

Print ISSN 2432-6674
Online ISSN 2432-7883

Bulletin of the NARO
Rural Engineering

農研機構研究報告

農村工学研究部門

No. 1
March, 2017
(平成29年3月)



農研機構は、みなさまと共に食と農の未来を創ります。

農研機構研究報告

農村工学研究部門

第1号

農村工学研究部門長	山	本	德	司
企画管理部長	白	谷	栄	作
企画管理部次長	杉	本	正	俊
技術移転部長	小	川	茂	男
農地基盤工学研究領域長	小	林	宏	康
施設工学研究領域長	増	川		晋
水利工学研究領域長	奥	島	修	二
地域資源工学研究領域長	増	本	隆	夫

編集委員会

編集委員長	白	谷	栄	作
委員	宮	本	輝	仁
〃	井	上	敬	資
〃	田	中	良	和
〃	福	田	浩	二
〃	濱	田	善	幸
事務局	濱	田	康	治
	林		水	紀

BULLETIN OF THE NARO, RURAL ENGINEERING

No. 1

YAMAMOTO Tokuji	Director-General, Institute for Rural Engineering, NARO (NIRE)
SHIRATANI Eisaku	Director, Department of Planning and General Administration
SUGIMOTO Masatoshi	Deputy Director, Department of Planning and General Administration
OGAWA Shigeo	Director, Department of Technology Transfer
KOBAYASHI Hiroyasu	Director, Division of Agricultural Environment Engineering
MASUKAWA Susumu	Director, Division of Facilities and Geotechnical Engineering
OKUSHIMA Shuji	Director, Division of Hydraulic Engineering
MASUMOTO Takao	Director, Division of Regional Resources Engineering

EDITORIAL BOARD

Chairman :	SHIRATANI Eisaku
Members :	MIYAMOTO Teruhito
	INOUE Keisuke
	TANAKA Yoshikazu
	FUKUDA Koji
	HAMADA Zenkou
Secretary :	HAMADA Koji
	HAYASHI Mizuki

農研機構研究報告

農村工学研究部門

第1号 2017年3月

目 次

技報編（旧：農村工学研究所技報）

- 直轄農地地すべり対策における概成判断及び斜面管理の事例と課題
..... 紺野 道昭 1
- 帯水層内の水質混合を抑止する単孔式二重揚水装置の作製と取水試験
..... 石田 聡・白旗 克志・土原 健雄・吉本 周平 11

[技術資料]

- 土地改良区を対象とした GIS 技術の受容に関する質的検討
..... 大塚 芳嵩・遠藤 和子・國光 洋二 21

報告編（旧：農村工学研究所報告）

- 農業用ポンプ設備への状態監視診断技術の適用に関する研究
..... 國枝 正 31
- 豪雨に対する谷池ならびに下流域の被災リスク低減に関する研究
..... 吉迫 宏 79
- 東南アジアにおける家畜ふん尿消化液の水田における液肥利用とそれに伴う環境影響
..... 折立 文子 135

BULLETIN OF THE NARO, RURAL ENGINEERING

No.1 March, 2017

Contents

TECHNICAL REPORT (formerly: Technical Report of the National Institute for Rural Engineering)	
KONNO Michiaki	
Challenges of Landslide Prevention Work Completion Methods and the Management after a Project Under Direct Control	1
ISHIDA Satoshi, SHIRAHATA Katsushi, TSUCHIHARA Takeo and YOSHIMOTO Shuhei	
A pumping test of single scavenger/production well system to prevent saltwater upconing	11
[technical data]	
OTSUKA Yoshitaka, ENDO Kazuko and KUNIMITSU Yoji	
Qualitative Investigation on the Process of Technology Acceptance of GIS by a Land Improvement District	21
BULLETIN (formerly: Bulletin of the National Institute for Rural Engineering)	
KUNIEDA Tadashi	
Application of Condition Monitoring and Diagnostic Technologies to Agricultural Pump Facilities	31
YOSHISAKO Hiroshi	
Disaster reduction technique for damage on the irrigation pond of valley type and the lower basin caused by heavy rain	79
ORITATE Fumiko	
Use of Digested Slurry from Livestock Manure in Paddy Fields and its Environmental Effect in Southeast Asia	135

技報編（旧：農村工学研究所技報）

直轄農地地すべり対策における概成判断及び斜面管理の事例と課題

紺野道昭*

*施設工学研究領域地域防災ユニット

要 旨

地すべり対策事業については、(1) 区域指定、(2) 基本計画策定、(3) 対策工事实施、(4) 概成（工事完了）、(5) 概成後の斜面権利の各段階のうち後半の(4)、(5)については明確な指針がなく個々の現場に判断が任されているのが実情である。本報では高知三波川帯地区を事例として、(4)と(5)における課題として以下の4点を取り上げ、対応の現状と今後の展望を示す。

第1に、地すべりブロックの把握が挙げられる。地すべりブロックは、地すべり対策における全ての段階において管理上の単位として扱われるため、正確な把握が求められる。調査方法は地形判読を主とするが、GPS、航空レーザ測量、干渉合成開口レーダー等の併用も考えられ、今後の精度向上や簡素化についても期待される。第2に、対策工施工後の地下水位の予測・評価が挙げられる。個別の現場で試行錯誤によっているのが現状であるため、水質分析等を用いた地下水流動機構の把握も含め、解析手法の適用性についてある程度の体系化が必要と考えられる。第3に、概成判断の基準が挙げられる。これらは個々の現場において経験等により個別に検討されることが多い。今後は、降雨量・地下水位・地すべり変位量相互の関係を定量的に把握することにより斜面が持つリスクを定量的に管理する手法についても検討すべきと考えられる。第4に、概成後の斜面管理が挙げられる。対策工工実施中に行われている地中変位を中心とした観測を全ての地すべり防止区域のブロックで常時行うのは、費用面等からも現実的に困難であるため、優先順位の設定、比較的簡易な観測方法の利用とともに、地すべり対策施設に着目した斜面管理も考えらえる。加えて、今後は個々の観測データ整理、個々の対策施設の機能点検にとどまらず、観測値と複数の対策工が組み合わせられた斜面全体のリスク評価方法についても手法の確立に向けた検討が必要と考えられる。

キーワード：安全率、概成、高知三波川帯

1. はじめに

昭和33年に地すべり等防止法が制定されて以降、地すべりが発生した場合及び発生するおそれがある場合は、以下のような流れで対策が行われてきた。

- (1) 地すべり防止区域指定
- (2) 基本計画の策定
- (3) 対策工事实施
- (4) 概成（工事完了）
- (5) 概成後の斜面管理

これらのうち(1)は国（農林水産省農村振興局及び林野庁並びに国土交通省）が行い、(2)から(5)は都道府県が行うこととなっている。(3)についても通常は都道府県が国の補助を得て行うが、地すべりが大規模で高度な技術や機械力を要する場合等は、国が代行できることになっている。

また、これらのうち農村振興局所管地すべりについては(1)から(3)までの考え方、事例、手続きの方法等については、農地地すべり研究会（1997）や農林水産省（2004）等により示されており、体系化が進んでいるところである。

その一方で、(4)の概成に向けての検討は、(3)の対

策工事の評価を踏まえて個別に行うことが多く、特に対策後も目標安全率を満たさない場合や地すべり変位が残存していた場合は、判断に苦慮する場合もある。また、通常は概成後も通常は地すべり防止区域として管理を継続し、再び地すべりが発生した場合等は再度対策工事ができるようになっている。しかし、対策工事を終えた地区も含めると農村振興局所管地すべり防止区域は全国で2,000地区弱にのぼり（農林水産省、2016）、対策事業とともに(5)の概成後の斜面管理を行う必要があり現場の負担は増大している。

本報は、農村振興局所管の地すべり対策の中から、特に(4)の概成判断と(5)の概成後の斜面管理について、地すべり対策工事が国直轄で行われた高知三波川帯地区（中国四国農政局高知三波川帯農地保全事業所、2012）を例に挙げながら、現状と今後の課題について整理するものである。

(4)の概成判断について、高知三波川帯地区では安定解析による「目標安全率」と、変位量による「概成基準」により行われた。なお、これらには本地区の独自基準も設定された。

これらのうち目標安全率は、安定解析により安全側の条件で現況安全率を求め、不足する安全率を得るために

必要な工種・数量を保全対象に応じて設定するものであるが、本地区に限らず最近では、対策工実施後の状態（地形、追加抑止力、地下水位等）を入力して再度安定解析を行い、目標安全率の達成度を評価する事例が増えてきている。しかしながら、当初計画していた目標安全率を達成できず、概成判断に苦慮する場合もある。

また、変位量による概成基準は、一般的には「地すべり変位が停止していること」とされているが、対策工実施後も若干の変位量が残存し、完全に停止させることが難しい場合もあり、そういった場合の概成判断の方法についても、個別地区の課題となっている。

(5)の概成後の地すべり斜面管理については、法令・通知等で観測方法や数量が具体的に指示されていることはなく、一般的には、対策工実施により地すべりが停止することを前提に、概成または個々の対策工の完成と同時に観測を終了することが多い。少ない事例ではあるものの、高知三波川地区においては国営事業の事後評価の参考とすることを目的として、概成後も一部の観測が継続されている。

以下、本報では第2章において(4)の概成判断のうちの「目標安全率」、第3章で「概成基準」、第4章で左記を踏まえた「概成判断の実際」について、第5章で(5)の「概成後の地すべり斜面管理」について述べる。

2. 目標安全率

2.1 安定解析の方法

本報で紹介する高知三波川帯地区の地すべり防止区域は、いずれも高知県大豊町に位置する中村大王上区域(1961年指定, 29.63ha)、桃原区域(1961年指定, 96.07ha)、西桃原区域(1978年指定, 34.70ha)である。なお、桃原区域と西桃原区域は隣接しており、本報では両区域をまとめて以後「桃原・西桃原区域」と記載する。

本地区における安定解析の方法は、農林水産省(2004)に示される標準スライス法(簡便法)が用いられた。この方法では、地すべりブロックの中央に設置した上下流方向の測線と地下のすべり面からなる2次元断面を複数のスライスに分けた上で、次に示す式(1)により抵抗力とすべり力の比、すなわち安全率 F_s を求める。

$$F_s = \frac{\sum \{c' \cdot l + (N - U) \tan \phi'\}}{\sum T} = \frac{\sum \{c' \cdot l + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot l) \tan \phi'\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

ここで、 c' : すべり面の粘着力 (kN/m^2)、 l : すべり面の長さ (m)、 N : すべり面上に働くスライス重量のすべり面に垂直な分力 (式) (kN/m)、 U : すべり面上での間隙水圧に起因する力 $U=u \cdot l$ (kN/m)、 ϕ' : すべり面の土の内部摩擦角 ($^\circ$) (有効応力表示)、 T : すべり面上に働くスライス重量の接線分力 $T=W \cdot \sin \alpha$ (kN/m)、 W : スライス

重量 (kN/m)、 u : スライスのすべり面上に働く間隙水圧 (kN/m^2)、 α : すべり面が水平方向に対してなす角 ($^\circ$) である。

ただし、高知三波川帯地区の場合は、幅が概ね200m以上の地すべりブロックについては2本~3本の測線を設置し、それぞれの受け持ち幅により重みを与えて計算する疑似三次元解析が実施された。

標準スライス法は、補助事業も含めて大部分の農地地すべり対策で用いられている解析方法であり、今後も多くの現場で用いられると考えられる。その一方で、特に大規模地すべりにおいては、より詳しく安全率を計算するために、一部の後発地区においては2次元測線上だけでなく地すべりブロックの3次元的な広がりも考慮したHovland法等も用いられていくこともあるものと考えられる。

2.2 地すべりブロックの把握

本報で取り扱う高知三波川帯地区は、高知県大豊町に位置する地すべり防止区域中村大王上区域(1961年指定 29.63ha)と、桃原区域(1961年指定 96.07ha)西桃原区域(1978年指定 34.70ha)からなる。

高知三波川帯地区における地すべり防止区域及び大規模地すべりブロックの範囲を、中村大王上区域について Fig. 1に、桃原・西桃原区域について Fig. 2に示す。図の外側の細かい線は地すべり防止区域の範囲、内側の太い実線、点線等は地すべりブロックの範囲と、そのように推定されていた年度を示している。

中村大王上区域では工事初期の大規模ブロックの形状が工事完了まで保持されているのに対して、桃原・西桃原区域においては大規模ブロックの把握に時間を要している。

桃原区域においても、Aブロックは工事当初の1999年

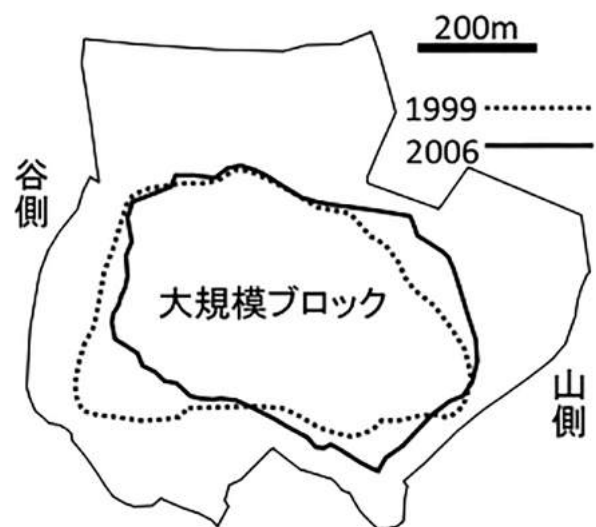


Fig. 1 地すべり防止区域及び大規模地すべりブロックの範囲 (中村大王上区域)

Landslide area and large landslide blocks (Nakamura daijōkami)

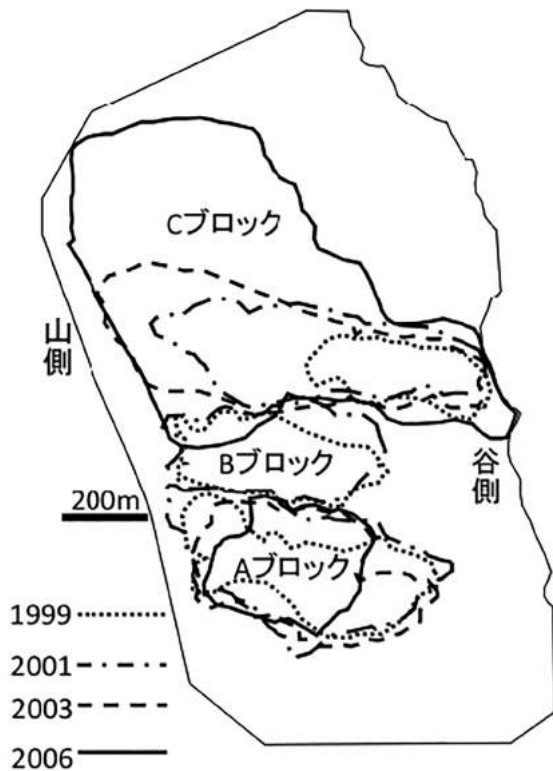


Fig. 2 地すべり防止区域及び大規模地すべりブロックの範囲
(桃原・西桃原区域)
Landslide area and large landslide blocks
(Momohara-Nishimomohara)

度からその形状は大きく変わっていない。一方、Bブロックは2003年度までの調査により大規模ブロックではなく小規模ブロックの集合体とされた。また、Cブロックでは2001年度まで、2003年度までと調査が進められるに従って、地すべりブロックが当初想定より広いことが明らかになり、2006年度までの調査で工事完了年度（2011年度）の範囲とほぼ同じとされた。

地すべりブロックの範囲は、安定解析と、それを元にした対策工配置計画や目標安全率達成状況評価の範囲そのものであり、正確に把握することが重要である。

一般的に地すべり対策においては、地形判読や地表踏査（地表の変状や崩積土の分布等）により地すべりブロックの範囲（平面形状と深さ）を想定し測線を設定した後に、調査ボーリングを掘削しパイプ歪み計や孔内傾斜計等により地中変位量を観測し確認している。このため、最初に想定する地すべりブロックの範囲が実際の変動範囲と異なっていた場合、地すべりブロックの把握のための調査に時間を要する場合がある。これを防ぐためには、正確な地形判読が求められることは言うまでもないが、現実的には技術者判断の余地が多い作業である。特に工事初期で情報が少ない中で、また、大規模・中小規模の複数の地すべり地形が複合的に存在している場合等に、地すべりブロック範囲の想定が極めて難しいこともある。できるだけ早い段階で、変位量観測値等の、地すべりブロック範囲の裏付けとなるデータの収集ができることが

望ましい。

地すべり対策の初期段階で地すべりブロックを把握するのに役立つと考えられる観測方法には、GPSによる観測、航空レーザ測量、干渉合成開口レーダーが挙げられる。

これらのうちGPSによる観測は農林水産省（2004）により地すべり移動量調査の1つとして位置づけられている。実際に、有澤ら（1998）は新潟県釜塚・段子刺地区の大規模地すべり地内で16点の測点（移動点）で年数回の観測を行い2～4cm/年程度の地すべり変位を捉えている。GPSにより連続観測を行い統計処理すれば1mm程度以上の突発変位または変位速度が0.1mm/日以上の変位を検出できる可能性が示されている（松田ら、2002）。中里ら（2007）は高知三波川帯地区で1cm/年程度の変位を捉えることができている。さらに最近では、中里ら（2009）により、山形県七五三掛地区で春先の雪解けにより発生した地すべりブロック及び周辺に3箇所のGPS連続観測施設を当該年の4月中に設置して観測開始し、地すべりの挙動を捉えている。これらのように、GPSによる複数の定点での定期または連続した変位量の取得は、地形だけで捉えにくい場合であっても現時点で変位している地すべりブロックの範囲を推定する手段の1つとして有効であると考えられる。加えて、地すべり発生時や地すべり変位が疑われる場合の速やかな観測態勢構築の手段として優れていると考えられる。

航空レーザ測量は、樹木や地物の影響を除去し地表面の情報を得る技術開発が進められており、地すべり地形判読の補助的手段として有用であるだけでなく、同一地点において複数回の測量を行えば、地すべり変位量と変位している範囲を捉えることができる可能性がある。例えば、向山（2010）は2時期の航空レーザ測量の画像を解析し、解像度数10cmのオーダーで地震前後の地形変化量を捉えている。また、下河ら（2013）は、台風前後の航空レーザ測量画像を解析し、斜面崩壊発生箇所の抽出を行っている。これらの事例は、高知三波川帯地区で見られている数mm/年よりもやや大きい変位量を扱っているものの、今後の測量精度向上、樹木等の地すべり以外の地形変化の影響除去手法の開発、画像解析手法の発達、測量期間を長く取る等の応用手段等により、慢性的に微小な変動を続ける大規模地すべりにおいても利用可能になると期待される。

干渉合成開口レーダー（SAR）については、地すべり地で解析が行われた事例がある。鈴木ら（2010）は、先に述べた2009年に山形県七五三掛地区で発生した地すべりについてSAR干渉解析を行い、さらに佐藤ら（2012）により解析が進められた結果、被害が発生した地すべりブロックに隣接する大規模地すべりブロック（地表の変状は少ない）の範囲においても経年的な変位の傾向を捉え、中里ら（2009）によるGPS観測と同様の傾向を示していた。大規模地すべりの変位の範囲を概ね把握する手法として、今後期待が持てると考えられる。なお、こ

これらの解析に用いたデータを取得した人工衛星「だいち」は2011年に運用を停止したが、現在は後継の「だいち2号」が運用されており、2014年11月からデータ配布が開始された(株式会社パスコ・一般財団法人リモートセンシング技術センター, 2014)。

2.3 地下水位の設定

地下水位は、2.1に示す式(1)の間隙水圧(u)のパラメータを決定するための参考とされる。実際の解析には便法としてボーリング孔(オープンピエゾメータ)や埋設型間隙水圧計の観測値をそのまま用いることが多いが、解析上の u は「すべり面」の間隙水圧であることに常に留意している必要がある。

現況地下水位は、原則として降雨観測期間の最高水位を用いるが、観測が短期間の場合には、豪雨時の異常水位を勘案して決めるとされている(農林水産省, 2004)。

高知三波川帯地区における工事実施期間中の最大日降雨は2004年8月1日で、中村大王地区で533mm、桃原地区で356mmであった。その後は毎年少雨傾向が続いていたが、工事完了年度の2011年度とその前年度に、2004年8月1日と同等な降雨量が観測されたため、これらの降雨により上昇した実測地下水位を豊水期の水位として安定解析が行われた。しかし、2009年度までは渇水年が続いていたため、対策後地下水位から実効雨量法によりモデルを作成し、2004年8月1日豪雨時に対策工がある場合の地下水位を推定して解析が行われていた。

高知三波川帯地区においては、大部分の対策工が完了した後の工事実施期間中に豪雨があったため、豪雨時の実測地下水位を用いた安定解析により対策効果を評価することができたが、対策工実施後に豪雨が観測できない場合、対策工実施後の斜面に豪雨があった場合の地下水位を推定して安定解析を行う必要が生じる。

実効雨量による地下水位の推定は、地すべり地も含めて一般的に広く行われている水文解析手法である。高知三波川帯地区を例とした事例には、海野ら(2008)による解析が挙げられ、これによると、先行降雨の有無によって実効雨量と地下水位の関係が異なることが指摘されている。また、紺野ら(2015)は山形県下の豪雪地帯地すべり地でタンクモデル、実効雨量等による地下水位の再現を試みたが、実効雨量の再現性はタンクモデルよりも劣るものとなった。これらの例に示されるように、地すべり地の降水量・パターンと地下水位の関係は、実効雨量等の単純な方法では良好な相関係数をもって推定できないことも多く、特に大規模地すべりにおいては、地下水の側方流動等も考慮した有限要素法や有限差分法を用いた2次元・3次元の浸透流解析が必要となる場合も生じるものと考えられる。

ただし、側方流動等を考慮した浸透流解析を行う際には、地すべりに影響を与えている地下水の流動範囲の推定や解析モデルの正しさの説明に苦慮することが考え

られる。このため、酸素・水素安定同位体比(土原ら, 2014a)や六フッ化硫黄(土原ら, 2014b)の分析等の調査を行い、地下水流動の範囲や速度を把握しておくことも重要と考えられる。

2.4 目標安全率の設定

高知三波川帯地区では、大規模ブロックの保全対象が河川であるほか、地区全体が集落となっており大部分のブロックに人家があるため、工事当初から目標安全率は原則として1.20に設定されていた。

しかし、工事が進められる中で、特に大規模ブロックにおいては、あくまでも安全率1.20を目標としつつも、それに最大限近づける対策を行うという考え方で目標安全率設定の再検討が進められ、2007年度までに以下のような「地区目標安全率(本報で用いる仮称)」として整理された。なお、渇水期及び豊水期両方の目標を達成するのが本工事の目標であった。

渇水期

条件1: 渇水期安全率 ≥ 1.20 で目標達成

条件2: 仮に対策前から地下水位を5m下げても安全率が1.20を下回る

条件3: 仮に地下水位をすべり面以下まで下げても安全率が1.20を下回る

条件4: 条件2または条件3を満たす場合は、渇水期安全率が対策前より5%向上すれば目標達成豊水期

条件5: 豊水期安全率 ≥ 1.00

3. 概成基準の設定

地すべり対策工事は一般的には地すべりの停止をもって概成と判断する。しかし、高知三波川帯地区では、地すべりが完全に停止しない場合や、追加対策工の実施が現実的に困難な場合が生じるおそれがあった。このため、2006年度から概成に向けた概成基準についての検討を開始し、穏やかな変位を許容しつつ、「豪雨時の急激な変位がなくなった状態を確認した上で概成とする」考え方に基づき、藤原(1994)により継続観測が必要と提案されている変動レベルCより小さいことを目安とし、以下の変位量が原則的な「地区概成基準(本報で用いる仮称)」が設定された。

年間変位量: 6mm未満

月間変位量: 2mm未満(2ヶ月連続しなければ可)

なお、藤原(1994)の提案は地表伸縮計による観測値を想定しているが、本地区では孔内傾斜計で観測される地中変位量により概成判断が行われた。

4. 概成判断の実際

第2章～3章で述べた地区目標安全率及び地区概成基準について、高知三波川帯地区での最終年度の達成状況を **Table 1** に示す。

検討が行われた2地区合わせて28の地すべりブロックのうち、地区目標安全率、地区概成基準ともに達成していたのは14ブロックであった。これに対して、地区概成基準は達成していたものの地区目標安全率未達成ブロックが10ブロック、地区目標安全率、地区概成基準ともに未達成となったブロックが4ブロックとなった。また、桃原・西桃原区域の大規模ブロック A-No.1, A-No.3, C-No.1 は、いずれも本地区で独自に設定された目標である条件4（対策後に対策前より5%向上）により目標安全率を達成したと判断されている。

高知三波川帯地区では、概成に向けて「目標安全率、概成基準の変位量については一律の基準を設定するのではなく、地すべりの規模や地域の実情等に応じて柔軟な概成判断をしても良いのではないか。」といった議論もなされ、工事完了年度である2011年度の最終的な概成判断においては、以下のような考え方が採られた。

Table 1 地区目標安全率及び地区概成基準達成状況
Achievement of safety functions and movement decreasing levels

○：達成 ×：未達成

地区	ブロック	地区目標安全率			地区概成基準	備考	
		条件					判断
		1	4	5			
中村大王上	No. 1	○	○	○	○	大規模ブロック	
	No. 2	○	×	×	○		
	No. 3	○	×	×	×	条件付概成	
	No. 4	○	○	○	○		
	No. 5	○	○	○	○		
	No. 6	○	○	○	○		
	No. 7	○	×	×	×	条件付概成	
	No. 8	○	○	○	○		
桃原・西桃原	A-No. 1	×	○	○	○	大規模ブロック	
	A-No. 2	○	○	○	○	大規模ブロック	
	A-No. 3	×	○	○	○	大規模ブロック	
	A-No. 4	×	○	○	○		
	A-No. 5	×	×	×	×		
	A-No. 6	×	×	×	×		
	A-No. 7	×	○	×	×		
	A-No. 8	○	×	×	×		
	B-No. 1	○	○	○	○		
	B-No. 2	×	※	○	×	※条件②③を満たさない	
	B-No. 3	×	※	○	×	※条件②③を満たさない	
	C-No. 1	×	○	○	○	大規模ブロック	
	C-No. 2	×	×	○	×	大規模ブロック 条件付概成	
	C-No. 3	×	※	○	×	※条件②③を満たさない	
	C-No. 4	×	※	○	×	※条件②③を満たさない	
	C-No. 5	×	○	○	○		
O-No. 1	○	○	○	○			
O-No. 2	×	×	○	×	条件付概成		
O-No. 3	○	○	○	○			
O-No. 4	×	×	×	○			

注：桃原・西桃原地区のブロック No の前の A～C の文字は、工事当初から想定されていた大規模ブロック名、O は当該ブロックの外にあるブロックである。

(1) 地区目標安全率が未達成

変位が地区概成基準（6mm/年, 2mm/月）未満で変位量の拡大傾向がないことを前提として、次の1)～5)等のことが単独あるいは複合的にあり、やむを得ず地区目標安全率を達成させることができない場合は「概成」とする。

- 1) 水抜きボーリング等からの排水があつて対策工の効果があると認められても、すべり面周辺地盤の水理地質構造の複雑さに起因し、すべり面に働く間隙水圧をデータとして取れない。
- 2) 生活・営農用水として利用する必要があるため、地区目標安全率に達するまで地下水位を下げるができない。
- 3) 現実的に可能な対策工が実施済み、または、地下水位が元々低いブロック、地下水面の勾配が急なブロックで、追加対策を実施しても安全率の上昇が見込めない。
- 4) ブロック内に保全施設（道路、家屋など）がなく追加対策の必要性が低い。
- 5) その他地域の事情により追加対策が難しい。

(2) 地区概成基準が未達成

年間変位6～24mmの変動レベルC（谷口ら, 1999）であり、変位量の拡大傾向がないことを前提として、次の1)～3)等のことが単独あるいは複合的にあり、やむを得ず地区概成基準（変位6mm/年, 2mm/月未満）を達成できない場合は、概成後も観測を継続する「条件付き概成」とする。

- 1) 考えられる必要な対策が実施済み。
- 2) ブロック内に保全施設（道路、家屋など）がない。
- 3) その他地域の事情により追加対策が難しい。

上記のような検討の結果、概ね概成は可能と判断され工事全体は完了することとされた。ただし、**Table 2** に示す中村大王上区域 No.3, No.7, 桃原・西桃原区域 C-No.2, O-No.2 ブロックについては条件付き概成とし、概成後も観測を継続することとされた。

高知三波川帯地区に限らず、地すべり対策においては、対策工事により目標安全率に達し地すべり変位も完全に停止するのが理想であるが、現場においては地下水位低下量が当初想定よりも少なかったり、変位が残存する場合があります。その後の対策の進め方について判断を迫られる場合も多い。例えば、広島県下の農村振興局所管直轄工事神石高原地区では、月間変位量0.5mmの概成基準を設け、地表面の変状（被害）や変位の累積傾向と合わせて概成判断を行い、一部の地すべりブロックにおいては概成後も観測を継続することとされた（田中ら, 2006）。また、新潟県下の国土交通省所管直轄工事赤崎地区では、年間変位量10mm以下を地すべり防止工事完了の判定基準としている（北陸地方整備局, 2011）。学会やWeb等に公表されていないものも含めて、個別地区の特徴を踏まえた考え方により概成判断を行うことが多いのが現状である。

地すべりブロックは個別地区ごとに規模や保全対象等が異なるため、概成判断の統一的な基準を整備するのは難しいと考えられる。しかし、対策後も想定より地下水位が高いことや変位量が残存していることを許容して概成した地すべりブロックについては、これまでの経験則による危険度評価に加えて、地すべり変位量と地下水位の関係を整理して、その斜面が持っている地すべり発生の数値的なりリスクを把握し、概成後に引き継ぐ必要があると考えられる。例えば、土江ら(2006)は高知県下の農村振興局所管高瀬地区で地すべり変位量を地下水位指数回帰式で再現し、また、本報2.3章で述べたように海野ら(2008)は高知三波川帯地区で降雨量と地下水位の関係を実効雨量で再現している。計算の手法については当面は個別地区で検討しなければならないと思うものの、このような既存の知見も生かしながら降雨量・地下水位・地すべり変位量相互の関係を定量的に把握し、わかりやすくとりまとめておくことが重要であると考えられる。このことにより、地すべり変位量が概成判断時に許容した範囲なのか、それを越えた新たな滑動の兆候なのかの見極めが可能となり、将来的には、超過確率降雨や気候変動をも考慮した斜面のリスク管理についても検討がなされると考えられる。

5. 概成後の地すべり斜面管理

5.1 観測計画

高知三波川帯地区では、概成より概ね5年を経過した後に行われる評価時点において地すべり対策工事の効果の発現状況を可能な限り定量的に評価するため、完了後も継続的な観測を行うこととされた。

観測地点は、最終年度の2011年度時点で実施していた孔内傾斜計による移動量観測83箇所、自記地下水位計等による地下水位観測152箇所全てではなく、以下の観点から概成後の観測を行う箇所が絞り込まれた。

(1) 観測対象ブロック

- 1) 大規模地すべり対策の対象ブロック
- 2) 排水トンネルの効果を期待した地すべりブロック
- 3) 継続観測を実施することを条件に概成とした地すべりブロック
- 4) 地すべり対策施設の機能評価

(2) 変位量観測の位置

- 1) 主測線またはブロックを代表する位置である。
- 2) 表層地すべりは除外する。
- 3) 座屈、変形していない孔とする。

(3) 地下水位観測の位置

- 1) 主測線またはブロックを代表する位置である。
- 2) 排水トンネル等の効果が認められるもの。
- 3) 降雨応答の認められる孔とする。

このような観点から絞り込まれた観測計画を **Table 2** に示す。

Table 2 概成後観測計画
Observation plan after the working project

地区	ブロック	観測項目・数量			備考
		地中変位量	地下水位	その他	
中村大王上	No. 1	1	2	トンネル排水量 トンネル内変状	大規模ブロック
	No. 3	1	1		条件付概成
	No. 7	2	2	荷重計	条件付概成
桃原・西桃原	A-No. 1	1	1		大規模ブロック
	A-No. 2				
	A-No. 3	1	1		大規模ブロック
	C-No. 1	1	4	トンネル排水量 トンネル内変状	大規模ブロック
	C-No. 2	2	1		大規模ブロック 条件付概成
	O-No. 2	1	1		条件付概成

原則として、観測対象ブロックに地中変位量観測、地下水位観測1箇所以上とされた。これらの他に、排水トンネル工を施工したブロックにおいては、トンネル内の変状の目視確認及び湧水量観測を行うこととされた。また、中村大王上区域No.7ブロックでは、地すべりが完全に停止しなかったため、対策施設保全の観点から、施工したアンカー工の1本に荷重計(ロードセル)が設置された。

5.2 観測状況

観測計画にあった地中変位量の2015年度2月までの観測状況(中国四国農政局資料による)を **Table 3** に示す。

Table 3 2014年度の地中変位量観測状況
Conditions of underground movement in 2014

地区	ブロック	観測状況	備考
中村大王上	No. 1	挿入型：観測可	大規模ブロック
	No. 3	挿入型：観測可	条件付概成
	No. 7	挿入型：2014年2月挿入不能 挿入型：2014年2月挿入不能	条件付概成
桃原・西桃原	A-No. 1	挿入型：2014年8月で観測取りやめ	大規模ブロック
	A-No. 2		
	A-No. 3	挿入型：観測可	大規模ブロック
	C-No. 1	埋設型：2014年8月に断線確認	大規模ブロック
	C-No. 2	埋設型：2014年8月に断線確認	大規模ブロック 条件付概成
		埋設型：観測可だが、座屈による異常値の疑い	
O-No. 2	挿入型：観測可	条件付概成	

以上のように、当初10基あった孔内傾斜計のうち、2014年度時点で観測できていたのは挿入型の4基であった。中村大王上区域No.7に設置していた2基は2014年2月に孔内傾斜計が挿入不能となり、桃原・西桃原区域A-No.1, No.2ブロックでは地すべり性の変位が観測されていないと評価されたため、観測を取りやめられた。また、桃原・西桃原区域Cブロックに設置した埋設型の孔内傾斜計は、うち2本で2014年8月に断線が確認され、もう1本については、従前から孔内での引っ掛かりが発生しており、変位が地すべりか座屈の影響か不明な状態と評価された。

概成後観測対象ブロックの変位量を **Table 4** に示す。

Table 4 年間地中変位量
Underground movement every year

C	ブロック	年度			備考
		2011~2012 (年平均)	2013	2014	
中村大王上	No. 1	0.43	0.44	0.57	大規模ブロック
	No. 3	5.78	2.93	6.36	条件付概成
	No. 7	4.69	5.07	不明	条件付概成
3.21		2.45	不明		
桃原・西桃原	A-No. 1	不明	不明	不明	大規模ブロック
	A-No. 2	不明	不明	不明	
	A-No. 3	0.54	0.63	0.59	大規模ブロック
	C-No. 1	不明	不明	不明	大規模ブロック
	C-No. 2	不明	不明	不明	大規模ブロック 条件付概成
	O-No. 2	4.05	5.34	11.70	条件付概成

変位量を観測できている大規模ブロックである中村大王上 No.1, 桃原・西桃原 A-No.3 については、変位量が増加する傾向は見られなかった。また、条件付概成とした中村大王上 No.3 については、毎年概成基準（年間 6mm）程度であった。桃原・西桃原地区 O-No.2 では 2013 年度まで概成基準程度の変位量であったが、2014 年度は 11.70mm と、やや大きい値を示したが、概成時に決定した条件付概成基準の年間変位 6～24mm の変動レベル C（藤原，1994）の範囲内であった。また、桃原・西桃原区域 A-No.1, A-No.2, C-No.1, C-No.2 ブロックでは、観測の可否にかかわらず概成後観測当初から地すべり性変位が観測できていないと評価されており、変位量は不明である。

その他、地下水位の急激な上昇、トンネル内の大きな変位もなく、荷重計の値も設計アンカー力の範囲内にあった。

高知三波川帯地区においては若干の変位量が残存したことに加えて国営事業の再評価に利用する目的も含め、概成後も一部の観測孔で観測を継続した。しかし、概成後の地すべり変位量等継続観測は一般的には想定されていない。また、農村振興局所管地すべり防止区域は全国で約 2 千地区、高知県だけでも 55 地区あり、高知三波川帯地区で用いたような孔内傾斜計や自記地下水位計を設置・維持しての観測を全ての地区で行うのは費用面や人員の面で現実的ではないと考えられる。

多数の地すべり斜面を管理する上で、注意すべき変位や変位量、また、それらを現実的に把握できる手法の開発が必要と考えられる。今後期待できる観測方法に、2.1 章で挙げた GPS による観測、航空レーザ測量、干渉合成開口レーダーが挙げられる。また、紺野・伊藤（2008）は写真測量による管理を検討している。これらの手法は現状においては、受信機の設置、測量業務の発注、人工衛星データ購入等が必要なこともあり、工事実施中の地区以外でも広く用いられているとまでは言えず、減に発生している災害の状況把握が主となっている。しかし、今後実績が増えるとともに手法の簡素化、データや測定

機器の普及状況によっては、今後の地すべりのスクリーニング・モニタリング技術として有効と考えられる。また、現時点で具体的な地区を挙げるには至らないものの、4 章後半で述べたように、降水量・地下水位・地すべり変位量の 3 つが把握できている地区であれば、地すべりモニタリングや気象データから、当該斜面が持っているリスクやその変化を予測することができると考えられる。

もう 1 つの斜面管理の方法として、地方行政や住民らによる監視や保全が挙げられ、地すべり監視員制度等の行政から支援を受けた住民による活動も含まれる。斜面全体の地すべり災害の予防・軽減に関しては、農林水産省農村振興局農村環境課（2008）により、地名、過去の災害記録、地形・植生などの地すべり地の特徴の見方や地すべり発生の前兆現象の把握等について地域住民向けの冊子が公表されている。また、概成後の地すべり防止区域内に設置されている対策施設の機能保全の方法については、農林水産省農村振興局農村環境課（2013）、農林水産省農村振興局農村環境課（2015）により主な工種（水抜きボーリング孔、集水井工、承水路工、アンカー工）を対象に公表されている。これらには、コンサルティングを含む専門的な機能診断の方法とともに、地方行政（依頼等を受けた地域住民を含む）が行うべき日常管理も提案されている。このような地すべり対策施設の機能や変位を監視することは、地すべり斜面全体の変位把握にも役立つと考えられる。

今後の地すべり斜面の管理を行っていくためには、できるだけ簡易かつ十分な地すべり観測方法の確立すること、概成後であっても地すべり対策施設の管理を進めていくことが重要と考えられる。加えて、今後は個々の観測データ整理、対策施設の機能点検にとどまらず、観測値と複数の対策工が組み合わせられた斜面全体のリスク評価方法についても手法の確立に向けた検討が必要と考えられる。

6. 今後に向けて

本報は、高知三波川帯地区を例に、工事実施中の概成判断、概成後の斜面管理に着目して、これまでの実績をとりまとめるとともに今後の課題について整理したものである。第 5 章までに述べた主な課題について以下にまとめる。

6.1 地すべりブロックの把握（2.2 章）

地すべり対策における全ての段階において、斜面管理は地すべりブロックを単位として行われる。具体的には、地形判読により地すべりブロックの範囲を想定した上で、測線を設定し調査ボーリング、地中変位量観測等を行うことになる。このため、地すべりブロックが最初の想定と異なる場合、調査に時間を要することがある。

一義的には正確な地形判読が最も重要であることは言

うまでもないが、技術者判断の余地があり、特に大規模・中小規模の複合的な地すべりの場合、対策対象ブロックの見極めが難しい面がある。このため、地すべり対策の初期段階で地すべりブロックの把握に利用できる観測方法として、GPSによる観測、航空レーザ測量、干渉合成開口レーダーが挙げられ、今後の手法の精度向上や簡素化等についても期待される。

6.2 地下水位の設定 (2.3章)

対策工事施工後に豪雨があった場合は、対策効果を直接確認することができるが、そうでない場合は、対策工がある状態での豪雨時の地下水位を予測し、対策工の効果を評価する必要がある。手法としては、実効雨量、タンクモデル等の概念モデルに加えて、2次元・3次元の浸透流解析等の方法があるが、個別の現場で試行錯誤によっているのが現状である。技術的に難しい面もあると思われるものの、解析手法の適用性についてある程度の体系化が必要と考えられる。また、地下水水質等の実測により、地下水流動機構を把握しておくことも重要と考えられる。最近行われている手法として、酸素・水素安定同位体比や六フッ化硫黄の分析等が挙げられる。

6.3 概成判断 (2.4章, 3章, 4章)

地すべり対策においては、当初定められた目標安全率に至らない場合や、対策工施工後にも若干の変位が残る場合がある。このような場合、個々の現場において個別に概成基準が検討されることが多いが、その根拠は経験則や観測・監視等の結果を基に便宜的に決定されているものであるため、あくまでも当面の管理基準として扱うべきものが多い。今後、降雨量・地下水位・地すべり変位量相互の関係を定量的に把握することにより、概成判断を行う、或いは概成後であっても、斜面が持つリスクを定量的に管理する手法についても検討すべきと考えられる。

6.4 概成後の地すべり観測 (5章)

地すべり対策においては、概成後も防止区域内で本来は変位量を把握すべきではあるが、対策工事実施中に行われている地中変位を中心とした観測を全ての地すべり防止区域で常時行うのは、費用面等からも現実的に困難である。優先順位の検討が必要となる。

観測方法については、5.1に挙げた比較的簡易な方法が考えられる。また、地すべり対策施設に着目した斜面管理も考えられる。加えて、今後は個々の観測データの評価、個々の対策施設の機能点検にとどまらず、観測値と複数の対策工が組み合わされた斜面全体のリスク評価方法についても手法の確立に向けた検討が必要と考えられる。

謝辞：5章で取り扱った概成後の地すべり観測データは、中国四国農政局から提供を受けたものである。本報執筆へのご協力について、深く感謝します。

引用文献

- 有澤英樹・小林郁雄・大石哲 (1998)：巨大地すべりにおけるGPS測量の効果と課題，第37回地すべり学会研究発表講演集，289-292.
- 中国四国農政局高知三波川帯農地保全事業所 (2012)：高知三波川帯地区技術誌，500p.
- 北陸地方整備局 (2011)：地すべり対策事業の事後評価資料 (阿賀野川水系赤崎地区地すべり対策事業)，http://www.hrr.mlit.go.jp/johokokai/hyouka/hyouka01/h23/h23_5/5.pdf (閲覧日：2015年10月29日)
- 藤原明敏 (1994)：地すべり調査と解析，理工図書，222p.
- 紺野昭浩・伊藤裕 (2008)：地すべり防止区域における観測管理体制の簡素化，農業農村工学会誌，76(12)，1114-1115，a3.
- 紺野道昭・森一司・藤原賢・大塚文哉・日野友則 (2015)：タンクモデル法，実効雨量法，重回帰分析法を用いた山形県下の豪雪地帯地すべり地における地下水位再現解析，第54回日本地すべり学会研究発表会講演集，157-158.
- 松田浩朗・安立寛・西村好恵・清水剛一 (2002)：GPSによる斜面変位計測結果の平滑化処理法と変位挙動予測手法の実用性の検証，土木学会論文集，715，333-343.
- 向山栄 (2010)：航空レーザ計測による地形の高精度判読，地盤工学会誌，58(8)，6-9.
- 中里裕臣 (2002)：農業土木におけるGPS利用技術(その4)：GPSを用いた地すべり調査，農業土木学会誌，70(1)，47-53.
- 中里裕臣・井上敬資・阿部栄一・高木圭介・増成友宏・武地美明 (2008)：GPSによる地すべり移動量観測における留意点，日本地すべり学会誌，44(6)，393-399.
- 中里裕臣・木下勝義・井上敬資・奥山武彦・須貝俊彦・八木浩司 (2009)：2009年2月25日以降の山形県鶴岡市七五三掛地すべりの再活動と移動状況の特徴 (速報)，地学雑誌，118(3)，587-594.
- 農地地すべり研究会 (1997)：農地すべり対策事業便覧1997年版，第2版，農業農村整備情報総合センター，655p.
- 農林水産省 (2004)：土地改良事業計画設計基準「農地地すべり防止対策」基準書・技術書，372p.
- 農林水産省 (2016)：農村振興局所管地すべり防止区域 集計表(平成28年6月20日現在)，http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/pdf/areas_shitei_noushin_160620.pdf (閲覧日：2016年12月8日)
- 農林水産省農村振興局農村環境課 (2008)：地すべり災害を予防・保全するための活動の手引き—住民の皆さんができる地すべり対策—，http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/pdf/yobou_tebiki.pdf (閲覧日：2016年9月6日)
- 農林水産省農村振興局農村環境課 (2013)：地すべり防止施設の機能保全の手引き～抑制工編～，http://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/pdf/tebiki_all.pdf (閲覧日：2015年11月4日)
- 農林水産省農村振興局農村環境課 (2015)：地すべり防止施設の機能保全の手引き～アンカー工編～，<http://www.maff.go.jp/j/>

- nousin/noukan/tyotei/t_zisuberi/pdf/tebiki_2all.pdf (閲 覧 日 : 2015 年 11 月 4 日)
- パスコ・一般財団法人リモートセンシング技術センター (2014) : 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2) データ等の配布開始について, http://alos-2-restec.jp/_public/alos-2_pr_20141125.pdf(閲覧日:2015年11月4日)
- 佐藤浩・岡谷隆基・小荒井衛・鈴木啓・飛田幹男・矢来博司・関口辰夫 (2012) : SAR 干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について - 山形県月山周辺を事例にして -, 日本地すべり学会誌, **49** (2), 61-67.
- 下河敏彦・稲垣秀輝・千田良道・松田匡司・鈴木浩二 (2013) : 航空レーザ測定の DSM で抽出された地すべり危険斜面の現地検証, 日本地すべり学会誌, **50** (4), 176-182.
- 鈴木啓・雨貝知美・森下遊・佐藤浩・小荒井衛・関口辰夫 (2010) : 山形県月山周辺における SAR 干渉画像を用いた地すべりの検出, 国土地理院時報, **120**, 1-7.
- 田中研一・馬屋原亨・福留正昭・永田聡 (2006) : 地すべり対策事業地区の概成評価方法について, 農業土木学会誌, **74** (1), 27-30, a3.
- 土江博・河相泰信 (2006) : 高瀬地区の観測システムについて, 第 61 回農土木学会中国四国支部講演会講演要旨集, 139-141.
- 土原健雄・奥山武彦・吉本周平・白旗克志・石田聡 (2014a) : 水素・酸素安定同位体比の高度効果からみた地すべり地の地下水涵養源の検討, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 630-631.
- 土原健雄・奥山武彦・吉本周平・白旗克志・石田聡 (2014b) : 六フッ化硫黄を指標とした山形県七五三掛地すべり地における地下水の年代推定, 農業農村工学会論文集, **82** (6), 413-422.
- 海野寿康・中里裕臣・井上敬資・高木圭介 (2008) : 破碎帯地すべり地区における地下水位計測と実効雨量に基づく地下水位の降雨応答特性, 日本地すべり学会誌, **45** (3), 219-226.

受理年月日 平成 27 年 11 月 9 日

Challenges of Landslide Prevention Work Completion Methods and the Management after a Project Under Direct Control

KONNO Michiaki*

*Disaster Prevention Unit, Division of Facilities and Geotechnical Engineering

Abstract

Landslide prevention projects are used at five stages: (1) designation of landslide prevention areas, (2) formulation of master plans, (3) construction of landslide prevention works, (4) completion of projects, and (5) post-project management. However, (4) and (5) have no universal standards. Local rules are used for individual areas. For these stages of (4) and (5), this paper presents four points as difficulties for the Kochi Sanbagawa belt area. Its current state and expected outcomes were assessed.

First, landslide blocks were identified. Correct evaluation and identification are necessary for a landslide block to be processed as a unit during management. Topographical analysis is the main method used today. However, results from GPS, aerial laser measurements, SAR interferometry, and other methods are also considered. Furthermore, more accurate and simplified investigation methods are anticipated. Second, evaluation and prediction of groundwater conditions must be done after building construction. Systematization of a certain degree is necessary for application of an analytical method, including the identification of subterranean stream networks using water quality analyses. Current methods rely on trial and error at individual sites. Third, judgment of a standard of the completion (Gaisei) is necessary. Such standards are often produced separately at different sites based on an empirical rule, but many contents must be handled as present criteria of control. The techniques to manage slope risk by assessing rainfall and groundwater effects on the amount of displacement of a landslide must also be considered. Fourth, slope management must be done after project completion. Different ideas must be examined in order of priority, with slope management emphasizing landslide measurement facilities and simple observation methods. Realistically, it is costly to maintain observations of ground displacement throughout a landslide prevention area during implementation of countermeasure work. Future methods are expected to provide continuous observations and function indicators at each measurement facility. Moreover, a risk evaluation method must be developed for a whole slope with multiple measurement devices and observation methods.

Key words: *Safety factor, Standard of the completion (Gaisei), Kochi Sanbagawa*

帯水層内の水質混合を抑止する 単孔式二重揚水装置の作製と取水試験

石田 聡* 白旗克志* 土原健雄* 吉本周平**

*地域資源工学研究領域地下水資源ユニット

**国際水管理研究所 (スリランカ)

要 旨

1本の井戸の任意の深度を空気パッカーで遮断し、パッカーの上下2深度から同時に揚水することで帯水層内の水質混合を抑止する単孔式二重揚水装置を作製した。この装置を用い、農村工学研究部門内の井戸の地下水水面下2mにパッカーを設置して取水試験を行い、揚水中の水位、EC、pH、水温、DO、ORPをパッカー上段・下段それぞれについて測定した。その結果、揚水強度2L/minではパッカー上段の水位は時間とともに低下した。これに対しパッカー下段の水位は殆ど変化せず、上段の水位変化の影響を受けなかった。また、揚水前のパッカー上段の地下水とパッカー下段の地下水にはEC、pH、DO、ORPそれぞれについて差があったが、取水試験中もその差が保たれ、両者が同じ値に近づくことはなかった。これらの結果より、作製した装置により2深度の地下水を混合させずに別々に揚水できることが示された。

キーワード：二重揚水、パッカー、アップコーニング、塩淡境界、淡水レンズ、地下水

1. 緒 言

沿岸域の不圧地下水は、海水を含む帯水層の上部に、密度差によって淡水域が存在し、塩淡境界が形成されている。このような地域に設置された井戸から揚水すると、井戸周辺の圧力が低下するため、帯水層下部から井戸に向かって塩水が遡上し（アップコーニング、Fig.1右）、単位時間あたりの揚水量（揚水強度）が過大であるとやがて井戸が使用不能となる（Presley, 2005）。帯水層の淡水域が一度塩水で汚染されると、揚水を停止して淡水の圧力を回復させても、粒子間の微小間隙に塩水が残留したり、塩水が浸入する水みちが形成されたりすることから地下水環境の復元は困難となる場合が多い（石田ら、2010など）。

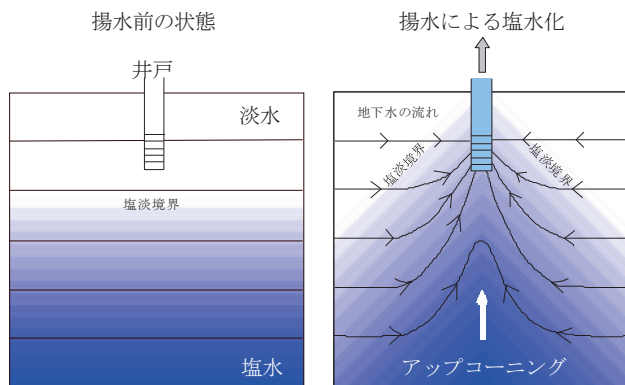


Fig.1 アップコーニング概念図
Conceptual figure of upconing

また、アップコーニングの度合いが小さくても、揚水により塩淡境界が上昇すれば、塩水と淡水の混合域（汽水域）の塩分濃度も上昇する。人間が一般的に利用できる淡水の塩分濃度は電気伝導度2mS/m以下（白旗ら、2009）であり、僅かな塩分濃度の上昇でも水資源として不適になる。このため塩淡境界を持つ帯水層においては揚水強度が制限される。

一方で、帯水層に水質の異なる地下水が存在する場合、それぞれの深度から同時に揚水する、二重揚水と呼ばれる揚水手法がある（Fig.2左）。この手法は、水質の良い地下水と同時に、水質の良くない地下水も揚水するため、これを廃棄する手段が必要であるが、それぞれの水質領域の間に圧力差を発生させないので、両者の混合を抑止することができる。この考え方は古くからあり、例えばZack and Candelario (1983)は、プエルトリコの沿岸域において、近接する一対の井戸の一方の取水口（ストレーナ）を淡水域、他方のストレーナを塩水域に設置し、それぞれ取水することで水質混合を抑止し淡水と塩水を分離して揚水できることを現地試験によって示している。

しかしこれまでの研究は、塩水域と淡水域にそれぞれ専用の揚水井戸を設けるもので、塩水の揚水深度と淡水の揚水深度は固定されていた。しかし沿岸域の地下水位は潮位によって変化し、塩淡境界深度も変化する。特に石灰岩からなる小島嶼は透水性が良好であり、島の規模が小さく海岸からの距離が短いとこの傾向は顕著である。揚水に2本の井戸を用いる場合、塩淡境界の移動に合わせて取水深度を変化させることは難しい（石田ら、2014）。

本研究では1本の井戸の塩水域と淡水域の境界部に止水性のパッカーによる仕切りを設け、井戸内の地下水流を遮断することで、塩水域と淡水域からの同時揚水を実現するとともに、パッカーの位置や長さを調節することで、塩淡境界深度の変化にも対応する揚水手法を考案し(Fig.2右, 特許出願中), 揚水装置を作製し, 取水試験によって手法の有効性について検討した。

2. 研究手法

2.1 揚水装置

本研究で作製する揚水装置が満たすべき条件については次のとおりとした。

- ①特定の深度のみから揚水することが可能なこと
- ②塩淡境界の移動に合わせて取水深度を変えられること
- ③揚水中の地下水圧を測定できること
- ④揚水強度を調整できること

この条件に基づいて作製した揚水装置の模式図, 系統図, 主な使用機材を Fig.3 に示す。

遮断部は長さ1mのゴム製の空気パッカーとした。パッカーは空気を抜いた状態で井戸内に挿入し, エアホースによって接続された地上のエアポンプによって膨張させ, 井戸内を止水する。

パッカー上下にはそれぞれDC12V駆動の水中モーターポンプが設置され, 地下水を揚水する。パッカー端部から水中モーターポンプ取水口までの距離は, パッカー上下ともに0.5mである。それぞれの揚水チューブ末端には流量計が接続され, 瞬時流量と積算流量を測定する。揚水強度はポンプの電源電圧を可変インバータ(電源AC100V)によって変化させることによって調整される。

パッカー上下にはまた, それぞれ水圧・電気伝導度(EC)・

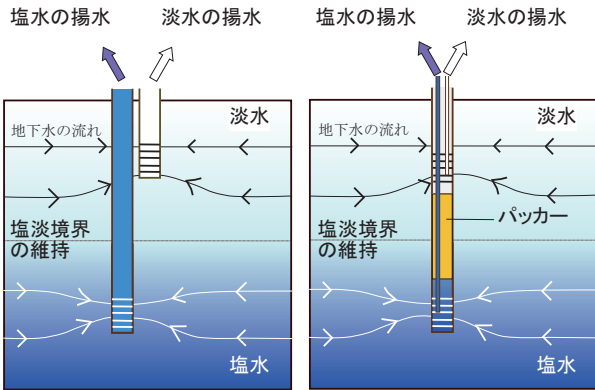


Fig.2 二重揚水手法(左:2孔式, 右:単孔式)
Scavenger/production well coupling

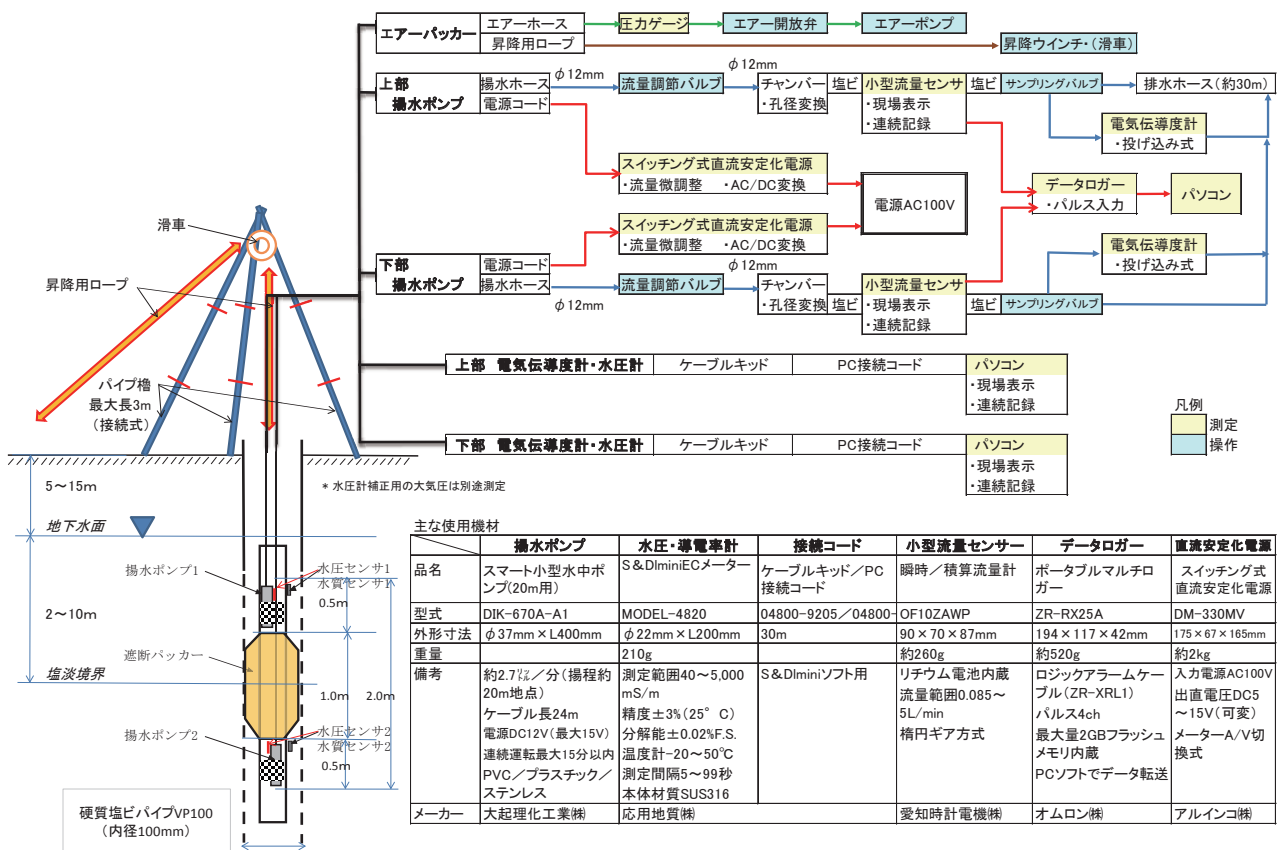


Fig.3 揚水装置の模式図, 系統図, 主な使用機材
Structure of pumping device

水温センサーが接続され、揚水中のデータが指定した時間間隔ごとに記録されるとともに、接続ケーブルを介して地上のパソコンでリアルタイムに確認することができる。パッカー、ポンプ、センサー、保護管等を含めた揚水装置の全長は約 3m、外径は約 73mm である。

本研究ではパッカーのゴムチューブを空気で膨らませて止水しているため、井戸の内側は滑らかな材質である必要がある。本研究で作製したような装置は一般的な管井に応用が可能であり、その口径範囲は 100 ~ 400mm 程度と考えられる。また塩淡境界深度は既知であるか、井戸中の地下水の EC を深度毎に測定することによって特定できることを想定している。

2.2 試験地概要

取水試験の実施場所は茨城県つくば市の洪積台地に位置する農村工学研究部門の敷地内に設置されたオールストレーナ井戸である。井戸の内径は 100mm であり、保孔管の材質は硬質塩化ビニル管 (VP-100) である。また、試験に使用した井戸は設置後 20 年以上が経過している。

地質は上位より表土 (層厚 0.9m)、ローム (層厚 2.6m)、凝灰質シルト (層厚 2.0m)、第四紀更新世の砂質土である (Fig.4)。砂質土には一部シルトが挟在するが、このシルトは被圧層とはなっていない。

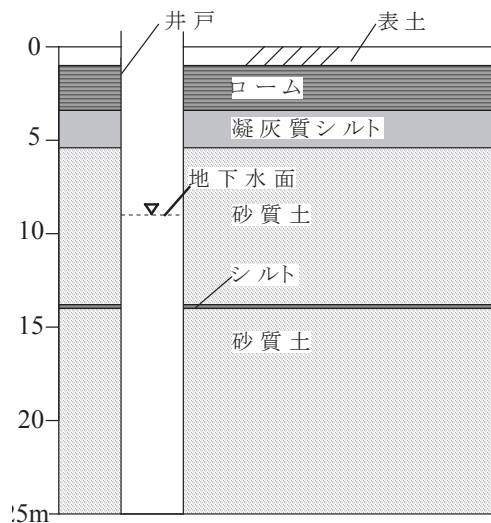


Fig.4 井戸周囲の地質断面図
Geological section around observation well

本試験地の地下水水面は砂質土中にあるが、ローム層および凝灰質シルト層内にはより浅い地下水 (宙水) 面が存在している。井戸内に浸出した宙水は保孔管を伝って砂質土内の地下水水面に流下している。このため、井戸内をパッカーで遮断するとパッカー上部に宙水が溜まり、水位が上昇する。宙水と砂質土内の地下水は EC などの水質に差があるので、パッカー上部 (以下上段と呼ぶ) とパッカー下部 (以下下段と呼ぶ) の水質にも差が生じる。本研究ではこの水質の差を利用し、上段の水質を淡水に、

下段の水質を塩水に見立て、取水試験中の水質の変化によって、本揚水手法の有効性を検討した。

2.3 取水試験

取水試験は 2013 年 12 月 6 日に行われた。Fig.5 に作製した揚水装置と試験時に井戸に挿入する様子および試験状況を示す。

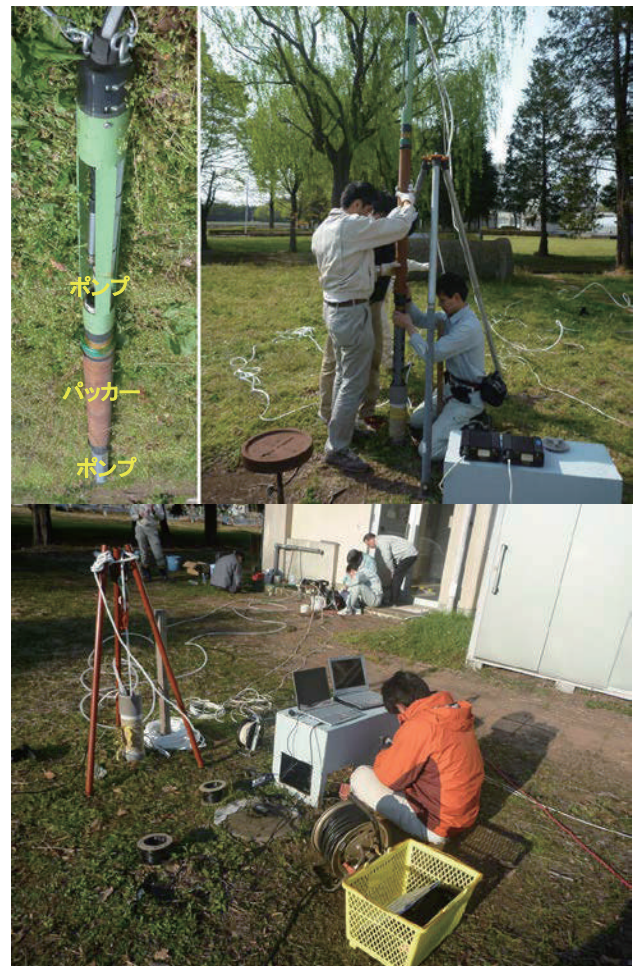


Fig.5 作製した揚水装置 (上左)、井戸に挿入する様子 (上右)、試験状況 (下)

Experimental device, insertion in well, scenery of pumping test

試験前の地下水水位は概ね GL-8.4m であった。パッカー設置深度はパッカー中心を GL-10.4m (地下水水面下 2m) とした。パッカー長は 1m であるため、上段の地下水深は挿入直後 1.5m となる。パッカー設置深度をこのように設定したのは、ポンプ上端の水深を 1m 確保するためである。パッカー設置後、宙水の影響による、上段の水位上昇を待った。その後、上段および下段より、2L/min の揚水強度で 15 分間揚水を行い、その後 1L/min の強度で 45 分間揚水を行った。揚水強度の調整は流量計に表示される瞬時流量を目視で確認しながら、ポンプ電源の電圧を変化させることで行った。揚水中は上段・下段の水圧をそれぞれ自計で 5 秒毎に測定した。また、上段・下段それぞれから揚水された地下水について、EC, pH, 水温, 溶存酸素 (DO), 酸化還元電位 (ORP) の測定を 10 分毎

に行った。EC, pH, 水温の測定は TOA-DKK 社製 WM-32EP, DO は HACH 社製 HQ30d, ORP は TOA-DKK 社製 RM-30P をそれぞれ使用した。揚水した地下水は前記した水質測定後、再度地下浸透しないように所内の排水口に導水した。

また、上段と下段が独立して揚水されていることを確認するため、上段のみ、および下段のみの取水試験も行い、揚水中の水圧を自記計で測定した。上段のみの揚水では 2L/min の揚水強度で 18 分間揚水を行い、その後 1L/min の揚水強度で 42 分間揚水を行った。下段のみの揚水では 1L/min の揚水強度で 2 分間揚水を行い、その後 2L/min の揚水強度で 1 分間、3L/min の揚水強度で 1 分間、4L/min の揚水強度で 1 分間揚水を行った。揚水装置への給電は所内に配電されている AC100V 商用電源を用いた。試験中は大気厚を別途測定し、測定した水圧を水位（地表面からの深さ）に換算した。

3. 結果および考察

3.1 パッカー挿入後の水位変化

試験中パッカーからの空気漏れは検出されず、空気圧の調整は行われなかった。

Fig.6 に井戸内にパッカーを挿入し止水してからの、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化を示す。

Fig.6 に示す期間中、パッカー挿入 8 分後から 4 分間ポンプの試運転を行っている。上段の水位はパッカー挿入後、ポンプ試運転中を除いて上がり続け、挿入後 1 時間以上経過した段階でほぼ一定値 (GL.-6.5m) となり、水位は 1.9m 上昇した。これに対して下段の水位はほぼ一定であり、上段の水位変化の影響を受けなかった。

本揚水手法の懸案事項の一つとして、パッカー止水区間における、孔壁と保孔管の間の鉛直流がある。

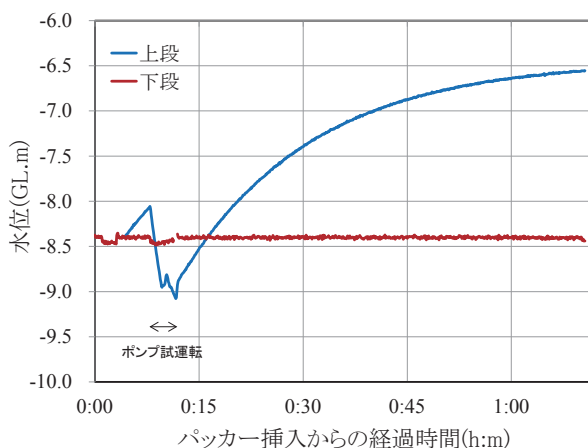


Fig.6 パッカー挿入後の水位変化
Fluctuation of groundwater potential after insertion of packing

今回試験に用いたような管井では、ボーリングマシンによる掘削径は保孔管の径より大きく、掘削孔の孔壁と保孔管の間は砂などの透水性が高い物質で充填されるのが一般的である。そのため井戸内の一部区間をパッカーで止水しても、地下水が孔壁と保孔管の間を通過してパッカー上下間で流れてしまうと止水の効果がなくなる。本取水試験装置でパッカー長を 1m と比較的長く設定したのも、止水区間が長くなるほど、止水区間を縦断する孔壁と保孔管の間の流路が存在する確率が小さくなると考えたためである。実際の井戸では、設置後地盤が徐々に保孔管に密着していくので、井戸の施工から時間が経過するほど、孔壁と保孔管の間の透水性は地盤の透水性に近づくと考えられる。今回の試験では Fig.6 に示すように上段と下段の水位は独立に変動していることから、今回の試験条件ではパッカーによる止水が機能していると考えられる。

3.2 取水試験中の水位変化

Fig.7 に取水試験中の、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化、および流量計で記録した上段および下段の地下水揚水強度（瞬時流量）の変化を示す。

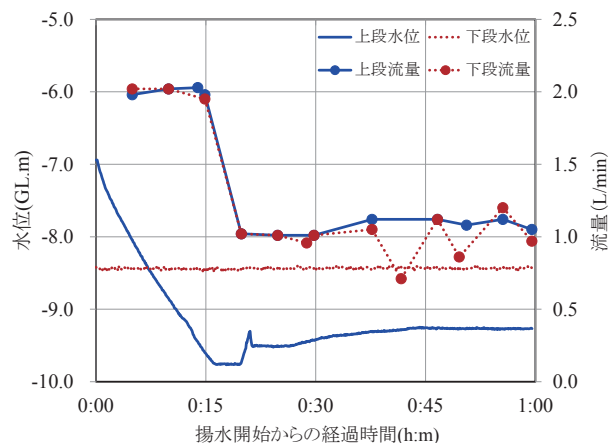


Fig.7 取水試験中の水位と揚水強度変化
Fluctuation of groundwater potential and pumping rate during pumping test

揚水開始から 15 分間は上段、下段とも地下水揚水強度は 2.0L/min であったが、上段の水位が急激に低下し、揚水開始 15 分後には 2.0L/min での揚水が継続できなくなった。このため揚水強度を 1.0L/min に変更して試験を継続した。揚水強度変更後、上段の水位は最終的に GL.-9.2 ~ -9.3m で安定した。これに対して下段の水位は揚水強度によらずほぼ一定であった。

上段の水位が急激に低下した理由は、パッカーによる止水により、揚水対象となる帯水層の厚さが制限されたことによると考えられる。地下水の揚水においては、帯水層の厚さと透水係数の積である透水量係数が指標となる。揚水強度が同じであっても帯水層厚が小さくなれば、揚水可能量が小さくなるとともに、水位低下が大きくな

る。この現象は単孔式二重揚水に限らず、2孔式二重揚水でも同様に発生すると考えられるが、いずれにせよ塩淡水境界深度が浅い（淡水域の厚さが薄い）場合には二重揚水手法を用いても、帯水層の性状によっては十分な揚水量が得られない可能性がある。

一方で上段の水位変動の影響を下段の水位が受けなかったことは3.1と同様であった。

3.3 取水試験中の水質変化

Fig.8 に取水試験中の上段および下段のポンプから揚水された地下水の EC 変化を示す。

取水試験中上段の EC は 14.9 ~ 15.7mS/m、下段の EC は 16.7 ~ 16.9mS/m の範囲で推移した。上段と下段の EC の差は 1.2 ~ 1.8mS/m であり、その差は取水試験中保たれていた。

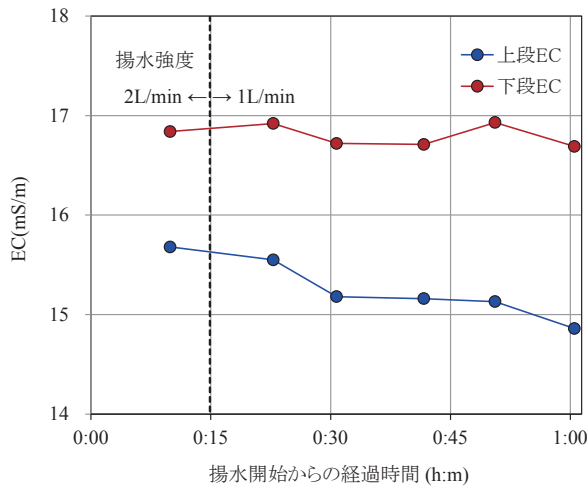


Fig.8 取水試験中の EC 変化
Fluctuation of EC of groundwater during pumping test

Fig.9 に取水試験中の上段および下段のポンプから揚水された地下水の pH および水温の変化を、Fig.10 に取水試験中の上段および下段のポンプから揚水された地下水の DO および ORP の変化を示す。

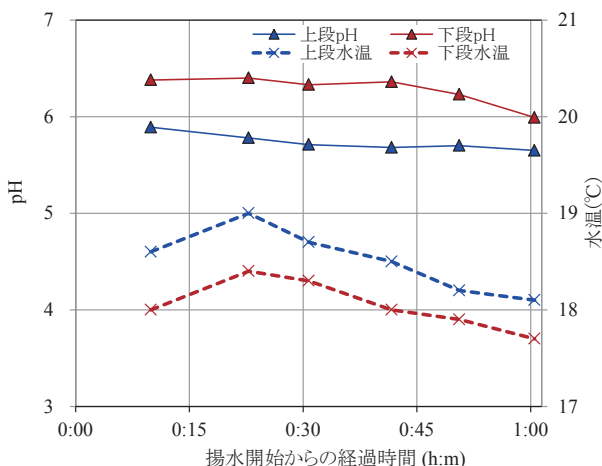


Fig.9 取水試験中の pH および水温変化
Fluctuation of pH and temperature of groundwater during pumping test

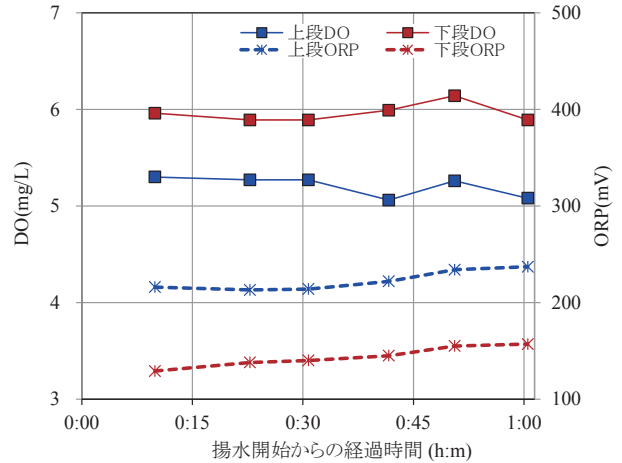


Fig.10 取水試験中の DO および ORP
Fluctuation of DO and ORP of groundwater during pumping test

これらのうち、Fig.9 に示す揚水開始 23 分後の水温が上昇しているのは、揚水量の調整に伴い一時的にポンプを停止したことにより、揚水チューブの地上部が日射で暖められた影響による可能性があり、検討の対象外とする。

Fig.9, Fig.10 に示すいずれの指標とも、上段と下段の差は取水試験中保たれていた。

これらの結果は、上段の地下水と下段の地下水が混合せず独立に揚水されていることを示しており、二重揚水の目的である帯水層中の 2 深度からの同時揚水が、本装置によって実現可能であると考えられる。

3.4 上段のみおよび下段のみで揚水した場合の水位変化

Fig.11 に上段のみで揚水を行ったときの、上段および下段の水位センサーで測定した水位変化を示す。

上段のみで揚水を行った場合、上段の水位は揚水強度に応じて低下したが、下段の水位は殆ど変化せず、上段の水位変化の影響を受けなかった。

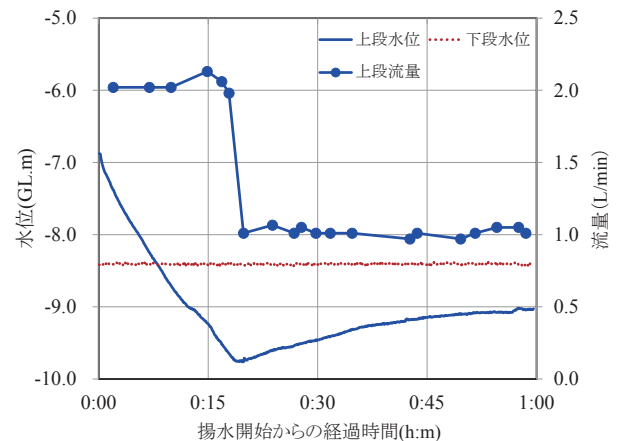


Fig.11 上段のみ揚水時の水位と揚水強度変化
Fluctuation of groundwater potential and pumping rate during pumping of upper pump

Fig.12 に下段のみで揚水を行ったときの、上段および下段の水圧センサーで測定した水位変化を示す。

下段のみで揚水を行った場合、上段の水位も下段の水位も揚水によって変化しなかった。上段の水位が上昇傾向にあるのは、その前に行われた取水試験によって低下した水位の回復過程にあったからである。また下段の水位に変化が無いことは、今回の揚水強度（最高 4L/min）が下段の透水量係数に対して非常に小さく、検出できるだけの水位低下が生じなかったことを示している。

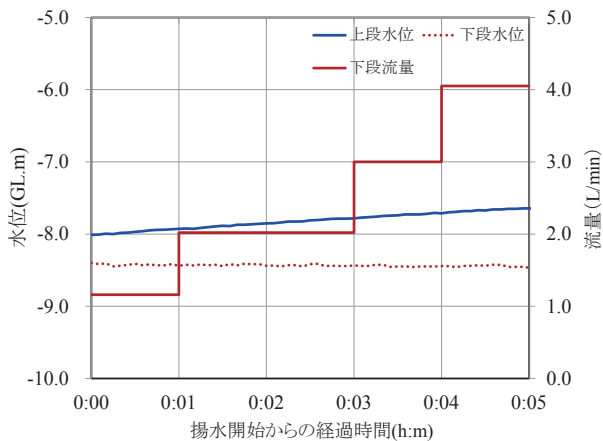


Fig.12 下段のみ揚水時の水位と揚水強度変化
Fluctuation of groundwater potential and pumping rate during pumping of lower pump

今回の取水試験ではパッカー挿入後の水位変化、上段・下段同時揚水、上段のみ揚水、下段のみ揚水のいずれの場合でも、上段と下段の水位は反対側の水位変動や揚水の影響を受けておらず、パッカー止水の有効性（孔壁と保孔管との間の鉛直流が発生していないこと）を示している。しかしこのことは、今回用いた試験井戸について言えることであり、本研究で用いた手法を現地に適用する際は、本研究で示した方法などでパッカー止水の有効性を確認することが必要である。

4. 結言

本研究ではこれまで2本の井戸で実施されてきた二重揚水手法を改良し、塩淡水境界深度が変化する沿岸域で利用するための新たな手法を考案した。具体的には、1本の井戸の塩水域と淡水域の境界部に止水性の空気パッカーによる仕切りを設け、井戸内の地下水流を遮断することで、塩水域と淡水域からの同時揚水を実現するとともに、仕切りの位置や長さを調節することで、塩淡水境界深度の変化にも対応するものである。また、考案した手法による揚水装置を作製するとともに、農村工学研究部門内の井戸において取水試験を実施した。

試験の結果、パッカー挿入後の水位変化、上段・下段同時揚水、上段のみ揚水、下段のみ揚水のいずれの場合でも、上段と下段の水位は反対側の水位変動や揚水の影響を受けなかった。

パッカーの上段・下段から同時に揚水した試験において、上段から揚水した地下水のECは、下段から揚水した地下水のECよりやや低く、その差は取水試験終了時まで保たれた。またpH、水温、DO、ORPについても、上段と下段の差は試験終了時まで保たれた。

これらの結果より、上段の地下水と下段の地下水が混合せず独立に揚水されていること、パッカーによる止水は有効で孔壁と保孔管の間の鉛直流も発生していないことが示された。

一方で、取水試験開始時のパッカー上段の地下水深は約3mであったが、揚水開始後水位が急激に低下し、2L/minの揚水強度を維持できなかった。このことは、宙水の存在と、パッカーによる止水によって上段の帯水層厚が減少したことによる影響であると考えられた。

以上より、二重揚水の目的である帯水層中の2深度からの同時揚水が、本装置によって実現可能であると考えられた。また留意点として、①現地で用いる井戸について孔壁と保孔管の間の鉛直流が発生しないことを確認する必要があること、②帯水層厚の減少により揚水強度が制限されることを考慮に入れる必要があること、が挙げられた。

謝辞：本研究の一部は、本研究の一部は科研費（15K07659 および 24580362）、住友財団環境研究助成の支援を受けて実施した。また取水試験の実施にあたっては（株）フジヤマ（当時）の久保昌明氏にご協力頂いた。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 石田 聡, 吉本周平, 小林 勤, 幸田和久, 土原健雄, 万福裕造 (2010): マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について, 地盤工学会誌, **58**(5), 22-25.
- 石田 聡, 白旗克志, 土原健雄, 吉本周平 (2014): 帯水層の塩水化を抑制する深度別揚水手法, 地盤工学会誌, **62**(11/12), 36-37.
- Presley K.T. (2005): Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, **2005-5098**, 1-40.
- 白旗克志, 長田実也 (2009): 淡水レンズからの水源開発を目指して—多良間島における調査—, 地盤工学会誌, **57**(9), 42.
- Zack, A. and Candelario R. M. (1984): A Hydraulic Technique For Designing Scavenger-Production Well Couples To Withdraw Freshwater From Aquifers Containing Saline Water: Final Technical Report To U.S. Department Of The Interior Washington, D.C. 20240, 1-50.

受理年月日 平成28年11月1日

A pumping test of single scavenger/production well system to prevent saltwater upconing

ISHIDA Satoshi*, SHIRAHATA Katsushi*, TSUCHIHARA Takeo* and YOSHIMOTO Shuhei**

* Groundwater Resources Unit, Division of Regional Resources Engineering

**International Water Management Institute (IWMI)

Abstract

We proposed a device made of air packing and installed as a partition in a borehole. The device had two pumps; one was set above the air packing and the other under it. The use of this air packing made possible the groundwater pumping from two horizons. The device was set in a borehole with a 100-mm diameter drilled into a field in our laboratory, and then the groundwater was pumped into it. The length of the packing was 1 m, and the packing was set at 2 m below the groundwater table. The groundwater pumping rates of both pumps were 1-2 L/min. EC, pH, temperature, DO and ORP of the pumped groundwater were measured during the pumping. The groundwater level which was measured by a hydraulic pressure sensor at a pumping rate of 2 L/min was found to decrease with time at the upper side of the packing, but it was almost stable at the lower side. The EC of the groundwater drawn above the packing did not fluctuate so much. The difference between the EC of the groundwater above and below the packing remained unchanged; the same tendency was observed in other water quality parameters. These results showed that the groundwater from two horizons could be separately pumped by using this device without negatively affecting water quality.

Key words: *Scavenger/production well, Packing, Upconing, Freshwater/saltwater boundary, Freshwater lens, Groundwater*

技術資料

土地改良区を対象とした GIS 技術の受容に関する質的検討

大塚芳嵩* 遠藤和子* 國光洋二*

*地域資源工学研究領域資源評価ユニット

要 旨

土地改良区の事務局長と農村工学研究部門が開発した GIS ソフト“VIMS”を事例に新しい技術の受容に関する心理的プロセスについてインタビュー調査による質的研究法の観点から検討した。対象者へのインタビューにより得られた発話を質的研究法の1つである修正版グラウンデッド・セオリー・アプローチにより集約・抽象化した。この結果、土地改良区の事務局長が新しい技術を受け入れるための要素として、土地改良区の〈現状と課題〉、技術の受容における〈障害〉と〈条件〉、受容を促進するための開発者からの〈支援〉、技術を受容する〈動機〉の5つのカテゴリーが生成された。

キーワード：土地改良区, VIMS, 技術受容, 半構造化インタビュー, 修正版グラウンデッド・セオリー・アプローチ

1. 緒言

農業・農村の基盤となる農業水利施設や圃場等の維持管理業務をおこなう土地改良区においては、担い手と職員の不足や経済基盤の悪化などによる人的・経済的課題が深刻化している(石田, 2000)。現在、これらの土地改良区における課題に対して近年多様な分野に導入されている ICT 技術を農業水利施設等の維持管理業務に応用する研究が進んでいる。この例として、農研機構農村工学研究部門では、地理情報システムに農業水利施設の維持管理システムを組み込んだ農地基盤地理情報システム(Village Information Management system, 以下 VIMS)を開発し、土地改良区の業務支援を目的とした取り組みをおこなっている(重岡ら 2014)。しかし、これらの ICT 技術を応用した様々な取り組みが農業・農村や関連組織である土地改良区等における諸課題の解決策として有望視されている一方で(衛藤ら, 2014; 鬼塚・星野, 2014)、新しい技術に対する現場の利用者の認知や受容、普及が進んでいないことが課題として挙げられる(畑山, 2005)。このような現状に対してコンピュータ科学分野においては、利用者からの意見をもとに開発した技術のハードウェアやソフトウェアなどの性能や機能性の改善に取り組む研究をおこなっている(窪田ら, 2012; 鈴木, 2012; 中原・山本, 2011; 小田島ら 2013)。また、技術面における課題解決を模索する一方で、利用者のニーズなどの心理的要因に着目する研究も見直されている(正木・椎塚, 2009; 加藤ら, 2014; 石田ら, 2014; 山本, 2014)。これらの既往研究のなかで、特に技術の受容と利用者の心理に着目した研究としては、Davis (1989) や Venkatesh et. al (2003) の技術受容モデルを応用した研究(小野, 2008a, 2008b; 全ら, 2010; 高田・藤田 2013; 金ら, 2013; 田中ら, 2014; 包ら, 2014)、Rogers (2007) のイノベーション

ン普及論を応用した研究などの心理モデルによる研究が主に挙げられる(小野, 2008a, 2008b; 李, 2012; 樋口, 2013)。今後の農業・農村の現場において新たな技術の普及を促進するためには、技術面の改善だけでなく、より利用者の心理や行動、社会経済的状况を含めた複合的な観点から研究と技術開発に取り組む必要があると考えられる。しかし、技術受容モデルやイノベーション普及論を適用した既往研究は日本においては限定的で、海外で作成されたモデルを各研究目的に合わせて一部改変した事例が多い(田中ら, 2014; 包ら, 2014)。このため、今後、土地改良区における技術の受容と普及を促進するためには、従来の技術受容モデルを農業・農村の実情にあわせた事例特化型のモデルとして再構築する必要があると考えられる。一方、上記のような質問用紙調査に基づく心理・行動モデルの研究が進捗する一方で、関係者からのインタビューやディスカッションをもとに質的研究の観点から対象者の心理を推測する研究もみられる(高津, 2012)。特に、質的研究法の1つであるグラウンデッド・セオリー・アプローチは、インタビューなどの発話記録をもとに現地で起こる現象や対象者の心理や行動などのプロセスについて検証し、その仮説を構築する研究手法として知られる(灘光ら, 2014)。現在、GTA は主に看護学や心理学などヒューマン・サービス分野での応用が拡大し、質的研究のなかでも適用例が多い研究手法である(小田切, 2009; 中神・明石, 2010; 角南, 2013; 寺岡, 2014; 梅田・岩田, 2014)。この研究手法の最も大きな特徴として、現場で採取したデータから現象や心理の「要因とプロセス」を推定する手法として応用することが可能であることが挙げられる。特に、既往研究の少ない研究テーマや個性の高い事例に取り組む際には、現場から基礎データを収集する方法として質的研究の重要性が指摘されている(岡村, 2004)。今後 ICT 技術の導入によ

る業務効率化が不可欠と考えられる土地改良区は、受益面積などの規模、都市部や中山間部などの立地、農業水利施設や圃場整備などの業務形態などの要因により現場の実情やニーズが多様であり、新たな技術の受容を進めるためには、まず特定の対象に密着した質的研究による基礎データの収集と仮説の構築が重要と考えられる。以上を踏まえて、多様な事情を抱える土地改良区の業務を技術的に支援するため、土地改良区の現場に赴き、新しい技術の受容に関する心理的なプロセスを質的研究の観点から再検討することが重要と考えられた。

そこで、本研究は土地改良区の事務局長と農村工学研究部門が開発した土地改良区の業務支援技術ソフト“VIMS”を事例に、新しい技術の受容に関する心理のプロセスについて質的研究法を用いて検討することとした。

2. 研究方法

2.1 本研究で採用する質的研究法の概説

本研究では、土地改良区の業務を支援する技術として開発された“VIMS”を事務局長が受容する過程で生じる心理のプロセスとその構成要因を把握するため、木下が提唱した修正版グラウンデッド・セオリー・アプローチ(以下、M-GTA)を採用することとした(木下, 2014; 木下, 2015)。本研究は、インタビューにより得られた対象者の気持ちや意見、感想などの発話データをM-GTAにより分析し、新しい技術の受容に関する概念やプロセス、及びそれら相互関係についての仮説を質的研究法の観点から検証することを目的としている。M-GTAの特徴として発話における文脈と状況の理解を重視して概念を生成することが挙げられ、対象者の心理や行動に関するプロセスの仮説を構築する研究に適しているとされる(木下, 2014; 木下, 2015)。このため、本研究のような調査対象や範囲が限定された事例的研究であっても意義のある結果を提示できると考えられ、質的研究法のなかでもM-GTAを用いて研究をおこなうことが妥当と考えられた。

M-GTAは類似した発話を集約・抽象化して“概念”を生成し、生成された概念は同様の手順でさらに抽象度を増した“サブカテゴリー”や“カテゴリー”として段階的に集約して抽象化する。これにより、対象者の発話を類型化し、発話に含まれた文脈を読み取り、一連の心理的プロセスを考察する。さらに、発話記録に含まれる文脈を踏まえて、これらの概念、サブカテゴリー、カテゴリーの相互関係をモデルとして構築し、対象者の心理プロセスの仮説モデルを構築する。本研究では、木下のM-GTAにおける分析手順に則り、データの解析をおこなう。具体的な手順については、以下のように実施した。

- ①本研究の目的(リサーチ・クエスチョン)に即した研究計画と調査内容を設定する
- ②各対象者にインタビューを実施してその発話を逐語化し、単位文の選択と抽出をおこなう

③類似した発話(単位文)を集約する

④専用の分析ワークシートにより集約した発話を解釈及び定義をおこない、“概念”を生成する

⑤理論的飽和化(新たな概念が出てこない状態)を迎えるまで、理論的サンプリング(新たな概念を生成する可能性のある対象者からデータを採取する)による継続比較分析をおこなう

⑥生成された概念の相互関係を考察し、結果図として仮説モデルを作図する

2.2 研究の対象

本研究の対象者は、関西圏に立地するA土地改良区の事務局長とした。A土地改良区は、中山間地区に立地する中規模の土地改良区で主な業務は農業用水の維持管理となっている。A土地改良区の事務局長は、合併に伴い隣接する土地改良区の事務局長や併設する社団法人の事務局長など多様な職員により構成されている。本研究において対象者が受容する技術として、土地改良区における農業水利施設の維持管理機能を有したソフトウェア“VIMS”とした。VIMSは農研機構農村工学研究部門と株式会社イマジックデザインが共同開発したソフトウェアで、土地改良区が管理する農業水利施設の図面等の基礎情報からその保守履歴等の記録・更新作業の簡略化を目的とし、モバイルデバイスとGISにより構成されるオンライン情報システムとして機能する。A土地改良区の事務局長は昨年より現地実証の対象者として農業水利施設の維持管理業務にVIMSを試用している。

2.3 調査概要と倫理的配慮

調査は、2016年8月5日にA土地改良区の事務職員を対象に半構造化インタビューを実施した。半構造化インタビューとは、予め大まかな質問内容を決めておき、対象者の回答にあわせてその詳細を発展的に聞き取る調査方法である。質問内容はインタビューガイドに従い、VIMSの利用方法のレクチャーおよび使用後の感想、良い点と悪い点、その改善案、VIMSの受容と普及に関する意見、共同開発に関する感想を時系列に沿って聞き取りをおこなった。インタビューガイドとは、質問内容を一定の規則にあわせて整理し、各質問の詳細が系列化されたものを指す。半構造化インタビューにおいては、インタビューガイドを中心に調査を実施するが、その場にあわせて質問の順序や内容、展開について臨機応変に対応することができる。インタビューの回答については、極力自身の経験や意見に基づいて発言してもらうように対象者に説明した。インタビュー終了後は、各対象者の発話を逐語録に文字起こしをおこない、M-GTAの分析方法に則り解析をおこなった。本研究の実施にあたっては、事前に研究内容と倫理的配慮、対象者に関する権利について書面にて説明した。また、インタビュー実施当日にも同様に倫理的配慮について再度説明した後、承諾を得

た対象者から同意書に署名をいただいた。また、インタビューは当日に対象者の同意を得たうえで音声記録と動画撮影をおこなった。

2.4 研究の位置づけと今後の継続調査について

本研究は M-GTA の分析手順に基づき今後も理論的サンプリングによる継続的な調査をおこない、技術受容の心理的プロセスについて理論的飽和化に至るまで検証を続けていく予定である。このため、本研究の内容はその調査の中間報告に相当し、M-GTA の解析のうち、現状において生成された概念について考察することとする。今後は対象者を増やして仮説モデルを構築すると同時に、専門知識を有した第三者のスーパーヴァイズや対象者への確認(メンバーチェック)、同じ目的で異なる手法やデータなどを用いた研究との比較(トライアンギュレーション)を実施し、より正確な心理的プロセスの把握を試みることを目指す。

3. 結果と考察

3.1 対象者の概説

本研究において、実施した半構造化面接の概要を表に記した (Table 1)。対象者数は、A 土地改良区の事務局に所属する合計 4 名の事務局員とした。対象者はすべて女性で、年齢は 30 代から 50 代の非正規雇用職員となっている。面接時間は 38 ~ 83 分で一人当たりの平均時間は約 49 分となっている。また、今回土地改良区の事務局員が受容する対象である VIMS の利用歴は、担当者と

して 2015 年から利用していた 1 名とインタビューを実施した 8 月に先立って予め 7 月に VIMS の利用方法をレクチャーされた 3 名で構成され、利用経験者と未経験者がいる。このため、新しい技術の受容に関して利用経験の有無の観点から異なる対象者を得られたと考えられた。事前に実施したレクチャー内容は、昨年からの試用期間中に受けた要望等を踏まえ改良した VIMS の基本操作やデータの見方、入力・出力方法の説明、及び簡単な操作練習をおこなった。

3.2 生成されたカテゴリーの説明

半構造化インタビューにより得られた発話を M-GTA 専用のワークシートを利用して解析した結果 (Table 2)、5 つのカテゴリーと 16 のサブカテゴリー、29 の概念が生成された (Table 3)。以下の本文では、生成されたカテゴリーを <>, サブカテゴリーを 【】, 概念を 『』, 実際の発話を 「」の括弧でくくる。生成されたカテゴリーは、〈現状と課題〉〈障害〉〈条件〉〈支援〉〈動機〉の 5 つとなった。以下に、

Table 1 調査概要と対象者の属性

	A	B	C	D
場所	A 土地改良区事務局の会議室			
日時	2016年8月5日			
インタビュー時間	38	83	34	39
年齢	42	55	37	39
性別	女性	女性	女性	女性
職業	事務局員	事務局員	事務局員 ※1	事務局員 ※2
勤続年数	5	25	1	1
共同研究の継続年数	0	0	1	1
VIMSの使用経験	なし	なし	なし	あり

※1 隣接する土地改良区の事務局員
※2 併設する社団法人の事務局員

Table 2 M-GTA におけるワークシートの作成例

概念名	古い慣習が残る土地改良区と農業		発言者
定義	古い慣習や男性社会の影響が残るため、土地改良区の ICT 技術の導入が進まない		
バリエーション	1	やっぱり、土地改良区って、あの一、男の人のね、なんかこう仕事っていうイメージがやっぱりあるし、実際にもうあの一、男のね、まあ年配の人が多んですけど、やっぱりこう一緒に現場に行ったり、まああの色々事務所で対応したりすると、やっぱり段々ね、向こうもまよく頑張つとな、って感じで見てくれて、やっぱり柔らかくなってくるんですね。	A01
	2	で、事務所が小さいとこほど、まあ、そういう感覚が残っているもので、昔のその一、まあ男性社会の、農業する人の、うーん、考え方って残っているもので、なかなかこの、土地改良区とが、その一パソコン使ってデータ化するってゆうのは、ものすごい難しいと思うんです。	B01
	3	やっぱり、こうもう男性社会じゃないですか、農業のね、改良区って。	B01
	4	このね、ほんとに、身内の組織やったりするもので、外部とあんまりつながりがなかったんですけど。	C01
理論的メモ	古い慣習や男性社会の負の影響により土地改良区の理事会等の構成比が高齢男性に偏り、交流が不足すること、また ICT 技術の導入を受け入れ難い状況が示されている。一方、そのような環境で働く対象者らの気持ちは必ずしもネガティブではない。『若者不足と高齢化に伴う IT 離れ』に類似しているが、そちらはこの概念の影響により生じると考えられるため区分した。この概念と矛盾する他の概念は見られない。		
その他			

各カテゴリーの概要について生成された①サブカテゴリー、②概念の順に述べ、カテゴリーの内容について考察する。なお、以降に表記される本文および図表における対象者の発話は、主旨が変わらない程度にゲラ取り（「えーっと」、「うんうん」など意味ない言葉、同じ単語の繰り返し、明らかな言い間違いの訂正）と場合によっては発話の一部省略を行った。また、必要に応じて発話文内に（）で著者の注釈や補足を記載した。本研究においては、個人が技術を受け入れることを“受容”とし、土地改良区など組織が技術を受け入れることを“導入”と定義した。以下、本研究では、生成された概念の名称を決める根拠となった主な発話について本文中に記載し、その内容について考察することとした。

3.2.1 土地改良区の現状と課題

1つ目のカテゴリーは、土地改良区の〈現状と課題〉で、【慣習と制度】【事務局の抱える課題】【行政との連携不足】【事務局員の現状と課題】の4つのサブカテゴリーで構成

される。【慣習と制度】は『古い慣習が残る土地改良区と農業』の概念のみで構成される。『古い慣習が残る土地改良区と農業』の概念を代表する発話として、「事務所が小さいところほどそうゆう感覚が残っているもので、昔の男性社会の、農業する人の考え方って残っているもので…（後略）。（Bさん）」などが挙げられる。これらの発話から、このサブカテゴリーは、男性社会や古い農業の慣習などが残るために、技術の事務局への導入など新しい取り組みの開始が困難な現状が示されていると考えられた。【事務局の抱える課題】は『事務局の人的・経済的課題』の概念のみで構成される。『事務局の抱える課題』の概念を代表する発話として、「女性が事務員して、理事長さんが男性がしてって、二人でやってってパターンが多いですね。（Aさん）」、「だって、職員さんだって、まともに職員やってるところって少ないんですもん。みんなパートとかやから。（Bさん）」などが挙げられる。これらの発話から、このサブカテゴリーは、事務局の人材不足やその要因としての運営資金不足を示していると考えられた。

Table 3 技術の受容と導入に関連する諸要因の類型化

高い(抽象的) ←----- 抽象度 -----> 低い(具体的)					
〈カテゴリー〉		【サブカテゴリー】		『概念』	
No	名称	No	名称	No	名称
1	現状と課題	1	慣習と制度	1	古い慣習が残る土地改良区と農業
		2	事務局の抱える課題	2	事務局の人的・経済的課題
		3	行政との連携不足	3	土地改良区の現状と行政支援の課題
		4	事務局員の現状と課題	4	若者不足と高齢化に伴うIT離れ
				5	通常業務にも習熟できない事務局員
				6	技術導入のための設備と予備知識がない
2	障害	1	技術への関心不足	1	技術の有用性と必要性がわからない
		2	専門技能の習得の負担	2	専門用語の理解に苦慮する
		3	継続使用の断念	3	操作を忘れる
		4	慣れない事物への不安	4	既存方法への慣れと比較
				5	煩わしさから使用をやめる
				6	精密機器やデータの扱いに対する不安
3	条件	1	技術的条件	1	簡易で利用しやすい技術
		2	事務的条件	2	新しい技術に対する慣れ
				3	多機能性
				4	技術導入に関するコスト
				5	理事会や組合員の意向
4	支援	1	サポーターの要件	1	対面式のサポート
		2	サポートの内容	2	サポーターの人柄
				3	丁寧で忍耐強いサポート
				4	サポートの期間や内容
5	動機	1	技術の応用	1	技術に対する期待
		2	交流	2	次世代への継承
		3	やりがい	3	研究者との交流
		4	事務局の将来	4	周囲の人からのサポート
				5	個人のやりがい
				6	事務局員の地域内育成への期待と課題
				7	土地改良区の企業化への期待
				8	時代の流れによる技術導入の追い風

【行政との連携不足】は『土地改良区の現状と行政支援の課題』の概念のみで構成される。『土地改良区の現状と行政支援の課題』の概念を代表する発話として、「そういう補助金とかないと、なかなか維持してゆくの…。みんな小さい改良区はもう維持していくのがやっとなんです。(Bさん)」、「まず、人、お金。はっきりゆうたらね。で、人を雇うってことは、お金がいるわけですよ。そういうお金が付きまとうわけですよ。そうしたら、派遣してもらおうとかね、あの行政から一時的にサポートに来てもらうとかね。…(後略)(Bさん)」などが挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、土地改良区事務局は行政からの人的・経済的支援に期待しつつも現状では十分な支援が得られず葛藤していることが示されている。【事務局員の現状と課題】は『若者不足と高齢化に伴う IT 離れ』『通常業務にも習熟できない事務局員』『技術導入のための設備と予備知識がない』の3つの概念から構成される。『若者不足と高齢化に伴う IT 離れ』の概念を代表する発話として、「どっちなかゆうと、高齢の人が多かったりするんですね。役員の人。そうするとパソコンのことがわからへん。…(中略)…必要になるか必要ないかってゆうのがね、理解してもらいにくい。(Cさん)」が挙げられる。『通常業務にも習熟できない事務局員』の概念を代表する発話として、「いまいちこ(A土地改良区)が何ヘクターのあるのかとか、聞かれても幾らやったかな、ってゆう感じなんで。あんまりその一、土地改良区の仕事ってゆうのがよくわかってないですね。(Dさん)」が挙げられる。『技術導入のための設備と予備知識がない』の概念を代表する発話として、「土地改良区ってゆうのは、(役員と組合員の)年代が高いので、お年寄りの方も多し、まして女性の方ってゆうのは本当に少ないし、パソコンってゆうこととかね、データ化するってことにすぐ疎いんですよ。(Bさん)」や「改良区にとってはパソコンないともあるらしいんですよ。(Bさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、土地改良区の高齢化や若者不足、正規雇用職員の減少などの複数の要因が重なり、業務に ICT 技術を導入することに対して理解を得づらいこと、加えて技術に習熟するための時間、人材と資材の確保ができない現状が示されていると考えられた。

以上のことから、〈現状と課題〉のカテゴリーは、土地改良区事務局を取り巻く環境や人的・経済的課題に関する現状が事務局員の足枷となり、業務に技術を導入し難い状況に陥っていることを示していると考えられた。特に、土地改良区の資金不足が雇用する事務局員の人数や形態を制限し、ICT 技術を事務局に導入する設備や人材を確保できなくなるというプロセスが推察できた。また、古い慣習や経済難の結果から事務局員や理事会の高齢化や女性の非正規雇用の増加を招き、ICT 技術の導入への理解や技術習熟の意欲や機会がさらに減少するプロセスも推察できた。

3.2.2 新しい技術を受容する障害

2つ目のカテゴリーは、新しい技術を事務局員が受け入れられる上での〈障害〉について示しており、【技術への関心不足】【専門技能の習得の負担】【継続使用の断念】【慣れない事物への不安】の4つのサブカテゴリーで構成される。【技術への関心不足】は『技術の有用性と必要性がわからない』の概念のみで構成される。『技術の有用性と必要性がわからない』の概念を代表する発話として、「え、これ(VIMS)で何が出来るってゆうのが、ちょっとわかりづらかった。(Cさん)」が挙げられる。著者らは今回の調査を実施する1年以上前から定期的に現地へ赴き、現場検証と技術のレクチャーを繰り返してきたにも関わらず、事務局員の多くは技術の内容やその必要性について十分に理解がされていなかったことが明らかとなった。この理由として、レクチャーを実施した著者らの方法が不十分であったことが考えられるが、後述するサブカテゴリーや概念が遠因となって事務局員の技術に対する興味や意欲が削がれた可能性も考えられた。【専門技能の習得の負担】は『専門用語の理解に苦慮する』『操作を忘れる』の2つの概念から構成される。『専門用語の理解に苦慮する』の概念を代表する発話として、「まず、専門用語がわからない。詳しい人から見たら、全然普通にスラスラと読めるんですけど、あんまりそれに慣れてない人だと難しい用語がわからないから、あー、もいっかって、そこでちょっと気が失せてしまう部分があるんで。(Aさん)」が挙げられる。『操作を忘れる』を代表する発話として、「使い方も何日か置くと忘れてしまって、聞くのも何かこう(開発者が)忙しいかなーとか、ほんで聞いてわかるかなーってゆうところも。やっぱ、そのものに対して多分自信もないんですよ。(Dさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、対象者は開発者とは異なり、技術に対する専門知識や専門技能の習熟に至っておらず、それらを学習する負担の大きさから技術の受け入れを避ける傾向、自信を喪失する傾向が示されている。そして、これらの心理的負担が次のサブカテゴリーの生成に影響していると考えられる。【継続使用の断念】は『既存方法への慣れと比較』『煩わしさから使用をやめる』の2つの概念から構成される。『既存方法への慣れと比較』の概念を代表する発話として、「私自身もね、パソコンで見るよりも実際紙で見る方が安心するってゆうのがあるんですよ。パソコンで普通に数字打ってデータ化してパソコンで見る画面より、紙面でもらった方がなんか納得するんですよ。(Bさん)」が挙げられる。『煩わしさから使用をやめる』を代表する発話として、「使い方がわからない。もしかしたら、もっと簡単にデータを使えるのかもしれないんですけど、そういうときにこう(開発者が)来てこうゆう資料出すんやったら、これ使ったらすぐに出せるよとか、逆に教えてほしいんですね。(Aさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、専門技能の習得の負担から継続的な使用に対し

て意欲が減少すること、さらに現在採用している方法への慣れや比較の結果から新しい技術の使用をやめてしまうことが示された。また、その他の発話として、「なんかこう、使い方が特殊じゃない。…(中略)…ショートカットがちょっと違ったりすると、使いにくい。(Cさん)」など対象者は通常のパソコンとの操作性が異なると煩わしく、使いづらいシステムと捉えることも示された。【慣れない事物への不安】は『精密機器やデータの扱いに対する不安』の概念のみから構成される。『精密機器やデータの扱いに対する不安』の概念を代表する発話として、「(前略)…どうしてもそうパソコンってゆうのは、ボタン一つでデータが飛ぶってゆう印象が抜けない。…(中略)…紙ってゆうのは、ほんとに消したらこう残っとるけど、データが消えるってことがあるものすごい不安やもんで。(Bさん)」や「タブレット(VIMSは端末と本体で構成される)にもなじみが全然ない。あたしなんかガラケーですから余計になじみがないし。あんま触らんとこみたいな、大事に置いとこみたいな、箱に入れて置いとこみたいな感じですよ。(Dさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、事務局員はそもそも通常のパソコン作業であっても現状において不安を感じており、ましてや新しい技術や使い慣れていないタブレット端末やデータ管理に対して大きな不安を感じているが示されている。これらの不安から、対象者はさらに技術の使用に対して忌避するようになり、受容から遠ざかっていることが示されている。

以上のことから、〈障害〉のカテゴリーは、新しい技術を受け入れる上で、主に対象者にかかる負担や不安など心理的要因から技術の受容を忌避する傾向があることを示していると考えられた。また、事務局員自身も基本的なパソコン操作の習熟や日常的なICT技術との接触についても十分でない可能性があるため、技術への拒絶感がさらに高まる可能性も示された。

3.2.3 新しい技術を受容する条件

3つ目のカテゴリーは、新しい技術を事務局員が受け入れる上での〈条件〉について示しており、【技術的条件】【事務的条件】の2つのサブカテゴリーで構成される。【技術的条件】は『簡易で利用しやすい技術』『新しい技術に対する慣れ』『多機能性』の3つの概念から構成される。『簡易で利用しやすい技術』の概念を代表する発話として、「使いやすい、分かりやすい。でー、使うほうもそうだし、見てもらう人にもわかりやすいってゆうのが、やっぱ使っていないとね。(Aさん)」が挙げられる。『新しい技術に対する慣れ』の概念を代表する発話として、「それを毎日例えば使うものであれば、ものすごく馴染んでくると思うんですけど、(中略)。じゃあ、あたしちゃんと使えるかな?みたいな(後略)。(Dさん)」が挙げられる。『多機能性』の概念を代表する発話として、「(機能が)いっぱいある方がね、自分やりたいと思った時にできたら一

番いいので、たくさんあった方がいいと思いますけど。(Cさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、対象者が技術を受け入れる条件として、技術の習熟に対する簡便性と慣れ、多機能性の重要性が示されている。一方で、多機能性に関しては「逆に、個人的な意見としては、そういうの(多機能)はあると逆に使えない。スマホでもたくさん機能があるけども、結局自分が使うのって限られているじゃないですか。(Aさん)」の発話にあるように技術の多機能性がかえって心理的な負担となり、受容の妨げになる可能性も示唆された。このため、多機能性を有する技術を現場へ導入する場合には対象者に十分なレクチャーを実施すること、また初期設定の段階で簡単な機能選択ができるようにするなど心理的負担を軽減する配慮が必要と考えられた。【事務的条件】は『技術導入に関するコスト』『理事会や組合員の意向』の2つの概念から構成される。『技術導入に関するコスト』の概念を代表する発話として、「理想でいいですか?初期(インシャルコスト)で20万まで。(Cさん)」や「うち800万ですよ、年間大体。賦課金(組合員から集める運営資金)でゆうのが。(ランニングコストが年間で)…一万とかやと(理事会に)理解してもらいやすいかな。(Cさん)」が挙げられる。『理事会や組合員の意向』の概念を代表する発話として、「一応、予算は理事会通して最終的には総代会通していきますんで、絶対理事会でうんって言うてもらわんと。勝手にこう使いたいってゆうて、予算があるからってゆうて、買えるもんでなくて。(Cさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリーは、たとえ事務局員が技術の受け入れに前向きであったとしてもインシャルコストやランニングコストの上限が事務局の実情としてあること、また高齢者が中心でICT技術の導入に後ろ向きである理事会の役員を説得することが求められていると示されている。また、規模の小さな土地改良区ではより運営状況が厳しく、技術の導入に関して予算や理事会の承認が厳しくなる現状も示唆された。

以上のことから、〈条件〉のカテゴリーは、新しい技術を受け入れるために必要な技術的条件と事務的条件を示していると考えられる。第2カテゴリーの〈障害〉をクリアしたとしても、実際の現場に技術を導入するためには対象者の受容性を増すために技術的・事務的条件をすべて満たす必要と考えられた。また、限られた予算内に技術の導入のコストが収まることの重要性が示され、特にランニングコストの低減や年間サポートの契約やオプション解除の有無も重要と発話から示された。また、最終的に導入を決定するには、高齢男性を中心とした理事会から承認を得る必要があり、開発者は理事会に対していかに技術の有用性をわかりやすく説明するかが導入の最終関門であると示された。

3.2.4 事務局員が求める支援

4つ目のカテゴリーは、事務局員が技術の受け入れる上

で研究者や技術者など開発者に求める〈支援〉について、【サポーターの要件】【サポート内容】の2つのサブカテゴリで構成される。【サポーターの要件】は『対面式のサポート』『サポーターの人柄』2つの概念から構成される。『対面式のサポート』の概念を代表する発話として、「やっぱり足を運んでもらって顔とかをあわせて話をさせていただくと、やっぱり気持ちも傾くのではないかな。電話だけでどうですかとか、メールとかダイレクトメールだけではなく、遠いですけど足を運んでいただくってゆうのが一番大きいかな、信頼されるんじゃないかなって思いますね (Aさん)」が挙げられる。『サポーターの人柄』の概念を代表する発話として、「聞きやすい雰囲気。… (中略) …懲りずに何回も同じこと聞きますがみたいな感じで、ちゃんと信用してお互いのやり取りはできたらいいなと思いますけど。(Bさん)」, 「難しく言う (言われる) のはちょっと苦手。… (中略) …向こう (開発者) はわかっとなやけど、こっち (対象者) の人は、それなんやっただけってことがあるから、分かりやすく (対象者の) レベルに合わせて話をしてほしいってゆうか。(Bさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリは、開発者に対して求める支援として直接顔を合わせた支援と技術に習熟していない対象者に対して繰り返し丁寧な説明を求めており、互いの信頼関係の構築を求めていることが示された。特に『サポーターの人柄』に関する発話は多く、互いのコミュニケーションが成立すること、同じ立ち位置でのサポートを求める意見が多かった。また、同世代など属性が近いと打ち解けるきっかけが多いことも意見として挙げられた。一方で、専門的な話ばかりする人やコミュニケーションが成り立たない人の場合は対象者から好まれないことも示され、場合によっては意欲や関心の減衰をもたらす可能性も示された。このことから、サポーターの人格によっては、対象者の技術受容の意欲に対して正負どちらの影響をもたらす得ることが示された。【サポート内容】は『丁寧で忍耐強いサポート』『サポートの期間や内容』の2つの概念から構成される。『丁寧で忍耐強いサポート』の概念を代表する発話として、「実際やれっていわれたらね、不安やから。そこは手取り足取り教えてもらう人がいたらいいと思います。(Bさん)」が挙げられる。『サポートの期間や内容』を代表する発話として、「そうですね、1週間ぐらい教えてもらったら。(Cさん)」が挙げられる。以上の発話から、このサブカテゴリは、開発者に求める支援の内容について示しており、サポートの際には対象者の声に耳を傾け丁寧なサポートを心がけること、技術に不慣れな対象者を安心させるようなケアも怠らないことが求められていた。また、技術の導入に関するレクチャーとしては、導入初期に1週間程度の連続したサポートと習熟後の月1回程程度のサポート、困ったときの電話サポートなどを実施することが対象者の求める理想的なサポートとして挙げられた。

以上のことから、〈サポート内容〉のカテゴリは、対象者が開発者に求めるサポートとして、人間関係や信頼感の構築と習熟度に合わせたサポート体制を求めていることを示していると考えられる。特に着目すべき点として、対象者らは具体的な技術的支援はあまり発話されず、開発者との信頼関係の構築に重きを置いている点が挙げられる。また、その他の発話とあわせて考察すると対象者は、“受容・導入=信頼関係=継続的な付き合い”と考えている可能性が示唆された。このため、技術の受容と導入の条件は技術的な課題解決を前提としたうえで、それまでの開発者との信頼関係が重要である可能性が示された。今後は理論的サンプリングにより、技術受容を促進条件として開発者との人間関係 (継続的な信頼関係) が重視されていることを裏付ける発話についても着目していきたい。

3.2.5 新しい技術を受容する動機

5つ目のカテゴリは、事務局員が新しい技術を受容する動機や受容を促進するための〈動機〉について示しており、【技術の応用】【交流】【やりがい】【事務局の将来】の4種のサブカテゴリで構成される。【技術の応用】は『技術に対する期待』『次世代への継承』2つの概念から構成される。『技術に対する期待』の概念を代表する発話として、「○○ (対象地区名) の観光に回ったりとかするときも、そうゆうのもポツと押したら、そこの情報がこう色々見えるみたいなところにもやっていけたら… (中略) …この先、面白いんじゃないかなって思っていました。(Dさん)」が挙げられる。『次世代への継承』の概念を代表する発話として、「データ化して残していくってゆうのは大事なことやし、今の時代そうゆう紙面だけじゃなくてそうゆう風にデータで残していくと便利やなって思いますけど。(Bさん)」が挙げられる。これらの発話から、このサブカテゴリは、対象者は技術そのものよりも、技術を導入した後の応用方法やその先にある地域振興や次世代への情報の継承などより高次の目的に高い関心があることが示された。このことから、対象者にとっての技術の必要性とは、開発者が意図した技術の内容に加えて、その技術を対象者の個々のニーズに合わせて応用できるかといった他のニーズとの適合性とニーズにあわせた技術の変容性であることが重要と考えられた。【交流】は『研究者との交流』『周囲の人からのサポート』の2つの概念から構成される。『研究者との交流』の概念を代表する発話として、「仕事以外の話でも (開発者に) 共感できる部分があると、それがいい風に仕事にも反映されてくるのかと思います。(Aさん)」が挙げられる。『周囲の人からのサポート』を代表する発話として、「仕事している中で周りに助けられているなっていうのは、本当に今の事務所とか、みんな個々に仕事の内容は違うけど、何かするときにはやっぱりみんなが手伝ってくれてる。だからこそできるのかなって。(Aさん)」が挙げられる。これらの

発話から、このサブカテゴリーは、対象者は技術の導入を通じた開発者との関わりに期待しそれが仕事への意欲に繋がること、また日常的な同僚からのサポートが円滑な通常業務を支えている要因として挙げられていた。【やりがい】は『個人のやりがい』の概念のみから構成される。『個人のやりがい』の概念を代表する発話として、「ああゆうの（VIMS）やったら、自分の地域のことが目で見えるってゆうのと、それから今までやってきたことの積み重ねがわかるわけじゃないですか。…（中略）…こんな風に管理してもろうとるんのやってゆうのがわかったら、やりがいってゆうか、それもあるんと違うんかなって思うんですけど。（Aさん）」が挙げられる。これらの発話から、このサブカテゴリーは、対象者の技術受容のモチベーションや動機として、次世代への情報継承による地域貢献など技術本来の目的よりも地域にあるより大きな課題にやりがいを感じていることが示されている。【事務局の将来】は『事務局員の地域内育成への期待と課題』『土地改良区の企業化への期待』『時代の流れによる技術導入の追い風』の3つの概念から構成される。『事務局員の地域内育成への期待と課題』の概念を代表する発話として、「（地域に他所の）若い男の子が入ってきててもね、2年か3年で。いやー、続かんのですわ。やっぱ、そういうの（地域の昔からのしがらみ）があるから、なかなか難しいじゃないですか。そうすると…（中略）…地元の地域のことわかって、地図的なこともわかってゆう子が、育てられたら一番いいと思うんですけど。それがなかなかお金もないし、難しい。（Bさん）」が挙げられる。『土地改良区の企業化への期待』の概念を代表する発話として、「今よく農業も会社組織になってるところがあるじゃないですか。…（中略）…もうちょっと、そういうのを運用してもいいんと違うんかなって思って。（Bさん）」が挙げられる。『時代の流れによる技術導入の追い風』の概念を代表する発話として、「段々役員さんの年代も下がってきて、…（中略）…定年されて60そこそこの方がこう役員さんになったりとかパソコンとかそういうのも会社で使ってみえたりとか、そういうのあるじゃないですか。（Bさん）」が挙げられる。これらの発話から、このサブカテゴリーは、事務局の現状を踏まえて、世代交代の追い風を受けながら様々な課題と苦闘している土地改良区の現状と期待について示されている。

以上のことから、〈動機〉のカテゴリーは、直接的あるいは間接的に対象者が技術を受容する要因について示しており、特に現状において対象者は地域の活性化を最優先事項として定めており、具体的に観光や福祉などを例に挙げていた。また、サブカテゴリー間でも対象者が【技術の応用】すること、またその【やりがい】をもとに【事務局の将来】に関する課題に取り組むプロセスもみられた。また、開発者との【交流】により対象者の【技術の応用】と【やりがい】が向上するプロセスもみられた。よって、技術の受容性を高めるためには、対象者が開発者に

訴えた技術に対する具体的な指摘だけでなく、対象者の背景にある大きな目的を理解し、その課題解決に当該技術が役立つことを指摘することが重要であると考えられた。また、これらの対象者の背景を十分に理解し、受容性を高める要因と示唆された信頼関係を構築するためには、開発者は積極的に対象者と交流して現地の情報収集と技術開発へのフィードバックを繰り返していくことが重要と考えられた。

4. 結言

本研究は、土地改良区の事務局員と農村工学研究部門が開発した土地改良区の業務支援技術ソフト“VIMS”を対象に、新しい技術の受容に関する心理的プロセスについて質的研究法を用いて検討することとした。この結果、土地改良区の事務局員が新しい技術を受容するための要因として、土地改良区の〈現状と課題〉、技術の受容のための〈障害〉と〈条件〉、受容を促進する〈支援〉、技術を受容する目的としての〈動機〉の5つのカテゴリーが生成された。

本研究は、質的研究法を用いて技術の受容プロセスについてその要因とプロセスについて考察している。今後はM-GTAの手法上の手続きを踏まえ今回の結果をより改善して仮説モデルを構築し、本論中に提示した信頼関係に関する新たな仮説を裏付けるべく研究を継続する。

引用文献

- 包薩日娜, 星野 敏, 橋本 禪, 清水夏樹 (2014) : 中国湖北省農村地域におけるインターネット利用意思の規定要因: -総合技術受容モデルによる分析から-, 農村計画学会誌, **33** (1), 54-62
- Davis, F.D. (1989) : Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology, *MIS Quarterly*, **13** (3), 319-340
- 衛藤彬史, 星野 敏, 鬼塚健一郎, 橋本 禪 (2014) : 農山村地域における地域活性化を目指した実名 SNS の普及, 農村計画学会誌, **32** (4), 499-506
- 畑山満則 (2005) : 自治体における高度な情報処理システム導入プロセスに関する考察, 情報処理学会研究報告, 2005-IS-094, **2005** (115), 27-34
- 樋口耕一 (2013) : 情報化イノベーションの採用と富の有無-ウェブの普及過程における規定構造の変化から-, ソシオロジ, **57** (3), 39-55
- 石田憲治 (2000) : 社会的要請の変化と土地改良区機能の拡充, 農業土木学会誌, **68** (11), 1115-1118
- 石田達郎, 瀬古俊一, 青木良輔, 宮田章裕, 橋本 遼, 渡辺昌洋, 井原雅行 (2014) : 安全確認システムの個人情報登録に関する心理的抵抗分析-被災経験者によるフィールド調査報告-, 情報処理学会研究報告 **2014-UBI-42** (9), 1-6

- 全ヨンギュンステファン, 兼田麗子, 加納貞彦 (2010): スマートフォン使用意図に関する研究 - 日本・韓国の携帯電話サービス・ユーザを対象として -, 国際情報研究, **7** (1), 27-39
- 加藤宗肖, 伊藤昌毅, 清水 亮, 木實新一, 瀬崎 薫 (2014): モバイル端末が創出する位置情報の利用に対するユーザー意識の質的調査, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, 1965-1972
- 金 鍾和, 森高正博, 福田 晋, 尹ソク重 (2013): ネットショッピングにおける消費者購買認識の構造分析 - 韓国における生鮮食品を事例として -, フードシステム研究 **19** (4), 382-393
- 木下康仁 (2014): グラウンデッド・セオリー論, 弘文堂, 127-150
- 木下康仁 (2015): グラウンデッド・セオリー・アプローチの実践, 弘文堂, 87-248
- 窪田 諭, 曾我和哉, 佐々木雄喜, 三浦友美, 瀧澤寛之, 佐々木敬志, 阿部昭博 (2012): 住民参加型 GIS としての地域 SNS の開発と運用評価, GIS : 理論と応用, **20** (2), 35-46
- 正木 圭, 椎塚久雄 (2009): モバイルコンテンツ利用に至る消費者意思決定プロセスのモデル化, 工学院大学研究報告, **109**, 153-160
- 灘光洋子, 浅井亜紀子, 小柳志津 (2014): 質的研究方法について考える - グラウンデッド・セオリー・アプローチ, ナラティブ分析, アクションリサーチを中心として -, 異文化コミュニケーション論集, **12**, 67-84
- 中神克之, 明石恵子 (2010): 症状出現からがん発見までにおける術前消化器がん患者のヘルス・リテラシーの発揮, 日本看護学会誌, **30** (3), 13-22
- 中原宏樹, 山本佳世子 (2011): 利用者間のコミュニケーションを目的とした Web-GIS の設計と構築, 日本社会情報学会全国大会研究発表論文集, **26**, 219-224
- 李 英 (2012): 消費者視点に基づいた新製品の普及に関する研究のサーベイ, 産研論集, **42**・**43**, 21-27
- 小田切康彦 (2009): 行政職員における NPO 理解のプロセス - 協働経験者への面接調査による質的研究 -, ノンプロフィット・レビュー, **9**(1・2), 15-26
- 小田島瑞希, 竹野健夫, 植竹俊文, 菅原光政 (2013): 地域コミュニティを主体とする文化資源収集支援システムの開発, 情報処理学会研究報告, **2013-IS-123** (7), 1-6
- 岡村 純 (2004): 質的研究の看護学領域への展開 - 社会調査方法論の視点から -, 沖縄県立看護大学紀要, **5**, 3-15
- 鬼塚健一郎, 星野 敏, (2014): SNS を活用した農山村地域コミュニティの再構築の可能性, 農村計画学会誌, **33** (1), 45-48
- 小野晃典 (2008a): 新技術受容の消費者行動理論, 三田商学研究, **51** (1), 1-18
- 小野晃典 (2008b): 新技術の受容と革新の採用, 三田商学研究, **51** (2), 1-20
- Rogers, E. M. (2003): *Diffusion of Innovation: Fifth Edition*, New York, NY: Free Press, 三藤利雄訳 (2007), 『イノベーションの普及』, 翔泳社
- 重岡 徹, 友松貴志, 庄 直樹, 山本徳司 (2014): 農地・農業用水等の地域資源保全のためのモバイル型地理情報システムの開発, 農村工学研究所技報, **215**, 155-184
- 角南なおみ (2013): 子どもに肯定的変化を促す教師の関わりの特徴 - 修正版グラウンデッド・セオリー・アプローチによる仮説モデルの生成 -, 教育心理学研究, **61**, 323-339
- 鈴木充夫 (2012): 市町村スケールにおける実践的な農業 GIS 構築の課題, 農村研究 **115**, 54-69
- 高田義久, 藤田宜治 (2013): スマートフォン保有者のモバイルデータサービス受容要因に関する考察 - 国内スマートフォン保有者調査に基づく分析 -, 情報通信学会誌 **31** (2), 53-65
- 高津英俊 (2012): 農業新規参入者へのメンタリング・プログラムの実態と機能に関する質的分析, 農林業問題研究, **186**, 110-115
- 田中康裕, 小館亮之, 全ヨンギュンステファン, Timothy Bolt (2014): マルチメディアクラウドサービスのユーザ受容に関する英韓比較, 電子情報通信学会技報 ライフインテリジェンスとオフィス情報システム, **114** (32), 27-32
- 寺岡貴子 (2014): 精神科病院で患者の自殺に遭遇した看護師を看護管理者が支援していくプロセス - 看護管理者が周囲との調整をはかりながら自殺に遭遇した看護師の支援を構築していく体験 -, 日本看護研究学会雑誌, **37** (2), 49-61
- 梅田尚子, 岩田浩子 (2015): 初回治療段階にある中年期の悪性神経腫患者の体験のゆらぎ, 日本がん看護学会誌, **29** (3), 29-39
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., and Davis, F. D. (2003): *User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View*, *MIS Quarterly*, **27** (3), 425-478
- 山本太郎 (2014): インターネット利用時の不安発生モデルに対する心理学的知見の適用に関する一考察, 情報処理学会技術研究報告, **2014-SPT-8** (15), 83-88

Qualitative Investigation on the Process of Technology Acceptance of GIS by a Land Improvement District

OTSUKA Yoshitaka*, ENDO Kazuko* and KUNIMITSU Yoji*

* Resources Evaluation Unit, Division of Regional Resources Engineering

Abstract

This study investigated the psychology of office workers in a land improvement district on technology acceptance of a new GIS software “VIMS” developed by the Institute for Rural Engineering, NARO, with a qualitative research method. As a result of the analysis with the modified-grounded theory approach, five categories for acceptance of new technology were generated from semi-structured interviews of office workers in the land improvement district: 〈 present conditions and problems 〉 of the land improvement district, 〈 obstacles 〉 and 〈 conditions 〉 for technology acceptance, 〈 support 〉 from the developer that promotes technology acceptance and 〈 motives 〉 as the reason to accept the new technology.

Key words: *Land Improvement District, VIMS, Technology Acceptance, Semi-Structured Interview, Modified-Grounded Theory Approach*

報告編（旧：農村工学研究所報告）

農業用ポンプ設備への状態監視診断技術の適用に関する研究

國枝 正*

* 技術移転部

要 旨

農業用ポンプ場は、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設である。その多くが更新の時期を迎えているものの、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が不足している現状にある。本論文は農業用ポンプ設備を対象とし、ポンプ設備の突発的な故障を防ぐため、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する技術の適用を図り、さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断する技術を確認することを目的として研究を行った。油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断は、農業用ポンプ設備の劣化兆候を振動法や温度法と比較してより早期に検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となることを示した。さらに、農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うためには、従来方式の時間計画保全から、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて状態監視保全に移行することが有効であることを示した。突発的な故障リスクを低減するための新たな機能診断システムを提案したことが特徴である。

キーワード：ポンプ設備、機能診断、時間計画保全、状態監視保全、トライボロジー、潤滑油、金属摩耗粒子

第 I 章 緒言

1.1 研究の背景

農業水利施設は、我が国の水田稲作の発展とともに逐次造成されてきた資産である。貯水池や河川などの水源から用水が取水された後、幹線水路、分水工、支線水路などから構成される農業水利施設により水田に用水が供給され、さらに利用された用水は下流の排水路に流入し、河川水や地下水に還元される。我が国の稲作は、紀元前3世紀頃から始まったといわれている。登呂遺跡にみられるように、弥生時代（紀元前2世紀～西暦2世紀）になって、ようやく小河川などからの小規模な水路工事が行われるようになった。戦国時代の築城や鉾山開発により土木技術の発達は著しく、その技術が沖積地や洪積台地の新田開発を可能にした。さらに江戸時代になってからの幕府や各大名による新田開発により、河川下流沖積平野の農業水利施設は江戸中期までに形成されていた（國廣, 1988）。

大戦直後に行われた農地改革が一段落した昭和24年（1949年）に土地改良法が制定されるなど、現在の農業水利施設の造成や管理などの事業は法制度に基づいて実施されている。これらの事業は国民への安定的な食料供給を目的とし、農業施策の中の生産対策と両輪をなす構造対策の根幹であり、農業生産性の向上などを目指す社会資本の整備がその基本にある（中・高橋, 2010）。

このように農業水利施設は、我が国の食料生産に不可欠な基本インフラである。なかでも、基幹的な農業用ポンプ場は全国に2,887箇所（平成24年3月末時点）あり、

農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設になっている。しかしながら、これらの施設の多くは戦後の食料増産の時代や高度成長期に整備されていることから、標準耐用年数を超過したポンプ場が年々増加し、超過割合は施設数ベースで67.5%となっている（農林水産省農村振興局, 2015）。したがって、今後、膨大な数のポンプ場を一齐に更新しなければならない事態が発生することが懸念される。

また、ポンプ設備の突発的な故障を防ぐためには、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する必要がある。さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断することによって補修・改修の優先順位を決定するなど、計画的な維持管理を行うことも必要である。現在、農業用ポンプ設備の機能診断は、主として、土地改良区などの施設管理者による日常点検や、農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ポンプ設備）」（農林水産省農村振興局整備部設計課, 2014）に基づいた数年に1回程度の定期的な点検の結果に基づいて実施されている。しかし、これらの点検は目視や触診・聴診が中心となり、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が少ないことから、劣化がある程度進行しなければ機能診断の必要性を把握できないなどの問題がある。そのため、一定の年数が経過すれば不具合が生じていない部品の交換を余儀なくされるなど維持管理の非効率化や、突発的な故障が生じた時点で高額な分解整備費用を施設管理者が負担しなければならない事態を招いている。

一方、農業用ポンプ設備については、約70箇所の国営造成施設の補修記録の傾向を分析した報告（山下, 2011）

や、特定の地区を対象にポンプの突発的な運転停止を発生させる要因の変動特性を分析した報告(水間ら, 2014)などがあるが、全国的な調査に基づきポンプ設備の劣化の進行形態を分析する研究は十分になされているとはいえない状況にある。

これらのことから、近年、農業用ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤を採取・分析し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受など回転機械の摩耗状態を把握する機能診断技術(以下、「潤滑診断」という)が報告されている(國枝ら, 2012; 河淵ら, 2013; 萩原, 2013; 國枝ら, 2014)。しかし、農業用ポンプ設備における潤滑診断は最近始められたばかりで潤滑剤の分析データなどの情報が少ないことから、農業水利施設の機能診断技術として国の基準などに位置付けられておらず、管理基準値は設定されていないのが現状である。

1.2 世界および日本の農業水利の現状

世界の五大灌漑国は面積でいうと、中国、インド、米国、ロシア、パキスタンである。ただし、Fig. 1-1に示すように、主な国の耕地率と灌漑率をプロットすると、米国とロシアは原点に近いところにあり、中国と日本を含む東アジアの灌漑率が最も高く、東南アジア、南アジアと続いている。乾燥した中近東地域の灌漑率は高いが国土の限られたところで農業が営まれており、ヨーロッパ諸国では無灌漑農業が行われている。このように、現在では、アジアに農業水利施設が多いことがわかる(高石, 1990)。

1960年代以前は、稲作を中心としたアジアでは、水の制御とともに環境への適応型稲作が行われ数千品種の稲が栽培されていた。ところが、1960年代半ばに、フィリピンの国際稲研究所(IRRI: International Rice Research Institute)が育種に成功した高収量品種(IR8)の急速な普及に端を発したいわゆる「緑の革命」を契機として、環

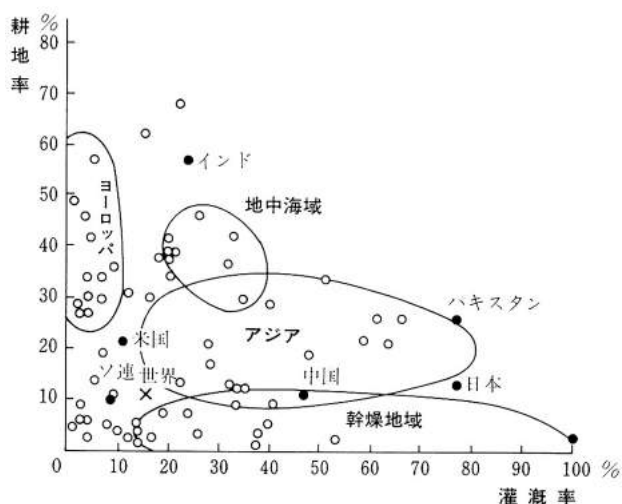


Fig. 1-1 世界の農地と灌漑の割合(高谷, 1990)
Ratio of farmlands and irrigation in the world

境適応型稲作は急速に環境形成型技術に取って代わられた。この稲は、適切な水管理のもとで育てられると画期的な高収量をもたらした。このため、各国政府は海外からの資金協力を仰いで農業水利施設の整備を行い、1970~80年代に灌漑面積は急速に伸び、その大半は60年代以降に建設されたものである(農業土木学会, 2000)。

一方、日本では、稲作はもとより農業水利施設の整備を中心とした環境形成型技術である。前節で述べたとおり、農業水利施設は稲作の発展とともに逐次造成されてきた歴史的資産というべきものであり、その大半は明治以前に築造されたものである。大戦後、食料増産のための緊急開拓などが進められるなかで、1949年(昭和24年)に土地改良法が制定され、50年代以降、ポンプ灌漑を行うなど日本は農業水利施設の高度化への取組をいち早く進めてきた。このような背景から、ポンプを利用した大型灌漑排水事業は日本の技術開発を中心として、アジアのみならず世界各地に広がっている状況にある。

農業用ポンプ設備の機能診断は、日本では、主として施設管理者による日常・定期点検記録をもとに目視・触診・聴診などの外観調査が実施されている。また、海外市場を持つ日本のポンプメーカーにおいては、専門業者による定期的な分解点検・整備を推奨している。この背景には、ポンプ設備は農業・河川・上下水道など土木系公共事業で使われることが大半であり、民間事業での需要が低いことから、ポンプ設備の機能診断技術の研究開発は遅れている状況にあると考えられる。このようなことから、農業用ポンプ設備の機能診断に関する海外文献を検索することは困難であり、農業用以外のポンプ設備では、Myhre et al.(2014)による上下水道施設における振動法を用いた状態監視技術の報告を1件検索することができた。

1.3 農業用ポンプ設備の特徴

1.3.1 揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備の区分

農業用ポンプ場に設置される揚水ポンプ設備は、農業用水の需要に応じた水量を農地などの目的地まで効率的に送水するために設置され、配水や用水量調節などの機能を担っている。また、排水ポンプ設備は、地域内の水位を低下させることにより、農地などを湛水被害や洪水災害から守るために設置され、排水および排水量調節などの機能を担っている。ポンプ設備は、主ポンプ・原動機・動力伝達装置・補機設備などの機器類や部品の集合体であり、これらが各々の役割を果たすことにより機能を発揮している(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2013)。

1.3.2 ポンプ設備の稼働時間

一般に、産業プラントや発電設備では、機械設備は1年間(8,760時間)停止することなく連続稼働している。一方、農業用ポンプ設備の稼働時間には次のような特徴がある。揚水ポンプは、農業用水が必要とされるかんが

い期間（約半年間）に集中して稼働し送水を行う。排水ポンプ設備は、常時排水が必要とされる低平地では常時稼働を行うが、洪水時に備えて地域内の排水を行う排水機場では夏季に多く発生する洪水時にのみ稼働する。調査研究で得られた農業用ポンプ設備の稼働時間の事例では、揚水ポンプ設備（17基）の年稼働時間の平均は2,136時間（Fig. 1-2）、排水ポンプ設備（23基）の年稼働時間の平均は444時間（Fig. 1-3）であった。

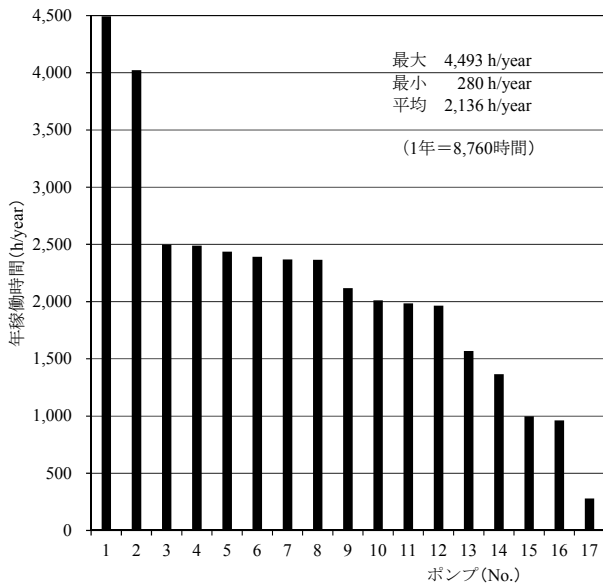


Fig. 1-2 農業用揚水ポンプの稼働実績
（関東における17基の調査事例）
Operation duration of irrigation-pump (17 samples)

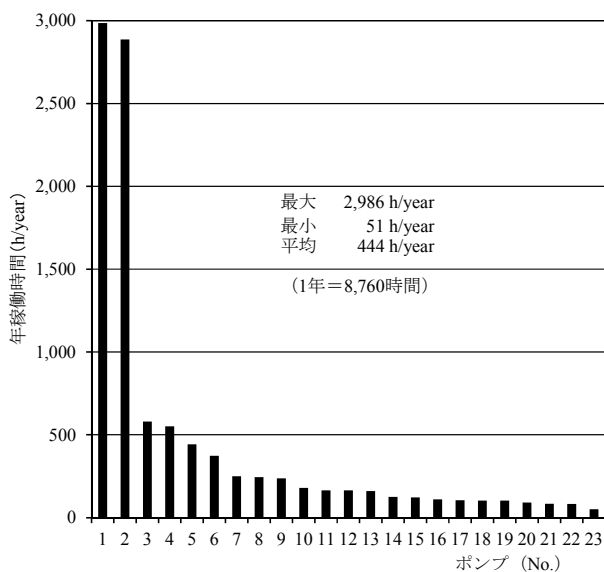


Fig. 1-3 農業用排水ポンプの稼働実績
（関東・東海・近畿における23基の調査事例）
Operation duration of drainage-pump (23 samples)

Table 1-1 A 排水機場の稼働時間と起動回数
Operation duration and startup frequency of A-Pump-Station

号機	1号	2号	3号	4号
翼形式	固定翼	可動翼	可動翼	固定翼
年平均稼働時間 (h/year)	661	1,980	1,880	617
年平均起動回数 (回/year)	446	48	32	417

1.3.3 ポンプ設備の起動回数

2013年1月、地域の排水を担うA排水機場の4基の農業用ポンプ設備（チューブラポンプ、口径2,200mm）のうち1号機が、運転開始とともに減速機から異常音を発生して突然停止した。西尾ら（2016）は、減速機が損傷するに至った原因を分解して調査した結果、損傷した歯車表面の一部に経年劣化によるとみられるマイクロピッチングを電子顕微鏡で確認している。Table 1-1に、A排水機場の管理記録簿から算出したポンプ設備の年平均稼働時間と年平均起動回数を示す。1号機の起動回数は446回と、起動回数の少ない3号の32回と比べて約14倍と多くなっているが、1号機の稼働時間661時間は3号機の1,880時間と比較して35%と少なかった。

一般に、材料は繰り返し応力のもとでは、静的強度よりも低い応力によって破壊する。このような現象を疲労損傷という。また、機械の起動や停止時は境界潤滑領域と呼ばれ、油膜が極めて薄く摩擦は大きい状態である。回転数が増大するにつれて油膜は厚くなり摩擦も低下し、混合潤滑から液体潤滑（または弾性流体潤滑）へと移行していき、機械の運転時は摩擦の低い液体潤滑である。このことから、摩擦が大きい状態で、ポンプ設備の起動と停止を短い間隔で繰り返すことで起動時の高負荷による歯車の損傷が原因で、減速機が停止したとみられる。このような使われ方をしている農業用ポンプ設備は、同様な故障によるポンプ設備の突発的な停止が起きやすいと考えられることから、管理していくうえで損傷などの異常発生の兆候を早期に検出し、適正に対処する必要がある。

1.4 関連する他分野の研究

1.4.1 機械設備の診断技術

産業プラントにおけるメンテナンス方式は、一定期間毎に点検を実施する時間計画保全（Time Based Maintenance：TBM）が従来からの主流であるが、近年では稼働している機械装置の状態を監視し、その情報に基づいて保守を行う状態監視保全（Condition Based Maintenance：CBM）へと保全方式が移行しつつある。特に機械設備のメンテナンスの現場においては、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE（Acoustic Emission）法、超音波法、油中摩耗粒子分析などがよく用いられている（若林・間野，2014；本田，2014）。例えば、

振動法には、回転体振動値（振動加速度）を計測することにより異常の程度を判断する簡易診断法と、その計測結果に応じて異常の部位を特定し有効な対策を決定する精密診断法がある。温度法は、回転機械の温度上昇が軸受の焼付きなどの前兆現象であることを利用し、温度計や温度センサによる常時監視を行う方法である。潤滑油中の金属摩耗粒子を調べることで機械の状態を推測する方法としては、フェログラフィー法や SOAP (Spectrometric Oil Analysis Program：金属濃度分析) 法が代表的である (Roylance・Pocock, 1983；Wright・Neale, 1987；日本トライボロジー学会, 2001b)。

潤滑診断は、機械設備の軸受、減速機、エンジンなどから潤滑油やグリースを採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、機械設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法である (Dempsey et al., 2004)。振動や異音が発生する前に劣化の初期段階の兆候を検出できる高感度な分析手法であり、火力発電設備や船舶機器における潤滑診断技術が報告されているなど、産業分野の機械設備では適用が進みつつある診断技術である。

1.4.2 他分野の潤滑診断技術

(1) 火力発電設備

火力発電所では、平成23年3月11日の東日本大震災の影響により火力発電比率（平成26年度、87.8%）（電気事業連合会, 2015）が大きくなるとともに電力の安定供給が求められ、コスト低減と効率的な保守対応の必要性が増している。そのため、法令で要求される定期検査期間以外は連続して運転することが求められ、一般的には2年間連続運転している状況にある (友安, 2014)。火力発電設備は主タービンや発電機の他に補機と呼ばれる数多くの回転機器から構成されており、日常巡視においては聴診棒を用いた異音検査や潤滑油の漏洩の有無調査などにより潤滑部の点検が行われている。また、ギヤや軸受などの潤滑部近傍の振動値や温度を計測し、その推移から潤滑状態の傾向監視を行っている。さらに、潤滑系統から採取した潤滑油を分析して、潤滑診断を実施している。電力各社は火力発電の高効率化ならびに高稼働率化に伴い発電設備の維持管理方法を見直し、保全方式をTBMからCBMへと移行しつつあり、回転機器の多くは潤滑部の摩耗劣化により故障に至るケースが多いことから、CBMの実施には潤滑診断の適用が必要とされている (吉田・川畑, 2014)。

(2) 船舶機器

船舶の主推進軸装置、主機関および補機関、補機器には各種の軸受が使用されており、それらの損傷は自航不能や減速航行を余儀なくされ船舶運航に重大な影響を及ぼす。近年は、コンテナ物流の近代化や、気象・海象情報を用いた最適航路選定などによるジャストインタイム的な運行管理が求められており、従来は熟練乗組員の判

断によっていた機関の異常診断も、各種センサを用いた機関・機器の常時監視へと移行してきている。また、これまで軸受は、船級協会規則により、一定間隔で分解してその健全性を確認することが義務づけられてきた。近年においては部品の状態を常時監視することで、分解点検の可否を判断するCBMの考え方が浸透してきている。主推進軸装置については、軸受の潤滑油中成分を監視してトレンドを把握するなどの状態監視システム (Propeller Shaft Condition Monitoring System：PSCM) を採用することにより、通常5年ごとに要求されるプロペラ軸抜き出しによる点検を行うことなく、10年間同軸を無開放で運転される船舶が一般化してきている (椎原ら, 2014)。

(3) 機械状態監視診断技術者資格

このように機械の状態を監視することが今日のメンテナンスの中核技術となっており、一般社団法人日本トライボロジー学会は日本機械学会と共同で、2009年10月からISO18436-4「機械状態監視診断技術者 (トライボロジー)」の資格を認証している。受験者の主な所属産業分野は2013年7月現在の累計で、「エンジニアリング・メンテナンスサービス (39%)」、「電力・ガス (26%)」、「潤滑剤供給関連 (14%)」、「石油・化学プラント (6%)」、「重工・機械 (6%)」、「その他 (9%)」となっている (若林・間野, 2014)。

1.5 潤滑剤の評価による機能診断技術

潤滑剤は、その外観から分類すると、①液体潤滑剤 (潤滑油)、②半固体潤滑剤 (グリース)、③固体潤滑剤 (二硫化モリブデン) の3種類に分類される。本論文では、機械設備の潤滑診断手法に用いる潤滑油とグリースを対象とする。

潤滑診断では、Table 1-2 に示すような潤滑剤の物理的性状、潤滑剤の汚染状態、機器の摩耗状態を把握することができる。ほとんどの分析項目はJIS規格に基づく指標であり、定量的なデータを得ることができる。

Table 1-2 分析項目および仕様
Analysis items and specifications

潤滑油の 物理的性状	粘度 (40℃)	/	JIS K 2283
	水分	/	JIS K 2275
	酸価	/	JIS K 2501
	赤外線吸収スペクトル法 (IR)		
グリースの 物理的性状		/	JIS K 0117
	ちょう度	/	JIS K 2220
潤滑剤の 汚染状態	滴点	/	JIS K 2220
	計数汚染度 (NAS1638)	/	JIS B 9934
	質量汚染度 (NAS1638)	/	JIS B 9931
	光学顕微鏡写真		
機器の 摩耗状態	金属濃度分析 (SOAP 法)	/	ICP 発光分光分析
	フェログラフィー法 (定量フェログラフィー・分析フェログラフィー)		

(1) 潤滑剤の物理的性状

物理的性状に係る診断を行う際には、「新油の値からの変化率」を用いて評価する。このため、潤滑診断においては、対象とする設備からの採油と同時に、使用している新油の採取・分析が必須である。なお、製油会社によって性状や添加剤に相違があるため、実際に使用している潤滑剤の名称、規格、交換時期を確認する。

(2) 潤滑剤の汚染状態

潤滑剤の汚染に関する評価指標として、全米航空宇宙工業会が制定したNAS等級 (National Aerospace Standard) が一般的に用いられる。NAS等級には、潤滑油 100mL 当たり存在する汚染粒子について、粒径別の個数で表す計数法 (Table 1-3) と重量で表す質量法 (Table 1-4) の規格が定められており、それぞれの等級で評価を行う (日本トライボロジー学会, 2006b)。

(3) 機器の摩耗状態

二つの金属が接触してすべりや転がり運動をするとき、それらの固体の表面から次々と材料が除去されていく材料損失を、摩耗という。油中の金属摩耗粒子の元素と含有量を調べて摩耗粒子の発生部位を特定し、また、その量により摩耗の程度を把握することができる。

① 金属濃度分析 (SOAP 法)

SOAP法 (Spectrometric Oil Analysis Program) は、油中に含まれる摩耗粒子を高周波プラズマ (ICP法, Inductive Coupled Plasma) の中で燃焼させ、そのときに生じる金属特有のスペクトルを分析することによって摩耗粒子の元素と含有量を同定する方法である。

② フェログラフィー法

強力な磁力で油中の摩耗粒子を捕捉し、摩耗量の測定や粒子観測が容易にできるように大きさの順に配列する方法である。磁性のある摩耗粒子は磁界方向に鎖状に捕捉される。非鉄金属は鉄と凝着した状態で摩耗粒子が発生することが多いので磁力で捕捉されるが、磁界から受ける力が弱いので配列は規則的でない。摩耗粒子は、その発生原因により様々な特徴を有していることから、捕捉された摩耗粒子の形状や量、粒径、色などを分析することにより、軸受などの潤滑状態を推定することができる (柴田, 1982)。

定量フェログラフィーは、摩耗粒子の量を測定し、その経時変化から異常摩耗の発生時期を予測する分析法である。「正常摩耗粒子は小さく、異常摩耗粒子は大きいことが多い」という現象を利用し、大摩耗粒子 (15 μm 以上) と小摩耗粒子 (5 μm 以下) に分け、式 (1) を用いて異常摩耗指数 (Severity Index, 以下、「Is 値」という) を算出する。

$$Is \text{ 値} = (P_L + P_S) (P_L - P_S) = P_L^2 - P_S^2 \quad (1)$$

ここで、 P_L = 大摩耗粒子 (15 μm 以上, 単位: %/mL), P_S = 小摩耗粒子 (5 μm 以下, 単位: %/mL), $(P_L + P_S)$ = 全摩耗量に相当, $(P_L - P_S)$ = 摩耗の異常度である。異常摩耗が始まると大摩耗粒子が支配的になり Is 値が急上昇することから、異常の始まりを見つけることができる。

分析フェログラフィーは、ガラス基板上に配列した摩耗粒子を光学顕微鏡で観察することで、摺動面の潤滑状態について詳しい情報を得ることができる。正常に作動

Table 1-3 NAS 汚染度基準 (計数法, NAS1638)
NAS standard of pollution (Measurement method, NAS1638)

単位: 個/100mL

NAS 等級 \ 粒径	00	0	1	2	3	4	5
5 ~ 15 μm	125	250	500	1,000	2,000	4,000	8,000
15 ~ 25 μm	22	44	89	178	356	712	1,425
25 ~ 50 μm	4	8	16	32	63	126	253
50 ~ 100 μm	1	2	3	6	11	22	45
100 μm 以上	0	0	1	1	2	4	8

NAS 等級 \ 粒径	6	7	8	9	10	11	12
5 ~ 15 μm	16,000	32,000	64,000	128,000	256,000	512,000	1,024,000
15 ~ 25 μm	2,850	5,700	11,400	22,800	45,600	91,200	182,400
25 ~ 50 μm	506	1,012	2,025	4,050	8,100	16,200	32,400
50 ~ 100 μm	90	180	360	720	1,440	2,880	5,760
100 μm 以上	16	32	64	128	256	512	1,024

Table 1-4 NAS 汚染度基準 (質量法, NAS1638)
NAS standard of pollution (Mass method, NAS1638)

単位: mg/100mL

級	100	101	102	103	104	105	106	107	108
重量	0.02	0.05	0.10	0.30	0.50	0.70	1.00	2.00	4.00

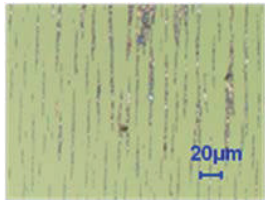
している機械の摩擦面から発生する摩耗粒子は、小さい粒子（5 μm 以下）が支配的である。

主要な摩耗粒子形態の分類と発生原因を **Table 1-5** に例示する。

(4) 機器の劣化状態

機械設備は、電動機や減速機、軸受などの回転機械が組み合わされて稼働している。それら回転機械の機能劣化の大部分は、回転部の金属が摩耗することが原因で進行する。金属摩耗を防止するためには、回転部の滑動を良くする潤滑油やグリースが重要な役割を果たしている

Table 1-5 主要な金属摩耗粒子形態の分類と発生原因
Classification and the origin of metal wear particles

分類	発生原因等	摩耗粒子例
正常摩耗粒子	機械が正常なすべり摩耗をしている際に発生する。 微細な薄片状の粒子。	
凝着摩耗粒子	接触面が摩擦によって互いに凝着し、固体表面からの脱落または移着によって不規則な表面が生じる。	
アブレシブ 摩耗粒子	硬い固体または硬い粒子の介在による削りまたはひっかき作用による摩耗。	
疲労摩耗粒子	摩擦面材料の微小体積が繰り返し応力を受ける際に、疲労破壊によって生じる。	
酸化摩耗粒子	酸素または酸化性雰囲気と材料の化学反応によって生じる。 赤褐色で小さな板状の粒子。	
腐食摩耗粒子	材料と雰囲気との化学的または電気的相互作用を伴い、表面が粗い小径の摩耗粒子。	
熔融摩耗粒子	接触する2物体間に電流が流れる際に、接触面間に起きる放電による摩耗。	

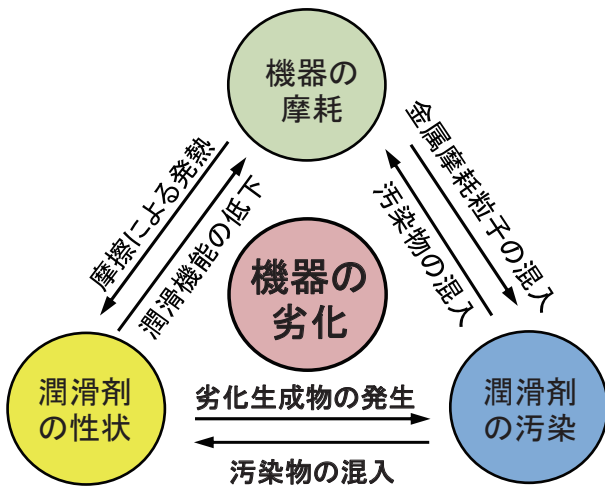


Fig. 1-4 潤滑剤の分析による機器の劣化診断
Degradation diagnosis of the machine by analysis of lubricant

が、潤滑油やグリースが劣化すると回転機械の性能は低下する。また、潤滑油やグリースに異物が混入すると、それが摩擦面の金属を削る摩耗の原因となり、その状態が進行すると摩擦による発熱が生じる。発熱によって潤滑油やグリースの劣化が進行する。このような関係(性状、汚染、摩耗、機器の劣化)を Fig. 1-4 に示す。これらの関係性をもとに、潤滑油やグリースを分析して得られた情報(性状、汚染、摩耗)を総合的に評価して、機器の劣化状態を診断する(國枝, 2012)。

1.6 本研究の目的

農業水利施設は、我が国の食料生産に不可欠な基本インフラである。なかでも農業用ポンプ設備は、農地ばかりでなく地域の用水や排水を担う重要な施設になっている。しかしながら、農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、日常・定期点検記録をもとに目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状況を把握することができない。また、海外市場を持つ日本のポンプメーカーにおいては、TBM方式で専門業者による分解点検・整備をこれまでも推奨している。ポンプ設備の突発的な故障を防ぐためには、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する必要がある。さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断することによって補修・改修の優先順位を決定するなど、計画的な維持管理を行うことも必要とされている。そのため、農業用ポンプ設備の維持管理においてもCBMを導入することは極めて有効であると考えられる。しかし、ポンプ設備は農業・河川・上下水道など土木系公共事業で使われることが大半であり、民間事業での需要が低いことから機能診断のための技術が確立されていない現状にある。

他方、産業プラントのメンテナンス方式は、稼働している機械設備の状態を監視し、その情報に基づいて保守

を行うCBMへと保全方式が移行しつつある。機械設備の回転・摺動部から潤滑剤を採取・分析し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、軸受など回転機械の摩耗状態を把握する潤滑診断の適用が報告されている。その潤滑診断の技術を農業用ポンプ設備の維持管理に適用させるには、いくつかの課題がある。例えば2年間と長期に稼働し続ける火力発電設備と比較すると、農業用ポンプ設備の使用環境は大きく異なり、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返す状況にある。それらの課題解決のためには、農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断の適用について、早期に検証を進める必要がある。

これらのことを踏まえ、以下の研究課題が抽出された。

- (1) 農業用ポンプ設備を管理する担当者への維持管理や故障の原因などに関するアンケート結果をもとに、ポンプ設備の劣化の特徴を明らかにするとともに、劣化の進行を防ぐためのCBM適用について考察する。
- (2) 潤滑剤の物理的性状に着目し、それらの分析結果から農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性を明らかにする。
- (3) 実機を用いて、潤滑診断の劣化に対する応答を求めることを目的とし、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶解現象を再現するための劣化促進試験を実施する。
- (4) 農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断を実施した事例に基づき適用時の留意点を示すとともに、潤滑診断の管理基準値の設定方法について考察する。
- (5) 農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断を実用化するための課題を整理し、ポンプ設備の機能診断について今後の展望を報告する。

本論文では、以上の研究課題の検討を通して、「農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用に関する研究」を行うことにより、ポンプ設備の故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する技術の適用を図り、さらに、設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断する技術を確立することを目的とする。

1.7 本論文の構成

本論文は全7章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第I章 緒言

研究の背景と関連する他分野の研究をまとめることで、本研究の位置づけを行い、研究の目的について述べる。

第II章 農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析

農業用ポンプ場は、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設である。その多くが更新の時期を迎えているものの、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が不足している現状にある。そこで本章で

は、ポンプ設備の維持管理に関する実態や問題点を把握するために実施したアンケート調査に基づき、ポンプ設備の劣化の特徴の一つである軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであることを確認する。さらに、部品の劣化を定量的に診断することにより分解点検や補修の適切なタイミングの判断が可能となること示すとともに、状態監視保全の適用を図ることによりポンプ設備の劣化の進行を未然に防ぎ、突発的な故障を軽減する手法についての考え方を述べる。

第Ⅲ章 農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性

潤滑剤の劣化の要因には、酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因（水分、塵、異物混入など）によるものがある。潤滑油の粘度は劣化や異種油混入の有無などの判定に用いられ、また、グリースのちょう度は物理的な劣化度の評価に用いられる指標である。そこで本章では、研究調査で得られた潤滑剤の分析データの中から潤滑油の粘度およびグリースのちょう度に着目し、それらの分析結果から潤滑油やグリースの劣化特性について明らかにする。

第Ⅳ章 実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験

機械設備では、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE (Acoustic Emission) 法、超音波法などが試みられている。そこで本章では、実機を用いて摩擦面にアプレシブ (切削型) と凝着、溶融の3種類の摩耗を人為的に発生させ、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融の現象を再現する劣化促進試験を実施する。本試験では、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察して劣化状態を迅速に把握しながら、その時の振動加速度や温度の変化、潤滑油中に含まれる金属摩耗粒子の増加数の計測を行い、機械設備の劣化に対する応答特性を求める。さらに、ポンプ設備の損傷を起す要因として主に想定される3種類の摩耗現象を確認し、油に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となることを報告する。

第Ⅴ章 農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題

農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、

日常・定期点検記録を基に目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状態を把握することができないことから、近年、潤滑剤の評価による機能診断の適用事例が報告されている。潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑油やグリースを採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法である。第Ⅳ章の実機を用いた劣化促進試験では、油中に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となることを報告した。しかし、その適用方法については、いまだ十分な評価がなされていないのが現状である。そこで、本章では、これまでに潤滑診断を実施して機器の劣化兆候を検出した研究事例を踏まえ、ポンプ設備の効率的かつ効果的な維持管理手法について報告するとともに、管理基準値の設定方法について考察する。

第Ⅵ章 農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム

潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する機能診断技術である。農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、短い間隔で状態監視することが効果的であるが、潤滑診断の間隔を短くすることは分析業務を専門機関に依頼する必要があることから、時間とコストが多く掛かるという課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、分析項目を選定した一次スクリーニングを実施することが可能である。そこで本章では、分析項目を選定した簡易な診断方法を適用して、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システムについて述べる。

第Ⅶ章 結言

本研究を通して得られた結論と知見をまとめて述べる。

第Ⅱ章 農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析

2.1 はじめに

基幹的な農業用ポンプ場は全国に2,800箇所以上あり、農地ばかりでなく地域の用水および排水を担う重要な施設になっている。しかし、標準耐用年数を超過したポンプ場が年々増加し、超過割合は施設数ベースで67.5%となっている（農林水産省農村振興局，2015）。したがって、今後、膨大な数のポンプ場の更新を一斉に行わなければならない事態が発生することが懸念される。

現在、農業用ポンプ設備の機能診断は、主として、土地改良区などの施設管理者による日常点検や、農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場（ポンプ設備）」（農林水産省農村振興局整備部設計課，2013）に基づいた数年に1回程度の定期的な点検の結果に基づいて実施されている。しかし、これらの点検は目視や触診・聴診が中心となり、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が少ないことから、劣化がある程度進行しなければ機能診断の必要性を把握できないなどの問題がある。そのため、一定の年数が経過すれば不具合が生じていない部品の交換を余儀なくされるなど維持管理の非効率化や、突発的な故障が生じた時点で高額な分解整備費用を施設管理者が負担しなければならない事態を招いている。こうした事態を避けるためには、供用年数を目安としたTBM（Time Based Maintenance：時間計画保全）を基本とする現行の保全方式に加え、施設の状態を的確に診断し、実際に性能が低下している施設から効果的に保守・保全する管理手法を確立する必要がある。この保全方式はCBM（Condition Based Maintenance：状態監視保全）と呼ばれ、火力発電設備（吉田・川畑，2014）や船舶機器（椎原ら，2014）における潤滑診断技術が報告されているなど、産業分野の機械設備では適用が進みつつある方式である。

一方、農業用ポンプ設備については、約70箇所の国営造成施設の補修記録の傾向を分析した報告（山下，2011）や、特定の地区を対象にポンプの突発的な運転停止を発生させる要因の変動特性を分析した報告（水間ら，2014）などがあるが、全国的な調査に基づきポンプ設備の劣化の進行形態を分析する研究は十分になされていない状況にある。

そこで本章では、土地改良区などで農業用ポンプ設備を管理する担当者への維持管理や故障の原因などに関するアンケート結果をもとに、ポンプ設備の劣化の特徴を明らかにするとともに、劣化の進行を未然に防ぐためのCBM適用の重要性について考察した。

2.2 研究対象の概要と調査方法

2.2.1 研究対象の概要

研究の対象とするポンプ場の抽出は各都道府県土地改良事業団体連合会に依頼し、口径300mm以上を目安と

して、供用開始後の経過年数（概ね10年、15年、20年、25年、30年以上）の異なる揚水機場を3箇所、並びに排水機場3箇所を各々選定した。東京都、神奈川県、富山県、和歌山県を除く43道府県の土地改良区などから合計227箇所のポンプ場についての回答があり、調査票の回収率は80.5%であった。これは、平成24年3月現在、受益面積が100ha以上の基幹的な農業用ポンプ場の総数2,887箇所（農林水産省農村振興局，2015）に対し、その約8%に相当する。その内訳は、揚水機場が107箇所、排水ポンプ設備は234基、排水機場は120箇所、排水ポンプ設備は289基であった。

2.2.2 調査方法

ポンプ設備の維持管理に関する実態や問題点などを把握するとともに、分解点検が行われた際の回転・摺動部における劣化状況に関するデータの収集を調査目的として、土地改良区などでポンプ場を管理する担当者に調査票への記入を求める形式でアンケート調査を実施した。この調査票は、①施設管理者および施設名称などの基本情報のほか、②ポンプ設備の型式や口径、揚程、設置年月などに関する情報、③分解点検に関する質問（Table 2-1）の構成とした。

なお、分解点検（定期整備）とは、ポンプ設備研究会（ポンプ設備研究会，2007）によれば、主として機器を分解して行う整備で、設備の故障、疲労、劣化などの防止および低下した機能を復元させることを目的とし、機器の用途により異なるが5～8年に1回実施することが望ましく、メーカーの診断によって損傷、摩耗、その他異常部分の補修、部品の交換を行うものであるとしている。定期整備はTBMであるが、ここでは分解点検の中に突発的な故障による緊急措置も含まれている。

2.3 調査結果

アンケート調査で得られた回答について分析した結果を以下に示す。

Table 2-1 分解点検に関する質問項目
Questionnaire about disassemble-check

質 問	選択または記述
分解点検の実績 その概算費用	有・無・不明 記述
分解点検時における「軸受部」の交換 不具合の内容を具体的に記入	有・無・不明 記述
分解点検時における「軸受部以外」の交換 不具合の内容を具体的に記入	有・無・不明 記述
ある一定の年数（あるいは運転時間） の経過に伴い分解点検を行う場合、 分解点検の周期を記入	記述
過去にあった機器の重大なトラブル 具体的な問題点について記入	有・無・不明 記述

2.3.1 ポンプ設備の施設情報

2.3.1.1 ポンプの型式と原動機の種類

揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備のそれぞれについて、アンケート調査で得られたポンプの型式別割合を Fig. 2-1 に、原動機の種類別割合を Fig. 2-2 に示す。揚水ポンプ設備では、渦巻ポンプが64.5%を占めており、原動機は全てに電動モータが使用されている。排水ポンプ設備では、斜流ポンプが60.9%となっており、揚水ポンプで多く使用されている渦巻ポンプはほとんど使用されていない。排水ポンプ設備の原動機は、電動モータとディーゼルエンジンがそれぞれ半数となっている。

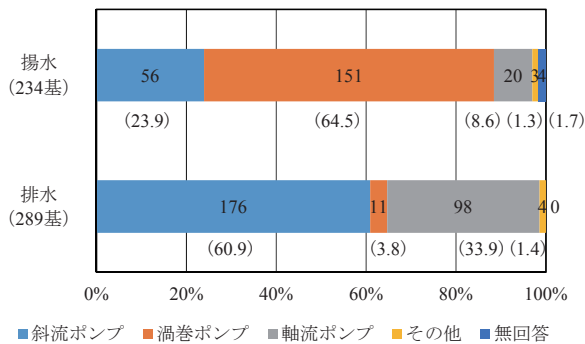


Fig.2-1 ポンプの型式別割合
Percentage according to the model of pump

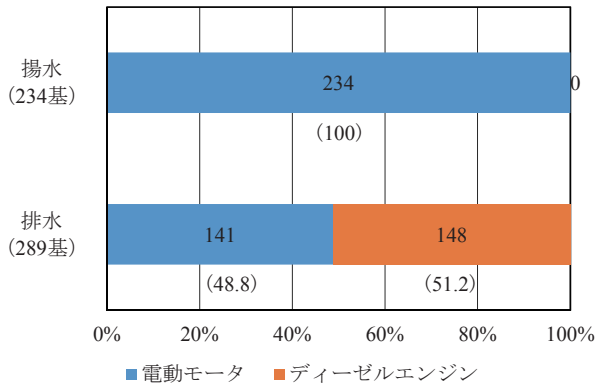


Fig.2-2 原動機の種類別割合
Percentage according to the kind of motor

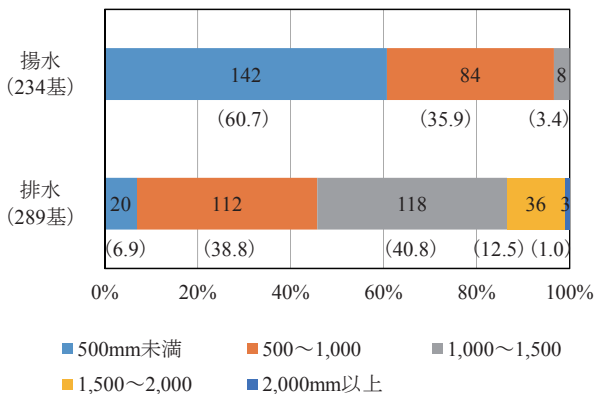


Fig.2-3 ポンプの口径別割合
Percentage according to the diameter of pump

2.3.1.2 ポンプの諸元

揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備について、口径別割合を Fig. 2-3 に、1基当たりの揚程と吐出量の関係を Fig. 2-4 に示す。

揚水ポンプは口径500mm未満が60.7%を占め、1,000mm以上は3.4%とわずかであった。揚程は10m以下から300mを超えるものまで種々であるが、吐出量は1m³/s未満が85.1%を占めていた。最大口径は1,400mmであり、吐出量4.7m³/s、揚程1.9mの軸流ポンプであった。

排水ポンプは口径1,000mm以上が54.3%と大きな割合を占める一方、500mm未満は6.9%とわずかであった。揚程は全てのポンプが10m以下であり、吐出量は1m³/s以上が78.7%を占めている。最大口径は2,200mmであり、吐出量10.3m³/s、揚程2.8mの斜流ポンプであった。

2.3.1.3 ポンプ設備の設置年代

調査票に設置年の記載があった揚水ポンプ設備205基と排水ポンプ設備216基について、設置年代別の台数を Fig. 2-5 に示す。ともに1980年代に設置されたものが多い。古いものでは、1950年代に設置され供用年数50年を

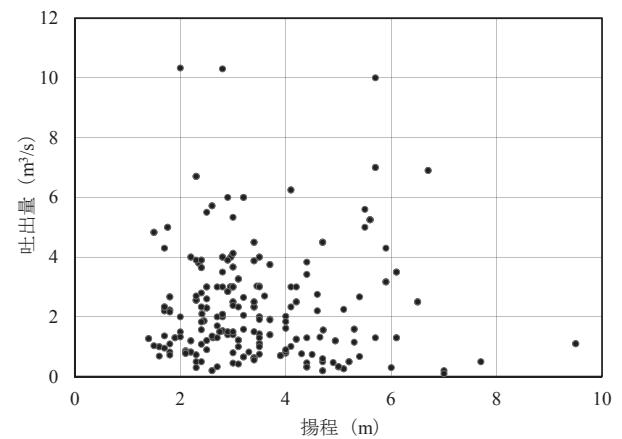
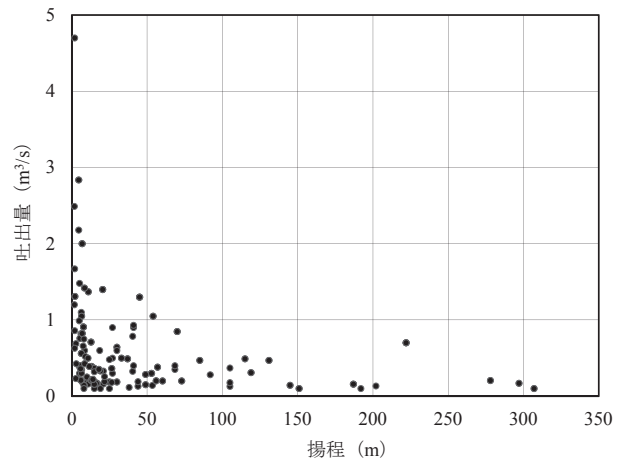


Fig.2-4 ポンプ設備の揚程と吐出量の関係
Relations of pump-head and discharge about pump facilities

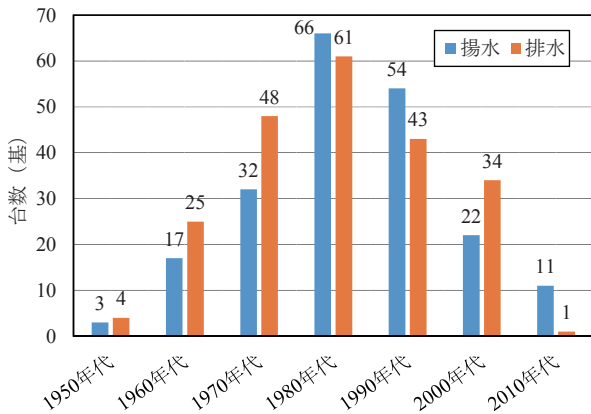


Fig. 2-5 ポンプ設備の設置年代別台数
Number according to the generation of pump facilities

超えるポンプ設備が7基あった。供用年数がポンプ設備の標準耐用年数である20年を超えるポンプ設備は285件(67.7%)であり、1.で述べた農林水産省のデータと同じ傾向となっている。

2.3.2 分解点検

ポンプ設備の分解点検の有無や、その際の軸受や部品交換の有無などをTable 2-2に示す。分解点検時点の概算費用に関する分布をFig. 2-6に示す。なお、ここで分解点検の概算費用には補修や整備の費用が含まれている。分解点検の周期についての分布をFig. 2-7に示す。

揚水ポンプ設備では178基(76.1%)が分解点検の履歴を有しており、さらに軸受の交換履歴は137基(58.5%)、軸受以外の交換履歴は122基(52.1%)とともに半数を超えていた。分解点検費用は500万円未満が58.8%であるが、1,000~5,000万円が21.9%と分解点検に高額な費用を要しているケースも少なくないことがわかる。揚水ポンプ設備は分解点検や軸受交換の履歴が多く、分解点検の周期は20年未満が86.1%となっている。

排水ポンプ設備では136基(47.1%)が分解点検の履歴を有しており、揚水ポンプよりも約3割少ない。軸受は74基(25.6%)、軸受以外の部品は92基(31.8%)とともに約3割の交換履歴があった。分解点検の概算費用は1,000~5,000万円が36.3%と最も多く、揚水ポンプと比較して高額な費用を要している。概算費用の最高額は5,000万円

であり、1971年に設置された口径2,100mmの斜流ポンプであった。分解点検の周期は20年以上が31.1%と揚水ポンプ設備に比べ周期が長いことが特徴であり、このなかには1968年に設置した排水ポンプ設備で周期が35年と36年との回答が含まれている。

2.3.3 不具合の内容

2.3.3.1 軸受の不具合

分解点検の際に軸受を交換した211基のうち、理由について具体的な記載があった59件の回答を分類すると、27件(45.8%)が摩耗によるものであった(Fig. 2-8)。摩耗は時間の経過によって進行する劣化であり、揚水ポンプでは摩耗による軸受の交換件数が21件と多かった。また、不具合はないものの定期整備補修にあわせて軸受の交換を行っているとの回答が10件(16.9%)あった。

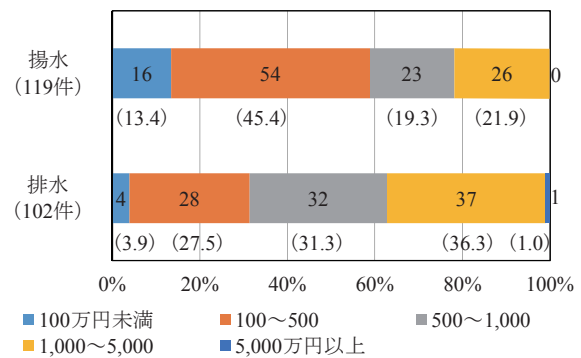


Fig. 2-6 分解点検の概算費用の分布 (1件当たり)
Distribution chart about cost of disassemble-check (per one)

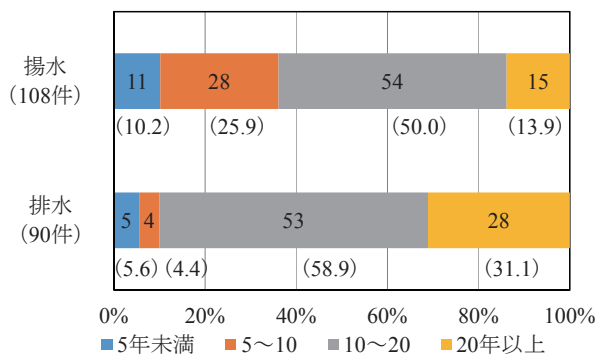


Fig. 2-7 分解点検の周期の分布
Distribution chart about period of disassemble-check

Table 2-2 ポンプ設備の分解点検や部品交換
Disassemble-check and exchanged parts of pump facilities

	分解点検			分解点検有のうち 軸受の交換			分解点検有の うち軸受以外の部品交換		
	有	無	不明	有	無	不明	有	無	不明
揚水 (234基)	178 76.1	51 21.8	5 2.1	137 58.5	24 10.3	17 7.3	122 52.1	29 12.4	27 11.5
排水 (289基)	136 47.1	141 48.8	12 4.1	74 25.6	37 12.8	25 8.7	92 31.8	25 8.7	19 6.6

(上段：基，下段：%)

2.3.3.2 軸受以外の部品の不具合

分解点検の際に軸受以外の部品を交換した214基のうち、理由について具体的な記載があった80件の回答を分類すると、不具合はないものの定期整備補修にあわせて部品の交換を行っているとの回答が11件(13.8%)あった。これ以外の69件の回答には複数の交換部品の記載があり、それら132項目をポンプや補機、原動機、減速機などの構成機器に分類した。その結果、88項目(66.7%)が回転・摺動部を有するポンプや原動機、減速機であることが分かった(Fig. 2-9)。特に、揚水ポンプ設備においては、インペラの摩耗13項目を含む65項目がポンプに集中していた。

2.3.4 機器の重大なトラブルとその分類

ここでは、重大なトラブルとは機器の不具合によって直ちにポンプ設備を停止せざるを得なかったケースとした。過去にあった機器の重大なトラブルに関する回答では、揚水ポンプが23件(9.8%)、排水ポンプが36件(12.5%)

と、ともに約1割が重大なトラブルを経験していた。機器の重大なトラブルについて、ポンプの設置年代別の件数と割合をTable 2-3に示す。設置年が2000年代以降の比較的新しいポンプ設備では、重大なトラブルの発生は1件とわずかであり、1990年代以前に設置されたポンプ設備ではトラブル発生の割合は高くなっている。なお、この分析では、トラブル発生の有無のみの回答を求めることとしたことから、発生年月は不明であり、また、複数回発生したとしても集計値は1回となる。

また、トラブルの内容について具体的な記載があった回答(44件)を構成部品などで分類し、その結果をFig. 2-10に示す。現象が多岐にわたり特定のトラブルに集約されないが、性能限界が突発的に発生する電気・制御部品を除き、時間の経過により性能が徐々に低下していく劣化進展型のモータ部品やエンジン、インペラ、軸受、歯車が多く見られる。

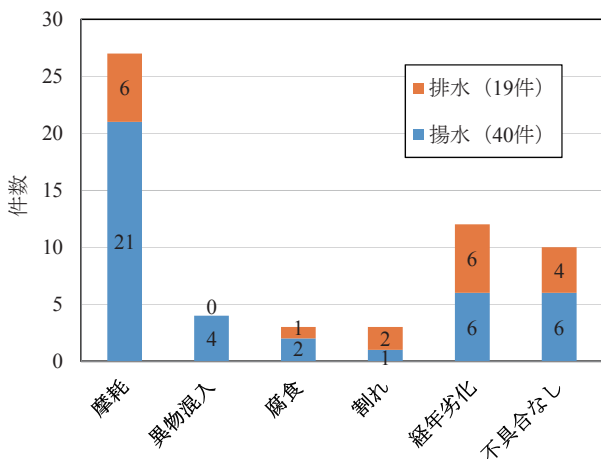


Fig.2-8 軸受の交換理由
Exchange reason of the bearing

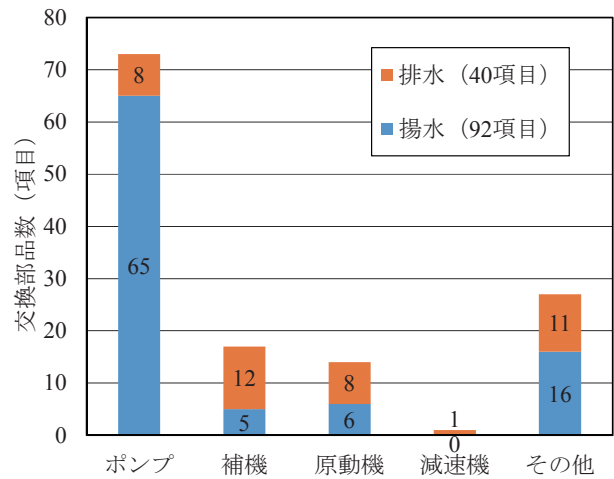


Fig.2-9 軸受以外の交換部品の構成機器
Apparatus of the exchanged parts except the bearing

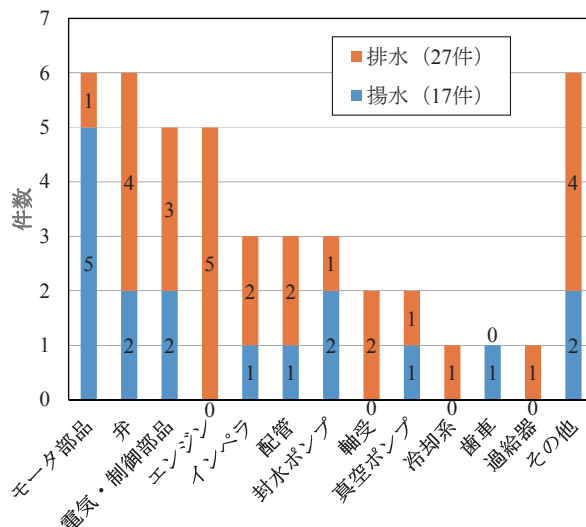


Fig. 2-10 機器の重大なトラブルの分類
Classification about the trouble of apparatus

Table 2-3 設置年代別のポンプ設備のトラブル件数と割合
Number and percentage about the trouble of pump facilities

年代	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
揚水ポンプ設置数	3	17	32	66	54	22	11
トラブル件数	0	4	9	6	4	0	0
比率 (%)	0	23.5	28.1	9.1	7.4	0	0
排水ポンプ設置数	4	25	48	61	43	34	1
トラブル件数	3	8	7	6	11	1	0
比率 (%)	75.0	32.0	14.6	9.8	25.6	2.9	0

2.4 考察

2.4.1 分解点検の分析結果から見た維持管理上の特徴

揚水ポンプ設備では、分解点検が行われた履歴を有する割合が排水ポンプ設備に比べて約3割高くなっており、分解点検周期は排水ポンプ設備よりも短くなっていった。また、揚水ポンプ設備では軸受および軸受以外の部品を交換した割合がとともに5割を超えていたが、排水ポンプ設備ではそれらの交換割合は約3割であった。これらは、揚水ポンプ設備の稼働時間が排水ポンプ設備よりも長いことから、摩耗などの劣化が進行したことによると考えられる。調査研究で得られたポンプ設備の稼働時間の事例では、排水ポンプ設備（23基）の年稼働時間の平均が444時間に対し、揚水ポンプ設備（17基）はその4.8倍の2,136時間であった（第I章参照）。機能診断の頻度を検討する際にポンプ設備の稼働時間は重要な情報となる。

一方、分解点検を行ったが結果として軸受や部品の交換を行っていないとの回答が約1割、また、不具合はないものの分解点検にあわせて部品交換を行っているとの回答が1割を超えていた。これらは、部品の劣化の進行は一様ではないことから、劣化による故障防止のために分解点検や部品交換を定期的に行うというTBMの考え方による対応である。

CBMの考え方に基づき、農業用ポンプ設備を対象として回転体振動値により部品の劣化状態を把握する簡易機能診断技術の適用が試みられている（末政ら，2009；酒井ら，2011；蒔苗・西田，2012）。また、筆者らは、ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤（潤滑油やグリース）を採取・分析する機能診断技術を適用することによって、ポンプ設備を分解することなく、摩耗や異物混入、腐食などの不具合の兆候を早期に検知することが可能であると報告している（國枝ら，2014）。これらの機能診断技術を用いて部品の劣化状態を定量的に把握することにより、ポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となると考える。

2.4.2 部品の不具合の診断と重大なトラブルの防止対策

軸受の不具合の原因の多くが摩耗によるものであり、これは時間の経過によって進行する劣化である。また、機器の重大なトラブルでは、性能が徐々に低下していく劣化進展型の部品の故障が数多く見られた。したがって、

突発的な故障の防止を図るには、部品の劣化を状態監視することにより異常な振動や発熱、異音が発生する前に、ポンプ設備の補修を行うことが重要であると考えられる。

軸受以外の交換部品の66.7%を占めているポンプ・原動機・減速機は、回転・摺動部で構成された装置である。ポンプ設備は装置の集合体であり、軸受以外の部品に不具合が生じた場合に軸振れや片当たりなどによって軸受の摩耗が発現する事例が報告されている（農林水産省農村振興局整備部設計課，2014）。

これらのことから、ポンプ設備の重大なトラブルを防止するためには、部品の劣化を定量的に診断することによって劣化の度合いが許容範囲を超える前の時点で補修を行うなど、ポンプ設備におけるCBMの適用が効果的であると考えられる。

2.4.3 故障の地域的な分布

揚水および排水ポンプ設備に関し、気候差等により故障が発生し易い地域が限定されているか否かを確認するため、重大なトラブルを経験したとの回答のあった都道府県の分布を地図上で示した（Fig. 2-11）。これを見ると故障の発生は地域に偏りが無いことが分かる。その理由の一つとして、ポンプ設備は建屋の中に設置され温度や湿度への対策が施されていることから、気候の影響を受けにくいことが考えられる。このことから、ポンプ設備

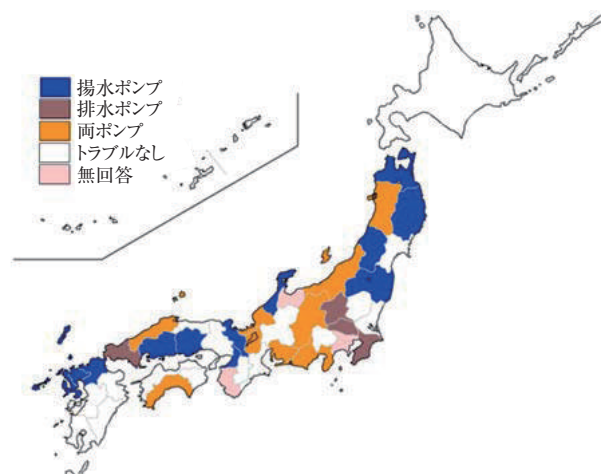


Fig. 2-11 ポンプ設備の故障に関する地域的な分布
Regional distribution about the trouble of pump facilities

の故障に関する調査を実施する際に対象地域を限定する必要はなく、また、調査で得られた結果は全国のポンプ設備に共通であると考ええる。

2.5 まとめ

本研究では、農業用ポンプ設備の維持管理に関する現状や課題などを把握するためにアンケート調査を実施した。調査対象としたポンプ設備の型式による性能の特徴として揚水ポンプの型式は高揚程の渦巻ポンプが多いのに対し、排水ポンプは低揚程の斜流ポンプが多くなっている。原動機の種類は、揚水ポンプ設備では全設備が電動機であったのに対し、排水ポンプ設備では電動機とディーゼルエンジンが半数ずつとなっている。また、双方ともに1980年代に設置されたものが最も多く、設備更新時期が近年に集中することが想定され、農林水産省が示すデータと同じ傾向となっている。アンケート調査を分析したその結果、以下のことが明らかになった。

(1) 分解点検が行われた履歴を有する割合は、揚水ポンプ設備が排水ポンプ設備に比べて高くなっていた。揚

水ポンプ設備の軸受および軸受以外の部品について交換した割合はともに5割を超えており、排水ポンプ設備ではそれらの交換割合は約3割であった。これらは、揚水ポンプ設備の稼働時間が排水ポンプ設備よりも長かったことから、摩耗などの劣化が進行したと考えられる。

- (2) 軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであった。軸受以外の交換部品の66.7%をポンプ・原動機・減速機が占めていた。また、機器の重大なトラブルでは、性能が徐々に低下していく劣化進行型の部品の故障が数多く見られた。
- (3) 気候差などにより故障が発生し易い地域が限定されているか否かを確認したところ、ポンプ設備の故障には発生する地域に偏りはないことが分かった。
- (4) ポンプ設備の重大なトラブルを防止するためには、部品の劣化が進行する前の適期に補修を行うなど、ポンプ設備におけるCBMの適用が効果的であると考えられる。

第三章 農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性

3.1 はじめに

近年、農業用ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤を採取・分析し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受など回転機械の摩耗状態を把握する機能診断技術（以下、「潤滑診断」という）が報告されている（國枝ら，2014）。しかし、潤滑診断は最近始められたばかりで農業水利施設の機能診断技術として位置付けられていないことから、農業用ポンプ設備の国の基準などに管理基準値は設定されていないのが現状である。

潤滑剤の劣化の要因には、酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因（水分、塵、異物混入など）によるものがある。潤滑油の粘度は劣化や異種油混入の有無などの判定に用いられる指標である。また、グリースの硬さの尺度であるちょう度は、物理的な劣化度の評価に用いられる指標である（小宮，2012）。そこで本章では、研究調査で得られた潤滑剤の分析データ（川畑ら，2015）の中から潤滑油の粘度およびグリースのちょう度に着目し、それらの分析結果から潤滑油やグリースの劣化特性について明らかにするとともに、管理基準値の設定方法を考察する。

3.2 潤滑剤の役割

本章で分析の対象とする潤滑剤は、潤滑油とグリースである。潤滑油は基油と添加剤から構成されており、基油には原油を精製して製造された鉱油、PAO (Poly- α -Olefin) や脂肪酸エステルなどの化学合成油などが用いられる。基油だけでは足りない性能を高めるために、用途に応じてさまざまな添加剤が加えられている。グリースは、潤滑油（基油）に増ちょう剤を分散させて半固体または固体状としたものである。

潤滑剤には用途に応じた性能を付与するため、適正な基油の選定や添加剤の配合が行われており、新油に要求される性状や性能については用途に応じて JIS 規格が制定されている。しかしながら、使用油に関しては公的な規格が明示されていないのが現状である。これは、使用油の管理基準が使用条件（装置の種類、運転条件、給油方法など）に左右され、一義的に決めるのが困難なためである（柴田，1994）。

農業用ポンプ設備の回転・摺動部に使われている潤滑剤は、①潤滑作用、②冷却作用、③清浄作用、④さび止め作用、⑤密封作用、⑥動力伝達作用（例、油圧作動油）、⑦防塵作用（例、グリース）などの重要な役割を果たしている。劣化に伴い潤滑剤本来の性能が低下してくるとポンプ設備の故障につながることになる。潤滑剤の作用を十分に発揮させ、ポンプ設備を正常に稼働させるためには、分析項目や点検間隔を定め潤滑剤を適切に管理し、その性状がどのように変化したかを知ることが大切であ

る。潤滑剤の状態を適正に管理することにより、機械の異常や故障を未然に防いだり、劣化の進行を抑えたりすることができる（日本トライボロジー学会，2006a）。

3.3 対象設備と分析方法

3.3.1 対象とする設備と試料

平成 24 年度から 27 年度の 4 年間で、千葉や新潟、石川、愛知、滋賀、沖縄の 6 県の排水機場 19 箇所および揚水機場 7 箇所において、ポンプ設備 61 基の軸受や減速機、電動機から潤滑油 113 試料とグリース 29 試料を採取し、潤滑診断を実施した。

3.3.2 分析方法

潤滑診断で実施した分析項目のうち、潤滑剤の性状を調べるために本研究で用いた分析項目および適用規格を Table 3-1 に示す。潤滑油の粘度に係る管理基準の目安は、潤滑油使用機械の重要度「普通」を適用し、新油の粘度からの変化率 $\pm 15\%$ （日本トライボロジー学会，2001c）を採用した。また、グリースのちょう度に係る管理基準の目安は、新グリースからの変化率 $\pm 20\%$ （日本トライボロジー学会，2006a）を用いた。

赤外線吸収スペクトル法（Infrared Absorption Analysis：IR）は、赤外線の領域に現れる物質の吸収スペクトルを

Table 3-1 分析項目および適用規格
Analysis items and specifications

分析項目	適用規格	分析の内容
潤滑油の粘度	JIS K 2283	油の動粘度（40℃）を測定する。
グリースのちょう度	JIS K 2220	グリースの見かけの硬さを表す数値
赤外線吸収スペクトル法（IR）	JIS K 0117	油が酸化することにより発生するカルボン酸を主に測定する。
金属濃度分析	ICP 発光分光分析	油中の金属元素と含有量を測定することにより、回転・摺動部の摩耗状態などを評価する。

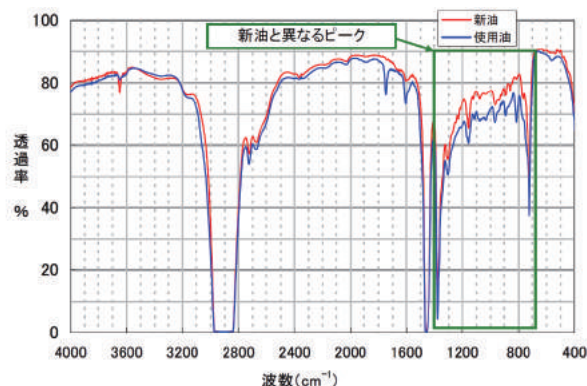


Fig. 3-1 潤滑診断の IR チャート（一例）
IR-chart in oil analysis (an example)

用いる分析法であり、潤滑剤の基油のタイプ分析や添加剤の分析、劣化の確認などに使用されている(河野, 1960)。その分析による潤滑油のIRチャートをFig. 3-1に例示する。波数 $650 \sim 1,300\text{cm}^{-1}$ は細かい吸収が多数みられる指紋領域と呼ばれ、そのパターンは物質に固有のものとなる。このパターンが新油と一致していれば同じ油種であるが、本例では新油と吸収スペクトルのピークが一致しないことから油名が異なる、もしくは異種油の混入の可能性があると判定する。

3.4 分析結果

3.4.1 潤滑油

潤滑油113試料の分析結果をTable 3-2に示す。赤外線吸収スペクトル法(IR)の分析により新油と吸収スペクトルのピークが一致しない潤滑油が29試料(25.7%)、また、金属濃度分析により新油と異なる添加剤成分を検出した潤滑油が7試料(6.2%)であった。これらの合計36試料(31.9%)は異種の潤滑油が混入している、もしくは聞き取りを行った潤滑油の製品名称が異なるなど、3分の1の潤滑油が正しく管理されていないことを示している。これら36試料を除外し、77試料(68.1%)を対象として潤滑油の粘度の変化率を算出した。粘度の変化率についての算定結果をFig. 3-2に示す。変化率は全て管理基準の目安($\pm 15\%$)に収まっており、粘度においては潤滑油

の性状は劣化していないと評価した。

一方で、除外した36試料のうち、6試料は粘度の測定値が記録されていた新油値と比較して高い値(+15%以上)、1試料が低い値(-15%以下)を示していた。これら7試料は潤滑油が劣化している可能性がある。

3.4.2 グリース

グリース29試料の分析結果をTable 3-3に示す。赤外線吸収スペクトル法(IR)の分析により新油と吸収スペクトルのピークが一致しないグリースが10試料(34.5%)であった。これらの10試料は異種のグリースが混入している、もしくは聞き取りを行ったグリースの製品名称が異なるなど、3分の1のグリースが正しく管理されていないことを示している。これら10試料を除外し、19試料(65.5%)を対象としてグリースのちょう度の変化率を算出した。ちょう度の変化率についての算定結果をFig. 3-3に示す。変化率は13試料(68.4%)が管理基準の目安($\pm 20\%$)に収まっており、6試料(31.6%)についてはちょう度において性状が劣化していると評価した。また、揚水ポンプ設備から採取したグリース10試料は全て軟化の傾向を、排水ポンプ設備から採取した9試料のうち8試料が硬化の傾向を示していた。

一方で、除外した10試料のうち、5試料はちょう度の測定値が記録されていた新油値と比較して高い値(+

Table 3-2 潤滑油の分析結果
Analysis of lubricating oil

項目	試料数 (%)
採取した試料	113 (100)
IRでピークが一致しない試料	29 (25.7)
異なる添加剤成分を検出した試料	7 (6.2)
新油値との変化率を求めた試料	77 (68.1)

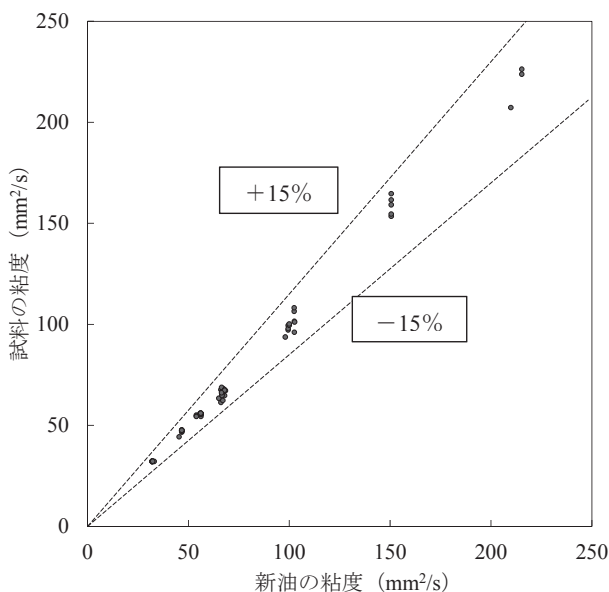


Fig. 3-2 潤滑油の粘度の変化率 (77 試料)
Change rates of the viscosity about lubricating oils (77 samples)

Table 3-3 グリースの分析結果
Analysis of grease

項目	試料数 (%)
採取した試料	29 (100)
IRでピークが一致しない試料	10 (34.5)
新油値との変化率を求めた試料	19 (65.5)

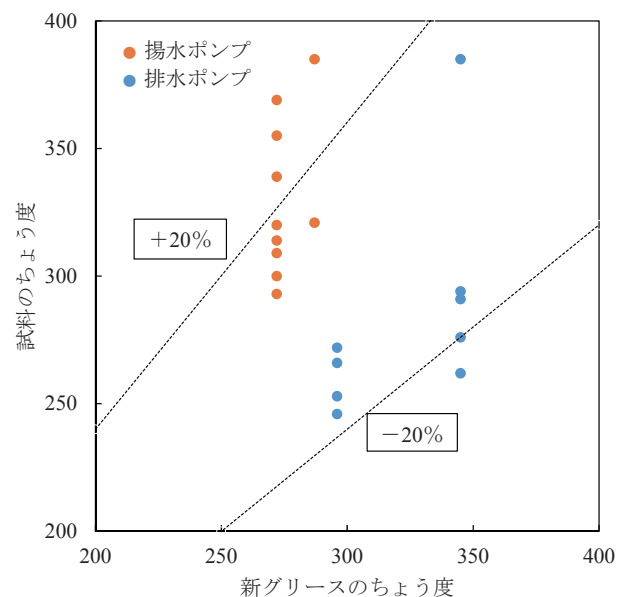


Fig. 3-3 グリースのちょう度の変化率 (19 試料)
Change rates of the consistency about grease (19 samples)

20%以上)を示していた。これら5試料はグリースが劣化(軟化)している可能性がある。

3.5 考察

3.5.1 潤滑油の粘度の劣化傾向

一般的に、劣化傾向にある潤滑油では粘度や酸価が増加し、界面張力が低下することが知られている(日本トライボロジー学会, 2001a)。粘度が変化する要因については、酸化劣化や添加剤の消耗・変質、外部からの異物混入、異種油の混入などが挙げられる。粘度低下による影響としては焼き付きの危険性が、また、上昇した場合には摩擦抵抗の増大による動力損失の増加が考えられる(柴田, 1994)。

Fig. 3-2 に示すように、潤滑油 77 試料における粘度の変化率は最小値 - 7.2% から最大値 + 9.4% の間に収まっており、劣化がほとんどみられない。適正に管理された潤滑油における粘度の変化率の幅が狭く良好な状況にあることから、潤滑油の粘度の劣化傾向を見出せなかった。参考となる指標として、潤滑油の物理的性状を示す酸価と水分、IR チャートを確認したところ、最大値と最小値を示した試料ともに良好の範囲であった。

3.5.2 グリースのちょう度の劣化傾向

グリースの劣化が進行すると、潤滑性能が低下して軸受の摩耗を促進させ、音や振動が大きくなり、最終的には軸受は回転できなくなる。グリースの劣化は、酸化劣化や回転による機械的なせん断、外部からの異物などの混入により、その成分や性状が変化して、グリースの潤滑性能は時間の経過とともに低下する(日本トライボロジー学会, 2001a)。Fig. 3-3 に示すように、グリースの硬さの尺度であるちょう度の変化率は最小値 - 24.1% から最大値 + 35.7% の間にあり、排水ポンプ設備のグリースは硬化(-側)の傾向を示し、揚水ポンプ設備のグリースは軟化(+側)の傾向を示していた。研究調査で得られたポンプ設備の稼働時間の事例では、排水ポンプ設備(23基)の年稼働時間の平均が444時間に対し、揚水ポンプ設備(17基)はその4.8倍の2,136時間であった(第I章参照)。このことから、稼働時間が比較的長い揚水ポンプでは増ちょう剤のせん断による軟化が、稼働時間の短い排水ポンプでは酸化劣化による硬化が生じた可能性がある。グリース選定のためにはポンプ設備の使用状況(年稼働時間)が重要な指標のひとつになると考えられる。

なお、排水ポンプ設備のグリースは硬化する傾向にあったが、管理基準値内ではあるものの1試料が軟化(ちょう度385)していた。本試料については、他の物理的性状(滴点、酸価、水分)は良好の範囲にあり、かつ、ポンプ設備の年間稼働時間は166時間と少なく、劣化要因を特定することは困難であった。

3.5.3 管理基準値との比較に対する現状の考察

今回の分析結果では、潤滑油の粘度の変化率は全て管理基準の目安(±15%)よりも厳しい値(±10%)を満足しており、粘度においては劣化していないと評価した。一方、グリースのちょう度の変化率は31.6%の試料が管理基準の目安(±20%)を超過しており、ちょう度において性状が劣化していると評価した。潤滑剤はポンプ設備を円滑に作動させるうえでなくてはならないものである。現在、潤滑剤については日常点検のなかで簡易な目視観察が実施されているが、それに加えて定期的に潤滑剤の性状を分析してその劣化状況を把握し、管理基準値を超えている場合には早めに新油と交換するなどの対策を講じる必要がある(國枝, 2014; Kunieda, 2015)。そこで、潤滑剤を用いた潤滑診断の実用化を図るためには、農業用ポンプ設備に適した管理基準値の設定が重要である。ここで、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなることから、農業用ポンプ設備の潤滑診断の実測データを集積することにより、実状に即した適切な管理基準値を設定することが必要となる。

さらに、管理基準値は対象とする施設の重要度に応じで設定する必要がある。農地だけでなく地域の排水を担う排水機場では、故障によるポンプ設備の停止が地域の生活に大きく影響を与える場合がある。このような施設の場合には管理基準値を潤滑油使用機械の重要度「高い」を適用し、例えば潤滑油の粘度であれば新油値からの変化率±10%(日本トライボロジー学会, 2001c)と厳しく設定することで整備点検の頻度を高め、異常兆候の早期検出が可能となると考える。

3.5.4 ポンプ設備の故障を防止する方策

本章で明らかになった課題は、潤滑剤の製品名称が正しく管理されていないなどの試料の割合が、潤滑油31.9%、グリース34.5%といずれも高かったことである。潤滑剤の性状を分析した結果、適正に管理された潤滑剤は著しい劣化が認められない一方で、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認された。潤滑剤に関わるポンプ設備の故障を未然に防止するためには、従来の油量や油温、漏洩の管理に加えて、保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理記録に残すことが重要であると考えられる。

3.6 まとめ

本章では、農業用ポンプ設備で使用される潤滑剤の性状(粘度、ちょう度)を分析して得られた結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 適正に管理された潤滑油は、粘度の変化率の幅が狭く良好な状況にあることから、劣化の傾向を見出せなかった。
- (2) 揚水ポンプ設備のグリースは軟化の傾向を、排水ポン

プ設備のグリースは硬化の傾向を示していた。グリース選定のためには、ポンプ設備の使用状況（年稼働時間）が重要な指標のひとつになる。

(3) 農業用ポンプ設備に適した管理基準値の設定が重要である。ここで、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなることから、実状に即した適切な管理基準値を設

定しなければならない。さらに、管理基準値は対象とする施設の重要度に応じて設定する必要がある。

(4) 潤滑剤の性状を測定した結果、潤滑剤の製品名称を正しく記録するなど適正に管理されている潤滑剤は著しい劣化が認められない一方、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認された。

第IV章 実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験

4.1 はじめに

農業用ポンプ場は、農地ばかりでなく地域の用水や排水を担う重要な施設となっている。それらの多くが更新の時期を迎えているものの、ポンプ設備の劣化の進行を評価するための情報が不足している現状にある。水間ら(2014)は、長期に供用されている農業用ポンプ場を対象として、整備補修記録をもとにポンプの運転停止要因を分析し、突発的な運転停止を回避する観点から異常の兆候を早期に把握する取り組みを強化し劣化した部品を適期に交換する必要があると報告している。

産業プラントにおけるメンテナンス方式は、一定期間毎に点検を実施する時間計画保全 (Time Based Maintenance : TBM) が従来からの主流であるが、近年では稼働している機械装置の状態を監視し、その情報に基づいて保守を行う状態監視保全 (Condition Based Maintenance : CBM) へと保全方式が移行しつつある。特に機械設備のメンテナンスの現場においては、回転機械の主要な故障原因である軸受の損傷や異常を的確かつ早期に検出する状態監視診断技術として、振動法や温度法、AE (Acoustic Emission) 法、超音波法、油中摩耗粒子分析などがよく用いられている (若林・間野, 2014; 本田, 2014)。例えば、振動法には、回転体振動値 (振動加速度) を計測することにより異常の程度を判断する簡易診断法と、その計測結果に応じて異常の部位を特定し有効な対策を決定する精密診断法がある。温度法は、回転機械の温度上昇が軸受の焼付きなどの前兆現象であることを利用し、温度計や温度センサによる常時監視を行う方法である。潤滑油中の金属摩耗粒子を調べることで機械の状態を推測する方法としては、フェログラフィー法や金属濃度分析 (Spectrometric Oil Analysis Program : SOAP 法) が代表的である (日本トライボロジー学会, 2001b)。

農業用ポンプ設備を対象として、近年、振動加速度により部品の劣化状態を把握する簡易機能診断手法の適用が試みられている (末政ら, 2009; 蒔苗・西田, 2012)。また、ポンプ設備の回転・摺動部から潤滑剤 (潤滑油やグリース) を採取し油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受など回転機械の摩耗状態を把握する手法 (以下、「潤滑診断」という) が報告されている (國枝ら, 2014)。これらの手法を用いて部品の劣化状態を定量的に診断することにより、分解点検や補修の適切なタイミングを判断する技術を示しているが、これらの報告では診断技術の有効性が十分検証されていない。

これらの診断技術を検証することを目的として、回転機械の劣化促進試験による検証がこれまでに行われている。実機を用いた試験方法は稼働している機械設備の劣化兆候を検出する技術検証となることから、設備の保守管理や機能診断に資するものとなる。例えば、赤垣らは、

水力発電機のすべり軸受を用いて潤滑油を排出する手法で摩耗試験を実施しており、軸受の挙動について軸変位および軸振れを非接触変位計で、また軸受温度を熱電対で監視し、損傷過程をフェログラフィー法と SOAP 法を用いて解析を行っている (赤垣ら, 1991)。また、川畑 (2010) は、潤滑油をヒータで昇温し油の粘性を下げた過酷な状態をつくる手法で実機のすべり軸受を用いて摩耗試験を行い、発生した金属摩耗粒子から潤滑状態の評価を行っている。しかし、ポンプ設備の損傷を引き起こす複数の要因を想定して劣化促進試験を行い、多角的に劣化兆候を検出して、金属摩耗粒子の形態を観察した事例は報告されていない。

摩耗は一般に、アブレシブ (切削型) 摩耗と凝着摩耗に分類される。アブレシブ摩耗 (切削型) は、潤滑油中に混入した堅い異物が柔らかい金属の表面に食い込み、その表面から一部が突き出て対面する金属を削り、切削型摩耗粒子を発生させる摩耗であるとされている (松本・Rotondi, 1980)。凝着摩耗は、摩耗する表面間の凝着と、凝着部の破断によって真実接触部の一部がちぎれて相手面に移着することを起源とする摩耗である。微細な粒子が摩耗の進行に伴い摩擦面で集合して成長する過程を経て、その脱落によって凝着摩耗粒子が生成すると報告されている (三科ら, 1979; 三科ら, 1996; 三科ら, 2003)。これらに加え、過酷な摩擦条件あるいは2面間に電流が流れる場合など摩擦面が高温になる条件下では、溶融摩耗が発生する。溶融摩耗は、固体表面の一部が溶融するために起きる摩耗である。表面の一部が溶融した後再び凝固するため、摩耗粒子は球状になることが多い。川畑 (2004) は、水力発電機のすべり軸受を用いて交流電源装置で印加して溶融摩耗試験を実施し、球状粒子の発生を電子顕微鏡で確認している。これら3種類の金属摩耗粒子と、良好な潤滑状態で発生する正常摩耗粒子の形態の分類と発生原因を一覧表にして、Table 4-1 に示す。

そこで本章では、実機を用いて摩擦面にアブレシブ (切削型) と凝着、溶融の3種類の摩耗を人為的に発生させ、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融の現象を再現する劣化促進試験を実施した。劣化促進試験中に、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察して機器の劣化状態を迅速に把握しながら、その時の振動加速度や温度の変化、潤滑油中に含まれる金属摩耗粒子の増加数の計測を行い、ポンプ設備の劣化兆候に対する応答特性を求めた。さらに、損傷を起こす要因として想定した3種類の摩耗現象を確認するとともに、潤滑診断の状態監視保全への適用について考察を行った。

4.2 試験対象の概要

劣化促進試験は、1976年に製造され、廃棄が予定されている回流発生装置用ポンプ設備を用いて実施した。ポ

Table 4-1 金属摩耗粒子形態の分類と発生原因
Classification and the origin of metal wear particles

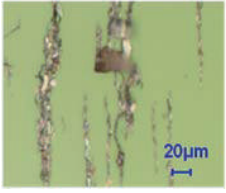
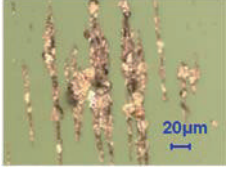
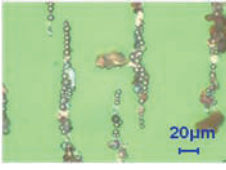
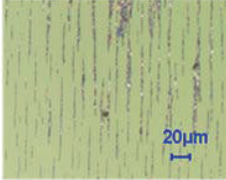
分類	発生原因等	摩耗粒子例
アプレシブ 摩耗粒子	硬い固体または硬い粒子の介在による削り, または, ひっかき作用による摩耗。三日月形やコイルスプリング状の粒子。	
凝着 摩耗粒子	接触面が摩擦によって互いに凝着し, 固体表面からの脱落または移着によって不規則な表面が生じる。微細な粒子の結合。	
熔融 摩耗粒子	接触する2物体間に電流が流れる際に, 接触面間に起きる放電による摩耗。粒子は球状。	
正常 摩耗粒子	機械が正常なすべり摩耗をしている際に発生する。微細な薄片状の粒子。	

Table 4-2 減速機と軸受の諸元
Specifications of speed reducer and bearings

名称	規格
減速機	はすば歯車 ギヤ比 5.769 : 1
減速機の 転がり軸受	自動調心ころ軸受 22318 内径・外径・幅 90 × 190 × 64mm
電動機の 転がり軸受	深溝玉軸受 6312 内径・外径・幅 60 × 130 × 31mm
冷却水ポンプの すべり軸受	材質 ホホワイトメタル 直径・幅 25 × 55mm

ンプ設備の外観と構成を **Fig. 4-1** に示す。主ポンプは横軸斜流型であり, 主な仕様は口径 900mm, 全揚程 4.2m, 揚水量 100m³/min である。

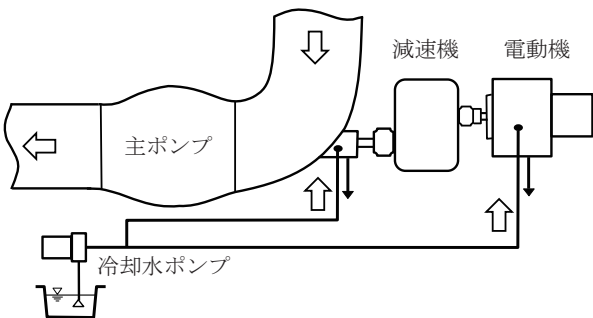
試験は, このポンプ設備の減速機のギヤおよび転がり軸受, 電動機の転がり軸受, 冷却水ポンプ主軸のすべり軸受を対象とした。減速機と軸受の諸元を **Table 4-2** に示す。なお, 冷却水ポンプは横軸遠心型であり, 主な仕様については口径の記録がなく, 全揚程 15m, 揚水量 0.1m³/min であった。

4.3 試験方法

本章では, ポンプ設備の軸受や歯車を対象として劣化の初期段階から損傷に至る劣化促進試験を実施した。試験により, アプレシブ(切削型)摩耗と凝着摩耗, 熔融摩耗の3種類の摩耗を回転・摺動部に人為的に発生させて, その時の温度や振動加速度, 潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の形態や個数, サイズを監視項目として測定した。監視項目とその測定装置を **Table 4-3** に示す。試験前に, ポンプ設備の潤滑油およびグリースを新品に交換して, ギヤや軸受の定常状態の値を測定した。試験中は, 劣化状態を迅速に把握するために, 回転式フェログラフィー装置(安部田・川畑, 2013)を用いて金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡で観察した。試験後, 採取した試料を分析室に持ち帰り, 分析フェログラフィー法を実施して金属摩耗粒子の形態とサイズを光学顕微鏡ならびに電子顕微鏡で観察して画像に記録した。



(a) 外観



(b) ポンプ設備の構成

Fig.4-1 横軸斜流ポンプ
Horizontal axis type mixed flow pump

Table 4-3 監視項目と測定装置
Monitoring item and measuring device

監視項目	単位	測定装置
金属摩耗粒子数と粒度分布	個 /100mL	微粒子計数装置 (Particle MATE)
金属摩耗粒子の形態やサイズ	μm	分析フェログラフィー法で計測
温度	℃	J 熱電対
振動加速度	mG	振動センサ (周波数帯域 5Hz ~ 5kHz)
回転数	r/min	回転計 (非接触式)
印加電圧	V	オシロスコープ

4.3.1 アブレシブ摩耗試験

硬い粒子の介在による削りまたは引っ掻き作用を起こして、アブレシブ摩耗を電動機の転がり軸受に発生させた。軸受に硬い異物が混入した状態を人為的に作り出すために、調合した試験用粉体をグリースに混入し、異物濃度が異なる3種類(100mg/L, 1,000mg/L, 6,100mg/L)の異物混入グリースを事前に作製した。試験用粉体は、通常環境に存在する粉じんの代表的なものを標準化して粒子径分布を規定・調整された粉体であり、粉じんに係わる各種装置の性能試験などに使用される。試験に用いたJIS試験用粉体1の仕様と調合割合をTable 4-4に示す。

Fig. 4-2に示すように、試験は電動機の回転数を1,500r/minで一定とし、電動機のグリースニップルから軸受に異物を混入していない新しいグリースの給脂を行い、続けて3種類の異物混入グリースを低濃度のものから高濃度のものの順に給脂を行った。軸受の振動加速度は、軸受が組み込まれたケーシング上部表面に振動センサを貼り付け垂直方向振動を、温度はケーシング上部表面に熱電対を貼り付けて軸受温度を測定した。それぞれの異物濃度で3分毎に3回以上の給脂を繰り返し、排脂口から排出されたグリースを採取して、グリースに含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを観察した。なお、グリース潤滑の軸受は、試験前に発生した金属摩耗粒子を取り除くことが困難であることから、試験前に充填されていたグ

Table 4-4 試験用粉体の仕様と調合割合
Specifications of powders for examinations and compounding ratio

名称	JIS 試験用粉体 1 (JIS Z 8901)		
使用材料	関東ローム (800℃で焼成し、その後、粒度調整)		
特徴	粉じんを想定して標準化したもの、土ほこり		
種別	7種	8種	11種
中位径の範囲 (μm)	27 ~ 31	6.6 ~ 8.6	1.6 ~ 2.3
調合割合	7種 : 8種 : 11種 = 1 : 1 : 1		

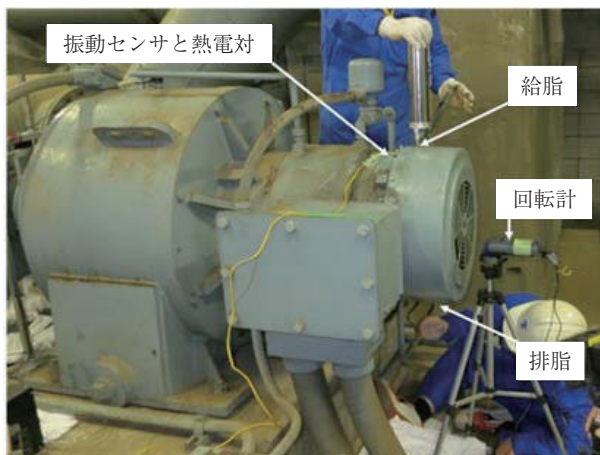


Fig.4-2 電動機軸受を対象としたアブレシブ摩耗試験
Abrasive wear test for the bearing of motor

リースに含まれる既存の金属摩耗粒子を観察した。また、排出されたグリースには金属摩耗粒子が均等に含まれていないことから、金属摩耗粒子数は計測の対象外とした。

4.3.2 凝着摩耗試験

接触面が摩擦によって互いに凝着し、固体表面からの脱落または移着によって不規則な表面が生じる凝着摩耗を冷却水ポンプ主軸のすべり軸受に発生させた。試験前に発生した金属摩耗粒子や混入した異物を取り除くため油槽の清掃を行い、新油(55mL)を充填した後、ろ過器を用いて油槽の浄化を行った。油槽ドレインから潤滑油を排出することで、すべり軸受の潤滑油量を減少させ徐々に油膜を薄くし、主軸と軸受を接触させて凝着摩耗を発生させた。軸受の振動加速度は、軸受が組み込まれたケーシング上部表面に振動センサを貼り付け垂直方向振動を、温度はケーシング油面計接続口から熱電対を差込み油槽底部の油温を測定した。また、Fig. 4-3に示すように、油槽から排出する潤滑油を微粒子計測装置を通過させることで、油中の金属摩耗粒子数を計測できるようにした。試験は、ポンプ主軸の回転数を1,500r/minで一定とし、15分間運転した後、主軸の油槽ドレインから潤滑油を4分毎に3mLずつ排出して採油瓶で採取し、潤滑油に含まれる金属摩耗粒子の形態とサイズを観察した。

4.3.3 溶融摩耗試験

ポンプ主軸と減速機のケーシングとの間に電圧を印加して放電を起こし、溶融摩耗を減速機内部のギヤおよび転がり軸受に発生させた。減速機に設置した測定装置をFig. 4-4 (a)に示す。試験前に減速機の上蓋を取り外して

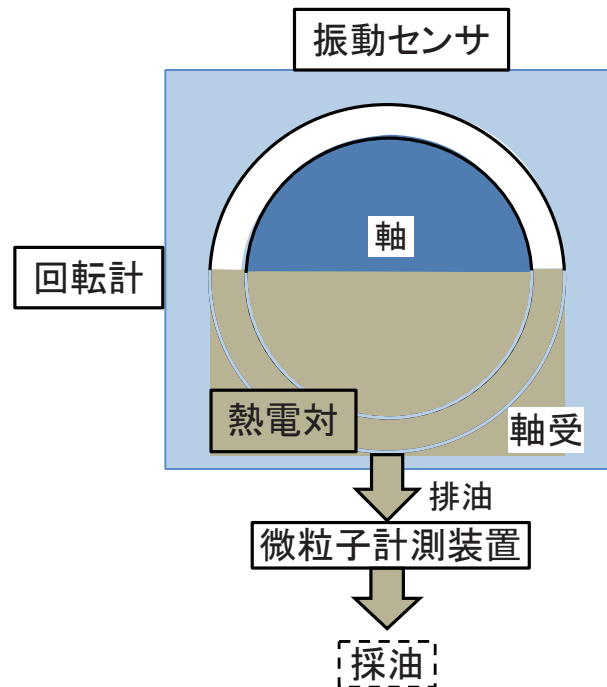
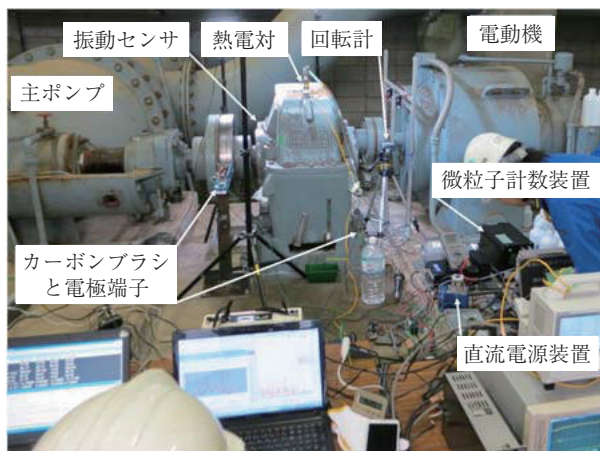


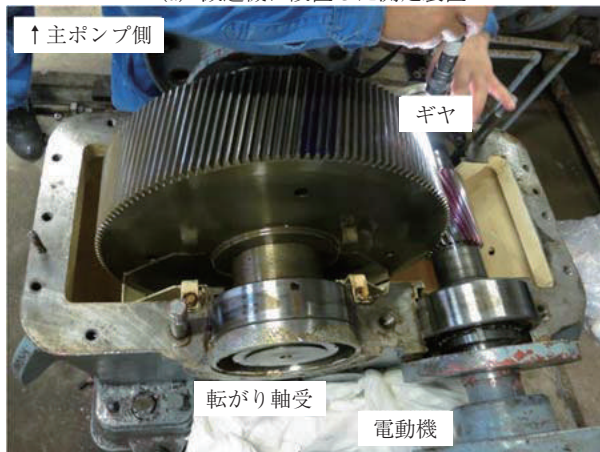
Fig.4-3 冷却水ポンプ軸受を対象とした凝着摩耗試験
Adhesive wear test for the bearing of cooling pump

油槽の清掃を行い (Fig. 4-4 (b)), 新油 (40L) を充填した後, ろ過器を用いて油槽の浄化を行った。試験は, ポンプ主軸にカーボンブラシを, 減速機のケーシングに電極端子を取り付け, 直流電源装置から電圧 (最大 12V) を印加し, 電流が流れた際に発生する放電によって, 減速機内部のギヤおよび転がり軸受に電食を起こし溶融摩耗を発生させた。軸受の振動加速度は, 軸受が組み込まれたケーシング上部表面に振動センサを貼り付け垂直方向振動を, 温度はケーシング上部点検窓から熱電対を差し込み油槽中層部の油温を測定した。また, 潤滑油を油槽と微粒子計数装置とを循環させて油中の金属摩耗粒子数を計測するとともに, 油槽へ戻る潤滑油の一部を採油瓶で採取し, 金属摩耗粒子の形態とサイズを観察した。

試験は3つのステージで実施した。第1ステージは電動機の回転数を 600r/min で一定とし, 5分間隔で電圧を 4V から 12V まで段階的に増加して放電を起こした。第2ステージは電圧を 12V で一定とし, 油膜を薄くして放電を起こすために 10分間隔で回転数を 600r/min から 100r/min まで段階的に低下させ, その間の計測および採油を行った。第3ステージは電圧を 12V で一定とし, 油膜が厚い状態で放電を起こすために, 10分間隔で回転数を



(a) 減速機に設置した測定装置



(b) 減速機の内部

Fig.4-4 減速機を対象とした溶融摩耗試験
Welding wear test for the speed reducer

800r/min から 1,350r/min まで段階的に増加させて試験を行った。

4.3.4 試験終了の判断基準とレプリカ作成

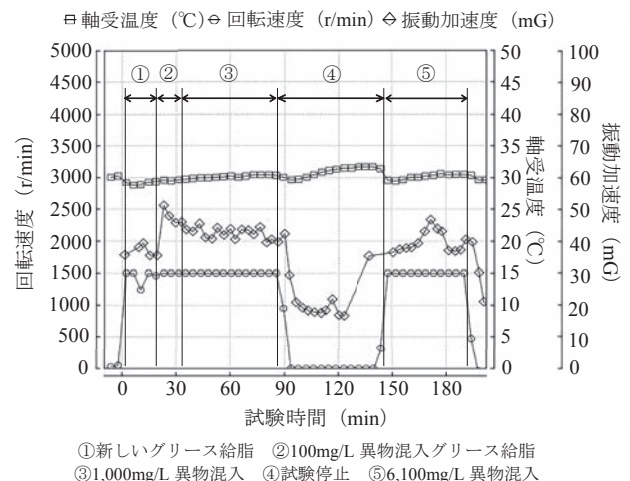
ポンプ設備の稼働時には, 軸受の温度や音, 振動加速度, そして発生した金属摩耗粒子数を常に監視し, これらの監視項目のうちいずれかが急上昇した時点でポンプの運転を停止して試験を終了した。試験後に, 減速機を分解してギヤのレプリカ (樹脂による型取り) を作成した。また, 試験で損傷した転がり軸受および冷却水ポンプ主軸を取り外して分解し, 電子顕微鏡を用いて損傷した箇所画像解析を行った。

4.4 試験結果

4.4.1 アブレイシブ摩耗試験

Fig. 4-5 に示すように, 100mg/L と 1,000mg/L 異物混入グリースの給脂では, 軸受温度および振動加速度に大きな変化がみられなかったことから, 試験を始めて 87分経過した時点で電動機を一時停止した。高濃度 (6,100mg/L) の異物混入グリースを準備して試験を 58分後に再開し, 給脂を 3分毎に 9回繰り返して, 排脂口から排出されたグリースを採取した。軸受温度および振動加速度を 47分経過するまで監視したが測定値に大きな変動はみられなかった。

採取したグリースに含まれる金属摩耗粒子を光学顕微鏡で観察した結果, 試験前に軸受に充填されていたグリースで観察された既存の金属摩耗粒子の形態はうろこ状の剥離片 (長さ 5~10 μm) であった。一方, 異物を混入していない新しいグリースと 100mg/L 異物混入グリースの中には摩耗粒子は観察されなかったものの, 1,000mg/L 異物混入グリースからはうろこ状の剥離片が観察された。6,100mg/L 異物混入グリースでは, うろこ状の剥離片と黒錆が観察され, さらに, 硬いもので削られたような三日月形の摩耗粒子 (長さ 4 μm) が観察された。これを電子



①新しいグリース給脂 ②100mg/L 異物混入グリース給脂
③1,000mg/L 異物混入 ④試験停止 ⑤6,100mg/L 異物混入

Fig.4-5 アブレイシブ摩耗試験の測定データ
Measurement data of abrasive wear test

顕微鏡で観察した画像を Fig. 4-6 に示す。この摩耗粒子の組成を、X線マイクロアナライザで分析すると99.4%が鉄であった。また、電子顕微鏡による観察では、Fig. 4-7 に示すように軸受の転動体表面に削られてきたとみられる痕跡が観察された。

4.4.2 凝着摩耗試験

微粒子計測装置で計測した潤滑油中の金属摩耗粒子数の経時変化を Fig. 4-8 に示す。油中の金属摩耗粒子数は15回の排油を行うまでは緩やかな増加傾向が見られ、図中の変化点に示すように、15回目の排油後に急激に増加し始めた。18回目の排油を行った後に、金属摩耗粒子数

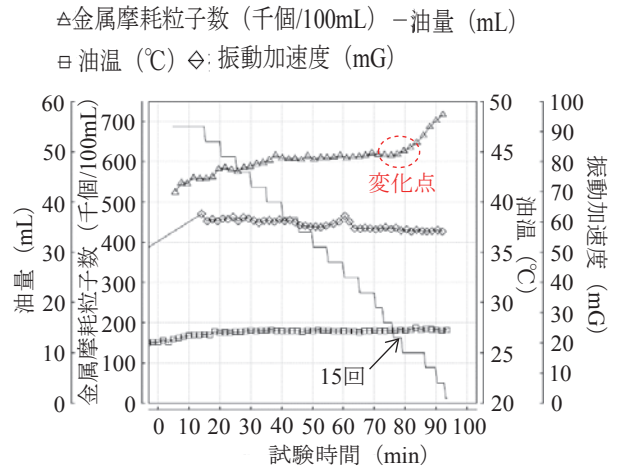


Fig.4-8 凝着摩耗試験の測定データ
Measurement data of adhesive wear test

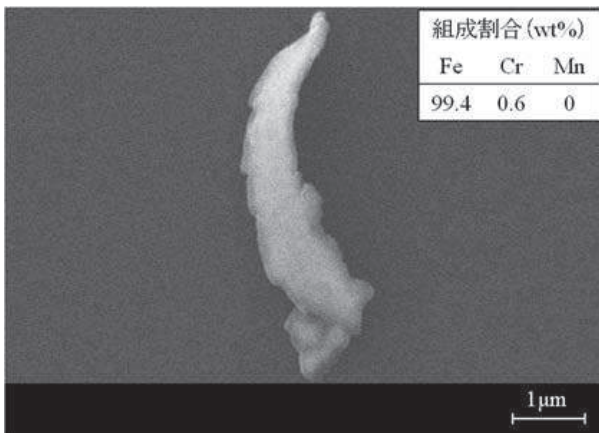


Fig. 4-6 アブレシブ摩耗試験で確認した金属摩耗粒子
Metal wear particle of abrasive wear test

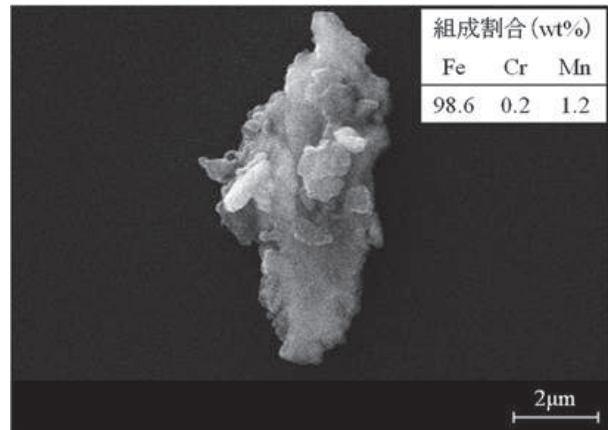
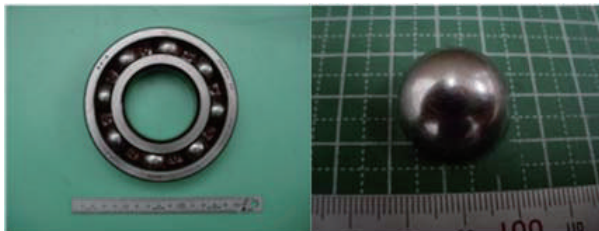
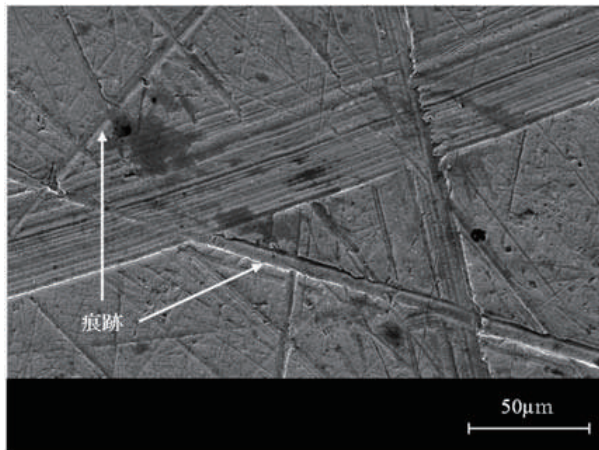


Fig.4-9 凝着摩耗試験で確認した金属摩耗粒子
Metal wear particle of adhesive wear test



(a) ベアリングの外観 (b) 転動体

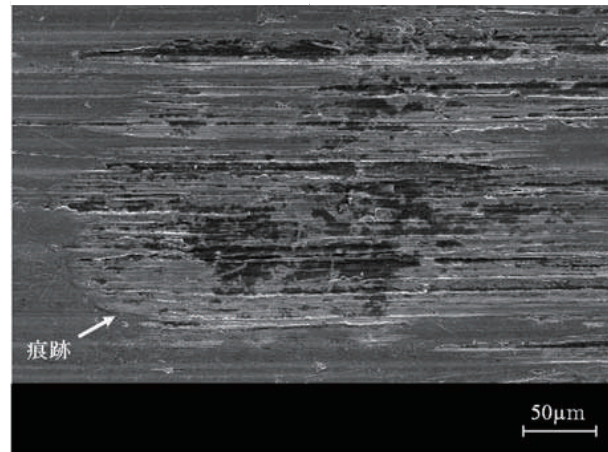


(c) 転動体表面の電子顕微鏡写真

Fig. 4-7 電動機軸受の転動体の電子顕微鏡写真
Photograph by electron microscope about the rolling element in bearing of motor



(a) 軸の外観 (b) 切断後の軸



(c) 軸表面の電子顕微鏡写真

Fig.4-10 冷却水ポンプの軸の電子顕微鏡写真
Photograph by electron microscope about the shaft of cooling pump

が増加傾向にあることを確認し試験を終了した。なお、摩耗粒子数が急増しているにもかかわらず、振動加速度と油温には大きな変化はみられなかった。

金属摩耗粒子の形態を観察した結果、14回目から18回目の排油中に、粒子が結合して大きなサイズ(長さ8 μ m)に成長した摩耗粒子が観察された(Fig. 4-9)。摩耗粒子の組成は98.6%が鉄であった。また、電子顕微鏡による観察では、Fig. 4-10に示すように主軸の表面に激しい摩耗によって生じたとみられる痕跡が確認された。また、軸受の表面には軸との接触で発生したとみられる痕跡が観察された。

4.4.3 溶融摩耗試験

溶融摩耗試験で発生した金属摩耗粒子数の経時変化をFig. 4-11に示す。第1ステージでは、最大電圧12Vにおいても金属摩耗粒子数などの数値に大きな変動はなかった。第2ステージでは、600r/min以下の回転数では油膜が薄く常に通電状態となり放電が発生しなかったことから、金属摩耗粒子数などの数値に大きな変動はなかった。第3ステージでは、回転数を800r/minから段階的に増加させて油膜を厚くしたことから放電が発生した。その結果、回転数を増大してすぐに金属摩耗粒子数が急激に増加する傾向が確認され、その後、880r/minで40分間計測を続けて試験を終了した。試験終盤の電圧降下は、直流電源装置の消耗によるものであった。試験後に分析室に

において、採取した潤滑油に含まれる金属摩耗粒子の形態を電子顕微鏡で観察した結果、1,000r/minを超えてからの潤滑油サンプルで硬いもので削られたとみられる形状の摩耗粒子が数多く観察され、わずかではあるが2 μ mサイズの表面が滑らかな球状粒子(Fig. 4-12)が観察された。球状粒子の組成は98.0%が鉄であった。また、軸受の保持器およびギヤ歯面レプリカの表面観察において、熱で金属表面が溶融してできたとみられる痕跡が観察された(Fig. 4-13, Fig. 4-14)。

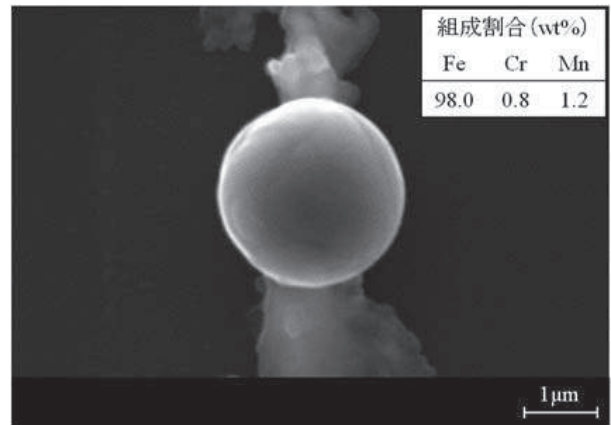


Fig.4-12 溶融摩耗試験で確認した金属摩耗粒子
Metal wear particle of welding wear test

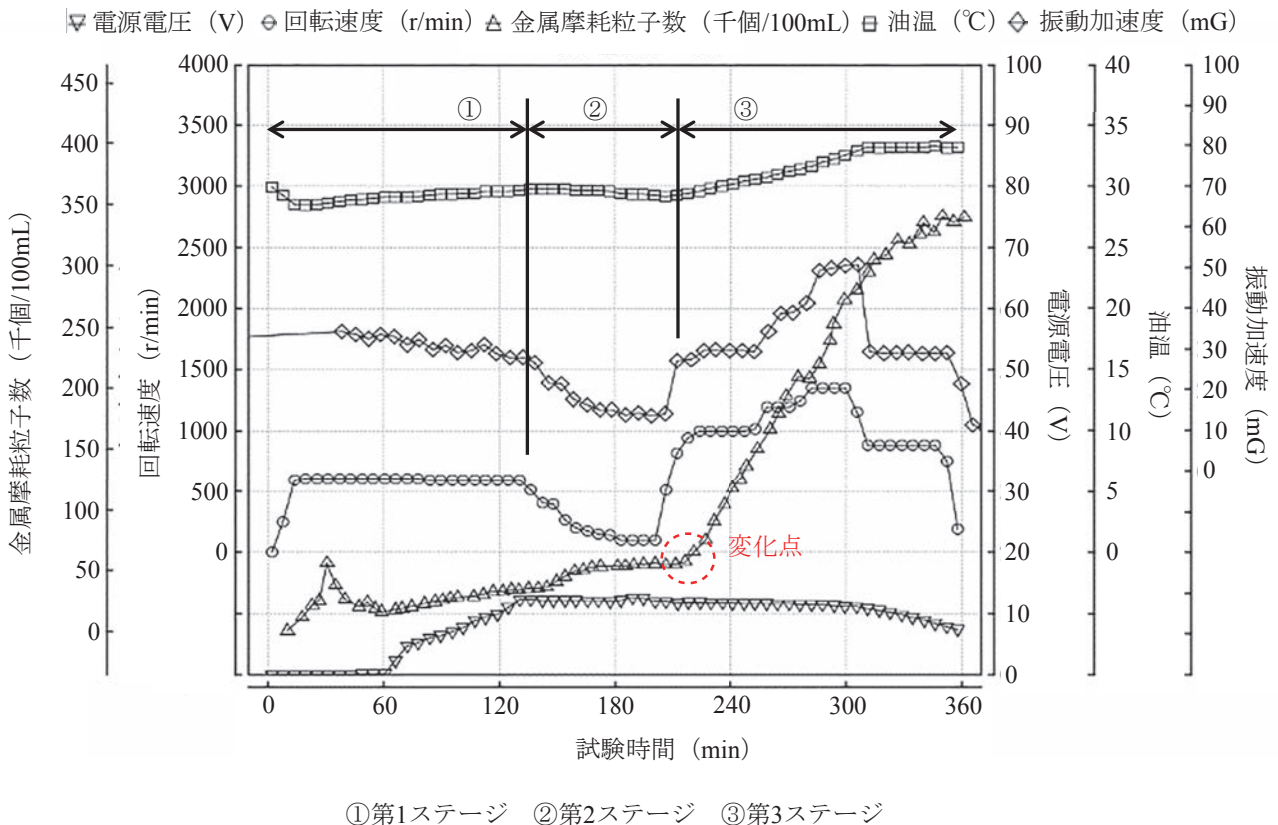
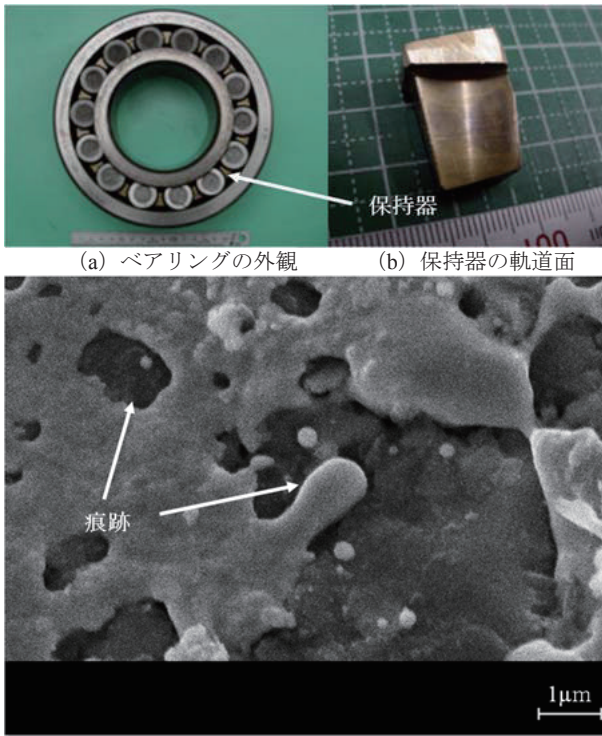


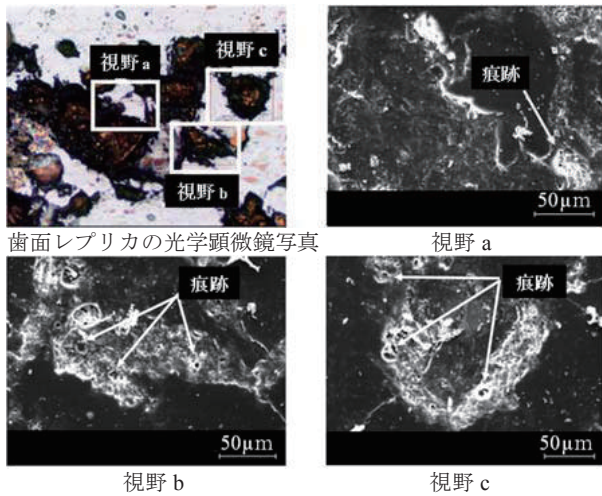
Fig.4-11 溶融摩耗試験の測定データ
Measurement data of welding wear test



(a) ベアリングの外観 (b) 保持器の軌道面

(c) 保持器軌道面の電子顕微鏡写真

Fig.4-13 軸受保持器の電子顕微鏡写真
Photograph by electron microscope about the holder of bearing



歯面レプリカの光学顕微鏡写真

Fig.4-14 減速機ギヤ歯面の転写レプリカ観察

Photograph by electron microscope about the replica which copied the surface of gear in speed reducer

4.5 考察

4.5.1 金属摩耗粒子とその発生部位

二つの金属が接触してすべりや転がり運動をするとき、それらの固体の表面から次々と材料が除去されていく材料損失を、摩耗という。油中の金属摩耗粒子の元素と含有量を調べて摩耗粒子の発生部位を特定し、また、その量により摩耗の程度を把握することができる（第I章を参照）。

4.5.1.1 アブレシブ摩耗粒子

光学顕微鏡による金属摩耗粒子の形態観察から、試験前に軸受に充填されていたグリースで観察された既存の摩耗粒子（うろこ状の剥離片）は、繰返し応力を受けて金属疲労により発生する疲労摩耗粒子の形態（松本・Rotondi, 1980）と同じ特徴を有していた。

一方、試験開始後に新たに観察された6,100mg/L異物混入グリース中の摩耗粒子は、Fig. 4-6に示すように、硬い粒子の介在による削りまたは引っ掻き作用で発生する切削型のアブレシブ摩耗粒子（長さ4 μm、幅1 μm）とみられる。この摩耗粒子は、松本らが報告した潤滑油中に混入した堅い異物が柔らかい金属の表面に食い込み、その表面から一部が突き出て対面する金属を削り発生した研削粒子（Cutting）の形態（松本・Rotondi, 1980）と同じ特徴を有している。このアブレシブ摩耗粒子の主成分は鉄（99.4wt%）であることから、軸受内輪か軸受外輪、転動体、保持器のいずれかで発生した摩耗粒子であると考えられる。また、電子顕微鏡による観察から、軸受の転動体表面に削られてきたとみられる切削痕を確認した（Fig. 4-7）。グリースに混入した試験用粉体には、二酸化ケイ素（SiO₂）が質量分率で34～40%含まれている。これらのことから、混入した異物が軸受軌道面あるいは転動面に噛み込み、アブレシブ摩耗粒子を発生させたと考えられる。

4.5.1.2 凝着摩耗粒子

試験開始後、油槽ドレインから15回の排油を行うまでは、潤滑油中の金属摩耗粒子数は緩やかな増加傾向が見られ、15回目の排油後に金属摩耗粒子数は急激に増加し始めた。これは排油によって油面が低下することで、主軸と軸受の間の油膜が形成され難くなることによって潤滑状態が悪くなり、凝着摩耗が発生する条件が整ったためと考えられる。

金属摩耗粒子の形態を電子顕微鏡で観察した結果、Fig. 4-9に示すように、微細な粒子が結合して大きなサイズ（長さ8 μm）に成長した摩耗粒子を確認した。この摩耗粒子は、三科ら（1978, 1995, 2002）が報告した凝着摩耗粒子の形態と同じ特徴を有している。また、観察された摩耗粒子の主成分は鉄（98.6wt%）であることから、発生箇所は主軸であると考えられる。そこで、主軸を電子顕微鏡で観察すると、表面に激しい摩耗によって生じたと思われる凝着痕を確認した（Fig. 4-10）。これらのことから、排油による油面の低下により主軸と軸受との間の油膜が破断して、金属同士が接触して摩擦を繰り返して凝着摩耗粒子が発生したと考えられる。

4.5.1.3 溶融摩耗粒子

溶融摩耗試験では、ポンプ主軸と減速機のケーシングとの間に電圧を印加して放電を起こし、潤滑油中に球状粒子を確認することができた（Fig. 4-12）。この摩耗粒子は、

川畑が報告した球状粒子の形態(川畑, 2004)と同じ特徴を有している。球状粒子は、溶融した金属が固体に戻る時に球形になる性質の表れであることから、摺動面近傍で金属融点を超える高温が発生したことを示しており、この熱は放電で発生したと考えられる。この球状粒子は鉄(98.0wt%)が主成分であり、保持器は銅合金であったことから、球状粒子の発生個所は軸受内輪と転動体との間か、軸受外輪と転動体との間、ギヤ歯面の間のいずれかであると考えられる。Fig. 4-13 および Fig. 4-14 に示すように、保持器およびギヤ歯面レプリカの表面観察において、放電による熱で金属表面が溶融したとみられる電食痕を確認したことから、軸受およびギヤ歯面の潤滑面の極微小領域において放電による電食が発生し、溶融摩耗粒子が発生したと考えられる。

なお、溶融摩耗試験の第3ステージにおいて、回転数を増大してすぐに金属摩耗粒子数が急激に増加した現象は、回転数増により軸受軌道面および歯面の摺動部に異物が噛み込み、切削型のアブレシブ摩耗粒子が発生する頻度が増加したことによるものと考えられる。

4.5.2 劣化兆候検出のための監視項目

凝着摩耗試験での潤滑油量は55mLであり溶融摩耗試験は40Lと違いはあったが、油量に関係なく潤滑油に含まれる金属摩耗粒子数の増加傾向を時系列で検出できることを確認した。さらに、潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが損傷の兆候を検出できる監視項目になることを確認した。油中の金属摩耗粒子数を計測して変化点を確認した時点で、ポンプ設備を停止して更油やろ過などの対策、もしくは分解点検を実施して原

因を除去することで、ポンプ設備が損傷に至る前に劣化の進行を防ぐことができると考える。

一方、Fig. 4-5 および Fig. 4-8, Fig. 4-11 に示すように、これらの試験時に軸受の振動加速度と温度には損傷の兆候を示す変動(変化点)を確認することができなかった。振動調査技術を用いた農業用ポンプ設備の機能診断の事例が報告されているが、その有効性は十分に検証されていない(末政ら, 2009; 蒔苗・西田, 2012)。これらのことから、油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は振動法や温度法と比較してより早期に劣化の兆候を捉えることができると考える。

4.6 まとめ

ポンプ設備の軸受や歯車を対象として劣化の初期段階から損傷に至る劣化促進試験を、実機を用いて実施した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) アブレシブ摩耗試験および凝着摩耗試験、溶融摩耗試験の3試験を行い、損傷を起こす要因として想定した現象に対応する金属摩耗粒子とその発生部位をそれぞれ確認することができた。
- (2) 油量に関係なく、潤滑油に含まれる金属摩耗粒子数の増加傾向を時系列で検出できることを確認した。
- (3) 潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが、ポンプ設備の劣化の兆候を検出する監視項目になることを確認した。
- (4) 油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は、振動法や温度法と比較して設備の劣化の兆候をより早期に検出できることを確認した。

第V章 農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題

— メンテナンストライボロジー —

5.1 はじめに

2013年1月、地域の排水を担う4基の農業用ポンプ設備（チューブラポンプ、口径2,200mm）のうち1基が、運転開始とともに減速機から異常音を発生して突然停止した。西尾ら（2016）は、減速機が損傷するに至った原因を分解して調査した結果、損傷した歯車表面の一部に経年劣化によるとみられる疲労破面を電子顕微鏡で確認している。起動時の高負荷による歯車の損傷が原因であるとみられるが、同様な故障によるポンプ設備の突発的な停止を防止し、管理していくうえで損傷などの異常発生を早期に検出し、適正に対処する必要があると述べている。

第II章において、軸受の不具合の原因の多くが稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであることなどを確認し、農業用ポンプ設備における状態監視保全（Condition Based Maintenance：CBM）の適用の必要性について述べた。農業用ポンプ設備の機能診断は、これまで主として、日常・定期点検記録をもとに目視・触診・聴診などの外観調査が実施されてきた。このような外観調査では内部の劣化状態を把握することができないことから、近年、ポンプ設備の軸受などに使われている潤滑剤の評価による機能診断の適用事例が報告されている（國枝ら，2012；河淵ら，2013；萩原，2013；國枝ら，2013；安部田ら，2015）。軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する手法（以下、「潤滑診断」という）である。第IV章の実機を用いた劣化促進試験では、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融の3種類の摩耗現象を確認し、油中に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが機械設備の劣化兆候を検出する監視項目となること報告した。さらに、油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は、振動や異音が発生する前に劣化の初期段階の兆候を検出できる高感度な分析手法であることを確認した。しかし、その適用方法については、いまだ十分な評価がなされていないのが現状である。そこで、本章では、これまでに潤滑診断を実施して機器の劣化兆候を検出した研究事例を踏まえ、その適用における課題について考察する。

5.2 対象設備と診断方法

平成24年度から27年度の4年間で千葉や新潟、石川、愛知、滋賀、沖縄の6県の排水機場19箇所および揚水機場7箇所において、ポンプ設備61の軸受や減速機、電動機から潤滑油114試料とグリース29試料、合計143試料を採取した。これらの試料について第I章3節で報告し

た潤滑診断を実施し、潤滑剤の物理的性状および潤滑剤の汚染状態、機器の摩耗状態を確認した。

潤滑剤を分析して正確なデータを得るために、以下の点に注意を払い潤滑剤の採取を行った。まず、農業用ポンプ設備は、潤滑診断の実施を前提に設計されていないことが多いことから、対象とするポンプ設備が潤滑油を容易に採取できる構造であることが採油時の前提条件である。分析に必要な油量は、潤滑油の物理的性状に約100mL、潤滑油の汚染状態に約300mL、機器の摩耗状態に約100mL、合計で概ね500mLである。分析機関では正確なデータを得るために、分析時のロスと予備量（再分析用）を含めて採油量1L程度を推奨している。グリースの場合、採取量は50g程度である。潤滑剤を採取する際には、周囲の粉塵などが混入しないようにする必要がある。

ポンプ設備が停止している状態では、金属摩耗粒子は潤滑油より重いことから油槽に沈降している。そのため、採油前に30分程度運転を行い、油中の金属摩耗粒子が十分に均質となった状態の潤滑油を採取する。排水ポンプを対象とする場合は、排水路の水位を事前に調整してポンプ運転が可能な状態にしておく必要がある。一方、揚水ポンプを対象とする場合には、水利権や電力契約期間を考慮し、ポンプ運転が可能な灌漑期間中に実施する必要がある。

潤滑診断では、ほとんどの分析項目はJIS規格に基づく指標であり定量的なデータが得られ、潤滑剤の物理的性状および潤滑剤の汚染状態、機器の摩耗状態を把握することができる。ここでの評価に用いた管理基準値は、一般的な潤滑油使用機械の重要度「普通」（日本トライボロジー学会，2001c；日本トライボロジー学会，2006a）および田中ら（2013）の報告を準用している。管理基準値の目安の一覧表をTable 5-1に示す。これらの分析項目を

Table 5-1 潤滑診断の評価に用いた管理基準値の目安
Management standards for Oil Analysis

分類	分析項目	管理基準値の目安
潤滑油の物理的性状	粘度 40℃	新油の値からの 変化率 ± 15%
	水分	500ppm 未満
	酸価	新油の値からの 上昇率 + 25% 以下
グリースの物理的性状	ちょう度	新グリース値からの 変化率 ± 20%
	滴点	150℃ 以上
	酸価	—
潤滑油の汚染状態	計数汚染度	(NAS12 級未満)
	質量汚染度	(NAS107 級未満)
機器の摩耗状態	異常摩耗指数 (Is 値)	(10 ³ 未満)

注：() 内の値は、農業用ポンプ設備を対象とした参考値である。

用いて正確な評価を行う際に、注意すべき点を以下に述べる。

(1) 潤滑剤の物理的性状

物理的性状に係る診断を行う際には、「新油の値からの変化率」を用いて評価する。このため、潤滑診断においては、対象とするポンプ設備からの採油と同時に、使用している新油の採取・分析が必須である。なお、製油会社によって性状や添加剤に相違があることから、実際に使用している潤滑剤の名称、規格、交換時期を管理点検記録で確認する。

(2) 潤滑油の汚染状態

潤滑油の汚染に関する評価指標として、全米航空宇宙工業会が制定したNAS等級(National Aerospace Standard)が一般的に用いられる(松本・Rotondi, 1980)。NAS等級には、潤滑油100mL当たり存在する汚染粒子について、粒径別の個数で表す計数法と重量で表す質量法の規格が定められており、それぞれの等級で評価を行う。その際、潤滑油に配合されている添加剤(微小な粒子)に影響を受ける事例などがあり、新油であっても機器に給油した段階で高位の汚染等級を示すことがあることから、新油の等級を確認して傾向管理を行う必要がある。

(3) 機器の摩耗状態

油中に浮遊している金属摩耗粒子の元素と含有量を調べ、摩耗粒子の発生部位を特定する。また、その量により摩耗の程度を把握することができる。そのための基本情報として、機器の材質と寸法を設計図書などで確認しておく必要がある。

(4) 総合的な評価

上述した(1)、(2)、(3)の項目について、それぞれの項目を単独で評価するのではなく、これらの項目を総合的に評価することで、機器の劣化状態についての正確な評価を行うことができる。さらに、潤滑診断を継続的に実施し、各評価項目の変化を時系列でモニタリングすることにより、劣化の兆候を早期に検出することが可能となる。評価結果は、潤滑油のろ過や分解点検などの維持管理や補修対策の要否判定に有効に活用する。潤滑診断の評価結果に応じて推奨される対処方法をTable 5-2に示す。

Table 5-2 潤滑診断の評価結果と対処方法
Countermeasures against Oil Analysis

分類 診断	潤滑剤の 物理的性状	潤滑剤の 汚染状態	機器の 摩耗状態
良好	状態監視を継続		
注意	診断周期を短縮 更油を検討	診断周期を短縮 ろ過または更油を検討	診断周期を 短縮
異常	更油を実施	ろ過または更油を 実施	分解点検を 実施

5.3 潤滑診断の結果

稼働中の農業用ポンプ設備を対象として、潤滑剤143試料について潤滑診断を実施した。そのうち、特徴的な金属摩耗粒子の形態を確認し、劣化の兆候を示した診断結果に着目して、それらの評価から導かれるポンプ設備の劣化状態に対処する方法を事例として以下に述べる。ここで、潤滑剤の正しい分析データに基づいた適正な潤滑診断を実施するには、潤滑剤の製品名称や交換日、稼働時間などの管理記録を入手することが求められる。

5.3.1 正常な状態

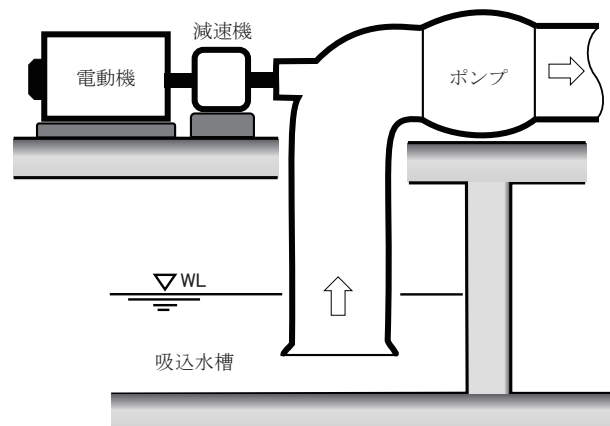
2001年に設置された横軸斜流ポンプ(口径1,000mm)の外観および構造図(断面図)をFig. 5-1に示す。減速機(遊星歯車型)のケーシング上部の給油口から潤滑油(A社製タービン油68)を約1L採取し、分析を行った。

Table 5-3に示す分析の結果から、潤滑油の物理的性状を表す粘度は $66.13\text{mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は -0.4% (管理基準の目安 $\pm 15\%$)、水分は 31.9ppm (同500ppm未満)、酸価は 0.03mgKOH/g と新油値 0.08mgKOH/g 以下であり、良好の範囲にあることを確認した。

潤滑油の汚染状態を表す計数汚染度は8級(同12級未



(a) 外観

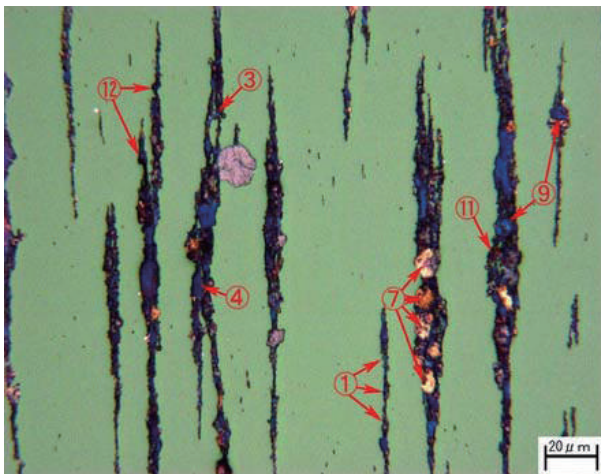


(b) 構造図

Fig. 5-1 横軸斜流ポンプ(口径1,000mm)
Horizontal axis type mixed flow pump (ϕ 1,000mm)

Table 5-3 潤滑油の分析結果
Analysis of lubricating oil

油種 (A社製・68)		測定値	新油値		
潤滑油の物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	66.13	66.39	
	水分	ppm	31.9	43.1	
	酸価	mgKOH/g	0.03	0.08	
潤滑油の汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	10,416	1,017	
		15~25μm	334	137	
		25~50μm	90	83	
		50~100μm	26	20	
		100μm以上	37	0	
	計数汚染度	級	8	4	
	質量汚染度	mg/100mL	0.45	0.60	
機器の摩耗状態	大摩耗粒子量	%/ml	2.70	0.02	
		%/ml	2.50	0.01	
	異常摩耗指数 (Is値)	-	1.0×10 ⁰	3.0×10 ⁻⁴	
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩耗	鉄	1.1	0
			クロム	0	0
			アルミニウム	0	0
			銅	10.2	0
			鉛	0.0	0
			アンチモン	0.0	0
		汚染	ケイ素	5.0	0
			カリウム	0	0
			ナトリウム	0	0
			カルシウム	0	0
		添加剤	亜鉛	6.0	1.0
リン			7.0	0	
モリブデン	0.1		0.1		
バリウム	0		0		



No.	摩耗粒子の名称	形態	量
1	正常	5μm未満の微細な薄片	少
3	アプレシブ (切削型)	切りくず状	少
4	凝着	相互移着で不規則な表面	少
7	疲労	うろこ状の剥離片(15μm以上)	少
9	疲労	うろこ状の剥離片(5μm未満)	少
11	赤さび	赤褐色の多晶質	少
12	黒さび	灰褐色の多晶質	少

Fig. 5-2 光学顕微鏡による金属摩耗粒子の画像
Photograph by optical microscope about metal wear particles

満), 質量汚染度は104級(同107級未満)であり, 良好の範囲にあることを確認した。

機器の摩耗状態について, 異常摩耗を早期に発見するパラメータである異常摩耗指数(Severity Index: Is値)は10⁰であり正常の範囲であった(Is値の算出方法は, 第1章の式1-1を参照)。ただし, SOAP法による金属濃度分析の結果では, 銅(Cu)が10.2mg/kg検出されたことから, 銅を使用した箇所において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。分析フェログラフィーにおいて, 光学顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を**Fig. 5-2**に示す。第1章**Table 1-4**に例示した正常摩耗粒子やアプレシブ(切削型)摩耗粒子, 疲労摩耗粒子などを観察したが, いずれも少量であった。

Fig. 5-3に, 新油ならびに使用油(試料)を赤外線吸収スペクトル法(Infrared Absorption Analysis: IR)で分析したIRチャートを示す。波数650~1,300cm⁻¹は細かい吸収が多数みられる指紋領域と呼ばれ, そのパターンは物質に固有のものとなる。このパターンが新油と一致していることから同じ油種であることを確認した。また, 1,710cm⁻¹付近に吸収ピークが存在しないことから潤滑油は酸化劣化していないと判定した。

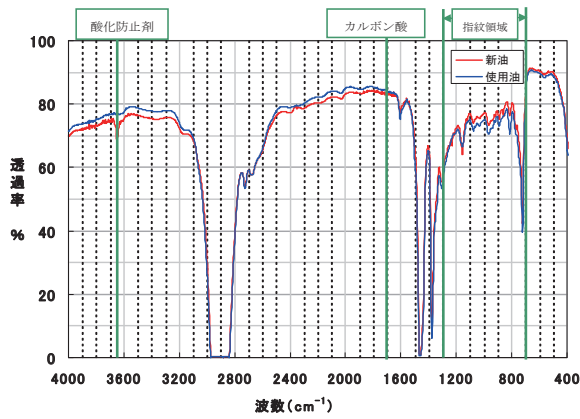


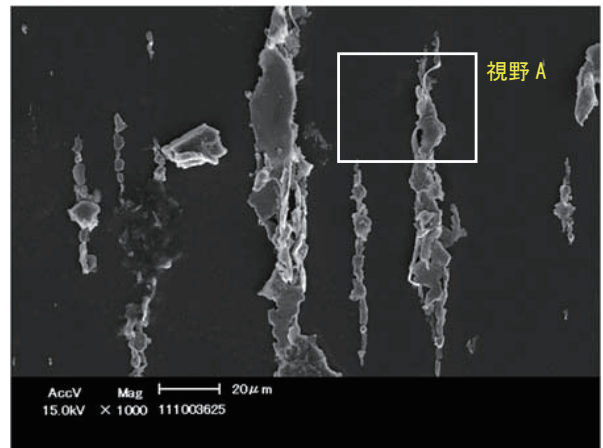
Fig. 5-3 潤滑油のIRチャート
IR-chart in oil analysis

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を示す各データは良好の範囲にあった。Table 5-2 に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、減速機は正常な状態であると診断し、状態監視を継続することを推奨した。

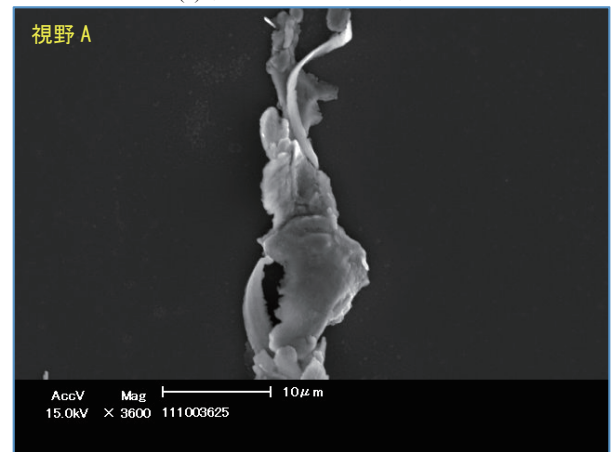
5.3.2 異物混入による劣化

1996年に設置された横軸斜流ポンプ(口径800mm)の電動機の転がり軸受の排脂口からグリース(B社製・296)を約50g採取し、分析を行った。ただし、グリースは流動性が低いことから、潤滑部で発生した全ての金属摩耗粒子が採取した試料に含まれていないので、油中粒子数の計測は行わない。

Table 5-4 に示す分析の結果から、グリースの物理的性



(a) 分析フェログラフィー



(b) アプレシブ(切削型) 摩耗粒子

Fig. 5-4 電子顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像
Photograph by electron microscope about metal wear particles

Table 5-4 グリースの分析結果
Analysis of grease

油種 (B社製・296)		測定値	新油値		
グリースの物理的性状	ちょう度	—	278		
	滴点	℃	181		
	酸価	mgKOH/g	2.65		
機器の摩耗状態	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	大摩耗粒子量	%/ml	5.0×10^2	—
		小摩耗粒子量	%/ml	7.0×10^1	—
		異常摩耗指数 (Is値)	-	2.5×10^5	—
	摩耗	鉄		31.6	0
		クロム		0	0
		アルミニウム		0	0
		ニッケル		46.0	5.0
		銅		108.4	0
		鉛		0	0
		アンチモン		0	0
	汚染	ケイ素		0	0
		カリウム		0	0
		ナトリウム		739.0	14.0
		カルシウム		1,138.4	475.0
添加剤	亜鉛		650.4	1,338.0	
	マグネシウム		214.0	373.0	
	リン		328.4	1,146.0	
	モリブデン		0	0	
	バリウム		68.0	12.0	

状を表すちょう度は278であり、新油からの変化率は-6.1%（管理基準の目安±20%）と良好の範囲にあることを確認した。滴点は181℃（管理基準の目安150℃以上）であった。酸価は2.65mgKOH/gと新油値3.76mgKOH/g以下であり、IRチャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、物理的性状は良好と判定した。

機器の摩耗状態について、Is値は 2.5×10^5 と高い数値であることから、異常摩耗の兆候を示していた。金属濃度分析の結果では、鉄(Fe)が31.6mg/kg検出されていることから、軸受軌道面および転動体表面において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。また、銅(Cu)が108.4mg/kg検出されたことから、軸受保持器の摩耗とみられる。分析フェログラフィーにおいて、電子顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態をFig. 5-4 (a)に示す。Fig. 5-4 (b)に示す視野Aに、第四章の劣化促進試験におけるアプレシブ摩耗試験で確認した金属摩耗粒子の形態と同じ特徴を有する $10 \mu\text{m}$ を超えるサイズのアプレシブ(切削型)摩耗粒子を観察した。これらは異物混入や金属表面の微小突起によって発生したとみられる。

潤滑診断の結果、グリースの物理的性状は良好の範囲にあるものの異常摩耗の兆候がみられ、軸受の摩耗状態

が厳しくなっていることや異物混入が確認できた。Table 5-2に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、分解点検を実施する必要があると診断した。

5.3.3 潤滑不良による劣化

1963年から稼働している横軸斜流ポンプ(口径1,200mm)の主軸のすべり軸受のケーシング上部の給油口から潤滑油(C社製・46)を約1L採取し、分析を行った。

Table 5-5に潤滑油の分析結果を示す。潤滑油の物理的性状を表す粘度は $43.56\text{mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は-0.1%（管理基準の目安±15%）、水分は69.3ppm(同500ppm未満)であり、良好の範囲にあることを確認した。酸価は0.15mgKOH/gと新油値0.19mgKOH/g以下であり、IRチャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、潤滑油は劣化していないと判定した。

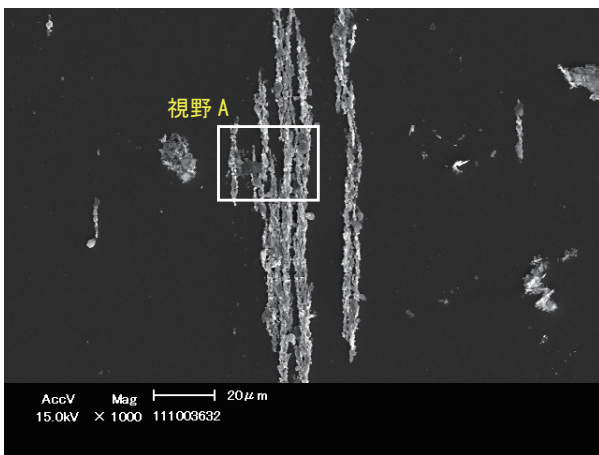
潤滑油の汚染状態を表す計数汚染度は11級(同12級未満)、質量汚染度は108級(同107級未満)であり、汚染度は高いと判定した。

機器の摩耗状態について、異常摩耗のパラメータであるIs値は 1.2×10^5 であったことから、潤滑状態は厳しいと判定した。また、金属濃度分析の結果では、銅(Cu)が16.0mg/kg検出されたことから、銅を使用した箇所において摩耗が発生している可能性があるとして診断した。分析フェログラフィーにおいて、電子顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態をFig. 5-5 (a)に示す。Fig. 5-5 (b)に示す視野Aに、第四章の劣化促進試験における凝着摩耗試験で確認した金属摩耗粒子の形態と同じ特徴を有する $10 \mu\text{m}$ を超えるサイズの凝着摩耗粒子を確認した。これらは、厳しい潤滑状態で発生することから、潤滑部で油膜切れを起こしていると考えられる。

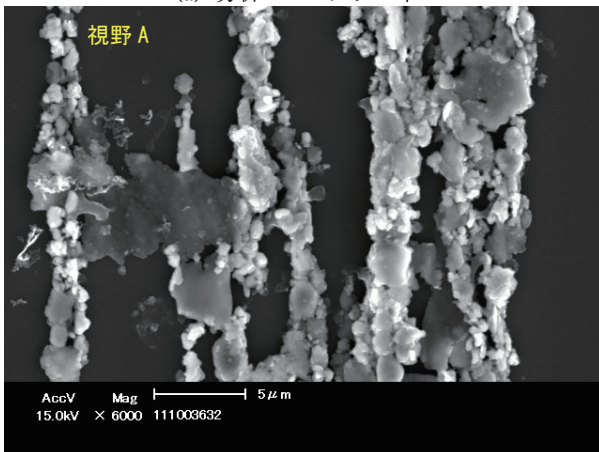
潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状は良好の範囲にあるものの異常摩耗の兆候がみられ、軸受の摩耗状態が厳しくなっていることが確認できた。潤滑油の汚染度が高いことから、金属摩耗粒子が軸受摺動面に噛み込み摩耗が進行することが懸念される。Table 5-2に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、主軸のすべり軸受の分解点検補修を推奨すると診断した。

5.3.4 電食による劣化

1971年から稼働しているチューブラポンプ(口径1,200mm)の外観をFig. 5-6 (a)に示す。Fig. 5-6 (b)に示すように、ポンプケーシングは二重の円筒からなり、減速機は内側の円筒ケーシング内に収められ、内筒と電動機の外周が水の流路となっている構造のポンプである。電動機や減速機はポンプ内部に収納してあるため、これらを点検するには外筒のケーシングを分解する必要がある。そこで、チューブラポンプの外部にある潤滑油循環装置から潤滑油(D社製・32)を約1L採取し、主軸のすべり軸受の劣化状態を診断した。



(a) 分析フェログラフィー



(b) 凝着摩耗粒子

Fig. 5-5 電子顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像
Photograph by electron microscope about metal wear particles

Table 5-5 潤滑油の分析結果
Analysis of lubricating oil

油種 (C社製・46)		測定値	新油値		
潤滑油の物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	43.56	43.59	
	水分	ppm	69.3	21.5	
	酸価	mgKOH/g	0.15	0.19	
潤滑油の汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	483,570	1,953	
		15~25μm	8,570	40	
		25~50μm	2,653	20	
		50~100μm	347	0	
		100μm以上	10	0	
	計数汚染度	級	11	3	
	質量汚染度	mg/100mL	3.80	0.10	
機器の摩耗状態	大摩耗粒子量	%/ml	3.8×10^2	—	
		小摩耗粒子量	%/ml	1.6×10^2	—
		異常摩耗指数 (Is値)	-	1.2×10^5	—
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩耗	鉄	6.6	0
			クロム	0	0
			錫	0.3	0
			銅	16.0	0
			アンチモン	0.1	0
		汚染	ケイ素	0	0
			ナトリウム	0	0
			カルシウム	0.7	0
添加剤		亜鉛	73.2	64.0	
		リン	116.1	108.0	
	モリブデン	0	0		

Table 5-6 に潤滑油の分析結果を示す。潤滑油の物理的性状を表す粘度は $30.61 \text{ mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は - 5.1% (管理基準の目安 $\pm 15\%$)、水分は 35.6 ppm (同 500 ppm 未満)、酸価は 0.02 mgKOH/g であり、IR チャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、良好の範囲にあることを確認した。

潤滑油の汚染状態を表す質量汚染度は 106 級 (同 107 級未満) であったが、計数汚染度は 12 級 (同 12 級未満) と異常の数値を示していることから、異常と判定した。

機器の摩耗状態について、異常摩耗のパラメータである Is 値は 2.8×10^1 であり正常の範囲であった。ただし、金属濃度分析の結果では、鉄 (Fe) が 0.5 mg/kg 、銅 (Cu) が 3.4 mg/kg 検出されたことから、軸受において摩耗が発生している可能性があることを診断した。

電子顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を Fig. 5-7(a) に示す。Fig. 5-7 (b) に示すように、表面が滑らかな球状をした溶融摩耗粒子を確認した。第IV章の劣化促進試験における溶融摩耗試験で確認した金属摩耗粒子の形態と同じ特徴を有する $2 \mu \text{ m}$ サイズの球状粒子であった。球状粒子は、溶融した金属が固体に戻るときに球形になる性質の表れであることから、摺動面近傍で金属融点を超える高温が発生したことを示しており、この熱は電動機からの漏電による放電で発生したものと診断した。

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状は良好の範囲に

あるが、油中の汚染度が高く溶融摩耗粒子を確認したことから、汚染物が軸受摺動面に噛み込み摩耗が進行することが懸念される。また、漏電の発生原因を確認して除去する必要がある。Table 5-2 に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、チューブラポンプの分解点検補修を推奨すると診断した。

5.3.5 分解作業時のヒューマンエラー

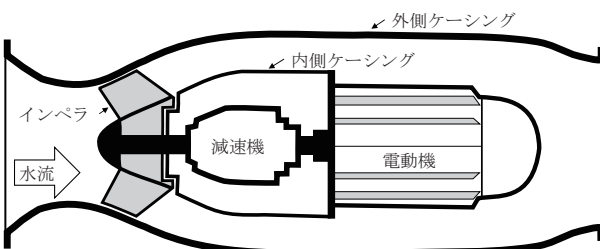
1995年に設置された横軸斜流ポンプ (口径 900 mm) の主軸の転がり軸受のケーシング上部の給油口から潤滑油 (E社製・46) を約 1 L 採取し、分析を行った。このポンプは設置後 20 年のオーバーホール点検を終えたところであり、26 時間稼働した時点で採油を実施した。

Table 5-7 に潤滑油の分析結果を示す。潤滑油の物理的性状を表す粘度は $44.35 \text{ mm}^2/\text{s}$ であり新油からの変化率は - 2.2% (管理基準の目安 $\pm 15\%$)、水分は 14.6 ppm (同 500 ppm 未満)、酸価は 0.08 mgKOH/g と新油値 0.09 mgKOH/g 以下であり、IR チャートで酸化劣化の兆候を示すカルボン酸の吸収が確認されていないことから、良好の範囲にあることを確認した。

更油後の稼働時間が 26 時間と短いにもかかわらず、潤滑油の汚染状態を表す計数汚染度は 12 級超 (同 12 級未満)、質量汚染度は 108 級 (同 107 級未満) であり、摩耗速度が非常に速くなっている可能性があり、汚染状態は

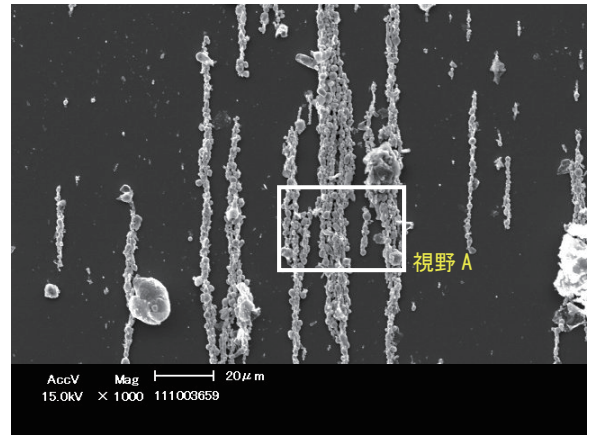


(a) 外観

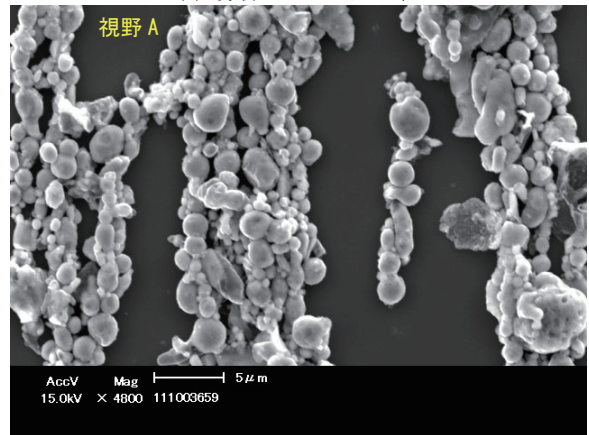


(b) 構造図 (断面図)

Fig. 5-6 チューブラポンプ
Tubular pump



(a) 分析フェログラフィー



(b) 溶融摩耗粒子

Fig. 5-7 電子顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像
Photograph by electron microscope about metal wear particles

Table 5-6 潤滑油の分析結果
Analysis of lubricating oil

		油種 (D社製・32)	測定値	新油値*	
潤滑油の物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	30.61	32.27	
	水分	ppm	35.6	41.1	
	酸価	mgKOH/g	0.02	0.00	
潤滑油の汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15μm	540,844		
		15~25μm	5,423		
		25~50μm	800		
		50~100μm	0		
		100μm以上	0		
	計数汚染度	級	12		
質量汚染度	mg/100mL	0.90			
	級	106			
機器の摩耗状態	大摩耗粒子量		%/ml	6.60	
	小摩耗粒子量		%/ml	3.90	
	異常摩耗指数 (Is値)		-	2.8 × 10 ¹	
	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	摩耗	鉄	0.5	
			クロム	0	
			アルミニウム	0	
			銅	3.4	
			鉛	0	
		汚染	アンチモン	0	
			ケイ素	0	
			カリウム	0	
			ナトリウム	0.2	
カルシウム			0.1		
添加剤	亜鉛	0			
	モリブデン	0			
	バリウム	0			

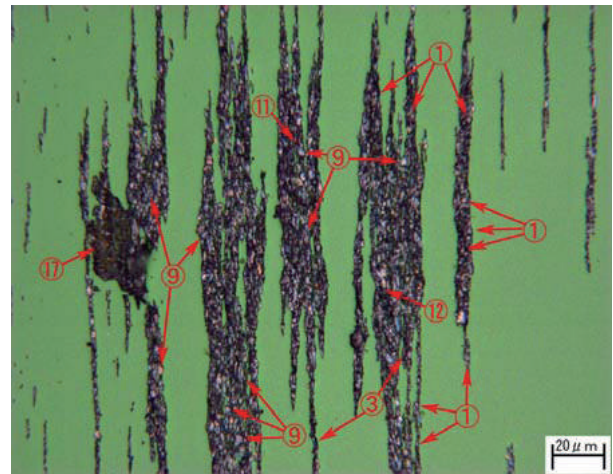
*新油が入手困難のため、同油種による参考値。

異常と判定した。

機器の摩耗状態について、異常摩耗のパラメータであるIs値は 5.9×10^3 であったことから、潤滑状態は厳しいと判定した。また、金属濃度分析の結果では、鉄 (Fe) が8.8mg/kg 検出されたことから、軸受軌道面や転動面で摩耗が発生しているとみられる。また、銅 (Cu) が2.9mg/kg 検出されたことから、転がり軸受の保持器で摩耗が発生している可能性があるとして診断した。分析フェログラフィにおいて、光学顕微鏡で観察した金属摩耗粒子の形態を Fig. 5-8 に示す。5 μ m 未満のうろこ状の剥離片が数多く確認された。これらは微小体積が繰返し応力を受け、表面から亀裂が進展し、剥離することで発生する疲労摩耗粒子 (田中ら, 2013) であり、粒子が大型化するとフレーキングが進行して破壊に至ることが懸念される。採取した潤滑油をろ過したメンブランフィルターの残渣には、微少な金属片や鉄さび、外部から混入した砂、さらに繊維状の異物 (Fig. 5-9) が観察されたことから、分解作業時のヒューマンエラー (柚原ら, 2012) の可能性があるとして診断した。

潤滑診断の結果、潤滑油の物理的性状は良好の範囲にあるものの異常摩耗の兆候がみられ、軸受の摩耗状態が厳しくなっていることが確認できた。潤滑油の汚染度が高いことから、金属摩耗粒子や外部混入異物が軸受摺動面に噛み込み摩耗が進行することが懸念される。前回の

更油の残留物の影響で今回の分析の汚染度が高くなった可能性も考えられる。Table 5-2 に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、まずは油槽内を清掃して更油を行い、潤滑診断を再度実施して、摩耗の進行を定期的に監

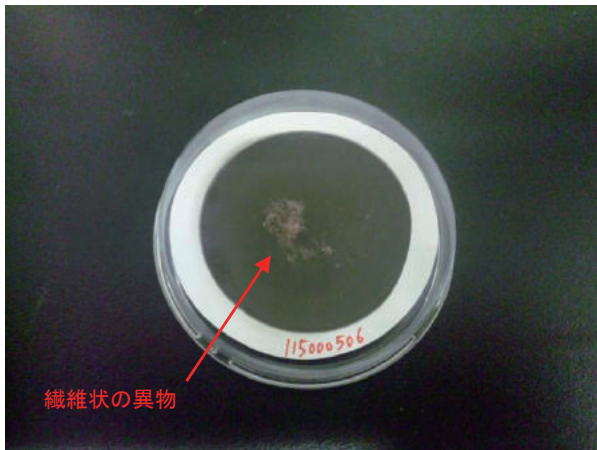


No.	摩耗粒子の名称	形態	量
1	正常	5 μ m未満の微細な薄片	多
3	アプレシブ (切削型)	切りくず状	少
9	疲労	うろこ状の剥離片 (5 μ m未満)	多
11	赤さび	赤褐色の多晶質	少
12	黒さび	灰褐色の多晶質	少
17	フリクションポリマ	不定形	少

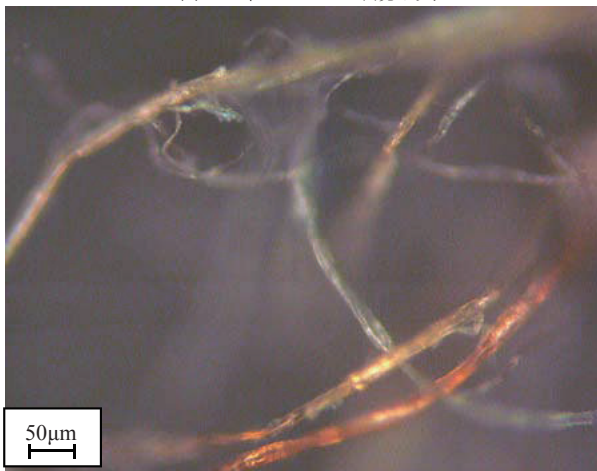
Fig. 5-8 光学顕微鏡写真による金属摩耗粒子の画像
Photograph by optical microscope about metal wear particles

Table 5-7 潤滑油の分析結果
Analysis of lubricating oil

油種 (E社製・46)		測定値	新油値	
潤滑油の物理的性状	粘度40℃	mm ² /s	44.35 / 45.36	
	水分	ppm	14.6 / 23.8	
	酸価	mgKOH/g	0.08 / 0.09	
潤滑油の汚染状態	油中粒子数 (個/100mL)	5~15 μ m	1,286,626 / 8,340	
		15~25 μ m	28,217 / 563	
		25~50 μ m	9,910 / 177	
		50~100 μ m	2,920 / 0	
		100 μ m以上	870 / 0	
計数汚染度	級	12 <	6	
	質量汚染度	mg/100mL	3.20 / 0.40	
機器の摩耗状態	金属濃度分析 (SOAP法) mg/kg	級	108 / 104	
		大摩耗粒子量	%/ml	158.33 / 0.03
			%/ml	138.33 / 0.01
		異常摩耗指数 (Is値)	-	5.9×10^3 / 6.1×10^{-4}
			摩耗	鉄
		クロム		0.1 / 0
		アルミニウム		0.1 / 0
		銅		2.9 / 0
		鉛		0.1 / 0
		アンチモン		0.1 / 0
		汚染	ケイ素	11.0 / 0
			カリウム	0 / 0
ナトリウム	0 / 0.1			
カルシウム	1.6 / 0			
添加剤	亜鉛	4.8 / 3		
	モリブデン	0.2 / 0.1		
	バリウム	12.6 / 0		



(a) フィルターの外観写真



(b) 光学顕微鏡による観察

Fig. 5-9 メンブランフィルター上の異物
Contaminants on the membrane filter

視する必要があると診断した。

5.4 考察

5.4.1 潤滑診断による劣化状態の評価と対処方法

前節で報告した5事例について、Table 5-2に示す潤滑診断の評価結果と対処方法に従い、潤滑剤の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態の各々の判定を併せて総合的に評価を行った。それらの潤滑診断の結果と対処方法を、一覧表にしてTable 5-8に示す。採取した油中に含まれる金属摩耗粒子の形態やサイズは、第IV章の劣化

促進試験で観察した金属摩耗粒子と同じ特徴を有していた。特に、「5.3.4 電食による劣化」と診断する根拠となった直径2µm程の熔融摩耗粒子（球状粒子）の存在を、分解点検の作業行程において確認することは困難である。これらの事例が示すように、油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断を用いることで、農業用ポンプ設備において劣化の兆候を検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となると考えられる。さらに、「5.3.5 分解作業時のヒューマンエラー」の診断事例では、分解点検を行った直後に潤滑診断を実施して、劣化兆候を適時適切に検出している。従来方式の時間計画保全（Time Based Maintenance：TBM）を補うに十分な効果を示していると考えられる。

これらの潤滑診断の結果から、農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うためには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて状態監視保全（Condition Based Maintenance：CBM）を行うことが有効であると考えられる。トライボロジーの知見を活用した潤滑診断は、機器の劣化が進行して破損に至る前に劣化の初期段階の兆候を検出できる高感度な分析手法である（Shah・Hirani, 2014）。今後、潤滑診断の実測データをより蓄積して、農業用ポンプ設備の劣化状態との相関が明らかになれば、補修整備の優先度決定や分解点検時期の予測が容易になることから、ポンプ設備の計画的な維持管理が可能となると考える。

5.4.2 潤滑診断の周期と分析項目

機械部品の損傷進行度のイメージ図をFig.5-10に示す（日本トライボロジー学会, 2006c）。異常の兆候を早期に発見し、異常の原因を的確に診断して損傷要因を除去するためには、短い間隔で状態監視することが効果的である。特に農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、潤滑診断の間隔を短くして機器の劣化状態を継続的に監視する必要がある。しかし、潤滑診断の間隔を短くすることは、分析業務を専門機関に依頼する必要があることから、時間とコストが多く掛かる

Table 5-8 潤滑診断の結果と対処方法
Countermeasures against Oil Analysis

診断事例 (節番号)	分析項目			診断結果	診断結果
	潤滑剤の 物理的性状	潤滑剤の 汚染状態	機器の 摩耗状態		
5.3.1	良好	良好	良好	正常な状態	使用を継続
5.3.2	良好	*	異常	異物混入による劣化	分解点検
5.3.3	良好	異常	異常	潤滑不良による劣化	分解点検
5.3.4	良好	異常	異常	電食による劣化	分解点検
5.3.5	良好	異常	注意	分解作業時の ヒューマンエラー	油槽を洗浄し更油、 定期的に監視

* グリースは流動性が低いことから、定量的評価は困難。

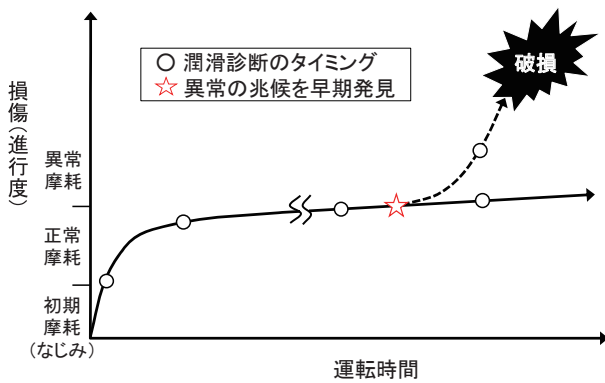


Fig. 5-10 機器の損傷進行度のイメージ図
Image of degradation progress of machinery

という課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、潤滑剤の物理的性状や汚染状態、さらに機器の摩耗状態におけるIs値までの測定結果が正常であると判定されれば、金属濃度分析(SOAP法)や異常原因を特定するための分析フェログラフィー(光学顕微鏡による観察)を実施する必要がないことから、分析項目を減らすことが可能である。そこで、分析項目を選定した簡易な診断方法で判定を行い、異常がなければポンプ設備を継続して使用すると診断する。簡易診断で異常があると判定されれば全項目で分析を行い、異常の原因を特定するという機能診断システムを構築することが効果的かつ効果的である。このような簡易な診断方法を導入することで、潤滑診断の周期を気にすることなく状態監視の継続が容易になると考える。

5.4.3 オイルマネジメントの適用

潤滑剤の正確な分析データに基づいた適正な潤滑診断を実施するには、潤滑剤の製品名称や交換日、稼働時間などの管理記録の入手が不可欠であった。潤滑剤本来の性能が低下してくると機器の劣化が進行してポンプ設備の故障につながることから、潤滑剤の作用を十分に発揮させ、ポンプ設備を正常に稼働させるためには、分析項目を定めて潤滑剤を適切に管理し、その性状がどのように変化したかを知ることが効果的であると考えられる。このような、機械の異常や故障を未然に防いだり、進行を抑えたりすることを目的として実施される潤滑剤の状態を適正に管理する手法をオイルマネジメントと呼ぶ(日本トライボロジー学会, 2006a)。

潤滑剤の劣化の要因には、酸化や熱などによる潤滑剤自身の化学的変化と外部的要因(水分、塵、異物混入など)によるものがある。第3章では、潤滑油の粘度ならびにグリースのちょう度の分析結果から、それらの劣化傾向を報告した。さらに、潤滑剤の製品名称を正しく記録するなど適正に管理されている潤滑剤は著しい劣化が認められないものの、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認されたことを明らかにした。潤滑剤はポンプ設備を円滑に作動させるう

えでなくてはならないものである。潤滑剤に関わるトラブルを未然に防止し、さらに、潤滑診断で正確な評価を行い劣化の進行を抑えるためには、オイルマネジメントの手法を取り入れ、ポンプ設備の保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理点検記録に残すことが効果的であると考えられる(國枝ら, 2015)。

5.4.4 管理基準値の設定方法

潤滑剤の劣化状態の診断に用いられる管理基準値は、使用機械メーカーとユーザー、潤滑剤メーカー間の協議によって決められるものが多い。また、事故による波及効果の大きな機械では、より厳しい基準が設けられている。しかしながら、農業用ポンプ設備を対象とした潤滑診断の適用については、試行的に潤滑診断を行っているところであり、いまだ公的な指針は策定されていない。そのため、本研究の潤滑診断で用いた管理基準値の目安は、一般的な潤滑油使用機械の重要度「普通」を準用している。これらを適用して各々の分析項目を評価し、農業用ポンプ設備について劣化状態の評価を行い、推奨する対処方法を決定した。しかし、例えば2年間と長期に稼働し続ける火力発電設備と比較すると、農業用ポンプ設備の稼働条件は大きく異なり、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返す状況にある。管理基準値を適用するにあたり、農業用ポンプ設備を対象として早期に検討を進める必要があると考える。

そこで、農業用ポンプ設備に適する管理基準値を検討し実用的な指針とするために、潤滑診断に関する十分な測定データの集積を組織的に実施することを提案する。Fig. 5-11に、管理基準値の設定のためのフロー図を示す。まず、潤滑診断で正確な評価を行うためには、潤滑剤の製品名称や交換日などが適正に管理されている必要があることから、定期点検が実施されているポンプ設備を揚水ポンプ設備と排水ポンプ設備に区分して、各々について複数箇所を選定する。その際に、「2.4.3 故障の地域的な分布」で述べたとおり、得られた測定データは全国の

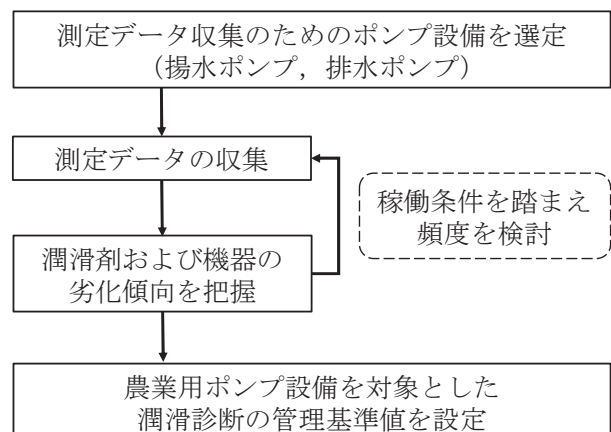


Fig. 5-11 管理基準値の設定のためのフロー図
Flowchart for setting controlcriteria values

ポンプ設備に共通であることから、地域を限定する必要はない。測定データを収集する際に、排水ポンプを対象とする場合は、排水路の水位を事前に調整してポンプ運転が可能にしておく必要がある。一方、揚水ポンプを対象とする場合には、水利権や電力契約期間を考慮し、ポンプ運転が可能な灌漑期間中に潤滑診断を実施する。測定データを収集する頻度は、ポンプ設備の稼働条件（稼働時間や起動停止回数など）により異なるが、起動と停止を短い間隔で繰り返すポンプ設備においては、診断周期を短縮して機器の劣化状態を継続して監視することにより、劣化兆候を把握する必要がある。測定データをもとに潤滑剤および機器の劣化傾向を把握して使用限界を推定することに利用する。

管理基準値を検討するにあたり、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなり効果のないものとなる恐れがある。例えば本研究において、第Ⅲ章で農業用ポンプ設備における潤滑剤の物理的性状の劣化特性を確認した結果、潤滑剤の製品名称や交換日などが適正に管理された潤滑油の粘度は劣化の傾向がみられなかった一方で、グリースのちょう度は31.6%が管理基準値の目安を超過していた。このような潤滑剤の使用状況のもとで、標準耐用年数を超過しているポンプ場が施設数ベースで67.5%であり、かつ稼働している状況にあることから、グリースのちょう度の管理基準値の目安（±20%）については、機器の劣化傾向を確認したうえで緩和に向けた調整を図る必要があるといえる。

5.5 まとめ

本章では、稼働中の農業用ポンプ設備から潤滑剤の採取・分析を行い、その評価を用いてポンプ設備の劣化状態の診断を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 潤滑診断は、潤滑剤の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態の各々の判定を併せて総合的に評価することで、機器の劣化状態を診断できることを確認した。
- (2) 油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断を用いることで、農業用ポンプ設備において劣化の兆候を検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となることを確認した。
- (3) 農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて、状態監視保全を行うことが有効であることを示した。
- (4) 農業用ポンプ設備において潤滑診断を効率的かつ効果的に実施するには、分析項目を選定した簡易な診断方法で判定を行い、異常であると判定されれば全項目で分析を行うことにより異常原因を特定するという新たな機能診断システムを構築することを提案した。
- (5) 潤滑剤に関わるトラブルを未然に防止し、さらに、潤滑診断で正確な評価を行い劣化の進行を抑えるためには、オイルマネジメントの手法を取り入れ、ポンプ設備の保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理点検記録に残すことが重要であることを示した。
- (6) 農業用ポンプ設備を対象とした潤滑診断における管理基準値について、その設定方法を提案した。

第Ⅵ章 農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム

6.1 はじめに

第Ⅴ章では、農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて状態監視保全 (Condition Based Maintenance : CBM) を行うことが有効であることを示した。潤滑診断は、ポンプ設備の軸受や減速機、エンジンなどから潤滑剤を採取し、油中に含まれる金属摩耗粒子の量や形態などの情報を用いて、ポンプ設備を分解せずに軸受などの摩耗状態を把握する機能診断技術である (國枝ら, 2012, 2013 ; 河淵ら, 2013 ; 萩原, 2013 ; 安部田ら, 2015)。本研究で対象とする農業用ポンプ設備の特徴は、稼働時間が短く夏季に集中しており、かつ、高頻度に起動と停止を繰り返すという使用環境にある (西尾・國枝, 2016)。このようなポンプ設備の劣化兆候を検出するには、短い間隔で状態監視することが効果的であるが、潤滑診断の間隔を短くすることは分析業務を専門機関に依頼する必要があることから、時間とコストが多く掛かるという課題がある。一方で、ポンプ設備の劣化状態を診断する際に、潤滑剤の物理的性状や汚染状態、さらに機器の摩耗状態における異常摩耗指数 (Severity Index : Is 値) の測定結果が正常であると判定されれば、金属濃度分析 (Spectrometric Oil Analysis Program : SOAP 法) (日本トライボロジー学会, 2001b) や異常原因を特定するための分析フェログラフィー (光学顕微鏡による観察) (松本・Rotondi, 1980 ; 柴田, 1982) を実施する必要がない。そのため、潤滑診断を行う前に、分析項目を選定した一次スクリーニングを実施することが可能である。

そこで本章では、分析項目を選定した簡易な診断方法 (以下、「簡易診断」という) を適用して、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システムについて述べる。

なお、本章で述べる携帯型測定装置の開発は、農業用ポンプ設備の機能診断技術の適用を促進することを目的として、農林水産省農村振興局・官民連携新技術研究開発事業「トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断技術開発 (平成24年～26年)」 (國枝, 2014 ; Kunieda, 2015 ; 川畑ら, 2015) において、民間企業と共同研究を行った成果の一部である。

6.2 簡易診断の分析項目と管理基準値

農業用ポンプ設備では、軸受や減速機などの回転部に潤滑剤が使用されている。川畑らは、ポンプ設備に用いられる潤滑油の劣化の多くが酸化劣化と水分混入であることから、簡易診断の分析項目では潤滑油の酸価と水分を測定すれば、潤滑油の物理的性状を概ね判定できると報告している (川畑ら, 2015)。このことについては、第Ⅲ章の潤滑剤の劣化特性において潤滑油の粘度の変率

は小さいことを確認したことからも、同様のことがいえる。潤滑油の汚染に関する劣化は、油中の固形物の粒子数と質量の増加であり、粒子数の増加現象は78%であり質量の増加現象22%に比べて非常に高いことから、粒子数を示す計数汚染度を選定項目とすると述べている。また、機器の摩耗状態では、凝着摩耗粒子 (37%)、疲労摩耗粒子 (32%)、切削摩耗粒子 (26%) が多く発生していると報告している。

機器の摩耗状態を判定する定量フェログラフィーは、摩耗粒子の量を測定し、その経時変化から異常摩耗の発生時期を予測する分析法である。「正常摩耗粒子は小さく、異常摩耗粒子は大きいことが多い」という現象を利用し、大摩耗粒子 (15 μm 以上) と小摩耗粒子 (5 μm 以下) に分け、式 (1) を用いて Is 値を算出する。

$$Is \text{ 値} = (P_L + P_S) (P_L - P_S) = P_L^2 - P_S^2 \quad (1)$$

ここで、 P_L =大摩耗粒子 (15 μm 以上, 単位:%/mL), P_S =小摩耗粒子 (5 μm 以下, 単位:%/mL), $(P_L + P_S)$ =全摩耗量に相当, $(P_L - P_S)$ =摩耗の異常度である。異常摩耗が始まると大摩耗粒子が支配的になり Is 値が急上昇することから、異常の始まりを見つかることができる。そこで、定量フェログラフィー (Is 値) を選定項目とする。

これらのことから、簡易診断における潤滑油の分析項目として、物理的性状は水分と酸価を、汚染状態は計数汚染度を、機器の摩耗状態は定量フェログラフィー (Is 値) を選定することとした。潤滑診断の分析項目と簡易診断における選定項目を整理した一覧表を **Table 6-1** に示す。また、選定した項目の管理基準値は、一般的な潤滑油使用機械の重要度「普通」 (日本トライボロジー学会, 2001c) および田中らの報告 (田中ら, 2013) を準用している。管理基準値の目安の一覧表を **Table 6-2** に示す。

Table 6-1 潤滑診断の分析項目および簡易診断の選定項目
Analysis items of lubrication diagnosis and chosen items of simplified diagnosis

項目	潤滑診断の分析項目と仕様	選定項目
潤滑油の物理的性状	粘度 (40℃) / JIS K 2283	
	水分 / JIS K 2275	○
	酸価 / JIS K 2501	○
	赤外線吸収スペクトル法 (IR) / JIS K 0117	
潤滑油の汚染状態	計数汚染度 (NAS1638) / JIS B 9934	○
	質量汚染度 (NAS1638) / JIS B 9931	
	光学顕微鏡写真	
機器の摩耗状態	金属濃度分析 (SOAP 法) / ICP 発光分光分析	
	フェログラフィー法 (定量フェログラフィー・分析フェログラフィー)	○ (Is 値)

Table 6-2 潤滑診断の評価に用いた管理基準値の目安
Management standards for Oil Analysis

分類	分析項目	管理基準値の目安
潤滑油の物理的性状	水分	500ppm 未満
	酸価	新油の値からの上昇率 + 25%
潤滑油の汚染状態	計数汚染度	(NAS12 級未満)
機器の摩耗状態	異常摩耗指数 (Is 値)	(10 ³ 未満)

注：() 内の値は、農業用ポンプ設備を対象とした参考値である。

6.3 携帯型測定装置の開発

分析項目を選定した簡易な診断方法で、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことが可能な携帯型測定装置の開発を行う。携帯型測定装置は、潤滑油の物理的性状に関する酸化劣化の発生および水分混入を評価する劣化簡易測定装置と、潤滑油の汚染に関する計数汚染度の増加を評価する汚染度簡易測定装置、さらに潤滑部の摩耗に関する凝着摩耗と切削摩耗、疲労摩耗の発生を評価する摩耗簡易測定装置の3機種とし、それぞれについて設計・製作を行う。携帯型測定装置は持ち運びが可能な大きさとし、現地に100Vの電源と操作台(折りたたみ机)があれば簡易診断を行うことができる仕様とした。

携帯型測定装置の測定は、ポンプ設備の運転管理者が潤滑剤に関する専門知識が十分でなくても判断できることを前提条件として、良好を○、注意を△、異常を×とする三段階に評価して表示する形式とした。ここでは、良好とは問題がない場合とし、注意とは軽微な劣化が発生している場合を、異常とは劣化が比較的進行している場合と定義する。

6.3.1 潤滑油の劣化簡易測定装置

潤滑油の劣化の多くが酸化劣化と水分混入であることから、潤滑油の酸価 (mgKOH/g) と水分 (ppm) を測定すれば、その劣化の程度を概ね推定できる。開発した携帯型測定装置は、ATR (Attenuated Total Reflection, 減衰全反射) 結晶を用いた検出部と、評価部および表示部から構成されている (Fig. 6-1) (國枝ら, 2014)。本装置の特徴は、反射光を目的の波長に絞り、潤滑油の酸化劣化の指標となるカルボキシル基 (-COOH) により赤外線が吸収される帯域 (1,710cm⁻¹ 付近) と、水分では水酸基 (-OH) により吸収される帯域 (3,100 ~ 3,600cm⁻¹ 付近) の2種の赤外線通過帯域フィルタを採用し、それらを受光素子の前面に並列配置して自動スライドさせることにより、2帯域の赤外線を簡易な機器構成で分光可能にした点にある。さらに、投入光量の変化を補正するために、潤滑油を構成する様々な分子の固有振動領域と無関係な 2,000cm⁻¹ 付近の通過帯域フィルタを用いて精度を上げている。

Fig. 6-1 に示すように、ポンプ設備の回転部から採取した潤滑油を、検出部の ATR 結晶表面に塗布する。その際

に ATR 結晶内を通過した赤外線は、界面で潤滑油の影響を受けて反射光のエネルギーが減少する。2種の帯域フィルタを通過した赤外線の強度を受光素子で電的に検出することによって、潤滑剤の酸価と水分を各々測定することができる。

潤滑油を五段階に酸化劣化させ、それぞれの試料の酸価と検出した電圧の関係を Fig. 6-2 に示す。酸価の値が大きいほど測定される電圧の値は小さくなり、両者には線形の関係が認められる。このグラフに三段階評価(良好, 注意, 異常)のイメージ図を重ねる。潤滑油は含まれる添加剤の種類や量で酸化劣化の上限値が異なることから、基油の酸化劣化がこれ以上に進行し難いと判断できる酸価の増加量を限界値と定め、限界値の半値を判定基準値とした。水分については、潤滑診断の管理基準値の目安である 500ppm を判定基準値とした。判定基準値以上の酸価であれば「異常」とし、判定基準値の半値以上で判定基準値未満であれば「注意」、判定基準値の半値未満の場合には「良好」と判定する。

本装置の外観と表示画面を Fig. 6-3 に示す。外寸は縦 195mm, 横 95mm, 高さ 51mm で、重さは 553g と小型軽量である。採取した潤滑剤を検出部に塗布するだけで専門

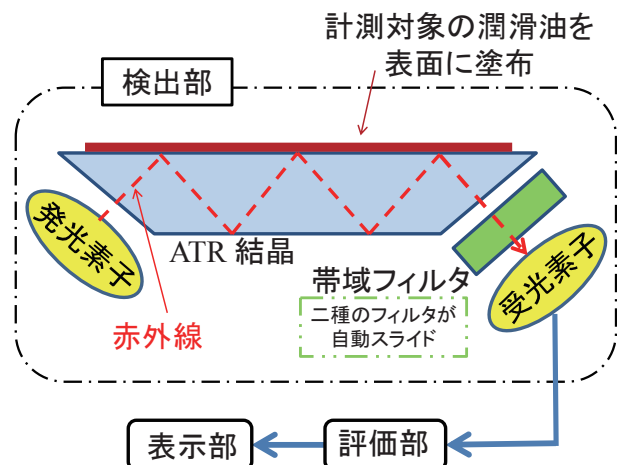


Fig. 6-1 劣化簡易測定装置のイメージ図

Image of simplified measurement device for degradation

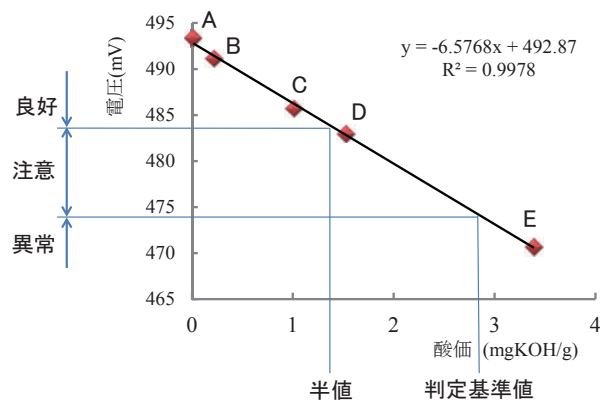


Fig. 6-2 三段階評価のイメージ図

Image of estimation with three phases

的な知識がなくても劣化状態を判断できるよう、瞬時に、酸化劣化と水分上昇の程度をそれぞれ三段階に評価（良好、注意、異常）して表示することができる。なお、取得データ（数値）についても表示することが可能である。

6.3.2 潤滑油の汚染度簡易測定装置

計数汚染度の測定には、油中の金属摩耗粒子の個数を計数する光遮へい式レーザー計測装置が一般的に用いられるが、油中に存在する気泡も光を遮へいするため、計測装置は気泡を除去する（脱泡）機能が不可欠である（飯田, 2011）ことから大型で高価となる。そこで、光遮へい効果に光反射効果を組み合わせることにより油中の金属摩耗粒子と気泡を瞬時に判別できる技術を適用することで、現場にも持ち運びできる小型の測定装置を開発した。

本装置で用いる新たな測定法として、これまで区別することができなかった固形物と気泡を自動的に判別できる微粒子計数方法（特許第4719587号）を適用する。その技術の原理を以下に述べる。気泡は潤滑油中において真球に近い形状で存在する。一方、固体粒子は板状や針状などいびつな形状をしているものがほとんどである。そこで、いびつな形状に当たった光は不規則に反射し、

真球に当たった光の反射光は左右対称となることを利用し、左右に反射した光が同期した場合に気泡と判別して粒子カウントから外すこととする。このようにして、一部遮へいされた透過光強度から粒子の大きさを計測し、反射光の同期を利用してコンピュータ上で三次元解析することによって粒子と気泡を判別することが可能となる。そのため、気泡の影響を考慮することなく、採取した潤滑油をそのままの状態でも測定できることから、現場での簡易診断に適した技術であるといえる。

本装置では、潤滑油を検出部まで運ぶ方法として、Fig. 6-4に示すようにシリンジとリニアアクチュエータを使用することで、油種によらず一定流量で、微量油量での測定を可能とした。これにより、油送ポンプや脱泡用コンプレッサーが不要となることで小型化を実現した。

計数汚染度については、潤滑診断の管理基準値の目安であるNAS12級を判定基準値とした。判定基準値以上の汚染度であれば「異常」とし、1等級下を「注意」、2等級以下の場合には「良好」と判定する。

本装置の外観と表示画面をFig. 6-5に示す。外寸は横247mm、奥行226mm、高さ308mmで、重さは8.5kgであり、持ち運びが可能なサイズである。測定結果は、三段階に評価（良好、注意、異常）して表示する。なお、取得データ（数値）についても表示することができる。

6.3.3 機器の摩耗簡易測定装置

定量フェログラフィーで機器の摩耗状態を判定するには、まず磁場を用いて金属摩耗粒子を潤滑油から取り出して大きさの順に配列したデータプレートを作成し、観察・測定する必要がある。データプレートを簡単に作成できる小型軽量の回転式フェログラフィー分析装置（安部田ら, 2013）が既に実用化されていることから、本研



(a) 外観



(b) 表示画面 1

(c) 表示画面 2

Fig. 6-3 劣化簡易測定装置と表示画面

Simplified measurement device of degradation and displays

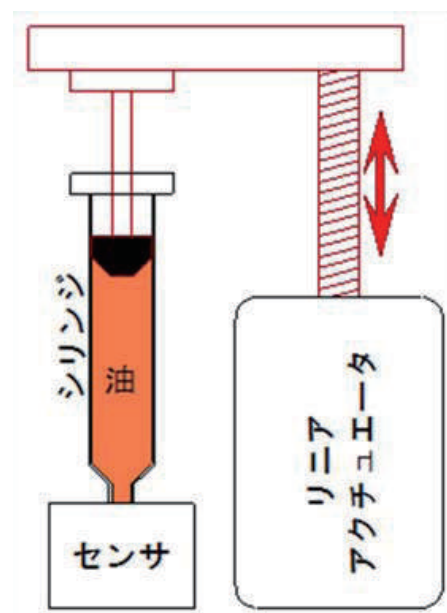


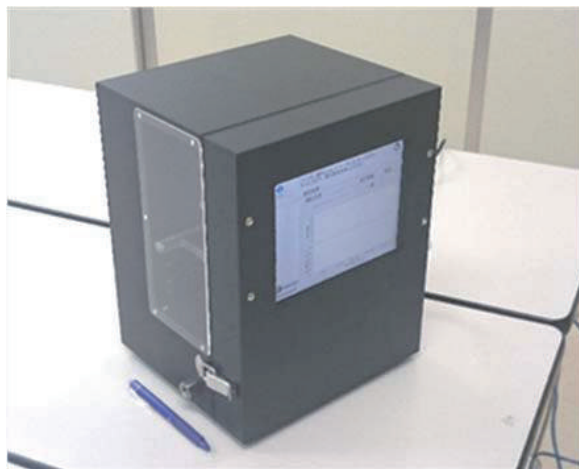
Fig. 6-4 汚染度簡易測定装置のイメージ図

Image of simplified measurement device of pollution degree

究では、回転式フェログラフィー分析装置で作成したデータプレートを用いて、現場で簡単に摩耗状態を測定できる装置を開発した。Fig. 6-6に示すように、機器の摩耗簡易測定装置は、データプレートを置くステージをモータで水平方向に可動することにより、金属摩耗粒子をマイクロスコープで自動的に観察できる構造とした。

回転式フェログラフィー分析装置は、遠心力を利用して金属摩耗粒子を配列させる方法をとることにより、データプレートの中心近くに大摩耗粒子が円状に補足される。また、小摩耗粒子は同心円の外側に沈着する。開発した摩耗簡易測定装置は、マイクロスコープで各々の摩耗粒子の光学濃度を読み込み、Is値に相当する劣化度を算出する方式とした。算出した値は、その数値が大きいほど摩耗状態が進展していることを示す。本装置で得られた算出値と、フェログラフィー法によるIs値との相関を検証すると相関係数は0.96と高いことから、簡易型の摩耗診断装置として用いることとした。

Is値については、潤滑診断の管理基準値の目安である 10^3 を判定基準値とした。判定基準値以上であれば「異常」とし、判定基準値以下を「注意」、判定基準値より2桁以下の場合には「良好」と設定し、Is値との相関に基づき評価を行う。



(a) 外観



(b) 表示画面

Fig. 6-5 汚染度簡易測定装置と表示画面
Simplified measurement device of pollution degree and display

本装置の外観と表示画面を Fig. 6-7 に示す。外寸は横150mm、奥行200mm、高さ200mmで、重さは3.0kgであり、持ち運びが可能なサイズである。測定結果は、三段階に評価（良好、注意、異常）して表示する。なお、取得データ（数値）についても表示することができる。

6.4 携帯型測定装置の性能評価

携帯型測定装置の性能を確認するために、4箇所の農業用排水機場において、10基のポンプ設備から潤滑油28試料を採取し、現地において携帯型測定装置を用いた簡易診断を行った。さらに、それらの試料について分析室において潤滑診断を行い、Table 6-2に示した管理基準との

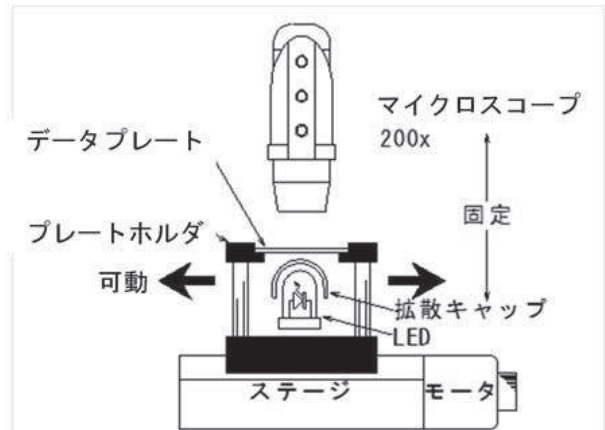
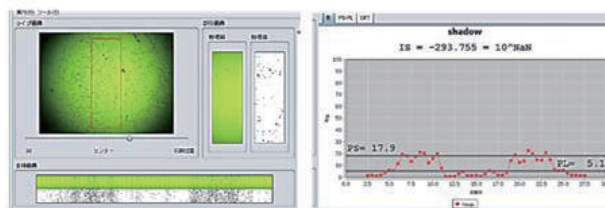


Fig. 6-6 摩耗簡易測定装置のイメージ図
Image of simplified measurement device of abrasion



(a) 外観



(b) 表示画面 1

(c) 表示画面 2

Fig. 6-7 摩耗簡易測定装置と表示画面
Simplified measurement device of the abrasion and displays

目安を適用し、潤滑油の物理的性状（酸化劣化と水分混入）と汚染状態、機器の摩耗状態に関して劣化の進行状態の評価を行った。潤滑診断の三段階評価の判定基準値は、酸価については管理基準値の目安である「新油の値からの上昇率+25%」を判定基準値としたが、その他の判定基準値は簡易診断と同様である。潤滑診断の三段階評価と携帯型測定装置で判定された診断結果との整合をみることによって、携帯型測定装置の性能評価を行った。Table 6-3の結果一覧表に示すように、診断結果の整合率については、潤滑油の酸化劣化は92.6%であり、潤滑油の水分は100%、潤滑油の汚染状態は96.4%、機器の摩耗状態は89.3%であり、簡易診断はいずれも概ね9割以上で一致した診断結果が得られた。

ここで、不整合がみられた評価結果をもとに、携帯型

測定装置の有用性について述べる。簡易診断は「異常」な試料を「異常」と判定することが求められることから、潤滑油の物理的性状（酸化劣化と水分混入）については整合率が高いものの、潤滑診断で「異常」と判定された試料がなく有用性を判断し難い。また、潤滑油の汚染状態については整合率が96.4%と高いものの、「異常」の試料を「良好」と判定したものが1試料あり、機器の摩耗状態については、「良好」の試料を「良好」と判定したものが3試料ある。それらについては、判定基準値の補正が必要である。そのため、潤滑診断との比較を行った簡易診断の実施データをより集積して、携帯型測定装置の三段階評価（良好、注意、異常）の補正を行うことで、整合性をより高いものにすることができると考える。

携帯型測定装置を用いた簡易診断で適正な評価を行う

Table 6-3 潤滑診断と簡易診断の結果一覧表
Table of lubrication diagnosis and simplified diagnosis

No.	排水機場	ポンプ型式	口径 (mm)	原動機	採油箇所	潤滑油の物理的性状				潤滑油の汚染状態		機器の摩耗状態			
						酸化劣化		水分混入		潤滑 診断	簡易 診断	潤滑 診断	簡易 診断	潤滑 診断	簡易 診断
						潤滑 診断	簡易 診断	潤滑 診断	簡易 診断						
1	A機場	横軸斜流	800	EM	主軸すべり軸受	○	○	○	○	○	○	△	△		
2	A機場	横軸斜流	800	EM	減速機	○	○	○	○	×	△	×	×		
3	A機場	横軸斜流	800	EM	主軸すべり軸受	○	○	○	○	△	△	△	△		
4	A機場	横軸斜流	800	EM	減速機	○	△	○	○	○	○	○	○		
5	A機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	×	×	△	△		
6	A機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
7	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	○		
8	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	△	△	△	△		
9	A機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	○	○	○	○		
10	A機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
11	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	△		
12	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	△		
13	A機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	○	○	○	○		
14	A機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
15	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	○		
16	A機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	○	○		
17	B機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	×	×	×	×		
18	B機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
19	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	○	○	△	△		
20	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	△	△	△	△		
21	B機場	横軸斜流	1,200	DE	主軸すべり軸受	○	○	○	○	×	×	×	×		
22	B機場	横軸斜流	1,200	DE	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
23	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	△	△	△	○		
24	B機場	横軸斜流	1,200	DE	エンジン過給機	○	○	○	○	×	×	△	△		
25	C機場	チューブラ	1,200	EM	減速機	○	○	○	○	○	○	○	○		
26	C機場	チューブラ	1,200	EM	主軸すべり軸受	○	△	○	○	×	×	△	△		
27	D機場	チューブラ	2,100	EM	潤滑油槽	○	○	○	○	×	×	△	△		
28	D機場	チューブラ	2,100	EM	潤滑油槽	○	○	○	○	○	○	△	△		
EM：電動機					一致数	26	28	27	25						
DE：ディーゼルエンジン					整合率 (%)	92.9	100	96.4	89.3						

には、測定する潤滑油を正しく採取することが重要である。施設を管理する技術者は、潤滑油を採取する前にポンプ設備を約 30 分稼働させ潤滑油を十分に攪拌し、油中に含まれる金属摩耗粒子が均一になっている状態で潤滑油の採取を行う。さらに、採油時に、外部からの異物などを混入させないよう注意を払う必要がある。このような留意事項や使用手順を示した操作マニュアル（川畑ら，2015）を既に整えており、携帯型測定装置を用いれば、専門知識が十分でなくても潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を簡易に判定することが可能となる。

6.5 携帯型測定装置を用いた新たな機能診断システム

現在、農業用ポンプ設備には劣化状態を定量的に診断する手法がなく、供用年数などを判断基準として定期的に分解点検・補修を行う方式が適用されている。そこで、ポンプ設備の回転部（減速機や軸受など）から潤滑油を採取・分析することによって、設備を分解することなく劣化状態を定量的に診断し、劣化が致命的な故障にいたる前に異常を検知して、突発的な故障リスクを低減するための新たな機能診断システムを導入することを提案する（國枝，2015；Kunieda，2016）。潤滑診断は、潤滑剤に関する知識を有する専門家が大型分析装置を用いて行う精密診断である。一方、本研究で開発した携帯型測定装置を用いた簡易診断は、施設を管理する技術者自らが現地で簡便に診断を行うことができる一次診断と位置づけられる。3種類の携帯型測定装置は小型かつ軽量であることから施設現場に持ち運び、100V 電源と操作台（折りたたみ机）があれば、容易に現地で簡易診断ができることを確認している。

新たな機能診断システムのフロー図を Fig. 6-8 に示す。新たな方式は、まず一次診断として、施設管理者自らが携帯型測定装置を用いて簡易診断を実施する。一次診断で「異常」と判定されれば、専門的分析機関に詳細な潤滑診断（二次診断）を依頼し、二次診断で異常箇所を特定した後に、機械設備会社にポンプ設備の分解点検・補修を発注する方式である。施設の管理者自らが日常点検のなかで劣化状態を診断できることから、効率的かつ効果的にポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となると考えられる。

6.6 まとめ

本章では、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム導入の提案について述べた。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 開発した携帯型測定装置を用いれば、専門知識が十分でなくても潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を簡易に判定することができる。3種類の携帯型測定装置は小型かつ軽量であることから施設現

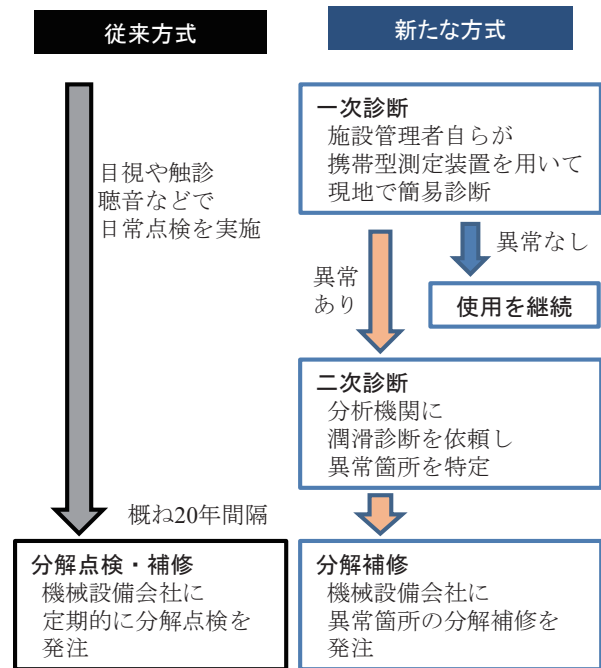


Fig. 6-8 新たな機能診断システムのフロー図
Flowchart of new diagnosis system

場に持ち運び、100V 電源と操作台（折りたたみ机）があれば、容易に現地において簡易診断ができることを確認した。

- (2) 簡易診断はいずれも概ね 9 割以上で一致した診断結果が得られた。今後は、潤滑診断との比較を行った簡易診断の実施データをより集積して、携帯型測定装置の三段階評価（良好，注意，異常）の補正を行うことで、整合性をより高いものにすることが可能となる。
- (3) 携帯型測定装置を用いた簡易診断で適正な評価を行うには、測定する潤滑油を正しく採取することが重要である。潤滑油を採取する前にポンプ設備を約 30 分稼働させ潤滑油を十分に攪拌し、油中に含まれる金属摩耗粒子が均一になっている状態で潤滑油の採取を行う。さらに、採油時に、外部からの異物などを混入させないよう注意を払う必要がある。
- (4) ポンプ設備の回転部（減速機や軸受など）から潤滑油を採取・分析することによって、設備を分解することなく劣化状態を定量的に診断し、劣化が致命的な故障にいたる前に異常を検知して、突発的な故障リスクを低減するための新たな機能診断システムを導入することを提案した。新たな方式は、携帯型測定装置を用いることで施設の管理者自らが日常点検のなかで劣化状態を診断できることから、効率的かつ効果的にポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となる。

第Ⅶ章 結 言

本研究は農業用ポンプ設備を対象とし、ポンプ設備の突発的な故障を防ぐために、故障が顕著となる前に劣化の兆候を検出する技術の適用を図り、さらに、ポンプ設備の劣化状態を定量的な指標で機能診断する技術を確立することを目的として研究を行った。

以下に、本論文で議論した研究課題を示す。

- (1) 農業用ポンプ設備を管理する担当者への維持管理や故障の原因などに関するアンケート結果をもとに、ポンプ設備の劣化の特徴を明らかにするとともに、劣化の進行を防ぐための状態監視保全の適用を考察する。
- (2) 潤滑剤の物理的性状に着目し、それらの分析結果から農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性と、潤滑診断の管理基準値の設定方法について考察する。
- (3) 実機を用いて、潤滑診断の劣化に対する応答特性を求めることを目的とし、農業用ポンプ設備でよくみられる切削と凝着、溶融現象を再現するための劣化促進試験を実施する。
- (4) 農業用ポンプ設備を対象として潤滑診断を実施した事例に基づき適用時の留意点を示し、ポンプ設備への適用に当たっての課題と今後の展望について考察する。

本研究で得られた結論と知見を以下に示す。

第Ⅱ章「農業用ポンプ設備で発生する不具合の特徴に関する分析」では、農業用ポンプ設備の維持管理に関する現状や課題などを把握するためにアンケート調査を実施した。調査対象としたポンプ設備の型式による性能の特徴として揚水ポンプの型式は高揚程の渦巻ポンプが多いのに対し、排水ポンプは低揚程の斜流ポンプが多くなっている。原動機の種類は、揚水ポンプ設備では全設備が電動機であったのに対し、排水ポンプ設備では電動機とディーゼルエンジンが半数ずつとなっている。また、双方ともに1980年代に設置されたものが最も多く、設備更新時期が近年に集中することが想定され、農林水産省が示すデータと同じ傾向となっている。アンケート調査を分析したその結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 分解点検が行われた履歴を有する割合は、揚水ポンプ設備が排水ポンプ設備に比べて高くなっていた。揚水ポンプ設備の軸受および軸受以外の部品について交換した割合はともに5割を超えており、排水ポンプ設備ではそれらの交換割合は約3割であった。これらは、揚水ポンプ設備の稼働時間が排水ポンプ設備よりも長かったことから、摩耗などの劣化が進行したと考えられる。
- (2) 軸受の不具合の原因の多くが、稼働時間の増加とともに進行する摩耗によるものであった。軸受以外の交換部品の66.7%をポンプ・原動機・減速機が占めていた。また、機器の重大なトラブルでは、性能が徐々に低下していく劣化進行型の部品の故障が数多く見られた。

(3) 気候差などにより故障が発生し易い地域が限定されているか否かを確認したところ、ポンプ設備の故障には発生する地域に偏りはなかった。

(4) ポンプ設備の重大なトラブルを防止するためには、部品の劣化が進行する前の適期に補修を行うなど、ポンプ設備における状態監視保全の適用が重要であることを確認した。

第Ⅲ章「農業用ポンプ設備における潤滑剤の劣化特性」では、農業用ポンプ設備で使用される潤滑剤の性状(粘度、稠度)を分析して得られた結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 適正に管理された潤滑油は、粘度の変化率の幅が狭く良好な状況にあることから、劣化の傾向を見出せなかった。
- (2) 揚水ポンプ設備のグリースは軟化の傾向を、排水ポンプ設備のグリースは硬化の傾向を示していた。グリース選定のためには、ポンプ設備の使用状況(年稼働時間)が重要な指標のひとつになる。
- (3) 農業用ポンプ設備に適した管理基準値の設定が必要である。ここで、厳しい管理基準値を採用すると整備点検が過剰となり、甘い値にすると故障リスクが大きくなることから、実状に即した適切な管理基準値を設定しなければならない。さらに、管理基準値は対象とする施設の重要度に応じて設定する必要がある。
- (4) 潤滑剤の性状を測定した結果、正しく管理された潤滑剤は著しい劣化が認められない一方で、正しく管理されていない潤滑剤は劣化の進行が疑われる試料が高い割合で確認された。

第Ⅳ章「実機を用いたポンプ設備の劣化促進試験」では、ポンプ設備の軸受や歯車を対象として劣化の初期段階から損傷に至る劣化促進試験を、実機を用いて実施した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) アブレイブ摩耗試験および凝着摩耗試験、溶融摩耗試験の3試験を行い、損傷を起こす要因として想定した現象に対応する金属摩耗粒子とその発生部位をそれぞれ確認することができた。
- (2) 油量に関係なく、潤滑油に含まれる金属摩耗粒子数の増加傾向を時系列で検出できることを確認した。
- (3) 潤滑剤に含まれる金属摩耗粒子の個数や形態、サイズが、ポンプ設備の劣化の兆候を検出する監視項目になることを確認した。
- (4) 油中の金属摩耗粒子数を計測する手法は、振動法や温度法と比較して設備の劣化の兆候をより早期に検出できることを確認した。

第Ⅴ章「農業用ポンプ設備の劣化兆候検出法とその適用上の課題」では、稼働中の農業用ポンプ設備から潤滑剤の採取・分析を行い、それらの分析結果で得られた評価を用いてポンプ設備の劣化状態の診断を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 潤滑診断は、潤滑剤の物理的性状および汚染状態、機

- 器の摩耗状態の各々の判定を併せて総合的に評価することで、機器の劣化状態を診断できることを確認した。
- (2) 油中の金属摩耗粒子を監視項目とする潤滑診断を用いることで、農業用ポンプ設備において劣化の兆候を検出し、破損に至る前に異常の原因を判明して適切な対処を図ることが可能となることを確認した。
 - (3) 農業用ポンプ設備を運転管理する現場において異常発生に対して適切な処置を行うには、設備の劣化兆候を検出する潤滑診断を用いて、状態監視保全を行うことが有効であることを示した。
 - (4) 農業用ポンプ設備において潤滑診断を効率的かつ効果的に実施するには、分析項目を選定した簡易な診断方法で判定を行い、異常であると判定されれば全項目で分析を行うことにより異常原因を特定するという新たな機能診断システムを構築することを提案した。
 - (5) 潤滑剤に関わるトラブルを未然に防止し、さらに、潤滑診断で正確な評価を行い劣化の進行を抑えるためには、オイルマネジメントの手法を取り入れ、ポンプ設備の保守整備において潤滑剤の製品名称と交換日、性状を管理点検記録に残すことが重要であることを示した。
 - (6) 農業用ポンプ設備を対象とした潤滑診断における管理基準値について、その設定方法を提案した。

第Ⅵ章「農業用ポンプ設備の新たな診断システム」では、施設を管理する技術者自らが現地で簡易診断を行うことができる携帯型測定装置の開発と、それらを用いた農業用ポンプ設備の新たな機能診断システム導入の提案について述べた。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 開発した携帯型測定装置を用いれば、専門知識が十分でなくても潤滑油の物理的性状および汚染状態、機器の摩耗状態を簡易に判定することができる。3種類の携帯型測定装置は小型かつ軽量であることから施設現場に持ち運び、100V電源と操作台（折りたたみ机）があれば、容易に現地において簡易診断ができることを確認した。
- (2) 簡易診断はいずれも概ね9割以上で一致した診断結果が得られた。今後は、潤滑診断との比較を行った簡易診断の実施データをより集積して、携帯型測定装置の三段階評価（良好、注意、異常）の補正を行うことで、整合性をより高いものにするのが可能となる。
- (3) 携帯型測定装置を用いた簡易診断で適正な評価を行うには、測定する潤滑油を正しく採取することが重要である。潤滑油を採取する前にポンプ設備を約30分稼働させ潤滑油を十分に攪拌し、油中に含まれる金属摩耗粒子が均一になっている状態で潤滑油の採取を行う。さらに、採油時に、外部からの異物などを混入させないよう注意を払う必要がある。
- (4) ポンプ設備の回転部（減速機や軸受など）から潤滑油を採取・分析することによって、設備を分解することなく劣化状態を定量的に診断し、劣化が致命的な故障にいたる前に異常を検知して、突発的な故障リスク

を低減するための新たな機能診断システムを導入することを提案した。新たな方式は、携帯型測定装置を用いることで施設の管理者自らが日常点検のなかで劣化状態を診断できることから、効率的かつ効果的にポンプ設備の分解点検や補修の適切なタイミングを判断することが可能となる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、懇切丁寧なご指導とご教示を賜りました東京農工大学大学院工学府 安藤泰久教授に深甚なる感謝の意を表します。安藤教授には、理論的な研究の進め方や摩擦現象の考え方など学術的な見地から多くの知識や示唆を頂き、また、論文のご校閲においても、技術的な内容はもちろん論文構成に至るまで、有意義かつ的確なご意見を頂き、深く感謝しております。小笠原俊夫教授、笹原弘之教授、夏亘教授、許允禎准教授には、学位論文審査において貴重なご意見とご指導を頂き、学位論文の精緻な考察を補うことができました。大変お忙しい中、ご指導いただきありがとうございます。

農林水産省の行政職として20数年間の勤務を経た後、このような研究の機会を与えて下さった皆様に感謝の言葉を述べさせていただきます。農研機構農村工学研究所 高橋順二前所長、小泉健所長、山本徳司企画管理部長には、本研究を開始した時点では到達点が見えない中で様々なご支援を賜りました。施設工学研究領域施設保全管理担当 水間啓慈主任研究員、森充広主任研究員、安部田泰特別研究員には、現地調査など本研究の遂行にあたり、多大なるご協力および貴重なご助言を賜りました。厚く御礼申し上げます。トライボテックス株式会社 川畑雅彦社長には、ご教示いただいた知見により開眼することができ、新たな学術分野であったトライボロジーに足を踏み入れる動機付けを頂きました。また、吉田直樹部長、藤平道孝部長をはじめ社員の皆様には、官民連携新技術研究開発事業の共同研究を通じて、携帯型測定装置の開発や劣化促進試験などに多大なるご協力とご助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

九州大学 黒田正治名誉教授には、学生時代に教えていただいた研究者としての基礎があったことにより、34年を経て学術論文として実を結ぶことができました。ここに厚く御礼申し上げます。最後に、私の研究生活について、寛容にして最良の理解者である妻、祐子に感謝の意を表します。

引用文献

- 安部田泰, 伊藤耕祐, 國枝 正, 水間啓慈 (2015) : 油中粒子解析法を用いた潤滑状態監視・診断の実機適用, 平成27年度農業農村工学会関東支部大会講演会講演要旨, 21-24.
- 安部田泰, 川畑雅彦 (2013) : 回転式フェログラフィー装置の開発と実機適用の事例, 日本機械学会第12回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, 55-57.
- 赤垣友治, 加藤康司, 古矢千吉, 川畑雅彦 (1991) : フェログラフィーによる実機ジャーナル軸受の破損過程の解析, 日本機械学会第69期全国大会講演会講演論文集 (Vol. C), 471-473.
- Paula J. Dempsey, David G. Lewicki, Harry j. Decker (2004) :

- Investigation of gear and bearing fatigue damage using debris particle distributions, NASA/TM - 2004-212883, 1-11.
- 電気事業連合会 (2015) : 電源別発電電力量構成比, http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/pdf/kaiken_s1_20150522.pdf
- 萩原大輔 (2013) : ポンプ施設における機能診断技術について, JAGREE information, **85**, 58-62.
- 本田知己 (2014) : 潤滑油劣化診断の現状と動向, トライボロジスト, **59** (6), 330-336.
- 飯田健次郎 (2011) : 液中粒子数濃度の計測および校正技術に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **8** (2), 213-243.
- 川畑雅彦 (2004) : 発電設備におけるメンテナンストライボロジービジネス, トライボロジスト, **49** (3), 206-212.
- 川畑雅彦 (2010) : 潤滑診断技術の発電設備への適用, 配管技術, **52** (1), 62-67.
- 川畑雅彦, 吉田直規, 國枝 正 (2015) : トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断技術の開発, ARIC 情報 119 号, 28-35.
- 河淵鉄郎, 國田欣悟, 熊澤 明 (2013) : トライボロジーを活用した機械設備の診断手法について, JAGREE information, **85**, 44-50.
- 河野通郎 (1960) : 潤滑剤の赤外線吸収スペクトル, 潤滑, **5** (4), 221-228.
- 小宮広志 (2012) : グリースのちょう度 - 試験法と意義, トライボロジスト, **57** (10), 701-708.
- 國枝 正 (2012) : トライボロジーを活用したポンプ設備の機能診断, 農村振興, **752**, 28-29.
- 國枝 正 (2014) : 潤滑油やグリースの劣化度を簡易に評価する携帯型測定装置, 平成 25 年度農村工学研究所成果情報, 17-18.
- Tadashi KUNIEDA (2015) : A portable device measures the degree of deterioration in lubricants of pump facilities, Research Topics 2013, National institute for rural engineering, p.2.
- 國枝 正 (2015) : 潤滑油等の分析によるポンプ設備の総合診断システム, 平成 26 年度農村工学研究所成果情報(主要普及成果), 11-12.
- Tadashi KUNIEDA (2016) : New functional diagnosis system for pump facilities by analysis of lubricating oil, Research Topics 2014, National institute for rural engineering, p.4.
- 國枝 正, 安藤泰久, 水間啓慈, 森 充広, 安部田泰 (2015) : 農業用ポンプ設備へのオイルマネジメントの適用, 農業農村工学会論文集, **299** (83-5), IV_19- IV_20.
- 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 安藤泰久 (2014) : 農業用ポンプ設備の潤滑油による機能診断における留意点, 農業農村工学会誌, **82** (1), 19-22.
- 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 川畑雅彦 (2013) : 潤滑油によるポンプ設備の機能診断, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 780-781.
- 國枝 正, 水間啓慈, 森 充広, 川畑雅彦, 吉田直樹, 井原 聡 (2014) : 潤滑剤の劣化度評価装置及び劣化度評価方法, 特願 2014-16164.
- 國枝 正, 森 充広, 水間啓慈 (2012) : トライボロジーを活用した農業用揚排水機の機能診断, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 834-835.
- 國廣安彦 (1988) : 水利施設管理の理論と実務, 地球社, 19-22.
- 蒔苗英孝, 西田真弓 (2012) : 振動調査技術の農業用ポンプ設備診断への適用, 水と土, **166**, 10-17.
- 松本善政, Roger H. Rotondi (1980) : フェログラフイー法による摩耗粒子分析と故障予知, 日本舶用機関学会誌, **15** (5), 369-377.
- 三科博司, 河野彰夫, 赤松良信 (2003) : 凝着摩耗のもっとも素になる粒子 (摩耗粒子) の発見と摩耗の素過程, トライボロジスト, **48** (4), 307-314.
- 三科博司, 金釜雲巖, 河野彰夫 (1996) : 摩擦にともなう表面の変形と摩耗の素過程, トライボロジスト, **41** (4), 332-339.
- 三科博司, 蒔田裕之, 笹田 直, 野呂瀬進 (1979) : 純金属間摩耗粉形成における移着成長過程の諸相, 潤滑, **24** (7), 466-472.
- 水間啓慈, 國枝 正, 森 丈久 (2014) : 農業用揚排水機場の整備補修記録に基づくポンプ停止要因分析, 農業農村工学会論文集, **292**, 85-91.
- B. Myhre, S. Petersen, R. Ugarelli (2014) : Using wireless vibration monitoring to enable condition-based maintenance of rotating machinery in the water and wastewater industries, *Procedia Engineering*, **89**, 1397-1403.
- 中 達雄, 高橋順二 (2010) : 農業水利施設のマネジメント工学, 養賢堂, 186-193.
- 日本トライボロジー学会 (2001a) : トライボロジーハンドブック, 養賢堂, 577-730.
- 日本トライボロジー学会 (2001b) : トライボロジーハンドブック, 養賢堂, 798-801.
- 日本トライボロジー学会 (2001c) : トライボロジーハンドブック, 養賢堂, 846-849.
- 日本トライボロジー学会編 (2006a) : メンテナンストライボロジー, 養賢堂, 84-146.
- 日本トライボロジー学会編 (2006b) : メンテナンストライボロジー, 養賢堂, 132-134.
- 日本トライボロジー学会編 (2006c) : メンテナンストライボロジー, 養賢堂, 147-169.
- 西尾光弘, 國枝 正 (2016) : 七穂排水機場減速機損傷から学ぶ新たな排水機場診断, 農業農村工学会誌, **84** (3), 44-45.
- 農業土木学会編 (2000) : 農業土木ハンドブック (改訂 6 版), 丸善, 835-871.
- 農林水産省農村振興局 (2015) : 農業水利施設におけるストックマネジメントの取組について, (オンライン), 入手先 < <http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/pdf/torikumi.pdf> > (参照: 2015 年 5 月 29 日)
- 農林水産省農村振興局整備部設計課 (2013) : 農業水利施設の機能保全の手引き「ポンプ場 (ポンプ設備)」, (オンライン), 入手先 < <http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/pdf/pump01.pdf> > (参照: 2014 年 6 月 9 日)

- ポンプ設備研究会 (2007)：実務家のための最新ポンプ設備工学ハンドブック (改訂版)，農業土木事業協会，1015-1017.
- B. J. Roylance, G. Pocock (1983)：Wear studies through particle size distribution I - Application of the Weibull distribution to Ferrography -, *Wear*, **90**, 113-136.
- 酒井雅史, 久保田貴純, 長野浩一 (2011)：東部幹線揚水機場ポンプ設備の機能診断調査及び改修設計, *水と土*, **163**, 53-61.
- Hiral Shah, Harish Hirani (2014)：Online condition monitoring of spur gears, *The International Journal of Condition Monitoring*, **4** (1), 1-8.
- 柴田正明 (1982)：フェログラフィについて, *潤滑*, **27** (7), 487-491.
- 柴田正明 (1994)：潤滑油の劣化診断とトライボロジー, *トライボロジスト*, **39** (7), 559-565.
- 椎原裕美, 光清智洋, 森田孝宏 (2014)：船舶機器のメンテナンスと状態監視, *トライボロジスト*, **59** (6), 337-344.
- 末政信夫, 中田一茂, 米澤 亘 (2009)：簡易振動診断技術を用いたポンプの健全度評価について, *水と土*, **158**, 37-43.
- 高谷好一編 (1990)：東南アジアの自然, 講座東南アジア学2, 弘文堂, 189-214.
- 田中隆夫, 片野浩司, 山口和哉 (2013)：河川用樋門開閉装置における潤滑油診断を利用した機械要素の劣化判断手法について, *日本機械学会第12回評価・診断に関するシンポジウム講演論文集*, 31-36.
- 友安和行 (2014)：石炭焼き火力発電所のトライボロジーの課題, *トライボロジスト*, **59** (3), 131-136.
- トライボテックス株式会社：微粒子計数装置, これを用いる微粒子計数方法及びこれを備える潤滑対象部診断システム, 特許第4719587号.
- 若林利明, 間野大樹 (2014)：軸受異常診断の現状と動向, *トライボロジスト*, **59** (6), 323-329.
- G. J. Wright, M. J. Neale (1987)：Wear-debris analysis as an integral component of machinery condition monitoring, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **87** (8), 253-260.
- 山下 正 (2011)：頭首工および用排水機場における補修の傾向分析, *農業農村工学会誌*, **79** (11), 29-32.
- 吉田直樹, 川畑雅彦 (2014)：火力発電所の潤滑診断技術, *トライボロジスト*, **59** (3), 150-155.
- 柚原直弘, 稲垣敏之, 古川 修 (2012)：ヒューマンエラーと機械・システム設計, 講談社, 1-35.

受理年月日 平成 28 年 11 月 30 日

Application of Condition Monitoring and Diagnostic Technologies to Agricultural Pump Facilities

KUNIEDA Tadashi*

*Department of Technology Transfer

Abstract

Pump stations for irrigation and drainage are important structures that handle water for farmlands and the surrounding area. Many pump facilities must be periodically rebuilt. However, information to evaluate the progress of deterioration is presently lacking for pump facilities. This study dealt with plans for a technique to apply to detecting signs of deterioration in agricultural pump facilities before problems become serious. The number, form and sizes of metal wear particles in the lubricating oil were confirmed as appropriate for detecting signs of deterioration in the facilities.

Therefore, the author proposed application of condition monitoring and diagnostic technologies as a basis for maintenance of agricultural pump facilities to prevent the progression of deterioration.

Key words: *Pump facilities, Function diagnosis, Time based maintenance, Condition based maintenance, Tribology, Lubricant, Metal wear particle*

豪雨に対する谷池ならびに 下流域の被災リスク低減に関する研究

吉迫 宏*

*施設工学研究領域地域防災ユニット

要 旨

本稿は、ため池における管理実態の解明や各種の機能診断・評価手法の検討を通じて、ため池の豪雨に対する施設と下流域の被災リスクを管理により低減する方策を解明した。

受益農家や集落が実施する管理作業の実態は、石川県珠洲市のため池を事例としてアンケート調査と現地調査に基づいて明らかにした。また、目視点検を踏まえた機能診断手法として、堤体の漏水経路を1m深地温の測定結果を基にして、堤体中の地温分布のシミュレーションによる逆解析から推定する手法を提案した。

豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策は、広島県東広島市のため池を事例として洪水流出モデルによるため池貯水位予測モデルを作成し、貯水位を指標として検討した。減災対策のうち、水位の低下管理は流域面積の大きなため池では被災リスクの低減効果は限定的な効果に留まるのに対し、洪水吐の簡易改修は安定的に被災リスクを低減することを明らかにした。

ため池群の洪水緩和効果による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策は、広島県椋梨川上流域を事例としてため池群を組み込んだ広域洪水流出モデルを作成し、下流河川の基準点における水位を指標として検討した。ため池群を活用して被災リスクの低減を図るためには、降雨ピーク前の空き容量確保が重要なことを明らかにした。

ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、広島県東広島市のため池を事例として取水に伴う貯水率の減少度合と降雨による回復度合を観測水位から求め、検討期間中の貯水率変化を簡便に予測する手法を考案して検討した。受益水田の転用・転作が進んでいるため池では、かんがい期間と洪水期間が競合する期間においても利水容量を転用できる可能性が高いことを明らかにした。

棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池集水域管理の検討は、島根県出雲地方における棚田の土壌流出の観測結果に基づいて観測田（耕作田／遊休田）の土壌流出実態を明らかにした上で、土壌流亡予測式における水稲・水田の作物係数 C と保全係数 P を算出して行った。土壌流亡予測式の係数比較から水稲作の維持は土壌流出の抑制に有効であることを明らかにし、貯水池への土砂流入抑制による貯水容量の維持に資する、棚田を含むため池集水域の管理について考察した。

キーワード：ため池、減災、洪水流出、被災リスク、土壌流出

【目次】

1. 総説

要旨

1. 総説
2. ため池の施設管理と被災リスク低減
3. 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策
4. ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策
5. ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出
6. 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討
7. 総合考察

謝辞

引用文献

Abstracts

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 ため池管理に関する政策的な課題

近年の集中豪雨の発生増加や今後の発生リスクが指摘されている南海トラフ巨大地震などにより、ため池における災害脆弱性の高まりが指摘されている。農村においては、人口減少や高齢化・混住化の進行などから地域社会での災害対応力が低下していることもあり、ため池の防災・減災対策は重要度を増している。

このような情勢の中で、2012年3月に閣議決定された「土地改良長期計画」（農林水産省、2012）では、7つの政策目標の1つとして「ハード・ソフト一体になった総合的な災害対策の推進による災害に強い農村社会の形成」が取り上げられている。食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会報告「農村社会の変化や新たな農政の展開における農業農村整備の課題（中間整理）」（農

林水産省農村振興局, 2013) では、ため池に関する課題として「ハード・ソフト対策を計画的に実施していくことが重要」「水田やため池を活用した豪雨時の一時貯留など、上下流一体の広域な視点から農地・農業用施設が有する防災機能をフル活用して地域全体の災害対応力を向上させる取組について、地域コミュニティとも連携しつつ促進していくことが効果的」が挙げられている。また、2014年6月に閣議決定された「国土強靱化基本計画」(内閣官房, 2014) では、地球温暖化等による災害リスクの高まりの懸念を指摘した上で、ため池に関してもハード対策とソフト対策を組み合わせた防災・減災対策の強化が取り上げられている。さらに、2015年には「農業の有する多面的機能の発揮の促進に関する法律」が施行され、これに基づく多面的機能支払交付金によりため池を含む農業・農村の有する多面的機能の維持・発揮を図るための地域の共同活動の支援がなされている。

想定される豪雨や地震に対応した堤体や洪水吐等の諸施設が整備されていない未改修ため池、ならびに機能診断において堤体や洪水吐などの施設に漏水や変形、劣化などの変状が見られるため池においては、改修による施設の整備、すなわちハード対策が従来から公共事業として行われてきた。しかし、すべての施設を改修して整備することは財政事情が逼迫している現状では困難である(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2014)。また、改修したため池においては、施設の健全性維持と多面的機能を増進してその機能を積極的に活用する際には、適切な維持管理の取り組みが不可欠である。

下流域を含むため池の防災・減災に関するハード・ソフト対策を計画的に実施するためには、豪雨や地震に対する施設の機能診断や想定されるリスク評価を実施し、これに基づいて改修を実施するため池の選定と優先順位付けを行うことが必要である。その上で、改修が完了するまでの期間や当面改修を実施しないため池では、避難対策や被災発生リスクを低減するための管理操作といった施設の整備によらないソフト対策、ならびにため池管理者による直営施工を含む簡易なハード対策を講じることが求められている。

1.1.2 ため池管理における技術的課題

防災・減災に向けたため池の被災発生の抑止と多面的機能の積極的な活用、ため池の管理体制脆弱化への対応に向けて、農林水産省はため池管理者等が行うため池の保全・管理や防災・減災に関する各種の手引き類を作成し、公表している。これら手引き類では、ため池管理における管理項目や作業内容、管理体制整備にあたっての検討事項が具体的に示されている。手引き類において示されている管理項目と作業内容、検討事項に対し、対応する技術を示すことが課題となる。

このうち「ため池管理マニュアル」(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2013) は、専門技術者ではない受益

農家等のため池管理者を対象として、ため池の役割や構造、決壊メカニズムの説明とともに、堤体や洪水吐などの施設別に日常の点検や管理作業のポイント、ならびに豪雨時や地震時における対応を示したものである。日常点検作業や洪水や地震が発生した際に確認する際の具体的なポイントを整理した点検チェックシート、ならびにため池の変状に関する点検結果の市町村役場への報告書式についても示されている。報告書式で対象施設別に整理されている点検項目を **Table 1-1** に示す。なお、「ため池管理マニュアル」においては、ここで示された変状の項目が新たに確認された場合には、市町村に相談することとされている。

これらの点検は現地において目視により行うものであり、変状を把握する際の指標となる事項は「土部分の変状」「コンクリート等部分の変状」「漏水」「通水の阻害(土砂や流木の堆積、雑草の繁茂によるもの)」の4つに分類できる。各点検項目が当該する事項を整理した結果を **Table 1-1** 中に示す。漏水を指標とする点検事項が最も多いことがわかる。また、「①堤体法面に「陥没」や「亀裂」, 「はらみだし」が生じている箇所がある」や「⑩コンクリート(洪水吐)と堤体の境界に隙間が見られる」「⑮コンクリート(斜樋)と堤体の境界に隙間が見られる」についても、点検の対象となる変状は漏水に伴って生じた可能性がある。従って、堤体の漏水の把握とは目視による点検において最も重要な要素であり、漏水に関する機能診断を適切に行うことが求められる。

農地・農業用水等の資源の保全に関する地域共同活動を支援する「多面的機能支払交付金」(2007～2011年度は農地・水・環境保全向上対策, 2012～2013年度は農地・水保全管理支払交付金) は、農地や農地周りの水路と農道とともにため池も対象とされており、活動の解説として「多面的機能支払交付金【農地維持活動】 農地, 水路等の基礎的な保全管理」(農林水産省農村振興局, 2015a) と「多面的機能支払交付金【資源向上活動(長寿命化)】 農地周りの水路, 農道等の長寿命化のための活動の解説」(農林水産省農村振興局, 2015b), 「多面的機能支払交付金【資源向上活動(共同)】 地域資源の質的向上を図る共同活動の解説」(農林水産省農村振興局, 2015c) が作成されている。これらの中で、ため池についても施設の保全管理と長寿命化、多面的機能の増進を図る活動のねらいと作業内容、技術的な要点、作業手順等が示されている。活動の担い手はため池管理者や受益農家とともに、地域住民などが想定されている。

多面的機能支払交付金に関する3つの手引き類に記載されている活動項目を **Table 1-2**, **Table 1-3** に示す。点検や見回り、機能診断を除く活動項目においては、施設の補修と予防保全的な維持管理作業が主体であり、これに加えて施設の補修とは異なる機能維持のための活動として貯水池内に流入・堆積した土砂の泥上げや流木の除去、洪水吐に堆積した土砂・流木の除去等が示されている。

Table 1-1 「ため池管理マニュアル」で示された点検項目
The check items of "The small earth dam management manual"

対象施設	変状の箇所と内容	変状の種類			
		土構造物等の変状	コンクリート等の変状	漏水	通水障害
堤体	① 堤体法面に「陥没」や「亀裂」、「はらみだし」が生じている箇所がある。	○			
	② 堤体法面にリップラップ材、張石、積みブロックなどに損傷や浸食箇所がある。		○		
	③ 堤体の下流の裏面に湿潤土壌を好む「シダ」「フキ」「コケ」類の繁茂等、植生の変化が見られる。			○	
	④ 堤体の”へり”の部分から湧水が見られる。			○	
	⑤ 堤体の下流法面や子段の側溝部で水のしみ出しや湧水、滞砂が見られる。			○	
	⑥ 接続道路からの排水による堤体の浸食が見られる。	○			
洪水吐	⑦ 水路コンクリート表面のひび割れから湧水が見られる。また、鉄筋がむき出しになっている箇所がある。		○		
	⑧ 壁の天端のはらみだし、また水路内側へのたわみがみられる。		○		
	⑨ 水路の底板や側壁に激しいすりへりや損傷が見られる。		○		
	⑩ 洪水吐内又はその下流水路に植物の繁茂が見られる。				○
	⑪ コンクリート(洪水吐)と堤体の境界に隙間が見られる。	○			
観測施設・観測計器	⑫ 雨も降らないのに漏水量が最近になって急増した／漏水に濁りが生じてきた。			○	
	⑬ 体内水位の計測値がこれまでと異なる値を示した。			○	
取水施設	⑭ 斜樋が損傷している。底樋が破損したり通水障害を生じたりしている。		○		○
	⑮ コンクリート(斜樋)と堤体の境界に隙間が見られる。	○			
	⑯ ゲート周りに漏水が生じたり、周辺に土砂やゴミが堆積している。				○
	⑰ 取水ゲート全閉にも関わらず底樋出口から泥水が出ている。			○	
	⑱ 下流地盤において、湿地や水溜りが見られる。			○	
貯水池内・貯水池周辺の斜面	⑲ 貯水池内で大規模な斜面の崩壊や連続した亀裂・湧水が発生している箇所がある。	○			
	⑳ 堤体に近接した法面で、連続した亀裂・湧水が発生している箇所がある。	○			
件数		6	5	7	3

出典：農林水産省農村振興局整備部防災課(2013)より作成

土砂や流木はため池の流域(集水域)から降雨流出に伴って貯水池へ流入するものであり、従って流域を適切に管理して土砂や流木の流入を抑制することは、ため池の防災・減災と機能維持の上でも重要な課題と考えられる。

ため池に関わる多面的機能の増進を図る活動としては、地域が一体となった防災・減災力の強化のための活動が示されており、「ため池の雨水貯留機能の活用」「危険ため池の管理体制の整備・強化」があげられている。前述の手引き類には具体的な活動内容の記述はないものの、前者はため池流域からの洪水流出が貯水池の空き容量や洪水吐の越流水深で貯留されることによって生じる雨水貯留機能の活用に関するものである。防災・減災に資する多面的機能の増進に関わる具体的な活動内容としては、大雨に備えた事前の貯水位の低下管理などによる

雨水貯留機能の強化が重要であると考えられる。

「ため池の保全管理体制整備の手引き」(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2014)は、ため池の防災・減災を推進するための保全管理体制の整備における基本事項と望ましい体制整備の方法をとりまとめたものである。保全管理体制の整備においては、保全管理計画を作成することとしており、その中で想定される危険を把握するためのリスク評価やため池が持つ多面的機能を把握するための地域資源評価を行うこととされている。

リスク評価については、豪雨と地震に対する構造的な被災の可能性や現地でのリスク確認・評価に加え、簡易氾濫解析によるため池の堤体決壊時に想定される被災範囲の想定や降雨に伴う貯水位上昇量の評価を行うこととされている。多面的機能については、多面的機能チェッ

Table 1-2 多面的機能支払交付金に関する活動項目
(ため池の基礎的な保全管理と長寿命化のための活動)
The activity item about the multiple functions payment grant

農地、水路等の基礎的な保全管理
点検 貯水池内の泥の堆積状況(ゴミの投棄状況を含む)、管理道路の状況(側溝のゴミの投棄状況を含む) 取水施設等のため池付帯施設の点検(水抜き時)
実践活動 草刈り(堤体等) 泥上げ(貯水池) かんがい期前の清掃(洪水吐・取水施設等) 管理道路の管理(草刈り・泥上げ・路面の補修) 遮光施設の適正管理 ゲート類の保守管理の徹底(取水施設) 異常気象後の見回り(堤体の異常と漏水の有無、洪水吐への土砂・ゴミ堆積、貯水池への土砂・流木・ゴミの流入等) 異常気象後の応急措置(土砂や雑木、倒木の処理)
農地周りの水路、農道等の長寿命化のための活動
・堤体 洗掘箇所の補修 漏水箇所の補修
・附帯施設 取水施設の補修 洪水吐の補修 安全施設の補修 ゲート、バルブの更新 安全施設の設置

出典：農林水産省農村振興局(2015a, 2015b)より作成

Table 1-3 多面的機能支払交付金に関する活動項目
(ため池の地域資源の質的向上を図る共同活動)
Activity item about the multiple functions payment grant

施設の機能診断 実践活動に位置付けた予防保全活動を手利きを実施するための施設の状況確認
実践活動
・堤体の適正管理 遮水シートの補修 コンクリート構造物の目地詰め コンクリート構造物の表面劣化への対応 堤体侵食の早期補修 破損施設の補修 きめ細やかな雑草対策
・附帯施設の適正管理 破損施設の補修 遮光施設の補修等 多面的機能の増進を図る活動 防災・減災力の強化 水田やため池の雨水貯留機能の活用、危険ため池の管理体制の整備・強化等、地域が一体となった防災・減災力の強化のための活動

出典：農林水産省農村振興局(2015c)より作成

クシートの項目として洪水調節機能が取り上げられており、活動の事例としては「低水管理による洪水調節容量の確保」が示されている。保全管理体制の整備の後は策定した保全管理計画に基づいて活動を取り組むこととなるが、大雨に備えた事前の貯水位の低下管理を実施し、施設自体の被災抑止や下流域の洪水緩和などの事前防災の取り組みによる被災リスクの低減が活動における一つの柱になるものと考えられる。

1.1.3 ため池の実態

農業水利施設であるため池は、古くから開発が行われてきた近畿地方や降水量の少ない瀬戸内地方を中心に、全国に存在する。ため池は、農業用ダムと類似の構造を持つ土構造物であっても、施設の規模とともに築造・改修年代や管理主体において大きく異なる。

内田(2003)は我が国におけるため池の存在形態を明らかにする一環として、農林水産省が1989年に実施した長期要防災事業量調査に基づいて全国の受益面積2ha以上のため池68,853箇所を対象に築造年代を集計した。この結果、1944年までに築造されたものが34,250箇所と築造年代不明の30,814箇所を除くと大半を占めること、加えて大きな改修を行っていないため池は48,470箇所と約7割を占めることを明らかにしている。これらの結果は古いデータに基づくものであるが、佐々木ら(2013)は2011年度における受益面積2.0ha以上の整備ため池数を約13,000箇所と報告しており、未改修のため池が多数残存する実態は2011年時点においても変わらない。

これらのことから、大半のため池は近代的な設計・施工技術ではなく経験的な知識と技術に基づいて築造されており、かつ防災上必要な改修が行われていない、すなわち豪雨や地震に対して弱点を抱えたままのものが多数存在していることがわかる。実際に、2013年度には全国1,000箇所以上のため池が被災し、うち12箇所が決壊が生じている(農林水産省農村振興局整備部防災課, 2014)。

また、内田(2003)は前述のデータを用いて管理者の属性を集計し、「集落または申し合わせ組合」「個人」による管理、すなわち公的機関ではなく受益農家自身が自ら管理を行っていると考えられるため池が38,625箇所と半数以上に上ることを明らかにした。この結果から、多くのため池における管理の担い手は専門技術者ではない受益農家自身であること、従って専門的な技術的知見に基づく十分な管理がなされていないため池、すなわち施設の長寿命化や防災・減災の観点から施設管理上の改善の必要があるため池は少なくないものと推定される。加えて、農村の過疎化・高齢化の進行、米価の下落や水田の転作・転用に伴う水稲作付面積の減少とこれに伴うけ水需要の減退、代替する水利施設の整備によるため池利用度の低下などにより、ため池の改修事業に関する負担金の負担力低下や管理体制の脆弱化が指摘されている。

さらに、多くの農村においては都市化ないし混住化が進んでおり、かつては農地や林地であったため池の下流が宅地化している場合も多く見られる。このため、豪雨や地震に対しては、農業生産活動に対する被害の防止に留まらず、ため池下流の人命や財産に対する被災の防止・軽減が強く求められるようになってきている。また、豪雨時における洪水緩和など、ため池の多面的機能を積極的に活用した地域の防災・減災対策についても、都市化・混住化や転作の進行など流域の土地利用の変化などに伴い、

効果を発現する場面が広がっていると考えられる。

なお、ため池はその形態から、流域からの降雨流出を貯水池に貯留する自流域を持つため池と貯水池と連結された用水路から流入する河川から取水した用水等を中継する機能のため池に大別できる。両者の形態を併せ持つため池も少なくなく存在するものの、洪水流出や用水管理はこの2つの形態のため池の間で明確に異なることから、これらの検討にあたっては自流域を持つため池と用水の中継を行うため池は明確に区分して検討する必要がある。本稿における流出解析と用水管理の検討においては自流域を持つため池を対象とし、「谷池」はこの自流域を持つため池を指すものとする。

1.1.4 本稿の目的と構成

本稿は、政策的にも重要な課題である谷池の防災・減災に関する課題のうち、豪雨による施設ならびにその下流域の被災リスクを適切に谷池の施設や貯水、上流域を維持管理することによる低減策を示すことを目的とする。

検討は、手引き類で示された管理項目や作業内容、管理体制整備にあたっての検討事項を踏まえ、ため池の施設管理と被災リスク低減策、豪雨による谷池の被災リスクの評価と低減策、ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策、ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出、および棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討を対象とする。このうち、ため池の施設管理、ならびに被災リスク低減と豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策は決壊などの施設自体の被災リスク低減、ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策は多面的機能の発現によるため池下流域の被災リスク低減を対象とする。利水容量の転用による洪水調節容量の創出と棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討については被災リスク低減策として必要な降雨前の空き容量を利水容量の転用で確保するとともに、谷池上流域を適正に維持管理することによって貯水量の維持を図るものである。

1.2 既往の研究

1.2.1 ため池の施設管理と被災リスク低減

ため池の維持管理においては、堤体や貯水池、洪水吐、取水施設等の各施設、周辺の地山、ならびに接続水路などにおいて日常的な点検や軽微な補修を含めた管理作業を行ってため池を常に健全な状態に保つとともに、管理者では対処できない異常が発生した場合には、速やかに技術者による対応を行うことが基本である。

ため池の管理に関する研究は、管理組織や管理者、住民参加、費用などの人的要素（例えば今田ら、2009、鈴木ら、2003）、水管理（例えば角道ら、2013、北村・喜多、1997）、動植物（例えば嶺田ら、2009、渡辺・高村、2006）などの分野に関しては多くの研究が進められてい

る。本稿で扱う受益農家や集落などのため池関係者が自ら行う維持管理作業については、嶺田ら（2013）が石川県珠洲市のため池を対象に実施したアンケート調査に基づいて受益農家等が行っているため池管理の実態を示した上で、ため池関係者や地域住民以外の者を含めた多様な連携によるため池再生の取り組みを紹介した。佐藤（2014）は気候区分と貯水量、流域比を用いて全国のため池から偏りなく対象ため池を抽出し、管理者に日常管理状況と気候変動に伴う管理者の意識と管理面での対応についてアンケート調査を行った。これらの事例はあるものの、施設の健全性維持や防災・減災のための維持管理作業に係わる実態を明らかにし、被災リスク低減に向けた管理の改善方策等を検討することは課題として残されている。

また、ため池堤体内部を対象とした調査手法に関する研究には、小林ら（2014）の簡易弾性波速度分布測定ならびに他の物理探査結果との複合評価の提案、黒田ら（2013）の地震波伝搬特性評価と経年変化監視への適用性検討、鈴木ら（2013）の常時微動スペクトルデータを用いた損傷ため池堤体の健全度評価、小林ら（2007）による弾性波を用いたため池堤体内の水分状況推定、堀ら（2002a）の地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法の検討などがある。これらの研究においては、いずれも大～中規模ため池への適用を暗黙の前提にしたものと考えられ、市町村や土地改良区の技術職員等が機能診断を直営で実施する際に用いることができる、安価かつ簡便な手法とはいえない。ため池管理者が目視点検で堤体等に変状を発見したため池において、ため池管理に携わる現場技術者が自ら実施できる堤体内部に関する機能診断手法の開発は課題として残されている。

1.2.2 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策

ため池は豪雨や地震等の自然災害により、毎年少なくともため池が被災している。佐々木ら（2013）は1998年～2011年の被災箇所数と被災金額を各年毎にとりまとめ、2004年の新潟県中越地震と10回にわたる台風の上陸による被害、2011年の東日本大震災による被災が顕著であることとともに、他の年においても少なくともため池で被災が生じていることを示した。また、堀ら（2002b）は1986年から1996年において災害査定を受けたため池の件数を地震と豪雨の別に示し、毎年被害が発生していることに加え、1995年の兵庫県南部地震を除けば、被害のほとんどは豪雨によるものであり、その割合は95%以上となることを明らかにしている。自然災害によるため池の被災リスク低減においては、特に豪雨に対する対策が重要であることが判る。

豪雨によるため池の被災リスクの評価に関しては、堀ら（2010a）や堀ら（2010b）が豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法の開発を行っている。また西村ら（2009）は

豪雨時のため池堤体の越流リスクの評価、ならびに洪水吐の改修効果について検討がなされた。しかし、これらの研究においては、豪雨時の被災リスク評価の鍵となる洪水流出モデルを用いた貯水位の時間変化、すなわち貯水位ハイドログラフの算出が観測データによる検証を踏まえていない簡便な手法に留まることや、流域比等のため池への降雨流出を規定する立地条件と貯水位管理や洪水吐改修による貯水位の異常上昇に伴う被災リスクの関係については明らかにされていない。

従って、自流域を持つため池の降雨流出特性の解明とこれに基づく貯水位予測手法の開発、ならびに被災リスク低減策、すなわち減災対策の効果をため池の立地条件や降雨特性の違い、気候変動に伴う降雨の将来変化を踏まえて明らかにすることは残された課題である。

1.2.3 ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策

ため池の洪水緩和に関する研究は単体のため池を中心に行われてきた。加藤・佐藤(2002)は、大阪府下の松沢ため池において貯水位と降水量の記録から洪水緩和の実績を分析するとともに確率降雨を用いてシミュレーションにより洪水を再現し、洪水低減割合の大きさは洪水発生前の空き容量の大きさ、貯水池への洪水流入パターンに強く影響を受けていることを明らかにした。また加藤ら(2002)は、同池において実降雨の降雨パターンを分析し、この結果に基づいて行った洪水シミュレーションに基づいて貯水池の水位低下管理は洪水ピーク緩和効果の増強に有効であることを明らかにした。中西ら(1999)は、洪水調節容量を持たない農業用ダムである大迫ダムにおいて洪水時の流入と放流の実態解析からピーク放流量がピーク流入量に対し小さくなること、水理学的解析から洪水緩和機能は空き容量あるいは洪水吐クレスト天端から上部での一時的な貯留により生ずることを明らかにした。中西ら(2002)は、香川県と大阪府を事例地区としてため池の水利用の過程で生じる空き容量を洪水防止機能の指標としてため池の雨水貯留の可能性を評価した。竹下ら(2006)は、これらの研究を踏まえた上でため池による洪水緩和を洪水ピーク流量の減少と整理し、ピーク流量を減少させる要因として洪水到達時刻の遅延に着目して遅延率を用いたため池洪水緩和量推定法を提案した。

ため池群による洪水緩和に関する研究として、内田(2008)は愛知県武豊町内のため池群を持つ4つの河川を対象に、2000年9月の豪雨時に流域内のため池群が果たした洪水調節効果を河川水位とため池貯水位、降水量の観測データを用いて検討した。ただし、河川ごとの観測ため池数は2池(うち1河川は1池)に留まることや洪水流出モデルを用いた流出過程の検討は行われていないため、分析結果は定性的な推定に留まる。大八木ら(2005, 2006)、大槻ら(2008)は福岡県下の御笠川流域ため池群

を対象に洪水流出モデルを作成し、ため池群の洪水緩和に関する一連の研究を2003年7月の豪雨を対象に行った。この中で大八木ら(2006)はため池群の洪水緩和機能について、2003年7月19日の洪水時に観測された降雨を用いてシミュレーションに基づき洪水調節開始時貯水率(0~100%)に対応したため池群下流の御笠川上の基準点におけるピークカット量を求め、ため池群の空き容量が大きいほどピークカット量は大きくなることを明らかにした。ただし、ピークカット量に関する知見は1事例の降雨に関するものに限られる。

しかし、観測貯水位に基づく現況のため池群が発揮している洪水緩和効果の評価、すなわち多面的機能(外部経済性)の評価は行われていない。加えて、評価の前提となる谷池型ため池群に関する流域単位での悉皆調査に基づく貯水率の報告はこの大八木ら(2006)による2005年8月かんがい期の御笠川流域における1事例に留まる。

従って、流域内のため池と河道を明示的に組み込んだ再現性の高い広域洪水流出モデルの作成によるため池群の洪水緩和効果の評価とともに、観測貯水率に基づく現況のため池群が発揮している洪水緩和効果の評価とため池群の洪水流出特性を踏まえた洪水緩和効果の増強方策の提案は残された課題である。

1.2.4 ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出

ため池の持つ多面的機能の一つである洪水緩和機能は近年積極的な評価がなされ、農業農村整備や河川整備に関する事業においても洪水緩和機能の発揮に向けた各種の取り組みが行われている。農林水産省の補助事業「広域防災ため池等整備モデル事業」は、農村地域における広域的かつ大規模な洪水被害に対応するために、農村地域に点在する既存のため池群に洪水調節容量を持たせると共に、水利再編等で相互にため池等を連携させ、広域での防災対策を行うことを目的としている。国土交通省と流域自治体が進める「総合治水対策特定河川事業」においても、奈良県下の大和川流域や愛知県下の境川流域、静岡県下の巴川流域などでため池の保全と治水利用が行われ、洪水調節容量を持つため池の整備も進められている(内田, 2003, 内田, 2008)。

ため池に洪水調節容量を持たせる方法としては、堤体の高上げや貯水池の浚渫、もしくは既存の利水容量の転用が考えられる。堤体の高上げや貯水池の浚渫による洪水調節容量の創出は、利水容量を減ずることなく洪水調節容量を確保することが可能である。しかし、ため池の改修が前提となることから、ため池改修の事業と一体的に行うことによって実現可能な方法である。これに対し、利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、ため池の利水容量に余裕のあることが前提となるものの、ため池の改修と一体的に実施しなくとも実施可能な方法である。角道ら(2013)は農業用ダムの水利計画手法である渇水要貯水量曲線法を事例ため池において適用して期別の空き

容量を設定し、流出調整効果の検討を行っている。しかし、渇水要貯水量曲線法は10年程度の水文観測データの取得を前提とする方法であり、大部分のため池においては水文観測が行われていない現状では、一般的な計画手法ではない。ため池に適用する利水計画手法としては、1～2シーズン程度の短期間で得られた水文観測データを用いて利水計画を行うことができる手法が求められる。

従って、受益水田の転用・転作が一定程度進んだため池において利水容量の一部転用による洪水調節容量創出の可能性を明らかにすること、ならびにため池における水文観測の現状を踏まえた短期間で得られた水文観測データにより利水余裕度を検討し、利水調整を行う手法の開発は残された課題である。

1.2.5 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討

水田は土壌面が水平であること、土壌侵食の大きな要因である雨滴の衝撃エネルギーが水面で吸収されること等の理由により、土壌侵食を生じないものと見なされてきた。日本学術会議が農林水産大臣の諮問を受けて行った答申においても、これら水田の構造面の特性を指摘した上で、水田の土壌侵食防止機能は耕作放棄によって荒地となった場合と比較して非常に高いとしている（日本学術会議、2001）。

しかし近年、営農形態の変化や環境配慮への要請などを背景として水田でも土壌流出観測が行われ、水稲作が行われている水田においても土粒子などの懸濁物質の流出事例が報告されている。谷山（2002）は慣行栽培が行われている水田を対象に、かんがいや表面排水等に伴う懸濁物質の年間の流入・流出量とその収支をとりまとめ、収支の算出が行われた11地点中9地点で懸濁物質の流出量が流入量よりも多い結果を示した。松井ら（2007）は沖縄県石垣島の水田で流出観測を行い、降雨出水時に水田から土粒子が流出している観測結果を示すとともに、松井・須永（2013）は沖縄県石垣島の水田群において1年間の浮遊土砂流出量を観測し、代かき・田植期を中心に水田からの土壌流出が生じていることを明らかにした。また、須戸ら（2009）は滋賀県宇曾川流域の水田群を事例として排水路末端でSS濃度等を行い、代かき・移植時に流出するSS成分が土壌流出の原因であることを考察した。

従来、きめ細かい水管理がなされてきた水田においても省力的ないし粗放的な管理に移行している事例も見られることから、水稲作が行われている水田における土壌流出の事例は増加している可能性がある。これらのことを考えると、水田の持つ土壌侵食防止機能の検討にあたって、単に水田の構造面の特性のみでなく、観測データに基づく土壌流出の実態把握が求められる。加えて、水田からの土壌流出も畑地や樹園地、草地、林地等における土壌侵食と一元的に評価を行うことができれば、ため

池上流域管理の管理にも寄与できる。

従って、ため池流域からの土砂流出、特に観測事例の少ない棚田における土壌流出を明らかにすること、ならびに土壌流出予測式に関わる水田の係数、特に求められた事例に限られる作物係数 C と保全係数 P を求めることは、土壌流出予測式の枠組みを用いてため池上流域にある水田の保全管理を検討する上で残された課題である。

2. ため池の施設管理と被災リスク低減

2.1 ため池の施設管理実態

2.1.1 目的

ため池の防災・減災に向けては、堤体や洪水吐、取水施設、貯水池などのため池の諸施設を常に健全な状態で維持することが基本である。多くのため池では、受益農家や集落などの地域の関係者が管理者を務めるとともに、関係者が自ら経験的な知識や技術に基づいて維持管理作業を担っている特徴がある。

そこで、受益農家や集落によって行われている施設の維持管理作業の実態について、石川県珠洲市のため池を対象にアンケート調査と現地調査に基づいて明らかにする。また、受益農家や集落において経験的に行われている維持管理作業に対し、特に豪雨に対する被災リスク低減に向けた改善点を考察する。



この地図は国土地理院の地理院地図（電子国土Web）を加工して作成したものである。

Fig. 2-1 珠洲市の位置
Location of Suizu-city

2.1.2 調査地域の概要と調査方法

2.1.2.1 調査地域の概要

調査地域である石川県珠洲市は能登半島の先端に位置する (Fig.2-1)。珠洲市一帯は海成段丘が発達しており、また残丘が山地を形成している。国土地理院発行の1/25,000地形図や空中写真より、段丘面には国営農地開発事業による開畑地を含む畑地、河川による段丘面の開析により形成された谷底部には大区画水田を含む水田、及び山地や段丘涯には針葉樹または広葉樹からなる林地が展開していることが判読できる。農業地域類型は中間農業地域に区分される。

珠洲市内には、石川県が管理する12本の二級河川が存在する。しかし、低平な山地や丘陵地が海に迫っていることから、いずれの河川とも河川延長は短い。このため古くからため池が築造、利用されている (北陸農政局珠洲開拓建設事業所, 1992)。

2.1.2.2 調査方法

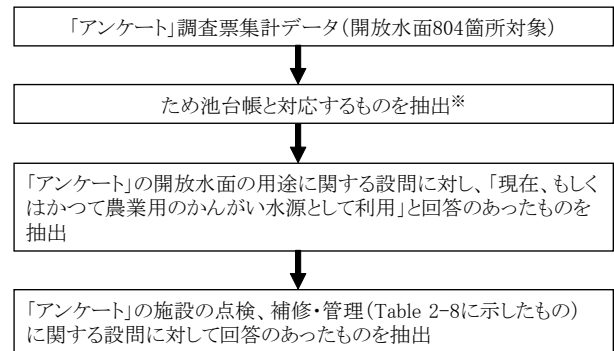
a 調査の対象と方法

施設管理の実態は「利用状況」、「日常的な維持管理」、「施設の点検、補修・管理」、「貯水池、洪水吐の現況」、及び「ため池利用に関する将来の意向」の5分野を対象に調査した。このうち「貯水池、洪水吐の現況」は現地調査により、これ以外の分野はアンケート調査により実態を明らかにした。

施設管理に関するアンケート調査は後述する現地調査時に把握したため池の諸施設に関する管理現況に関わる現地調査を踏まえて項目を決定し、石川県農林水産部と農研機構農村工学研究所が共同で実施した「ため池の管理に関するアンケート」(以下「アンケート」とする)の一環として2010年1月に実施した。

「アンケート」は1/2,500地図(珠洲市:1975年及び1993年作成)ないし市販の住宅地図(「ゼンリン住宅地図 石川県珠洲市」:2007年発行)で判読できた開放水面(804箇所)を調査対象とし、ため池管理者への調査票の配付と回答依頼は珠洲市と珠洲市土地改良区の協力を得て行った(回収は郵送による。有効回答率60.1%)。「アンケート」の対象とした開放水面は現存するため池だけでなく、既に廃止されたため池や防火水槽、個人宅の庭池、養魚池などを多数含んでいる。また、「アンケート」は石川県環境部による「外来生物アンケート」と一体の調査票で共同実施したため、その設問は多岐にわたる上、一部の設問のみ回答がなされた調査票も存在した。そこで、Fig.2-2の手順により、ため池台帳に記載があるため池106箇所を対象に、回収した調査票から分析用のデータを抽出した。分析対象のため池の内、珠洲市土地改良区が管理するものは4箇所(3.8%)のみで、他は受益農家により管理が行われていた。

「貯水池、洪水吐の現況」は珠洲市を流れる二級河川である紀の川流域において、1/25,000地形図(国土地理



※ ため池台帳と対応できるため池においても、ため池台帳上にデータの記載がないもの(12箇所)と堤高15m以上のもの(3箇所)は除外した。

Fig. 2-2 分析データの抽出手順
Extraction procedure of analysis data

院2009年発行)とため池台帳の双方に記載されているため池25箇所を調査の対象とした。これらのため池は受益農家によって管理作業が担われているものと判断できる、後述するように珠洲市における典型的なため池である。また、現地調査は2010年3月3日～7日と2010年6月12日～15日に予備調査、2010年8月25日～26日に本調査を実施した。

加えて、珠洲市内のため池の概要を把握するために、ため池台帳の分析を行った。ため池台帳には珠洲市内218箇所のため池が記載されている。分析はため池台帳記載のため池の内、ため池台帳にデータの記載がないもの(12箇所)、データの記載があっても所在地の特定ができないもの(12箇所)、「アンケート」対象外のため池(前述の開放水面として判読できなかったもので、前2者と重複するものを除いた16箇所)、及び、法令等でダムとして扱われる堤高15m以上のもの(3箇所)を除いた175箇所を対象に行った。また、「アンケート」分析ため池と現地調査ため池についても比較のために分析を行った。

b 分析項目

(1) ため池の概要

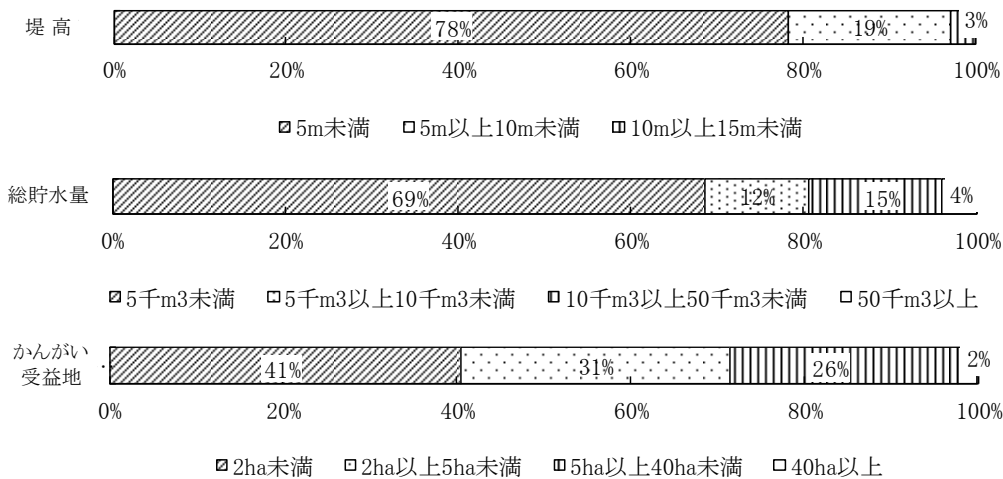
分析項目はため池台帳の項目の内、ため池の規模を表す「堤高」、「総貯水量」、及び「かんがい受益地」とした。

(2) 利用状況

分析項目は、「アンケート」の設問の内、「ため池のかんがい水源としての具体的な利用」と「ため池の日常のかんがい水源以外で具体的な利用」とし、各選択肢の回答数を分析した。なお、かんがい水源としての具体的な利用についての設問は2009年の1年間に関して問うたものである。

(3) 日常的な維持管理

分析項目は「アンケート」の設問の内、「ため池に何らかの用務で出向いた回数」と「堤体の草刈り(作業回数、



※「かんがい受益地」は全て水田である(Table 2-1も同じ)。

Fig.2-3 ため池の規模別割合 (珠洲市全体)
A ratio according to the scale of irrigation ponds

Table 2-1 調査ため池の概要
Summary of the investigation irrigation ponds

	ため池数	堤高(m)	総貯水量 (m ³)	かんがい受益地(ha)
珠洲市全体	平均値	3.9	10,476	5.8
	中央値	3.5	2,300	2.0
アンケート分析	平均値	3.7	13,124	5.8
	中央値	3.5	2,900	2.0
現地調査	平均値	3.7	19,308	11.8
	中央値	3.2	3,600	2.0

作業者)」とし、各選択肢の回答数を分析した。なお、ため池に出向いた回数は2009年の1年間に関して問うたものである。

(4) 施設の点検、補修・管理

分析項目は「アンケート」の設問の内、堤体と洪水吐、取水施設、貯水池の点検と補修・管理に関する設問とし、作業内容と作業回数、作業者に関する選択肢の回答数を施設別に分析した。

(5) 貯水池、洪水吐の現況

分析項目は貯水池内の流木・倒木の状況、並びに洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の状況とし、現地調査において目視でこれらを把握した。

(6) ため池利用に関する将来の意向

分析項目は「アンケート」の設問である「かんがい水源の今後」と「かんがい水源以外に今後期待する役割」とし、各選択肢の回答数を分析した。

2.1.3 調査結果と考察

2.1.3.1 ため池の概要

珠洲市全体のため池に関する堤高と総貯水量、かんがい受益地の規模別割合を Fig.2-3 に示す。また、項目別の平均値と中央値を Table 2-1 に示す。堤高 5m 未満のものは 78.3%、総貯水量 5,000m³ 未満のものは 68.6%、2ha 未満のものは 40.6% であり、老朽ため池研究会 (1979) が全国のため池を対象にため池台帳の集計により求めた値である堤高 5m 未満の割合 32% と総貯水量 5,000m³ 未満の割合 26% と比べ、珠洲市内のため池は小規模なものが主体であるといえる。一方、堤高 10m 以上のものは 2.9%、総貯水量 50,000m³ 以上のものは 4.0%、かんがい受益地 40ha 以上のものは 2.3% と規模の大きなため池は少数に留まる。

「アンケート」分析ため池と現地調査ため池に関する各項目の平均値と中央値を Table 2-1 中に示す。なお、各項目の値の分布は正規分布やこれに近いものとは限らないことから、平均値に加えて中央値についても検討する。珠洲市全体と「アンケート」分析ため池、現地調査ため池を比較すると、中央値については各項目とも同様の値である。平均値は現地調査ため池の「総貯水量」と「かんがい受益地」において他よりも高い値となる傾向が認められるものの、20%水準(両側検定)による t 検定ではいずれの項目についても珠洲市全体と「アンケート」分析ため池、現地調査ため池の相互間に有意差は認められなかった。従って、ため池の規模に関しては、「アンケート」分析ため池と現地調査ため池は珠洲市内のため池を代表するデータであると判断できる。

2.1.3.2 利用状況

Table 2-2 にかんがい水源としての利用状況を示す。「アンケート」分析ため池の内、82.1%のため池は主たる水源として利用されている。その一方、かんがい水源として

Table 2-2 かんがい水源としての利用状況
Situation of utilization as the irrigation source

	(単位:%)			
	全用途	水稲作	畑作物	果樹園
主たる水源	82	82	14	4
補助水源	10	9	6	0
利用しない (無回答を含む)	8	9	80	96

Table 2-3 10年前と比べた利用の変化
Change of the availability in comparison with ten years ago
(単位:%)

利用の変化	割合
以前より使わなくなった	26
変わらない	61
以前より使うようになった	7
わからない・無回答	6

利用しないため池は7.5%に留まる。水稲作の水源としての利用は主たる水源と補助水源を合わせて90.6%に達するのに対し、畑作物の水源としては19.6%、果樹園の水源としての利用は3.7%に留まる。なお、水稲作以外の作目のみを対象に主たる水源として使用するため池は存在しない。

Table 3-3に10年前と比べた利用の変化を示す。この設問はかんがいの水量や頻度、受益面積の変化など、管理者が認識する利用の変化を問うている。61.3%のため池においては利用の変化は見られないものの、26.2%のため池においては以前よりも利用度合が低下している。

Table 3-4に日常のかんがい水源以外の利用方法を示す。59.8%のため池では日常のかんがい水源以外の利用はなされていない(無回答を含む)。10%以上のため池で行われている利用方法は上位から順に「干ばつ時の緊急水源(18.7%)」、「防火用水(14.0%)」、及び「生物の生息場所(10.3%)」である。なお、「干ばつ時の緊急水源」以外の利用、すなわち干ばつ時を含めたかんがい水源以外の目的で利用がなされているため池は27.4%、日常のかんがい水源以外の利用を含め、全く利用されていないため池は5.7%に留まる。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池は利用度合の低下傾向は見られるものの、大半のため池においては水稲作を主としたかんがい水源として利用されているといえる。

2.1.3.3 日常的な維持管理

Table 2-5に管理者が何らかの用事でため池に出向いた回数(2009年)を示す。「アンケート」分析ため池の内、63.2%のため池で年11回以上、76.2%のため池で年6回以上の頻度で管理者は利用・管理のためにため池へ出向

Table 2-4 日常のかんがい水源以外の利用方法
Usage except the irrigation source

利用目的	(単位:%, 複数回答可)	
	割合	
干ばつ時の緊急水源	19	
防火用水	14	
生物の生息場所	10	
散歩などの憩いの空間として	3	
養魚	3	
釣り(養魚池以外)	2	
全く利用していない(無回答を含む)	60	
その他	1	

いている。管理者が全く出向かないため池は5.7%に留まる。なお、管理者が全く出向かないため池は水稲作の補助水源として使われている1箇所を除き、かんがい水源ないしかんがい水源以外の利用がなされていない

Table 2-6に草刈りの回数を示す。59.6%のため池において年1回以上の草刈りが行われている。一方、草刈りを実施していない可能性が高い「無回答」(「アンケート」の設問には「実施せず」の選択肢なし)は33.0%である。なお、草刈りの実施は雑草の繁茂度合にも規定されるものであり、雑草の繁茂が取水などの作業や施設管理に支障ない程度であれば、草刈りを実施しないことも当然考えられる。このため、単純に草刈り回数を指標として維持管理の状況を判断することは適当ではない。

Table 2-7に草刈りの作業者の内訳を示す。作業者の割合は受益農家による共同(分担)作業による場合が最も多く、次に管理者自身(家族を含む)による作業、集落の共同作業による作業の順が多い。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池においては大半のため池で管理者は施設の異変を把握する上で十分と考えられる頻度でため池に出向いているといえる。草刈りについても、前述したように大部分のため池はかんがい水源として利用されていることから、多くのため池において水源施設として利用する上で支障ない程度の雑草管理はなされているものと考えられる。

2.1.3.4 施設の点検、補修・管理

Table 2-8に「アンケート」分析ため池における点検、補修・管理作業に関する作業内容ごとの実施ため池割合を施設別に示す。

堤体に関しては、30%を越えるため池で「堤体の亀裂や陥没」と「漏水箇所」、「堤体の浸食や崩れ」の点検が実施されている。また10%を越えるため池で「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」と「安全施設」の点検についても実施されている。補修・管理作業については、10%を越えるため池で「堤体の亀裂や陥没箇所の埋め戻し」と「漏水箇所の補修」、「堤体の浸食や崩れ箇所の修復」が実施されている。

Table 2-5 何らかの用事でため池へ出向いた回数（2009年）
The number of times that went to irrigation ponds on some kind of business

（単位：％）

回数	割合
0回	6
1～2回	8
3～5回	8
6～10回	13
11～20回	15
20回以上	49
不明	1

Table 2-6 草刈りの回数
The number of times of the mowing

（単位：％）

作業回数	割合
10年以上行っていない	1
数年に1回程度	5
年1回	12
年2回	26
年3～5回	20
年6回以上	1
不明	2
無回答	33

Table 2-7 草刈りの作業者
Worker of the mowing

（単位：％）

作業者	割合
受益農家の共同(分担)作業	24
管理者自身(家族を含む)	22
集落の共同作業	16
その他	3
不明	3
無回答	32

洪水吐に関しては、10%を越えるため池で「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」と「落ち葉、流木の堆積」の点検、並びに補修・管理作業として「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

取水施設に関しては、30%を越えるため池で「樋管など周辺施設の草の繁茂状況」の点検、10%を越えるため池で「樋管の破損状況」と「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」、「落ち葉、流木の堆積」の点検が実施されている。補修・管理作業については、40%を越えるため池で「樋管など周辺施設の草刈り」、10%を越えるため池で「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

貯水池に関しては、40%を越えるため池で「貯水状況の確認」の点検、20%を越えるため池で「落ち葉、流木の堆積」と「池内の藻の発生状況」、「池内の土砂の堆積」の点検が実施されている。補修・管理作業については、20%を越えるため池で「池の水抜き」、10%を越えるため池で「落ち葉、流木の除去」が実施されている。

なお、「アンケート」分析ため池において、Table 2-8で分析した項目の点検、補修・管理作業を全く実施していないため池は9.4%に留まる。

Table 2-9に点検と補修・管理作業の作業回数を施設別に示す。点検を1回以上実施しているため池の割合は高い順に堤体で50.0%、貯水池で44.3%、取水施設で43.4%、洪水吐で34.0%である。

Table 2-10に点検と補修・管理作業の作業者の内訳を施設別に示す。洪水吐の補修・管理作業において「受益農家の共同(分担)作業」の割合が低いことを除くと、各施設とも点検、補修・管理の作業者の割合は「管理者自身(家族を含む)」と「受益農家の共同(分担)作業」、「集落の共同作業」で概ね同比率となっている。

これらの結果から、大部分の「アンケート」分析ため池においては、何らかの施設の点検、補修・管理に関する作業が行われていることがわかる。この中で、実施割合の高い「漏水箇所」や「堤体の亀裂や陥没」、「堤体の浸食や崩れ」、「コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み」などの点検、補修・管理については、ため池を利用する上で直ちに補修等の対応が必要となる施設の異常だけでなく、通常の利用においては支障のない軽微な施設の劣化や破損についても対象としている可能性がある。農業水利施設の予防保全は劣化等による施設の性能低下が許容範囲を超える前に適切な補修等の対策を行い、施設の長寿命化を図るもの（機能保全における性能設計入門編集委員会、2008）であり、受益農家の手によってため池の各施設に対する初期的な劣化箇所の点検と点検結果に応じた補修・管理の取組が可能であれば、ため池においても予防保全の導入による長寿命化は可能であると考えられる。今後、管理者や作業を行う受益農家に対する聞き取り調査を行い、点検と補修・管理に関するより詳細な作業内容を明らかにする必要がある。

2.1.3.5 貯水池、洪水吐の現況

Table 2-11に貯水池内の流木・倒木の状況を示す。現地調査ため池の内、40.0%のため池で貯水池内に流木・倒木

Table 2-8 点検・補修・管理に関する作業内容別の実施ため池
A ratio of irrigation ponds according to work contents about check and repair.

(複数回答/単位:%)

	堤体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理
A	36	14	4	2	3	2	1	1
B	37	16	—	—	—	—	—	—
C	30	12	—	—	—	—	—	—
D	16	3	18	1	14	0	0	0
E	3	0	7	0	1	0	0	0
F	3	2	2	3	1	4	8	9
G	15	4	1	1	0	0	0	0
H	7	8	5	8	30	42	0	2
I	1	0	—	—	17	2	0	0
J	4	1	16	14	10	12	22	16
K	0	0	0	0	0	0	0	0
L	3	0	0	0	0	0	0	0
M	—	—	—	—	—	—	21	8
N	—	—	—	—	7	8	45	24
O	—	—	—	—	—	—	21	5
P	1	0	1	0	1	0	1	1
実施せず	32	49	56	68	31	43	28	43
不明	2	16	4	9	12	4	6	12

記号	作業の内容	
	点検	補修・管理作業
A	漏水箇所	漏水箇所の補修
B	堤体の亀裂や陥没	堤体の亀裂や陥没箇所の埋め戻し
C	堤体の浸食や崩れ	堤体の浸食や崩れ箇所の修復
D	コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの異常や傷み	コンクリート部分やブロック目地、ゴムシートの補修
E	コンクリートやブロック構造物の裏側の空洞	コンクリートやブロック構造物の裏側の空洞の埋め戻し
F	ゴミの不法投棄	ゴミの回収
G	安全施設(柵や看板が壊れていないか)	安全施設(柵や看板など)の補修
H	樋管など周辺施設の草の繁茂状況	樋管など周辺施設の草刈り
I	樋管の破損状況	樋管の補修
J	落ち葉、流木の堆積	落ち葉、流木の除去
K	機械部分の動作確認	機械部分への注油
L	機械部分の損耗	機械の部品等の交換
M	池内の藻の発生状況	池内の藻刈り
N	貯水状況の確認	池の水抜き
O	池内の土砂の堆積	池内の泥上げ・泥吐き
P	その他	その他

Table 2-9 点検と補修・管理の作業回数
The work number of times of check and repair

(単位:%)

	堤体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理
10年以上行っていない	1	2	1	1	1	2	1	1
数年に1回程度	5	4	4	4	5	4	3	6
年1回	20	11	16	8	14	11	10	8
年2回	14	5	8	4	12	10	10	6
年3～5回	10	7	8	4	5	9	11	9
年6回以上	6	1	2	2	12	4	12	5
実施せず	32	48	55	68	31	43	29	41
不明	12	22	6	9	20	17	24	24

Table 2-10 点検と補修・管理の作業者
The worker of check and repair

(単位:%)

	堤体		洪水吐		取水施設		貯水池	
	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理	点検	補修・管理
管理者自身(家族を含む)	17	14	14	11	23	20	19	20
受益農家の共同(分担)作業	20	11	10	3	25	16	21	12
集落の共同作業	19	19	11	11	15	15	21	19
その他	4	3	4	3	2	2	4	4
実施せず	32	48	55	68	31	43	29	41
不明	8	5	6	4	4	4	6	4

が見られた。現地調査で把握した洪水吐流入口に漂着した流木の例を Fig.2-4 に示す。

Table 2-12 に洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の状況を示す。軽度のものを含めれば洪水吐内で25.0%、流入口付近で54.2%のため池において、洪水吐を流下する洪水の通水を阻害しうる雑草の繁茂、枯れ草等が見られた。現地調査で把握した洪水吐流入口付近に繁茂する雑草の例を Fig.2-5 に示す。なお、貯水池内の流木・倒木と洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等の両方、ないしはどちらか一方が見られたため池は現地調査ため池の80.0%である。

流木・倒木や雑草・枯れ草等の除去が行われていないため池においても、多くのため池は現地調査において堤体の草刈りなどの通常の維持管理は適切に行われていると判断できた。また、Table 2-8 に示したように取水施設で「樋管など周辺施設の草刈り」を行うため池の割合は

41.5%なのに対して「落ち葉、流木の除去」を行うため池の割合は貯水池で15.7%、洪水吐で13.9%に留まる。従って、これら流木・倒木と雑草・枯れ草等の除去は少なからずため池管理者と受益農家にとって作業すべき事柄として意識されていない、もしくは意識されていても労力面などの理由で実施できていない可能性がある。

地球温暖化に伴って生じる降雨形態の変化に対しては、ため池についても洪水吐の排水能力の不足が懸念されている。貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草の繁茂、枯れ草等は単純に洪水吐の排水能力を低下させるだけでなく、降雨形態の変化に伴って懸念される降水の極値現象の変化、すなわち既往の観測値を超える豪雨時に洪水吐の閉塞、ひいては堤体越流による堤体の決壊を引き起こす原因となるおそれがある。ため池利用上の直接的な問題を生じていない場合においても、これら流木・倒木や雑草の繁茂、枯れ草等は豪雨時の災害リ

Table 2-11 貯水池内の流木・倒木の状況
The situation of driftwood and the fallen tree in the reservoir

(単位: %)

状況	割合
問題なし	60
流木・倒木あり	40



Fig.2-4 洪水吐流入口に漂着した流木
The driftwood which was cast ashore in spillway

Table 2-12 洪水吐の状況
The management situation of the spillway

(単位: %)

状況	洪水吐内	流入口付近
問題なし	75	46
雑草の繁茂、枯れ草等(軽度)	4	25
同上(通水を阻害)	21	29



Fig.2-5 洪水吐流入口付近に繁茂する雑草
The weed which grows thick in front of spillway

スクの軽減のために除去することが望ましい。今後、これらの除去に対する管理者への啓蒙や除去作業に対する支援を行う必要があると考えられる。

2.1.3.6 ため池利用に関する将来の意向

Table 2-13 にかんがい水源としての今後の意向を示す。「アンケート」分析ため池の内、64.2%のため池で管理者は現状維持を望んでいる。一方、ため池の廃止を望む管理者は0.9%、公的機関などへの管理の委譲を望む管理者は5.7%に留まる。

Table 2-14 にかんがい水源以外の役割への期待を示す。29.2%のため池で生物生息の場としての役割、27.4%のため池で防火用水としての役割が求められているものの、45.3%のため池ではかんがい水源以外の役割は求められていない。

これらの結果から、「アンケート」分析ため池においては当面現状の利用と施設管理が維持されるものと考えられる。しかし、高齢化と人口減少、水田面積の減少などは珠洲市においても進行しており、将来を考えた場合には維持管理の困難を来したため池に対する対応策が必要となる可能性がある。

2.1.3.7 ため池の施設管理と被災リスクの低減

アンケート分析ため池では、多くのため池で施設の異変発生を把握する上で十分な頻度の見回りと水源施設として利用する上で支障ない程度の雑草管理がなされているものと考えられることや堤体や洪水吐、取水施設、貯水池に関する何らかの点検と補修・管理に関する作業が行われていること、直ちに補修等の対応が必要な施設の異常だけでなく、軽微な施設の劣化や破損を対象とした点検と補修・管理が行われている可能性があることが明らかになった。一方、現地調査ため池では、貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草・枯れ草等の除去が十分行われていないことが明らかになった。

このことはため池管理者を中心とした受益農家が行っている施設管理は施設の健全性維持に大きく寄与するものであることとともに、ため池管理者等では対処しきれない事項があることを示している。技術的な専門知識を持たない管理者等が把握した変状に関する情報を自治体や土地改良区などのため池管理に関わる公的機関が系統的に集約し、技術者による機能診断や労力的に対応できない作業の支援など、機敏に次の対応をとる体制作り、ならびに対応する技術開発はため池の被災リスク低減に向けて重要であるといえる。

2.2 被災リスク低減に向けた機能診断手法の開発

2.2.1 目的

ため池管理者が実施する目視による点検において変状が発見された場合には、専門技術者による点検ないし機能診断を行うこととなる。この際、万一ため池が決壊し

Table 2-13 かんがい水源としての今後の意向
Intention as the irrigation source

(単位：%)	
選択肢	割合
現状のままでよい	63
かんがい時の水源としてもっと活用したい	14
干ばつ時の緊急水源として活用したい	8
かんがい水源として管理することが困難なので、公的な機関などに管理を委ねたい	6
かんがい水源として利用しないので、つぶしたい(埋めたい)	1
その他	4
不明	4

Table 2-14 かんがい水源以外の役割への期待
Expectation to the role except the irrigation source

(単位：%)	
選択肢	割合
生物の生息場所としての役割	29
防火用水としての役割	27
散歩など憩いの空間としての役割	8
災害や洪水防止としての役割	8
養魚池としての役割	4
釣り場所としての役割	3
その他	6
かんがい水源としての役割以外は求めない	45
不明	6

た場合に重大な被害を及ぼすため池において、危険度合いの高い変状が認められた場合には、相応の費用を費やして機能診断を行うことが可能であると考えられる。しかし、決壊時における想定される被害が相対的に小さなため池でかつ差し迫った緊急性がないと判断される変状に対しては、市町村や土地改良区の技術職員、あるいはため池管理に関わる者で技術的な経験を持つ者などの現場技術者が自ら機能診断を実施することが求められると考えられる。

そこで、目視点検で捉えられる変状で最も重要なものは堤体ならびに堤体と地山等の境界部で発生する漏水とされていることから、現場技術者がため池管理者などの協力を得て自ら実施できる漏水に関する目視点検を踏まえた機能診断手法として、堤体の漏水経路を1m深地温の測定結果に基づいて堤体中の地温分布のシミュレーションによる逆解析から推定する手法を提案する。

2.2.2 1m深地温探査法によるため池堤体の漏水調査法の開発

2.2.2.1 技術開発に当たっての課題

まず、ため池堤体の漏水や1m深地温探査法に関する既

往の研究結果に基づき、技術開発に当たっての課題を整理する。

土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)では、ため池堤体等の漏水箇所として、堤体盛土部と基礎地盤または両岸地山との境界部、底樋や洪水吐等の堤体横断施設の周囲を挙げている。堀ら(2002b)は、豪雨による農業用ため池の破壊原因として、常時満水位付近の上流斜面を浸入点とする浸透破壊が最も多いことを明らかにしている。従って、1m深地温探査法による漏水調査においては、堤体中に生じたパイピング穴や堤体横断施設からの漏水によって生じた高透水域などの堤体内部への貯水の浸入経路とその周囲の高含水域(以下、堀ら(2002a)の例に倣い、これらを合わせて「漏水経路」とする)の位置や深度を把握できることが求められる。

湯原(1955)は地下熱源の規模や深度、竹内(1983b)は地下水流脈の規模や深度について、地盤中の熱源・地下水流脈を円柱型、地表面を半無限に広がる平面、かつ地下水流脈以外の土壌の熱伝導率は一定と見なした上で定常熱伝導方程式の近似解を求め、1m深地温から理論的に推定する方法を提案している。前述の奥山ら(2003)は、ため池堤体を基礎地盤と一体の長大な斜面と見なした上で、1m深地温の測定値とこの推定方法による計算値が一致する地下水流脈の規模と深度を求めるとともに、推定結果を検証している。しかし、ため池堤体自体は地すべりブロック等の長大な斜面とは異なり、法面の一方の大半は貯水に、天端ともう一面の法面は大気と接し、その構造も半無限平面と見なすことはできない。従って、ため池堤体内部の1m深地温のシミュレーションを行う場合には、半無限平面と見なすことができない、ため池堤体の構造に即した地下水流脈の規模・深度の推定法を開発する必要がある。

竹内(1996)は、ため池堤体における1m深地温探査において、天端から堤体末端にかけて1×3mあるいは2×3mの測点網の設定を提案している。しかし、土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部

設計課, 2006) では堤体法面の後法勾配を 1:1.5 ~ 2.5 (参考寸法) としているものの, 実際には 1m 深地温測定に関わる諸作業が難しい急勾配の法面を持つため池も多い。従って, 堤体法面上に密な測点網を設定することが困難なため池も少なくないことから, 堤体天端上に設定した測点のみで漏水経路の探査が可能かどうかを検討する必要がある。

また竹内 (1983a) は, 地況の相違が 1m 深地温に与える影響を資料から整理した上で, 1m 深地温の補正方法を提案している。ため池堤体においても, 例えば貯水には深度方向の温度勾配の存在が考えられることから, 貯水と接する側の堤体表面はこれの影響等を受け, 堤体表面温度の相違が存在すると考えられる。しかし, 調査に当たって堤体表面の温度や堤体土の物性値などを詳細に測定する必要があるれば, 1m 深地温探査法の長所である簡便性は失われる。従って, 1m 深地温以外の測定項目は極力少なくする必要がある。

2.2.2.2 ため池堤体の漏水と 1m 深地温

堤体天端上に設定した測点において 1m 深地温を測定し, 測定結果を検討した。

1m 深地温の測定は, 青池 (香川県善通寺市生野町) において行った。青池の堤体においては, 右岸側地山寄り下端部分を中心に, 表面に漏水が浸出している。堤体天端付近の表層土は日本統一土質分類法による分類で粘土質砂 (SC), 堤体土はシルト質砂 (SM) である。水面下の部分を除いた堤体の表面は草で覆われ, 年間を通じて草刈りが行われている。青池の平面図 (諸元含む) を Fig.2-6 に示す。

堤体中の漏水経路は特殊な場合を除き, 堤体軸とほぼ直交すると考えられることから, 堤体表面に漏水が浸出している区間とその前後の区間に対して天端中心に測線を設定し, 測線上に 1m 間隔で測点を設けた。また, 堤体中の浸透水の水温を測定するために, 前述の漏水浸出区間, 非浸出区間にそれぞれハンドオーガーで削孔した観測孔を 1つずつ設けた。測線・測点と観測孔の位置を Fig.2-6 中, Fig.2-7 に示す。

1m 深地温の測定に当たっては, 直径 6mm の鋼棒を 1m 弱の深さまでハンマーで叩き込んだ後に引き抜き, この孔へデータロガーに接続した白金測温抵抗体を深さ 1m の位置に挿入して周辺土と密着させた。1m 深地温は測定開始から 4 分経過した時点の値とした。また, 合わせて Fig.2-6, Fig.2-7 の地点 1 (非浸出区間), 地点 2 (浸出区間) において観測孔内の浸出水の水温を測定した。1999 年 7 月 21 日における測定結果を Fig.2-8 に示す。

Fig.2-8 より, 測点 40 付近を中心に, 測点 38 ~ 42 において明瞭な低温部が認められる。測点 1 ~ 35 の平均地温 24.0℃ を非漏水部の代表値, これと最も温度差がある測点 39 の地温 23.3℃ を低温部の代表値とすると, 両者の間には 0.7℃ の温度差が認められる。正規分布とした場合の測点 1 ~ 35 に関する信頼度 99% の信頼区間下限値は 23.9℃ であるので, 両者の温度差は明確に把握できると考えられる。従って, 堤高の低いため池堤体においては, 堤体天端上に設定した測点から 1m 深地温を測定することにより, 地温異常の把握は可能であることがわかる。青池堤体では地況や日射の条件はほぼ同じであり, 1m 深地温に大きな変動のない測点 1 ~ 35 区間に含まれる地点 1 で測

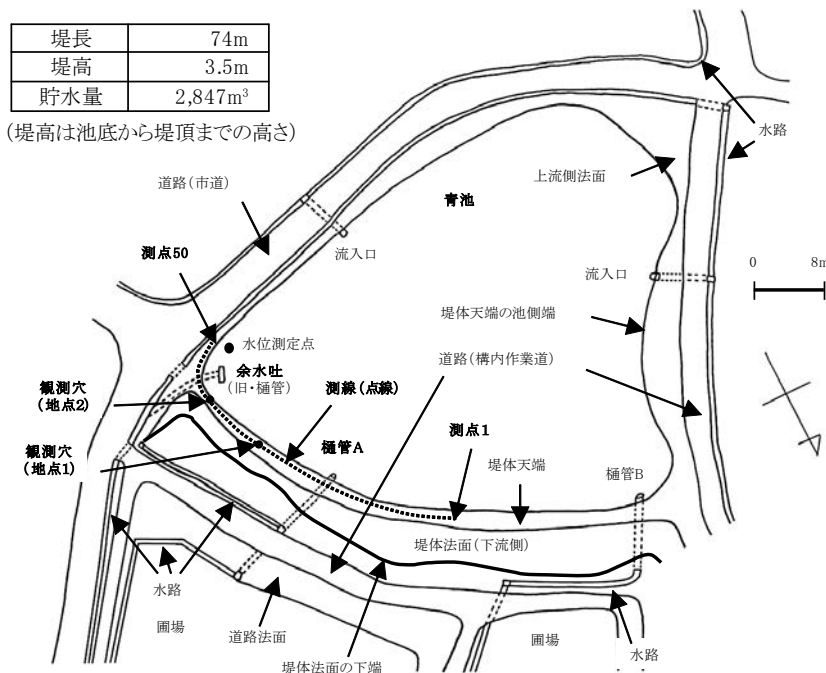


Fig. 2-6 青池平面図
Ground plan of Aoike pond

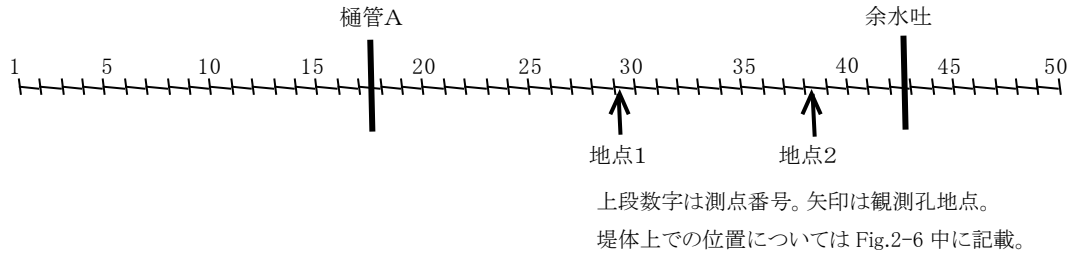
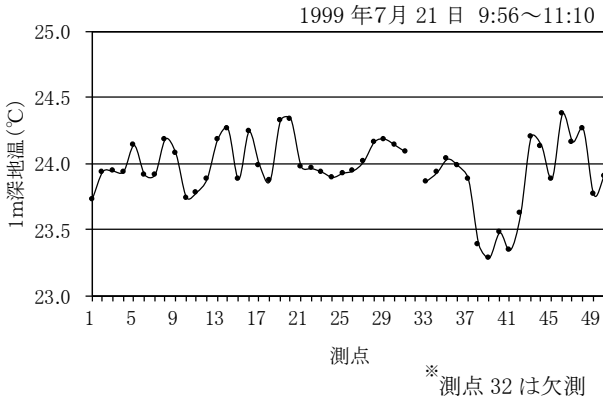


Fig. 2-7 測線と測点 (青池・天端中央)
The survey line and observation points



地点1の水温:21.6°C, 地点2の水温:20.6°C

Fig. 2-8 1m 深地温の測定結果 (青池)

Result of measuring ground temperature at a depth of one meter

定した浸出水の水温は21.6°Cであるのに対し、低温部に含まれる地点2で測定した浸出水の水温は20.6°Cと低いこと、低温部の下流側堤体表面では漏水の浸出が観察されることから、低温部の形成は漏水の影響によるものと考えられる。

2.2.2.3 たため池堤体1m深地温の日較差

たため池堤体における1m深地温の日較差を把握するために、青池において1m深地温の日変化を測定するとともに、比較のために気温の日変化を測定した。

Fig. 2-8において通常的な地温を持つ測点35と低温部である測点39において1m深地温を、青池から約370m離れた気象観測露場において気温を測定した。1999年8月30日の毎正時の測定値をFig. 2-9に示す。

Fig. 2-9から、気温の日較差は7.7°Cであるのに対し、1m深地温の日較差は両測点とも0.1°Cである。従って、堤体天端上から測定した1m深地温の日較差は、気温の日較差と比較して極めて小さいことがわかる。

2.2.2.4 たため池堤体1m深地温の年変化

たため池堤体における1m深地温の年変化を把握するために、青池において1m深地温を季節毎に測定した。

Fig. 2-8において通常的な地温を持つ測点28~31と低温部である測点38~42の1m深地温、及び比較のためにFig. 2-6, Fig. 2-7示した地点2における観測孔内への浸出

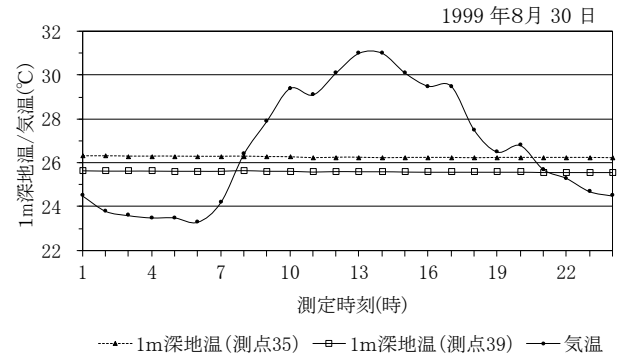


Fig. 2-9 1m 深地温の日変化 (青池)

Daily fluctuations of the ground temperature at a depth of one meter

水の水温について、1998年8月7日~1999年7月21日の間において季節毎に測定した。測点28~31の平均値(通常)、測点38~42の間において平均値(通常)と最も温度差のある測点の測定値(特異)、両者の差、及び地点2の水温をFig. 2-10に示す。

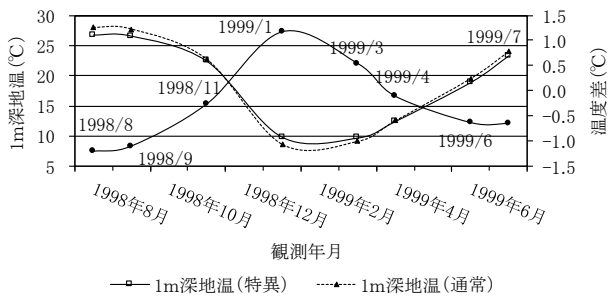
Fig. 2-10から、両者の1m深地温の間には夏期(1998年8月7日)で1.4°C、冬期(1999年1月29日)には1.3°Cの温度差が認められる。これに対し、春期と秋期の温度差は小さい。従って、1m深地温の測定は、両者の温度差が大きい夏期または冬期を行うことが適当である。

2.2.2.5 たため池堤体の表面温度

たため池堤体表面における温度分布、及び表面温度の日較差を把握するために、堤体の表面温度を測定した。

新井・西沢(1974)は人工貯水池の水温構造の特徴として、その水温分布は複雑なことと水温成層の形成を指摘している。青池の水深は約2mと浅いことから、堤体の表面温度の測定は人工貯水池に特徴的な水温構造が形成されると考えられる水深を持つ六道池(広島県東広島市豊栄町乃美, 堤高7m, 堤長88m)において行った。大気と接する側の堤体表面については、草刈りがなされた状態の天端で2005年9月7日~8日に地表下0.2mにおいて温度を測定した。水面下の堤体表面については、2005年9月8日に垂直方向の表面温度分布(水面から水深2.7m地点までの堤体表面上の水温)を測定した。これらの結果をFig. 2-11, Fig. 2-12に示す。

Fig. 2-11から、大気と接する側の表層地温には日較差が



*温度差=1m深地温(特異)-1m深地温(通常)
 水温(地点2)はボーリング孔内の水温(位置は Fig 2-6, 7 参照)

Fig. 2-10 1m 深地温の年変化 (青池)

Annual change of the ground temperature at a depth of one meter

あることがわかる。従って、ため池堤体天端においても、地すべりブロックなどと同様に、地温異常の把握は日較差が十分に小さい1m深地温の測定によることが有利である。Fig.2-12 から、水面下の堤体表面温度は水深約0.5mの地点を境として温度勾配が異なること、水面から水深約0.5mまでの間に日射や気温等の影響を強く受ける層が、その下には別の層が形成されていることがわかる。また、夏季においては深層の貯水は表層より低温であり、この低温水が漏水として堤体内に浸透することによって地温異常(低温部)が形成されることがわかる。

2.2.3 ため池堤体1m深地温のシミュレーション

2.2.3.1 基礎方程式とシミュレーション

前節の結果より、ため池堤体は1m深地温の日較差が極めて小さいことから、堤体内における熱移動はフーリエの法則による定常熱伝導問題(内部発熱なし)として扱う。また、前述した既往の1m深探査法では土壌の熱伝導を一定として扱っていること、熱伝導率と密接に関連する堤体土の水分状態の詳細な把握は困難なことから、近似的に浸潤面から上部の堤体土の熱伝導は一定と見なし、定物性問題として扱う。従って、ため池堤体の1m深地温の形成に関わる熱移動の基礎方程式は、式(2-1)(庄司, 1995)となる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad \text{式 (2-1)}$$

T:温度(°C) x, y, z:各座標値

シミュレーションは、黒田(2003)の有限要素法による三次元熱伝導解析プログラムを用いて行った。シミュレーションに用いる堤体は、青池での測量結果を基に後述する Fig.2-13 に示す断面とした。有限要素法の計算には堤長12mかつ均一型の堤体を想定し、六面体20節点を持つアイソパラメトリック要素を用いて要素・節点を設定した。頂点節点間の間隔は、堤体天端下においてX(堤体軸)方向100cm, Y(堤体軸直交)方向35cm, Z(高さ)方向12.5cmとし、中間に中間節点を設定した。

2.2.3.2 温度境界の設定方法の検討

シミュレーションでため池堤体の1m深地温を求める際の温度境界条件の設定方法を検討する。

温度境界は、漏水経路と堤体表面(大気に接する面:大気側/貯水に接する面:貯水側)、堤体内の浸透流が形成する浸潤面から構成される。検討に当たっては、この温度境界の条件(形状/温度勾配)と1m深地温の関係をシミュレーションで求めた。

温度境界の条件は Table 2-15 に示す5条件とした。なお、堤体と基礎地盤の接面、堤体の両端面は断熱境界とした。検討に用いた堤体断面の例(浸潤面の形状が水平の場合)は Fig.2-13 に示した。条件A~Cにおいては、浸潤面は貯水位を2.0mとして土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)及び土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書〔フィルダム編〕(農林水産省農村振興局, 2003)に示されている A.Casagrande の方法により求めた放物線状の浸潤面とした。条件D, Eにおいては、設定条件の単純化を検討するために堤体全面にわたって等しい高さ、すなわち水平の浸潤面とした。浸潤面の温度勾配は、条件A, Bについては線形の温度勾配とし、条件C~Eについては設定条件の単純化を検討するために温度勾配がない、すなわち全面に渡って等しい温度とした。条件D, Eについて

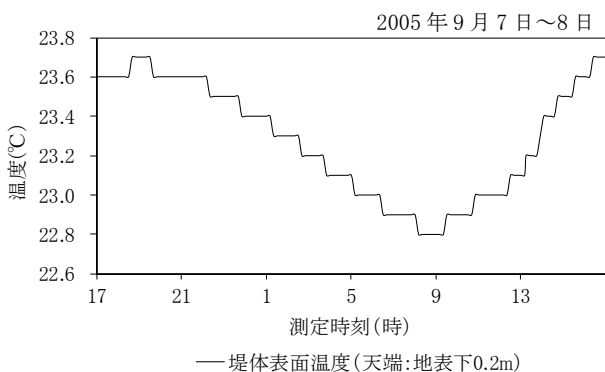


Fig.2-11 堤体表面温度(天端)の日変化(六道池)
 Daily fluctuations of the dam body surface temperature

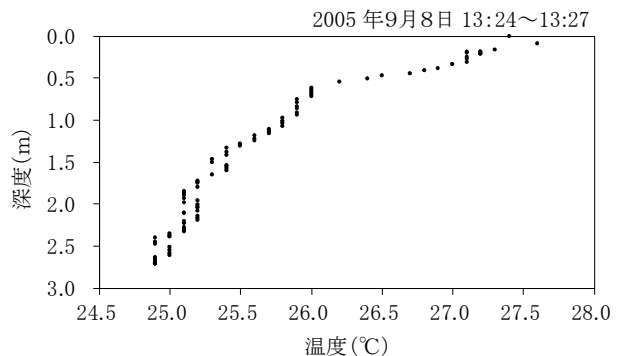
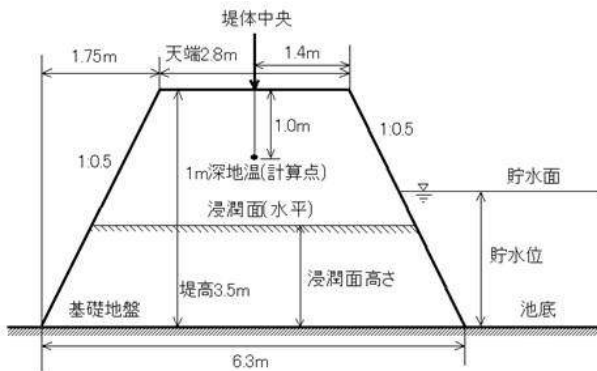


Fig.2-12 堤体表面温度(水面下)の鉛直分布(六道池)
 Distribution of the plumb direction of the dam body surface temperature

Table 2-15 計算条件（1）と1m深地温の計算値
List of parameters used for the calculation and calculated value of the ground temperature at a depth of one meter

温度固定境界の条件	条件A	条件B	条件C	条件D	条件E
浸潤面の形状	放物線	放物線	放物線	水平	水平
貯水位(m)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
浸潤面高さ(堤体中央)(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
浸潤面表面温度(貯水との接点)(°C)	19.6	17.6	21.6	21.6	21.6
" (堤体中央)(°C)	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6
" (堤体末端)(°C)	24.2	26.7	21.6	21.6	21.6
堤体表面温度(大気側)(°C)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
" (貯水側)(°C)	—	—	—	20.6	27.3
1m深地温(堤体中央:計算値)(°C)	24.0	24.0	24.1	24.0	24.1

※堤体軸平行方向の全長に対して同一条件を設定



※浸潤面の形状、ならびに貯水面との位置関係は Table 2-15 の条件D, Eの場合を示した。

Fig. 2-13 シミュレーションに用いた堤体断面 (青池)
The dam body section used in the simulation

は水面と浸潤面との間の堤体表面（貯水側）も温度境界とし、条件Dは低温側の条件として Fig.2-8 に示した青池の観測孔内（地点2）の浸出水の水温を、条件Eは高温の条件として Fig.2-6 に示した水位観測点における水面下1mの堤体表面（貯水側）の水温（1999年7月21日測定）を設定し、浸潤面と同様に設定条件の単純化を検討するために温度勾配はないものとした。条件D, Eとも、温度勾配を想定しないことから、実際の堤体表面（貯水側）温度と比してそれぞれより低温側、高温側と考えられる条件であり、堤体表面（貯水側）の温度境界条件の相違に対する1m深地温の影響をより強く検討できる。なお、堤体表面（大気側）は、条件A～Eとも、全面にわたって等しい温度とした。これら条件の下で形成される堤体中央の1m深地温の計算値を Table 2-15 中に示した。

Table 2-15 中の条件A～Cに関する1m深地温（計算値）の比較から、浸潤面表面の温度勾配の違いによる温度差はほとんど生じないことがわかる。また、条件C, Dから浸潤面の形状の違いによる温度差もほとんど生じない

こと、条件D, Eから浸潤面と水面との間の堤体表面温度（貯水側）の違いによる温度差もほとんど生じないことがわかる。

これらの結果から、浸潤面の形状は堤体軸直交方向に対して等しい深度を持つ平面として単純化して設定する。浸潤面の温度についても、温度勾配は存在しない、すなわち全面に渡って均一な値を設定する。堤体表面温度（大気側/貯水側）も、大気側、貯水側それぞれに対して均一な値を設定する。また、浸潤面の温度は堤体上に設置した観測孔への浸出水の水温から、堤体表面の温度は大気側、貯水側それぞれの任意地点での表層地温や堤体表面の水温、もしくはこれらを代替する観測データを基に設定する。日較差の存在する表層地温や堤体表面の水温については日平均値等を用いる。

2.2.3.3 漏水経路の設定

シミュレーションでため池堤体の1m深地温を求める際の漏水経路の設定方法を検討する。

検討に当たっては、Table 2-16 に示す9条件について、Fig.2-13の堤体を用いてシミュレーションを行った。但し、漏水経路の条件が1m深地温に与える影響を明確に捉えるために、浸潤面は設定していない。漏水経路については長方形断面とし、前節の検討結果から堤体軸直交方向の形状や温度勾配の相違は1m深地温に影響を及ぼさないと考えられるので、漏水経路は堤体軸直交方向の全長にわたって等しい厚さかつ温度勾配を持たない直方体とした。漏水経路を持つ堤体断面は Fig.2-14 に示す。1m深地温は堤体中央において堤体軸平行方向に0.5m間隔で求めた。計算結果は Fig.2-15～Fig.2-18 に示す。

Fig.2-15 から、漏水経路厚さの違いによる温度差はほとんど生じない、すなわち漏水経路厚さの探査はできないことがわかる。これに対し、Fig.2-16 から、漏水経路幅の

Table 2-16 計算条件(2)
List of parameters used for the calculation

温度固定境界の条件	条件F	条件G	条件H	条件I	条件J	条件K	条件L	条件M	条件N
漏水経路の形状	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形	長方形
貯水位(m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
漏水経路表面高さ(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	2.0
漏水経路高さ(m)	0.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	2.0
漏水経路幅(堤体平行方向)(m)	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
漏水経路表面温度(°C)	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	19.6	21.6	20.6	20.6
堤体表面温度(大気側)(°C)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
〃 (貯水側)(°C)	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3

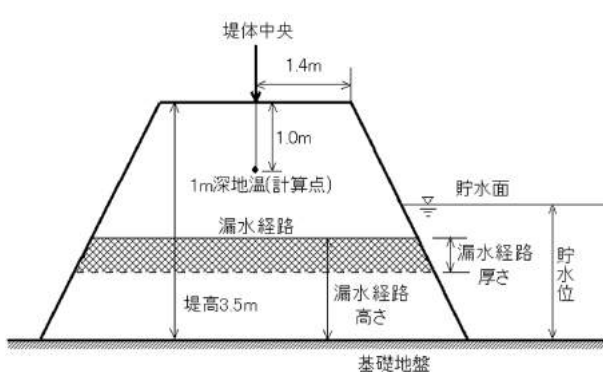


Fig. 2-14 想定した堤体中の漏水経路
Course of the assumed outflow in the dam body

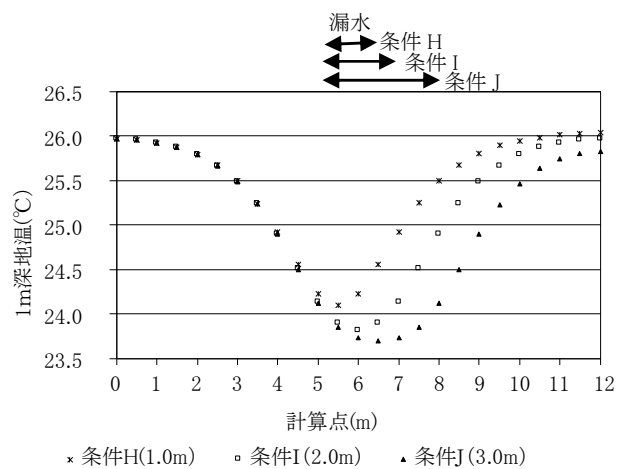


Fig. 2-16 漏水経路幅と1m深地温の関係
Relations of width of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

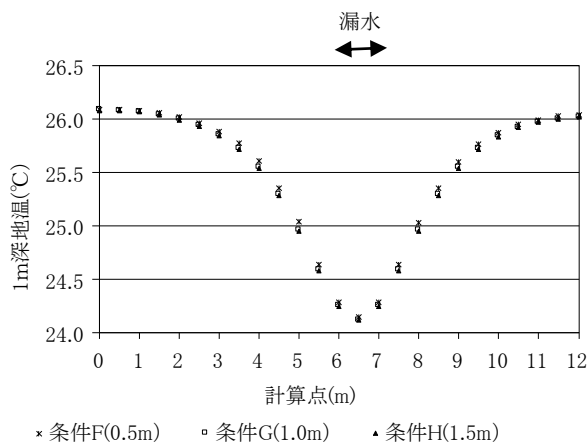


Fig. 2-15 漏水経路厚さと1m深地温の関係
Relations of thickness of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

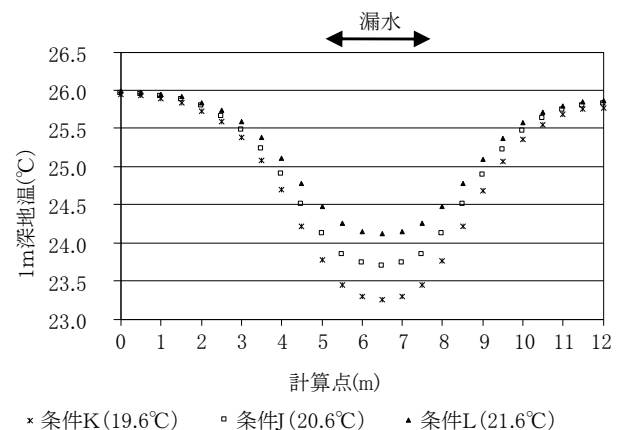


Fig. 2-17 漏水経路温度と1m深地温の関係
Relations of temperature of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

違いによって明確な温度差が生じることがわかる。**Fig. 2-17**, **Fig. 2-18** から、漏水経路の温度が異なる場合と漏水経路高さが異なる場合には、いずれも明確な温度差が生じることがわかる。また、計算点0m地点の1m深地温と0.5°C

以上の地温差を生じる範囲は、**Fig. 2-17** においては条件K、Jで計算点3m～10m地点、条件Lで計算点3.5m～9.5m地点、**Fig. 2-18** においては3条件とも計算点3m～10m地点の間である。従って、1m深地温の地温差を生じる範囲

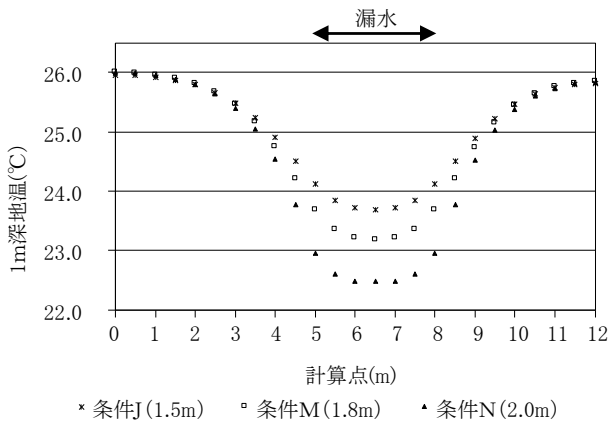


Fig.2-18 漏水経路高さ と 1m 深地温の関係

Relations of the height of the outflow and the ground temperature at a depth of one meter

は、漏水経路温度や漏水経路高さに関わらず、ほぼ等しいことがわかる。

これらの結果から、漏水経路の温度が既知の場合には、堤体軸平行方向に設けた測点の1m深地温の実測値と計算値が整合するよう漏水経路の幅と深度を変えてシミュレーションを行い、両者をマッチングさせることで、測線と直交する漏水経路の幅と深度の推定が可能であることがわかる。

2.2.3.4 ため池堤体中の漏水経路の推定手順

得られた結果を踏まえ、漏水経路の位置と深度の推定手順を次に提示する。なお、適用に当たっては、漏水経路は直方体で近似できることを前提とする。

- ① 堤体天端上に測線・測点を設定し、1～2m程度の間隔で1m深地温を測定。
- ② 1m深地温の測定結果から、漏水経路の中心を推定。
- ③ 漏水経路直上とそれ以外の堤体天端上でハンドオーガー等により観測孔の削孔し、漏水経路と浸潤面の水温を測定。
- ④ 既往の観測資料や実測により、堤体表面温度（大気側／貯水側）を決定。
- ⑤ A.Casagrandeの方法や観測孔内の水位測定で測線直下の浸潤面深度を決定。
- ⑥ 漏水経路の幅と深度を仮定し、直方体として漏水経路を設定。
- ⑦ 上記の②～⑥の条件に基づいて、堤体物性を均一（定物性問題）と見なした三次元熱伝導シミュレーション（定常熱伝導問題（内部発熱なし））により1m深地温を求める。
- ⑧ 上記の①と⑦の結果を比較し、両者がほぼ等しいと見なせるようになるまで作業を繰り返す。
- ⑨ 上記の①と⑥の結果がほぼ等しいと見なせた時点の漏水経路の幅と深度を推定結果とする。

2.2.4 青池における漏水経路の推定と検証

2.2.4.1 漏水経路の推定

前節で提示した手順に従い、Fig.2-8に示した1m深地温の測定結果を用いて青池堤体における漏水経路の探査を行う。

シミュレーションに用いた温度境界条件は、1m深地温の測定と同時にを行った測定値等を用いた。漏水経路水温はFig.2-8に示す地点2における観測孔内への浸出水の水温、漏水経路外の浸潤面温度は同様に地点1における水温、及び堤体表面温度（貯水側）は地点1付近の堤体表面（貯水側）の水温（水面下1m地点）とした。池水位はFig.2-6に示す水位測定点における測定値とし、浸潤面深度はこの値を用いてA.Casagrandeの方法で求めた。また、堤体表面温度（大気側）は、前述の気象観測露場において1m深地温の測定日と同時期の1993年7月15日～29日に観測された地表下0.2mの地温の平均値を用いた。既出のものを含め、これらをTable 2-17に示す。

得られた1m深地温の計算値と実測値をFig.2-19に、漏水経路の諸元をTable 2-18に示す。青池にはFig.2-6、Fig.2-7に示す位置に、余水吐として機能している旧樋管がある。貯水池側の堤体法面においては、パイピング穴等の漏水の浸入点となるような場所は旧樋管（余水吐）の流入口付近を除いて観察されなかったことから、青池堤体の漏水は旧樋管（余水吐）の流入口付近から旧樋管の管路に沿って堤体内に浸入していると考えられる。また、下流側の道路法面下端の水路周辺一帯（Fig.2-6参照）では、漏水が常時浸出している。従って、青池堤体においては、旧樋管（余水吐）の流入口付近から堤体内に浸入した漏水が、測点番号40地点を中心として推定した深度・幅の経路で測線下を流下した後、下流側の道路法面の浸出地点に達していると推定される。

2.2.4.2 推定結果の検証

旧樋管の管路の埋設深度は、貯水池内の流入口と下流側水路への流出口の位置から推定すると、堤体天端下約1.7mである。測線付近の漏水経路の深度は管路の深度に近いものと考えられることから、深度の推定結果は妥当

Table 2-17 計算条件（3）
List of parameters used for the calculation

項目	値
浸潤面温度(°C)	21.6
漏水経路温度(°C)	20.6
堤体表面温度(大気側)(°C)	26.0
堤体表面温度(貯水側)(°C)	26.7
池水位(天端からの深度)(m)	1.51
浸潤面深度(天端からの深度)(m)	2.0

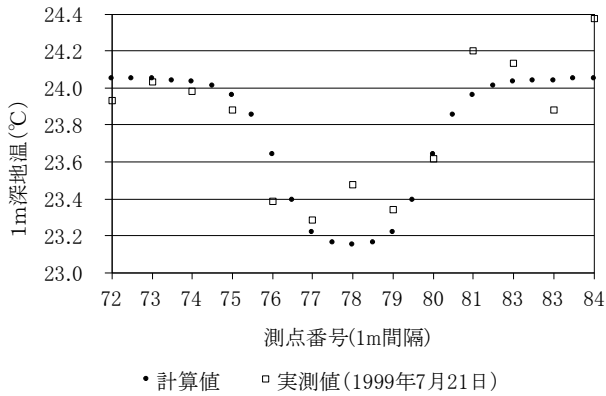


Fig.2-19 計算値と実測値の比較 (1m 深地温：青池)
Comparison between observed value and calculated value

Table 2-18 推定した漏水諸元 (青池)
Specifications of the estimated water leakage

項目	値
漏水経路表面深度(天端から)(m)	1.7
漏水経路幅(堤体軸平行方向)(m)	3.0

であると判断できる。

堀ら (1995) は、青池において塩水トレーサ法により、Fig.2-20 に示す堤体表面に浸出する漏水の卓越する流速ベクトルを求めた。他地点と比して著しく速い流速が測定された地点 A, H と旧樋管流入地点を結んだ直線は、漏水経路の中心と推定された測点 40 を包括し、かつそれぞれ推定した漏水経路の幅をもって測線と交差する。従って、測線上の漏水経路の幅についても妥当なものと考えられる。

これらの検証結果から、提示した手順により測線下における漏水経路の位置と深度の推定を行うことが可能であると判断できる。

3. 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策

3.1 背景と目的

ため池の被災要因の太宗は豪雨であることから、豪雨による被災リスクの低減、すなわち決壊を避けることは極めて重要である。しかし、ため池の改修事業は進められているものの、現行の「土地改良事業設計指針」ため

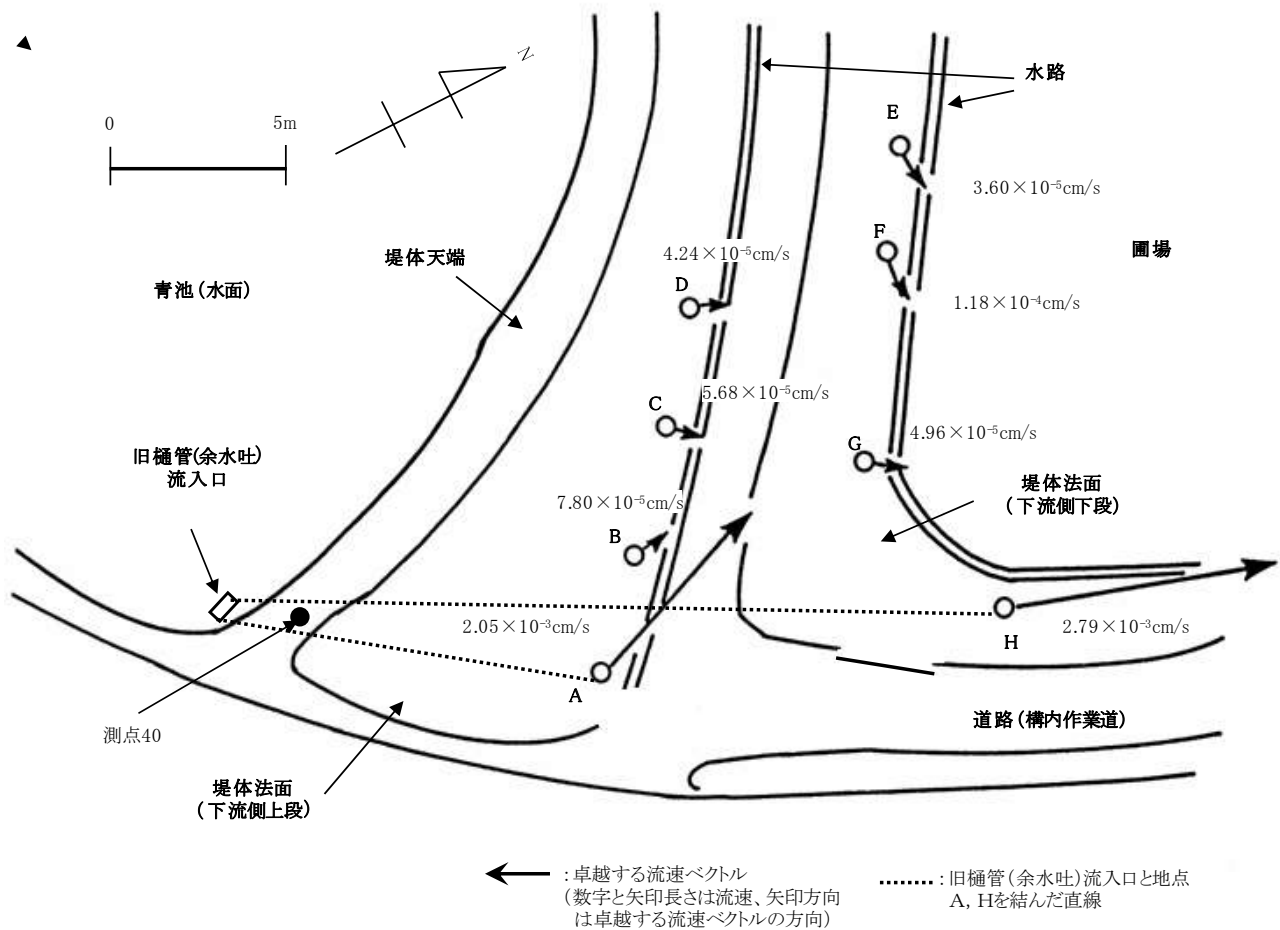


Fig. 2-20 流速ベクトルと推定した漏水の主な水みち (青池)
The flow vectors and course of the estimated outflows

池整備」に相当する水準で堤体や洪水吐などの整備がなされていない、すなわち豪雨時に被災するおそれがあるため池は多数存在する。

豪雨に起因する、ため池の決壊を招く堤体の被災は越流破壊とすべり破壊、浸透破壊の3つに大別される（農林水産省農村振興局整備部防災課，2013）。越流破壊は貯水位が堤頂を超えることにより、越流水で堤体法面が侵食され生じるものである。すべり破壊は貯水と降雨が堤体に浸透し、堤体法面に円弧すべり等が生じる現象である。また、浸透破壊は堤体中に貯水が浸透して水みちが形成され、堤体が破壊される現象である。いずれも降雨に伴う貯水位の上昇と密接に関わり合う現象であることから、設計洪水水位ないし未整備ため池であればこれに準ずる水位を貯水管理上の上限水位として設定し、ピーク水位がこれを超えないようソフト対策ないしハード対策を講じることにより、被災リスクを低減することができる。

ため池管理者が主体となって取り組む減災対策として、ピーク水位をソフト対策ないし簡易なハード対策によって低下させる取り組みが示されている（農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室，2014）。ソフト対策としては、豪雨が予想される期間にあらかじめ貯水位を常時満水位よりも引き下げて貯水の管理を行う低水位管理や気象予報に従って降雨前にあらかじめ放流を行って貯水位を低下させる事前放流の取り組みがある。これらの対応で創出した空き容量に流域から流入する降雨流出を貯留することで、ピーク水位を低下させることが期待できる。また、ため池管理の一環として実施される簡易なハード対策としては、洪水吐の拡幅や増設がある。この場合は洪水吐の放流能力を増強することにより、ピーク水位の低下が期待できる。貯水位を指標とした被災リスクの評価を行う場合、ならびに空き容量の創出や洪水吐の放流能力増強によるピーク水位引き下げによる被災リスク低減の効果を検討する場合には、洪水流出モデルを用いて降雨に伴う流域からの流入量を求め、これと洪水吐からの放流量ならびに降雨前の貯水位から貯水位ハイドログラフを妥当な精度で作成する必要がある。

また、農林水産省が全国のため池管理者を抽出して実施したアンケート調査においては、「10年程度前と比べた変化」として約7割の回答者が豪雨の頻度・強さが増したことと対応した管理強化の必要性を回答している（佐藤，2014）。地球温暖化に伴い、大雨や短時間強雨の発生回数の増加などが指摘されており、豪雨に対するため池の防災・減災対策においては気候変動に伴う降雨の変化を想定して検討を行う必要がある。

そこで、自流域を持つため池の洪水流出特性を明らかにした上で洪水流出モデルによるため池貯水位予測モデルを作成し、貯水位を指標として気候変動による降雨の変化を踏まえたため池の被災リスクの評価、ならびにため池管理者により実施可能な減災対策による被災リスクの低減効果について検討を行う。さらにこの結果に基づいて、ため

池管理者が減災対策を講じることによる被災リスクの低減策、すなわち決壊の回避策について考察する。

3.2 検討内容

3.2.1 水文観測と洪水流出特性の検討

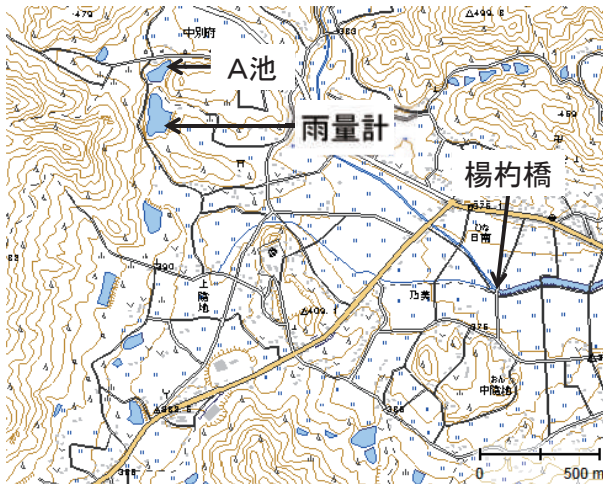
水文観測は2005年3月12日から2011年3月31日を観測期間として、広島県東広島市豊栄町乃美のA池の貯水池、ならびに比較のために下流の椋梨川楊杓橋地点の河道に圧力式水位計（センシズ HM-900 ないし同等品）を設置して実施した。水位計の設置にあたっては、A池においては堤体法面、椋梨川楊杓橋地点においては護岸法面に塩ビ管を取り付けて塩ビ管底部に水位計のセンサ部分を設置するとともに、機器収納箱を水没しない地点に設置して記録装置を納めた。A池には雨量計の設置に適した場所がないことから、雨量計（太田製作所 34-T）は天空を遮る樹木等がない、隣接するため池の堤体上に設置した（Fig.3-1, Fig.3-2）。水位と雨量の観測は10分ないし15分間隔で行った。A池は河川や沢などの貯水池への流入水路を持たない小規模のため池であり、上流域からの流入水は流域の斜面から貯水池へ直接流入するものと考えられる。A池の諸元（Table 3-1）は現地調査によるほか、満水面積と流域面積については1/25,000地形図上で求めた。



この地図は国土地理院の地理院地図(電子国土 Web)を加工して作成したものである。

Fig. 3-1 東広島市とA池、椋梨川楊杓橋地点の位置

Location of Higashi-Hiroshima city, A pond and Youjyaku bridge point in Mukunashi river



この地図は国土地理院発行の1/25,000地形図(乃美)を使用したものである。

Fig. 3-2 A池と椋梨川楊杓橋地点、雨量観測地点の位置
Location of A pond, Youjyaku bridge point and rainfall amount observation point

Table 3-1 A池の諸元
Specifics of A pond

	A(流域比小)	B(流域比大)
堤高(m)	3.31	3.82
流域面積(m ²)	90,000	480,000
越流幅(m)	0.21	0.43
最大越流水深(m)	0.26	0.51
余裕高(m)	0.26	0.51
流域比	15	80

洪水流出特性の検討にあたっては、まず観測期間において椋梨川楊杓橋地点で最も水位が上昇した2010年7月14日降雨を対象に、A池においては流域から貯水池への流入量、椋梨川椋梨川楊杓橋地点においては河川流量を求めた。A池貯水池における水収支は豪雨を対象とした検討であることから、池敷や堤体から地盤への浸透量や貯水面から大気への蒸発量は無視し、単位時間あたりの貯水量 dS/dt (変化量) は式 (3-1) とする。従って、流入量 I は貯水池容量 dS/dt (変化量) と放流量 O を求めることにより、式 (3-1) から計算できる。A池では貯水の利用などの人為的な放流は全くなされていないことから、放流量 O は洪水吐からの流出のみとして式 (3-2) を使い、水面と洪水吐水路底の水位差を越流総水頭 H として、これを観測貯水位から求めて計算した。なお、洪水吐は素掘り土水路であり、長方形断面の水路流入型のものと見なすことができることから、Table 3-1 に示した値を用いた。貯水池の断面構造は第5章においてA池を含む東広島市豊栄町内椋梨川流域のため池を対象に推定した断面構造を用い、貯水量は観測貯水位から求めた。楊杓橋地点の河川流量は第4章で作成した広域洪水流出モデルより水位-流量曲線を作成し、観測水位から求めた。

$$dS/dt = I - O \quad (3-1)$$

I : 流入量 (m³/s)
 O : 放流量 (m³/s)
 S : 貯水量 (m³)
 t : 単位時間 (s)

$$Q = CBH^{3/2} \quad (3-2)$$

Q : 流量 (m³/s)
 B : 水路幅 (m)
 H : 越流総水頭 (m)
 C : 流量係数 (=1.2 : m^{1/2}/s)

降雨に伴う流出水は降雨が地表面ないし表層部を流下して到達する表面流出(表層流出)と比較的浅い領域を流下して到達する中間流出、地中の深い領域まで浸透した後時間をかけて流下する地下水流出にその流出経路に応じて大別される。従って、観測された流量ハイドログラフはこれらの3成分が合成されたものである。流出成分の分離法には図解法があり、水谷(2008)はBarnsの方法(Barns, 1940)に基づいて縦軸を対数表示としたピーク流量出現時刻以降の流量、横軸を経過時間とした片対数のグラフを作成することで、流出成分の分離を行っている。この方法で作成した片対数グラフは2つの屈折点で区分される3本の直線で近似され、それぞれの直線が3つの流出成分に対応することから、流出成分の分離ができる。

図解法による片対数グラフの作成は、2010年7月14日降雨におけるピーク流量出現時刻以降の流量について、A池流入量と椋梨川楊杓橋地点を対象に行った。

3.2.2 貯水位予測モデルの作成

貯水位予測モデルはFig.3-3に示す構成のものとした。流域から貯水池への流入量の計算に対しては貯留関数法を適用し、洪水吐からの放流量と貯水池容量(単位時間あたり変化量)の計算は前述のA池流入量の計算方法と同じとした。貯水位予測モデルにおいても豪雨時の洪水流出を対象とすることから、池敷や堤体から地盤への浸透量や貯水面から大気への蒸発量は無視し、取水施設からの放流量は考慮しない。貯留関数法の計算にあたっては、木村(1975)の基礎方程式を式(3-3)、式(3-4)を連立させ、ルンゲクッタ法により差分化するとともに、計算時間刻みは1分とした。

$$S = kq^p \quad (3-3)$$

$$\frac{dS}{dt} = r_e - q \quad (3-4)$$

S : 見かけの貯留高 (mm)
 q : 流出高 (mm)
 r_e : 有効降雨強度 (mm)
 k, p : 係数 (無次元)

貯留関数法の係数は2005年7月2日降雨ならびに2005年9月7日降雨時の観測データを用い、A池流入量とA池貯水位を用いて試行錯誤により決定した。有効雨量の計算は第4章で求めた飽和雨量と一次流出率を用いた。これらの値はTable 3-2に示す。

3.2.3 降雨データの作成

検討に用いた降雨データのうち、現在降雨については独立行政法人土木研究所が公開するフェア式による計算プログラムを用い、東広島地点のアメダス観測値(1976～2000年)からハイエトグラフを作成した。降雨継続時間と降雨パターンは「土地改良事業設計指針「ため池整備」」の「参考資料-1 貯留効果の計算例」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)と土地改良事業計画

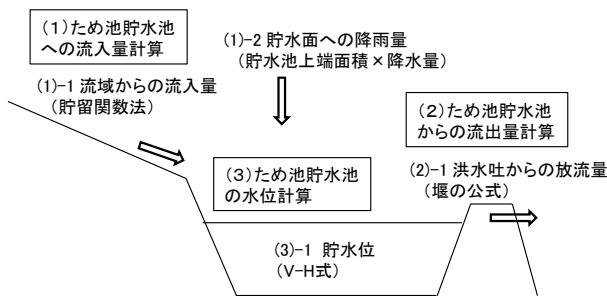


Fig. 3-3 貯水位予測モデルの概要
Summary of the reservoir levels prediction model

Table 3-2 貯留関数法の係数等 (A池)
Coefficients of storage function

項目	値等
k値	15
p値	0.6
一次流出率	0.4
飽和雨量(mm)	100

設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準の運用(農林水産省農村振興局, 2006)を参考に24時間連続降雨とし、降雨パターンは中央集中型と後方集中型を作成した。

将来降雨については、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による第5次評価報告書で用いられた、世界気候計画(WCRP)が策定した第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)の実験仕様に基づく気候モデルで得られた降水量の予測データを用いて作成した。作成にあたっては、アメダス観測点における将来の日雨量の予測に使用できる空間解像度と考えられる、Table 3-3に示した水平解像度200km程度以下の気候モデルを選択した。また、CMIP5の実験仕様で設定されている複数の温暖化シナリオのうち、比較的緩やかに温暖化が進行することを想定しているRCP4.5に対応した予測データを使用した。使用する予測データの期間は、現在降雨についてはアメダス

Table 3-3 検討した気候モデル
Examined climate models

気候モデル名
MIROC5
MRI-CGCM3
CNRM-CM5
CSIRO-Mk3-6-0
HadGEM2-ES

観測値に対応する1976年～2000年とし、将来降雨は今世紀末の2081年～2100年とした。

予測データには統計的な誤差(バイアス)が含まれるため、将来降雨のデータ作成にあたってはバイアス補正を行った。まず、各気候モデルの予測データ(現在/将来)を計算格子間距離の重み付けにより5kmメッシュ化し、1976年以降の降水量が観測されているA池最寄りのアメダス観測地点であるアメダス東広島地点と重なるメッシュの値を求め、これをアメダス東広島地点の予測データとした。次に、各気候モデルによる現在の日雨量の予測データと同期間の東広島地点におけるアメダス観測値の日雨量の双方について、月最大日雨量を用いてグンベル法により月毎の確率雨量(2～30年)を求め、この2つの確率雨量の間で気候モデル別かつ月ごとに回帰式を作成した。バイアス補正はこの回帰式を用い、対応する気候モデルならびに月ごとに現在と将来の予測データに対して適用して行った。

将来降雨のハイドログラフ作成にあたっては、まずアメダス観測値とバイアス補正後の予測データに関し、年最大の日降水量を用いてグンベル法により現在降雨の確率雨量(2～30年)を気候モデル毎に求めた。アメダス観測値に関しては、24時間雨量に関する確率雨量についても同様に求めた。次に、得られた確率雨量の比較から、アメダス観測値による確率雨量と近い値が得られた気候モデルを選択した。選択した気候モデルの将来降雨においては、同様にグンベル法で気候モデル毎に確率雨量(2～30年)を求めるとともに、各気候モデルの予測データから作成した年最大の日降水量にデータを全て用いたマルチアンサンプルの確率雨量(2～30年)を求めた。その上で、アメダス観測値と将来降雨(各気象モデル/アンサンプルデータ)の確率雨量から回帰式を、またアメダス観測値の24時間雨量と日雨量に関する確率雨量の間でも相互の回帰式を求めた。

将来降雨においても降雨継続時間と降雨パターンについては現在の降雨と同一とし、各時刻とも同倍率で雨量が変化するものと仮定して、現在降雨のハイエトグラフからこれら回帰式を用いて将来降雨のハイエトグラフを作成した。

3.2.4 A池における検討

豪雨によるため池の被災は、前述のように越流破壊とすべり破壊、浸透破壊に大別され、いずれも貯水位と密接な関係がある。このうち越流破壊は貯水位が堤頂の高さを越えた時点で堤体越流が生じることで発生する現象であり、堤頂の高さと等しい貯水位を被災発生の際の閾値と見なすことができる。これに対して、未改修ため池においては一般に堤体内部は不均一である上に内部構造や土質定数、透水係数等は不明であること、浸透破壊に関わる現象は堤体内部の局所的な弱部を起点に発生する機会が多いことが想定され予測が困難なことから、すべり破壊と浸透破壊の発生限界となる閾値の貯水位は明確ではない。

そこで、洪水吐水深の半分の水位を一意に被災発生を目安水位として設定し、前述の貯水位予測モデルをA池に適用してピーク水位が堤頂に達する降雨確率年、ならびにこの逆数である年間の生起確率を貯水位予測モデルの逆解析で求めた。

減災対策は、ピーク水位引き下げによる被災リスク低減効果が期待できる貯水位の低下管理（低水位管理・事前放流）と洪水吐の拡幅（簡易改修）に関し、対策シナリオを設定した（Table 3-4）。被災リスクについては、貯水が常時満水位にある現況のため池、ならびに対策シナリオを設定した場合について、降雨確率年から生起確率を求めた。

また、一般にため池の設計洪水流量の計算に用いる200年確率の降雨に関して、降雨継続時間24時間の中央集中型ならびに後方集中型降雨に対するピーク水位を求めた。

3.2.5 モデルため池における検討

豪雨に伴う貯水位の上昇度合は式(3-1)の通り、流入量と放流量の関係で規定される。ピーク水位引き下げを目的とする減災対策の効果は、貯水池の規模の指標である満水面積に対する流域面積の比率である流域比（流域面積／満水面積）の影響を大きく受けるものと考えられる。そこで、満水面積と貯水量は共通とし、流域比（流域面積／満水面積）の異なる2種類のモデルため池を設定し、流域比の相違と減災対策による被災リスク低減効

果の関係を評価した。なお、堤体の被災発生に対する閾値の水位は堤頂と常時満水位である洪水吐底面の標高差である洪水吐深さの半分に対応する水位とし、洪水吐の放流能力は未改修ため池を想定して30年確率の24時間連続降雨・後方集中型（現在）においてピーク水位がこの貯水位となるよう洪水吐の諸元を設定した。モデルため池の諸元等はTable 3-5、Table 3-6に示す。

減災対策は、A池における検討と同様に、貯水位の低下管理と洪水吐の拡幅に関し、対策シナリオを設定した（Table 3-7）。被災リスクについても同様に確率降雨年から生起確率を求めた。

Table 3-5 モデルため池の諸元1（共通部分）
Specifics of the model irrigation pond

諸元	値等
満水面積(m ²)	6,000
総貯水量(m ³)	15,120
常時満水位(m)	2.8
洪水吐形式	水路流入型
流量係数(m ^{0.5} /s)	1.35
k値	15
p値	0.6
一次流出率	0.4
飽和雨量(mm)	100

Table 3-6 モデルため池の諸元2
Specifics of the model irrigation pond

	A(流域比小)	B(流域比大)
堤高(m)	3.31	3.82
流域面積(m ²)	90,000	480,000
越流幅(m)	0.21	0.43
最大越流水深(m)	0.26	0.51
余裕高(m)	0.26	0.51
流域比	15	80

Table 3-4 対策シナリオ（A池）
Measures scenarios

- ①貯水位の低下管理(貯水量75%)
降雨前水位を1.84m→1.45m(-0.39m)下げて管理
- ②貯水位の低下管理(貯水量50%)
降雨前水位を1.84m→1.03m(-0.81m)下げて管理
- ③洪水吐の簡易改修
越流幅を0.25m→0.5m(2倍)に拡幅
※最大越流水深/余裕高は変更なし

Table 3-7 対策シナリオ（モデルため池）
Measures scenarios

- ①貯水位の低下管理(貯水量50%)
降雨前水位を2.8m→1.48m(-1.32m)下げて管理
- ②洪水吐の簡易改修(越流幅を1.5倍に拡幅)
A. 越流幅を0.21m→0.32mに拡幅
B. 越流幅を0.43m→0.64mに拡幅
※越流水深/余裕高は変更なし

なお、降雨パターンはピーク水位が最も上昇する後方集中型降雨のみ検討に用い、将来降雨についてはアンサンブルデータによる将来降雨データを用いて生起確率を求めた。

3.3 結果と考察

3.3.1 A池の洪水流出特性

A池流入量と比較対象の棕梨川楊杓橋地点に関する流量ハイドログラフを Fig.3-4 に示す。A池流入量のピークは降雨のピークとよく対応していること、また縦軸（流量）の倍率を合わせると、A池流入量と棕梨川楊杓橋地点流量の波形は近似していることが判る。

作成した減水曲線を Fig.3-5 に示す。A池流入量においても、棕梨川楊杓橋地点流量と同様に減水曲線の作成に

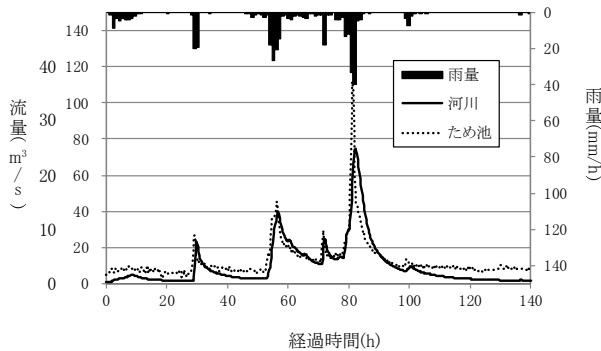
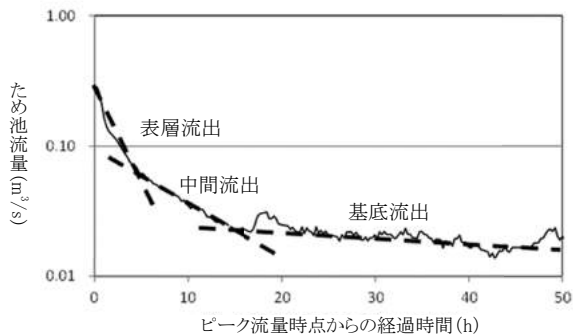
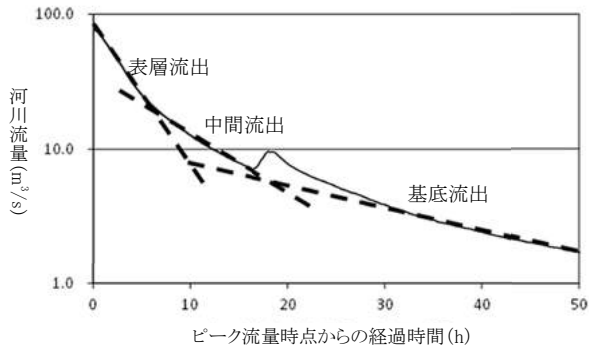


Fig.3-4 流量ハイドログラフ (2010年7月14日降雨)
Discharge hydrograph



(上：楊杓橋地点の河川流量，下：A池流入量)

Fig.3-5 作成した減水曲線 (2010年7月14日降雨)
Composed recession curves

よって流出成分の3成分が分離されること、表面流（表層流）と中間流を合わせた直接流出が基底流出である地下水流に対して卓越し、洪水流出時の主要な流出成分であることがわかる。

これらの結果から、A池のように河川や沢などの貯水池への流入水路を持たず上流域からの流入水が直接貯水池へ流入するため池においても、豪雨時の貯水池への流出は河道に対する流域からの流出と同様の現象であると考えられること、従ってため池流域からの洪水流出に関しては、貯留関数法をはじめとした直接流出を解析対象とする洪水流出モデルが適用可能であると判断できる。

3.3.2 作成した貯水位予測モデル

A池において、貯留関数法の係数を決定した2010年7月14日降雨において、A池において評価モデルの再現性を流入量について検証した結果を Fig.3-6 に、貯水位について検証した結果を Fig.3-7 に示す。流入量ならびに貯水位とも、良好な精度で再現できていることがわかる。

3.3.3 作成した降雨データ

作成した現在降雨の例として、30年確率のハイトグラフを Fig.3-8 に示す。

各気候モデルのバイアス補正後の予測データ（現在）、ならびにアメダスデータから確率年毎の日雨量を求めた結果について Fig.3-9 に示す。CNRM_CM5 から作成した確率雨量はアメダスデータから作成した確率雨量と乖離

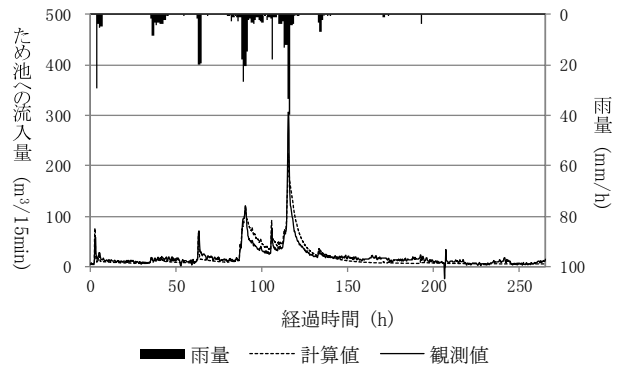


Fig.3-6 流入量予測結果 (A池：2010年7月14日降雨)
Estimation result of inflow

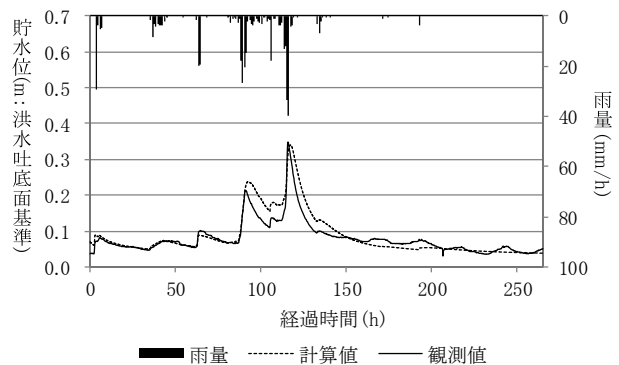


Fig.3-7 貯水位予測結果 (A池：2010年7月14日降雨)
Estimation result of reservoir level

が見られるため、アンサンブルデータによる確率雨量の算出時には除外した。

将来降雨データについて、確率年ごとの24時間雨量を気候モデル別(アンサンブルデータならびにアメダスデータによるものを含む)に求めた結果を Fig.3-10 に示す。将来降雨は現在降雨よりも大きく増加するほか、気候モデル間で大きくばらつくことがわかる。このことから、気候モデル間のばらつきを踏まえて将来降雨データを作成する必要がある。その対処方法の一つとして、複数の気候モデルのデータを用いてマルチアンサンブルの将来気候データを作成することが有効であると考えられる。

3.3.4 A池の被災リスクと減災対策の評価

A池において、求めたピーク水位が被災発生の目安水位に達する生起確率を現在降雨と将来降雨ならびに中央

集中型降雨と後方集中型降雨の別に、現状のため池と3種類の減災対策を講じた場合について求めた結果を Fig.3-11 に示す。生起確率に対応する降雨確率年については Fig.3-11 中に記した。また、200年確率・降雨継続時間24時間の中央集中型ならびに後方集中型降雨に関するピーク水位は Fig.3-4 に示した。

Fig.3-11 より、被災発生の目安水位に達する生起確率は中央集中型よりも後方集中型において高いことがわかる。また、雨量の増加に対応して、現在降雨よりも将来降雨に対して生起確率が高くなることがわかる。減災対策に関しては、いずれの対策も被災リスク低減の効果を発揮すること、設定したシナリオにおいては洪水吐の拡幅が最も効果を発揮することがわかる。また、降雨確率200年の降雨におけるピーク水位は、後方集中型降雨の方が中央集中型降雨に対してピーク水位が高くなるものの、両パターンともピーク水位は堤頂には達しないことがわかる。

設計洪水時の貯水が堤頂を越流することがないように定められる堤頂と設計洪水位の標高差である堤体の余裕高は、土地改良事業設計指針「ため池整備」(農林水産省農村振興局整備部設計課, 2006)において、ため池決壊時に想定される被害規模が小さい堤高5.0m未満のため池の場合には最小1.0とされている。A池の洪水吐水深は0.6mであり、堤体の余裕高は大幅に不足しているものの、200年確率の24時間連続降雨で予測されるピーク水位は堤頂を下回ることから、現況においても一定規模の豪雨に

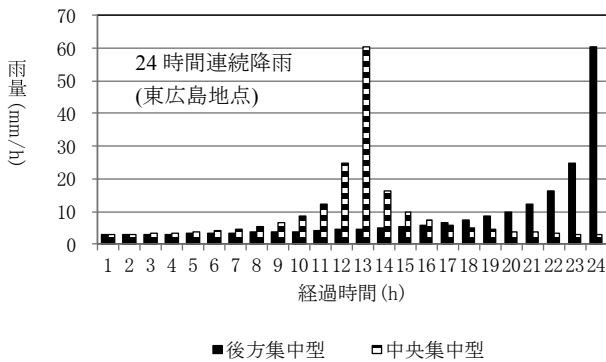


Fig.3-8 現在降雨のハイエトグラフの例 (確率降雨30年)
Example of thehyetgraph of the present rain

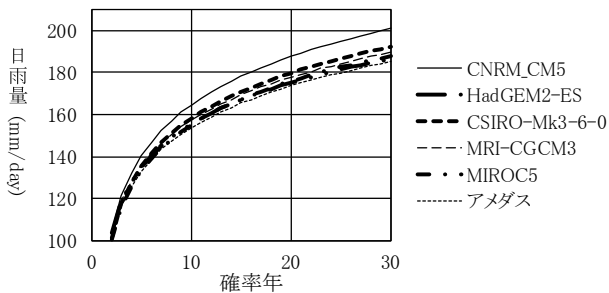


Fig.3-9 気候モデルによる現在降雨データ (1976~2000年)
The present rain with the climate model

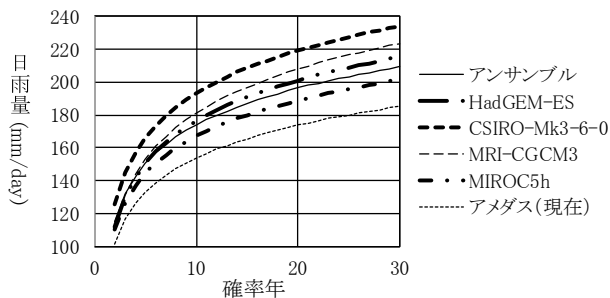


Fig.3-10 気候モデルによる将来降雨データ (2081~2100年)
The future rain with the climate model

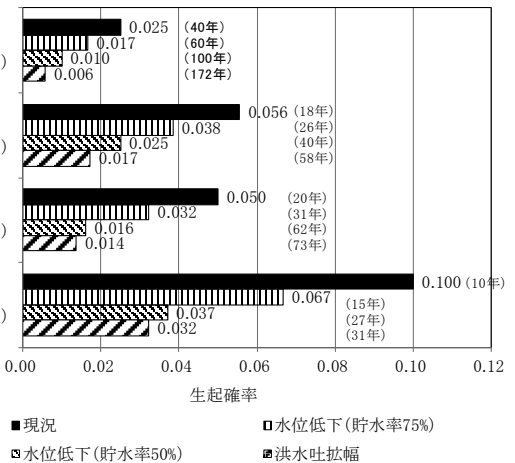


Fig.3-11 被災リスクの評価結果 (A池)
Evaluation result of the damaged risk

Table 3-8 A池におけるピーク水位
Peak water level in A pond

(単位: m)	
降雨パターン	ピーク水位
中央集中型降雨	0.45
後方集中型降雨	0.53

※水位は洪水吐底面基準。堤頂に達する水位は0.6m。

は耐えうるものと考えられる。しかし、水深の半分の水位を被災発生を目安水位とした現在降雨に関する検討では、中央集中型降雨では降雨確率 40 年、後方集中型降雨では降雨確率 20 年でピーク水位が目安水位に達すること、ならびに将来降雨においては目安水位に基づく被災リスクが上昇することから、堤体や洪水吐の本格的な整備が行われるまでは減災対策を実施してピーク水位を引き下げ、被災リスクの低減を図る必要があると考えられる。

3.3.5 モデルため池における被災リスクと減災対策の効果

モデルため池において、ピーク水位が現在降雨および将来降雨において目安水位に達する生起確率を求めた結果について、Table 3-9 に示す。

検討結果より、洪水吐の簡易改修は現在降雨において流域比の大小にかかわらず減災効果を発揮することがわかる。これに対し、貯水位の低下管理は流域比 15 の場合は一定の効果を発揮するものの、流域比 80 の場合は効果を発揮しないことがわかる。また、将来降雨においては洪水吐の簡易改修は流域比 15 ならびに流域比 80 のため池とも将来降雨においても減災効果を発揮するのに対し、貯水位の低下管理は現在降雨では効果があつた流域比 15 においても十分な効果が期待できないおそれがある。ため池の減災対策の選定にあたっては、将来を含む想定する降雨と被災リスク軽減の効果の関係を検討することが重要である。

流域比が大きい場合は流域からの流入量が相対的に大きく、ピーク水位が形成される時間前に水位低下分の空き容量が失われる。貯水位の低下管理は上流域からの流入水を貯水池の空き容量での貯留により受け止めることにより、ピーク水位を低下させるものである。従って、流域比の大きなため池ではピーク水位の出現時刻前に満水となり、ピーク水位を低下させることができない。また、降雨継続時間が長い後方集中型降雨においても、同様の状態が考えられる。貯水位の低下管理は、利水容量に余裕のあるため池であれば水利権者の合意と管理者の取水施設等の操作のみで実施できる減災対策であり、工事等を要することなく実施可能という利点があることから、直ちに実施可能な減災対策として重要である。しかし、貯水位の低下管理によって必要な被災リスク低減効果が得られない場合には、他の対策を併用する必要がある。

Table 3-9 被災リスクの検討結果（モデルため池）

Evaluation result of the damaged risk

		現在	世紀末
A 流域比15	現況	0.033	0.071
	水位低下	0.012	0.029
	洪水吐拡幅	0.012	0.029
B 流域比80	現況	0.033	0.071
	水位低下	0.033	0.071
	洪水吐拡幅	0.011	0.027

洪水吐の拡幅は洪水吐放流量の増強により迅速に放水を図ることにより、ピーク水位を低下させるものである。流域比が大きく流域からの流入量の大きなため池でも、対応した拡幅を行えば、ピーク水位出現時刻前の流入の影響は小さく、安定した被災リスクの低減効果が期待できる。また、洪水吐の拡幅は常時満水位を引き下げる必要がなく、貯水容量は減少しない。従って、浚渫等を同時に行わない限り貯水容量が減少する洪水吐の掘り下げによる放流能力の拡大とは異なり、利水容量の調整は不要である。貯水容量の減少を招かない洪水吐の放流能力向上策としては、現在の洪水吐の拡幅の他、副洪水吐を堤体や地山に追加設置することも考えられる。現有の洪水吐の拡幅が困難な場合や放流先の下流水路の通水断面が不足する場合などにおいては、副洪水吐の設置により放流能力の拡大を行うことで、被災リスクの低減を図ることが考えられる。

4. ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策

4.1 背景と目的

ため池は貯水位が洪水吐底面よりも低い場合には、空き容量に流域からの流入水を貯留することにより、上流域からの流出量を低減する。満水の場合でも、貯水池に洪水吐の越流水深に対応する容量を一時的に貯留することにより、ため池は降雨から流出に至る時間を遅延させる。ため池が持つ多面的機能であるこれら洪水緩和機能により、ため池群は下流域の農地の湛水防除や河川・水路の氾濫抑制など下流河川流域の被災リスクを低減させる効果を発揮しているものと考えられる。ため池群を持つ河川の流域においては、農地防災や治水にあつたため池群の積極的な活用が求められている。

ため池群の洪水緩和効果による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策の検討は、ため池によるため池群を対象として、流域内に多数あるため池が下流河川上の基準点に与える洪水緩和効果を評価する。基準点における洪水緩和効果の評価は、流域の流出過程におけるため池群の役割を解明することである。また前述した既往の研究から、単独ため池での洪水緩和効果の大きさは洪水発生前の空き容量の大きさ、貯水池への洪水流入パターンに強く影響を受けること、また貯水池の水位低下管理は洪水ピーク緩和効果の増強に有効であることが明らかになっている。

そこで、対象流域においてため池の貯水位を観測するとともに、ため池群と河道を明示的に組み込んだ広域洪水流出モデルを作成する。その上で、貯水位の調査結果を用いて基準点における河川水位と確率降雨を指標として従来明らかにされていない現況のため池群が発揮する洪水緩和効果の大きさを求める。この結果から、ため池群を積極的に活用して多面的機能としての洪水緩和効果

を發揮させ、下流河川流域の被災リスクを低減させるための貯水管理を考察する。

4.2 対象流域

対象流域は地形的に閉じた流域と見なすことができる棕梨川揚杓橋地点の上流域（広島県東広島市）とし、基準点是对象流域の出口である揚杓橋地点とした。棕梨川は広島県東部を流れる沼田川（二級河川）の支流である。対象流域は中国山地を構成する標高400～600m程度の丘陵からなる中山間地帯であり、水田を主体とする農地と集落は主に河川沿いの緩傾斜地に広がっている。ため池は水田の広がる河川沿いの緩傾斜地と山林との境目を中心に、中小規模のため池が多数散在している。対象流域の概要は Fig.4-1, Table 4-1 に示した。

二級河川沼田川水系河川整備計画（広島県、2003）によれば、棕梨川流域は度々洪水にみまわれている。直近では1999年6月29日に梅雨前線による大雨で基準点を含む棕梨川・西原川合流点（新堰橋付近）～棕梨川・霜降川合流点（河木橋付近）区間の一帯などで氾濫し、家屋や農地の浸水被害が発生している。

4.3 洪水流出モデルの作成

4.3.1 対象流域のモデル化

対象流域における洪水流出モデルの作成にあたっては、流域の流出過程を河道の洪水流、ため池貯水池における

Table 4-1 対象流域の概要 of the study basin

検討流域面積	18.04km ²	ため池個数	56個
うち田面積	3.59km ²	総貯水面積	113千m ²
うち畑・牧草地面積	0.63km ²	総貯水量	251千m ³
うち果樹園面積	0.07km ²	総流域面積	3.71km ²
うち林地・その他面積	13.75km ²	総流域面積率	20.6%

貯留と洪水吐からの流出、および河道・ため池貯水池の後背地からの降雨流出の3つに区分し、それぞれに異なる計算モデルを適用した。河道は基準点の前後区間などで平坦に近く、洪水時に背水による水位の堰上げの可能性があること、河川水位を洪水流出モデル検証と洪水緩和効果評価の指標としたことから、不定流モデルを用いた。河道とため池貯水池の後背地からの降雨流出には貯留関数法を適用した。ため池貯水池は単一要素のボックスモデルとして扱い、流入量に基づいて非定常計算を行って貯水位と洪水吐からの流出量を求めた。なお、河道の氾濫は検討対象としないため、モデル化においても考慮しなかった。

モデル化の範囲は対象流域に加え、基準点において下流側水位を考慮した計算ができるように棕梨川（本流）の河道については棕梨川・霜降川合流点（河木橋付近）から4.75km下流の東広島・三原市境界付近まで、ため池貯水池や後背地については同合流点から750m下流地点の河道に対応した範囲までとした（Fig.4-1）。モデル化に関わる地理情報の処理はESRI ArcGIS 9.2と小山ら（2007）が作成した水理計算用データ作成プログラムを用いて行い、作業手順等は吉迫ら（2007）に準じた。

洪水流出モデルは現況のため池群に対応したものととも、全てのため池が潰廃された場合のものを作成した。

4.3.2 河道

河道は1/25,000地形図に記載された河川・水路に加え、同図上の等高線を基に設定したため池から河川・水路までの流路、ならびにこれと等価と考えられる等高線の凹部に設定した沢を仮想河道とし、モデル化の対象とした（Fig 4-1）。

不定流解析の基礎方程式は河道の流れを一次元とし、摩擦抵抗にマンニングの法則を用いた運動方程式の式（4-1）と連続方程式の式（4-2）を用いた。河道に対する後背地からの流入量、ため池洪水吐からの流入量、および合流する河道からの流入量は式（4-2）において横流入量として扱った。

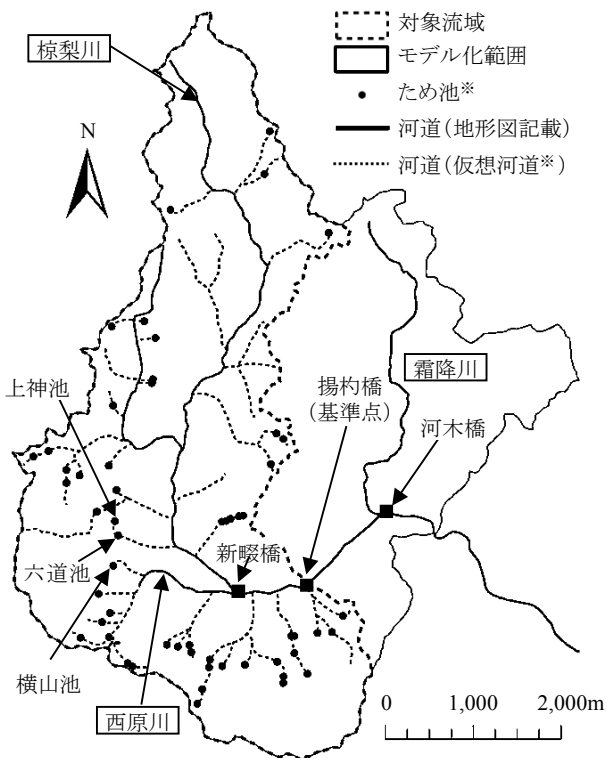
$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) - S_1 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0 \quad (4-1)$$

x: 流れの方向を正とする距離 (m)

t: 時間 (s)

g: 重力加速度 (m/s²)

v: 流速 (断面平均流速) (m/s)



*ため池と仮想河道は対象流域に限って記載

Fig.4-1 対象流域と洪水流出モデルの作成範囲 The studied basin and the scope of the flood outflow model

- h : 水深 (河道底から水面までの高さ) (m)
- R : 径深 (m)
- S_i : 河道底勾配 (無次元)
- n : マニングの粗度係数 (無次元)

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_i = 0 \quad (4-2)$$

- A_i : 通水断面積 (m²)
- Q : 流量 (m³/s)
- q_i : 単位長さ当たりの横流入量 (m³)

不定流モデルの差分格子点に対応する河道のセル分割は 100m 単位とした。断面形状や粗度係数は、1/25,000 地形図に記載された河川・水路については現地測量・調査に基づく値 (粗度係数: 0.035 ~ 0.1) とし、仮想河道については一律に一定値 (粗度係数: 0.1) を各セルに与えた。河道標高は解析上重要な椋梨川・西原川合流点~椋梨川・霜降川合流点区間などについては GPS による測量値を、他の区間については数値地図 50m メッシュ (標高) から補完して求めた値を用いた。

基礎方程式は中村・白石 (1971) や白石 (1971) が示した方法に基づいて中心差分化し、陽解法を用いて計算した。

4.3.3 後背地

後背地は降雨流出の単位であり、ため池貯水池に対する流出域はため池貯水池を単位として、河道に対する流出域は右岸・左岸別に河道長 1,000m を単位 (河道長 1,000m に満たない上流端は兩岸をあわせて 1 単位) として、1/25,000 地形図の等高線を基にモデル化範囲全域を空白域や後背地の重複が生じないように分割して設定した。貯留関数モデルは 1/25,000 地形図の土地利用・植生区分に従って田、畑・牧草地、果樹園、および山林・その他 (針葉樹林、広葉樹林等) の別に、各後背地内を更に細分した単位で作成した。河道に対する流出地点は後背地に接する不定流モデルのセルの内、最下流のセルとした。

貯留関数法の基礎方程式は木村 (1975) の式 (4-3)、式 (4-4) を用いた。有効降雨の推定は建設省水文研究会 (1971) に準じ、基準点で作成した保留量曲線、ならびに流出高累加曲線から求めた飽和雨量と一次流出率を用いて行った。対象流域は比較的狭域のため貯留関数法の係数は全後背地共通の値とし、基準点における観測水位と不定流モデルによる計算水位が整合するよう試行錯誤で係数の値を決定した。決定された係数等の値を Table 4-2 に示した。

$$S_2 = kq_2^p \quad (4-3)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = r_e - q_2 \quad (4-4)$$

Table 4-2 決定された係数等の値
Decided values of the coefficients

k 値 (田)	8	飽和雨量 (田を除く)	115mm
同 (畑・牧草地・樹園地)	12	同 (田)	50mm
同 (林地・その他)	15	一次流出率	0.33
p 値	0.6	時間遅れ	45min

- S_2 : 見かけの貯留高 (mm)
- q_2 : 流出高 (mm)
- r_e : 有効降雨強度 (mm)
- k, p : 係数 (無次元)

4.3.4 ため池

ため池は 1/25,000 地形図に記載されているもの (ただし、現地で潰廃を確認した 1ヶ所は除く) を対象とした。

洪水吐の形式は現地調査により把握した。対象流域内の洪水吐の形式と流量係数は Table 4-3 に示した。水路流入型や越流堰型、縦樋型の洪水吐による放流量は式 (4-5) により、ヒューム管や取水孔の開放口、すなわちオリフィスによる放流量は式 (4-6) により求めた。洪水吐の水路幅や堰の有効長、孔断面積等の計算に必要な諸元は測量により求めた。矩形断面における水路流入型と越流堰型、ならびに縦樋型の洪水吐に関する流量係数は加藤 (2005) と農林水産省農村振興局整備部設計課 (2006) を参考に設定し (Table 4-3)、台形断面や複断面の水路を持つ洪水吐の流量係数はこれらの値を基に椿・荒木 (1961) により求めた。オリフィスの流量係数は農林水産省農村振興局整備部設計課 (2006) に示された斜樋の流量係数とした (Table 4-3)。取水による放流量は無視した。

$$Qd = Cd \cdot B \cdot Hd^{3/2} \quad (4-5)$$

- Qd : 流量 (m³/s)
- Cd : 流量係数 (m^{1/2}/s)
- B : 水路幅 / 堰の有効幅 (m)
- Hd : 速度水頭を含む越流総水頭 (m)

$$Q = C \cdot A_2 \sqrt{2gH} \quad (4-6)$$

- Q : 流量 (m³/s)
- C : 流量係数
- A_2 : 孔断面積 (m²)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- H : 孔中心までの水深 (m)

満水面積は 1/25,000 地形図から計測した値、堤高はため池台帳に記載されている値 (記載のない場合は現地での測量値) とし、断面構造は第 5 章で対象流域のため池について求めたものを用いた。貯水位の計算方法は農林水産省農村振興局整備部設計課 (2006) に準じた。

全ため池が潰廃された場合のモデルは貯水池への流入

Table 4-3 洪水吐の形式と係数
The type and coefficients of the spillway

形式	箇所数	流量係数
水路流入型(コンクリート)	21	1.35
水路流入型(石積)	10	1.35
水路流入型(素掘)	11	1.20
越流堰型(標準・コンクリート)	3	2.00
越流堰型(簡易(刃型)・コンクリート)	2	2.00
越流堰型(石積)	1	1.35
縦樋型(コンクリート)	5	2.00
ヒューム管	2	0.62
取水孔の開放(洪水吐代用)	1	0.62

量, すなわち貯留関数モデルによって計算されるため池後背地からの流出量が洪水吐の流出地点と同一の河道地点(不定流モデルのセル)へ直接流出するものとした。

4.3.5 計算

洪水流出モデルの計算時間刻みは, 仮想河道と対象流域外の椋梨川本流のそれぞれ一部に急傾斜区間があることから, 不定流モデルにおいて発散が生じないように0.1秒とした。不定流モデルの境界条件は, 不定流モデルの最下流側セル(椋梨川本流)と基準点との間には十分な距離と高低差があることから, 最下流側メッシュの水位を2.0m(固定値)とした。

4.4 検討

4.4.1 観測

観測はため池の貯水率把握と洪水流出モデルの検証のために, 2005年3月12日から2011年3月31日を観測期間としてため池貯水位と雨量, 河川水位, 河川流速に関して行った。

ため池貯水位は上神池と六道池, 横山池において圧力式水位計(ハイネットHM-900-05またはセンシズHM-900-05)による連続観測を行った。加えて, 対象流域内のモデル化ため池全てを対象に, 洪水吐敷高(ヒューム管や取水孔の開放口の場合は孔の下端)と貯水位との標高差を空き水位として測量用ポールにより10cm単位で後掲するTable 4-5中に示した観測日をはじめ随時測定した。雨量は転倒マス型雨量計(太田製作所34-T)により六道池堤体上で, 河川水位は圧力式水位計(ハイネットHM-900-05)により基準点で連続観測を行った。河川流速は浮子法により2005年9月7日の降雨を対象に基準点で行った。これらの観測地点はFig.4-1中に示した。なお, 連続観測の時間間隔は水位に関しては15分, 雨量に関しては10分ないし15分とした。

4.4.2 洪水流出モデルの検証

洪水流出モデルの検証は河川水位・流量に関して行った。

河川水位・流量は基準点(堤防護岸高さ3.0m)において検証した。水位については観測期間中に基準点で2m以上のピーク水位が観測されたTable 4-4に示した4つの降雨(降雨日はいずれもピーク雨量の観測日)を, 流量については流量観測を行った2005年9月7日の降雨を対象に行った。検証用の計算開始時点のため池貯水位(初期値)は, 水位計設置ため池での検証対象降雨の降雨前貯水位(水位計による観測値)と随時実施した空き水位観測から求めた貯水位が最も近い観測日の観測空き水位を検証対象降雨の降雨前空き水位と見なし, この観測空き水位を用いて計算開始時点のため池貯水位を設定した(水位計設置ため池は水位計観測値を使用)。雨量は六道池堤体上での観測値を用いた。4つの検証対象降雨に関する降雨強度と降雨継続時間, ピーク水位, 比流量, 計算開始時点の設定貯水率(ため池群総貯水率)はTable 4-4に示した。河川水位の計算精度は式(4-7)の相対基準と式(4-8)の χ^2 -基準を用い, 比流量0.6以上の場合の観測値を対象として評価した。河川流量については観測値と計算値を対比した。

$$E_1 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |H_{oi} - H_{ci}| / H_{oi} \right) \times 100 \quad (4-7)$$

E_1 : 相対基準誤差 (%)

H_{oi} : 観測水位 (m)

H_{ci} : 計算水位 (m)

N : データ数

$$E_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - H_{ci})^2 / H_{oi} \quad (4-8)$$

E_2 : χ^2 -基準誤差 (m)

H_{oi} : 観測水位 (m)

H_{ci} : 計算水位 (m)

N : データ数

4.4.3 河川流量の緩和度合

河川流量の緩和度合は降雨前のため池貯水率に対応した基準点のピーク流量の緩和率として洪水流出モデルにより求めた。

「土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準, 基準の運用, 基準及び運用の解説, 技術書」(農林水産省農村振興局, 2006)では, 連続降雨を対象とする場合の小規模洪水調節ダムにおける計画基準降雨は1日降雨について確率計算を行って確率降雨を定めた後, 適当な単位時間ごとに配分するとしている。そこで, 評価に用いる降雨の継続時間は24時間とし, 降雨パターンは中央集中型と後方集中型の2つとした。降雨強度は独立行政法人土木研究所が公開するフェア式による計算プログラムと近隣のアメダス観測地点「東広島」の観測データ(1976~2000年)を用いて求めた。計算に用いた降雨強度は後

Table 4-4 洪水流出モデル検証に用いた降雨と基準点水位等、および検証結果

Data for the flood outflow model verification and model					
項目	単位	2005.7.2	2005.9.7	2009.8.1	2010.7.14
ピーク雨量	(mm/h)	36.0	21.0	50.0	34.0
総雨量	(mm)	289.0	202.5	106.5	299.5
継続時間	(h)	126	86	5	106
ピーク水位	(m)	2.17	2.35	2.24	2.94
比流量	(m ³ /(s・km ²))	2.18	2.49	1.94	4.15
設定貯水率	(%)	62	90	96	87
相対基準E ₁	(%)	7.1	11.0	7.3	9.0
χ ² -基準E ₂	(m)	0.010	0.026	0.026	0.027

で示す全ため池が潰廃された場合に基準点のピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する22年確率（中央集中型）と11年確率（後方集中型）とし、単位時間は1時間とした。作成したハイエトグラフは Fig.4-2 に示した。

初期値として設定したため池貯水率は常時満水位（非洪水時の最高水位）に対する空き水位比0～100%（10%間隔）に対応するものとし、全てのため池に対して同一の貯水率を与えた。

ピーク流量の緩和率は式（4-9）より求めた。

$$R = ((Q_0 - Q_1) / Q_0) \times 100 \quad (4-9)$$

R：緩和率（%）

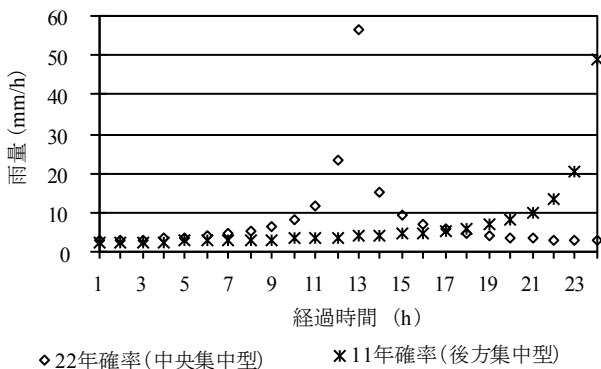
Q₀：ため池潰廃時のピーク流量（m/s³）

Q₁：各降雨前貯水率に対応したピーク流量（m/s³）

4.4.4 河川水位の緩和度合

河川水位の緩和度合は、降雨前のため池群貯水位に対応した基準点のピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する降雨の確率年を洪水流出モデルによる逆解析により求めた。

降雨パターンは前節と同じく中央集中型と後方集中型の24時間連続降雨とし、降雨強度も前節と同様に求めた。確率年は堤防護岸高さに最も近い値となるピーク水位が得られるまで1年単位で確率年（降雨強度）を変え、繰



総雨量：196.3mm(22年確率), 170.1mm(11年確率)

Fig.4-2 想定したハイエトグラフ
Hypothesized hyetographs

り返し計算を行って求めた。

評価は Table 4-5 中に示した観測日全てについて観測された空き水位を用いて行った。また、全ため池の空き水位が常時満水位に対する空き水位比で一律に0～100%（10%間隔）の場合、ならびに全ため池潰廃の場合についても評価した。

4.5 結果

4.5.1 ため池の貯水状況

各年の梅雨入り前（2006年は梅雨入り後）と台風シーズンの9月初旬（2008年は8月下旬）に観測した空き水位から求めたため池群の貯水率（基準点上流域および新堰橋上流域）を Table 4-5 に示す。また、近隣のアメダス観測地点「東広島」における各年の降水量（3～5月および6～8月計）、ならびに1981～2010年の観測値を3等分に階級区分して求めた多雨と平年、小雨の区分を Table 4-5 中に示す。

Table 4-5 より、梅雨入り前後におけるため池群の総貯水率は3～5月の降水量が多雨に区分される2006年と2010年においては95%前後、平年に区分される2008年においては90%程度である。一方、アメダス東広島地点での観測開始（1976年1月1日）以降において3～5月の降水量が最も少ない2009年と2番目に少ない2005年においても総貯水率は62～63%である。対象流域の梅雨入り前後のため池群は、降雨状況に関わらず貯水量には余裕があることがわかる。なお、小雨に区分される2007年は5月の降水量が平年値（148.0mm）に近い144mmであったために高い総貯水率が観測されたものと考えられる。

台風シーズンにおけるため池群の総貯水率は6～8月の降水量が多雨に区分される2009年において87%である。一方、アメダスの観測開始以降において6～8月の降水量が2番目に少ない2008年は60%、少雨に区分される2007年は80%程度である。対象流域のため池群は、かんがい期間の終期においても、相当量の貯水を残していることがわかる。なお、小雨に区分される2005年は7～8月の降水量が平年値（369.8mm）より高い468mmであり、かつ平成17年台風第14号に伴う降雨中の観測であったために高い総貯水率が、逆に平年に区分される2010年は8月の降水量が20.5mmとアメダスの観測開始以降2番目に少なかったことから低い総貯水率が観測されたものと考えられる。

Table 4-5 中に示した各ため池の貯水率に関する中央値と最大値、最小値より、小雨に区分される年でも満水（貯水率100%）のため池が、多雨の年でも空（同0%）のため池が存在するものの、中央値はいずれの観測日においても総貯水率に近いことがわかる。なお、多雨の年に空のため池が存在するのは、かんがい期間中においても樋管を開放し、落水を行っているため池が存在するためである。

Table 4-5 ため池群の観測貯水率
Observed reserve ratio of the studied ponds

梅雨入り前後										
観測年	観測日	総貯水率 ^{※1}		個別ため池の貯水率(基準点上流)			降水量(mm) (3~5月計)	降雨状況	求めた確率年	
		新堰橋上流	基準点上流	中央値	最大値	最小値			中央集中型	後方集中型
2005年	6月8~10日 ^{※2}	63%	—	65%	100%	0%	216	小雨	29年	15年
2006年	6月17~20日	96%	96%	100%	100%	0%	561	多雨	24年	13年
2007年	5月30日~6月2日	92%	92%	100%	100%	0%	282	小雨	25年	13年
2008年	5月26~28日	88%	90%	100%	100%	13%	429	平年	25年	13年
2009年	6月12~13日	62%	62%	64%	100%	0%	188	小雨	29年	15年
2010年	6月1~2日	94%	94%	100%	100%	44%	587	多雨	25年	13年

台風シーズン										
観測年	観測日	総貯水率 ^{※1}		個別ため池の貯水率(基準点上流)			降水量(mm) (6~8月計)	降雨状況	求めた確率年	
		新堰橋上流	基準点上流	中央値	最大値	最小値			中央集中型	後方集中型
2005年	9月6日 ^{※3}	98%	97%	100%	100%	0%	509	小雨	24年	13年
2007年	9月4~8日	79%	80%	89%	100%	0%	398	小雨	27年	14年
2008年	8月20~23日	60%	60%	61%	100%	0%	244	小雨	29年	14年
2009年	9月1日	87%	87%	92%	100%	0%	788	多雨	26年	13年
2010年	9月2~4日	69%	67%	69%	100%	0%	578	平年	29年	14年

※1: 新堰橋上流のため池個数は40個(基準点上流は56個).
 ※2: 2個のため池は欠測。「個別ため池の貯水率」は新堰橋上流における値.
 ※3: 新堰橋上流で3個, 基準点上流で7個(新堰橋上流分を含む)のため池は欠測.

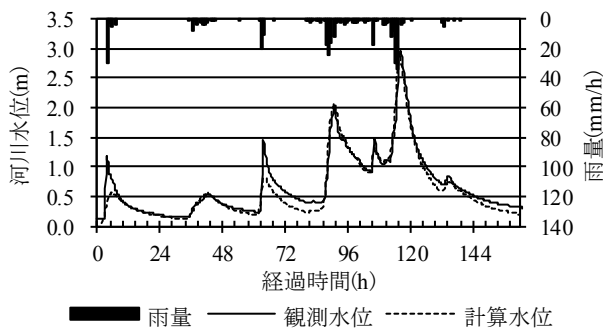


Fig.4-3 観測値と計算値の比較 (河川水位: 2010.7.14 降雨)
Comparison between observed and calculated river water levels on 14th July 2010

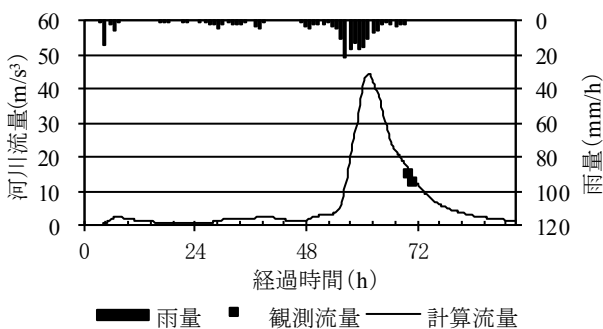


Fig.4-4 観測値と計算値の比較 (河川流量: 2005.9.7 降雨)
Comparison between observed and calculated river discharge on 7th September 2005

4.5.2 洪水流出モデルの再現性

河川水位の相対基準と χ^2 基準による評価結果を **Table 4-4** 中に示す。また、堤防護岸高さとはほぼ等しい、最大のピーク水位を観測した2010年7月14日の降雨における観測値と計算値を比較した結果を **Fig.4-3** に示す。これらの結果より、洪水流出モデルは基準点における河川水位

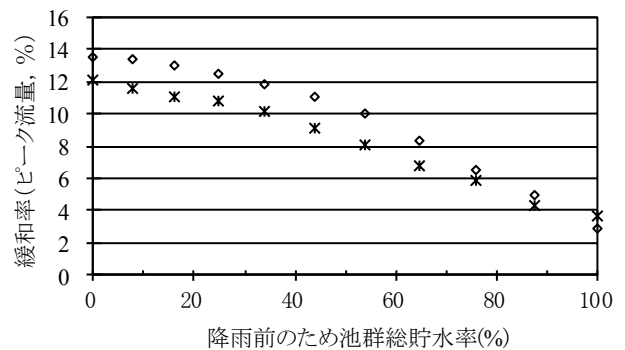


Fig.4-5 ピーク流量の緩和率 (基準点)
Mitigation ratio of peak flow at the reference point

を高い精度で再現していると判断できる。河川流量について観測値と計算値を対比した結果を **Fig.4-4** に示す。観測値は2時点かつ小流量のものに限られるものの、観測時点においては良好な精度を再現していることがわかる。

4.5.3 降雨前貯水率とピーク流量の関係

降雨前のため池群総貯水率とピーク流量の緩和率の関係を **Fig.4-5** に示す。

Fig.4-5 より、前述の大八木ら(2006)が福岡県下の御笠川流域ため池群で得た結果と同様に、対象流域のため池群においても検討した後方集中型と中央集中型の降雨とも降雨前のため池群総貯水率(初期値)の減少、すなわち空き容量(以下、既往の研究における定義にかかわらず、常時満水位以下の貯水可能容量とする)の増大に伴って緩和率は増大することがわかる。また、満水時、すなわち空き容量がない場合の緩和率はそれぞれ2.8%と3.6%と小さく、ため池の貯留効果、すなわち満水時のため池において貯水池に流入した洪水が貯水位を高めつつ

Table 4-6 ピーク水位が護岸天端高さに達する確率年
The year of return period that peak water level reaches top of dike

降雨前の貯水率 (降雨前の水位率)	0%	8%	16%	25%	34%	44%	54%	65%	76%	88%	100%	潰廃
	(0%)	(10%)	(20%)	(30%)	(40%)	(50%)	(60%)	(70%)	(80%)	(90%)	(100%)	
確率年(中央集中型)	37	36	35	34	33	32	31	29	27	26	24	22
確率年(後方集中型)	17	17	17	17	16	16	15	15	14	13	13	11

洪水吐を流下する際に生じる一時貯留が基準点のピーク流量の緩和に寄与する効果は小さいことがわかる。

4.5.4 降雨前貯水率とピーク水位の関係

求めたピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する確率年を **Table 4-5** 中と **Table 4-6** に示す。**Table 4-6** より、中央集中型降雨においてため池全てが潰廃した場合にピーク水位が堤防護岸の天端高さに達する降雨強度は22年確率であるのに対し、降雨前の貯水池が全て空（総貯水率0%）の場合は37年確率である。従って、この22年確率と37年確率の間が対象流域のため池群が中央集中型24時間連続降雨において基準点の溢水防止に発揮し得る効果の最大幅である。これに対して後方集中型降雨においては、全潰廃の場合は11年確率、総貯水率0%の場合は17年確率となり、中央集中型降雨と比べて効果は小さいことがわかる。

4.6 考察

4.6.1 対象流域のため池群が発揮する洪水緩和効果

基準点の17.9km下流には、洪水調節容量を持つ椋梨ダム（広島県管理）が存在する。椋梨ダムの洪水期間は椋梨ダム操作規則で6月16日から9月30日と定められている。対象流域のため池群に関しても、この期間において洪水緩和効果の発揮が期待される。**Table 4-5** 中に示したため池群の貯水率は洪水期間の始期前と終期に対応しており、洪水期間におけるため池群の貯水状況は **Table 4-5** 中に示した貯水率と降雨状況から推定できると考えられる。また、対象流域のため池においては、6月上旬はかんがい期前半の用水需要のピークである水稲作の代かき～活着期を過ぎて中干し期以降のかんがい期後半の用水需要ピークに備えて梅雨による貯水の回復を待つ時期であり、9月上旬はかんがいによる取水をほぼ終えた時期である。従って、この2つの観測時期は用水利用によってため池に最も大きな空き容量が形成され得る時期であると考えられる。

Table 4-5 中に示したため池群の貯水率には、前述のようにアメダス東広島における降水量がアメダスの観測期間を通じた最小年（2009年3～5月：平年値の48%）と2番目に少ない年（2005年3～5月：同55%、2008年6～8年：同39%）のものが含まれる。これらの年における総貯水率は3時期とも60～63%であり、観測期間中の小雨の年を超える記録的な渇水を除外して考えれば、用水利用を通じて形成される洪水期間中のため池群の空き容量（総量）の上限は総貯水量の40%程度と考えられる。

一方、多雨や平年並みの年における総貯水率は観測日の前1ヶ月が小雨だった2010年9月を除いて87～96%と高いことから、多雨や平年並みの年においては洪水期間を通じてため池群は満水に近い状態にあると考えられる。これは、対象流域の水田は河川や沢などのため池以外の水源を主たる水源とし、ため池は小雨時など主たる水源からの用水が不足する際の補助水源として利用する機会が多いことに起因する。他地域でも、主に補助水源として利用されているため池型ため池群においては同様の貯水状況にあるものと考えられる。

Table 4-5 中に示したように、中央集中型降雨であれば観測された総貯水率が最も小さい2008年8月（基準点上流の総貯水率60%、以下同じ）においては29年確率、2009年6月（62%）においても29年確率の降雨で基準点のピーク水位は護岸高さに達する。従って、前述の全ため池潰廃時の22年確率との対比から、対象流域のため池群は基準点の溢水・氾濫防止に対して洪水緩和効果を発揮し、下流域の防災に寄与しているといえる。しかし、後方集中型24時間連続降雨の場合には2008年8月において14年確率、2009年6月において15年確率であり、全ため池潰廃時の11年確率と比較して基準点におけるため池群の洪水緩和効果は小さい。また、中央集中型降雨であっても3～5月の降水量が平年に区分される2008年5月（90%）では25年確率、6～8月が多雨と区分される2009年9月（87%）では26年確率であり、同様に洪水緩和効果は小さい。

従って、対象流域においては用水利用によって生じる洪水期間中のため池群の空き容量は渇水年を除いて小さく、基準点に対する大きな洪水緩和効果は期待できないといえる。また、後方集中型降雨に対しては、小雨の年においても基準点に対する大きな洪水緩和効果は期待できないといえる。

4.6.2 対象流域における洪水緩和効果の強化

谷池によるため池群が河川上の基準点に対して発揮する洪水緩和効果は基準点上流域の面積に対する各ため池の流域面積の総和の比に支配され、実際に発揮される洪水緩和効果の大きさはため池群の空き容量と満水時の貯留効果の割合により規定されるものと考えられる。

「土地改良事業設計指針「ため池整備」」（農林水産省農村振興局整備部設計課、2006）では、貯留効果が見込めるため池の目安として、流域面積/貯水（満水）面積が30以下であることを挙げている。前述の加藤・佐藤（2002）は松沢ため池（流域面積/満水面積=16）においてシミュ

レーションを行った結果から、満水時においても降雨パターンに関わらず洪水吐流出量のピークは37～43%緩和されることを明らかにしている。しかし、対象流域においては、Table 4-7に示すように流域面積/満水面積の比が30以下であるため池数は51%に留まること、貯留効果が見込めるため池においても満水時の緩和率は空き容量がある場合の緩和率(100%)と比べれば小さいことから、満水状態のため池群による基準点における洪水緩和効果はFig.4-5で示されたように小さいと考えられる。

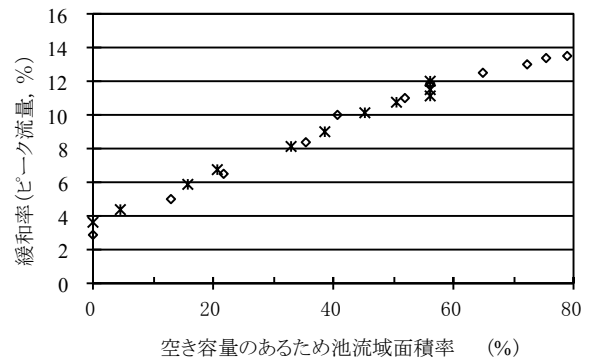
Fig.4-6はFig.4-5で示した計算データを用い、基準点でのピーク流量出現時刻の1時間前時点における空き容量のあるため池の流域面積率(空き容量のあるため池総流域面積/ため池総流域面積)と基準点のピーク流量緩和率との関係を求めたものである。対象流域においては、Fig.4-6中に示すように中央集中型22年確率と後方集中型11年確率の降雨とも、空き容量のあるため池流域面積率と緩和率の間で一次式の関係が成り立つ。このことは、基準点におけるピーク流量を形成する降雨流出を貯留する空き容量がピーク流量の緩和に直接寄与することを示している。また、図中のデータの分布からも読み取れるように、後方集中型11年確率降雨の場合は中央集中型22年降雨の場合と比べ、降雨前の空き容量が同一の場合においてピーク流量出現前に先行降雨によって満水となるため池が当然ながら多い。Table 4-7で示した両降雨に対

Table 4-7 対象流域内ため池の流域面積/貯水面積の比
Statistics of ratio of catchment area to surface area of irrigation ponds in the subject basin

流域面積/ 貯水面積の比	個数	割合
0.0～15.0	13	23%
15.1～30.0	16	28%
30.1～45.0	10	18%
45.1～60.0	6	11%
60.1～	11	20%

して発揮し得るため池群の洪水緩和効果の違いは、このピーク流量出現前におけるため池群の貯水状況の相違によって生じていることがわかる。

従って、対象流域におけるため池群が基準点に対して発揮する洪水緩和効果を強化するためには、利水容量の転用や堤体の嵩上げ、貯水池の浚渫などにより、洪水調節容量を設定したため池の流域面積率が大きくなるように洪水調節容量をため池へ付与することが重要である。同時に、洪水調節容量を有効に機能させ、かつ降雨パターンにかかわらず安定的に洪水緩和効果を発揮させるために、降雨前の事前放流による洪水調節容量の維持とともに、ピーク水位の形成に直接関係しない時間帯における貯水池への流入水を極力放流し、ピーク水位の形成に直接繋がる流入水を貯留するための空き容量の維持が必要である。このための方策としては、堤体上の洪水期間満



◇22年確率(中央集中型) ×11年確率(後方集中型)

回帰式:

$$y = 0.136x + 3.567 \text{ (22年確率(中央集中型)), } R^2=0.978$$

$$y = 0.139x + 3.770 \text{ (11年確率(後方集中型)), } R^2=0.994$$

x: 空き容量のあるため池流域面積率

y: 緩和率(ピーク流量)

Fig.4-6 空き容量のあるため池流域面積率とピーク流量の緩和率(基準点)

Flood mitigation rate of the peak flow quantity and the basin area rate with the space capacity of the reservoir

水位の高さに放流口(オリフィス)を設置すること等が有効であると考えられる。

なお、Fig.4-6で示した一次式の一般性については、今後他流域で検討する必要がある。

5. ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出

5.1 背景と目的

ため池は農業用水の貯水を目的に築造されており、一般に洪水調整容量は持たない。しかし、貯水管理による被災リスク低減や洪水緩和効果の発揮に際しては、降雨前に貯水位を引き下げて空き容量を持たせることが重要である。ため池に洪水調節容量を持たせる方法としては、堤体の嵩上げや貯水池の浚渫、もしくは既存の利水容量の転用が考えられる。堤体の嵩上げや貯水池の浚渫による洪水調節容量の創出は、利水容量を減ずることなく洪水調節容量を確保することが可能である。しかし、ため池の改修が前提となることから、ため池改修に関わる事業の一環として行うこととなる。これに対し、利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、ため池の利水容量に余裕のあることならびに水利権者の合意が必要なものの、現状のため池を前提に実施可能な方法である。

2007年度の水田面積に占める水稻作付面積の割合は全国で66%に止まることや、都市化や混住化、耕作放棄地の発生に伴って受益水田の潰廃が進行しているため池も少なくない。これらは、ため池管理の脆弱化を招く要因であると共に、水田における必要水量を減少させ、利水容量の転用の余地を生み出す要因でもある。

そこで、広島県東広島市において、ため池貯水位の観測を行い、観測結果に基づいて利水容量の一部転用による洪水調節容量創出の可能性を検討する。

5.2 ため池貯水位の観測と貯水率の算出

5.2.1 観測ため池の概況

ため池貯水位の観測は、広島県東広島市豊栄町乃美の六道池において行った。乃美地区は、沼田川水系の椋梨川（二級河川）の流域に位置し、中国山地を構成する残丘群と河川沿いに広がる比較的平坦な土地からなる。水田は河川沿いの平坦地を主に、ため池は残丘群と水田の境界となる山裾を主に存在する。同地区のため池は、いずれも谷地形を堰き止めて作られた中小規模のため池であり、広島県下の中山間地域における典型的なため池である。六道池を含む乃美地区の地形図を Fig.5-1 に示す。

六道池は乃美地区における最大規模のため池であり、ため池台帳に記載されている諸元を Table 5-1 に示す。水稻作付けが行われている水田は、現地調査の結果、全受益水田の約 33%（2006 年）ないし約 35%（2004, 2005 年）であった。ため池からの受益水田への配水は開水路を通じて行われ、取水は管理者が一元的に取水施設を操作するのではなく、受益農家が必要に応じて各自操作することにより行われていた。ため池からの取水期間は、2004 年～2006 年を通じ、4 月 20 日前後から 8 月 12 日までであった。

5.2.2 貯水位の観測と貯水率の算出

貯水位の観測は、貯水池内に圧力式水位計（ウイジン UIZ-WL500）を設置して行った。観測は 2004 年 4 月 22 日から 2007 年 3 月 31 日にかけて行い、観測値は 15 分間隔でデータロガーに記録した。

貯水率の算出にあたっては、貯水池の断面形状を把握し、水位から貯水量を計算する必要がある。六道池を含む東広島市豊栄町内の椋梨川（支流含む。以下同じ）流域のため池は、いずれも山裾の谷地形を堰き止めて作られたため池であり、ため池貯水池の断面形状は相似的な関係にあると考えられる。そこで、Fig.5-1 中に示した乃美地区の宇手飛 1 号池、宇手飛 2 号池における深浅測量（今泉ら、2006）に基づき、Fig.5-2 に示した断面形状を想定した。

この想定した断面形状が妥当なものであることを検証するために、1/25,000 地形図に記載されている東広島市豊栄町内の椋梨川流域のため池 63 箇所を対象に、地形図に記載されている貯水池を満水時の面積とし、ため池台帳記載の堤高や現地測量した洪水吐水深を用いて Fig.5-2 の断面形状によって算出した貯水量とため池台帳に記載されている貯水量を比較した。結果は Fig.5-3 に示す。両者は相関関係（相関係数 0.98）にあること、またほぼ 1:1 の関係（ $y=1.045x-435.7$ ）にあることがわかる。従って、Fig.5-2 に示した断面形状は妥当なもの判断できる。

貯水率は、15 分間隔で記録した水位から日平均水位を



電子国土(国土交通省国土地理院)より作成

Fig.5-1 乃美地区の概要
Outline of Nomi area

Table 5-1 六道池の諸元
Specifics of Rokudo pond

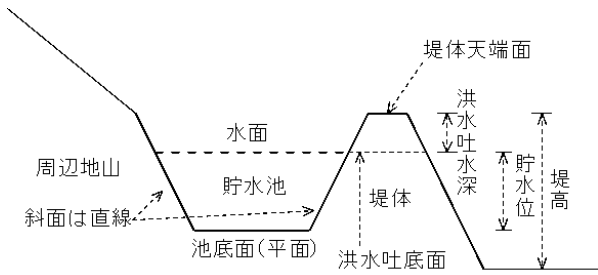
項目	値
貯水量(千m ³)	34
受益面積(ha)	10
受益戸数(戸)	13
流域面積(km ²)	0.106
堤高(m)	6.8
堤頂長(m)	88

求め、1/25,000 地形図から求めた満水時の貯水面面積と Fig.5-2 から、日平均貯水率として求めた。観測期間中の貯水率は Fig.5-4 に示す。

5.2.3 観測期間の降水量

降水量は、最寄りのアメダス観測地点である東広島地点（広島県東広島市八本松、六道池から南西方向へ約 19km）のアメダスデータを用いた。なお、六道池堤体上に設置した雨量計で観測した日降水量と東広島地点のアメダスデータの日降水量の間には、2005 年 3 月 13 日～2005 年 12 月 5 日において、相関関係（相関係数 0.90）とほぼ 1:1 の関係（ $y=0.998x+0.616$ ）が成り立つ。アメダスデータの日降水量は Fig.5-4 中に記した。

また、各年の降水量の多寡を表すために、土地改良事業において計画基準降雨を決定する際に多く用いられている岩井法（岩井・石黒、1970）を用い、期別降水量の超過確率/非超過確率を求めた。超過確率/非超過確率の計算は、乃美地区におけるしろかきや田植、活着期に対応する 4～5 月、分けつ期や出穂期、登熟期に対応する 6～8 月、及びため池の貯水期である前年度の 9 月～3 月の期間別に求めた降水量に対して行った。計算は、確率水文量の計算プログラム Ver.1.2（フカダソフト）を用いて行った。期間別の降水量を含め、結果は Table 5-2 に示す。



※1 (満水面面積) : (池底面積) = 10 : 6
 ※2 (池底面～洪水吐底面までの高さ)
 = (堤高 - 洪水吐水深) × 0.75

Fig.5-2 想定したため池貯水池の構造
 Hypothesize shape of reservoir basin

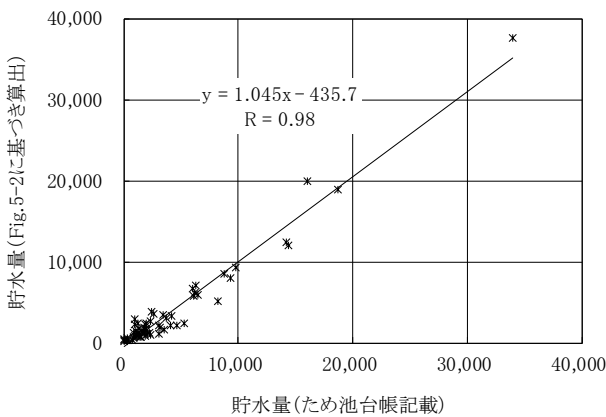


Fig.5-3 想定したため池貯水池構造の検証
 Inspection of hypothesized shape of reservoir basin

5.2.4 貯水率と降雨の関係

Fig.5-4 と Table 5-2 より, 2004 年度においては貯水期である前年度9月～3月は小雨であったものの, しろかき～活着期である4～5月は多雨であり, 年度を通じてほぼ80%以上の貯水率が確保されている。6～8月においても平年程度の降雨があり, 取水に伴って減少した貯水は降雨に伴って満水近くまで回復している。

2005 年度においては, 4～5月にかけては平均の半分以下の降水量の小雨であり, この時に貯水率は50%近くまで低下している。但し, その後の降雨により, 貯水率は回復している。

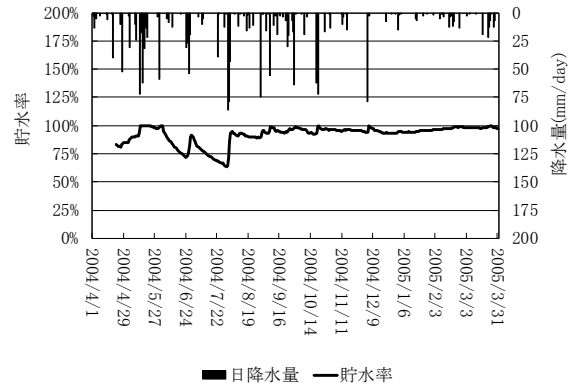
2006 年度は4～8月を通じて多雨であり, 貯水率は常時80%台～満水を維持している。但し, 9月以降の貯水期は小雨気味であり, 貯水率は低下傾向にある。

3ヶ年を通じた取水期間(4月22日～8月12日とする。以下同じ)の総日数に対し, 満水の日数は9%, 90%以上は42%, 80%以上は65%, 及び70%以上は86%である。逆に, 60%を下回る日数は4%である。

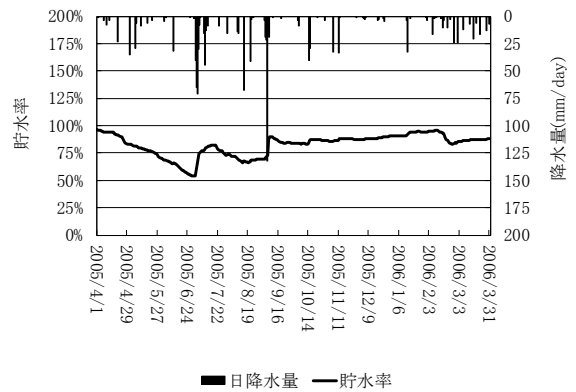
5.3 利水容量の転用による洪水調節容量の創出

5.3.1 貯水率の減少度合の算定

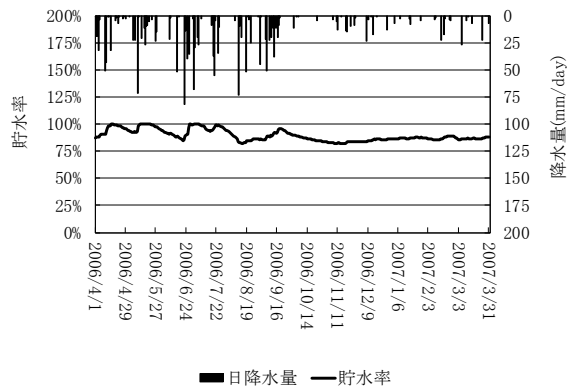
利水容量の一部転用による洪水調節容量の創出の検討



(a)2004 年度(2004.4.22～2005.3.31)



(b)2005 年度(2005.4.1～2006.3.31)



(a)2006 年度(2006.4.1～2007.3.31)

Fig.5-4 貯水率と降水量 (六道池)
 Reserve ratio and precipitation

Table 5-2 期別の降水量と確率 (東広島)
 Precipitation and probability every period

年度	4～5月		6～8月		9月～3月	
	降水量 (mm)	確率	降水量 (mm)	確率	降水量 (mm)	確率
2003	—	—	—	—	337	1/29
2004	487	(1/33)	580	1/2	769	(1/7)
2005	129	1/57	509	1/3	603	(1/2)
2006	454	(1/20)	794	(1/6)	477	1/4
平均	286	—	583	—	595	—

※1 平均, 確率とも1976年4月～2008年3月のデータより算出
 ※2 確率の括弧表記は超過確率, それ以外は非超過確率

にあたっては、渇水年においても取水期間中に利水容量と洪水調節容量の両立が可能であることを明らかにする必要がある。この検討を行うために、取水期間中のため池貯水量変化を定式化する。

ため池貯水量の変化は、灌漑に伴う取水や降雨に伴う地表水・地下水の流入、地盤中への貯水の浸透など、多数の要素が複合する現象である。類似の性質を持つ農業用利水ダムにおいては、貯水運用ルール策定手法として、貯水量を貯水池への流入量や取水量、流出量等の合成量として直接解析の対象とし、貯水量の時系列変化を表す基準貯水ラインを作成して利水運用の検討を行う渇水要貯水量曲線法が知られている（農林水産省農村振興局整備部水利整備課，2004，千賀，2007）。そこで、貯水量変化の定式化にあたっては、渇水要貯水量曲線法に倣い、ため池貯水量を直接解析の対象とする。

貯水量変化の定式化においては、まず貯水率の減少度を求めた。貯水率の減少度合は、取水期間中において、10日間以上にわたって一定の割合で貯水が減少している期間を選び、一次回帰式の傾きとして求めた。一様減少期間の始期と終期、日数、減少度合である一次回帰式の傾き、及び一次回帰式の適合度合として相関係数を **Table 5-3** に示す。加えて、一次回帰式の傾きを支配する可能性

がある先行降雨についても、始期前日より前30日間の降水量を求め、**Table 5-3** 中に記した。また、求めた先行降雨と一次回帰式の傾きの関係を **Fig.5-5** に示した。

Fig.5-5 より、一次回帰式の傾きと先行降雨の間には、逆相関の傾向を読み取ることができる。貯水量の変動が水文的な要素に支配される場合には、順相関の関係（先行降雨が多いほど、貯水率の減少度合は小さい）になると考えられる。また、受益農家の水利用が降水量に支配される場合（降水量の多い時は潤沢に用水を使用し、少ない時は節制的に使用する）には、逆相関の関係になると考えられる。**Fig.5-5** 中において逆相関の傾向から外れる期間2005年7月21日～8月9日は、当該年前半が渇水年であることもあり、六道池においては、受益農家の用水の使い方（節制的な水利用か否か）が貯水量の減少度合に対する支配的な要素と考えられる。

5.3.2 要貯水率の算定

六道池において、利水容量の一部転用により洪水調節容量の創出を行う際に、洪水調節容量の設定期間始期に利水容量として確保する必要がある貯水率（以下、要貯水率）を求める。

要貯水率の算定に用いた諸条件は **Table 5-4** に示した。洪水調節容量は梅雨期以降に設定することとし、設定期間始期を6月1日とした。また、利水容量の設定期間終期は、取水期間の終期である8月12日とした。この始期と終期の間を検討期間とした。貯水率の減少度合は、**Fig.5-5** に示した回帰直線から乖離する期間2004年6月5日～6月23日と期間2005年7月21日～8月9日を除いた最大値と最小値を、それぞれ通常時と節水時の値とした。また、ため池の伝統的な維持管理活動として非灌漑期の水抜き（落水）があることから、取水期間の終期における貯水率は0%とした。検討期間中の降雨は、最も厳しい条件を想定し、0mmとした。

要貯水率は、検討期間中においては貯水率減少度合の値に対応する一定量の取水が毎日行われるものとして、取水期間の終期における貯水率（0%）を起点として要貯水率をシミュレーションした。シミュレーション結果は **Fig.5-6** に示す。通常時の貯水率減少度合による要貯水率は58%、節水時は34%となる。

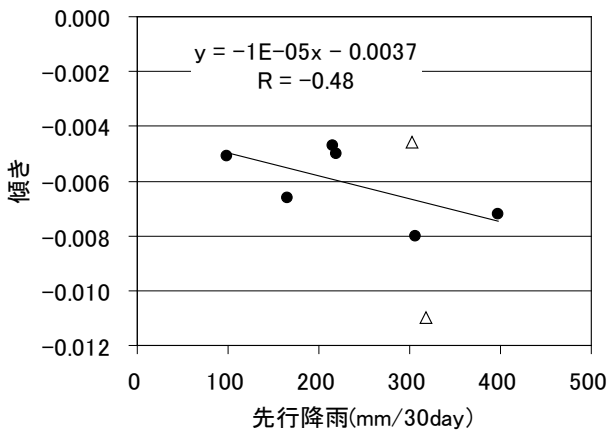
5.3.3 降雨による貯水率の回復

取水期間中の降雨による貯水量の回復を定式化するために、取水期間において一連降雨ごとの降水量と各一連降雨による貯水率増加率を求めた。一連降雨は日単位で連続する降雨かつ総降水量20mm以上のものを対象とし、貯水率増加率は一連降雨の開始日前日から終了日翌日までの総貯水量に対する貯水量の増加率とした。両者の関係は **Fig.5-7** に示す。

Fig.5-7 から、一連降雨の降水量と貯水率増加率の間には相関関係（相関係数:0.89）が成り立つこと、一次回帰

Table 5-3 貯水率の減少度合（傾き）と先行降雨
The decrease degree of the reserve ratio and the antecedent precipitation

No.	始期	終期	日数	傾き	相関係数	先行降雨 (mm/30day)
1.	2004/6/5	2004/6/23	19	-0.0110	0.997	318
2.	2004/7/6	2004/7/30	25	-0.0066	0.995	166
3.	2005/4/16	2005/6/29	75	-0.0051	0.994	99
4.	2005/7/21	2005/8/9	20	-0.0046	0.951	303
5.	2006/4/24	2006/5/6	13	-0.0050	0.999	219
6.	2006/5/24	2006/6/21	29	-0.0047	0.988	216
7.	2006/7/7	2006/7/16	10	-0.0072	0.976	397
8.	2006/7/27	2006/8/9	14	-0.0080	0.999	307



△：逆相関の傾向から外れるもの

Fig.5-5 先行降雨と傾きの関係

Relations of the percentage of storage and the antecedent precipitation

式 ($y = 0.134x - 5.14$) より、降雨が貯水量を回復させるか否かの閾値は 38mm であることがわかる。

降雨によって期待される貯水率の回復量は、水田農業用水の水源計画に関わる計画基準年に準じ、1/10 確率の渇水時の降雨に対応するものとした (農林水産省農村振興局, 2014)。回復量の計算にあたっては、検討期間において貯水量を回復させる降水量閾値 (38mm) を超える一連降雨の総降水量合計値について、岩井法により 1/10 確率の渇水時に相当する総降水量合計値を求めた (Table 5-2 と同一の降水量データを使用して計算)。この総降水量合計値に対する貯水率の回復量は、Fig.5-7 に示した一次回帰式にこの値を代入して求めた。また、Fig.5-6 で得られた要貯水率から、降雨時期は考慮せず、単純にこの回復量を差し引いたものを降雨を考慮した場合の要貯水率とした。これらの値は Table 5-5 に示す。

Fig.5-6 に示した節水時の貯水率減少度合に基づく要貯水率 (34%) に、1/10 確率の渇水時の降雨による貯水率回復量を見込んだ場合の要貯水率 (17%) は、現行の水稲作付面積に対応する六道池受益水田の「土地改良事業計画

Table 5-4 要貯水率の算定に用いた諸条件

List of parameters used for the calculation of the necessary reserve ratio

項目	値
検討期間の始期 (洪水調節容量の設定始期)	6月1日
検討期間の終期 (取水期間の終期)	8月12日
検討期間の日数	73日間
貯水率減少度合(通常時)	-0.0080
〃 (節水時)	-0.0047
検討期間終期における貯水率(%)	0
検討期間中の降水量(mm)	0

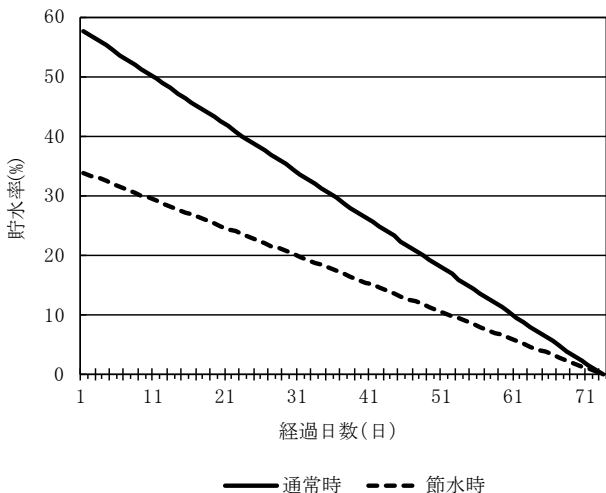
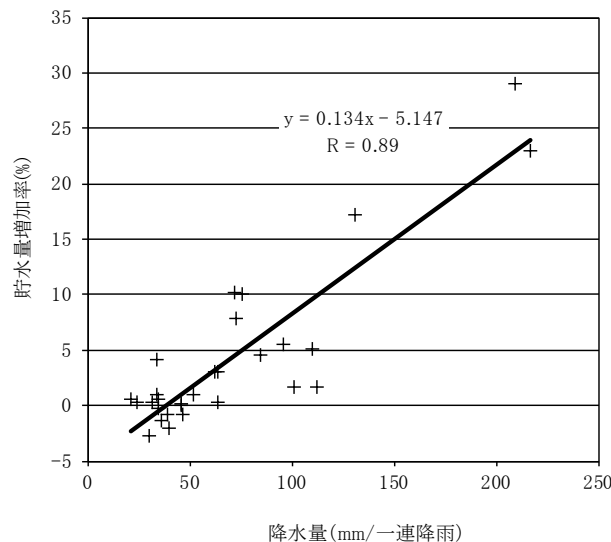


Fig. 5-6 貯水率のシミュレーション結果
Simulation result of percentage of reserve ratio



X:横軸 Y:縦軸

Fig. 5-7 降雨と貯水量増加率の関係
Relations of the precipitation and growth rate of water storage

基準 計画 農業用水 (水田) (農林水産省農村振興局, 2014) の水源計画で定める計画用水量に相当するものと考えられる。

5.4 考察

第4章での広域洪水流出モデルを用いた検討により、六道池の下流の椋梨川楊杓橋流点の上流域のため池群は一定の洪水緩和効果を発揮することが示されている。第4章での検討結果では、ため池群の降雨前貯水率を一律に常時満水位の70% (六道池の場合は貯水率59%) とした場合、降雨継続時間24時間の22年確率の中央集中型降雨に対し、全てのため池が潰壊した場合との比較でピーク流量を8.3%軽減する。

Fig.5-4 より、六道池において検討期間中にこの貯水率 (59%) を下回ったのは、小雨と取水期間が重なった2005年6月20日~7月2日 (観測期間を通じた検討期間総日数の6%) に留まり、逆に少なくない期間 (同34%) において、貯水率は満水を含め、90%以上となっている。従って、六道池においては、受益水田内の水稲作付面積が減少したことに伴い、利水容量には余裕が生じていること、取水による水位低下のみでは、洪水緩和機能の発揮に当たって必要な洪水調節容量は多くの期間を通じて生じていないことがわかる。

Fig.5-6 と Table 5-5 に示した洪水調節容量の設定期間始期の要貯水率は、一番条件の厳しい条件である無降雨かつ通常時の減少度合によるシミュレーションの結果でも58%であり、上限水位を常時満水位の70%とした場合の貯水率 (59%) を下回ることがわかる。また、水源計画で定める計画用水量に相当すると考えられる1/10 確率の渇水年の降雨を考慮した要貯水率 (節水時) は17%であり、用水量が水稲作付面積に比例すると仮定した場合、受益

水田の水稲作付率は前述のように約33%（2006年）であることから、再び受益水田全体に水稲を作付けする場合の用水量は2006年の約3倍となり、この場合の要貯水率（節水時）は51%と概算できる。この値も上述の貯水率（59%）を下回ることから、受益水田において水稲作付面積が拡大した場合においても、利水容量と洪水調節容量の両立は可能であると考えられる。従って、六道池においては、利水容量の一部転用による洪水調節容量の創出は可能であると判断できる。

東広島市豊栄町内の椋梨川流域には、国土地理院1999年発行の1/25,000地形図上において109箇所のため池（現地調査で潰廃を確認した1箇所を除く）が記載されている。国土地理院1967年発行の1/25,000地形図との対比では、ため池の潰廃は確認されなかった。また、東広島市豊栄町においては、Fig.5-8に示すように、1968年から2003年の35年間に、水田面積は16.3%、水稲作付面積は47.1%減少している。ため池の潰廃が殆ど生じていない中で、水稲作付面積については大幅に減少していることから、この一帯のため池においては検討を行った六道池と同様に、利水容量に余裕が生じているため池も少なくないものと判断できる。

従って、東広島市豊栄町内の椋梨川流域のため池群においては、現行の水稲作付面積を前提にすれば、利水容

量の一部転用によってため池群に洪水調節容量を創出し、洪水緩和機能を増強できる可能性は高いと考えられる。

6. 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討

6.1 背景と目的

被災リスク低減においても重要なため池の貯水機能の維持にあたっては、貯水池に堆積した土砂を定期的に取り除くことが必要である。貯水池の集水域である上流域から流入し貯水池に堆積する土砂は上流域の農地・林地等を適切に管理し、土壌流出を抑制することで低減できる。また、多面的機能支払交付金の活動のため池の多面的機能の増進を図る活動を取り組む場合には、ため池上流域の農地はため池と一体のものとして、遊休農地の有効利用など国土保全に寄与する農地の保全管理に関する取り組みを行うことが想定される。

前述のように、水田は土壌面が水平であるという地形的な特徴や湛水栽培を行うという管理上の特徴から、土壌侵食を生じないものと見なされてきた。しかし、耕作放棄などによる水田の遊休化などにより、水田においても無視できない土壌流出が生じている場合が予想される。ため池の上流域において多面的機能の増進を図る取り組みにおいては、水田からの土壌流出に関わる実態に基づき畑地や樹園地、草地、林地等の他の土地利用と一体に水田・水稲の土壌侵食の評価ができれば、ため池上流域の適正な管理に向けた活動計画の検討に寄与するものと考えられる。

そこで、ため池流域からの土砂流出の実態を明らかにする一助として、従来少数の報告に留まる棚田の土砂流出について、鳥根県出雲地方の棚田で実施した土壌流出観測に基づき、観測水田における土壌流出の実態を明らかにする。また、ため池流域の土砂流出量を評価し、適正な管理指針・計画を立てる一助として、棚田の土壌流出観測データを「土地改良事業計画指針 農地開発（改良山成畑工）」（農林水産省構造改善局計画部資源課，1992）の参考資料（以下、「事業計画指針」とする）として記載されている土壌流亡予測式（以下、本文中では「予測式」とする）に当てはめ、観測水田（耕作田）の係数、特に従来求められた事例の少ない作物係数Cと保全係数Pに関わる値を計算するとともに、予測式の枠組みを用いてため池上流域にある水田の保全管理について考察する。

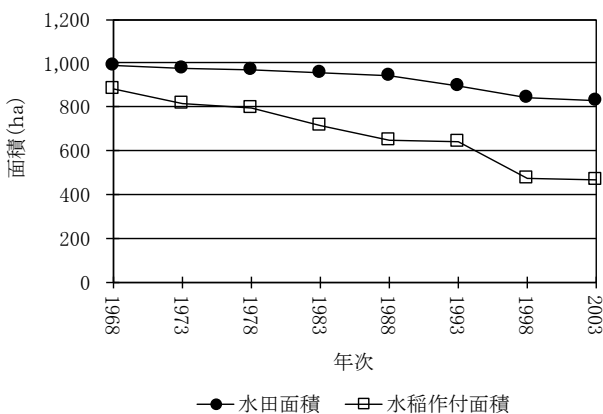
6.2 棚田における土壌流出

6.2.1 流出観測の概要

流出観測は多面的機能維持増進調査（農林水産省：2000～2007年度）の一環として農林水産省中国四国農政局が鳥根県出雲市野尻町と同県雲南市三刀屋町里坊の2地点で実施した（農林水産省農村振興局企画部資源課，2008）。観測地区の位置をFig.6-1に、観測水田とそ

Table 5-5 降雨を考慮した要貯水率
Necessary reserve ratio in consideration of the rain

項目	値
貯水率回復に寄与する総降水量(mm) (検討期間中)	163
降雨による貯水率回復量(%)	17
降雨を考慮した要貯水率(%) (通常時)	41
降雨を考慮した要貯水率(%) (節水時)	17



※耕地面積調査(農林水産省)より作成

Fig.5-8 水田面積と水稲作付面積の変化
Change of paddy field area and wet-rice cultivation area

の周辺の地形図を Fig.6-2 に、観測水田の概要(写真)を Fig.6-3 に、現地測量で把握した観測水田の面積を Table 6-1 に示す。両地点とも、観測水田からの流出水は排水口に接続した塩ビ管を通じて三角堰箱に導かれ、三角堰箱内に設置した水位計(ウイジン UIZ-GY050)と濁度計(アレック電子 Compact-CLW)による毎正時を基準とした測定が20分間隔で行われている。観測により、三角堰箱内の水位と濁度(FTU)の値が得られている。三角堰内は整流板で3区画に仕切った上で塩ビ管からの導水先と水位計・濁度計設置の区画は中央の区画を挟んでその両側に分け、塩ビ管から取り入れた流出水による水位計・濁度計での乱流が生じないように考慮した。また、三角堰箱内に堆積した土壌や落ち葉等については定期的に清掃し、観測に影響が出ないように観測施設の点検・管理を行った。

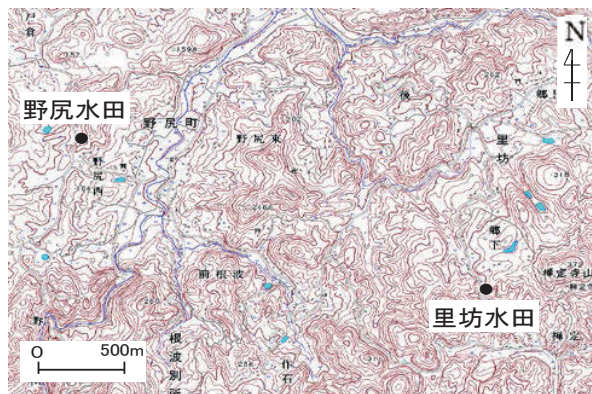
観測期間を Table 6-1 中に示す。観測機器は凍結による破損を防ぐため、冬季に取り外した。よって、この間は欠測となっている。

6.2.2 観測水田の概要

流出観測が行われた観測水田はいずれも傾斜面に立地する棚田であり、両地点は標高約250mの丘を挟んで近接(直線距離で約2.6km)している。観測水田の諸元や観測期間中の状況は流出観測と平行して独自に行った現地調査により把握した。

出雲市野尻町の観測水田(以下、野尻水田)は連担す

る棚田の最上段に位置する耕作田である。観測期間を通じて水稲作(慣行作、裏作なし)が行われていた。この一帯の棚田は小区画ながら県営圃場整備事業により区画等の整備がなされている。山側にため池が隣接しており、かんがい水はこのため池から必要に応じてビニールホースで直接引水していた。但し、一連降雨時には湧水で用水がまかなわれており、水田外からの引水とこれに伴う土壌の流入は認められなかった。直接流出域は田面と畦畔、隣接する法面(地山、ため池堤体)からなる。水田



この地図は国土地理院の数値地図25000(地図画像)「松江」を使用したものである。

Fig. 6-2 観測水田と周辺の地形図
The topographical map around the observation paddy fields



この地図は国土地理院の地理院地図(電子国土 Web)を加工して作成したものである。

Fig. 6-1 観測地区の位置
Location of the observation area



里坊水田:2007年2月20日撮影



野尻水田:2007年2月8日撮影

Fig. 6-3 観測水田の概要(写真)
Outline of the observation paddy fields

Table 6-1 観測水田の面積と観測期間
The area and observation period of the observation paddy fields

	面積(m ²)		観測期間	
	直接流出域	うち、田面	全期間	うち、欠測期間
野尻水田(耕作田)	329	176	2006.6.29～2007.8.9	2006.12.19～2007.3.27
里坊水田(遊休田)	149	103	2006.6.27～2007.8.9	2006.12.19～2007.5.15

※ 欠測期間は1日以上の間を示す。

の作土を含め、流出域の土壌はまさ土を主体とする。田面には地山・ため池側を中心として多量の湧水が生じており、落水時は畦畔に沿って田面に設けられた排水溝を通じて排水がなされていた。水田からの排水は湛水時には堰板を越流して、落水時には田面から直接排水口に流出していた。但し落水時においても、排水口周辺や田面に設けられた排水溝に目視で把握できる土壌侵食は発生していなかった。法面は年間を通じて密な植生（枯死した地上部も含む）で覆われ、土壌面の露出は生じていなかった。法面の草刈りは稲刈り後に行われていた。雲南市三刀屋町里坊の観測水田（以下、里坊水田）は四段の棚田の最下段に位置する遊休田である。一連の水田とも、小区画かつ圃場整備は未実施である。但し、観測水田とその上段水田の法面下部はコンクリートブロック積となっていた。直接流出域は田面と隣接する法面（地山、上段水田）からなる。野尻水田と同様に、水田の作土を含め、流出域の土壌はまさ土を主体とする。田面には多量の湧水が生じており、水田からの排水は洗掘等が生じないように排水口に堰板を設置し、越流水を三角堰箱へ通じる塩ビ管に流出させていた。このため、田面はほぼ観測期間を通じ、全面にわたって湛水していた。法面は年間を通じて密な植生（枯死した地上部も含む）で覆われ、土壌面の露出は生じていなかった。法面、田面とも草刈りや除草は行われていなかった。田面にはミゾソバやガマ等が密生していたが、一部では湛水面が露出していた。

6.2.3 土壌流出量の算出

土壌流出量は炉乾燥質量として流出観測で得られた三角堰箱内の水位と濁度（FTU）から求めた。水位はまず三角堰の越流水深に変換し、中国四国農政局が作成した三角堰の水位－流量換算式を用いて流量を算出した。濁度（FTU）はホルマジン基準の濁度のため、両観測水田の排水口付近から採取した作土を用いて独自に作成した濁度（FTU）－濃度換算式を用い、観測水田における濁水の濃度に変換した。土壌流出量は流量と濃度の積として算出した。

なお、観測値は観測間隔である20分間の平均値と見なし、算出した値も20分間の平均値とした。

6.2.4 降水量

降水量は国土交通省水文水質データベース上で一般に

公開されている最寄りの水文水質観測所である鍋山観測所（里坊水田）と所原観測所（野尻水田）における観測値（60分間雨量／毎正時）を用いた。鍋山観測所は里坊水田の南南東方向約2.2km、所原観測所は野尻水田の北西方向約4.1kmに位置する。

6.2.5 土壌流出量の集計

予測式では土壌流出発生の際値とされている総降雨量13mm以上かつ降雨開始後6時間以上の無降雨時間を生じるまでの降雨を一連降雨としている。そこで、一連降雨毎に降雨開始時刻と降雨終了時刻、継続時間、降雨開始時刻前6時間の間における流出水観測の有無、総降水量、流量、土壌流出量を集計した。結果をTable 6-2、Table 6-3に示す。野尻水田における作付期間は中国四国農政局から提供を受けた資料に基づいて把握し、作付期間中となる一連降雨をTable 6-2中に示した。

また、欠測期間を含むものの、年間の総土壌流出量と一連降雨に伴う土壌流出量、野尻水田については代かきとその前後期間の土壌流出量についても集計した。結果をTable 6-4に示す。

6.2.6 考察

Table 6-4より、両観測水田とも土壌流出が生じていること、土壌流出の7割前後は一連降雨時に生じていること、また野尻水田においては代かき期間（前後期間を含む）に発生する土壌流出の割合は3.2%と小さいことがわかる。またTable 6-2、Table 6-3より、里坊水田では全ての、野尻水田においてもNo.25とNo.29以外の一連降雨において降雨開始前に観測水田からの流出水を観測しており、一連降雨による土壌流出は降雨前から既に田面が湛水した状態で生じていることがわかる。

一連降雨中の観測水田の状態と土壌流出の状況を把握するために、2007年7月12日～14日に現地調査を行った。現地における観察により、両観測水田とも直接流出域に含まれる法面からの流出水や崩落土壌の発生は生じていないこと、流出水は田面への降雨と田面に生じた湧水に由来すること、三角堰箱に通じる塩ビ管以外の直接流出域外への地表流出は認められないこと、及び水田の湛水には全体に土壌由来の濁りが発生していることを把握した。また、2006年12月4日～6日、2007年2月4日～8日、2月18日～21日、7月24日～25日、及び10月11日に行っ

た現地調査においても、いずれも直接流出域に含まれる法面からの流出水や崩落土壌の発生、三角堰箱に通じる塩ビ管以外への地表流出を伺わせる痕跡は両観測水田とも見いだせなかった。なお、野尻水田においては2007年7月12日～14日、2007年7月24日～25日とも、かんがいは行われていなかった。従って、観測水田における土壌の流出は、降雨による田面への湧水発生に伴う土壌中の土壌子の移動や田面内での水移動に伴う土粒子の攪乱、移動などが絡み合う現象が想定される。里坊水田においては、田面に密生するミゾソバやガマ等が形成する土粒子を含む根群域を流出水が通過しているものと考え

られる。

また、一連降雨前にも流出水が観測されていることから、観測水田内で生じた濁水は水田内に貯留、沈降することなく流出するものと考えられる。

6.3 土壌流亡予測式の係数算出

6.3.1 土壌流亡予測式

土壌流亡に関する予測式はUSLE (Universal Soil Loss Equation, 汎用土壌流亡式) (Wischmeier, H. H. and Smith, D. D., 1978) が広く世界的に用いられている。予測式はUSLEの構成に準拠した式であり、これを構成する係数を

Table 6-2 一連降雨時の観測データ (野尻水田)
Observation data at the continuous rainfalls

No.	降雨開始時刻	降雨終了時刻	継続時間 h	降雨前流出	総降水量 mm	El_{60} $tf \cdot m^2 / ha \cdot h$	流量 m^3	土壌流出量 kg	作付期間
1	2006/07/02 00:00	2006/07/02 09:00	10	○	32	4.8			○
2	2006/07/04 18:00	2006/07/05 09:00	16	○	22	2.9	10.1	0.9	○
3	2006/07/16 11:00	2006/07/16 15:00	5	○	19	2.0	2.6	0.7	○
4	2006/07/17 05:00	2006/07/19 10:00	54	○	315	178.4	492.8	54.4	○
5	2006/07/20 22:00	2006/07/21 03:00	6	○	17	1.8	46.3	2.6	○
6	2006/07/23 17:00	2006/07/25 01:00	33	○	62	7.2	204.4	10.0	○
7	2006/08/07 17:00	2006/08/07 17:00	1	○	17	6.7	0.3	0.0	○
8	2006/08/20 15:00	2006/08/20 16:00	2	○	17	3.5	1.0	1.2	○
9	2006/09/05 02:00	2006/09/05 04:00	3	○	16	3.5	1.8	0.5	○
10	2006/09/09 18:00	2006/09/10 12:00	19	○	17	0.7	5.3	0.9	○
11	2006/09/15 22:00	2006/09/16 16:00	19	○	23	1.3	6.4	0.7	○
12	2006/10/01 14:00	2006/10/02 08:00	19	○	13	0.6	3.1	0.1	
13	2006/10/05 04:00	2006/10/05 16:00	13	○	14	0.9	3.0	0.2	
14	2006/10/23 20:00	2006/10/24 21:00	26	○	14	0.6	4.3	0.2	
15	2006/11/06 21:00	2006/11/07 07:00	11	○	25	2.0	1.6	0.7	
16	2006/11/11 01:00	2006/11/11 16:00	16	○	35	7.3	2.2	0.8	
17	2006/11/19 07:00	2006/11/19 20:00	14	○	16	0.7	0.5	0.1	
18	2006/11/20 08:00	2006/11/20 22:00	15	○	22	2.7	1.1	0.6	
19	2006/11/27 12:00	2006/11/28 09:00	22	○	38	3.9	1.6	0.5	
20	2006/12/09 17:00	2006/12/10 13:00	21	○	22	0.9	1.1	0.3	
21	2007/03/29 20:00	2007/03/30 03:00	8	○	16	2.4	4.2	4.2	
22	2007/03/31 18:00	2007/03/31 18:00	1	○	74	75.2	41.5	27.1	
23	2007/04/16 17:00	2007/04/17 02:00	10	○	15	0.9	0.1	0.0	
24	2007/05/01 02:00	2007/05/01 06:00	5	○	21	3.1	1.4	0.4	○
25	2007/05/25 04:00	2007/05/25 14:00	11	○	33	9.2	2.0	0.4	○
26	2007/05/30 05:00	2007/05/30 08:00	4	○	33	12.6	0.8	0.4	○
27	2007/06/08 23:00	2007/06/09 10:00	12	○	18	1.4	0.3	0.0	○
28	2007/06/14 00:00	2007/06/15 04:00	29	○	25	1.9	0.8	0.1	○
29	2007/06/22 03:00	2007/06/22 12:00	10	○	53	14.4	10.1	1.4	○
30	2007/06/24 04:00	2007/06/24 20:00	17	○	57	12.0	43.5	2.2	○
31	2007/06/29 10:00	2007/06/29 14:00	5	○	34	8.2	23.1	3.8	○
32	2007/07/01 10:00	2007/07/02 05:00	20	○	75	34.2	122.3	13.5	○
33	2007/07/04 08:00	2007/07/04 19:00	12	○	53	11.1	89.4	14.4	○
34	2007/07/10 02:00	2007/07/10 18:00	17	○	47	17.2	48.0	4.2	○
35	2007/07/12 07:00	2007/07/12 10:00	4	○	33	9.2	41.6	3.3	○
36	2007/07/13 04:00	2007/07/14 18:00	39	○	59	9.3			○
37	2007/07/15 04:00	2007/07/16 01:00	22	○	25	1.5			○
38	2007/07/16 09:00	2007/07/16 14:00	6	○	40	8.9	56.8	3.1	○
39	2007/07/20 10:00	2007/07/20 20:00	11	○	20	2.5	9.8	0.8	○
40	2007/07/29 21:00	2007/07/29 22:00	2	○	20	8.7	6.9	3.5	○
41	2007/08/03 10:00	2007/08/03 17:00	8	○	42	9.0	15.9	1.6	○

※1 降雨開始時刻は初めに降水量が観測された時刻、降雨終了時刻は最後に降水量が観測された時刻を示す (Table 6-3 も同じ)。

※2 流量と土壌流出量は降雨開始時刻から降雨開始時刻6時間経過時点までの合計値とした (Table 6-3 も同じ)。

※3 No.1 は観測施設の設置直後のため、除外した。

※4 No.4～7 の総降水量と El_{60} は所原観測所が欠測のため、鍋山観測所の降水量データを用いた。

※5 No.36～37 は隣接するため池余水吐からの流出水が観測水田内に流入したため、除外した。

Table 6-3 一連降雨時の観測データ（里坊水田）
Observation data at the continuous rainfalls

No.	降雨開始時刻	降雨終了時刻	継続時間 h	降雨前流出	総降水量 mm	EI_{60} tf·m ² /ha·h	流量 m ³	土壌流出量 kg
1	2006/07/02 01:00	2006/07/02 08:00	8	○	31	3.9		
2	2006/07/04 18:00	2006/07/05 02:00	9	○	20	2.0	130.3	25.2
3	2006/07/08 20:00	2006/07/09 02:00	7	○	17	1.1	76.1	7.0
4	2006/07/16 12:00	2006/07/16 16:00	5	○	17	2.5	41.9	2.4
5	2006/07/17 05:00	2006/07/19 10:00	6	○	315	178.4		
6	2006/07/20 22:00	2006/07/21 03:00	6	○	17	1.8	60.1	5.7
7	2006/07/23 17:00	2006/07/25 01:00	9	○	62	7.2	156.4	8.2
8	2006/08/07 17:00	2006/08/07 17:00	1	○	17	6.7	1.2	0.1
9	2006/09/05 03:00	2006/09/05 05:00	3	○	19	6.5	2.2	0.1
10	2006/09/09 23:00	2006/09/10 11:00	13	○	26	3.6	12.9	0.8
11	2006/09/12 17:00	2006/09/13 11:00	19	○	13	0.3	22.6	1.0
12	2006/09/15 22:00	2006/09/16 15:00	18	○	15	0.6	34.8	1.9
13	2006/09/17 00:00	2006/09/17 03:00	4	○	15	1.6	30.0	2.6
14	2006/10/05 06:00	2006/10/06 08:00	3	○	38	3.0	54.3	3.5
15	2006/10/23 23:00	2006/10/24 21:00	23	○	20	0.8	10.6	0.4
16	2006/11/06 22:00	2006/11/07 07:00	10	○	23	1.9	6.8	0.8
17	2006/11/11 02:00	2006/11/11 18:00	17	○	33	5.3	25.0	3.1
18	2006/11/19 08:00	2006/11/19 19:00	12	○	15	0.4	19.3	0.9
19	2006/11/20 08:00	2006/11/20 23:00	16	○	18	1.7	45.5	4.1
20	2006/11/27 11:00	2006/11/28 08:00	22	○	31	2.4	62.8	5.0
21	2006/12/09 17:00	2006/12/10 11:00	19	○	22	1.0	28.7	1.8
22	2007/05/25 04:00	2007/05/25 13:00	10	○	34	6.4	33.4	4.8
23	2007/05/30 07:00	2007/05/30 08:00	2	○	24	10.2	21.8	3.6
24	2007/06/08 23:00	2007/06/09 10:00	12	○	13	0.5	7.1	0.5
25	2007/06/13 23:00	2007/06/14 18:00	20	○	19	1.5	14.7	0.9
26	2007/06/22 03:00	2007/06/22 12:00	10	○	62	25.2	106.3	43.9
27	2007/06/24 02:00	2007/06/24 20:00	19	○	43	9.3	76.1	18.2
28	2007/06/29 10:00	2007/06/29 14:00	5	○	27	6.4	55.7	19.1
29	2007/07/01 10:00	2007/07/02 05:00	20	○	92	58.8	204.3	126.9
30	2007/07/02 22:00	2007/07/02 23:00	2	○	14	2.5	25.4	5.0
31	2007/07/04 08:00	2007/07/04 19:00	12	○	58	15.6	161.1	53.3
32	2007/07/09 14:00	2007/07/10 23:00	10	○	48	9.8	87.3	45.1
33	2007/07/12 03:00	2007/07/12 11:00	9	○	35	8.0	61.0	39.3
34	2007/07/13 06:00	2007/07/14 20:00	15	○	54	10.3	149.5	37.7
35	2007/07/15 05:00	2007/07/15 20:00	16	○	32	2.0	123.7	28.3
36	2007/07/16 08:00	2007/07/16 14:00	7	○	48	21.7	106.4	66.8
37	2007/07/20 10:00	2007/07/20 19:00	10	○	21	4.0	21.4	1.9
38	2007/08/03 10:00	2007/08/03 17:00	8	○	31	4.5	49.7	11.7

※1 No.1 は観測施設の設置直後のため、除外した。

※2 No.5 は隣接する水路からの越流水が観測水田内に流入したため、除外した。

Table 6-4 年間及び期別の土壌流出量
Soil loss of the year and period

	野尻水田	里坊水田
	流出土壌量等	流出土壌量等
全期間(2006年8月9日～2007年8月8日)計(kg)	143.8	712.5
一連降雨計(kg)	98.6	533.1
同(全期間計に対する割合)(%)	68.5	74.8
しろかき+前後期間(4月20日～5月31日)(kg)	4.6	—
同(全期間計に対する割合)(%)	3.2	—

※野尻水田については表2のNo.36～37降雨とその前後期間を含めて集計した。

日本の実情に適合するよう、使用単位をメートル法、基準とする斜面長を20m、傾斜を5°、及び降雨係数の単位時間に改めて求めたものである。基となったUSLE同様に、係数については国内の試験圃場で得られた観測データに基づいて得られた流亡土量予測の経験式である。予測式を式(6-1)に示す(土壤流亡予測式は流亡土量を重量(tf・ha⁻¹)で求めるものであることからSI単位系に変換せず、事業計画指針に記載されている単位のままとした。式(6-2)～式(6-6)、及び関連する図表も同じ)。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (6-1)$$

A: 単位面積当たりの流亡土量(重量)(tf・ha⁻¹)

R: 降雨係数(tf・m²・ha⁻¹・h⁻¹)

K: 土壌係数(h・m⁻²)

LS: 地形係数(無次元)

C: 作物係数(無次元)

P: 保全係数(無次元)

予測式は降雨係数の算出に30分間雨量を用いるUSLEとは異なり、毎正時の60分間雨量を用いる。観測水田最寄りの鍋山観測所と所原観測所において一般に公開されている降水量の観測値は毎正時の60分間雨量であること、流出観測データも毎正時を基準に20分間隔で観測されていることから、本式を検討の対象とした。

6.3.2 水田への予測式の適用

予測式は造成農地における流亡土量の予測手法の確立を目的としてとりまとめられており、水稻や水田に適用することは想定されていない。湛水状態の水田では、畑地での土壌侵食発生の大きな要素である雨滴の衝撃エネルギーが水面で吸収されるように、土壌流出過程は当然ながら畑地と異なる。

予測式の係数の内、降雨係数Rは一連降雨毎に求めた降雨エネルギーEと60分間ピーク降雨強度I₆₀の積である降雨侵食指数EI₆₀の年間累計値(平均値)の1/100として定義されている。降雨侵食指数EI₆₀は雨滴落下や表流水による土粒子の剥離・運搬と関係する物理的な指標を組み合わせたものであり、表流水についても考慮したものである。また、長沢ら(1993)は一連降雨ごとに求めたEI値と傾斜枠試験で求めた流亡度量の間に高い相関性が得られた結果に基づいて、EI値は雨滴侵食だけでなく表面流出水による侵食作用をも反映する総合的な指標とみなせるものと考察している。そこで、水田においても、降雨係数Rを畑地と類比(アナロジー)的に適用可能かどうかを検討した。

予測式はUSLEと同様に土壌侵食に関する各要因を項(係数)として与え、これらの積により年間の流亡土量を求めるものである。事業計画指針では、これらの係数は作期または年間を通じて一定とされてことから式の構成上、流亡土量は降雨係数Rに比例するものと考えら

れる。そこで一連降雨毎に降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量を求め、両者の間に相関関係が成り立つかどうかを検討した。予測式における降雨侵食指数EI₆₀の算出式を式(6-2)、式(6-3)に、式(6-2)、式(6-3)で算出した一連降雨毎の降雨侵食指数EI₆₀をTable 6-2、Table 6-3中に、降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量の関係と相関係数をFig.6-4に示す。

$$EI_{60} = E \cdot I \quad (6-2)$$

$$E = (210 + 89 \log I) \cdot r \quad (6-3)$$

E: 区間降雨の降雨エネルギー(m²・tf・ha⁻¹)

I: 区間雨量(毎正時間の降雨量)の降雨強度(cm/h)

但し、I ≤ 7.6cm/hとする

r: 区間雨量(cm)

Fig.6-4より、両観測水田とも降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量の間に高い相関関係(野尻水田:0.96、里坊水田:0.90)が成り立つことがわかる。前述のように、両観測水田とも一連降雨による土壌流出は降雨前から既に田面が湛水した状態で生じていることから、試験区のうち田面での雨滴侵食は生じていないものと判断できる。田面を除いた試験区に含まれる法面部分においては雨滴侵食が生じうるものの、前述のように現地調査で痕跡を含む表面流出や土壌侵食の発生が確認されていない。従って、両観測水田においては、降雨侵食指数EI₆₀ならびに降雨係数Rは、田面の攪乱土壌を流水が巻き上げることや流

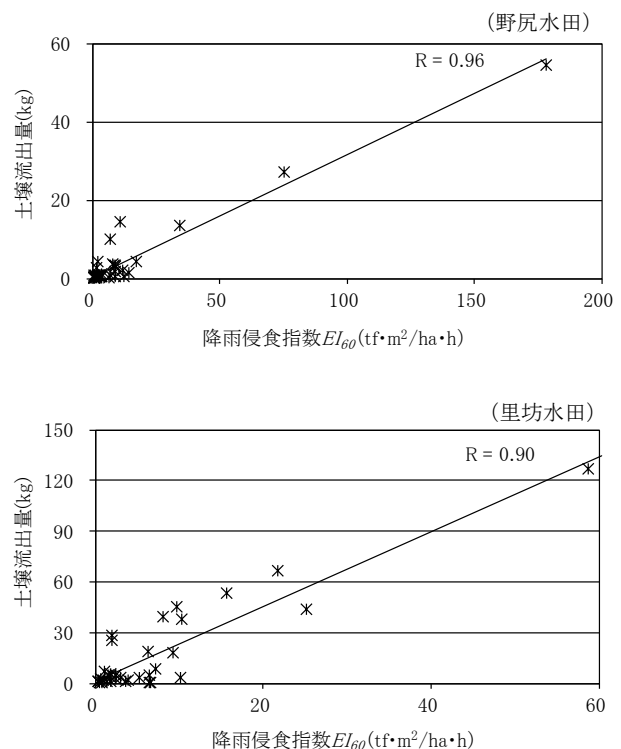


Fig.6-4 一連降雨毎の降雨侵食指数EI₆₀と土壤流出量の関係
Relations of rainfall erosion index EI₆₀ and soil loss at the continuous rainfalls

出水が土壌間隙を通過する際に土粒子を剥離することによって発生する土壌流出を表す指標となり得るものと判断できる。

6.3.3 耕作田に関する係数の算出

耕作田である野尻水田を対象に、降雨係数 R を除く水稲・水田に関する予測式の各係数を求めた。

土壌係数 K は事業計画指針に記載されているノモグラフ法に従い、式 (6-4) ~ 式 (6-6) を用いて求めた。

$$100Ku = 2.1 \cdot M^{1.14} (10^d) (12-a) + 3.25 (b-2) + 2.5 (c-3) \quad (6-4)$$

Ku : USLE における土壌係数 (ヤード・ポンド単位)

M : 粒径パラメータ

a : 有機物含有量

b : 土壌構造コード

c : 土層透水性級位

$$M = (\text{シルト} + \text{極細砂}) \% \times (100 - \text{粘土} \%) \quad (6-5)$$

砂 : 粒径 2.00 ~ 0.10mm

シルト + 極細砂 : 粒径 0.10 ~ 0.002mm

粘土 : 粒径 < 0.002mm

$$K = 1.18 \cdot (EI_{30}/EI_{60}) Ku \quad (6-6)$$

EI_{30}/EI_{60} : EI_{30} と EI_{60} の比

粒径パラメータや土壌構造コードに係わる粒度は JIS A 1204「土の粒度試験方法」に準じ、ふるい分析と沈降分析から求めた。有機物含有量は地盤工学会基準 JGS T231「土の有機物含有量試験方法」に準じ、重クロム酸法で求めた(事業計画指針に記載されているノモグラフ法は重クロム酸法で求めた有機物含有量とされていることから、旧基準に準じた)。これら土質試験は水田作土層から採取した土壌を用いて行った。土層透水性級位に係わる透水度は非作付期に田面で行った円筒法でのシリンダーインテグレートによるベイシックインテグレートから求めた。また、30分間雨量から求める降雨侵食指数 EI_{30} と 60分間雨量から求める降雨侵食指数 EI_{60} の比である EI_{30}/EI_{60} は鳥根県仁多郡奥出雲町横田地区における観測によって

得られた値を用いた。計算に用いた値と求めた各係数を **Table 6-5**、**Table 6-6** に示す。

地形係数 LS も事業計画指針に従って式 (6-7) を用いて求めた。但し、斜面長 l は観測田における排水口までの最大流路長、勾配 θ は田面の勾配とした。計算に用いた値と求めた地形係数 LS の値を **Table 6-7** に示す。

$$LS = (l/20.0)^{0.5} (68.19\sin^2 \theta + 4.75\sin \theta + 0.068) \quad (6-7)$$

l : 斜面長 (m)

θ : 勾配 ($^\circ$)

作物係数 C は休閑地(裸地状態の圃場)の値を 1.0 とし、休閑地と作付等がなされている圃場からの流亡土量の比として定義されている。保全係数 P も平畝・上下耕がなされている圃場の値を 1.0 とし、平畝・上下耕と保全的耕作(等高線栽培等)がなされている圃場からの流亡土量の比として定義されている。水稲の作物係数 C と水田の保全係数 P を分離することは得られた観測データのみでは不可能なことから、両係数はその積である作物・保全係数 CP とした。作物・保全係数 CP は流亡土量 A と降雨係数 R を通期(全観測期間)、作付期(4月20日~9月30日)、及び非作付期別に **Table 6-2** 中の土壌流出量と降雨侵食指数 EI_{60} の値から集計し、式 (6-1) から逆算して求めた。計算に用いた値と求めた各係数を **Table 6-8** に示す。

6.3.4 考察

水稲・水田を対象に、作物係数 C と保全係数 P の双方を求めた事例は限られる。吉川ら(1998)は USLE を改変した中山間農地に適用する土壌侵食評価式を作成して

Table 6-5 粒径パラメータ M の算出に使用した値
Values for calculation of particle size parameter M

※野尻水田で得られた値		
砂	シルト+極細砂	粘土
粒径2.00~0.10mm	粒径0.10~0.002mm	<0.002mm
%	%	%
14	62	24

Table 6-6 土壌係数 K の算出
Calculation of soil coefficient K

※野尻水田で得られた値					
粒径パラメータ	有機物含有量	土壌構造コード	土層透水性級位	土壌係数(USLE)	土壌係数
M	a	b	c	Ku	$K(\text{h}/\text{m}^2)$
4712	4.00	1	6	0.30	0.56

※1 有機物含有量の 4.00 は重クロム酸法で求めた有機物含有量(4.06%)に対応(4%を超える場合は一律に 4.00)。

※2 土壌構造コードの 1 は「極細粒 礫<5%」に対応。

※3 土層透水性級位の 6 は「極めて遅い <0.125cm/h」に対応。

※4 $EI_{30}/EI_{60}=1.57$ (「平成3年度 改良山成工調査(土壌流亡)地区別資料 総括報告書(財団法人日本農業土木総合研究所)」に記載されているものを使用)

Table 6-7 地形係数 LS の算出
Calculation of topography coefficient LS

※野尻水田で得られた値	
項目	値
斜面長 l (m)	23.0
傾斜角 θ (°)	0
地形係数 LS (無次元)	0.0729

いる。同式では予測式や USLE と同じ定義による作物係数 C と保全係数 P についても既往文献等に基づき整理、作成されており、棚田田面の作物係数 C 、保全係数 P の値もそれぞれ 0.38、0.6 として示されている。これらの値から作物・保全係数 CP を求めると 0.228 となり、Table 6-8 に示した野尻水田の値に近いことがわかる。但し、棚田を含む水稲・水田の一般的な作物・保全係数 CP を得るためには、多数の観測地点で得られたデータに基づく検討が必要である。

野尻水田に関する作物・保全係数 CP の値が得られたことから、予測式の枠組みを用いて野尻水田の土壌流出や土壌保全度合を他の農地利用と比較検討できる。野尻水田を現状の棚田として利用する場合と原地形のまま傾斜畑として利用する場合は、降雨係数 R と土壌係数 K が同一の圃場であれば、圃場の土壌保全度合は地形係数 LS と作物・保全係数 CP との積 $LSCP$ の値の比較でできる。そこで野尻水田で得られた値と事業計画指針に記載されている畑作物の作物係数 C の値を用い、野尻水田の立地地点を現状の棚田として利用する場合と原地形（傾斜度約 5°）のまま傾斜畑として利用する場合の $LSCP$ 値を求めた。作物係数の値に対応した現況の水田（Table 6-8 に対応した通期、作付期、非作付期別）を含む作物群ごとの $LSCP$ 値を Table 6-9 に示す。

棚田として利用した場合の通期の $LSCP$ 値は 0.019 となるのに対し、傾斜畑として利用した場合は最も土壌保全度合の高い牧草を作付けした場合においてもこれより高い 0.021 となることがわかる。従って、現状の野尻水田は原地形のまま傾斜畑として利用する場合よりも土壌保全的であると判断できる。

野尻水田を棚田のまま転作する場合は土壌係数 K に加えて地形係数 LS についても同一であるため、Table 6-9 に示した作物・保全係数 CP により比較できる。野尻水田は一連降雨の降雨開始前にも流出水を観測しており、このような水田で畑作物を栽培する場合には湿害を避けるために作土を高く盛立てる畝立を行い、作物を畝に植え付けることが一般的である。野尻水田においては Table 6-2 中の作物群 A～C の作物のように畝立を行わない作物の作付けは想定外であるため、畑作物への転作を行った場合の作物・保全係数 CP は作物群 D～G の LS 値である 0.3～0.6 が対応する。これに対して野尻水田の LS 値は通期で 0.25、非作付期においても 0.276 であり、畑作物への転作を想定した場合と比して非作付期においても同等ないし小さいことがわかる。

多面的機能支払交付金の活動等において、ため池と一体でため池上流域の水田の保全管理を行う場合には、水田・水稲の係数を求めることにより、予測式の枠組みを用いて棚田を含む農地を適切に保全管理するための計画立案に資することができる。

7. 総合考察

7.1 ため池の施設管理と被災リスク低減

7.1.1 ため池管理者を主体にした施設管理実態

ため池管理者を主体とした維持管理の実態を、石川県珠洲市のため池を事例として、アンケート調査と現地調査に基づいて明らかにした。

アンケート調査においては、管理者等が実施する点検や軽微な補修により、ため池は施設の健全性の維持が図られている実態が明らかになった。施設の健全性維持は豪雨による決壊など施設の被災防止、ならびに洪水緩和効果による下流域の被災防止などのため池の持つ多面的機能の発揮においても基本となる重要な事項である。但し、維持管理作業は、多くのため池においては公的な機関ではなく、ため池管理者をはじめとする受益農家や集落などのため池と地域の関係者により行われており、作業内容は地域の慣行ないし作業者の経験に基づいて行わ

Table 6-8 作物・保全係数 CP の算出
Calculation of topography coefficient CP

項目	※野尻水田で得られた値		
	通期	作付期	非作付期
流亡土量 A' (kg/m ²)	0.49	0.38	0.11
流亡土量 A (tf/ha)	4.9	3.8	1.1
降雨係数 R (tf・m ² /ha・h)	469.6	371.6	98.0
土壌係数 K (h/m ²)	0.56	0.56	0.56
地形係数 LS (無次元)	0.0729	0.0729	0.0729
作物・保全係数 CP (無次元)	0.257	0.251	0.276

Table 6-9 求めた地形係数 LS × 作物・保全係数 CP の値
Calculated values of topography coefficient LS × soil coefficient K

	作物係数 C	$LSCP$	作物等
作物群A	0.02	0.021	牧草
作物群B	0.1	0.107	ブドウ(果樹)、ワラ・乾草マルチ、エンバク
作物群C	0.2	0.214	コムギ
作物群D	0.3	0.322	陸稲、キャベツ、ブロッコリー、ハクサイ、レタス、カボチャ、スイカ、マクワウリ、パレイシヨ、トウガラシ、トマト、ピーナッツ、カンショ、除虫菊、ソバ、ゴマ
作物群E	0.4	0.429	トウモロコシ、ワタ、ダイコン、ホウレンソウ、ゴボウ、ニンジン、セロリ、ナス、ピーマン、ソラマメ、ダイズ
作物群F	0.5	0.536	ネギ、タマネギ、ラッキョウ、エンドウ、インゲン、アズキ、ナガイモ
作物群G	0.6	0.643	アスパラガス、タバコ
	0.257	0.019	(通期)
野尻水田	0.251	0.018	(作付期)
	0.276	0.020	(非作付期)

※ 作物群 A~G については傾斜度 $I=5^\circ$, 斜面長 $\theta = 23\text{m}$ として地形係数 LS を算出。また保全係数 $P = 1.0$ とした。

れていることから、地域により相違することが考えられる。また、過疎化・高齢化ないし都市化・混住化の進行、かんがい水源におけるため池の重要度合の変化などにより、将来において管理の粗放化が生じる可能性もある。

一方、現地調査においては、貯水池内の流木・倒木や洪水吐・洪水吐流入口の雑草・枯れ草等の除去が十分行われていないことが明らかになった。流木・倒木や雑草・枯れ草等の除去が十分行われていないことの背景としては、受益農家や集落の高齢化・過疎化や用水需要の減少を背景とした労力の不足だけでなく、今までに流木・倒木や雑草・枯れ草の放置による顕著なため池の被災が発生していなかったことも考えられる。しかし、小規模なため池では、当然ながら整備されたため池でも洪水吐の規模が小さいままの場合もあり、流木等が枯れ草等のゴミと一緒に洪水吐に流れ込み通水障害を生じた場合には、被災を招く貯水位の異常上昇をもたらす危険は高い。

ため池管理者を主体にした施設管理においては、ため池管理者や作業者を対象に、施設の健全性維持と減災・防災に資する作業項目をとりまとめた手引き類の作成、ならびに自治体や土地改良区による作業講習会の実施を行うことで、慣習や経験だけでなく技術的な体系を踏まえた施設管理が可能となり、被災リスク低減に資するものと考えられる。作業講習会においては、地域内のため池における管理上の問題点や防災上の弱点を洗い出し、これを踏まえてため池管理者を中心とした現状の管理体制では十分な対応ができない事項に対する自治体や土地改良区などの支援策を講ずることができれば、さらに被災リスク低減に資すると考えられる。

7.1.2 現場技術者による機能診断技術

目視点検を踏まえた現場技術者が自ら行う機能診断手法として、堤体の漏水経路を 1m 深地温の測定結果を基に堤体中の地温分布のシミュレーションによる逆解析から推定する手法を提案した。

ため池の場合、一般に機能診断のために多額の費用を費やすことは困難である。特に、決壊時の浸水想定区域などから想定される被害が相対的に小さいため池において、かつ差し迫った緊急性がないと現場技術者の目視点検で判断される変状については安価な手法以外の機能診断は困難である。開発した手法は白金測温抵抗体と対応するデータロガー、白金測温抵抗体を挿入する穴を削る用具、ならびにパソコンと解析ソフトがあれば実施可能であり、自治体や土地改良区の現場技術者においても、自ら機材・用具を取りそろえて実施可能な手法である。従って、ため池管理者等による堤体などの施設の点検で変状が見いだされた際の、現場技術者による機能診断手法としての実用性は高いといえる。

漏水に関わる変状は、漏水の流出に伴って時間経過とともに変状が進行する危険性が高い現象である。このため、差し迫った緊急性がないと判断された変状についても、目視点検や漏水量計測などとともに本手法による機能診断で変状の進行状況を定期的に監視すれば、現場技術者による変状のモニタリングも可能と考えられる。モニタリングを通じて堤体の決壊等に対して危険度合の高まり等が見られる場合に直ちに対応策を講じることができれば、ため池の被災リスク低減に大きく寄与できる。

7.2 豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策

豪雨によるため池の被災リスクの評価と低減策は、広島県東広島市のため池を事例として洪水流出モデルによるため池貯水位予測モデルを作成し、貯水位を指標として堤体の決壊などによるため池の被災リスクと減災対策の効果を評価した。

決壊等の被災リスクの低減に向けた対策は堤体や洪水吐の改修が基本であるが、全国20万箇所とされるため池全てを土地改良設計指針「ため池整備」の水準で整備することは困難である。また、計画的に整備を行うため池に関しても、改修事業が完了するまでの間については、減災対策を講じる必要がある。豪雨によるため池の被災リスクは洪水流出モデルを用いた貯水位予測モデルを作成した上で堤体など施設に被災が発生する閾値と判断する貯水位を設定し、想定する降雨に対してピーク水位が閾値となる貯水位に達する降雨確率年ないし生起確率を求めることにより評価できる。

未改修ため池であっても、長期に運用されている実績から、一定程度の降雨には耐えうるものと考えられる。しかし、地球温暖化に伴う気候変動により大雨の発生回数などが増加すると考えられることもあり、将来降雨を含めて貯水位の上昇を外力とするため池の被災リスクを評価することは重要である。

ため池管理者が主体になって実施する減災対策には、洪水期間にあらかじめ常時満水位よりも貯水位を引き下げる低水位管理や気象予報に基づいて降雨前にあらかじめ貯水位を低下させる事前放流により、降雨前に空き容量を創出するソフト対策、ならびに洪水吐の拡幅や副洪水吐を追加する簡易なハード対策がある。前者のソフト対策は豪雨時の上流域からの流入水を貯水池の空き容量での貯留により受け止めることで、後者の簡易なハード対策は洪水吐放流量の増強により迅速に放流を図ることで、いずれもピーク水位を低下させて被災リスクを低減するものである。後者は前者に比べ、上流からの流入量の大小、すなわち流域比（流域面積／満水面積）や大雨の頻度が増加した場合にも安定的に被災リスクを低減させる。但し、前者、すなわち降雨前の空き容量創出による対策は利水容量に余裕のあるため池であれば、水利権者の合意と管理者の取水施設等の操作のみで実施できる減災対策であり、工事等を要することなく実施可能という利点があり、直ちに実施可能な減災対策として重要である。

7.3 ため池群の活用による下流河川流域の被災リスクの評価と低減策

ため池群の多面的機能による洪水緩和効果に基づいた下流河川流域の被災リスクの評価と低減策は、広島県椋梨川上流域を事例としてため池群を組み込んだ広域洪水流出モデルを作成し、下流河川の基準点における水位を指標として検討した。

ため池群を活用して下流河川のピーク水位を被災リスクの低減を図るためには、降雨ピーク前の空き容量確保が重要である。ため池群の洪水緩和効果を強化するには、洪水調節容量を設定したため池の流域面積率が大きくなるように洪水調節容量を付与することがまず必要であり、その上で降雨前の放流による洪水調節容量の維持とともに、ピーク水位の形成に直接関係しない時間帯における貯水池への流入水を極力放流し、ピーク水位の形成に直接繋がる流入水を貯留するための空き容量の維持が必要である。従って、決壊等のため池被災リスクの低減策である低水位管理や事前放流は、ため池群を活用して下流河川流域の被災リスク低減を図る際にも有効な方策であることから、これら貯水管理に関するソフト対策は施設の被災発生リスク低減策としての効果が小さい場合でも下流河川流域の被災リスク低減の観点から取り組む意義がある。

広島県椋梨川上流域のため池群のように、主たる水源からの用水が不足する際の補助水源として利用するため池においては、渇水年を除くとかんがい期間と重なる洪水期間においても用水に余裕があるものと考えられる。水利権者の同意が前提になることやため池用水の利用状況・形態によって異なるものの、多面的機能である洪水緩和効果の発現に向けた用水管理を実施できるため池群は他流域でも少なくとも存在すると想定される。多面的機能の効用はため池関係者に限らず下流河川流域関係者に及ぶので、洪水緩和効果の受益者からため池管理に必要な費用ないし賦役を転移し、ため池群を活用して下流河川のピーク水位を被災リスクの低減を積極的に図ることも考えられる。

但し、ため池は基本的に河道外の貯留施設であり、自流域を持つため池が多数存在する流域においても河川の流域に占めるため池の流域面積の比率は高くないものと考えられる。また、降雨中にため池に向いて貯水の放流等を行うための操作を行うことは労力面で一般に困難であり、特に豪雨中のため池管理者による施設の操作は不測の事態を招く危険性があることから、基本的には避けるべきである。このため都市化の進行で受益水田が消滅し、ため池を治水のための施設に転用し、改造することができる場合などを除くと、ため池の洪水緩和効果が発揮できる降雨や貯水管理の条件が揃った際に、付加的に下流河川に対して被災リスクを軽減するものとして位置づけることが妥当であると考えられる。

7.4 ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出

ため池の利水容量の転用による洪水調節容量の創出は、広島県東広島市のため池を事例として取水に伴う貯水率の減少度合と降雨による回復度合を観測水位から求め、検討期間中の貯水率変化を簡便に予測する手法を考案して検討した。

ため池は農業用水源として築造されていることから、

洪水調節容量など被災リスク低減に用いる容量は一般に想定されていない。しかし、水稲作から畑作物への転作が進んでおり、2007年度の水田面積に占める水稲作付面積の割合は全国で66%に止まることや、都市化や混住化、耕作放棄地の発生に伴って受益水田の潰廃が進行しているため池も少なくない。また、河川から取水した用水などため池外の水源によるかんがい施設を整備した地区においては、ため池は干ばつ時の補助水源として運用されている場合が多いと考えられる。従って、現状のため池においては、利水容量の転用により洪水調整容量を創出できる余地は大きいと考えられる。

水位計や雨量計を設置して水文観測を実施しているため池は少数であり、今後防災面で重点的に管理を行う必要があるため池に関しては水文観測機器を整備して貯水位や雨量のモニタリングを行う可能性は高いと考えられるものの、多くのため池における貯水位の観測は将来においても目視によるものと考えられる。重要な今回考案した手法は1～2期間の日水位データを基に検討することが可能であり、ため池の利水容量転用の可能性を定量的に評価・検討する手法として、高い実用性を持つと考えられる。

7.5 棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池上流域管理の検討

棚田における土壌流出の評価を踏まえたため池集水域管理の検討は、鳥根県出雲地方における棚田の土壌流出の観測結果に基づいて観測田（耕作田／遊休田）の土壌流出実態を明らかにした上で、土壌流亡予測式における水稲・水田の作物係数 C と保全係数 P を算出して行った。

水田・水稲は他の土地利用・作物と比べて土壌流出に対して保全的であることから、一般的には水田に起因する土壌が貯水池内に堆積し、一般にはため池管理上の問題を引き起こす可能性は少ないものと考えられる。しかし、今回得られた観測データや既往の研究報告では水田においても無視できない量の土壌流出が生じていることから、ため池上流域に占める水田の面積比率が大きく、かつ耕作放棄などによる水田の遊休化に伴って土壌流出量が増大する場合や既往の研究で報告されている代かき後の強制落水などに伴う土壌流出が見られる場合には、水田からの土壌流出が生じないよう水田の利用・管理を行う必要がある。加えて、ため池の多面的機能増進に関わる活動においては、流域内の水田についても一体的に扱うべきものであり、ため池への土壌流出の観点だけでなく、上流域の水田は国土保全の観点からも適切に利用・管理する必要がある。

土壌流亡予測式の枠組みで行った検討により、既往の研究で指摘されている代かき・田植時に水田から出る流出水に伴う土壌流出を除くと、水稲以外の作物に転換する場合よりも水稲作を維持する方が土壌保全的である。また、作付けを行わずに水張り水田として管理した場合

の土壌流出も水稲作時と同程度と考えられる。上流域水田の管理にあたっては、耕作放棄等の管理粗放化を放置することなく、土壌流出抑制の視点から適正な管理を行うことで、貯水容量の維持を通じたため池と下流河川流域の被災リスク低減に資することができる。

7.6 まとめ

ため池は古くから農民が築造し、今日においても多くのため池が受益農家や集落などのため池管理者をはじめとする関係者が自ら維持管理している。施設の健全性維持、ならびに多面的機能の発揮を含む豪雨に対するため池とその下流河川流域の被災リスク軽減に際しては、ため池管理者等による維持管理が重要な役割を果たす。

本稿における実態調査や観測、検討はそれぞれ特定の地区・ため池で行った事例であり、立地条件を相違する地区やため池における比較検討や手法の適用性は今後の課題である。ため池の施設管理や用水管理は地域によりその実態は様々であると考えられる。また、気候や地形、都市化や過疎化の進行状況など、ため池の立地条件によっても維持管理の実態は大きな影響をうけるものと考えられる。従って、本稿の成果に基づいてため池の減災対策を取り組む場合には、適用地区・ため池での技術的な検討は不可欠である。

但し、自流域を持つ谷池は上流域からの降雨流出を貯留し、用水をかんがいに使用すること、ならびに豪雨時の流入水を洪水吐から放流するという基本的な機能は不変であることを踏まえれば、本稿で開発・提案した手法や技術的な知見は広く全国に適用し得るものと考えられる。

謝辞：本稿をとりまとめるにあたり、三重大学大学院生物資源学研究所の成岡市博士には終始丁寧なご指導とご援助を頂いた。また、同研究所の加治佐隆光博士、酒井俊典博士、ならびに岡島賢治博士には貴重なご助言とご示唆を頂き、とりまとめにあたって大きなご援助を頂いた。

本稿を構成する研究の共同研究者である農研機構（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構）農村工学研究部門の小川茂男博士と福本昌人博士には、特に研究計画やとりまとめにおいてご指導とご助言を頂いた。塩野隆弘博士には土壌流亡予測式の適用に関してご助言を、嶺田拓也博士にはため池管理に関するアンケート調査の共同作業を頂いた。ハイドロシステム（株）の小山潤氏には広域洪水流出モデルのプログラム作成を、ならびに岡山大学大学院環境生命科学研究科の工藤亮治博士には温暖化実験データの入手とダウンスケーリングに関する作業を担当して頂いた。また、元独立行政法人農村工学研究所の大西亮一博士にはため池群の洪水緩和をはじめとするため池の水文・流出解析に関わる研究の端緒を、元秋田県立大学教授生物資源科学部の高橋順二博士にはため池の維持管理に関わる研究の端緒を、ならびに茨城大学農学部毛利栄征博士にはため池減災に関する研究の端緒を与えて頂いた。また、農研機構農村工学研究部門の鈴木尚登博士と増本隆夫博士、堀俊和博士、ならびに著者が参画したプロジェ

クト研究等の参画研究者であった方々には、研究推進にあたっての各種のご助力と研究会等での有益なご意見を頂いた。さらに日本大学生物資源科学部の川本治博士をはじめ、上司や同僚として同じ研究部・研究領域で共に仕事をした方々には、様々な研究推進上の便宜を図って頂いた。

本稿に関する研究にあたっては、ため池や水田を所有する農家をはじめとした地域の方々、ならびに関係行政機関の方々から観測や調査に対する便宜・協力を頂いた。本稿の研究は全てフィールドでの観測や調査に立脚するものであり、これらの方々から頂いた協力がなければ為し得ないものであった。また、いずれの研究も行政機関等における技術検討と何らかの形で連携して実施したものであり、技術検討の場での議論や担当者との意見交換は研究計画の立案や研究とりまとめにあたって大変有益であった。関係各位には、深く御礼を申し上げる。

なお、本論文は三重大学大学院生物資源学研究科学学位審査論文であることを付記する。

引用文献

- Barnes, B. S. (1940) : Discussion of analysis of runoff characteristics, Trans., ASCE, **105**, 106
- Wischmeier, W. H. and Smith D. D. (1978), Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning, U.S. Dep. Agric., *Agriculture Handbook*, No.537.
- 新井正・西沢利栄 (1974) : 水温論, 共立出版, 185-190
- 今泉眞之・石田聡・土原健雄・吉迫宏 (2006) : ため池周辺の地下水流入・流出量の評価－広島中央の谷ため池を例として－, 農業工学研究所技報, **204**, 157-174
- 今田美穂・青柳みどり・渡辺貴史・高村典子 (2009) : ため池の管理組織形態と存続をめぐる費用負担の実態, 農村計画学会誌, **27**(論文特集), 239-244
- 岩井重久・石黒正儀 (1970) : 応用水文統計学, 森北出版, 73-83
- 内田和子 (2008) : ため池—その多面的機能と活用—, 農林統計協会, 139-153
- 内田和子 (2003) : 日本のため池 防災と環境保全, 海青社, 35-70
- 大槻順朗・大八木豊・島谷幸宏・朴崎璨 (2008) : 御笠川流域における貯留施設の治水効果の評価, 水工学論文集, **52**, 361-366
- 大八木豊・島谷幸宏・杉本知佳子・加藤憲介・朴崎璨 (2006) : ため池を用いた御笠川流域の治水強化策, 水工学論文集, **50**, 325-330
- 大八木豊・島谷幸宏・杉本知佳子・加藤憲介・朴崎璨 (2005) : 御笠川流域におけるため池の治水効果, 河川技術論文集, **11**, 261-266
- 奥山武彦・黒田清一郎・中里裕臣・長束勇 (2003) : 地すべりブロック内におけるため池の浸透防止工による地下水流動の変化, 農業工学研究所技報, **201**, 165-172
- 角道弘文・高橋一将・千賀裕太郎 (2013) : 湯水要貯水量曲線法を用いた農業用ため池の流出調整効果の検討, 農業農村工学会論文集, **81**(3), 257-262
- 加藤敬 (2005) : 農業用ため池の洪水低減機能に関する水文・水理学的研究, 農業工学研究所報告, **44**, 1-22
- 加藤敬・佐藤政良 (2002) : 大阪府松沢池における洪水低減機能とその確率評価—ため池の洪水低減機能の評価—, 農業土木学会論文集, **222**, 637-644
- 加藤敬・佐藤政良・太田高志 (2002) : 実降雨のパターンを考慮したため池の洪水調節機能評価, 農業土木学会論文集, **222**, 645-651
- 北村邦彦・喜多威知郎 (1997) : 石川県能登地域における中山間ため池地帯の水管理, 農業土木学会論文集, **188**, 315-322
- 機能保全における性能設計入門編集委員会編 (2008) : 機能保全における性能設計入門, 農業農村工学会, 142-143
- 木村俊晃 (1975) : 貯留関数法, 河鍋書店, 10-35
- 黒田清一郎・増川晋・田頭秀和 (2013) : 土構造物の地震波伝播特性評価と経年変化監視への適用性, 農業農村工学会誌, **81**(8), 627-630
- 黒田英男 (2003) : Visual Basic による 3 次元熱伝導解析プログラム, CQ出版, 176-246
- 建設省水文研究会 (1971) : 流出計算例題集 2, 全日本建設技術協会, 81-146
- 小林晃・丹羽亮太・柳本智也・山本清仁・青山咸康 (2007) : 弾性波を用いたため池堤体内の水分状況推定, 農業土木学会論文集, **249**, 231-238
- 小林晃・山本清仁・岡田謙吾 (2014) : ため池堤体の効率的調査法—簡易弾性波速度分布測定の提案と複合評価—, 土木学会論文集 F4, **70**(1), 1-10
- 小山潤・小川茂男・吉迫宏・島武男 (2007) : 水理解析を目的とした流域 GIS データのオブジェクト構造化と応用, GIS—理論と応用—, **15**(2), 93-102
- 佐々木聡・鈴木浩之・北田裕道 (2013) : ため池の防災・減災の施策について, 農業農村工学会誌, **81**(8), 631-634
- 佐藤俊典 (2014) : 気候変動影響に関するため池管理者へのアンケート調査の結果報告, 農業農村工学会誌, **82**(1), 47-50
- 庄司正弘 (1995) : 伝熱工学, 東京大学出版会, 17
- 白石英彦 (1971) : 第 9 章 不定流数値解析における初期条件および境界条件について (農業水利を中心として), “伊藤 剛編, 数値解析の応用と基礎 (水理学を中心として)”, アテネ出版, 177-196
- 鈴木隆善・河合宏夫・米村 誠・西島信一 (2003) : 住民参加によるため池の保全・管理体制づくり, 農業土木学会誌, **71**(10), 921-924
- 鈴木哲也・荻原龍太郎・森井俊広・河合隆行 (2013) : 常時微動スベクトルデータを用いた損傷ため池堤体の健全度評価, 農業農村工学会誌, **81**(8), 611-614
- 須戸幹・三木俊和・増田佳昭 (2009) : 代かき・移植時における水田からの濁水流出特性—滋賀県宇曾川流域の水田群を事例として—, 農業農村工学会論文集, **77**(2), 113-119
- 千賀祐太郎 (2007) : 水資源管理と環境保全, 鹿島出版会, 86-103
- 竹内篤雄 (1996) : 温度測定による流動地下水調査法, 古今書院, 70

- 竹内篤雄 (1983a)：地すべり地温測定による地下水調査法，吉井書店，46-50
- 竹内篤雄 (1983b)：地すべり地温測定による地下水調査法，吉井書店，59-64
- 竹下伸一・別枝宏平・三野徹・中村公人 (2006)：遅延率を用いたため池洪水緩和量推定法，農業土木学会論文集，**243**，291-300
- 谷山一郎 (2002)：Ⅷ 農林地の土砂流出に伴うリン流出をモニタリングする (長谷川周一・波多野隆介・岡崎正規：環境負荷を予測する－モニタリングからモデリングへ)，博友社，127-142
- 椿東一郎・荒木正夫 (1961)：水理学演習上巻，森北出版，221-222
- 内閣官房 (2014)：国土強靱化基本計画－強くて，しなやかなニッポンへ，内閣官房，24
- 長沢徹明・梅田安治・李里漫 (1993)：USLEにおける降雨係数の評価について－北海道における土壌侵食抑制に関する研究 (I)－，農業土木学会論文集，**165**，121-127
- 中西憲雄・加藤敬・小林宏康・中達雄 (2002)：ため池の雨水貯留可能量の評価，農業土木学会論文集，**217**，101-107
- 中西憲雄・加藤敬・常住直人 (1999)：農業用ダムが発揮する洪水低減機能の解明－大迫ダムの洪水時放流事例とその分析から－，農業土木学会論文集，**202**，533-539
- 中村充・白石英彦 (1971)：数理モデルによる非常現象の解析－湾，河川，湖におけるシミュレーション－，農業土木試験場報告，**9**，137-158
- 西村伸一・森俊輔・藤澤和謙・村上章 (2009)：豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計，応用力学論文集，**12**，89-97
- 日本学術会議 (2001)：地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について (答申)，日本学術会議，48-49
- 農林水産省 (2012)：土地改良長期計画，農林水産省，22-23
- 農林水産省構造改善局計画部資源課 (監修) (1992)：土地改良事業計画指針 農地開発 (改良山成畑工)，農業土木学会，158-178
- 農林水産省農村振興局 (2015a)：多面的機能支払交付金【農地維持活動】農地，水路等の基礎的な保全管理，農林水産省農村振興局，45-58
- 農林水産省農村振興局 (2015b)：多面的機能支払交付金【資源向上活動 (長寿命化)】農地周りの水路，農道等の長寿命化のための活動の解説，農林水産省農村振興局，51-64
- 農林水産省農村振興局 (2015c)：多面的機能支払交付金【資源向上活動 (共同)】地域資源の質的向上を図る共同活動の解説，農林水産省農村振興局，14-16，81-96，237
- 農林水産省農村振興局 (監修) (2014)：土地計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水 (水田)」，農業農村工学会，70-71
- 農林水産省農村振興局 (2013)：平成25年度食料・農業・農村政策審議会農業農村振興整備部会報告 農村社会の変化や新たな農政の展開における農業農村整備の課題 (中間整理)，農林水産省農村振興局，13-14
- 農林水産省農村振興局 (監修) (2006)：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準，基準の運用，基準及び運用の解説，技術書，農業土木学会，86-87
- 農林水産省農村振興局 (監修) (2003)：土地改良事業計画設計基準・設計「ダム」技術書 [フィルダム編]，農業土木学会，II -60-62
- 農林水産省農村振興局企画部資源課 (2008)：多面的機能維持増進調査報告書，農林水産省農村振興局企画部資源課，110-118
- 農林水産省農村振興局整備部水利整備課 (監修) (2004)：土地改良施設管理基準－ダム編－，農業土木学会，103-108
- 農林水産省農村振興局整備部設計課 (監修) (2006)：土地改良事業設計指針「ため池整備」，農業土木学会，3，17-18，48，61-68，102，133-143
- 農林水産省農村振興局整備部防災課 (2014)：ため池の保全管理体制整備の手引き，農林水産省農村振興局整備部防災課，1-64
- 農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室 (2014)：農業水利施設減災管理手引き，農林水産省農村振興局整備部防災課災害対策室，2-1-2-111
- 農林水産省農村振興局整備部防災課 (2013)：ため池管理マニュアル，農林水産省農村振興局整備部防災課，1-30
- 広島県 (2003)：二級河川沼田川水系河川整備計画，広島県，5-6
- 北陸農政局珠洲開拓建設事業所 (1992)：珠洲事業誌，北陸農政局珠洲開拓建設事業所，22-23
- 堀俊和・毛利栄征・松島健一・有吉充 (2010a)：豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法，農業農村工学会論文集，**78** (6)，493-503
- 堀俊和・毛利栄征・松島健一・有吉充 (2010b)：豪雨リスクを考慮したため池の減災対策，農業農村工学会誌，**78** (9)，759-763
- 堀俊和・森充広・毛利栄征・青山咸康 (2002a)：地中レーダによるため池の漏水経路の調査手法，農業土木学会論文集，**218**，241-251
- 堀俊和・毛利栄征・青山咸康 (2002b)：豪雨による農業用ため池の破壊原因と被災の特徴，農業土木学会論文集，**218**，253-263
- 堀俊和・山下恒雄・吉迫宏 (1995)：塩水トレーサ法によるため池の漏水調査法について，農業工学研究所技報，**192**，41-53
- 松井宏之・須永吉昭 (2013)：石垣島・水田地帯からの浮遊土砂流出量の長期観測およびL-Q式の適用，土木学会論文集B1，**69** (4)，I_955-I_960
- 松井宏之・福永隆二・清水智 (2007)：石垣島の水田における降雨出水時の浮遊土砂収支，農業農村工学会論文集，**252**，689-694
- 水村和正 (2008)：水文学の基礎，東京電機大学出版局，118-140
- 嶺田拓也・小出水規行・石田憲治 (2009)：水田における冬期湛水の導入による持続的な多面的機能の発揮－宮城県大崎市伸萌地区の生物相保全機能を事例とした考察－，農村計画学会誌，**27** (論文特集)，335-340
- 嶺田拓也・吉迫宏・赤石大輔 (2013)：過疎高齢化地域の老朽化・放棄ため池の新たな利活用創造に向けた取組み，農業農村工学会誌，**81** (8)，635-638
- 湯原浩三 (1955)：地下1m深の地温分布から地下熱源を理論的に推定する一方法，物理探査，**8** (1)，27-33
- 吉川 (暉澤) 省子・山本博・石原暁・花野義雄 (1998)：四国地域における農地管理の粗放化に伴う土壌侵食の変動評価，日本土壌肥科学雑誌，**69** (3)，265-277
- 吉迫宏・小山潤・小川茂男・島武男・中西憲雄・大西亮一 (2007)：

- ため池群の持つ洪水軽減効果シミュレータの開発－広島県椋梨川流域への適用－, 農村工学研究所技報, **206**, 209-217
- 吉迫宏 (2008) : 地温探査によるため池堤体の漏水調査, 土壌の物理性, **108**, 67-80
- 吉迫宏・小川茂男 (2009) : ため池における利水容量の転用による洪水調節容量の創出－東広島市六道池における検討－, システム農学, **25** (1), 63-70
- 吉迫宏・小川茂男・塩野隆弘 (2009) : 棚田における土壌流出と土壌流亡予測式の係数算出, システム農学, **25** (4), 205-213
- 吉迫宏・福本昌人・嶺田拓也・松森堅治・瀬川徳子 (2011) : 石川県珠洲市における小規模ため池の施設管理実態, 農村工学研究所技報, **211**, 121-130
- 吉迫宏・小山潤・小川茂男・福本昌人 (2013) : 広島県椋梨川流域における谷池型ため池群の洪水緩和効果, 農業農村工学会論文集, **81** (3), 205-214
- 老朽ため池研究会 (監修) (1979) : 老朽ため池整備便覧<昭和57年度版>, 公共事業通信社, 14
- 渡辺貴史・高村典子 (2006) : 兵庫県東播磨地域における生物保全に対するため池管理者の意識, 農村計画学会誌, **25** (論文特集), 353-358

受理年月日 平成28年12月26日

Disaster reduction technique for damage on the irrigation pond of valley type and the lower basin caused by heavy rain

YOSHISAKO Hiroshi*

*Disaster Prevention Unit, Division of Facilities and Geotechnical Engineering

Abstract

In this study, we investigated management measures to reduce the risk of heavy rain disaster to irrigation pond facilities and downstream areas by clarifying the actual condition of irrigation pond management and discussing various methods of functional diagnosis and evaluation.

We made a case study on the actual condition of management conducted by farmers and local community members who benefit from irrigation ponds in Suzu City, Ishikawa Prefecture through questionnaire survey and field investigation. We then proposed a functional diagnosis method based on visual checks; this method estimates leakage paths in a dam from the inverse analysis of simulated ground temperature distribution in the dam on the basis of ground temperature measurements at a depth of 1 m.

We evaluated the risk of heavy rain disaster to irrigation ponds and discussed mitigation measures for the case of irrigation ponds in Higashi-hiroshima City, Hiroshima Prefecture by developing a reservoir level prediction model based on a flood runoff model and using the reservoir level as an indicator. We found that among the disaster mitigation measures, controlled water level reduction in an irrigation pond having a large catchment area has only a limited effect on disaster risk reduction, whereas minor modifications to spillways can reduce disaster risks on a stable basis.

We evaluated disaster risk reduction in downstream river areas resulting from flood mitigation using a group of irrigation ponds and discussed mitigation measures for the case of the upper river basin of the Mukunashi River in Hiroshima Prefecture by developing a regional flood runoff model incorporating a group of irrigation ponds and using river water levels at downstream reference locations as an indicator. We found that it is important to secure an available capacity before experiencing peak rainfall in order to reduce disaster risks by using a group of irrigation ponds.

To create an extra capacity of flood control by diverting the service water capacity of irrigation ponds, we studied the case of irrigation ponds in Higashi-hiroshima City, Hiroshima Prefecture and deduced, from the observed water levels, decrease in the percentage of storage due to withdrawal and increase in the percentage of storage due to rainfall. We then created and discussed a simple method to predict changes in the percentage of storage during a given investigation period. We found that in irrigation ponds serving water to paddy fields where diversion and crop changeover have progressed, it is likely that service water capacity can be diverted even during an overlapping period of irrigation and flood control.

In studying the management of irrigation pond catchment areas in consideration of soil runoff from terraced paddy fields, we observed soil runoff from terraced paddy fields in the Izumo district of Shimane Prefecture to clarify the state of soil runoff from the observed cultivated and idle paddy fields, and then calculated the cropping factor C and the conservation practice factor P in the soil loss equation for the studied paddy and paddy fields. From the comparison of factors in the soil loss equation, we found that preserving rice cultivation is effective for suppressing soil runoff. We then discussed the management of irrigation pond catchment areas including terraced paddy fields in terms of maintaining reservoir capacity by suppressing the flow of deposit into reservoirs.

Key words: *irrigation pond, disaster mitigation, storm runoff, disaster risk, soil runoff*

Use of Digested Slurry from Livestock Manure in Paddy Fields and its Environmental Effect in Southeast Asia

ORITATE Fumiko*

*Renewable Energy and Resources Unit, Regional Resources Engineering Division

Abstract

Use of digested slurry from livestock manure in paddy fields and the associated environmental effects were examined using a regional diagnosis and field experiments with the aim of establishing a sustainable biomass use system in Southeast Asia. First, analysis of biomass use in a suburban village in Southern Vietnam identified several options for improving the regional environment and generating energy, resulting in a preferred proposal to use currently untreated livestock manure for biogas production and use digested slurry as a fertilizer in paddy fields. Second, the effects of using digested slurry as fertilizer on rice production and environmental impacts were evaluated through field experiments. This study clarified that digested slurry can be substituted for chemical fertilizers, and nitrogen loading and fecal contamination of receiving waters can be avoided if no water is discharged from the treated plot for a sufficient duration. Third, the economic feasibility of using digested slurry was evaluated in field experiments, which found that it is economically feasible if the nitrogen concentration of the digested slurry can be raised to five times that of present conditions. Finally, the effects of extending this regional scenario to all of Southeast Asia on nitrogen loads discharged to water bodies and on greenhouse gas emissions was estimated and evaluated.

Key words: Southeast Asia, Regional biomass use, Biogas digester, Paddy field, Digested slurry, GHG emission

Contents

1. INTRODUCTION
 - 1.1 Background
 - 1.2 Research Problem
 - 1.3 Objectives of This Study
 - 1.4 Structure of the Thesis
2. LITERATURE REVIEW
 - 2.1 Household Biogas Systems in Rural Area of Southeast Asia
 - 2.2 Methods for Analysis and Evaluation of Regional Conditions of Biomass Use
 - 2.3 Fertilizer Effects of Digested Slurry on Rice Plants
 - 2.4 Environmental Effects of Application of Digested Slurry in Paddy Fields
 - 2.5 Transportation and Application Methods of Digested Slurry to Paddy Fields
 - 2.6 Summary
3. ANALYSIS OF PRESENT CONDITIONS OF BIOMASS USE IN A SUBURBAN VILLAGE IN SOUTHERN VIETNAM
 - 3.1 Introduction
 - 3.2 Methods
 - 3.3 Results and Discussion
 - 3.4 Conclusion

4. FEASIBILITY OF USE OF DIGESTED SLURRY IN PADDY FIELDS FROM FERTILIZER EFFECT AND ENVIRONMENTAL IMPACT

4.1 Introduction

4.2 Materials and Methods

4.3 Results and Discussion

4.4 Conclusions

5. FEASIBILITY OF USE OF DIGESTED SLURRY IN PADDY FIELDS FROM ECONOMICAL ASPECT

5.1 Introduction

5.2 Materials and Methods

5.3 Results and Discussion

5.4 Conclusions

6. DISCUSSIONS

6.1 Installation and Evaluation of the System to use Digested Slurry from Biogas Digesters

6.2 Advanced Regional Biomass Use System with Bio-ethanol Production from Rice Straw

6.3 Prospect for Diffusion of Regional Biomass Use System to Southeast Asia

7. CONCLUSION

ACKNOWLEDGEMENTS

APPENDIXES

Appendix 1 Bases of data used for regional diagnosis

Appendix 2 Calculation procedures of cost for fertilization

Appendix 3 Calculation procedures of the number of milk cow in Southeast Asia

REFERENCES

1. INTRODUCTION

1.1 Background

Use of fossil fuels has given us comfortable life through economic growth and development of industry. However, such use has caused environmental problems such as water and air pollution and global warming by greenhouse gas (GHG) emissions at the same time. Moreover, fossil fuels are exhaustible resources, whose stock have been decreasing year after year. It is therefore important to consider a lifestyle without depending on fossil fuels. Currently, in rapid developing countries such as Southeast Asian Countries, rapid economic growth and industrialization cause rapid increase of energy demand and severe environmental problems (Samantha and Milou, 2010). Main energy sources are fossil fuels with the share of 37% for oil, 21% for natural gas and 16% for coal (IEA, 2013), and energy-related CO₂ emissions have increased to 1.2 gigatonnes (Gt) in 2011 in Southeast Asia (Adiarso et al., 2013). These are problems which developed countries have once experienced in advance of developing countries.

For these circumstances, a shift in the paradigm to supply sustainable energy sources by utilization of renewable energy has been proposed (Samantha and Milou, 2010). Bioenergy is an attractive among renewable energies because of its properties of not only “renewable”, but also “storable and substitutive”, “abundant” and “carbon neutral” (Ogi, 2002). It can contribute to a reduction in GHG emissions by substituting for fossil fuels. Moreover, it also can contribute to decrease environmental pollution such as nitrogen load in water bodies when the bioenergy source is wasted biomass. For this, wasted biomass is focused in this study.

Wasted biomass such as livestock manure and agricultural residues are abundant in rural area. Many biomass are spatially distributed thinly and widely (Sakoda et al., 2006). Considering the cost and energy for transporting them for use, decentralized regional biomass use system is desirable. In Southeast Asian Countries, rural areas play an important role in national development because population of rural area is more than 50% of total in 2014 (FAOSTAT, 2015a), and ratio of agriculture in GDP is still more than 10% (except for Brunei, Myanmar, Malaysia and Singapore) (The World Bank, 2015) in each of Southeast Asian Countries.

Therefore, construction of regional biomass use system (especially, wasted biomass) in rural area would be greatly meaningful. For this, it is important to propose appropriate biomass use scenario for construction of regional biomass use system, which is particularly suitable for Southeast Asian Countries. Here, “appropriate” indicates that the scenario is adoptable both technologically and economically. The effect of adoption of the scenario should also be fully investigated.

In Southeast Asian Countries, livestock farming and rice production is popular. Therefore, the following two kinds of biomass use systems may have potential to be developed in Southeast Asia: 1) using untreated livestock manure for feedstock of household methane fermentation system called “biogas digesters”, and using generated biogas for fuel in households, and 2) using unused rice straw for feedstock of bio-ethanol, and using the bio-ethanol as substitution of fossil fuels. Biogas digesters have already been used in rural area in Southeast Asia as discussed in the following chapters. By contrast, bio-ethanol production from rice straw is still under development and many improvements are required before the system become economically feasible (Igarashi, 2008; Kunimitsu and Ueda, 2013) through various trials for improving the processes for conversion of rice straw to bio-ethanol (Fujita et al., 2011; Tran et al., 2013; Vu et al., 2013). Therefore, this study sets a main focus on the former scenario, namely, using untreated livestock manure for feedstock of household biogas digesters, and using generated biogas for fuel in households.

1.2 Research Problem

Vietnam is selected as the study area of this study because Vietnam is a major rice producing country and also in which livestock farming is popular among Southeast Asian Countries. In Vietnam, energy demands are increasing with rapid economic growth (Pham et al., 2011; Nguyen et al., 2013), and environmental problems have become increasingly significant. It is forecasted that annual energy demands will increase by approximately 12.1% from 2010 to 2020, accompanied by yearly decreases in fossil fuel sources (Nguyen et al., 2013). Rapid economic growth has also led to rapid increases in the livestock industry with greater demands for meat products. Air pollution such as odor and pollution of aquifers and surface water caused by improper treatment of livestock excreta are becoming very serious (Vu et al., 2007; Vu et al., 2012; Thu et al., 2012).

As for rice production, the annual planted area and production are 7.9 million ha and 44 million tons, respectively (General Statistics Office Vietnam, 2013). Moreover, Vietnam is known as the world's second largest exporter of rice (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan, 2014). By-products in rice cultivation such as rice husk and straw are estimated to be generated at approximately 60 million tons per year, but very few of them (5-7%) are used, and the rest are burned directly in the field. Although the agricultural sector occupied only 18% in GDP, more than 46% of national population are engaged in agricultural activities (General Statistics Office Vietnam, 2013). It is also characteristic in Vietnam that approximately 70% of the population is still living in rural areas (Pham et al., 2011; Nguyen et al., 2013; Sakata, 2013), which indicates that rural areas have significant economical meaning for national development (Sakata, 2013).

Based on these circumstances in Vietnam, the government has set targets to increase the share of renewable energy in total commercial primary energy from 3% in 2010 to 5% in 2020 and 11% in 2050 (The Prime Minister of Vietnam, 2011a) and to increase the share of electricity generated from renewable resources such as wind and biomass from 3.5% of total electricity generation in 2010 to 4.5% in 2020 and 6% in 2030 (The Prime Minister of Vietnam, 2011b). Among renewable energies, the government is especially interested in biomass technology improvement to take advantage of diverse local biomass resources and produce new energy for replacing fossil fuels (Nguyen et al., 2013). With the above promotions concerning energy, strategies for environmental protection have also been issued (The Prime Minister of Vietnam, 2012) aiming to improve the environment in polluted and deteriorated areas, to mitigate deterioration and exhaustion of natural resources, to improve the capability of actively responding to climate change and to reduce increases in GHG emissions.

In view of such targets of the Vietnam government, it is meaningful to approach the task about biogas digesters. Therefore, this study sets a focus on biogas digesters, which are widely adopted throughout the world. In developing countries, there are currently millions of household biogas digesters (Thu et al., 2012). There are 30 million household biogas digesters in China, 3.8 million in India, 60,000 in Bangladesh (Thu et al., 2012), several hundred in the Philippines (Elauria and Elauria, 2013), and an increasing number in Africa, Peru (Thu et al., 2012), Nepal (Rajendran et al., 2012) and Cambodia (Bunthoeun et al., 2013). In Vietnam, similar to the above countries, household biogas digesters have spread countrywide in rural areas, especially recently with encouragement for participation in the "biogas program for the animal husbandry sector in Vietnam" (Vietnam Livestock Production Department MARD and Netherlands Development Organization SNV, 2013). This program aims to solve environmental problems such as air and water pollution caused by livestock manure, and to provide a clean and affordable energy source for the local people (Thu et al., 2012; Vietnam Livestock Production Department MARD and Netherlands Development Organization SNV, 2013).

Biogas acquired from biogas digesters is mainly used as fuel for cooking, lighting and electricity. Therefore, biogas digesters provide farmers with benefits of clean energy, saved cost by substituting for fossil fuels or reduced workload to collect firewood that can be substituted by biogas. On the other hand, problems are that most digested slurry from biogas digesters is discharged to water bodies without any treatment, and only small amounts are used as fertilizer for garden trees or vegetables in fields adjacent to farmer houses and as feed for fish (Thu et al., 2012; Huong et al., 2014). Discharge of digested slurry deteriorates water quality in water bodies because it contains high concentrations of nitrogen (Oritate et al., 2015) and fecal indicator microbes (Huong et al., 2014).

Focusing on the fertilizer components contained in digested slurry such as nitrogen, potassium and phosphorus, use in agricultural fields can be proposed as an effective solution (Yuyama et al., 2007). Especially, this study sets the main objective on applying digested slurry to the rice paddy fields. Such a selection of the objective is motivated by the facts that: 1) paddy fields occupy large areas of agricultural fields in Southeast Asian Countries, 2) most nitrogen components in digested slurry are ammonia-nitrogen compounds (Matsunaka et al., 2002), which rice prefers as a source of nitrogen (Ishii et al., 2011), and 3) paddy fields have high nitrogen removal capacity through denitrification and uptake by plants (Kyaw et al., 2005). However, the utilization of digested slurry in paddy fields in Vietnam is rarely conducted because of lack of knowledge or fear of cost for transportation and application to farmlands. Therefore, it is necessary to establish a feasible system of the use of digested slurry by evaluating it from various aspects such as fertilizer effects on rice, environmental effects, costs and labor for transportation and application to the field, and evaluation of the environmental effects at the regional level.

1.3 Objectives of This Study

Based on the above discussions, this study aims to evaluate the effects of applying digested slurry to paddy fields in rural areas of rapidly developing countries in Southeast Asia by using a suburban village in Southern Vietnam as a case study area. The detailed objectives are as follows.

1. To propose sustainable regional biomass use scenarios through adopting a “regional diagnosis” approach, which is a method for constructing a material flow diagram at a regional level.
2. To evaluate the feasibility of using digested slurry in paddy fields in terms of fertilizer effects on rice, and environmental impacts such as nitrogen load and fecal contamination.
3. To evaluate the feasibility of using digested slurry in paddy fields in terms of costs for transportation and application of slurry by adopting the pouring method.

1.4 Structure of the Thesis

This thesis consists of seven chapters.

Chapter 1 summarizes the current situation of energy and the environment in Southeast Asia, technologies for energy production from biomass as background of this study, and states the objectives of this study.

Chapter 2 reviews the previous studies about 1) household biogas systems in rural area of Southeast Asia, 2) methods for analysis and evaluation for regional conditions of biomass use, 3) fertilizer effects of digested slurry on rice plants and 4) environmental effects in application of digested slurry in paddy fields and 5) transportation and application methods of digested slurry for use in paddy fields.

Chapter 3 clarifies the present conditions of biomass use in a suburban village in Southern Vietnam, in which rice cultivation and livestock farming are popular, by regional diagnosis, and indicate the necessity of treatment of untreated livestock manure and effective use of untreated digested slurry which are currently discharged to water bodies.

Chapter 4 evaluates the feasibility of using digested slurry in paddy fields in Southern Vietnam in terms of fertilizer effects on rice and environmental impacts such as nitrogen load and fecal contamination in lower water bodies through field experiments in the study area.

Chapter 5 evaluates the feasibility of using digested slurry in paddy fields in Southern Vietnam in terms of economy such as costs for transportation and application to farmlands by adopting the pouring method through field experiments in the study area.

Chapter 6 discusses possibilities of installing the system of using digested slurry from biogas digesters in a particular setting of a suburban village in Southern Vietnam, based on the results in **Chapters 3 to 5**. In particular, it estimates the effect of adopting it on environmental loads such as nitrogen load in water bodies and GHG emissions. It also considers a case for adding an optional biomass use system, that is, bio-ethanol production from rice straw as the case in which regional biomass use is further improved. Moreover, it proposes the diffusion of these systems throughout Southeast Asia by estimating the reduction of environmental load, and suggests the implications of the results of this study.

Chapter 7 summarizes the conclusion of this study.

2. LITERATURE REVIEW

2.1 Household Biogas Systems in Rural Area of Southeast Asia

Methane fermentation is a biochemical process to decompose organic wastes into CH_4 and CO_2 under anaerobic conditions by metabolic processes of microorganisms (Li, 2005). Ratios of CH_4 and CO_2 in biogas obtained by methane fermentation are approximately 60% and 40%, respectively, and calorific values of biogas are generally 5,000-6,000 kcal (21-25 MJ) per 1 Nm^3 (Li, 2005). Methane fermentation can be classified into non-heating fermentation ($< 25^\circ\text{C}$), mesophilic fermentation at approximately 35°C ($30\text{-}40^\circ\text{C}$), and thermophilic fermentation at approximately 55°C ($50\text{-}60^\circ\text{C}$). Comparing the aspects of treatment properties of the latter two types of fermentation reveals that, thermophilic fermentation is advantageous because of a high hydrolysis rate, high death rate of pathogens and high fermentation speed, despite a disadvantage with the easy accumulation of organic acids. In contrast, mesophilic fermentation is advantageous because of high stability despite a low degradation speed (Li, 2005). Methane fermentation is carbon neutral, and can use

various kind of wasted biomass such as sewage sludge, garbage and livestock wastes as feedstock, providing significant implications for global environmental conservation (Noike, 2009).

“Methane fermentation technology” is a technology to biologically decompose wasted biomass by the principle of methane fermentation, and collect and use the product CH₄ as an energy resource. Therefore, “methane fermentation technology” is also called “Biogas Technology” (Li, 2005). Biogas technology has the following advantages (Thu et al., 2012; Nguyen, 2005); 1) reduces the GHG emissions from manure, 2) produces renewable energy, 3) reduces the workload for farmers to collect firewood for cooking in rural areas, 4) reduces deforestation, and 5) improves the surrounding environment by reducing odors and pathogens.

There are currently millions of household biogas digesters (Thu et al., 2012) as mentioned in **Chapter 1**. There are several types of biogas digesters, and currently the most popular type in rural areas around Ho Chi Minh City is the fixed dome type made from solid bricks and mortar, and buried underground as shown in **Fig. 1**. There are three main components continuously connected; (i) inlet tank where pig manure is mixed with water before it is discharged into the digester; (ii) digester where the mixture of pig manure and water is fermented to produce methane and other gases; (iii) compensating tank that collects excess slurry effluent from the digester (Nguyen et al., 2012). Average size of a digester is approximately 8 m³, the capacity to make a profit with biogas generated from the manure of 15-20 head of pigs or 4-6 head of milk cows (Information acquired by Interviews of Department of Agriculture and Rural Development, Ho Chi Minh City (DARD-HCMC) in 2010). Incidentally, polyethylene tube biogas digesters as shown in **Fig. 2** are popular in the Mekong Delta Region (Yamada, 2008; Nguyen et al., 2012) because they are low cost, easy to install and applicable to the regions where the ground water level is high (Nguyen et al., 2012) because their shapes mean they can be installed without deep excavation of the ground (**Fig. 2**). A reduction of more than 1,000 t-CO₂ per year was achieved with introduction of polyethylene tube type biogas digesters in 961 households of a village in the Mekong Delta by the Clean Development Mechanism (CDM) Project (Matsubara et al., 2014; Izumi et al., 2013).

Biogas from biogas digesters is mainly used as fuel for cooking, lighting and electricity. On the other hand, most digested slurry from biogas digesters is discharged to water bodies without any treatment, only small amounts are used as fertilizer for garden trees or vegetables in fields adjacent to farmer houses and as feed for fish (Thu et al., 2012; Huong et



Fig. 1 Fixed dome type of household biogas digester

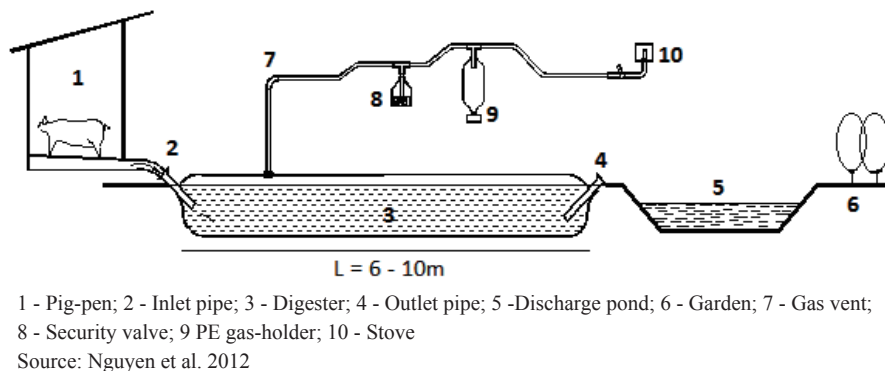


Fig. 2 Polyethylene tube biogas digester

al., 2014). The Mekong Delta Region is an exception because specific material flow called VACB systems (Vuon=garden; Ao=pond; Chuong=pigsty; B=biogas digester) (Yamada, 2008) is formed, and most of the digested slurry is used as feed for fish. Discharge of digested slurry deteriorates water quality in water bodies because high concentrations of nitrogen (Oritate et al., 2015) and fecal indicator microbes (Huong et al., 2014) are confirmed in digested slurry. Focusing on the fertilizer components contained in digested slurry, use in agricultural fields can be proposed as an effective solution (Yuyama et al., 2007). Especially, the feasibility of utilization of digested slurry in paddy field is significant as mentioned in **Chapter 1**. However, the utilization of digested slurry in paddy fields in Vietnam is rarely conducted, and needed the investigation to evaluate the feasibility.

2.2 Methods for Analysis and Evaluation of Regional Conditions of Biomass Use

Quantitative clarification of the material flow related to biomass use in the objective region is important to propose appropriate biomass use plan. “Material Flow Analysis” established by Brunner and Rechberger (2004) is well known as a similar study that assessed the environmental impacts of human activities on nutrient flow (Do et al., 2013). In Japan, the nitrogen flow analysis established by Matsumoto (2000) focusing on compartments of “farmland”, “animal” and “human” based on statistical data is well known as a forerunner for this kind of study. Based on the methods of Matsumoto (2000), Yuyama (2005) developed a method called “regional diagnosis” for estimating circulation of regional biomass. “regional diagnosis” aims to clarify the sustainability and soundness of a biomass use plan based on accurate understanding of the present conditions of the material flow of biomass use in the objective area, and compares several ideas in terms of selection of feedstock biomass, biomass conversion process, scale and disposition of biomass conversion facilities (Yuyama, 2005).

For the purpose of “regional diagnosis”, the “Diagnosis Model for Biomass Resources Circulative Use” was developed by Yuyama (2004). Structure of it is similar to the concept of “Material Flow Analysis” established by Brunner and Rechberger (2004) (Matsuno et al., 2006). Applied biomass is composed of organic wastes such as livestock wastes, agricultural residues, food processing residues, wood or fish wastes, garbage and sludge of domestic waste water, which are available abundantly in rural areas. Evaluated parameters are nitrogen, phosphorus, potassium, carbon and raw weights of each material. Basic unit areas are municipalities, and “agricultural fields”, “livestock facilities”, “water bodies”, “human living areas”, “food processing facilities” and “recycling facilities” (Yuyama, 2004). The method has been used for estimation of major sources of nitrogen loads and examination of the effectiveness of measures to reduce nitrogen loads to water bodies in river basins of Japan (Matsuno et al., 2006). Following these studies, this study will use this method extensively to clarify and evaluate the present conditions of biomass use and regional environment in an objective area. However, to adapt this method to developing countries such as Vietnam in which available data is limited, the structure may have to be simplified to be suitable for the site. Thus, this issue will be a main focus in **Chapter 3**.

2.3 Fertilizer Effects of Digested Slurry on Rice Plants

Digested slurry contains specific amounts of nitrogen, potassium and phosphorus as mentioned in **Chapter 1**, making it a potential fertilizer for plants. Digested slurry has almost the same effects as chemical fertilizers under various application conditions. Li et al. (2003) indicated that the effects of cattle digested slurry applied by spreading onto the soil surface at both basal and top-dressing (both were after transplanting) on plant length, leaf area index (LAI), grain yield, or biomass of edible rice were not significantly different from those of chemical fertilizers with approximately equal nitrogen application rates in a field experiment with clay loam. Miho et al. (2004) reported that the plot with digested slurry applied by spreading onto or into the surface water at both basal and topdressing showed almost the same effects on growth and production of edible rice as chemical fertilizers with the same nitrogen application rates in a field experiment. Sunaga et al. (2009) and Win et al. (2009) reported that rice growth and biomass production of high-yielding rice was almost the same in plots with cattle digested slurry applied by spreading onto the soil surface and immediately plowing at basal, and spreading onto surface water at topdressing as plots with chemical fertilizers applied at the same nitrogen application rate in the lysimeter experiments using gray lowland soil. Zenmyo et al. (2009) indicated that rice growth of edible rice with digested slurry applied was almost the same as chemical fertilizer by the same application method of Sunaga et al. (2009) and Win et al. (2009) with pot experiments using gray lowland soil. Koga et al. (2010) showed that application of digested

slurry as top-dressing by pouring with irrigation water onto the field increased yield components such as grain number per head of rice plants and grain yield of edible rice in the field experiments, and concluded that digested slurry is effective for growth and yield of rice plants when used as a top-dressing. Watanabe et al. (2011) reported that there was no significant difference in yield, taste, dry weight and nitrogen content of rice plants at the heading stage in plots with digested slurry applied by spreading onto soil surface and plowing immediately or injection into soil at basal and spreading onto soil surface with irrigation water at topdressing as the plot with chemical fertilizer applied at approximately the same nitrogen application rates. Kamioka and Kamewada (2011) indicated that almost the same rice growth and yield of edible rice was obtained when using cattle digested slurry as basal by spreading onto surface water, and plowing immediately similar to the use of chemical fertilizer of the same nitrogen application rate in field experiments. Mihara et al. (2011) showed almost the same rice growth and yield of edible rice when using digested slurry as basal and topdressing both by spreading in the surface water after transplanting similar to treatment of chemical fertilizer with twice the rate of nitrogen application as chemical fertilizer in the field experiment with gray lowland soil. Phayom et al. (2012) reported that the use of digested slurry as topdressing with periodic application to poor sandy loam soil increased N uptake, agronomic efficiency, which is the increase in grain yield per unit N input (Li et al., 2003), and fertilizer N recovery efficiency when compared with the use of chemical fertilizer as mainly basal. Nishikawa et al. (2012) reported that at the standard nitrogen application rate for edible rice (10 g m^{-2}), almost the same grain yield was obtained in plots with cattle slurry applied as basal or split applications and topdressing as in plots treated with chemical fertilizer for an average of seven years with yearly applications. They also indicated the split application of digested slurry improved N efficiency in rice plants in field experiments with grey lowland soil.

The above previous studies show that the application rate of digested slurry was decided based on ammonia-nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) (Win et al., 2009; Kamioka and Kamewada, 2011; Nishikawa et al., 2012) or based on total nitrogen (T-N) (Miho et al., 2004; Zenmyo et al., 2009; Koga et al., 2010; Mihara et al., 2011; Phayom et al., 2012) in the digested slurry. Appropriate application rate for digested slurry should be decided according to various factors such as field conditions, application method, chemical properties of digested slurry, or inorganic N mineralized from the soil that sometimes accounts for 60-70% of the total N uptake during the growing period (Nishikawa et al., 2012).

There are also reports that digested slurry decreased rice growth and production when compared to chemical fertilizers. Ammonia volatilization was increased by high pH, high $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations in surface water, high water temperature or high wind speed (Hayashi et al., 2008). Therefore, nitrogen loss by ammonia volatilization should be taken into account in application of digested slurry with high pH and high $\text{NH}_4\text{-N}$ concentrations to paddy fields. Zenmyo et al. (2009) reported that tiller number, shoot dry weight and the gross recovery rate of nitrogen applied to edible rice decreased with the use of digested slurry by spreading on the soil surface and plowing immediately at basal, and spreading onto surface water at topdressing in a pot experiment with gray lowland soil, and concluded that this may be due to nitrogen loss by ammonia volatilization. Watanabe et al. (2011) also reported that use of digested slurry by pouring with irrigation water as basal decreased yield, dry weight and nitrogen content of rice plants at the heading stage in field experiments. Miho et al. (2004), Sunaga et al. (2009), Win et al. (2009; 2010), Sasada et al. (2011) and Chen et al. (2013) reported higher ammonia volatilization in application of digested slurry when compared to chemical fertilizer applications such as 13% of applied $\text{NH}_4\text{-N}$ (Win et al., 2009), 8.9% of applied $\text{NH}_4\text{-N}$ (Win et al., 2010), 2.5-2.9% of applied $\text{NH}_4\text{-N}$ (Sasada et al., 2011) and approximately 16.4% of applied N (Chen et al., 2013). Soil in Vietnam has a pH lower than 5 (Pham et al., 2006). Ammonia volatilization for surface water with a pH of 3.4 to 6.2 was low, approximately 1.7% of the N applied during the cropping period when applying urea during the wet season in the Mekong Delta Region in Vietnam (Watanabe et al., 2009). Loss of nitrogen from digested slurry in paddy fields in Vietnam with relatively low pH is not significant, but not negligible.

2.4 Environmental Effects of Application of Digested Slurry in Paddy Fields

Nitrogen in digested slurry enters the soil N pool mainly as $\text{NH}_4\text{-N}$. Li et al. (2003) reported that the $\text{NH}_4\text{-N}$ was directly used by rice or absorbed by soil clay particles, or, alternatively, could be oxidized to $\text{NO}_3\text{-N}$ and may diffuse or percolate into the soil reduction layer, and then, be lost by denitrification. They also mentioned that organic matter in digested slurry may enter the soil organic pool and contribute to the preservation of soil fertility, therefore, pollution of

underground water and streams by nitrogen and organic matter is not a major problem, if water is kept in the paddy field after application of digested slurry. Watanabe et al. (2011) reported that the nitrogen load in effluents for application of digested slurry by three different application methods, i.e. pouring with irrigation water, spreading onto the soil surface and mixing with soil, and injection into soil, were almost the same as application of chemical fertilizer, approximately 10% of nitrogen applied during cultivation. Sasada et al. (2011) indicated that the concentrations of total soluble organic C and total soluble N in the drainage water were not significantly different among the treatments of cattle digested slurry, pig digested slurry and chemical fertilizer, and the concentrations of nitrate were lower than 0.5 mg L^{-1} in all treatments during flooding in the lysimeter experiment with gray lowland soil. Kamioka and Kamewada (2011) indicated no significant difference in infiltration of inorganic nitrogen, which was approximately 2.5% of applied nitrogen, between treatments of cattle digested slurry and chemical fertilizer in the lysimeter experiment with andosol. Sunaga et al. (2009) showed that the T-N leaching in the treatments of cattle digested slurry was approximately 3%, almost the same as chemical fertilizer with the same nitrogen application rate in the lysimeter experiment with gray lowland soil. Chen et al. (2013) indicated that there was no significant difference in nitrogen load by surface discharge and percolation between treatments with digested slurry and chemical fertilizers, differences were small at approximately 0.7% and 2.0% for the N applied. From these previous results, nitrogen loads by surface discharge or percolation may not be crucial. However, the low nitrogen loads are derived from their proper water management after fertilization. For example, Watanabe et al. (2011) showed that nitrogen concentrations in surface water increased to more than 10 mg L^{-1} after application of digested slurry or chemical fertilizers of 6.0 to 7.0 gN m^{-2} and two weeks were needed to decrease to less than 1 mg L^{-1} in a field experiment. Therefore, they proposed that at least two weeks is needed to prevent surface discharge. Kamioka and Kamewada (2011) indicated that nitrogen levels in surface water at the plots treated with digested slurry and chemical fertilizers of 4.0 gN m^{-2} once increased to more than 15 mg L^{-1} after fertilization, and decreased to 0.3 mg L^{-1} in 10 days after fertilization in lysimeter experiments. Chen et al. (2013) also indicated that for 7 days after application of digested slurry or chemical fertilizer, nitrogen levels were relatively high, and concluded that it is necessary to prevent surface water overflow from the plot for 7 days after fertilization to avoid surface water pollution. These studies suggested that, to avoid pollution due to surface drainage, surface water must be kept on a paddy field for an enough period until its nitrogen concentration is reduced. They also suggested that the length of such a period could be variable according to local soil and climate conditions. This implies the necessity of conducting field experiments in the study area in Vietnam to find a suitable length of such a period.

Microbial pollution of surrounding environments with application of digested slurry should be considered if: 1) feedstock of digested slurry contains livestock or human manure, 2) fermentation is not conducted with thermophilic way, or 3) fermentation is conducted without any sterilization processes. Huong et al. (2014) reported that *E. coli* concentrations in feedstock was reduced only 1 to 2 log units during digestion, and $3.70 \pm 0.84 \log_{10} \text{ CFU}$ (CFU, colony forming unit) mL^{-1} of *E. coli* (n=146) was contained in digested slurry from household biogas digesters with feedstock of pig slurry and human excreta in Northern Vietnam. Similar reduction capacity was reported in *E. coli* for biogas digesters with feedstock of swine manure in Southern Vietnam (Kobayashi et al., 2007). Huong et al. (2014) estimated that such a limited reduction in *E. coli* suggests that bacterial pathogens like Salmonella, which has been found in 5-50% of pigs in Vietnam, and Campylobacter, which is an important cause of diarrhea in Vietnamese children, are likely to be present in the effluent from biogas systems with the feedstock of pig manure and human excreta. Contamination of rice plants and hygienic risk for humans who eat rice from the application of digested slurry should be low because rice is eaten after cooking. Prevention of microbial pollution of lower water bodies with application of digested slurry should be considered. Pathogens derived from manure-related material after being applied to paddy fields can be decreased gradually by exposition of UV radiation or increases in the pH of surface water during photosynthesis of rice plants (Ueda et al., 2003). It was indicated that fecal coliforms in surface water in paddies treated with unchlorinated secondary effluents from sewage treatment works decreased at a rate of approximately $0.6 \log \text{ day}^{-1}$ (Ueda et al., 2003). However, survival of microbes in the environment is influenced by many factors including temperature, soil types, occurrence of other bacteria and soil protozoa (Ohtomo et al., 2004), sunlight, organic matter content, etc. (Nicholson et al., 2005). Therefore, it is important to examine the microbial fates at sites, where digested slurry is applied, to prevent hygienic water pollution of lower water bodies by discharging of surface water in which sufficient decrease in pathogens is not confirmed.

2.5 Transportation and Application Methods of Digested Slurry to Paddy Fields

The utilization of digested slurry in paddy fields requires transportation of digested slurry from the biogas digesters (Thu et al., 2012) and application to the fields. As a transportation method of digested slurry, vacuum trucks are popular and usually used in Japan (Yamaoka et al., 2012). A model for planning the effective transportation and application of digested slurry to farmlands using vacuum trucks was developed in Japan (Yamaoka et al., 2009; 2011; 2012). In the model, optimal plan for transportation and application of digested slurry can be calculated considering such factors as production rate or chemical components of digested slurry, locations of the biogas plant and agricultural fields, possible application season, application rate per area, application area of fields, numbers of vacuum trucks (Yamaoka et al., 2009). The model has been developed by introducing the use of slurry spreaders (Yamaoka et al., 2011), operation with plural vacuum trucks for digested slurry and installation of intermediate tanks (Yamaoka et al., 2012).

There are three methods for application of digested slurry to paddy fields, i.e. pouring with irrigation water from an inlet using a vacuum truck, spreading on the soil surface with a digested slurry spreader, and injecting into the soil with an injector (Watanabe et al., 2011). The pouring method is applicable after irrigation and during rice growth as additional fertilization (Phayom et al., 2012). The methods for application with a spreader and injector are applicable for basal fertilization before planting (Iida et al., 2009). The spatial distribution of digested slurry focusing on nitrogen applied to a field by the pouring method has been examined by numerical analysis (Yuge et al., 2014; Inomura et al., 2010). The possibility to obtain the same or better yield with the use of digested slurry by the pouring method as by conventional cultivation with chemical fertilizers has been shown through actual field studies (Koga et al., 2010; Mihara et al., 2011). The detailed procedures for the pouring method were compiled by Iwashita et al. (2008) as follows; 1) decreasing the surface water of the field to shallow ponding conditions such as a water level of 0 cm (Koga et al., 2010) or 0.3 cm (Mihara et al., 2011) before application of digested slurry, 2) pouring digested slurry with a specific volume of irrigation water, so that the water depth increased by 4 to 5 cm (Mihara et al., 2011) on the field, 3) digging a trench when there is a shortage of irrigation water and 4) improving the land level by careful paddling. From the above, it was concluded that the pouring method is applicable in Vietnam because of fewer machines so this method was to be decided to test in this study as the first trial.

2.6 Summary

In summary, this chapter has identified the following gaps between the achievements of previous studies and the objectives of this study set in **Chapter 1**, and the approaches that will be taken in the subsequent chapters in order to close such gaps:

- 1) “Regional diagnosis” developed in Japan is an effective method to understand the present conditions of biomass use and simulate future biomass use plans at the regional level. However, since simply applying this method as it is needs a lot of detailed data, simplifying the framework of this method would be practical and helpful for applying it to developing countries such as Vietnam in which available data is certainly limited.
- 2) Effectiveness of digested slurry as fertilizer for rice plant has been studied extensively on Japanese paddy fields under various conditions such as: applications as basal or top-dressing; applications onto soil or surface water with or without plowing immediately or injecting to soil; trials of various nitrogen application rates, like adjusting the rate to be the same as the case of chemical fertilizer by the $\text{NH}_4\text{-N}$ content or the T-N content of digested slurry. However, situations for paddy fields in Southeast Asia are quite different from the ones in Japan in terms of climate, soil properties, and rice cultivation styles, etc. Warm climate may cause rapid mineralization of applied nitrogen in digested slurry and soil nitrogen. High or low pH of soil may influence the available ratio of applied nitrogen for rice plants through ammonia volatilization. Rice cultivation styles in Vietnam in which nitrogen fertilizer is applied twice or three times as top-dressing may bring different results from Japanese cases in terms of fertilizer effects of digested slurry for rice. However, there are currently few reports investigating this issue. Therefore, it is necessary to investigate the effectiveness of digested slurry as fertilizer considering appropriate application rate and timing for the site in Vietnam.
- 3) It has been shown that environmental pollution in lower water bodies such as nitrogen loads and fecal contamination through surface discharge after application of digested slurry may be prevented by keeping surface water of paddy fields for a certain period after application of slurry. However, the period of such water retention may be different

according to the situation in the paddy field. Some experiments suggested the period be seven days after fertilization, while other experiments ten days. Therefore, it is necessary to investigate the fate of nitrogen and fecal indicator microbes in surface water after application of digested slurry in paddy fields.

4) Several kinds of transportation and application methods of digested slurry to paddy fields have been developed in Japan. Vacuum trucks are popularly used for transportation, and pouring method is supposed to be the most suitable method when focusing on availability of digested slurry not only for basal but also for top-dressing and minimum necessity of equipment for adopting it. For these reasons, pouring method using vacuum trucks seems to be the most recommendable method in developing countries such as Vietnam in which specific transportation and application method of slurry has not yet existed, and nitrogen fertilizer is conventionally applied twice or three times as top-dressing. However, the conditions of paddy fields in Southeast Asian Countries are substantially different from Japan. For example, pouring method needs strict and flexible water management to achieve even spatial distribution of digested slurry as mentioned in Section of 2.5, but it may be sometimes difficult in paddy fields in Southeast Asia including Vietnam, where water management practices are not so strict nor flexible, which may sometimes cause extremely dry conditions in surface soil or deep flooding of surface water. Moreover, the cost needed for application of slurry by pouring method may be significantly different between the cases in Japan and Vietnam. If the cost becomes extremely higher than that of conventional cultivation methods with chemical fertilizers, the adoption of slurry may be difficult. For these reasons, it is necessary to investigate whether the pouring method is adoptable to paddy fields in Vietnam through field surveys and observations, and the evaluation from the economic aspect.

3. ANALYSIS OF PRESENT CONDITIONS OF BIOMASS USE IN A SUBURBAN VILLAGE IN SOUTHERN VIETNAM

3.1 Introduction

This chapter describes the present conditions of regional biomass use in preparation for proposing improved biomass scenario later in **Chapter 6** in a suburban village in Southern Vietnam. The village is one of common villages in Southeast Asia due to existence of livestock farming and rice cultivation. Data related to livestock farming, rice cultivation and so on is collected by interviews, field surveys and literature reviews, and applied to the regional diagnosis.

3.2 Methods

3.2.1 Objective Village

Objective village for this study was Thai My Village in Cu Chi District, Ho Chi Minh City, located about 43 km north-west from the center of Ho Chi Minh City as shown in **Fig. 3**. In this village, rice cultivation and livestock industries are popular. Annual rainfall is approximately 1,880 mm, and there are two seasons, a dry season and a rainy season. Household-scale methane fermentation systems using livestock excreta, called “biogas digesters” are popular

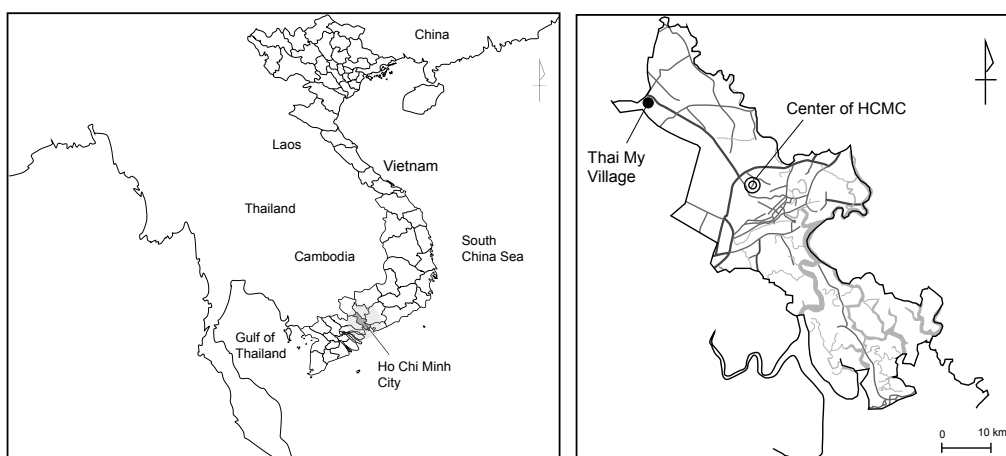


Fig. 3 Location of Ho Chi Minh City and Thai My Village

in this village through promotion by government-led programs (Vietnam Livestock Production Department MARD and Netherlands Development Organization SNV, 2013). There are 111 households that have biogas digesters with capacities of $7.8 \pm 1.2 \text{ m}^3$ in the fermentation tank volume. Information and data collected by the surveys are shown in **Table 1**.

Table 1 Data collected for regional diagnosis (Page 1 of 3)

Item	Data [(Data source)]
a. Basic information	
(a) Land use and the area	
Total area of the village	2,415 ha [(1)]
Agricultural land	1,861 ha [(1)]
Road	113 ha [(1)]
River and Canal area	123 ha [(1)]
Residential area	159 ha [(1)]
Others	159 ha [(1)]
(b) Population	
Population	10,849 people [(1)]
Number of households	2,873 households [(1)]
Number of farmer households	967 households [(1)]
Agricultural workers	2,224 people [(1)]
(c) Variety and usage of energy at home	
Fuel variety	Electricity, Wood, Biogas, Rice straw and husk [(1)]
Usage of fuel	Electrical equipment, Lighting, TV, Radio, Stove burner, Cooking [(1)]
(d) Conditions of sources for drinking water	
Water well in house (Depth; 4-50 m), Tank for drinking water [(1)]	
(e) Environmental problems	
Discharge of large quantity of untreated pig excreta [(1)]	
b. Agricultural information	
(a) Main crop situation, annual planted area	
Rice	544 ha, 2 or 3 crops in a year according to the economic situation or field conditions [(2)]
Corn and peanuts	200 ha [(2)]
Vegetables	75 ha [(2)]
Fruits	146 ha [(2)]
(b) Agricultural machinery	
Machinery types and numbers in the village	Combine; 2 equipment Tractor; 7-8 equipment Rice mill; 4 equipment Tilling machinery Water pump [(2)]
Fuel types for machinery	Diesel oil (for large machinery) Gasoline (for small machinery) [(2)]
c. Information about rice cultivation	
(a) Variety and application rate of fertilizer	Mixed fertilizer of NPK, Urea, Phosphorus, Potassium, etc. $500\text{-}900 \text{ kg ha}^{-1}$ (crop season) ⁻¹ (total weight of fertilizers) [(3)]
(b) Method for water management	By portable pump owned by farmer through canals nearby the field [(4)]
(c) Water quality of canal and river	Shown in Table 2 [(5)]

Table 1 Data collected for regional diagnosis (Page 2 of 3)

Item	Data [(Data source)]
(d) Amount of irrigation water	10,286.28 t ha ⁻¹ y ⁻¹ [(App. 1-1 No. 7)]
(e) Annual precipitation	18,818 t ha ⁻¹ y ⁻¹ [(App. 1-1 No. 4)]
(f) Ammonia volatilization	0.0017 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ [(App. 1-1 No. 21)]
(g) Denitrification	0.03 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ [(App. 1-1 No. 19)]
(h) Nitrogen fixation	0.0178 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ [(App. 1-1 No. 13)]
(i) Carbon dioxide emissions	14.2 t ha ⁻¹ y ⁻¹ (2,952 t y ⁻¹) [(App. 1-1 No. 24-27)]
(j) Percolation	202 mm (crop season) ⁻¹ [(App. 1-1 No. 22)]
(k) Methane gas emissions	160 kg ha ⁻¹ y ⁻¹ [(App. 1-1 No. 24)]
(l) Yield and by-products	
Yield	Winter-spring crop; 5.0-6.0 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ [(1), (6)]
	Spring-summer crop; 3.0-4.0 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ [(1), (6)]
	Sumer-autumn crop; 3.0 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ [(1)]
Average yield	4.0 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (2,176 t y ⁻¹) [(1), (6)]
*Yield indicates 15% moisture for unhulled rice.	
*Rice is harvested 10-20 cm above the ground, so rice straw is divided into upper part and lower part.	
Rice husk	0.798 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (434 t y ⁻¹); Used for making compost [(1), (6)]
Rice bran	0.351 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (191 t y ⁻¹); Used for livestock feed [(1), (6)]
Rice straw (Upper part)	2.97 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (1,618 t y ⁻¹); Not used, burned in the field 0.74 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (405 t y ⁻¹); Shipment to outside 0.74 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (405 t y ⁻¹); Used for livestock feed (In total; 2,428 t y ⁻¹) [(1), (6)]
Rice straw (Lower part)	1.07 t ha ⁻¹ (crop season) ⁻¹ (582 t y ⁻¹); Remained, burned in the field [(1), (6)]
d. Information about cultivation except for ric	
(a) Variety and application rate of fertilizer	
Chemical fertilizer	Corn; 3,500 kg ha ⁻¹ y ⁻¹ , Vegetables; 2,560 kg ha ⁻¹ y ⁻¹ Fruits; 4,000 kg ha ⁻¹ y ⁻¹ [App. 1-2 No. 3, 9, 12]
Compost	25 t ha ⁻¹ y ⁻¹ [App. 1-2 No. 5]
(b) Nitrogen fixation	0.11 t ha ⁻¹ y ⁻¹ [App. 1-2 No. 29]
(c) Carbon dioxide emissions	9.2 t ha ⁻¹ y ⁻¹ (3,859 t y ⁻¹) [App. 1-2 No. 32, 33]
(d) Nitrogen loss by emission	0.018 t ha ⁻¹ y ⁻¹ [App. 1-2 No. 31]
(e) Percolation	5,648 t ha ⁻¹ y ⁻¹ (2,377,969 t y ⁻¹) [App. 1-1 No.4, App. 1-2 No. 1, 34, 35]
(f) Yield	Corn; 7.5 t ha ⁻¹ y ⁻¹ , Vegetables; 62.95 t ha ⁻¹ y ⁻¹ Fruits; 0.824 t ha ⁻¹ y ⁻¹ [App. 1-2 No. 14, 17, 20]
e. Information about livestock	
(a) Kinds and numbers	
Beef cow	1,659 heads [(7)]
Milk cow	61 heads [(7)]
Buffalo	400 heads [(7)]
Pig	11,000 heads [(7)]
Poultry	8,000 heads [(7)]

Table 1 Data collected for regional diagnosis (Page 3 of 3)

Item	Data [(Data source)]
(b) Method of livestock raising, variety of feed	
Beef cow and buffalo	Raised outside during daytime and in cattle shed at night [(8)]
Milk cow and pig	Raised in cattle shed [(8)]
Feed	Bran, grass, etc. [(8)]
(c) Generation rate of livestock excreta and its contents	
Pig	Feces; 0.73 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 18.68%, N; 0.83%) Urine; 0.49 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 0%, N; 32.5%) [App. 1-3 No. 2-6]
Beef	Feces; 8.22 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 15.75%, N; 0.7%) Urine; 4.56 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 0%, N; 27.1%) [App. 1-3 No. 8-12]
Milk cow	Feces; 8.22 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 8.55%, N; 0.38%) Urine; 4.56 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 0%, N; 27.1%) [App. 1-3 No. 14-18]
Buffalo	Feces; 8.22 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 6.98%, N; 0.31%) Urine; 4.56 t head ⁻¹ y ⁻¹ (C; 0%, N; 27.1%) [App. 1-3 No. 24-28]
(d) Flow of livestock excreta	
Pig excreta	Approximately 10%; Used as feedstock for biogas digester 10 t week ⁻¹ of feces; Shipped outside the village as feedstock for compost Rest discharged to lower water bodies [(8)]
Milk cow excreta	Approximately 10%; Used as feedstock for biogas digester Rest discharged to lower water bodies [(8)]
Beef excreta	Half of feces; Sold outside the village Another half of feces; Used as feedstock for composting at composting facility Rest discharged to the lower water bodies [(8)]
Buffalo excreta	Similar to beef cow excreta [(8)]
(e) Information about biogas digester	
Number in the village	111 digesters [(8)]
Capacity	7.8±1.2 m ³ [(8)]
Feedstock	Pig excreta and milk cow excreta [(8)]
Biogas generation rate	746.7 (Nm ³ (t-Carbon of feedstock biomass) ⁻¹) [(8), (9)]
Usage of biogas	Mainly cooking in farmer households [(8)]
Use or disposal of digested slurry	Partially used for trees in the backyard, adjacent crop field of farmer's house or fish pond, and mostly discharged to canals and rivers with or without passing through the soil [(8)]

(Abbreviations)

HCMUT: Ho Chi Minh City University of Technology

DOST-HCM: Department of Science and Technology

DARD-HCM: Department of Agriculture and Rural Development

VPC: Thai My Village People Committee

Cu Chi PC: People Committee of Cu Chi

App.; Appendix

(1) Interviews of VPC, DOST, Cu Chi PC and Villagers

(2) Interviews of VPC, DOST, Cu Chi PC, Villagers and DARD

(3) Interviews of VPC, Villagers

(4) Interviews of VPC, Villagers and DOST

(5) Sampling surveys conducted in Thai My Village

(6) Field surveys at test field in Thai My Village

(7) Interviews of VPC and DARD

(8) Interviews of Villagers

(9) Calculations based on data from Interviews of Villagers

3.2.2 Method of the Regional Diagnosis

The regional diagnosis method, developed by Yuyama (2005), is designed to draw a region-wide map of material flows on the basis of survey data, and conducted by the following procedures.

First, data needed for analysis of the present conditions of biomass use for the objective area were collected as described in the following section. Some data had to be substituted with Japanese ones though on-site or Vietnamese original data should be used for the regional diagnosis. Most data related to non-paddy fields were substituted with Japanese ones. However, the regional diagnosis in this study focused on material flow around paddy field compartments. Therefore, most conclusions in this study reflect the Vietnamese on-site situation.

Second, the present conditions of biomass use were represented as the “present” material flow diagram. It is composed of a “compartment (box)” that represents space to generate, convert or use biomass, and “arrow” that represents material flow. The compartments involve livestock farming, agricultural fields, biogas digesters, and composting facilities, etc. Components for analysis were raw weight, water content, carbon content and nitrogen content of feedstock biomass and products. Each value used in the material flow diagram was calculated by multiplying the specific unit of each parameter by its abundance. Specific unit was based on the surveys or literature and the data sources and detailed calculations are shown in the **Appendix 1** of this thesis.

Third, the regional diagnosis method evaluates the effects of newly installing biomass conversion facilities, such as biogas digesters, by recalculating the material flows after adjusting some input data according to future scenarios. This step will be a focus in **Chapter 6**.

3.2.3 Data Collection for Regional Diagnosis

Data for regional diagnosis was collected by interviews, field surveys and literature reviews.

Interviews were conducted from 11 to 29 January 2010 and 27 October 2010. Interviewees were farmers (30 households) and public administrations such as Vietnam Department of Science and Technology, Peoples Committee of Ho Chi Minh City (DOST-HCM), Department of Agriculture and Rural Development of Ho Chi Minh City (DARD-HCM), People committee of Cu Chi District, People committee of Thai My Village, the objective village in this study.

Field surveys of water quality in the canal, river and household wells (depth of borehole; 30-60 m) were conducted seven times in the objective village from 2010 to 2012 (21 April 2010, 30 June 2010, 26 October 2010, 14 January 2011, 19 April 2011, 12 July 2011 and 7 April 2012). Ten sampling points (SW1 – SW10) and three sampling points (GW1 – GW3) were selected for surface water and groundwater, respectively, as shown in **Fig. 4**. Field surveys at the rice cultivation test field in the objective village were conducted from 6 December 2011 to 24 March 2012, and from 11 May to 17 August 2012 to obtain data on conventional cultivation with chemical fertilizers. In these tests, rice cultivation was conducted with farmers contracted by the study team in 1 hectare of a paddy field. Data and information such as application rate of fertilizers and agrochemicals, the volume of irrigation and drainage water, yield and the amount of by-products such as rice straw, rice husk and rice bran were obtained from records of the working diary and direct measurements at the site. The volume of irrigation and drainage water was calculated by multiplying the capacity of the portable water pump used for irrigation and drainage beforehand, and recorded operating time of it. The yield was measured by weighing unhulled rice bags at harvest on 24 March 2012 and 17 August 2012 at the site, and calculated to a 15% moisture weight using moisture values obtained from weight before and after drying at 105°C for 24 hours. The ratio of rice straw to unhulled rice was calculated by weighing each part sampled at sampling points before harvesting by combine. The ratio of rice husk and rice bran to unhulled rice was calculated by measuring each weight and moisture after rice hulling.

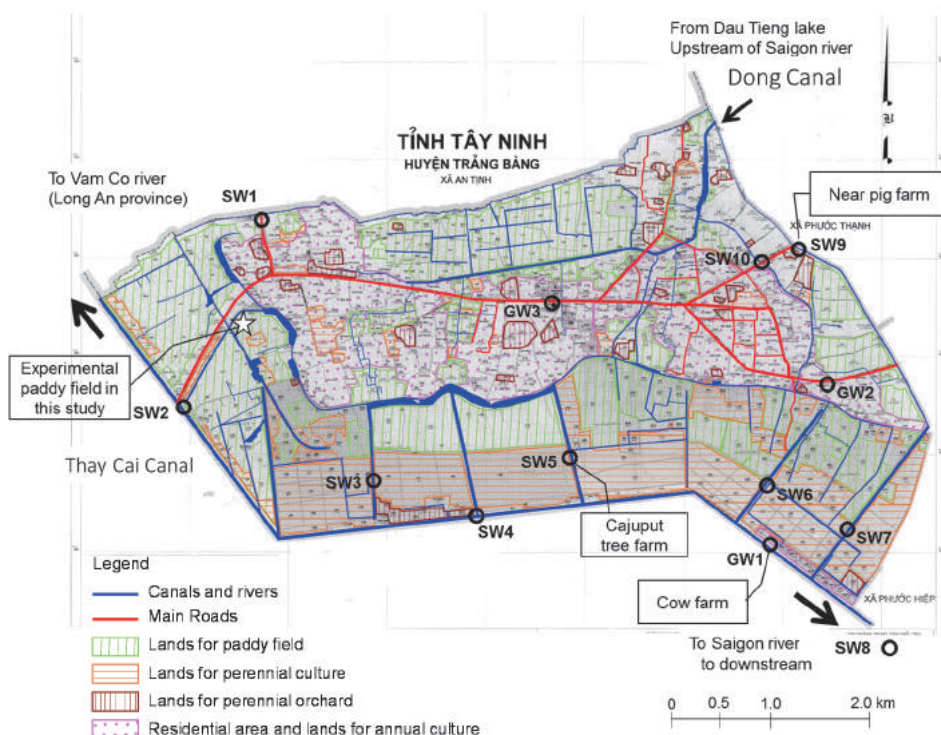
In the same test field, rice cultivation tests using slurry from biogas digesters as a substitute for chemical fertilizers was conducted to compare to the cultivation with chemical fertilizers by setting 8 m² experimental plots (Oritate et al., 2013a; Oritate et al., 2013b) from 11 December 2012 to 13 March 2013, and 200 m² experimental plots from 14 December 2013 to 26 March 2014 (Oritate et al., 2014; Oritate et al., 2015). In these experiments, data on application rate of fertilizer and agrochemicals, and yield and yield components were collected by measurements at the site. Details are shown in **Appendix 1**.

3.3 Results and Discussion

3.3.1 Estimation of Present Conditions of Biomass Use

Fig. 5 shows the results of diagnosing the present conditions on biomass use in Thai My Village. The ratio of slurry from biogas digesters to ponds as feed for fishes and to trees in the backyard of farmers' houses was very low in the village, so these descriptions were omitted from the material flow diagram. The obtained results are summarized in the following points:

- 1) Out of the total livestock excreta of 40,861 t y⁻¹, 13,683 t y⁻¹ was taken outside the village as feedstock for compost, 8,458 t y⁻¹ used in the village as feedstock for compost, 2,102 t y⁻¹ used as feedstock for biogas digesters and 16,618 t y⁻¹, that is, approximately 41% of the total discharged to the lower waterbodies without any treatment.
- 2) Nitrogen effluent load to water bodies came from untreated livestock excreta, untreated slurry from biogas digesters and discharges from agricultural fields, reaching a total of 131.6 t y⁻¹. The load from untreated livestock excreta accounted for approximately 43% of the nitrogen that cause water pollution. To decrease water pollution and promote resource circulation, use of this untreated livestock excreta as feedstock for compost or feedstock biogas digesters can be proposed.
- 3) Numbers of biogas digesters introduced were 111 units, accounting for 5% coverage, for approximately 2,102 t y⁻¹ in generated livestock excreta. In many cases, more than 5 times the volume of washing water of livestock excreta from cattle sheds is poured into biogas digesters, usage of digested slurry as liquid fertilizer is limited due to the lack of knowledge or fear of costs for transportation and application of highly-diluted digested slurry to fields.
- 4) Water quality parameters such as COD, BOD₅, NO₃-N, NH₄-N in the surface water and ground water at some sampling points, especially, near the livestock farms in the village exceeded the standard value in Vietnam (QCVN 08: 2008/ BTNMT; QCVN 09: 2008/ BTNMT) as shown in **Table 2** and **Table 3**.
- 5) Amounts of rice straw, rice husk and rice bran produced in the field was approximately 3,010 t y⁻¹, 434 t y⁻¹ and 191 t y⁻¹, respectively. Rice straw of 3,010 t y⁻¹ consists of 2,428 t y⁻¹ from the upper part and 582 t y⁻¹ from the lower part. The upper part was harvested above 10-20 cm from the ground, and lower part remained in the field. In **Fig. 5**, rice husk, rice bran and rice straw are shown as flow from "Paddy fields" to "By product". Within "By-product", 405 t y⁻¹



*About signs in above map, "SW" indicates sampling points of surface water, and "GW" indicates sampling points of ground water (depth; 30-60m)

Fig. 4 Sampling points of surface water and ground water in Thai My Village

was transported outside the village, 595 t y⁻¹ used as feed for livestock and 434 t y⁻¹ used as feedstock for compost inside the village. Whereas, 1,618 t y⁻¹ of the upper part of rice straw, which is larger than the “By product” was not used effectively and burned in the fields along with 582 t y⁻¹ of the lower part of rice straw within a few weeks after harvesting. Promotion of effective use of this unused rice straw is desired in terms of resource circulation in the region.

3.3.2 Options for Decrease of Environmental Loads by Biomass Use focusing on Energy Production

In the previous section, the necessity to promote effective use of untreated livestock excreta that is discharged into water bodies at present was proposed in terms of decrease of environmental loads and regional resource circulation. Moreover, the desirability of effective use of rice straw that is unused at present is also proposed in terms of promoting resource circulation. Among some options for use of these biomass, the use as the feedstock for regional energy production such as biogas or bio-ethanol would be sensible options. Technology for bio-ethanol production from rice straw is now under development as mentioned in **Chapter 1**, but biogas technology has already been adopted in rural areas in Vietnam as mentioned in **Chapter 2** and this chapter. Therefore, use of livestock manure as feedstock for biogas digesters is discussed hereafter. Especially, biogas digesters followed by the use of digested slurry as a fertilizer in paddy fields which occupy large area of agricultural land in the region is proposed as an effective option in terms of 1) decreasing environmental loads, 2) increasing regional energy production, and 3) saving the input of chemical fertilizers to agricultural fields. Organic components in livestock excreta are decomposed through methane fermentation processes in biogas digesters (Li, 2005), therefore, digested slurry is easier for plants to use when compared to untreated livestock excreta. However, since actual use of digested slurry in paddy fields is now rarely conducted at the site as mentioned above, it is necessary to investigate effects of it on rice as a fertilizer, environmental effects such as nitrogen pollution or fecal contamination of lower water bodies through surface discharge, and transportation and application method which is economically feasible.

Table 2 Surface water quality of rivers and canals in Thai My Village

	COD mg L ⁻¹	BOD ₅ mg L ⁻¹	NH ₄ -N mg L ⁻¹	NO ₃ -N mg L ⁻¹	TN mg L ⁻¹
SW1 ^a	89	19.7	1.5	20.1	9.0
SW2	72	18.6	1.1	1.5	6.5
SW3	138	19.1	1.6	0.9	3.0
SW4	98	28.9	3.4	1.2	7.8
SW5	84	21.1	1.2	0.4	3.2
SW6	75	20.0	3.8	1.5	9.0
SW7	125	17.1	1.5	3.3	5.6
SW8	84	27.9	3.1	4.3	8.6
SW9	254	74.0	7.4	2.3	18.5
SW10	14	5.4	0.2	0.2	0.7
QCVN08 ^b	≤30	≤15.0	≤0.5	≤10.0	-

^a SW1-SW10 are the sampling points as shown in Fig. 4. Each value is the average of all data obtained by sampling surveys except for the following missing values: all parameters of SW10 on 26 October 2010, SW6 on 14 January 2011 and SW10 on 7 April 2012 for without water at sampling points, and TN of all sampling points on 21 April 2010 for missing of analysis.

^b “QCVN08” is standard for surface water in Vietnam, “QCVN08: 2008/BTNMT”

Table 3 Ground water quality in Thai My Village

	pH	TOC mg L ⁻¹	NH ₄ -N mg L ⁻¹	NO ₃ -N mg L ⁻¹	TN mg L ⁻¹
GW1 ^a	6.4	2.2	3.1	2.7	7.1
GW2	5.8	4.9	0.2	0.3	0.5
GW3	5.4	0.9	0.1	0.5	0.8
QCVN09 ^b	5.5-8.5	-	≤0.1	-	-

^a GW1-GW3 are the sampling points as shown in Fig. 4. Each value is the average of all data obtained by sampling surveys except for the following missing values: NO₃-N and TN in all sampling points on 21 April 2010 for missing of analysis

^b “QCVN09” is standard for ground water in Vietnam, “QCVN09: 2008/BTNMT”

3.4 Conclusion

This chapter investigated the present conditions of biomass use focusing on livestock excreta treatment, rice cultivation and conditions of water quality in waterbodies. Necessary data and information were collected from literature reviews, interviews of farmers and public administrative staff, and field surveys. The material flow diagram that represents the present biomass use showed that untreated livestock excreta may cause water pollution, and some by-products from rice cultivation are not effectively used despite they are sources of energy. The effective use of these through appropriate conversion process can contribute to an increase in production of regional energy such as biogas or bio-ethanol. Especially, the use of currently untreated livestock excreta as a feedstock for biogas digesters followed by the use of digested slurry in paddy fields as a fertilizer is an effective option in terms of environmental conservation and saving the input of chemical fertilizers to agricultural fields.

In promotion of the use of digested slurry, it is necessary to investigate effects of it on rice as a fertilizer, environmental effects, and transportation and application method which is economically feasible.

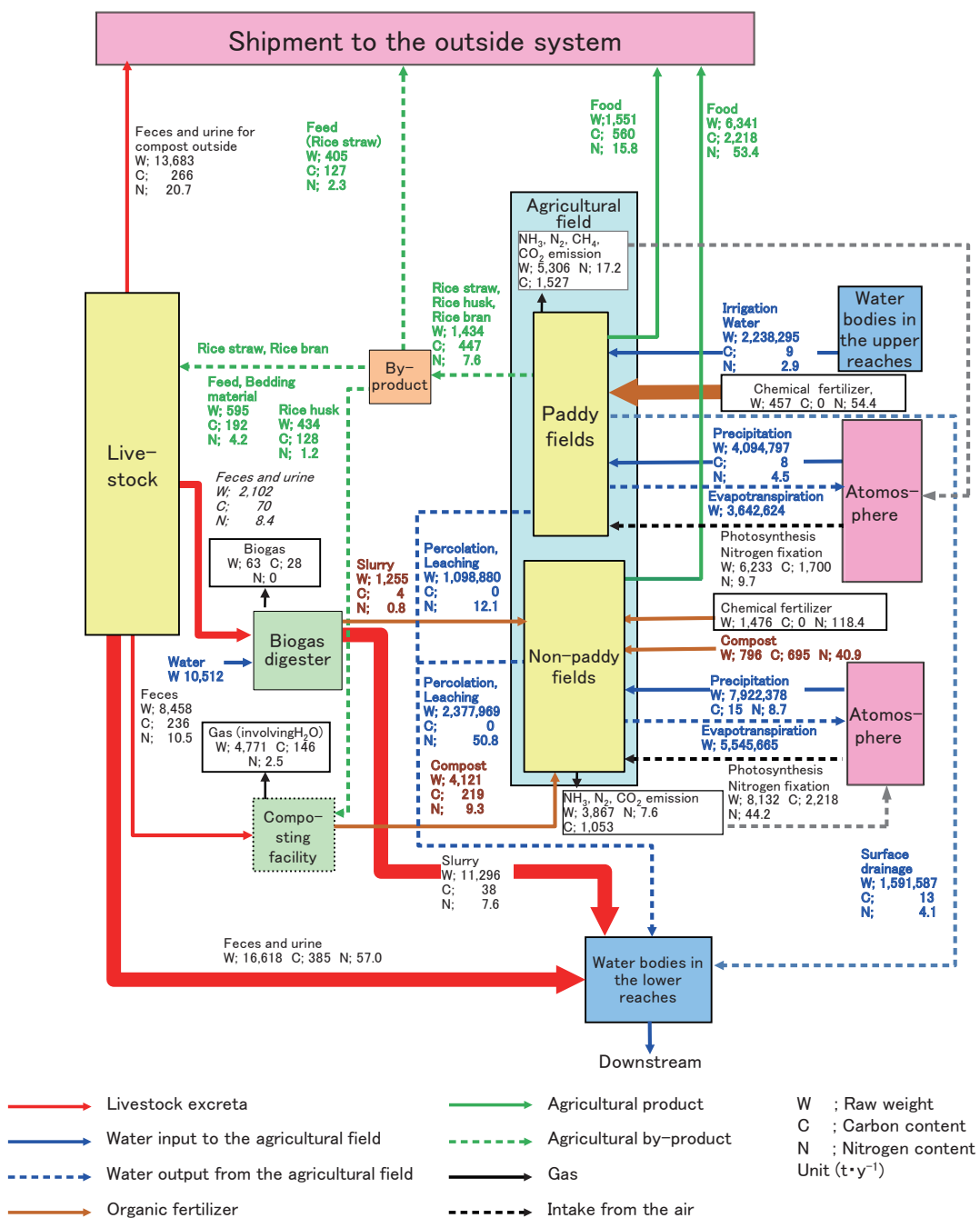


Fig. 5 Present conditions of Thai My village

4. FEASIBILITY OF USE OF DIGESTED SLURRY IN PADDY FIELDS FROM FERTILIZER EFFECT AND ENVIRONMENTAL IMPACT

4.1 Introduction

Digested slurry has a potential to be effective fertilizer and also baneful pollutants, because it contains a lot of organic substances, nitrogen and pathogenic microbes. However, effects as a fertilizer and environment impacts of digested slurry have not been quantitatively evaluated in paddy fields in Vietnam. In this chapter, fertilizer effects, fate of nitrogen and fecal indicator microbes with application of slurry are investigated by the field experiment. For evaluation of fertilizer effects, two types of nitrogen application rate focusing on T-N and $\text{NH}_4\text{-N}$ in digested slurry was prepared to propose the appropriate application rate of digested slurry at the site. For evaluation of environmental effects, prevention of pollution of lower water bodies derived from surface discharge was focused on. Fate of nitrogen components and fecal indicator microbes in surface water of a paddy field after fertilization was investigated to propose the appropriate period for keeping surface water in the paddy fields.

4.2 Materials and Methods

4.2.1 Experimental Fields and Fertilizers

An experiment was conducted during the dry season from December 2012 to March 2013 in a paddy field of Binh Ha Dong, Thai My Village, Cu Chi District (10°59'1978" N 106°22'0857" E). Areas around the experimental field in the western part of Thai My Village are low-lying land, and rice cultivation is conducted twice a year in most paddy fields. The soil is Typic Sulfaquepts (USDA 2010). Main properties of the soil in the experimental fields were: pH of 3.82, EC of 0.017 S m^{-1} , T-N of 3.4 g kg^{-1} , total carbon (T-C) of 43.1 g kg^{-1} , $\text{NH}_4\text{-N}$ of 4.45 mg 100g^{-1} , nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) of 0.02 mg 100g^{-1} , calcium oxide (CaO), magnesium oxide (MgO) and potassium oxide (K_2O) of 52.9, 41.1 and 17.1 mg 100g^{-1} , respectively.

Experimental plots for three treatments with two replicates of each 8 m^3 were set in the experimental fields as shown in Fig. 6.; 1) chemical fertilized plots (hereafter, CF), 2) digested slurry plots with the same nitrogen application rate as CF for $\text{NH}_4\text{-N}$ in digested slurry (hereafter, MF($\text{NH}_4\text{-N}$)), and 3) digested slurry plots with the same nitrogen application rate as CF for total kjeldahl nitrogen (TKN) in digested slurry (hereafter, MF(T-N)). Granulated mixed fertilizer of NPK (N: P_2O_5 : K_2O = 20: 20: 15), powdered urea and phosphorus fertilizer were applied to plot of CF. Digested slurry was collected from household scale biogas digesters of pig farmers shown in Fig. 7 in Thai My Village. The feedstock was pig manure and wash water from pig pens that was fermented at air-temperature. Collected digested slurry was transported from pig farms to a storage tank shown in Fig. 8 installed nearby the experimental paddy field. The digested slurry was sampled at the first additional fertilization on 20 December 2012. Main



Fig. 6 Experimental plots



Fig. 7 Biogas digester in a pig farm



Fig. 8 Storage tank of digested slurry

properties of the digested slurry were: pH of 7.05, EC of 0.32 S m⁻¹, TKN of 885 mg L⁻¹, NH₄-N of 322 mg L⁻¹, NO₃-N of less than 0.01 mg L⁻¹, PO₄-P of 32.7 mg L⁻¹, K⁺ of 213 mg L⁻¹, *E. coli* of 3.6E+07 CFU 100 mL⁻¹ and Coliforms of 5.40E+07 CFU 100 mL⁻¹. Nitrogen, phosphorus and potassium concentrations of this digested slurry was analyzed again at the second additional fertilization on 8 January 2013, and the values were TKN of 566 mg L⁻¹, and NH₄-N of 449 mg L⁻¹, PO₄-P of 9.92 mg L⁻¹ and of K⁺ of 236 mg L⁻¹. At the third additional fertilization, the analysis of nitrogen concentrations was failed to be conducted.

4.2.2 Rice Cultivation Schedule and Fertilization Design

Rice cultivation was conducted based on the customary cultivation schedule in Thai My Village. Rice cultivar was “OM7347” and sowed directly in the ponded field on 11 December 2012. Additional fertilization was applied 3 times on 20 December 2012, 8 January 2013 and 22 January 2013. Chemical fertilizers were applied onto the surface water, and digested slurry was applied through rice plants using a bucket onto the surface water. Harvesting was conducted on 13 March 2013. Fertilization design is shown in **Table 4**, and planned and actual application rate of fertilizers is shown in **Table 5**. Application rate of digested slurry was decided based on the nitrogen concentrations in the digested slurry sampled and measured twice before the experiment with approximately 300 and 400 mg L⁻¹ for NH₄-N and TKN, respectively. Because N concentrations in digested slurry were variable, the actual nitrogen application rate was different from originally planned one.

4.2.3 Sampling and Analysis

Sampling of surface water was conducted mainly after fertilization during the flooded term, that is, on 11, 19, 20, 21, 22, 27 December 2012 and 9, 15, 23 January 2013. NH₄-N and NO₃-N were measured by the ion chromatograph (ICS-1500, Dionex), T-N was measured by the kjeldahl method and *E. coli* and Coliforms analyzed by the surface plating method using XMG agar (NissuiPharma).

Samples of surface soil were collected at a depth of 0-10 cm before seeding, after harvesting and mainly after

Table 4 Fertilization design

Experimental Plot	20 December 2012 (The first additional fertilization)		8 January 2013 (The second additional fertilization)		22 January 2013 (The third additional fertilization)	
	Material	Fertilization rate ha ⁻¹	Material	Fertilization rate ha ⁻¹	Material	Fertilization rate ha ⁻¹
CF	Mixed fertilizer of NPK ^a	150 kg	Urea	100kg	Urea	50 kg
	Phosphorus fertilizer	400 kg				
MF(NH ₄ -N)	Slurry	1.0×10 ⁵ L	Slurry	1.5×10 ⁵ L	Slurry	0.6×10 ⁵ L ^b
MF(T-N)	Slurry	0.8×10 ⁵ L	Slurry	1.2×10 ⁵ L	Slurry	0.5×10 ⁵ L

^a Components of mixed fertilizer of NPK are N: P₂O₅: K₂O=20: 20: 15,

^b Planned application rate: 0.8×10⁵ L

Table 5 Planned and actual application rate of fertilizers

	Planned fertilization rate ^a (kg ha ⁻¹)			Actual fertilization rate ^b (kg ha ⁻¹)		
	N T-N (NH ₄ -N)	P ₂ O ₅	K ₂ O	N T-N (NH ₄ -N)	P ₂ O ₅	K ₂ O
CF	100	94	47	100	94	47
MF (NH ₄ -N)	132 (99)	-	-	209 (128)	12	86
MF(T-N)	100 (75)	-	-	166 (102)	10	69

^a Application rate of each fertilizer was planned focusing on nitrogen application rate

^b Actual fertilization rate was calculated by analyzed values of N, P and K in the slurry and applied volume of slurry at each fertilization. Analyzed values of the slurry at the second fertilization were also used as the concentrations of N, P and K for the actual fertilization rate at the third additional fertilization

fertilization, that is, on 11, 19, 20, 21, 27 December 2012 and 8, 9, 15, 22, 29 January 2013 and 13 March 2013. $\text{NH}_4\text{-N}$ in soil was extracted with 10% KCL solution (volume of KCL solution: dry weight of soil was 10:1), and measured by the indophenol blue colorimetric method (Hidaka, 1997) with a spectrophotometer (U-1900, Hitachi). $\text{NO}_3\text{-N}$ in the soil was extracted with diluted water (volume of distilled water: dry weight of soil was 10:1), and measured by the ion chromatographic method (Kihou, 1997) with ion chromatograph (ICS-1500, Dionex). *E. coli* and Coliforms in the surface soil were analyzed by the overlaying method using XMG agar (Nissuipharma).

Yield and yield components, namely height of plants, numbers of ears per 1 m², numbers of grains per ear and total nitrogen content of unhulled rice, were measured at harvest. Yield was calculated as the weight of unhulled rice with moisture of 15%w.b. Protein content of rice was calculated based on the values for total nitrogen (Nakamura and Yuyama, 2005) analyzed by CHNS-Analyzer (Euro EA 3000, Euro Vector).

4.3 Results and Discussion

4.3.1 Influence on Rice Production of Digested Slurry

Table 6 shows the yield and yield components. Although it would be difficult to make statistically rigid arguments due to the few number of data, the results in **Table 6** might suggest the following points.

There was no statistically-significant difference (t-test*, $\alpha=0.05$) among the experimental plots in yield, ears per 1 m² and gains per ear. Protein content of rice derived from T-N content in rice was highest in the following order; MF($\text{NH}_4\text{-N}$), MF(T-N) and CF. A higher content of protein in rice decreases the flavor (Ueno et al., 2011), so the flavor of the rice would not be inferior with the use of digested slurry as a fertilizer, but it may become inferior in case nitrogen application rate is increased.

According to **Table 5**, application rate of T-N became approximately twice in MF($\text{NH}_4\text{-N}$) and 1.7 times in MF(T-N) larger than in CF, and approximately 1.3 times in MF($\text{NH}_4\text{-N}$) larger than in MF(T-N) and CF as a result of the fluctuations in nitrogen concentrations of digested slurry of the biogas digester in pig farm.

From the above, it can be concluded that nitrogen in digested slurry can substitute for chemical fertilizers. The lower application rate of digested slurry for rice production same to conventional cultivation would be desirable to reduce the risk of nitrogen loads from paddy fields to lower water bodies.

4.3.2 Fate of Nitrogen in the Field after Fertilization

Fig. 9 (a) and **(b)** show the fate of T-N and $\text{NH}_4\text{-N}$ in the surface water, respectively. $\text{NO}_3\text{-N}$ was very low in the surface water (below 0.5 mg L⁻¹) during cultivation, so the values are omitted from the graph. Extreme high values of T-N observed on 23 January may be derived from a disturbance of surface soil at sampling or contamination with suspended matter in the surface water. T-N and $\text{NH}_4\text{-N}$ in the surface water increased after the additional fertilization. T-N levels were high in all plots, more than 20 mg L⁻¹ even 1 week after the first additional fertilization. Whereas, T-N in the surface water of CF decreased to less than 10 mg L⁻¹ in 1 week after the second additional fertilization though both MF plots were over 10 mg L⁻¹. $\text{NH}_4\text{-N}$ in the surface water for MF($\text{NH}_4\text{-N}$) and MF(T-N) were over 10 mg L⁻¹ even 1 week after the first additional fertilization, and remained over 5 mg L⁻¹ during cultivation though $\text{NH}_4\text{-N}$ in the surface water of CF gradually decreased to below 3.0 mg L⁻¹, and did not show any remarkable increase after that. The concentrations were higher for MF($\text{NH}_4\text{-N}$) than MF(T-N). This may partly be because of the decomposition of organic nitrogen in the digested slurry after application to the field. More examination is required to estimate the appropriate duration for prevention of surface discharge from the plots with digested slurry applied to prevent nitrogen pollution of lower water bodies.

Table 6 Yield and yield components

Experimental Plot	Yield kg ha ⁻¹	Plant height cm	Ears m ²	Grains ear ⁻¹	T-N %	Protein %
CF	10,176±294	86±5	761±72	89±17	1.51	8.97
MF($\text{NH}_4\text{-N}$)	11,751±1,228	88±4	622±22	133±3	1.53	9.12
MF(T-N)	9,489±544	95±4	806±150	151±36	1.51	9.01

Remark: n=1 in T-N and protein, n=2 in yield, ears m² and grains ear⁻¹, n=10 in plant height

* with Bonferroni correction

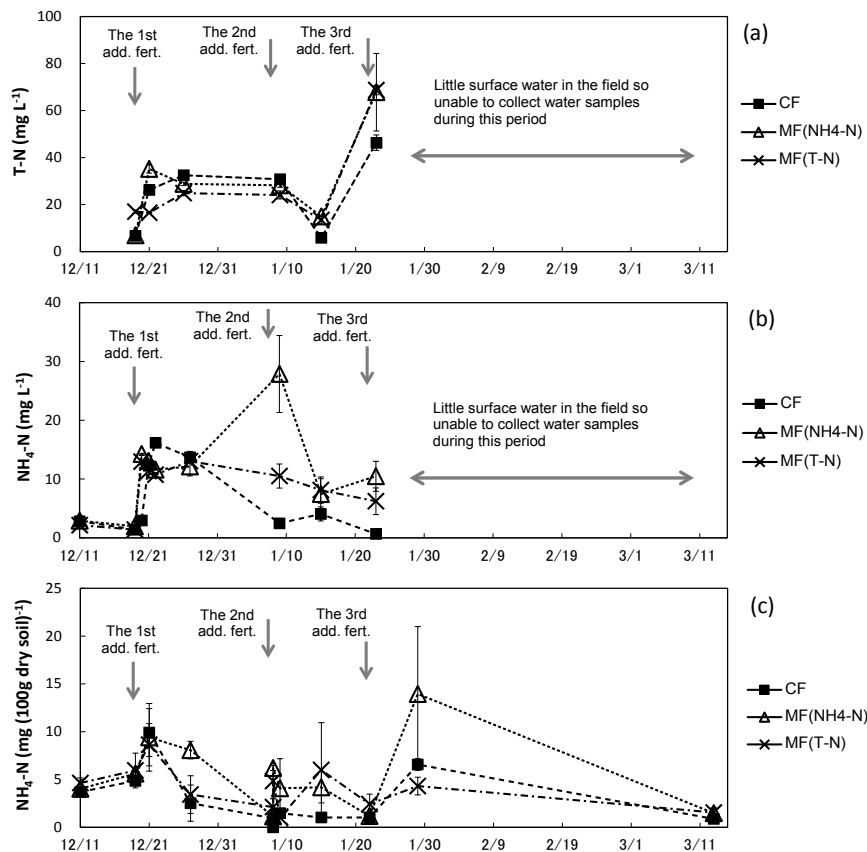


Fig. 9 (a) T-N in surface water, (b) $\text{NH}_4\text{-N}$ in surface water, (c) $\text{NH}_4\text{-N}$ in surface soil (n=2)

Fig. 9 (c) shows the fate of $\text{NH}_4\text{-N}$ in surface soil. $\text{NO}_3\text{-N}$ in surface soil was also very low (below $2.0 \text{ mg (100 g dry soil)}^{-1}$) during cultivation, similar to the surface water, so it is omitted from the graph. $\text{NH}_4\text{-N}$ in the surface soil increased after fertilization and then gradually decreased. The value was higher in MF($\text{NH}_4\text{-N}$) than CF throughout the cultivation.

4.3.3 Fate of *E. coli* and Coliforms in the Field after Fertilization

Fig. 10 (a) and (b) show the fate of *E. coli* and Coliforms in surface water, respectively. *E. coli* and Coliforms in surface water at MF($\text{NH}_4\text{-N}$) and MF(TN) increased to a maximum of $1.0\text{E}+07 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$ after application of digested slurry, but decreased below non-detectable levels (less than $1.0\text{E}+02 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$) within a week and did not show subsequent increases. This result is similar to the findings by Ueda et al. (2003), who conducted experiments by applying unchlorinated secondary effluent from sewage treatment works to the paddy field model, and showed that fecal coliforms in the surface water of the paddy field model decreased 0.6 log day^{-1} and below $1.0\text{E}+03 \text{ CFU } 100 \text{ mL}^{-1}$ which was the WHO guideline on wastewater reuse for unrestricted irrigation (Mara and Cairncross, 1989) within a week, and concluded that the reason may be the exposition of UV radiation or increases in pH of surface water during photosynthesis of rice plants (Ueda et al., 2003). From this, at least 1 week of prevention of surface discharge from the plots with digested slurry applied is needed to prevent fecal contamination of lower water bodies.

Fig. 10 (c) shows the fate of *E. coli* in the surface soil. *E. coli* in MF($\text{NH}_4\text{-N}$) and MF(T-N) showed a slight increase ($1.0\text{E}+02 \text{ CFU g}^{-1}$) with the first application of digested slurry. However, it decreased to a non-detective level (less than $1.0\text{E}+01 \text{ CFU g}^{-1}$) within a week and no subsequent increase was observed during cultivation. The reason for decreasing of *E. coli* and Coliforms were not investigated certainly in this experiment, but lower pH value of less than 4, other bacteria or protozoa in the soil would reduce *E. coli* and Coliforms.

Coliforms in the surface soil showed a similar trend as *E. coli* until 22 January 2013, but increased again after 22 January 2013 (omitted from the graph). Considering the trends of *E. coli*, increases in Coliforms are not likely from digested slurry, so will be investigated in a future study.

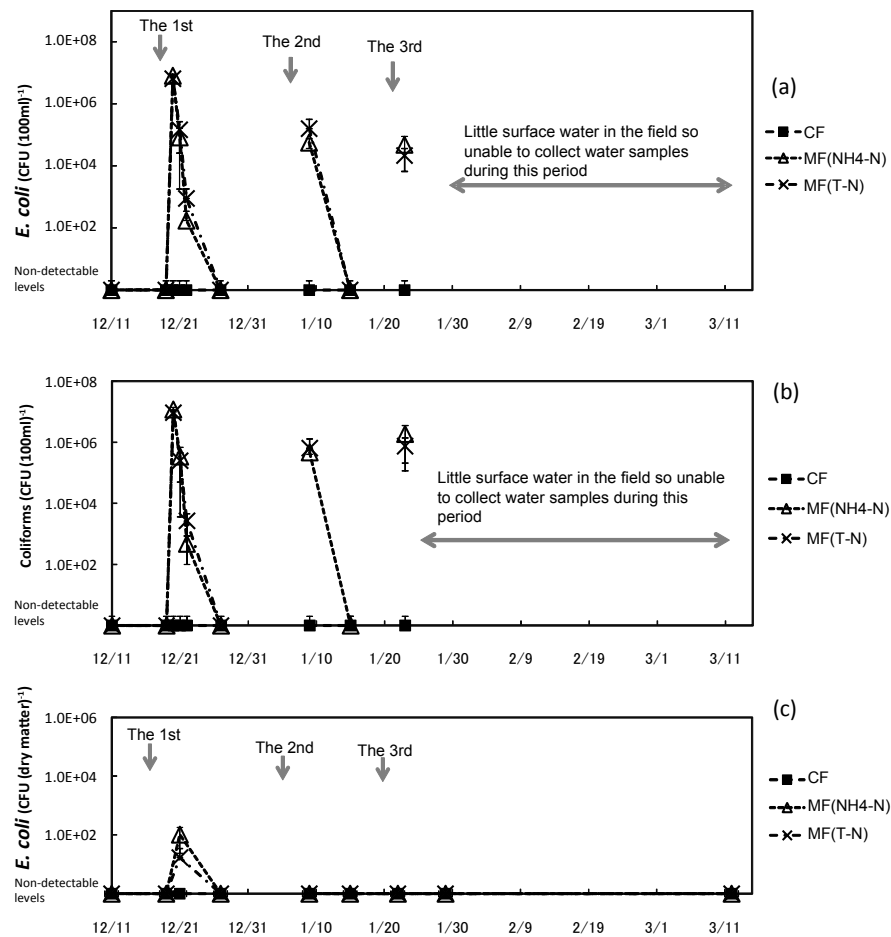


Fig. 10 (a) *E. coli* in surface water, (b) Coliforms in surface water, (c) *E. coli* in surface soil.

4.4 Conclusions

Fertilizer effects of digested slurry on rice, the fates of nitrogen components and fecal indicator microbes in surface water after application of digested slurry as an additional fertilizer was investigated with the field experiment at the site with comparisons of chemical fertilizer treatments to evaluate the feasibility of use of digested slurry as a fertilizer in paddy fields in Southern Vietnam.

There were no statistically-significant differences between the plots with digested slurry applied and the plots with chemical fertilizers applied in yield and yield components, so digested slurry can be substituted for chemical fertilizer with no bad effects on the rice, and the lower application rate of digested slurry for rice production same to conventional cultivation would be desirable to reduce the risk of nitrogen loads from paddy fields to lower water bodies.

T-N in surface water of the plots with digested slurry applied were greater than 20 mg L⁻¹ in 1 week after the first additional fertilization and more than 10 mg L⁻¹ in 1 week after the second fertilization. NH₄-N in surface water was greater than 10 mg L⁻¹ in 1 week after the first additional fertilization, and remained over 5 mg L⁻¹ during cultivation. From this results, more examination is required to estimate the appropriate duration for prevention of surface discharge from the plots with digested slurry applied to prevent nitrogen pollution of lower water bodies.

E. coli and Coliforms in surface water of the plots with digested slurry applied increased just after application of digested slurry, but decreased to non-detectable levels within a week. *E. coli* and Coliforms in the surface soil showed similar trends. Based on these results, at least 1 week of prevention of surface discharge from the plots with digested slurry applied is needed to prevent fecal contamination of lower water bodies.

5. FEASIBILITY OF USE OF DIGESTED SLURRY IN PADDY FIELDS FROM ECONOMICAL ASPECT

5.1 Introduction

Application of digested slurry to paddy fields requires higher costs and larger burdens on labor than chemical fertilizers because larger volume of digested slurry has to be conveyed to satisfy equivalent nutrient demands supplied by chemical fertilizers. To make feasible the use of digested slurry in paddy fields, economical transportation and application methods of digested slurry should be proposed. In this chapter, demonstration of transportation and application of digested slurry is conducted, and time, labor, fuel consumption, etc. for each procedure are monitored. The costs of application of digested slurry are compared to chemical fertilizers, and feasibility of use of digested slurry is evaluated from economical aspects.

5.2 Materials and Methods

5.2.1 Digested Slurry used for This Study

A study site was Thai My Village, Cu Chi District in Ho Chi Minh City. There were approximately 111 small scale biogas digesters with fermentation tank capacities of $7.8 \pm 1.2 \text{ m}^3$ in the study area as mentioned in **Chapter 3**. Digested slurry for the experiments was taken from household scale biogas digesters of adjacent two pig farms for each slurry application in Thai My Village. The distance between the experimental field and pig farms was 5.3 km. Each location is shown in **Fig. 11**. The digesters ferment pig manure and pig pen washing water at air temperature. Properties of the digested slurry are shown in **Table 7**. Because large volumes of washing water enter the biogas digesters, nitrogen concentrations in the digested slurry are lower when compared to ordinary digested slurry in Japan with a range of 1,000 – 3,000 mg L^{-1} of T-N (Nakamura et al. 2012).

5.2.2 Prototype Slurry Tanker

Vehicles for transportation of digested slurry are rarely available in rural areas of Vietnam. Therefore, an original prototype slurry tanker was manufactured with assemblage of a 3 m^3 plastic tank, tractor trolley, motor pump and generator. Details including dimensions, specifications and price of the equipment are shown in **Table 8**. Total cost of the prototype slurry tanker was 3,554 USD. This cost does not include the cost for assemblage because farmers can do it themselves. Materials are commonly available on-site. The prototype slurry tanker was towed by a 55 HP (horsepower) tractor. Tractors are usually rented for farm work in the village. The rental fee of a tractor with an operator is 23.85 USD half-day⁻¹ (half-day indicates 4 hours). Appearance of the prototype slurry tanker and tractor is shown in **Fig. 12**.

5.2.3 Experimental Field

Experiments were conducted in 300 m^2 plots as shown in **Fig. 13**, set with plastic sheets in a paddy field of Binh Ha Dong, Thai My Village, Cu Chi District, Ho Chi Minh City ($10^{\circ}59'1978'' \text{ N } 106^{\circ}22'0857'' \text{ E}$) (**Fig. 11**). In this village, pig farming and rice cultivation are common. A control plot was also set outside the experimental plot shown in **Fig. 13** and was conventionally cultivated using chemical fertilizers.

Areas containing the experimental fields were located in low-lying lands and rice cultivation conducted twice a year in most paddy fields. The soil was Typic Sulfaquepts (USDA 2010). Main properties of the soil in the experimental fields were: pH of 3.93, EC of 0.016 S m^{-1} , T-N of 3.9 g kg^{-1} , T-C of 49.4 g kg^{-1} , $\text{NH}_4\text{-N}$ of $1.81 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$ and less than $0.1 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ of $\text{NO}_3\text{-N}$.

5.2.4 Cultivation Schedule and Fertilization Method

Experiments were conducted during the rainy season from April to July 2013. Rice cultivar was “OM6976” and sowed directly in the flooded field on 12 April 2013. Fertilization was conducted as shown in **Table 9**. Schedules and rates of each chemical fertilizer application were based on on-site conventional cultivation. First and second additional fertilizations were conducted when rice was in the tillering stage and the third additional fertilization was done just before the booting stage. Fertilization dates and nitrogen application rates for the experimental plot were planned the same as the control, but the first additional fertilization on 25 April 2013 was postponed because the rice plants were too small. Therefore, application for the first additional fertilization was distributed with the second and the third additional fertilizations.



^a Location of pig farms refer to Vision Tech Inc. (2011)

Fig. 11 Location of the experimental field, the biogas digesters and pig farms in Thai My Village

Table 7 Properties of digested slurry and irrigation water

		pH	EC S m ⁻¹	T-N ^a mg L ⁻¹	NH ₄ -N mg L ⁻¹	NO ₃ -N mg L ⁻¹	PO ₄ -P mg L ⁻¹	K ⁺ mg L ⁻¹
The second additional fertilization (10 May)	Slurry	-	-	472	305	-	-	-
	Canal water	-	-	11	2	-	-	-
The third additional fertilization (31 May)	Slurry applied by 1st shuttle	7.3	0.39	312	255	<0.01	28.7	192
	Slurry applied by 2nd shuttle	7.0	0.33	264	243	<0.01	30.5	171
	Canal water	5.7	0.01	12	N.D. ^b	<0.01	N.D.	-

^a Values for T-N in this table are actually for total kjeldahl nitrogen (TKN), but the values of NO₃-N are negligible as shown above.

^b N.D. Not-Detected. (less than 0.2 mg L⁻¹)

An estimated T-N of 400 mg L⁻¹ in the digested slurry was used to calculate the application rate of nitrogen for the experimental plot. The actual nitrogen application rates were as shown in **Table 9** based on the nitrogen concentrations in digested slurry shown in **Table 7**.

For both the second and the third additional fertilizations for the experimental plot, digested slurry was applied with irrigation water from the road side of the field as shown in **Fig. 13**.

The second additional fertilization was conducted with a vacuum truck. A vacuum truck is ordinarily used for the collection and transportation of sludge from septic tanks of households. The truck had a capacity of 5.5 m³ of digested slurry as shown in **Fig. 14** and **Table 8 (b)**. **Fig. 15** showed the application of digested slurry with the truck.

The third additional fertilization was conducted with the prototype slurry tanker used for transportation and application of digested slurry. **Fig. 16** showed the application of digested slurry with the prototype slurry tanker. The reason why a vacuum truck and a proto-type slurry tanker were used in the second and third additional fertilization was to obtain the data of both types of vehicle for estimation of the cost and labor.

Harvest was conducted on 21 July for the control plot and 26 July for the experimental plot.

Table 8 Equipment used for pouring digested slurry

(a) Equipment for prototype slurry tanker

Machine/ Equipment	Machine model	HP ^a	Fuel variety	Application	Dimension Capacity/Specifications	Initial investment cost (USD) ^b			
Plastic tank	-	-	-	Stocking digested slurry	Overall dimension: (H) 1,270 x (W) 1,360 x (L) 2,280 (mm) Total capacity: 3 m ³ (Available capacity: 2.7 m ³)	143			
Tractor trolley	-	-	-	Loading tank	Overall dimensions: (W) 1,500 x (L) 2,800 (mm) Tire size: (Φ) 825 x (W) 160 (mm)	1,670			
Motor Pump	PENTAX DX100/2G	1.75	-	Collection and pouring of digested slurry	Characteristic curve				
					Q	0	6	12	18
					H	9.8	8.3	6.3	3.5
					Q: Quantity (m ³ h ⁻¹), H: Head (m)				
Generator	HONDA HG 7500 SE	13	Gasoline	Collection and pouring of digested slurry	220V, 6.0kW, Equipped with the engine of HONDA GX390	1,369			
Initial investment cost for prototype slurry tanker (Total of above equipment costs)						3,554			

^a HP: Horsepower of machine^b Data for the costs of equipment were obtained by on-site interviews of farmers and villagers.

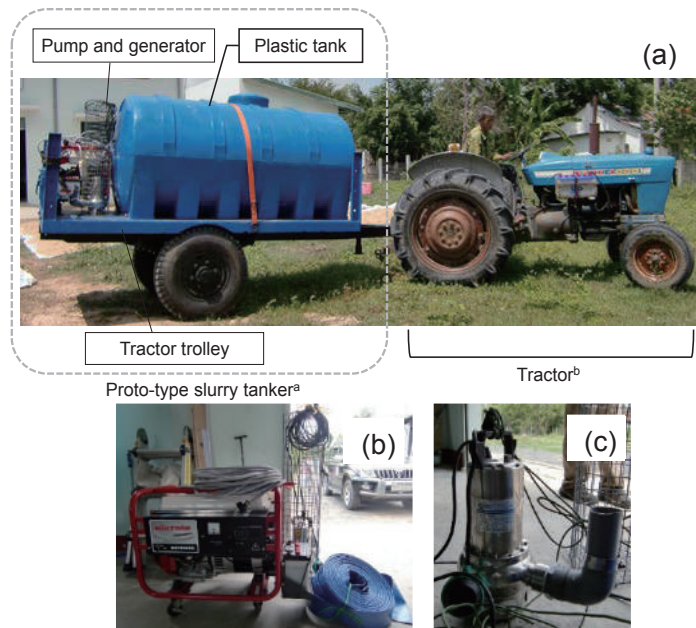
(b) Other equipment

Machine/ Equipment	Machine model	HP	Fuel variety	Use application	Remarks	Cost (USD)
Tractor	FORD 4000	55	Diesel oil	Traction of prototype slurry tanker	Rental fee of a tractor for half-day ^a	23.85
Vacuum truck	-	-	Diesel oil	Collection, transportation and pouring of digested slurry	Rental fee of vacuum truck for 1 day ^b Available capacity of tank of vacuum truck: 5.5 m ³	71.55
Engine Pump	B80NT	5.5	Gasoline	Pouring irrigation water into the field ^c	Equipped with a HONDA GX160 engine	Owned by farmers

^a Rental fee of a tractor including operation and maintenance costs, fuel cost and labor cost for 1 operator. "Half day" indicates 4 hours.^b Rental fee of a vacuum truck including operation and maintenance costs, fuel cost and labor cost for 2 operators. "1 day" indicates 8 hours.^c Engine pump prepared not only for the irrigation with slurry fertilization, but used for ordinary general agricultural works.**Table 9** Fertilization design for field experiment

Fertilization	Application rate for digested slurry m ³ m ⁻²	Experimental plot			Control plot		
		Application rates for N, P ₂ O ₅ and K ₂ O as digested slurry			Application rates for N, P ₂ O ₅ and K ₂ O as chemical fertilizers ^a		
		N g m ⁻²	P ₂ O ₅ g m ⁻²	K ₂ O g m ⁻²	N g m ⁻²	P ₂ O ₅ g m ⁻²	K ₂ O g m ⁻²
The first (25 April)	-	0.0	0.0	0.0	4.6	8.0	0.0
The second (10 May)	1.67 x 10 ⁻²	7.9	1.9 ^b	6.0 ^c	4.0	4.0	3.0
The third (31 May)	1.09 x 10 ⁻²	3.1	0.7	2.4	2.0	2.0	3.9
Total	2.76 x 10 ⁻²	11.0	2.6	8.4	10.6	14.0	6.9

^a Variety and rate of chemical fertilizers applied on each fertilization day were as follows;1) Urea of 10 g m⁻² and phosphorus fertilizer of 50 g m⁻² applied on 25 April 2013.2) Mixed fertilizer of N: P₂O₅: K₂O=20: 20: 15 for 20 g m⁻² applied on 10 May 2013.3) Mixed fertilizer of N: P: K=20: 20: 15 of 10 g m⁻² and potash fertilizer of 4 g m⁻² applied on 31 May 2013.^b Data of phosphate concentrations in digested slurry used for second additional fertilization could not be obtained. Therefore, rate was calculated based on the ratio of phosphate concentrations to total nitrogen concentrations for the third additional fertilization.^c Data of potassium concentrations in digested slurry used for second additional fertilization could not be obtained. Therefore, rate was calculated based on the ratio of potassium concentrations to total nitrogen concentrations for the third additional fertilization.



^a Prototype slurry tanker manufactured by assemblage of plastic tank, tractor trolley, generator and pump
^b Tractor rented every time for fertilization

Fig. 12 (a) Whole pictures of the prototype slurry tanker and tractor for towing, (b) Generator, (c) Motor pump

5.2.5 Survey and Analysis

At the second additional fertilization day on 10 May 2013, working procedures needed for pouring digested slurry and time for each procedures during fertilization was recorded. At the third additional fertilization day on 31 May 2013, working procedures needed for pouring digested slurry, time, fuel and costs consumed for each procedure during fertilization were recorded. Data of hourly wages for agricultural activities, price and components of each chemical fertilizer used for conventional cultivation and fuel prices were obtained by interviews of farmers and villagers.

At harvest, yield and yield components such as height of plants, numbers of ears per 1 m², numbers of grains per 1 ear were measured. At harvest, the experimental plot was divided into 12 meshes and harvested unhulled rice in each mesh was weighed and converted to yield at moisture of 15%w.b. For grains per ear and plant height, 10 rice plants from each mesh were sampled and measured. Ten rice plants were sampled from three points in the control plot and measured for grains per ear and plant height. Then, all remaining rice in the control plot was harvested all together using a combine and the yield in the control plot was obtained. T-N content of rice grains was analyzed with a NC-Analyzer (SUMIGRAPH NC-220, SCAS). T-N content of rice plants was analyzed with a NC-Analyzer (Euro EA 3000, Euro Vector).

During cultivation, precipitation was recorded with a rain gage (OW-34-BP, Ota Keiki) equipped with a data logger (UIZ3639, UIZIN).

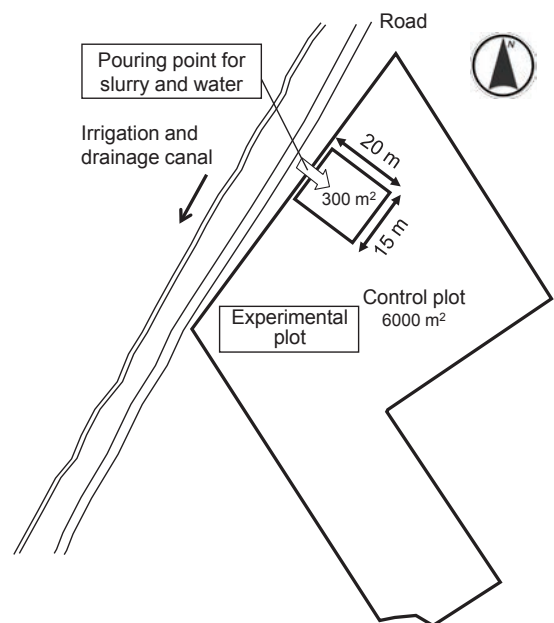


Fig. 13 Diagram of experimental field

5.3 Results and Discussion

5.3.1 Rice Production with the Use of Digested Slurry by Pouring Method

Yield and yield components for the experimental and control plots are shown in **Table 10**. Yield in the experimental plot was 485 g m^{-2} , within the range of $300\text{--}500 \text{ g m}^{-2}$ for on-site conventional cultivation (Oritate et al., 2015) and yield for Ho Chi Minh City was 392 g m^{-2} (General Statistics Office Vietnam, 2011). However, a yield of 299 g m^{-2} for the control plot was lower than the values for on-site conventional cultivation. As shown in **Table 9**, nitrogen was applied earlier in the control plot compared to the experimental plot. Therefore, there would be abundant nitrogen in the control plot, so, the vegetative growth stage may have lasted longer in control plot than in the experimental plot. This may result in the smaller yield in the control plot. Rice production in the experimental plot showed that digested slurry can be substituted as the chemical fertilizer for rice production.

5.3.2 Work Procedures, Fuel Consumption and Labor for Application of Digested Slurry

Slurry needed for the second and third additional fertilizations of the experimental plot was 5.0 m^3 and 3.26 m^3 , respectively. Slurry was transported by 2 shuttles of the prototype slurry tanker (available capacity of 2.7 m^3) for the third additional fertilization and 1 vacuum truck for the second additional fertilization (available capacity of 5.5 m^3). Slurry was collected from biogas digesters of pig farms in Thai My Village. Slurry and irrigation water were applied based on previous studies (Koga et al., 2010; Mihara et al., 2011; Kamioka and Kamewada, 2011; Iwashita et al., 2008). At both additional fertilizations, digested slurry and irrigation water were poured together until the increase of $4\text{--}5 \text{ cm}$ of water level. Water level could not be decreased to shallow ponding conditions proposed by Iwashita et al. (2008) such as a water level of 0 cm (Koga et al., 2011) or 0.3 cm (Mihara et al., 2011) just before the second additional fertilization.



Fig. 14 Photograph of vacuum truck



Fig. 15 Application of digested slurry with the vacuum truck



Fig. 16 Application of digested slurry with the prototype slurry tanker

Table 10 Yield and yield components in experimental plot and control plot

		Yield	Ears per 1m^2	Grains per 1 ear	Plant height	Nitrogen content of rice grain	Nitrogen content of rice plants
		g m^{-2}	Ears m^{-2}	Grains ear ⁻¹	cm	%	%
Experimental plot	Average	485 (n=12)	232 (n=12)	63 (n=120)	83.3 (n=119)	1.8 (n=12)	4.9 (n=12)
	SD.	187	107.6	24.9	10.7	0.3	0.6
Control plot	Average	299	483 (n=3)	32 (n=30)	91.8 (n=30)	1.9 (n=1)	3.0 (n=3)
	SD.	-	101.9	22.7	12.5	-	0.5

By contrasts, just before the third additional fertilization, field conditions before application of digested slurry were dryer than the same conditions. for the third additional fertilization, because of poor irrigation and drainage conditions in the paddy field, and low precipitation before the third additional fertilization as shown in **Fig. 17**. Pouring rate of digested slurry was 2.98 L s^{-1} for the second additional fertilization and 4.62 L s^{-1} for the third additional fertilization as shown in **Table 11**. Pouring rate of digested slurry that we used was faster than the 2.3 L s^{-1} of Mihara et al. (2011) and 0.48 L s^{-1} of Kamioka and Kamewada (2011). Irrigation water was poured at a rate of 6.07 L s^{-1} even though Kamioka and Kamewada (2011) used a rate of 3.3 L s^{-1} . Both pouring rates in this study were based on the capacity of each pump. For spatial distribution of digested slurry in paddy fields, the flow rates shown in the past studies such as by Koga or Mihara are advantageous. On the other hand, large flow rate such as in this study is advantageous for work efficiency.

One worker and one operator for the tractor and two operators for the vacuum truck were engaged for collection, transportation and pouring of the digested slurry, and one worker took charge of the pouring of irrigation water. The data obtained for slurry fertilization was compiled as shown in **Table 11**. Labor costs for agricultural work was $1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1}$, and gasoline price was 1.06 USD L^{-1} , these data were estimated as common to slurry fertilization for proto-type slurry tanker and vacuum truck. Time for preparation and withdrawal for collection of digested slurry and time for preparation and withdrawal for pouring digested slurry were estimated at 900 seconds for 1 shuttle, respectively. Similarly, time for preparation and withdrawal for irrigation water was estimated at 900 seconds for 1 shuttle. Time required for monitoring water level of paddy field was estimated as 20% of the running time of engine pump because the intermitted monitoring will be needed for the application of digested slurry to large area of paddy fields. Rental fee of a tractor for a half day was 23.85 USD. In the study site, 1 day indicates 8 hours. This cost includes fuel for the tractor and labor for 1 operator of a tractor. Rental fee of a vacuum truck for 1 day with 2 operators was 71.55 USD. This also includes fuel for vacuum truck and labor for 2 operators.

5.3.3 Work Procedures, Fuel Consumption and Labor for Application of Chemical Fertilizer

Chemical fertilizers were manually applied by workers. The time required for fertilization per unit weight of chemical fertilizers was $6.08 \times 10^{-2} \text{ h kg}^{-1} \text{ person}^{-1}$. Application rate for each fertilizer on each fertilization day was as shown in the notes under **Table 9**. The prices of fertilizers used for the control plot were surveyed. A motor-cycle was used for transportation of chemical fertilizers from the farmer's house to the field. Maximum weight of the chemical fertilizer transported by the motor-cycle was 50 kg. Ten minutes and 0.17 L of gasoline were consumed for transportation of 1 shuttle from the farmer's house to the experimental field. The plot was irrigated before application of chemical fertilizer for the third additional fertilization, because the surface of the field was dry. Data obtained are shown in **Table 12**.

5.3.4 Comparison of Cost for Fertilization

Cost for slurry fertilization was estimated based on data obtained from the experiments as shown in **Table 8** and **9** to evaluate the feasibility of slurry fertilization from the viewpoint of economics. The estimation conditions were set as follows, and detail procedures of estimation is described in **Appendix 2**.

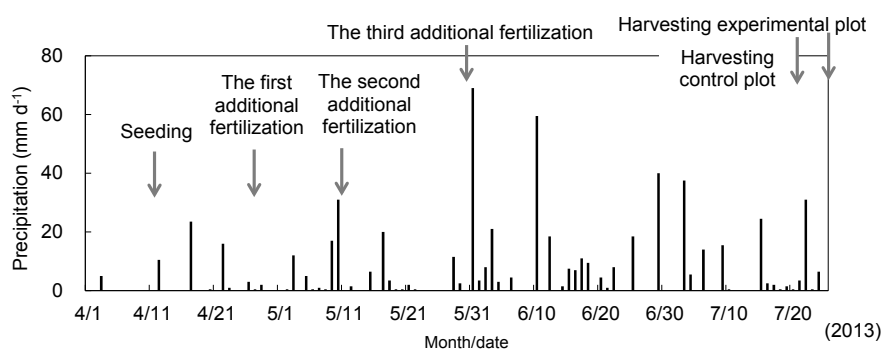


Fig. 17 Precipitation during cultivation

Table 11 Data obtained for slurry fertilization

(a) Data common to slurry fertilization for prototype slurry tanker and vacuum truck

No.	Category	Factor	Data
1	Price	Labor costs for agricultural work	1.19 (USD h ⁻¹ person ⁻¹)
2		Gasoline price (Average price in May 2013)	1.06 (USD L ⁻¹)
3	Collection of digested slurry	Time for preparation and withdrawal for collection of digested slurry	900 (s shuttle ⁻¹) ^a
4	Pouring of digested slurry	Time for preparation and withdrawal for pouring of digested slurry	900 (s shuttle ⁻¹)
5	Pouring of irrigation water	Flow rate for pouring of irrigation water with engine pump	6.07 (L s ⁻¹)
6		Fuel consumption rate for engine pump during irrigation	8.91 x 10 ⁻⁴ (L s ⁻¹)
7		Time for preparation and withdrawal of irrigation water	900 (s shuttle ⁻¹)
8		Time for monitoring water level of paddy field ^b	20% of the running time of an engine pump

^a “Shuttle” indicates the shuttle between the field and the biogas digester for slurry fertilization^b Timing of the monitoring may be intermittent

(b) Data for slurry fertilization with prototype slurry tanker

No.	Category	Factor	Data
1	Price	Rental fee of a tractor for half-day (with 1 operator)	23.85 (USD 4hours ⁻¹)
2	Transportation	Driving speed of a tractor (20 minutes required for transportation of 5.3 km.)	0.265 (km min ⁻¹)
3	Collection of digested slurry	Flow rate for collection of digested slurry with a motor pump on the prototype slurry tanker	3.08 (L s ⁻¹)
4		Fuel consumption rate for generator on the prototype slurry tanker to drive the motor pump for collection and pouring of digested slurry (Value is same for pouring of digested slurry)	9.94 x 10 ⁻⁴ (L s ⁻¹)
5	Pouring of digested slurry	Flow rate for pouring digested slurry with motor pump on the prototype slurry tanker	4.62 (L s ⁻¹)

(c) Data for slurry fertilization with a vacuum truck

No.	Category	Factor	Data
1	Price	Rental fee of a vacuum truck for 1 day (with 2 operators)	71.55 (USD 8hours ⁻¹)
2	Transportation	Driving speed of a vacuum truck (Tractor speed was used)	0.265 (km min ⁻¹)
3	Collection of digested slurry	Flow rate for collection of digested slurry with vacuum truck	4.17 (L s ⁻¹)
4	Pouring of digested slurry	Flow rate for pouring digested slurry with vacuum truck	2.98 (L s ⁻¹)

1) Application schedule and rates of fertilization are shown in **Table 9**.

2) Transportation distance was 2.5 km.

Although the actual distance was 5.3 km to the experimental plot, this distance was reduced to 2.5 km because both paddy fields and pig farms are distributed in the village as shown in **Fig. 11**, and digested slurry would be transported from pig farms to the closest paddy fields.

3) T-N in the digested slurry was 400 or 2,000 mg L⁻¹

T-N of approximately 400 mg L⁻¹ was the average value obtained in our previous study (Thang et al. 2011). T-N of 2,000 mg L⁻¹ is a proposed value. Reduction of washing water for livestock sheds into the biogas digesters is expected to reach the plan value of 2,000 mg L⁻¹.

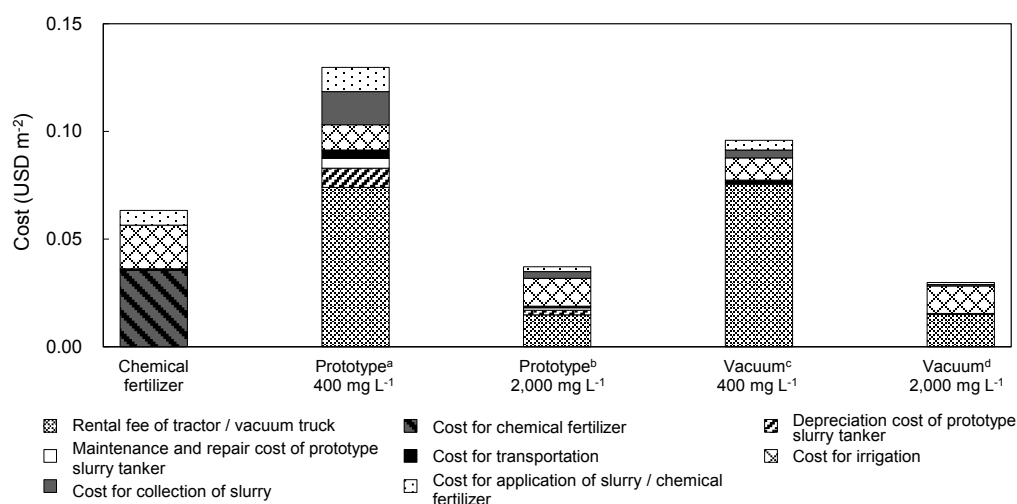
4) Surface water levels in the field before and after application of digested slurry and irrigation water were 0 cm and 4 cm, respectively.

Table 12 Data obtained for fertilization in conventional cultivation with chemical fertilizer

No.	Category	Factor	Data
1	Price	Labor costs for agricultural work	1.19 (USD h ⁻¹ person ⁻¹) ^a
2		Gasoline price (Average price in May 2013)	1.06 (USD L ⁻¹) ^a
3		Mixed fertilizer of NPK	0.72 (USD kg ⁻¹)
4		Urea	0.48 (USD kg ⁻¹)
5		Phosphorus fertilizer	0.14 (USD kg ⁻¹)
6		Potash fertilizer	0.50 (USD kg ⁻¹)
7	Transportation	Time for transportation between the field and farmer's house with a motor-cycle	10 (minutes)
8		Fuel consumption rate of a motor-cycle	1.7 x 10 ⁻² (L min ⁻¹)
9		Maximum weight of chemical fertilizer transported with a motor-cycle	50 (kg shuttle ⁻¹)
10	Application	Time for fertilization per weight of chemical fertilizer and per one workers	6.08 x 10 ⁻² (h kg ⁻¹ person ⁻¹)
11	Pouring of irrigation water in the field	Flow rate for pouring irrigation water with the engine pump	6.07 (L s ⁻¹) ^a
12		Fuel consumption rate for engine pump during irrigation	8.91 x 10 ⁻⁴ (L s ⁻¹) ^a
13		Time for preparation and withdrawal for pouring of irrigation water	900 (s shuttle ⁻¹) ^a
14		Time for monitoring of water level of paddy field ^b	20% of the running time of the engine pump

^a Data is same as for slurry fertilization.

^b Timing of the monitoring may be intermittent



^a "Prototype 400 mg L⁻¹" indicates slurry fertilization with the prototype slurry tanker at a nitrogen concentration of 400 mg L⁻¹

^b "Prototype 2,000 mg L⁻¹" indicates slurry fertilization with the prototype slurry tanker at a nitrogen concentration of 2,000 mg L⁻¹

^c "Vacuum 400 mg L⁻¹" indicates the slurry fertilization with the vacuum truck at a nitrogen concentration of 400 mg L⁻¹

^d "Vacuum 2,000 mg L⁻¹" indicates slurry fertilization with the vacuum truck at a nitrogen concentration of 2,000 mg L⁻¹

Fig. 18 Cost comparisons for fertilization

These results show that an increase in nitrogen concentrations of digested slurry by a reduction in the entry of washing water from livestock sheds into the biogas digesters make slurry fertilization feasible.

Surface water levels before and after slurry fertilization were set at 0 cm and 4 cm for the third additional fertilization even though the experiments were conducted during the rainy season. Surface of the field at the third additional fertilization was dry. Therefore, surface water in the field can be assumed to be almost as dry as the third additional fertilization.

The estimation is summarized in **Fig. 18**. Costs for fertilization by conventional cultivation with chemical fertilizer was

estimated as 0.06 USD m⁻². However, slurry fertilization with the prototype slurry tanker cost 0.13 USD m⁻² and slurry fertilization with a vacuum truck cost 0.10 USD m⁻² under the current situation of T-N of 400 mg L⁻¹ in the digested slurry. The increase in T-N in the digested slurry from 400 to 2,000 mg L⁻¹ drastically reduced the costs for slurry fertilization. Costs for slurry fertilization with both the vacuum truck and the prototype slurry tanker were lower than the costs for chemical fertilizers. Costs for slurry fertilization with a vacuum truck were lower than the costs with the prototype slurry tanker, because the vacuum truck can transport larger volumes of digested slurry at one time. However, the use of prototype slurry tankers to transport digested slurry can be economical because vacuum trucks are rarely available in rural areas of Vietnam.

5.4 Conclusions

In this study, digested slurry was applied by the pouring method as additional fertilizer to evaluate the feasibility of the use of digested slurry in paddy fields of Southern Vietnam. Data-related costs and labor for application of digested slurry and rice production by this method were obtained and compared with applications of chemical fertilizers.

Rice production with the use of digested slurry was 485 g m⁻², which is within the range of on-site conventional cultivation with chemical fertilizers. Therefore, it was shown that digested slurry can be substituted for chemical fertilizers for rice production.

T-N concentrations from 400 to 2,000 mg L⁻¹ in the digested slurry showed that the cost for slurry fertilization can be reduced to less than the cost for chemical fertilizers.

A reduction in washing water can produce nitrogen concentrations of 2,000 mg L⁻¹ in the digested slurry. For this, large volume of washing water after flashing out the pig manure should be separated from influent to a biogas digester. The separated washing water could be treated by natural purification such as by soil and plants.

Experiments and estimations in this study clarify the feasibility of slurry fertilization in Southern Vietnam.

6. DISCUSSIONS

6.1 Installation and Evaluation of the System to use Digested Slurry from Biogas Digesters

Based on the feasibility of use of digested slurry in paddy fields in Southern Vietnam by evaluation from the view point of impact on rice plants and surrounding environment, and the economy as clarified in **Chapters 3-5**, a scenario to increase biogas digesters in the village for treatment of currently untreated livestock excreta and to use slurry from the biogas digester at agricultural fields as a fertilizer was proposed and designed as the “Scenario 1”. The details of the scenario are as follows:

- 1) All unused pig and milk cow excreta were considered as feedstock for biogas digesters. By increasing the number of biogas digesters, excreta from 10,288 pigs and 61 milk cows became the target.
- 2) Water content of digested slurry was set to one fifth of the water content of digested slurry in “present conditions” based on consideration of transportation cost of slurry in **Chapter 5**.
- 3) Digested slurry produced from biogas digesters was used on non-paddy fields at the same application rate as “present conditions”, and all the rest used at paddy fields as fertilizer.
- 4) Total nitrogen in the digested slurry was considered as replacement for chemical nitrogen fertilizer based on the results of rice cultivation tests using digested slurry at the site.

Based on the above assumed scenario, material flow in a village was calculated as shown in **Fig. 19**. Highlighted results are arranged in **Tables 13, 14 and 15**.

Effluent nitrogen load decreased to 79.7 t y⁻¹ from 131.6 t y⁻¹, equivalent to a 39% reduction. The application rate of nitrogen chemical fertilizer for rice cultivation decreased to 2.5 t y⁻¹ from 54.4 t y⁻¹ as a result of the application of digested slurry. Percolation and leaching were not changed because the former researches in Japan (Kamioka and Kamewada, 2011; Sunaga et al., 2009; Chen et al., 2013) indicated that the application of digested slurry did not significantly influence on it as mentioned in **Chapter 2**. Biogas generation rate increased from 52,125 Nm³ y⁻¹ to 326,822 Nm³ y⁻¹. Nitrogen loss from the paddy field slightly increased through ammonia volatilization caused by application of digested slurry to the surface of the paddy field as mentioned in **Appendix 1-1**, No.47. Therefore, it is necessary to consider a method of

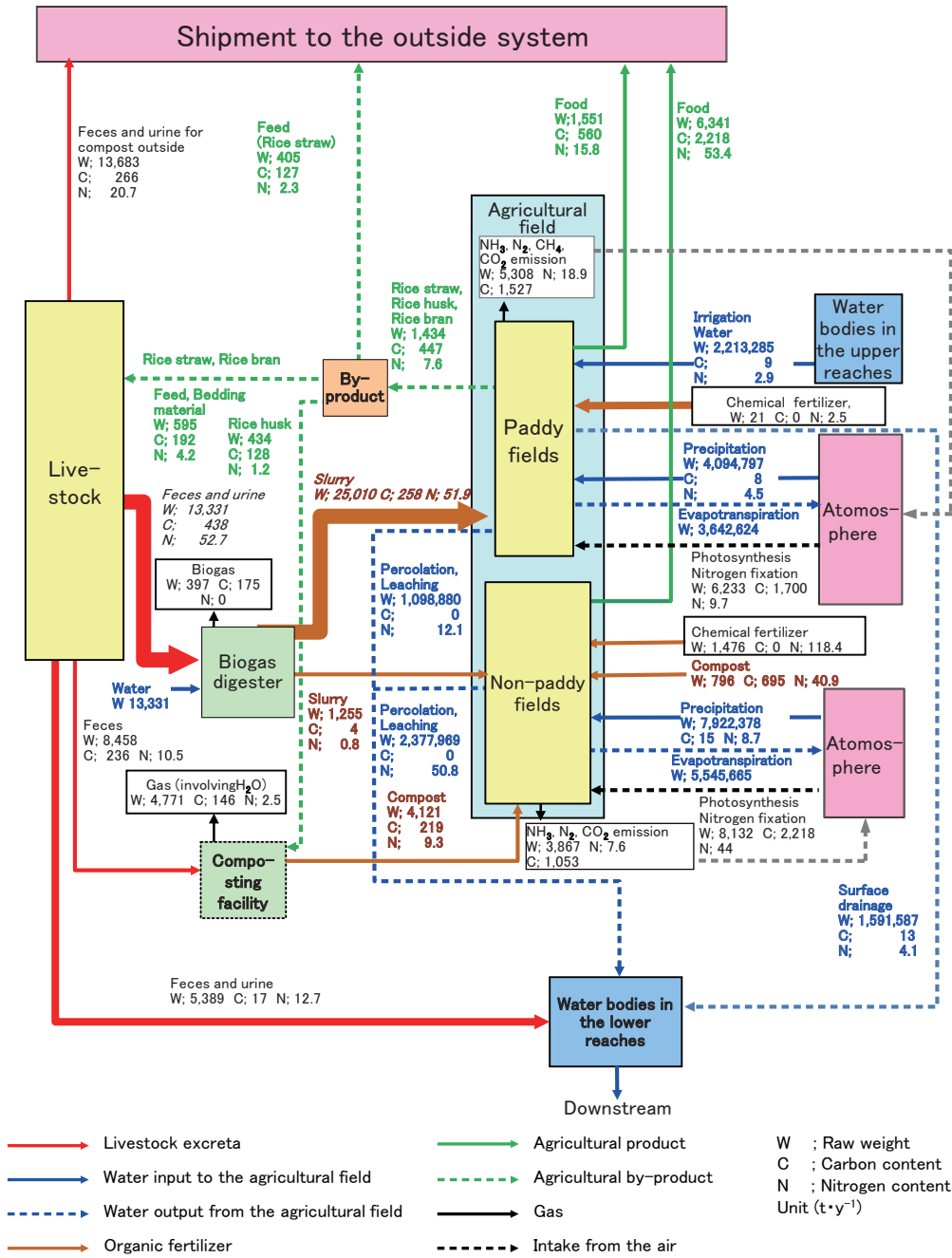


Fig. 19 "Scenario 1" based on the scenario for increasing biogas digesters and using the slurry from them in paddy fields

Table 13 Changes in nitrogen load to lower water bodies from each source

Source of nitrogen load	Present	Scenario 1
	Nitrogen load (t year ⁻¹)	
Livestock excreta	57.0	12.7
Leaching from non-paddy	50.8	50.8
Leaching from paddy fields	12.1	12.1
Surface drainage from paddy	4.1	4.1
Digested slurry	7.6	0.0
Total	131.6	79.7

Table 14 Changes in chemical fertilizer use rate in paddy fields

Present		Scenario 1	
Weight	Nitrogen	Weight	Nitrogen
t year ⁻¹		t year ⁻¹	
457	54.4	21	2.5

application for digested slurry that can minimize the ammonia volatilization rate in the future.

Several reports indicate the annual reductions of GHG emission by adoption of household biogas digesters and indicate the annual reduction rate per one unit of biogas digester (UNFCCC, 2015). Among them, the reduction rate by adoption of concrete dome-type biogas digesters in rural areas of Vietnam is $2.7054 \text{ t-CO}_2\text{e y}^{-1}$ *1 per one unit of biogas digester (assuming that operation rate of biogas digesters of 100%) (UNFCCC, 2012). This rate is derived from the difference in GHG emissions between using coal, LPG and kerosene as cooking fuel and substitution with biogas. Increase of biogas digesters of approximately 586 units from 111 at present to 697 in “Scenario 1” can be estimated. Here, number of the units of biogas digesters are estimated based on popular patterns in Thai My Village, that is, to operate one unit of biogas digester, 15 pigs or 5 milk cows are needed. Therefore, approximately $1,600 \text{ t-CO}_2\text{ y}^{-1}$ can be reduced in the whole Thai My village from “present conditions” to “Scenario 1”.

6.2 Advanced Regional Biomass Use System with Bio-ethanol Production from Rice Straw

Assuming more improvement of regional biomass use in the future, an advanced scenario can be proposed and designed as “Scenario 2”. In this scenario, a new biomass use system, namely, bio-ethanol production from rice-straw is added to “Scenario 1”. In “Scenario 2”, unused rice straw of $1,618 \text{ t y}^{-1}$ which is harvested and left in the field after rice cultivation is focused on as the feedstock for bio-ethanol. According to the results of experimental production of bio-ethanol from rice straw at a pilot plant on the site, 420 kL year^{-1} of bio-ethanol can be produced from $6,000 \text{ t y}^{-1}$ of rice straw with a moisture of 60%w.b. (Mochidzuki, 2013). Therefore, the conversion unit for bio-ethanol from rice straw can be calculated as $175 \text{ L (t-dry rice straw)}^{-1}$. Under this scenario, the material flow in a village was calculated as shown in Fig. 20. This revealed that approximately 240 kL year^{-1} ($\approx 190 \text{ t y}^{-1}$) of bio-ethanol can be produced as regional energy from unused rice straw. Bio-ethanol could reduce GHG emissions from fossil fuels substituted with bio-ethanol. The calorific value of bio-ethanol from rice straw in “Scenario 2” is estimated at approximately 5.21 TJ y^{-1} according to calorific value of bio-ethanol of 27.40 TJ Gg^{-1} (IPCC, 2006a) and its specific gravity of 0.7893 kg L^{-1} (Oki et al., 1994), and by substituting this bio-ethanol for fossil fuel of which GHG emission factor is $69,300 \text{ kg-CO}_2 \text{ TJ}^{-1}$ (IPCC, 2006b), $0.36 \text{ Gg-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ can be reduced within this village.

6.3 Prospect for Diffusion of Regional Biomass Use System to Southeast Asia

This section further evaluated the prospects of the diffusion of the regional biomass use system mentioned above to Southeast Asia. The first scenario considers the use and diffusion of biogas digesters, assuming that manure of all pigs and milk cows is used as feedstock for biogas digesters, and digested slurry is used as fertilizer in agricultural fields. The total numbers of pigs and milk cow throughout Southeast Asia are approximately 72.2 million in 2013 (FAOSTAT, 2015b) and 1.66 million (refer to Appendix 3). The total number of biogas digester units throughout Southeast Asia can be estimated at approximately 5.1 million units calculated as for Thai My village. Therefore, the reduction rate of GHG emission throughout Southeast Asia can be estimated at approximately $14 \text{ Mt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ *2. This is equal to approximately 3% of the amount of GHG emissions from agricultural sectors in Southeast Asia.

In the above situation, approximately 0.39 Mt y^{-1} of nitrogen is contained in manure for feedstock for biogas digesters. Therefore, this amount of nitrogen load of digested slurry can be removed from water bodies by using this digested slurry from biogas digesters in agricultural fields as fertilizer. Total renewable water resources in Southeast Asia is $6,396 \times 10^9 \text{ m}^3\text{y}^{-1}$ in 2014 (AQUASTAT, 2015), so the reduction of nitrogen load corresponds to a decrease of approximately 0.06 mgN L^{-1} in all water discharged in Southeast Asia.

The second scenario considers the production and use of bio-ethanol from unused rice straw assuming that two-thirds of harvested rice straw generated in paddy fields is used for feedstock of bio-ethanol as in “Scenario 2” throughout Southeast Asia. Yield in paddy of Southeast Asia was 4.19 t ha^{-1} in 2013 (FAOSTAT, 2015c), and the volume of rice straw that can be used for bio-ethanol production is estimated at 0.16 Gt y^{-1} based on the same calculation as for Thai My Village. In this scenario, approximately 23.7 G L y^{-1} of bio-ethanol can be produced and $350 \text{ Mt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ can be reduced by substituting

*1 = $2.7054 \text{ t-CO}_2\text{e y}^{-1}$ in this case

*2 = $14 \text{ Mt-CO}_2\text{e y}^{-1}$ in this case

Table 15 Change in biogas generation rate from biogas digesters

Feedstock of biogas digester	Present Biogas generation rate (N m ³ year ⁻¹)	Scenario 1
Pig excreta	51,394	320,452
Milk cow excreta	731	6,370
Total	52,125	326,822

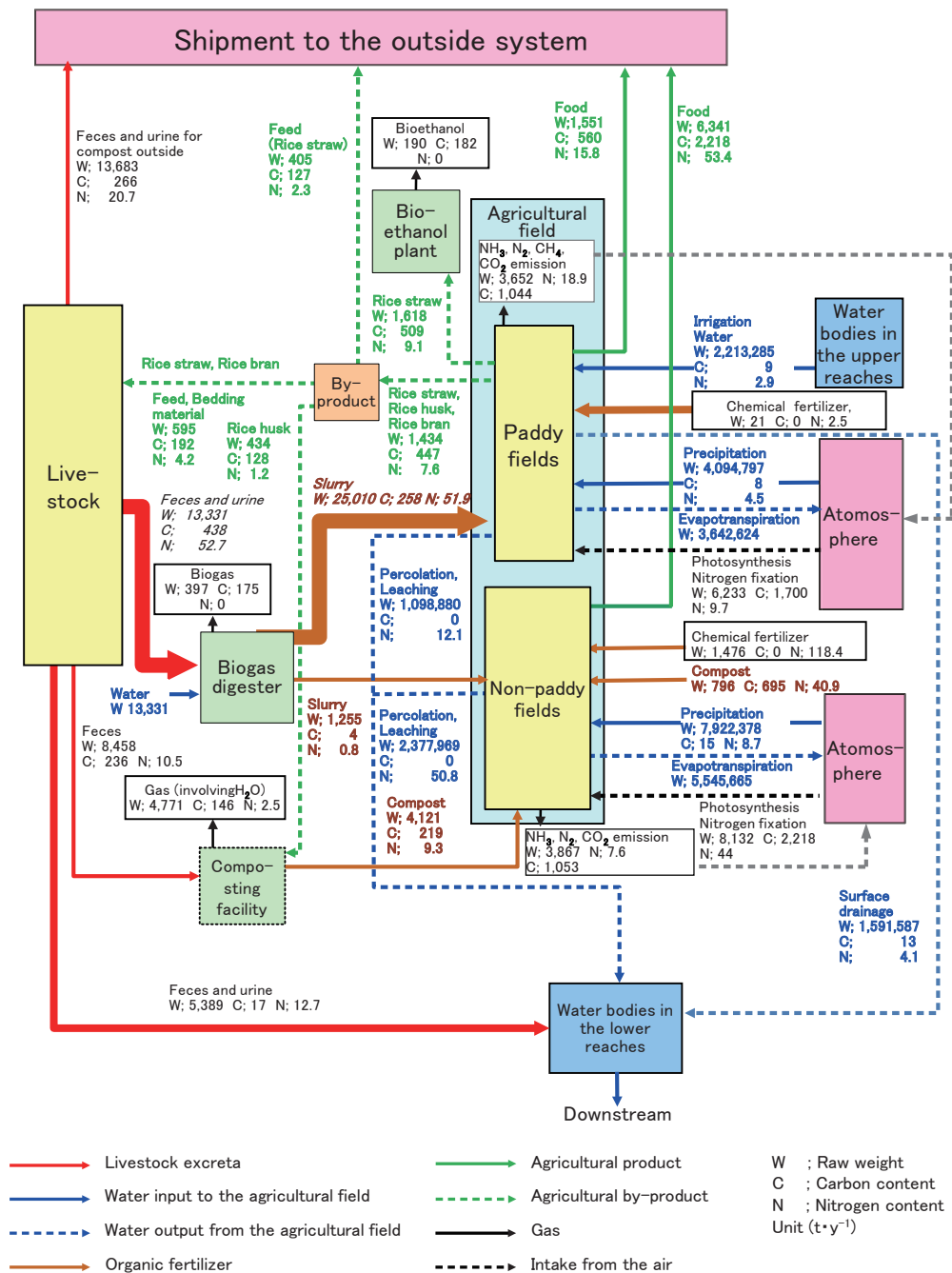


Fig. 20 "Scenario 2" based on the scenario adding the production of bio-ethanol from rice straw

this bio-ethanol for fossil fuel. This is equal to approximately 8% of the amount of GHG emissions from agricultural sectors in Southeast Asia.

Based on the above discussions, the regional biomass use system proposed above would certainly contribute not only to the local environment, but also to the global environment.

7. CONCLUSION

In this study, feasibility of use of digested slurry from biogas digesters in paddy fields in Southern Vietnam was clarified in terms of fertilizer effects on rice, environmental impacts and economical aspect. Following is the summarization of the results obtained. In addition, effects of regional biomass use system to Southeast Asia were forecasted.

In **Chapter 3**, regional diagnosis of a representative suburban village in Southern Vietnam where rice cultivation and livestock farming are popular was conducted to clarify the present conditions of use of regional biomass. Literature reviews, interviews at the site and field surveys were conducted to collect data for the present regional diagnosis. The analysis of the material flow diagram clarified that untreated livestock excreta and untreated digested slurry occupied 49% in total nitrogen load to regional water bodies, and may cause water pollution, and that of some by-products from rice cultivation, especially, approximately 67% of harvested rice straw is not effectively used even though they may be sources of energy. As the most effective option for this situation, the use of currently untreated livestock excreta as the feedstock for biogas digesters followed by the use of digested slurry in paddy fields in terms of environmental conservation and saving the input of chemical fertilizers to agricultural fields was proposed. Then, the necessity of investigating the feasibility from the view point of 1) effects on rice as a fertilizer and environmental impacts such as nitrogen pollution or fecal contamination of lower water bodies through surface discharge during its use, and 2) economical methods of transporting and applying it, was proposed to promote of the use of digested slurry.

In **Chapter 4**, to evaluate the feasibility of use of digested slurry in paddy fields of Southern Vietnam from the view point of fertilizer effects on rice, environmental impacts such as nitrogen load and fecal contamination with application of digested slurry, a field experiment on small plots in a paddy field at the site was conducted to compare it with conventional cultivation with chemical fertilizers. Nitrogen concentrations and fecal indicator microbes such as *E. coli* and Coliforms in surface water following fertilization, and yield and yield components were surveyed. As the results, there was no significant difference in yield and yield components between both treatments, nitrogen concentrations in surface water in plots treated with digested slurry decreased gradually but were higher than 10 mg L^{-1} even 1 week after fertilization, and *E. coli* in surface water of the plot treated with digested slurry decreased to a non-detectable level within 1 week after fertilization. This clarified that digested slurry is applicable as a fertilizer for rice, and that the prevention of nitrogen load and fecal contamination in lower water bodies is possible along with the prevention of discharge from the plot treated with slurry for a determined duration.

In **Chapter 5**, to evaluate the feasibility of use of digested slurry in paddy fields of Southern Vietnam from the view point of economy and labor, a field experiment to test the use of digested slurry by the pouring method was conducted at the site. A vacuum truck was used to transport and pour the digested slurry, and a prototype slurry tanker was also manufactured to transport and apply digested slurry, because vacuum trucks are rarely available in rural areas of Vietnam. To evaluate feasibility, costs and labor for application of digested slurry were examined and compared with conventional cultivation methods using chemical fertilizers. Among the results, costs for slurry fertilization with a prototype slurry tanker and a vacuum truck were estimated at 0.13 USD m^{-2} , and 0.10 USD m^{-2} , respectively. These costs were higher than the 0.06 USD m^{-2} for conventional cultivation with T-N of approximately 400 mg L^{-1} in the digested slurry. However, it was clarified that the cost for slurry fertilization can be lower than that in conventional cultivation when the concentration of nitrogen in the digested slurry is increased from 400 to $2,000 \text{ mg L}^{-1}$. These results clarified that an increase in nitrogen concentrations in digested slurry makes slurry fertilization feasible by decreasing the amount of washing water for livestock sheds that enters into the biogas digesters.

In **Chapter 6**, according to the results obtained in **Chapters 3-5**, reduction of 39% of nitrogen load in water bodies and reduction of $1,600 \text{ t-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ of GHG emissions were expected by diffusion of biogas digesters and use of digested slurry in a suburban village in Southern Vietnam. Reduction of $0.36 \text{ Gg-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ of GHG emission was expected by advanced regional biomass use system with bio-ethanol production from rice straw in the village. The diffusion of biogas digesters and use of digested slurry in paddy fields in Southeast Asia would reduce approximately 0.06 mgN L^{-1} of nitrogen load in the water bodies and approximately $14 \text{ Mt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ of GHG emission. Diffusion of bio-ethanol production from rice straw would reduce $350 \text{ Mt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ of GHG emissions. The total reduction of $364 \text{ Mt-CO}_2 \text{ y}^{-1}$ of GHG emission corresponds to approximately 11% of the amount of GHG emissions from agricultural sectors.

Vietnam was selected as a representative Southeast Asian country in this study, and regional biomass use systems were developed based on the situation in Vietnam. However, these details differ among countries in the region. Thus, in practice, it will necessary to fine-tune the systems proposed in this study in order to apply them in each Southeast Asian country. In addition, though the systems are based on household biogas digesters, the economies of Southeast Asian Countries are growing rapidly and their livestock sectors will likely grow as well. Therefore, additional consideration of large-scale livestock farming will be necessary in the future.

ACKNOWLEDGEMENTS: The work presented in this manuscript is based on the author's Ph.D. thesis. First of all, the author wishes to express her sincere gratitude to Dr. Shigeto KAWASHIMA, Professor of Hydrological Environment Engineering, Division of Environmental Science and Technology, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, and Chairperson of the Examination Committee, for his keen guidance, valuable suggestions and constructive criticisms in the completion of this study.

The author also wishes to extend her sincere appreciation to the members of the Examination Committee, Professor Dr. Satoshi HOSHINO and Professor Dr. Michihisa IIDA, for their discussions and constructive suggestions in reviewing and improving this thesis.

The author is very grateful to Dr. Kimihito NAKAMURA, Associate Professor of Hydrological Environment Engineering, Division of Environmental Science and Technology, Graduate School of Agriculture, Kyoto University for his valuable advice in improving this thesis.

All of the work presented in this Ph.D. thesis was conducted under the National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization (NIRE-NARO). The author is deeply grateful to Dr. Masaru YAMAOKA, Chief Researcher of Biomass Recycling System in Renewable Resources Engineering Research Division in NIRE-NARO and Dr. Yoshito YUYAMA, Senior Program Officer of Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council for all their support and encouragement during this study. The author wishes to thank Dr. Masato NAKAMURA, Senior Researcher of NARO for his sincere support and advice throughout this study. The author is also grateful to Dr. Natsuki SHIMIZU, Associate Professor of Kyoto University, who was a former Postdoctoral Researcher of Biomass Recycling System in NIRE-NARO, for her valuable advice. The author is particularly thankful to Dr. Takao MASUMOTO, Director of Renewable Resources Engineering Research Division for his sincere support.

This study was supported by JST-JICA SATREPS "Sustainable Integration of Local Agriculture and Biomass Industries". The author is deeply grateful to Dr. Akiyoshi SAKODA, Professor of the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo (IIS-UT) and the representative of this project for providing a precious study opportunity in this project and Dr. Kazuhiro MOCHIDZUKI, Project Associate Professor of IIS-UT for sincere support and advice during the project. Special thanks are due to Professor Dr. Nguyen Phuoc Dan, Dr. Dang Vu Bich Hanh and their laboratory members, Mr. Nguyen Duy Khanh, Mr. Nguyen Huu Viet, Mr. Lai Duy Phuong, Ms. Trinh Thi Bich Huyen, and Mr. Nguyen Lam Quang Thoai in the Faculty of Environment, Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam for their sincere cooperation and assistance in the field surveys in Vietnam. The author also expresses appreciation to Mr. Ryuji NAKAYAMA, Project Coordinator for careful support in Vietnam during the project.

The author acknowledges all the members of NIRE-NARO with special recognition to Dr. Iwao KITAGAWA, Dr. Shigeo OGAWA and Dr. Tatsuki UEDA for their helpful support and advice in this study. The author would like to thank Dr. DeMar Taylor, Professor of Tsukuba University, who was engaged for a native check by NIRE-NARO for improving the English of this thesis. The author also acknowledges Ms. Yoshiko HAGIWARA and Ms. Masako YAMAFUJI for their helpful assistance.

The author also acknowledges Dr. Eiji MATSUBARA, Technical Councilor in Japan Association for International Collaboration of Agriculture and Forestry, who was former Project Reader in Rural Development Planning Division of Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS); Dr. Taro IZUMI and Dr. Shinji HIROUCHI in Rural Development Planning Division of JIRCAS for their helpful advice about Vietnam for promoting this study.

Last but not the least, the author also thanks Dr. Takehide HAMA, Associate Professor of Kumamoto University, who was a senior at Kyoto University and Dr. Yoko FUJIKAWA, Associate Professor of Koyoto University Research Reactor Institute for their guidance during the author's time as a student.

APPENDIXES

Appendix 1 Bases of data used for regional diagnosis
Appendix 1-1 Bases of data used for regional diagnosis (paddy field compartment)

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
Paddy field area	—	—	—	217.6	ha	Paddy cropping area in a year is 544 (ha y ⁻¹),... (1) Half area is 2 (crops y ⁻¹), and other half area is 3 (crops y ⁻¹),... (1) Assumption that same size of area is used for each cultivation season, actual paddy field area is calculated as follows: Paddy field area (ha) = 544 (ha y ⁻¹)/(1/2 (ha) * 2 (crops) + 1/2 (ha) * 3 (crops)) = 544 (ha y ⁻¹) * 2/5 = 217.6 (ha)	(1) Interviews of VPC, DARD	1
	W	840	kg ha ⁻¹ crop ⁻¹	457	t y ⁻¹	Application rate of chemical fertilizer is 840 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹),... (1) Therefore, chemical fertilizer rate (t y ⁻¹) = Application rate of chemical fertilizer (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹)/1,000 = 840 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹)/1,000 = 457 (t y ⁻¹)	(1) Interviews of VPC and Villagers	2
	C	0	kg ha ⁻¹ crop ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in chemical fertilizer Application rate of nitrogen fertilizer is 100 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹),... (1) Therefore, application rate of nitrogen fertilizer (t y ⁻¹) = Application rate of nitrogen fertilizer (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹)/1,000 = 100 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹)/1,000 = 54.4 (t y ⁻¹)	(1) Interviews of VPC and Villagers	3
(Input) Application of chemical fertilizer	W	1881.8	mm y ⁻¹	4,094,797	t y ⁻¹	Mean annual precipitation is 1,881.8 (mm y ⁻¹),... (1) Therefore, input from precipitation (t y ⁻¹) = Mean annual precipitation (mm y ⁻¹) * Area (ha) * 10 = 1,881.8 (mm y ⁻¹) * 217.6 (ha) * 10 = 4,094,797 (t y ⁻¹)	(1) Global Meteorological Information CD edited by Japan Meteorological Business Support Center	4
	C	1.9	mg L ⁻¹	8	t y ⁻¹	Total carbon concentration of precipitation is 1.9 (mg L ⁻¹),... (1) Therefore, input from precipitation (t y ⁻¹) = Total carbon concentration of precipitation (mg L ⁻¹) * Precipitation rate (t y ⁻¹)/1,000,000 = 1.9 (mg L ⁻¹) * 4,094,797 (t y ⁻¹)/1,000,000 = 8 (t y ⁻¹)	(1) Hanya T. and Ogura N. (1985) : Water quality investigation method, p.58, Maruzen	5
	N	1.1	mg L ⁻¹	4.5	t y ⁻¹	Total nitrogen concentration of precipitation is 1.1 (mg L ⁻¹),... (1) Therefore, nitrogen content of precipitation (t y ⁻¹) = Total nitrogen concentration of precipitation (mg L ⁻¹) * Precipitation rate (t y ⁻¹)/1,000,000 = 1.1 (mg L ⁻¹) * 4,094,797 (t y ⁻¹)/1,000,000 = 4.5 (t y ⁻¹)	(1) Tabuchi T. and Takamura Y. (1985) : Discharge of nitrogen and phosphorus from watershed, p. 19, University of Tokyo Press	6
(Input) Irrigation water	W	10,286.28	t ha ⁻¹ y ⁻¹	2,238,295	t y ⁻¹	Irrigation water for cultivation in dry season (from December to March) was 8,928.52 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹),... (1) Precipitation in this season was 66 (mm), that is, 660 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹),... (2) Therefore, necessary water for rice cultivation per crop should be 9588.52 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹). Precipitation in spring-summer season (from April to August) is 1,128.5 (mm), that is, 11,285 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) and precipitation in summer-autumn season (from September to November) is 687.3 (mm), that is, 6,873 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹)... (2) Therefore, necessary irrigation water for each season is 0 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) and 2,715.52 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹), respectively. 2 crops per year, that is, cultivation in dry season and spring-summer season is conducted in half of paddy field, and 3 crops per year, that is, cultivation in dry season, spring-summer season and summer-autumn season is conducted in half of paddy field... (3) Therefore, necessary quantity of annual irrigation water (t ha ⁻¹ y ⁻¹) = 1/2 * (8,928.52 + 0) + 1/2 * (8,928.52 + 0 + 2,715.52) = 10,286.28 (t ha ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, quantity of irrigation water (t y ⁻¹) = 10,286.28 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * 217.6 (ha) = 2,238,295 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012) (2) Global Meteorological Information CD edited by Japan Meteorological Business Support Center (3) Interviews of VPC and Villagers	7

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.	
		Value	Unit	Value	Unit				
(Input) Irrigation water	C	4.0	mg L ⁻¹	9	t y ⁻¹	Total carbon concentration of irrigation water is approximately 4.0 (mg L ⁻¹)....(1) Therefore, carbon content of irrigation water (t y ⁻¹) = Quantity of irrigation water (t y ⁻¹) * Carbon concentration of irrigation water (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 2,238,295 (t y ⁻¹) * 4.0 (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 9 (t y ⁻¹)	(1) Survey of surface water quality in canal in Thai My Village (from 2010 to 2012)	8	
	N	1.3	mg L ⁻¹	2.9	t y ⁻¹	Total nitrogen concentration of irrigation water is approximately 1.3 (mg L ⁻¹)....(1), (2) Therefore, nitrogen content of irrigation water (t y ⁻¹) = Quantity of irrigation water (t y ⁻¹) * Nitrogen concentration of irrigation water (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 2,238,295 (t y ⁻¹) * 1.3 (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 2.9 (t y ⁻¹)	(1) Tabuchi T. et al. (1998) : Science for clean water, The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering (2) Survey of surface water quality in canal in Thai My Village (from 2010 to 2012)	9	
(Input) Photosynthesis	W	—	—	6,233	t y ⁻¹	Carbon is taken from the air as carbon dioxide as shown in the following formula for photosynthesis: $6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{10}O_5 + 6H_2O + 6O_2$ Therefore, photosynthesis rate (t y ⁻¹) = 44/12 * Carbon rate taken by photosynthesis (t y ⁻¹) = 44/12 * 1,700 (t y ⁻¹) = 6,233 (t y ⁻¹)	Calculation based on the molecular formula for carbon dioxide	10	
	C	—	—	1,700	t y ⁻¹	Assumption that carbon content taken for photosynthesis is equal to the carbon content of harvest, that is, total carbon content of unhulled rice (Total of polished rice, rice husk and rice bran) and rice straw. Therefore, carbon content taken for photosynthesis (t y ⁻¹) = 1,700 (t y ⁻¹)	Calculation based on carbon content of harvest (unhulled rice and rice straw) obtained by field survey at test field (from December 2011 to March 2012)	11	
	N	0	—	0	t y ⁻¹	Nitrogen is not provided by photosynthesis.	—	—	—
	W	—	—	10	t y ⁻¹	Weight is same as nitrogen.	—	—	—
(Input) Nitrogen fixation	C	0	—	0	t y ⁻¹	Carbon is not provided by nitrogen fixation.	—	—	—
	N	0.0045	t ha ⁻¹ y ⁻¹	9.7	t y ⁻¹	Nitrogen fixation rate = 17.8 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹)....(1) Therefore, nitrogen fixation rate (t ha ⁻¹ y ⁻¹) = 17.8 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * ((1/2 * 2 crops + 1/2 * 3 crops)/y)/1000 = 0.0445 (t ha ⁻¹ y ⁻¹). Nitrogen fixation rate (t y ⁻¹) = Nitrogen fixation rate (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha) = 0.0445 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * 217.6 (ha) = 9.7 (t y ⁻¹)	(1) Giau T. Q. (2012) : Effects of rotational crops and water management on balance of N, P and K and characteristics of acidic alluviumsoil, Doctoral Dissertation in CanTho University, Vietnam	13	
	W	150	mm month ⁻¹	3,642,624	t y ⁻¹	Average rate of evaporation at Ho Chi Minh City is 150 mm/month....(1) The relationship between evapotranspiration and pan evaporation can be written as "evapotranspiration = 0.93 * pan evaporation"....(2) Therefore, evapotranspiration rate (t y ⁻¹) = Average of evaporation rate (mm month ⁻¹) * 12 (month) * 0.93 * Area (ha) * 10 = 150 (mm month ⁻¹) * 12 (month) * 0.93 * 217.6 (ha) * 10 = 3,642,624 (t y ⁻¹)	(1) Hieu T. V. (2011) : Assessment of rain water resource in Ho Chi Minh City and proposal of management solutions. Report of DOST-HCMC project. (2) Yoshida S. (1978) : A simple evapotranspiration model of a paddy field in tropical Asia. Soil Science and Plant Nutrition, 25 (1), pp. 81-91	14	
(Output) Drainage	W	—	—	1,591,587	t y ⁻¹	Assumption that, quantity of drainage water (t ha ⁻¹ y ⁻¹) = (Quantity of irrigation water + Precipitation rate) - (Evapotranspiration rate + Percolation rate) Therefore, quantity of drainage water (t y ⁻¹) = (2,238,295 (t y ⁻¹) + 4,094,797 (t y ⁻¹)) - (3,642,624 (t y ⁻¹) + 1,098,880 (t y ⁻¹)) = 1,591,587 (t y ⁻¹)	Calculation based on quantity of irrigation water, precipitation rate, evapo-transpiration rate and percolation rate.	15	
	C	8.0	mg L ⁻¹	13	t y ⁻¹	Carbon concentration of drainage water is approximately twice as much as irrigation water, that is, 8.0 (mg L ⁻¹)....(1) Therefore, carbon content of drainage water (t y ⁻¹) = Quantity of drainage water (t y ⁻¹) * Total carbon concentration of drainage water (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 1,591,587 (t y ⁻¹) * 8.0 (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 13 (t y ⁻¹)	(1) Assumption based on the results of survey of surface water quality in canal in Thai My Village (from 2010to 2012)	16	

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Output) Drainage	N	2.6	mg L ⁻¹	4.1	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of drainage water is approximately twice as much as irrigation water, that is, 2.6 (mg L ⁻¹)... (1) Therefore, nitrogen content of drainage water (t y ⁻¹) = Quantity of drainage water (t y ⁻¹) * Total nitrogen concentration of drainage water (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 1,591,587 (t y ⁻¹) * 2.6 (mg L ⁻¹)/1,000,000 ≈ 4.1 (t y ⁻¹)	(1) Assumption based on the results of survey of surface water quality in canal in Thai My Village (from 2010 to 2012)	17
	W	—	—	16	t y ⁻¹	Weight is same as nitrogen.	—	18
	C	0	—	0	t y ⁻¹	Carbon is not lost by denitrification.	—	-
(Output) Denitrification	N	30	%	16.3	t y ⁻¹	Denitrification rate is 20-50% of nitrogen fertilization rate... (1) Therefore, assumption the value is 30%. Therefore, denitrification rate (t y ⁻¹) = Nitrogen content of fertilizer (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * 0.3/1,000 = 100 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.3/1,000 ≈ 16.3 (t y ⁻¹)	(1) Kyuma K. (2004) : Paddy soil science. Kyoto University Press, p. 151	19
	W	—	—	1	t y ⁻¹	Weight is same as ammonia volatilization rate.	—	20
	C	0	—	0	t y ⁻¹	Carbon is not lost by ammonia volatilization.	—	-
(Output) Ammonia volatilization	N	1.7	%	0.9	t y ⁻¹	Nitrogen loss by ammonia volatilization is 1.7% of nitrogen fertilization rate per crop at paddy field with the pH range between 3.4 and 6.2... (1) Therefore, nitrogen loss by ammonia volatilization (t y ⁻¹) = Nitrogen fertilization rate (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * 0.017/1,000 = 100 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.017/1,000 ≈ 0.9 (t y ⁻¹)	(1) Watanabe T. (2009) : Measurement of ammonia volatilization from flooded paddyfields in Vietnam. Soil Science and Plant Nutrition, 55, pp. 793-799	21
	W	202	mm crop ⁻¹	1,098,880	t y ⁻¹	1) Percolation rate is 202 (mm crop ⁻¹)... (1) Therefore, percolation rate (t y ⁻¹) = Percolation rate (mm ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 0.01 * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * 1,000 = 202 (mm ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 0.01 * 544 (ha y ⁻¹) * 1,000 = 1,098,880 (t y ⁻¹)	(1) Thoai N. L. Q et al. (2012) : Balance of water, nitrogen and phosphorus for rice crop at a paddy field in Southern Vietnam, Proceedings of Annual Conference for Society of Environmental Science 2012, Japan, pp. 136-137	22
(Output) Percolation	C	0	kg ha ⁻¹ crop ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon loss by percolation is assumed to be 0.	—	-
	N	11	mg L ⁻¹	12.1	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of water 30-50 cm from the ground surface in the experimental field was approximately 11 (mg L ⁻¹)... (1) Percolation rate is 1,098,880 (t y ⁻¹). Therefore, loss by nitrate leaching (t y ⁻¹) = Percolation rate (t y ⁻¹) * Nitrogen concentration in water (mg L ⁻¹)/1,000,000 = 1,098,880 (t y ⁻¹) * 11 (mg L ⁻¹)/1,000,000 ≈ 12.1 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2013 to March 2014)	23
(Output) Methane gas emission	W	160	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	87	t y ⁻¹	1) Methane gas emitted during cultivation of rice at intermittently flooded paddy field is approximately 16 g m ⁻² y ⁻¹ ... (1) = 160 kg ha ⁻¹ y ⁻¹ Methane gas emission rate is 160 kg ha ⁻¹ y ⁻¹ in the reference. The rate is converted to 160 kg ha ⁻¹ crop ⁻¹ for application rate to the objective village. Therefore, methane gas emission rate (t y ⁻¹) = Methane gas emission rate (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹)/1,000 = 160 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹)/1,000 ≈ 87 (t y ⁻¹)	(1) Ministry of Environment, Japan Greenhouse Gas Inventory Office of Japan (GIO), CGER, NIES (2011) : National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, p. 6-25	24
	C	—	—	65	t y ⁻¹	Carbon content in methane gas (t y ⁻¹) = Methane gas emission rate (t y ⁻¹) * 12/16 = 87 * 12/16 ≈ 65 (t y ⁻¹)	Calculation based on the molecular formula of methane	25
	N	0	kg ha ⁻¹	0	t y ⁻¹	Nitrogen is not lost by methane gas emission.	—	-
(Output) Carbon dioxide emission	W	—	—	2,952	t y ⁻¹	Carbon dioxide emission rate (t y ⁻¹) = 44/12 * Carbon loss rate in the form of carbon dioxide (t y ⁻¹) ≈ 2,952 (t y ⁻¹)	Calculation based on the molecular formula of carbon dioxide	26

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Output) Carbon dioxide emission	C	870	t y ⁻¹	805	t y ⁻¹	Total carbon loss from paddy field is 4,000 (kgC ha ⁻¹ y ⁻¹)...(1). Therefore, total carbon loss from paddy field (t y ⁻¹) = 4,000 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 217.6 (ha)/1000 = 870 (t y ⁻¹). Assumption that carbon loss from the paddy field is in the form of methane and carbon dioxide. Therefore, carbon loss in the form of carbon dioxide (t y ⁻¹) = Total carbon loss rate (t y ⁻¹) - Carbon loss rate in the form of methane (t y ⁻¹) = 870 (t y ⁻¹) - 65 (t y ⁻¹) = 805 (t y ⁻¹).	(1) Systemization Sub-team, Bio-Recycle Project ed. (2006) : Design and Evaluation of Biomass Use System, p. 33	27
	N	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Nitrogen is not lost by carbon dioxide emissions. Average yield of unhulled rice is 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) with a water content of 15%...(1),(2) Generation rate of polished rice (normal) to yield of unhulled rice is 0.6161 with a water content of 15%...(1) Therefore, the amount of polished rice (normal) with the water content of 15% (t y ⁻¹) = Yield of unhulled rice with a water content of 15% (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * Generation rate = 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.6161 = 1,341 (t y ⁻¹)	—	-
(Output) Yield of polished rice (normal)	W	0.6161	—	1,341	t y ⁻¹		(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Interviews of VPC and Villagers	28
	C	42.5	%	484	t y ⁻¹	Carbon concentration of polished rice under dry conditions is about 42.5 (%)...(1) Therefore, carbon content of polished rice (normal) = Amount of polished rice (normal) with a water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of polished rice under dry conditions (%) = 1,341 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 42.5/100 = 484 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from May to August 2012, from December 2013 to March 2014)	29
(Output) Yield of polished rice (broken)	N	1.2	%	13.7	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of polished rice under dry conditions is 1.2 (%)...(1) Therefore, nitrogen content of polished rice (normal) = Amount of polished rice (normal) with the water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of polished rice (normal) under dry conditions (%) = 1,341 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 1.2/100 = 13.7 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from May to August 2012, December 2013 to March 2014)	30
	W	0.0967	—	210	t y ⁻¹	Generation rate of polished rice (broken) to yield of unhulled rice is 0.0967 with a water content of 15%...(1) Therefore, the amount of polished rice (broken) with a water content of 15% (t y ⁻¹) = Yield (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * Generation rate = 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.0967 = 210 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	31
(Output) Yield of polished rice (broken)	C	42.5	%	76	t y ⁻¹	Carbon concentration of polished rice under dry conditions is 42.5 (%)...(1) Therefore, carbon content of polished rice (broken) = Amount of polished rice (broken) with a water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of polished rice (broken) under dry conditions (%) = 210 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 42.5/100 = 76 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from May to August 2012, from December 2013 to March 2014)	32
	N	1.2	%	2.1	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of polished rice under dry conditions is 1.2 (%)...(1) Therefore, nitrogen content of polished rice (broken) = Amount of polished rice (broken) with a water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of polished rice (broken) under dry conditions (%) = 210 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 1.2/100 = 2.1 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from May to August 2012, from December 2013 to March 2014)	33
(Output) Yield of rice husk	W	0.1995	—	434	t y ⁻¹	Generation rate of rice husk to yield of unhulled rice is 0.1995 with a water content of 15%...(1) Therefore, the amount of rice husk with a water content of 15% (t y ⁻¹) = Yield (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * Generation rate = 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.1995 = 434 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	34

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Output) Yield of rice husk	C	34.6	%	128	t y ⁻¹	Carbon concentration of rice husk under dry conditions is 34.6 (%)....(1) Therefore, carbon content of rice husk (t y ⁻¹) = Amount of rice husk with the water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of rice husk with dry conditions (%) = 434 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 34.6/100 = 128 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 69	35
	N	0.32	%	1.2	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of rice husk is 0.32 (%)....(1) Therefore, nitrogen content of rice husk (t y ⁻¹) = Amount of rice husk with a water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of rice husk with dry conditions (%) = 434 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 0.32/100 = 1.2 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 69	36
	W	0.0877	—	191	t y ⁻¹	Generation rate of rice bran to yield of unhulled rice with a water content of 15% is 0.0877...(1). Therefore, the amount of rice bran with a water content of 15% (t y ⁻¹) = Yield with a water content of 15% (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * Generation rate = 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.0877 = 191 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	37
(Output) Yield of rice bran	C	40.2	%	65	t y ⁻¹	Carbon concentration of rice bran under dry conditions is 40.2 (%)....(1) Therefore, carbon content of rice bran = Amount of rice bran with the water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of rice bran with dry conditions (%) = 191 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 40.2/100 = 65 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 69	38
	N	1.18	%	1.9	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of rice bran under dry conditions is 1.18 (%)....(1) Therefore, nitrogen content of rice bran = Amount of rice bran with the water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of rice bran with dry conditions (%) = 191 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 1.18/100 = 1.9 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 69	39
	W	1.1154	—	2,427	t y ⁻¹	Generation rate of upper part above dividing point by combine or hook at harvesting of rice straw to yield of unhulled rice is 1.1154...(1),(2) Therefore, the amount of rice straw (upper part) (t y ⁻¹) = Yield (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * Generation rate = 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 1.1154 = 2,427 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Interviews of Villagers	40
(Output) Yield of rice straw (Upper part above dividing point at harvesting)	C	37.01	%	764	t y ⁻¹	Carbon concentration of rice straw under dry conditions is 37.01 (%)....(1) Therefore, carbon content of rice straw (upper part) = Amount of rice straw (upper part) with a water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of rice straw under dry conditions (%) = 2,427 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 37.01/100 = 764 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	41
	N	0.66	%	13.6	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of rice straw under dry conditions is 0.66 (%)....(1) Therefore, nitrogen content of rice straw (upper part) = Amount of rice straw (upper part) (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of rice straw under dry conditions (%) = 2,427 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 0.66/100 = 13.6 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	42
	W	0.2676	—	582	t y ⁻¹	Generation rate of lower part below dividing point by combine or hook of rice straw to yield of unhulled rice is 0.2676...(1),(2) Therefore, the amount of rice straw (lower part) (t y ⁻¹) = Yield (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * Generation rate = 4 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.2676 = 582 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Interviews of Villagers	43

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Output) Yield of rice straw (Lower part below dividing point at harvesting)	C	37.01	%	183	t y ⁻¹	Carbon concentration of rice straw under dry conditions is 37.01 (%)....(1) Therefore, carbon content of rice straw (lower part) = Amount of rice straw (lower part) (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of rice straw under dry conditions (%) = 582 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 37.01/100 = 183 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	44
	N	0.66	%	3.3	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of rice straw under dry conditions is 0.66 (%)....(1) Therefore, nitrogen content of rice straw = Amount of rice straw (lower part) (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of rice straw under dry conditions (%) = 582 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 0.66/100 = 3.3 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012)	45
(Output) Ammonia volatilization (With use of slurry)	W	—	—	3	t y ⁻¹	Weight is same as ammonia vitalization rate.	—	46
	C	0	—	0	t y ⁻¹	Carbon is not lost by ammonia volatilization.	—	-
(Output) Ammonia volatilization (With use of slurry)	N	4.86	%	2.6	t y ⁻¹	Nitrogen loss by ammonia volatilization is 1.7% of nitrogen fertilization rate per crop at paddy field with the pH range between 3.4 and 6.2....(1) By laboratory test on application of chemical fertilizer and slurry to soil in experimental paddy field (pH 3.5-4.0), the ammonia volatilization rate in the application of slurry was 2.857 times greater than in chemical fertilizer....(2) Therefore, nitrogen loss by ammonia volatilization (t y ⁻¹) = Nitrogen content of fertilizer (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * Cropping area in a year (ha y ⁻¹) * 0.017/1,000 * 2.857 = 100 (kg ha ⁻¹ crop ⁻¹) * 544 (ha y ⁻¹) * 0.017/1,000 * 2.857 = 2.6 (t y ⁻¹)	(1) Watanabe T. (2009) : Measurement of ammonia volatilization from flooded paddy fields in Vietnam. Soil Science and Plant Nutrition, 55, pp. 793-799 (2) Laboratory-test	47
	W	—	—	2,250	t y ⁻¹	Rice straw burned after cultivation is the total of all lower part below dividing point, and 4/6 of upper part above dividing point by combine or hook....(1) Therefore, the amount of burned rice straw (t y ⁻¹) = 582 (t y ⁻¹) + 4/6 * 2,427 (t y ⁻¹) = 2,200 (t y ⁻¹) The contribution to the gaseous C released to the atmosphere is 84% for CO ₂ , 14% for CO and 1.2% for CH ₄(2) Total carbon loss is 657 (t y ⁻¹) as below calculation for carbon rate. Therefore, carbon loss by CO ₂ (t y ⁻¹) = 657 (t y ⁻¹) * 0.84 = 552 (t y ⁻¹) Carbon loss by CO (t y ⁻¹) = 657 (t y ⁻¹) * 0.14 = 92 (t y ⁻¹) Carbon loss by CH ₄ (t y ⁻¹) = 657 (t y ⁻¹) * 0.012 = 8 (t y ⁻¹) Therefore, the weight of gas released in burning the rice straw (t y ⁻¹) = Total of loss in the form of CO ₂ , CO and CH ₄ = 552 (t y ⁻¹) + 44/12 + 92 (t y ⁻¹) * 28/12 + 8 * 16/12 = 2,250 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Nguyen B. C. et al. (1994) : CH ₄ and CO emissions from rice straw burning in south east Asia, Environmental Monitoring and Assessment 31, pp. 131-137	48
(Output) Gas emission in straw after harvesting (Without use of rice straw for bio- ethanol)	C	37.01	%	657	t y ⁻¹	Carbon concentration of rice straw under dry conditions is 37.01 (%)....(1) Therefore, carbon content of 2,200 (t y ⁻¹) of rice straw (t y ⁻¹) = Amount of rice straw with a water content of 15% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of rice straw under dry conditions (%) = 2,200 (t y ⁻¹) * (1-15/100) * 37.01/100 = 692 (t y ⁻¹) 3) About 95% of the carbon burned is released in the atmosphere in the gaseous form....(2) 4) Therefore, carbon loss rate by burning of rice straw (t y ⁻¹) = 692 (t y ⁻¹) * 0.95 = 657 (t y ⁻¹)	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Nguyen B. C. et al. (1994) : CH ₄ and CO emissions from rice straw burning in south east Asia, Environmental Monitoring and Assessment 31, pp. 131-137	49
	N	—	—	0	t y ⁻¹	Nitrogen is not lost.	—	-

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Output) Gas emission in burning unused rice straw after harvesting (With use of rice straw for bio-ethanol)	W	—	—	594	t y ⁻¹	<p>Rice straw burned after cultivation is the total of all lower part below dividing point. Therefore, the amount of burned rice straw (t y⁻¹) = 582 (t y⁻¹)....(1) The contribution to the gaseous C released to the atmosphere is 84% for CO₂, 14% for CO and 1.2% for CH₄....(2) Total carbon loss is 174 (t y⁻¹) as below calculation about carbon rate. Therefore, carbon loss by CO₂ (t y⁻¹), CO (t y⁻¹) and CH₄ (t y⁻¹) ≒ 146 (t y⁻¹), 24 (t y⁻¹) and 2 (t y⁻¹) Therefore, the weight of gas released in burning the rice straw (t y⁻¹) = Total of loss in the form of CO₂, CO and CH₄ = 146 (t y⁻¹) * 44/12 + 24 (t y⁻¹) * 28/12 + 2 * 16/12 = 594 (t y⁻¹)</p>	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Nguyen B. C. et al. (1994) : CH ₄ and CO emissions from rice straw burning in south east Asia, Environmental Monitoring and Assessment 31, pp. 131-137	50
	C	37.01	%	174	t y ⁻¹	<p>Carbon concentration of rice straw under dry conditions is 37.01 (%)....(1) Therefore, carbon content of 582 (t y⁻¹) of rice straw (t y⁻¹) = Amount of rice straw with a water content of 15% (t y⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of rice straw under dry conditions (%) = 582 (t y⁻¹) * (1-15/100) * 37.01/100 ≒ 183 (t y⁻¹) About 95% of the carbon burned is released in the atmosphere in the gaseous form....(2) Therefore, carbon loss rate by burning of rice straw (t y⁻¹) = 183 (t y⁻¹) * 0.95 ≒ 174 (t y⁻¹)</p>	(1) Field survey at test field (from December 2011 to March 2012, from May to August 2012) (2) Nguyen B. C. et al. (1994) : CH ₄ and CO emissions from rice straw burning in south east Asia, Environmental Monitoring and Assessment 31, pp. 131-137	51
	N	—	—	0	t y ⁻¹	Nitrogen is not lost.	—	—

Appendix 1-2 Bases of data used for regional diagnosis (non-paddy field compartment)

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
Total area	—	—	—	421	ha	—	Interviews of VPC, DARD	1
Corn cultivation area	—	—	—	200	ha	—	Interviews of VPC, DARD	2
(Input) Application of chemical fertilizer for corn	W	3,500	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	700	t y ⁻¹	Chemical fertilization rate is 10 times nitrogen fertilization rate.	Rough assumption	3
	C	0	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in chemical fertilizer.	—	—
(Input) Application of chemical fertilizer for corn	N	350	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	70.0	t y ⁻¹	Fertilization standard for corn in Okinawa Prefecture is referred to here because standard for corn in Vietnam is not clear. Fertilization with chemical fertilizer is "N : P ₂ O ₅ : K ₂ O = 35 : 19 : 20 (Unit: kg 10a ⁻¹ y ⁻¹)"....(1) Therefore, nitrogen fertilization rate with chemical fertilizer (t y ⁻¹) = 350 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 200 (ha)/1,000 = 70.0 (t y ⁻¹)	(1) Guideline for vegetable cultivation in Okinawa Prefecture (2006) : Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Okinawa Prefecture, p. 7	4
	W	25	t ha ⁻¹ y ⁻¹	5,000	t y ⁻¹	Compost is used for cultivation of corn....(1) Fertilization standard for corn in Okinawa Prefecture is referred to here because standard for corn in Vietnam is not clear. Fertilization with compost is 2,500 kg 10a ⁻¹ y ⁻¹(2) Therefore, application rate of compost (t y ⁻¹) = Fertilization rate with compost (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha) = 25 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * 200 (ha) = 5,000 (t y ⁻¹) * In case of using digested slurry as fertilizer, application rate of compost would be decreased.	(1) Interviews of Villagers (2) Guideline for vegetable cultivation in Okinawa Prefecture(2006) : Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Okinawa Prefecture, p. 7	5
(Input) Application of compost for corn	C	18.36	%	918	t y ⁻¹	Ratio of carbon to nitrogen is 18, and nitrogen concentration is 1.02 (%).....(1) Therefore, carbon concentration in dry compost is 18.36 (%). Therefore, application rate (t y ⁻¹) = Application rate (t y ⁻¹) * Carbon concentration of compost (%) = 5,000 (t y ⁻¹) * 18.36/100 = 918 (t y ⁻¹) * In case of using digested slurry as fertilizer, the application rate of compost would be decreased.	(1) Kin Organic Compost Center Industry Ltd. http://kin-taihi.jp/product.html	6
	N	1.02	%	51.0	t y ⁻¹	Nitrogen concentration in compost is 1.02 (%).....(1) Therefore, application rate of nitrogen with compost (t y ⁻¹) = Application rate of compost (t y ⁻¹) * Nitrogen concentration of compost (%) = 5,000 (t y ⁻¹) * 1.02/100 = 51.0 (t y ⁻¹) * In case of using digested slurry as fertilizer, the application rate of compost would be decreased.	Kin Organic Compost Center Industry Ltd. http://kin-taihi.jp/product.html	7
Vegetable cultivation area	—	—	—	75	ha	—	Interviews of VPC, DARD	8
	W	2,560	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	192	t y ⁻¹	Chemical fertilization rate is 10 times nitrogen fertilization rate.	Rough assumption	9
(Input) Application of chemical fertilizer for vegetables (sugar cane)	C	0	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in chemical fertilizer.	—	—
	N	256	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	19.2	t y ⁻¹	Vegetable variety cultivated at Thai My Village is not clear because vegetable variety is decided according to the price year by year....(1) Sugar cane is one of the main vegetables cultivated in Vietnam....(2) and also in Thai My Village....(1), so assumption is sugar cane as main vegetable here. Fertilization standard for sugar cane in Okinawa Prefecture is referred here because standard for sugar cane in Vietnam is not clear. Fertilization by chemical fertilizer is "N : P ₂ O ₅ : K ₂ O = 25.6 : 23.2 : 10.9 (Unit: kg 10a ⁻¹ y ⁻¹) on average"....(3) Therefore, nitrogen fertilization rate with chemical fertilizer (t y ⁻¹) = 25.6 (kg 10a ⁻¹ y ⁻¹) * 10 * Area (ha)/1,000 = 19.2 (t y ⁻¹)	(1) Interviews of VPC and Villagers (2) Statistical Year Book 2011(2011) : General Statistical Office in Vietnam, pp. 322-324 (3) Guideline for sugar cane cultivation (2006) : Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Okinawa Prefecture	10
Fruit cultivation area	—	—	—	146	ha	—	Interviews of VPC, DARD	11

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Input) Application of chemical fertilizer for fruit (mango)	W	4,000	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	584	t y ⁻¹	Fruit variety cultivated at Thai My Village is not clear because decided according to the price year by year... (1) Mango is one of the main fruits cultivated in Vietnam... (2) and also in Thai My Village... (1), so assumption is mango as the main fruit here. Fertilization standard for mango (five years after starting cultivation) in Okinawa Prefecture is used here because standard for mango in Vietnam is not clear. Fertilization by chemical fertilizer is total fertilization rate in a year of 400 (kg 10a ⁻¹)... (3) Therefore, chemical fertilization rate (t y ⁻¹) = Fertilization rate (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 10 * Area (ha)/1,000 = 4,000 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 146 (ha)/1,000 = 584 (t y ⁻¹) Carbon is not contained in chemical fertilizer.	(1) Interviews of VPC and Villagers (2) Statistical Year Book 2011(2011) : General Statistical Office in Vietnam, pp. 372-374 (3) Guideline for fruits cultivation, Forestry and Fisheries, Okinawa Prefecture, p. 10	12
	C	0	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Fertilization standard for mango (five years after starting cultivation) in Okinawa Prefecture is used here because standard for mango in Vietnam is not clear. Nitrogen fertilization rate shown in above standard is 20 (kg 10a ⁻¹) in a year... (1) Therefore, nitrogen fertilization rate of chemical fertilizer (t y ⁻¹) = Nitrogen fertilization rate (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha)/1,000 = 200 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 146 (ha)/1,000 = 29.2 (t y ⁻¹)	(1) Guideline for fruits cultivation, (2003) : Department of Agriculture, Forestry and Fisheries, Okinawa Prefecture, p. 10	13
	W	7.5	t ha ⁻¹ y ⁻¹	1,500	t y ⁻¹	Yield of corn per crop is 6-9 (t ha ⁻¹)... (1), so, the average is 7.5 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹). Corn is cultivated once a year, so, 7.5 (t ha ⁻¹ crop ⁻¹) = 7.5 (t ha ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, yield (t y ⁻¹) = yield (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha) = 7.5 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * 200 (ha) = 1,500 (t y ⁻¹)	(1) Interviews of VPC and Villagers	14
(Output) Yield of corn	C	43.8	%	399	t y ⁻¹	Carbon concentration of corn under dry conditions is 43.8%... (1) Assumption that water content of corn in above yield is 39.2%... (1) Therefore, carbon content with a water content of 39.2% (t y ⁻¹) = Yield with the water content of 39.2% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 1,500 (t y ⁻¹) * (1-39.2/100) * 43.8/100 = 399 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 70	15
	N	2.12	%	19.3	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 2.12%... (1) Assumption that water content of corn in above yield is 39.2%... (1) Therefore, nitrogen content with a water content of 39.2% (t y ⁻¹) = Yield of corn with the water content is 39.2% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 1,500 (t y ⁻¹) * (1-39.2/100) * 2.12/100 = 19.3 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 70	16
	W	62.95	t ha ⁻¹ y ⁻¹	4,721	t y ⁻¹	Yield of sugar cane in Ho Chi Minh City is 132,200 (t y ⁻¹) when the cultivation area is 2,100 (ha)... (1) Therefore, calculating as 133,200 (t y ⁻¹)/2,100 (ha) = 62.95 (t ha ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, yield of sugar cane (t y ⁻¹) = Yield (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha) = 62.95 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * 75 (ha) = 4,721 (t y ⁻¹)	(1) Statistical Year Book 2011(2011) : General Statistical Office in Vietnam, pp. 366-367	17
(Output) Yield of sugar cane	C	42.5	%	1,810	t y ⁻¹	Carbon concentration under dry conditions is 42.5%... (1) Assumption that water content of sugar cane in above yield is 9.8%... (1) Therefore, carbon content with a water content of 9.8% (t y ⁻¹) = Yield of sugar cane (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 4,721 (t y ⁻¹) * (1-9.8/100) * 42.5/100 = 1,810 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 70	18

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
(Output) Yield of sugar cane	N	0.8	%	34.1	t y ⁻¹	Nitrogen concentration of sugar cane under dry conditions is 0.8%... (1) Assumption that water content of sugar cane in above yield is 9.8%... (1) Therefore, nitrogen content of sugar cane with a water content of 9.8% (t y ⁻¹) = Yield of sugar cane (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of sugar cane (%) = 4,721 (t y ⁻¹) * (1-9.8/100) * 0.8/100 ≈ 34.1 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, p. 70	19
	W	0.824	t ha ⁻¹ y ⁻¹	120	t y ⁻¹	Yield of mango in Vietnam is 71,200 (t y ⁻¹) when the cultivation area is 86,400 (ha)... (1) Therefore, calculating as 71,200 (t y ⁻¹)/86,400 (ha) = 0.824 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) Therefore, Yield (t y ⁻¹) = Yield (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha) = 0.824 (t ha ⁻¹ y ⁻¹) * 146 (ha) ≈ 120 (t y ⁻¹)	(1) Statistical Year Book 2011(2011) : General Statistical Office in Vietnam. pp. 372-373	20
(Output) Yield of mango	C	40	%	9	t y ⁻¹	Assumption that carbon concentration is 40%, because carbon concentration of other plants under dry conditions is about 40%... (1) Assumption that water content of mango in above yield is 82%... (2) Therefore, carbon content (t y ⁻¹) = Yield of mango with the water content of 82% (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration of mango (%) = 120 (t y ⁻¹) * (1-82/100) * 40/100 ≈ 9 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 69-70 (2) Kagawa Y. et al. (2003) : Food component table, Kagawa Education Institute of Nutrition Press, p. 118	21
	N	0.096	%	0.0	t y ⁻¹	Protein content of mango is 0.6%... (1) Coefficient of nitrogen concentration to protein content is 6.25... (1) Therefore, nitrogen concentration of mango = 0.6/6.25 = 0.096 % Assumption that water content of mango in above yield is 82%... (1) Therefore, nitrogen content of mango with a water content of 82% (t y ⁻¹) = Yield of mango (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration of mango (%) = 120 (t y ⁻¹) * (1-82/100) * 0.096/100 (%) ≈ 0.0 (t y ⁻¹)	(1) Kagawa Y. et al. (2003) : Food component table, Kagawa Education Institute of Nutrition Press, p. 118, p.255	22
	W	1881.8	mm y ⁻¹	7,922,378	t y ⁻¹	Mean annual precipitation is 1881.8 (mm y ⁻¹)... (1) Therefore, input from precipitation (t y ⁻¹) = Mean annual precipitation (mm y ⁻¹) * Area (ha) * 10 = 1881.8 (mm y ⁻¹) * 421 (ha) * 10 = 7,922,378 (t y ⁻¹)	(1) Global Meteorological Information CD edited by Japan Meteorological Business Support Center	23
(Input) Precipitation	C	1.9	mg L ⁻¹	15	t y ⁻¹	Total carbon concentration of precipitation is 1.9 (mg L ⁻¹)... (1) Therefore, input from precipitation (t y ⁻¹) = Total carbon concentration of precipitation (mg L ⁻¹) * Precipitation rate (t y ⁻¹)/1,000,000 = 1.9 (mg L ⁻¹) * 7,922,378 (t ha ⁻¹)/1,000,000 ≈ 15 (t y ⁻¹)	(1) Hanya T. and Ogura N. (1985) : Water quality investigation method, p.58, Maruzen.	24
	N	1.1	mg L ⁻¹	8.7	t y ⁻¹	Total nitrogen concentration of precipitation is 1.1 (mg L ⁻¹)... (1) Therefore, input from precipitation (t y ⁻¹) = Total nitrogen concentration of precipitation (mg L ⁻¹) * Precipitation rate (t y ⁻¹)/1,000,000 = 1.1 (mg L ⁻¹) * 7,922,378 (t ha ⁻¹)/1,000,000 ≈ 8.7 (t y ⁻¹)	(1) Tabuchi T. and Takamura Y. (1985) : Discharge of nitrogen and phosphorus from watershed, p. 19, University of Tokyo Press.	25
(Input) Photosynthesis	W	—	—	8,133	t y ⁻¹	Carbon is provided from the air as carbon dioxide by the following formula for photosynthesis: 6CO ₂ + 12H ₂ O → C ₆ H ₁₂ O ₆ + 6H ₂ O + 6O ₂ Therefore, photosynthesis rate (t y ⁻¹) = 44/12 * Carbon rate taken by photosynthesis (t y ⁻¹) ≈ 8,133 (t y ⁻¹)	Calculation based on the molecular formula of carbon dioxide	26

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.	
		Value	Unit	Value	Unit				
(Input) Photosynthesis	C	2,218	t y ⁻¹	2,218	t y ⁻¹	Assumption that carbon content provided by photosynthesis is equal to the carbon content of harvest Therefore, 2,218 (t y ⁻¹)	Calculation by sum of carbon content of harvested corn, sugar cane and mango.	27	
	N	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹				Nitrogen is not provided by photosynthesis.
	W	—	—	44	t y ⁻¹				Weight is same as nitrogen fixation rate.
(Input) Nitrogen fixation	C	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not provided by nitrogen fixation. Nitrogen fixation rate is 10-200 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)...(1), so, the average value is 105 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, nitrogen fixation rate (t y ⁻¹) = Nitrogen fixation rate (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha)/1,000 = 105 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 421 (ha)/1,000 ≒ 44.2 (t y ⁻¹)	(1) Systemization Sub-team, Bio-recycle Project ed. (2006) : Design and Evaluation of Biomass Use System, pp. 30-39	29	
	N	105	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	44.2	t y ⁻¹				
	W	—	—	8	t y ⁻¹				Weight is almost same as nitrogen loss rate by emission.
(Output) Nitrogen loss by emission (Both ammonia volatilization and denitrification)	C	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not lost by both ammonia volatilization and denitrification. Nitrogen loss rate by emission is 5-30 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹)...(1), the average value is 18 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, nitrogen loss rate by emission (t y ⁻¹) = Nitrogen loss rate by emission (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha)/1,000 = 18 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 421 (ha)/1,000 ≒ 7.6 (t y ⁻¹)	(1) Systemization Sub-team, Bio-recycle Project ed. (2006) : Design and Evaluation of Biomass Use System, pp. 30-39	31	
	N	18	kg ha ⁻¹ y ⁻¹	7.6	t y ⁻¹				
	W	—	—	3,859	t y ⁻¹				Assumption that carbon loss is in the form of carbon dioxide. Therefore, carbon dioxide emission (t y ⁻¹) = 44/12 * Carbon loss (t y ⁻¹) ≒ 3,859 (t y ⁻¹)
(Output) Carbon dioxide emission	C	2,500	kgC ha ⁻¹ y ⁻¹	1,053	t y ⁻¹	Carbon loss is 1,500-3,500 (kgC ha ⁻¹ y ⁻¹)...(1), the average value is 2,500 (kgC ha ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, carbon loss (t y ⁻¹) = Carbon loss rate (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * Area (ha)/1,000 = 2,500 (kg ha ⁻¹ y ⁻¹) * 421 (ha)/1,000 ≒ 1,053 (t y ⁻¹)	Calculation based on the molecular formula of carbon dioxide	32	
	N	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹				Nitrogen is not lost by carbon dioxide emissions.
	W	—	—	5,545,665	t y ⁻¹				Assumption that 70% of precipitation is evapotranspiration, Evapotranspiration rate (t y ⁻¹) = 0.7 * Precipitation rate (t y ⁻¹) = 0.7 * 7,922,378 ≒ 5,545,665 (t y ⁻¹)
(Output) Evapotranspiration	C	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Assumption that percolation rate (t y ⁻¹) = Precipitation rate (t y ⁻¹) + (Application rate of digested slurry (using digested slurry because the water content of digested slurry is greater than 98%)) - Evapotranspiration rate (t y ⁻¹) = 2,377,969 (t y ⁻¹) (Case that 1,255 (t y ⁻¹) of digested slurry is used)	Rough assumption	34	
	N	—	—	—	—				Carbon is not lost by denitrification.
	W	—	—	2,377,969	t y ⁻¹				Nitrate leaching rate is 20-40%...(1), so the average is 30%. Therefore, nitrate leaching rate (t y ⁻¹) = Nitrogen fertilization rate (t y ⁻¹) * 0.3 = 169.4 (t y ⁻¹) * 0.3 ≒ 50.8 (t y ⁻¹) *Here, nitrogen fertilization indicates by chemical fertilizer, compost and slurry.
(Output) Percolation	C	0	t y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not lost by denitrification. Nitrate leaching rate is 20-40%...(1), so the average is 30%. Therefore, nitrate leaching rate (t y ⁻¹) = Nitrogen fertilization rate (t y ⁻¹) * 0.3 = 169.4 (t y ⁻¹) * 0.3 ≒ 50.8 (t y ⁻¹) *Here, nitrogen fertilization indicates by chemical fertilizer, compost and slurry.	(1) Systemization Sub-team, Bio-recycle Project ed. (2006) : Design and Evaluation of Biomass Use System, pp. 30-39	36	
	N	169.4	t y ⁻¹	50.8	t y ⁻¹				
	W	—	—	—	—				

Appendix 1-3 Bases of data used for regional diagnosis (livestock wastes compartment)

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
Number of pigs	—	—	—	11,000	head	—	Interviews of VPC and Villagers	1
	W	0.73	t head ⁻¹ y ⁻¹	8,030	t y ⁻¹	Generation rate is 1.0-3.0 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)...(1), so the average is 2.0 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) = 0.73 (t head ⁻¹ y ⁻¹) Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 0.73 * 11,000 = 8,030 (t y ⁻¹)	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutant wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	2
	C	18.68	%	459	t y ⁻¹	Ratio of carbon to nitrogen is 20-25, and nitrogen concentration under dry conditions is 0.83 (%)...(1) Therefore, carbon concentration in dry conditions is 18.68 (%) in average. Water content of raw feces is 69.4 (%)...(2) Therefore, carbon content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 8,030 (t y ⁻¹) * (1-69.4/100) * 18.68/100 = 459 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	3
Generation rate of feces (pig)	—	—	—	—	—	—	Interviews of VPC and Villagers	7
	N	0.83	%	20.4	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 0.83 (%)...(1) Water content of raw feces is 69.4 (%)...(2) Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 8,030 (t y ⁻¹) * (1-69.4/100) * 0.83/100 = 20.4 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	4
	W	0.49	t head ⁻¹ y ⁻¹	5,390	t y ⁻¹	Generation rate is 0.7-2.0 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)...(1), so the average is 1.35 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) = 0.49 (t head ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 0.49 * 11,000 = 5,390 (t y ⁻¹) Carbon is not contained in urine.	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutant wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	5
Generation rate of urine (pig)	C	0	—	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in urine.	—	—
	N	32.5	%	35.0	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 32.5%, and water content of raw urine is 98.0%...(1) Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 5,390 (t y ⁻¹) * (1-98.0/100) * 32.5/100 = 35.0 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	6

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
Generation rate of feces (beef)	W	8.22	t head ⁻¹ y ⁻¹	13,637	t y ⁻¹	Generation rate is 20-25 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)...(1), so the average is 22.5 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) ≒ 8.22 (t head ⁻¹ y ⁻¹) Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 8.22 * 1,659 ≒ 13,637 (t y ⁻¹)	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutants in wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	8
	C	15.75	%	427	t y ⁻¹	Ratio of carbon to nitrogen is 20-25, and nitrogen concentration under dry conditions is 0.7 (%)...(1). Therefore, carbon concentration under dry conditions is 15.75 (%) in average. Water content of raw feces is 80.1 (%)...(2). Therefore, carbon content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 13,637 (t y ⁻¹) * (1-80.1/100) * 1.575/100 ≒ 427 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	9
	N	0.7	%	19.0	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 0.7 (%)...(1) Water content of raw feces is 80.1 (%)...(2) Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 13,637 (t y ⁻¹) * (1-80.1/100) * 0.7/100 ≒ 19.0 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	10
	W	4.56	t head ⁻¹ y ⁻¹	7,565	t y ⁻¹	Generation rate is 10-15 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)...(1), so the average is 12.5 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) ≒ 4.56 (t head ⁻¹ y ⁻¹) Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * The numbers (heads) = 4.56 * 1,659 ≒ 7,565 (t y ⁻¹) Carbon is not contained in urine.	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutants in wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	11
Generation rate of urine (beef)	C	0	t head ⁻¹ y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in urine.	—	-
	N	27.1	%	14.4	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 27.1%, and water content of raw urine is 99.3%...(1). Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 7,565 (t y ⁻¹) * (1-99.3/100) * 27.1/100 ≒ 14.4 (t y ⁻¹)	Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	12
Number of milk cow	—	—	—	61	head	Interviews of VPC and Villagers	—	13
Generation rate of feces (milk cow)	W	8.22	t head ⁻¹ y ⁻¹	501	t y ⁻¹	Generation rate is 20-25 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)...(1), so the average is 22.5 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) ≒ 8.22 (t head ⁻¹ y ⁻¹) Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 8.22 * 61 ≒ 501 (t y ⁻¹)	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutants in wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	14

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
Generation rate of feces (milk cow)	C	8.55	%	9	t y ⁻¹	Ratio of carbon to nitrogen is 20-25, and nitrogen concentration under dry conditions is 0.38 (%)....(1) Therefore, carbon concentration under dry conditions is 8.55 (%) in average. Water content of raw feces is 80.1 (%)....(2) Therefore, carbon content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 501 (t y ⁻¹) * (1-80.1/100) * 8.55/100 ≈ 9 (t y ⁻¹)	1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City 2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	15
	N	0.38	%	0.4	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 0.38 (%)....(1) Water content of raw feces is 80.1 (%)....(2) Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 501 (t y ⁻¹) * (1-80.1/100) * 0.38/100 ≈ 0.4 (t y ⁻¹)	1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City 2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	16
	W	4.56	t head ⁻¹ y ⁻¹	278	t y ⁻¹	Generation rate is 10-15 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)....(1), so the average is 12.5 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) ≈ 4.56 (t head ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 4.56 * 61 ≈ 278 (t y ⁻¹) Carbon is not contained in urine.	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutant in wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	17
Generation rate of urine (milk cow)	C	0	t head ⁻¹ y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in urine.	—	-
	N	27.1	%	0.5	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 27.1%, and water content of raw urine is 99.3%....(1) Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 278 (t y ⁻¹) * (1-99.3/100) * 27.1/100 ≈ 0.5 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	18
	—	—	—	8,000	head	Interviews of VPC and Villagers	Interviews of VPC and Villagers	19
Number of poultry	W	0.0435	t head ⁻¹ y ⁻¹	348	t y ⁻¹	Generation rate is 0.0435 (t head ⁻¹ y ⁻¹)....(1) Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 0.0435 * 8,000 = 348 (t y ⁻¹)	(1) Unit for practical realization of system in Chiba Pref. Bio-recycle Project ed. (2007) Prolog for construction of Agri-biomass town, pp. 22-23	20
	C	13.2	%	17	t y ⁻¹	Ratio of carbon to nitrogen is 7-15, and nitrogen concentration under dry conditions is 1.2 (%)....(1) Therefore, carbon concentration under dry conditions is 13.2 (%) in average. Water content of raw feces is 63.7 (%)....(2) Therefore, carbon content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 348 (t y ⁻¹) * (1-63.7/100) * 13.2/100 ≈ 17 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	21

Data required	Component	Specific value		Total amount		Process of calculation	Data/information sources	No.
		Value	Unit	Value	Unit			
Generation rate of feces (poultry)	N	1.2	%	1.5	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 1.2 (%). Water content of raw feces is 63.7 (%). Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 348 (t y ⁻¹) * (1-63.7/100) * 1.20/100 ≒ 1.5 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	22
	—	—	—	400	head	—	Interviews of VPC and Villagers	23
Number of buffalo	W	8.22	t head ⁻¹ y ⁻¹	3,288	t y ⁻¹	Generation rate is 20-25 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)... (1), so the average is 22.5 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) ≒ 8.22 (t head ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 8.22 * 400 = 3,288 (t y ⁻¹)	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutants in wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	24
	C	6.98	%	46	t y ⁻¹	Ratio of carbon to nitrogen is 20-25 on the assumption that the value of buffalo is same as beef, and nitrogen concentration under dry conditions 0.31 (%). Therefore, carbon concentration under dry conditions is 6.98 (%). Water content of raw feces is 80.1 (%). Therefore, carbon content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Carbon concentration under dry conditions (%) = 3,288 (t y ⁻¹) * (1-80.1/100) * 6.98/100 ≒ 46 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	25
	—	—	—	—	—	—	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	26
Generation rate of feces (buffalo)	N	0.31	%	2.0	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 0.31 (%). water content of raw feces is 80.1 (%). Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration und conditions (%) = 3,288 (t y ⁻¹) * (1-80.1/100) * 0.31/100 ≒ 2.0 (t y ⁻¹)	(1) Ngo K. S. and Nguyen L. D. (1997) : Biogas production using anaerobic digestion, Book of Agriculture Publishing House, Ho Chi Minh City (2) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	26
	W	4.56	t head ⁻¹ y ⁻¹	1,824	t y ⁻¹	Generation rate is 10-15 (kg head ⁻¹ d ⁻¹)... (1), so the average is 12.5 (kg head ⁻¹ d ⁻¹) ≒ 4.56 (t head ⁻¹ y ⁻¹). Therefore, raw weight (t y ⁻¹) = Generation rate (t head ⁻¹ y ⁻¹) * Numbers (head) = 4.56 * 400 = 1,824 (t y ⁻¹)	(1) Nguyen T. H. L. (1994) : Study on pollutants in wastes from medium-scale pig farms and application of waste treatment methods for the piggery farms, Doctoral dissertation, Nong Lam University in Ho Chi Minh City	27
Generation rate of urine (buffalo)	C	0	t head ⁻¹ y ⁻¹	0	t y ⁻¹	Carbon is not contained in urine.	—	—
	N	27.1	%	3.5	t y ⁻¹	Nitrogen concentration under dry conditions is 27.1 (%), and water content of raw urine is 99.3 (%). Therefore, nitrogen content = Raw weight (t y ⁻¹) * (1-water content (%)) * Nitrogen concentration under dry conditions (%) = 1,824 (t y ⁻¹) * (1-99.3/100) * 27.1/100 ≒ 3.5 (t y ⁻¹)	(1) Nakamura M. et al. (2005) : Development of a composition database for various types of biomass, Technical Report of the National Institute for Rural Engineering, pp. 57-80	28

Appendix 2 Calculation procedures of cost for fertilization

Appendix 2-1 Operation costs

1. Conventional cultivation with chemical fertilizer

(1) Area: 2,500 m²

An area of 2,500 m² was set to optimize the transportation of chemical fertilizer as shown (3) below.

(2) Weight and price of chemical fertilizer

a. The first additional fertilization

Weight of phosphorus fertilizer: $50 \text{ g m}^{-2} \times 2,500 \text{ m}^2 = 125,000 \text{ g}$

Price of phosphorus fertilizer: $125,000 \text{ g} \times 0.14 \text{ USD kg}^{-1} = 17.50 \text{ USD}$

Weight of Urea: $10 \text{ g m}^{-2} \times 2,500 \text{ m}^2 = 25,000 \text{ g}$

Price of Urea: $25,000 \text{ g} \times 0.48 \text{ USD kg}^{-1} = 12.00 \text{ USD}$

Subtotal weight: $125,000 \text{ g} + 25,000 \text{ g} = 150,000 \text{ g}$

Subtotal price: $17.50 \text{ USD} + 12.0 \text{ USD} = 29.50 \text{ USD}$

b. The second additional fertilization

Weight of mixed fertilizer: $20 \text{ g m}^{-2} \times 2,500 \text{ m}^2 = 50,000 \text{ g}$

Price of mixed fertilizer: $50,000 \text{ g} \times 0.72 \text{ USD kg}^{-1} = 36.00 \text{ USD}$

c. The third additional fertilization

Weight of mixed fertilizer: $10 \text{ g m}^{-2} \times 2,500 \text{ m}^2 = 25,000 \text{ g}$

Price of mixed fertilizer: $25,000 \text{ g} \times 0.72 \text{ USD kg}^{-1} = 18.00 \text{ USD}$

Weight of potash fertilizer: $4 \text{ g m}^{-2} \times 2,500 \text{ m}^2 = 10,000 \text{ g}$

Price of potash fertilizer: $10,000 \text{ g} \times 0.50 \text{ USD kg}^{-1} = 5.00 \text{ USD}$

Subtotal weight: $25,000 \text{ g} + 10,000 \text{ g} = 35,000 \text{ g}$

Subtotal price: $18.00 \text{ USD} + 5.00 \text{ USD} = 23.00 \text{ USD}$

Total weight: 235,000 g

Total price: 88.50 USD

(3) Transportation

a. The first additional fertilization

$150,000 \text{ g} \div 50 \text{ kg shuttle}^{-1} = 3 \text{ shuttles}$

b. The second additional fertilization

$50,000 \text{ g} \div 50 \text{ kg shuttle}^{-1} = 1 \text{ shuttle}$

c. The third additional fertilization

$35,000 \text{ g} \div 50 \text{ kg shuttle}^{-1} = 0.7 \doteq 1 \text{ shuttle}$

Total: 5 shuttles

Total time: $5 \text{ shuttles} \times 10 \text{ min shuttle}^{-1} = 50 \text{ min}$

Fuel consumption for a motor-cycle: $1.7 \times 10^{-2} (\text{L min}^{-1}) \times 50 \text{ min} = 0.85 \text{ L}$

Gasoline cost: $0.85 \text{ L} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1} = 0.90 \text{ USD}$

Labor cost: $50 \text{ min} \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} = 0.99 \text{ USD}$

Subtotal cost: $0.90 \text{ USD} + 0.99 \text{ USD} = 1.89 \text{ USD}$

(4) Application

Time: $235,000 \text{ g} \times 6.08 \times 10^{-2} \text{ h kg}^{-1} \text{ person}^{-1} = 14.29 \text{ h person}^{-1}$

Labor cost: $14.29 \text{ h} \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} = 17.01 \text{ USD}$

(5) Irrigation water

※Water level in paddy field was increased from 0 cm to 4 cm through irrigation to dissolve chemical fertilizer and increase absorption by rice plants

Water volume: $0.04 \text{ m} \times 2,500 \text{ m}^2 = 100 \text{ m}^3$

Pouring time: $100 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ (L s}^{-1}) = 16,474.46 \text{ s}$

Fuel consumption of pump for irrigation: $16,474.46 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ (L s}^{-1}) = 14.68 \text{ L}$

Gasoline cost: $14.68 \text{ L} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1} = 15.56 \text{ USD}$

Labor working time: $16,474.46 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s} = 4,194.89 \text{ s}$

Labor cost for irrigation: $4,194.89 \text{ s} \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} = 1.39 \text{ USD}$

Subtotal cost: $15.56 \text{ USD} + 1.39 \text{ USD} = 16.95 \text{ USD}$

Total cost: $16.95 \text{ USD} \times 3 \text{ times} = 50.85 \text{ USD}$

Total cost 158.25 USD for 2,500 m²

$= 6.33 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$

$\approx 0.06 \text{ USD m}^{-2}$

2. Slurry fertilization with vacuum truck**(1) Cost for one shuttle****a. Collection of digested slurry**

Running time of pump: $5.5 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 4.17 \text{ L s}^{-1} = 1,318.94 \text{ s shuttle}^{-1}$

Total time: $1,318.94 \text{ s shuttle}^{-1} + 900 \text{ s shuttle}^{-1} = 2,218.94 \text{ s shuttle}^{-1}$

b. Transportation of digested slurry

Time: $2.5 \text{ km} \times 2 \text{ (one way)} \div 0.265 \text{ km min}^{-1} = 1,132.08 \text{ s shuttle}^{-1}$

c. Pouring of digested slurry

Running time of pump: $5.5 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 2.98 \text{ L s}^{-1} = 1,845.64 \text{ s shuttle}^{-1}$

Total time: $1,845.64 \text{ s shuttle}^{-1} + 900 \text{ s shuttle}^{-1} = 2,745.64 \text{ s shuttle}^{-1}$

d. Cost for one shuttle

Time for one shuttle: $2,218.94 \text{ s} + 1,132.08 \text{ s} + 2,745.64 \text{ s} = 6,096.66 \text{ s} \approx 1.69 \text{ h}$

Vacuum truck rental fee: $8.94 \text{ USD h}^{-1} \times 1.69 \text{ h} = 15.11 \text{ USD shuttle}^{-1}$

※Rental fee includes 2 operators and fuel cost for transportation and pump.

Labor cost for one worker: $1.69 \text{ h} \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} = 2.01 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Cost for one shuttle of a vacuum truck: $15.11 + 2.01 = 17.12 \text{ USD shuttle}^{-1}$

(2) Area for one shuttle**a. Area for digested slurry with 400 mg L⁻¹ of T-N**

The second fertilization: $400 \text{ mg L}^{-1} \times 5.5 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 7.9 \text{ g m}^{-2} \approx 278.48 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

The third fertilization: $400 \text{ mg L}^{-1} \times 5.5 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 3.1 \text{ g m}^{-2} \approx 709.67 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

b. Area for digested slurry with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

The second fertilization: $2,000 \text{ mg L}^{-1} \times 5.5 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 7.9 \text{ g m}^{-2} \doteq 1,392.40 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

The third fertilization: $2,000 \text{ mg L}^{-1} \times 5.5 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 3.1 \text{ g m}^{-2} \doteq 3,548.38 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

(3) Cost for irrigation

※Water level in paddy field increased from 0 cm to 4 cm by irrigation and digested slurry of 5.5 m³ with one shuttle.

a. Pouring of irrigation water in case of digested slurry with 400 mg L⁻¹ of T-N

Water volume for the second fertilization: $0.04 \text{ m} \times 278.48 \text{ m}^2 - 5.5 \text{ m}^3 = 5.64 \text{ m}^3$

Water volume for the third fertilization: $0.04 \text{ m} \times 709.67 \text{ m}^2 - 5.5 \text{ m}^3 = 22.89 \text{ m}^3$

Pump running time for the second fertilization: $5.64 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} = 929.15 \text{ s}$

Pump running time for the third fertilization: $22.89 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} = 3,771.00 \text{ s}$

Fuel cost of pump for the second fertilization: $929.15 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1}$
= 0.88 USD

Fuel cost of pump for the third fertilization: $3,771.00 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1}$
= 3.56 USD

Labor cost for the second fertilization: $(929.15 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1}$
= 0.36 USD

Labor cost for the third fertilization: $(3,771.00 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1}$
= 0.55 USD

b. Pouring of irrigation water in case of digested slurry with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

Water volume for the second fertilization: $0.04 \text{ m} \times 1,392.40 \text{ m}^2 - 5.5 \text{ m}^3 = 50.20 \text{ m}^3$

Water volume for the third fertilization: $0.04 \text{ m} \times 3,548.38 \text{ m}^2 - 5.5 \text{ m}^3 = 136.44 \text{ m}^3$

Pump running time for the second fertilization: $50.20 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} = 8,270.18 \text{ s}$

Pump running time for the third fertilization: $136.44 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} = 22,477.76 \text{ s}$

Fuel cost of pump for the second fertilization: $8,270.18 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1}$
= 7.81 USD

Fuel cost of pump for the third fertilization: $22,477.76 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1}$
= 21.23 USD

Labor cost for the second fertilization: $(8,270.18 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1}$
= 0.84 USD

Labor cost for the third fertilization: $(22,477.76 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1}$
= 1.78 USD

(4) Sum of slurry fertilization cost for vacuum truck

a. T-N of 400 mg L⁻¹ in digested slurry

Cost for the second fertilization: $17.12 + 0.88 + 0.36 = 18.36 \text{ USD}$

Cost for the second fertilization per 1m²: $18.36 \text{ USD} \div 278.48 \text{ m}^2 \doteq 6.59 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$

Cost for the third fertilization: $17.12 + 3.56 + 0.55 = 21.23 \text{ USD}$

Cost for the third fertilization per 1m²: $21.23 \text{ USD} \div 709.67 \text{ m}^2 \doteq 2.99 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$

Cost for T-N in digested slurry of 400 mg L⁻¹ per 1m²: $6.59 \times 10^{-2} + 2.99 \times 10^{-2} = 9.58 \times 10^{-2}$ USD m⁻²
 $\doteq 0.10$ USD m⁻²

b. T-N of 2,000 mg L⁻¹ in digested slurry

Cost for the second fertilization: $17.12 + 7.81 + 0.84 = 25.77$ USD

Cost for the second fertilization per 1m²: $25.77 \text{ USD} \div 1,392.40 \text{ m}^2 \doteq 1.85 \times 10^{-2}$ USD m⁻²

Cost for the third fertilization: $17.12 + 21.23 + 1.78 = 40.13$ USD

Cost for the third fertilization per 1m²: $40.13 \text{ USD} \div 3,548.38 \text{ m}^2 \doteq 1.13 \times 10^{-2}$ USD m⁻²

Cost for T-N in digested slurry of 2,000 mg L⁻¹ per 1m²: $1.85 \times 10^{-2} + 1.13 \times 10^{-2}$
 $= 2.98 \times 10^{-2}$ USD m⁻² $\doteq 0.03$ USD m⁻²

3. Slurry fertilization with a prototype slurry tanker

(1) Cost for one shuttle

a. Collection of digested slurry

Running time for generator to drive pump: $2.7 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 3.08 \text{ L s}^{-1} = 876.62 \text{ s shuttle}^{-1}$

Total time: $876.62 \text{ s shuttle}^{-1} + 900 \text{ s shuttle}^{-1} = 1,776.62 \text{ s shuttle}^{-1}$

b. Transportation of digested slurry

Time: $2.5 \text{ km shuttle}^{-1} \times 2 \text{ (one way)} \div 0.265 \text{ km min}^{-1} = 1,132.08 \text{ s}$

c. Pouring of digested slurry

Running time for generator to drive pump: $2.7 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 4.62 \text{ L s}^{-1} = 584.42 \text{ s shuttle}^{-1}$

Total time: $584.42 \text{ s shuttle}^{-1} + 900 \text{ s shuttle}^{-1} = 1,484.42 \text{ s shuttle}^{-1}$

d. Cost for one shuttle

Fuel cost for collection of digested slurry: $876.62 \text{ s shuttle}^{-1} \times 9.94 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1}$
 $\doteq 0.92 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Fuel cost for pouring of digested slurry: $584.42 \text{ s shuttle}^{-1} \times 9.94 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1}$
 $\doteq 0.62 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Fuel cost for one shuttle $0.92 \text{ USD shuttle}^{-1} + 0.62 \text{ USD shuttle}^{-1} = 1.54 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Time for one shuttle: $1,776.62 \text{ s} + 1,132.08 \text{ s} + 1,484.42 \text{ s} = 4,393.12 \text{ s} \doteq 1.22 \text{ h}$

Rental fee for tractor: $5.96 \text{ USD h}^{-1} \times 1.22 \text{ h shuttle}^{-1} = 7.27 \text{ USD shuttle}^{-1}$

※Rental fee includes labor cost for 1 operator and fuel cost for transportation.

Labor cost for one worker: $1.22 \text{ h} \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} = 1.45 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Cost for one shuttle with prototype slurry tanker: $1.54 + 7.27 + 1.45 = 10.26 \text{ USD shuttle}^{-1}$

(2) Area for one shuttle

a. Area for digested slurry with 400 mg L⁻¹ of T-N

The second fertilization: $400 \text{ mg L}^{-1} \times 2.7 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 7.9 \text{ g m}^{-2} \doteq 136.71 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

The third fertilization: $400 \text{ mg L}^{-1} \times 2.7 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 3.1 \text{ g m}^{-2} \doteq 348.39 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

b. Area for digested slurry with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

The second fertilization: $2,000 \text{ mg L}^{-1} \times 2.7 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 7.9 \text{ g m}^{-2} \doteq 683.54 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

The third fertilization: $2,000 \text{ mg L}^{-1} \times 2.7 \text{ m}^3 \text{ shuttle}^{-1} \div 3.1 \text{ g m}^{-2} \doteq 1,741.94 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

(3) Cost for irrigation

※Water level in paddy field was increased from 0 cm to 4 cm by irrigation and digested slurry of 2.7 m³ by one shuttle.

a. Pouring of irrigation water in case of digested slurry with 400 mg L⁻¹ of T-N

Water volume for the second fertilization: $0.04 \text{ m} \times 136.71 \text{ m}^2 - 2.7 \text{ m}^3 \doteq 2.77 \text{ m}^3$

Water volume for the third fertilization: $0.04 \text{ m} \times 348.39 \text{ m}^2 - 2.7 \text{ m}^3 \doteq 11.24 \text{ m}^3$

Pump running time for the second fertilization: $2.77 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} \doteq 456.34 \text{ s}$

Pump running time for the third fertilization: $11.24 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} \doteq 1,851.73 \text{ s}$

Fuel cost of pump for the second fertilization: $456.34 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1} \doteq 0.43 \text{ USD}$

Fuel cost of pump for the third fertilization: $1,851.73 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1} \doteq 1.75 \text{ USD}$

Labor cost for the second fertilization: $(456.34 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} \doteq 0.33 \text{ USD}$

Labor cost for the third fertilization: $(1,851.73 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} \doteq 0.42 \text{ USD}$

b. Pouring of irrigation water in case of digested slurry with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

Water volume for the second fertilization: $0.04 \text{ m} \times 683.54 \text{ m}^2 - 2.7 \text{ m}^3 = 24.64 \text{ m}^3$

Water volume for the third fertilization: $0.04 \text{ m} \times 1,741.94 \text{ m}^2 - 2.7 \text{ m}^3 = 66.98 \text{ m}^3$

Pump running time for the second fertilization: $24.64 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} = 4,059.31 \text{ s}$

Pump running time for the third fertilization: $66.98 \text{ m}^3 \div 6.07 \text{ L s}^{-1} = 11,034.60 \text{ s}$

Fuel cost of pump for the second fertilization: $4,059.31 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1} \doteq 3.83 \text{ USD}$

Fuel cost of pump for the third fertilization: $11,034.60 \text{ s} \times 8.91 \times 10^{-4} \text{ L s}^{-1} \times 1.06 \text{ USD L}^{-1} \doteq 10.42 \text{ USD}$

Labor cost for the second fertilization: $(4,059.31 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} \doteq 0.57 \text{ USD}$

Labor cost for the third fertilization: $(11,034.60 \text{ s} \times 0.2 + 900 \text{ s}) \times 1.19 \text{ USD h}^{-1} \text{ person}^{-1} \doteq 1.03 \text{ USD}$

(4) Sum of slurry fertilization cost by the prototype slurry tanker

a. T-N of 400 mg L⁻¹ in digested slurry

Cost for the second fertilization: $10.26 + 0.43 + 0.33 = 11.02 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Cost for the second fertilization per 1m²: $11.02 \text{ USD shuttle}^{-1} \div 136.71 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \doteq 8.06 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$

Cost for the third fertilization: $10.26 + 1.75 + 0.42 = 12.43 \text{ USD shuttle}^{-1}$

Cost for the third fertilization per 1m²: $12.43 \text{ USD} \div 348.39 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \doteq 3.57 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$

Cost for T-N of 400 mg L⁻¹ per 1m² in digested slurry: $8.06 \times 10^{-2} + 3.57 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$

$$\cong 0.12 \text{ USD m}^{-2}$$

(Therefore, total cost for slurry fertilization with T-N of 400 mg L⁻¹ in digested slurry is approximately 0.13 USD m⁻² by adding the depreciation cost for prototype slurry tanker of 8.92×10⁻³ USD m⁻² and maintenance and repair cost for prototype slurry tanker of 4.55×10⁻³ USD m⁻² as mentioned in **Appendix 2-2** to above operation cost of 0.12 USD m⁻².)

b. T-N of 2,000 mg L⁻¹ in digested slurry

$$\text{Cost for the second fertilization: } 10.26 + 3.83 + 0.57 = 14.66 \text{ USD shuttle}^{-1}$$

$$\text{Cost for the second fertilization per 1m}^2: 14.66 \text{ USD} \div 683.54 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \cong 2.14 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$$

$$\text{Cost for the third fertilization } 10.26 + 10.42 + 1.03 = 21.71 \text{ USD shuttle}^{-1}$$

$$\text{Cost for the third fertilization per 1m}^2: 21.71 \text{ USD shuttle}^{-1} \div 1,741.94 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$$

$$\cong 1.25 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$$

$$\text{Cost for T-N of 2,000 mg L}^{-1} \text{ per 1 m}^2 \text{ in digested slurry: } 2.14 \times 10^{-2} + 1.25 \times 10^{-2}$$

$$= 3.39 \times 10^{-2} \text{ USD m}^{-2}$$

(Therefore, total cost for slurry fertilization with T-N of 2,000 mg L⁻¹ in digested slurry is approximately 0.04 USD m⁻² by adding the depreciation cost for prototype slurry tanker of 2.14×10⁻³ USD m⁻² and maintenance and repair cost for prototype slurry tanker of 1.09×10⁻³ USD m⁻² as mentioned in **Appendix 2-2** to above operation cost of 3.39 × 10⁻² USD m⁻².)

Appendix 2-2 Depreciation, maintenance and repair costs of prototype slurry tanker

Depreciation costs

Initial investment cost for prototype slurry tanker (on the assumption that maximum depreciation period of 15 years)

Plastic tank: 429 USD (143 USD × 3 times)

Tractor trolley: 1,670 USD

Motor pump: 372 USD

Generator: 1,369 USD

Total: 429 + 1,670 + 372 + 1,369=3,840 USD

Maximum depreciation period of machine tools, pumps and generators are 15 years based on the Vietnamese guidelines for depreciation of fixed assets"45/2013/TT-BTC". The maximum depreciation period of plastic tank is assumed as 5 years.

Rice is harvested twice a year in half of paddy fields, and 3 times a year in another half of paddy fields in Thai My Village.

Therefore, the depreciation cost per crop with prototype slurry tanker can be estimated as follows;

$$3,840 \text{ USD} \div 15 \text{ years} \div 2.5 \text{ crops year}^{-1} = 102.4 \text{ USD crop}^{-1}$$

(According to **Appendix 2-1. 3 (1)**, total time for a shuttle of the prototype slurry tanker can be calculated as follows;

$$1,776.62 + 1,132.08 + 1,484.42 = 4,393.12 \text{ s shuttle}^{-1}$$

(1) Area for one shuttle of prototype slurry tanker

Areas for one shuttle are shown as **Appendix 2-1. 3 (2)**.

a. Area for the T-N in digested slurry of 400 mg L⁻¹

The second fertilization: 136.71 m² shuttle⁻¹

b. Area for digested slurry with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

The second fertilization: 683.54 m² shuttle⁻¹

* Area for the second fertilization was taken because the second fertilization is more critical than the third fertilization.

(2) Time for all procedures

According to **Appendix 2-1**, 3 (1) and (3), times for every procedure are shown as follows;

a. Collection and transportation of digested slurry

$$1,776.62 \text{ s} + 1,132.08 \text{ s} = 2,908.70 \text{ s}$$

b. Pouring of digested slurry

$$1,484.42 \text{ s}$$

c. Irrigation for the second fertilization*

T-N in digested slurry of 400 mg L⁻¹

$$456.34 \text{ s} + 900 \text{ s} = 1,356.34 \text{ s}$$

T-N in digested slurry of 2,000 mg L⁻¹

$$4,059.31 \text{ s} + 900 \text{ s} = 4,959.31 \text{ s}$$

(3)-1 Sequence in 8 hours for digested slurry with 400 mg L⁻¹ of T-N

Sequence of slurry fertilization in 8 hours is shown as **Fig. Ap2-1**.

Time for one shuttle: 2,908.70 s + 1,484.42 s = 4,393.12 s

Number of shuttles in 8 hours: 8 h ÷ 4,393.12 s shuttle⁻¹ ≈ 6.56

Therefore, the maximum frequency of shuttle per day is 6 shuttles.

Therefore, maximum area for application of digested slurry per crop is estimated as follows;

$$6 \text{ shuttle day}^{-1} \times 136.71 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \times 14 \text{ days}^{**} = 11,483.64 \text{ m}^2 \text{ crop}^{-1}$$

** The second fertilization is acceptable for 14 days based on the interval of each additional fertilization.

Therefore, the depreciation cost of prototype slurry tanker per area can be estimated as follows:

$$102.4 \text{ USD crop}^{-1} \div 11,483.64 \text{ m}^2 \text{ crop}^{-1} \approx 8.92 \times 10^{-3} \text{ USD m}^{-2}$$

(3)-2 Sequence in 8 hours for digested slurry with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

Sequence of slurry fertilization in 8 hours is shown as **Fig. Ap2-2** because time for pouring of irrigation water is longer than time for collection and transportation of digested slurry and pouring of digested slurry.

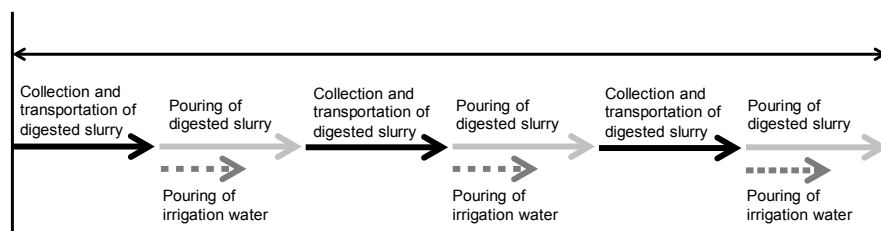


Fig. Ap 2-1 Sequence in 8 hours for slurry fertilization with 400 mg L⁻¹ of T-N

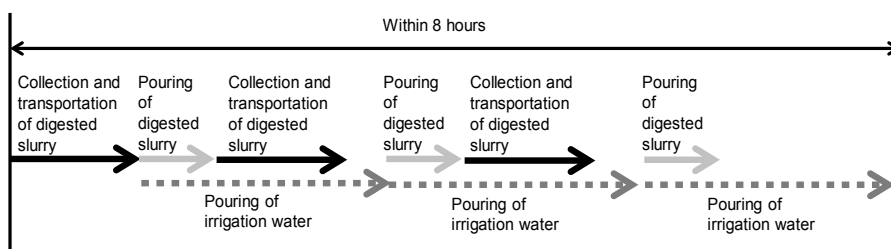


Fig. Ap 2-2 Sequence in 8 hours for slurry fertilization with 2,000 mg L⁻¹ of T-N

Number of shuttles in 8 hours, “n” is indicated by the following equation.

$$2,908.70 \text{ s shuttle}^{-1} + 4959.31 \text{ s shuttle}^{-1} \times n < 8 \text{ h}$$

$$n < 5.22$$

Maximum shuttles for one day is 5 shuttles.

Maximum area for application of digested slurry per crop is as follows;

$$5 \text{ shuttle day}^{-1} \times 683.54 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \times 14 \text{ days} = 47,847.80 \text{ m}^2 \text{ crop}^{-1}$$

Therefore, the depreciation costs of prototype slurry tanker per area can be estimated as follows:

$$102.4 \text{ USD crop}^{-1} \div 47,847.80 \text{ m}^2 \text{ crop}^{-1} = 2.14 \times 10^{-3} \text{ USD m}^{-2}$$

Maintenance and repair cost

Maintenance and repair cost of generator to drive motor pump corresponds to the maintenance and repair cost of the prototype slurry tanker.

Here, regarding “maintenance and repair cost” as Cmr

(1) Cmr for a day in use*

$$= C_{in} \times R_{mr}$$

Here,

C_{in}; Initial investment cost for power unit of prototype slurry tanker

R_{mr}; Maintenance and repair cost rate for equivalent value with use for one day

* Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2014) Estimation standards for land improvement (for machine cost), p. 3

(1)-1 C_{in} here is assumed as initial investment cost for total of motor pump and generator

$$= 372 \text{ USD} + 1,369 \text{ USD} = 1,741 \text{ USD}$$

(1)-2 R_{mr} = (C_d + R_{mr} + R_{am} × Y_{st}) ÷ (D_{st} × Y_{st})

Here,

C_d; Depreciation cost (C_d was neglected because calculated as shown in former part in **Appendix 2-2**.)

R_{mr}; Maintenance and repair cost rate** = 120 % of C_{in}

R_{am}; Annual management cost rate*** = 7 % of C_{in}

Y_{st}; Standard years in use = 15 years***

D_{st}; Annual standard days in use = 14 days**** (F_{af} in a crop)⁻¹ × (2 times of A_f) crop⁻¹ × 2.5 crop year⁻¹ = 70 days

Here,

F_{af}; Frequency of additional fertilization

A_f; Additional fertilization

** Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2014) Estimation standards for land improvement (for machine cost), p. 182

*** Maximum depreciation period of pumps and generators is 15 years based on the Vietnamese guidelines about depreciation of fixed assets”45/2013/TT-BTC”.

**** Maximum days for application of digested slurry is assumed as 14 days for each fertilization based on the interval of each additional fertilization.

In this case,

C_d can be neglected because it was calculated in another category in this study.

Therefore,

Cmr for a day in use $\approx 3.73 \text{ USD day}^{-1}$

(2) Area for one shuttle

Areas for one shuttle are shown as **Appendix 2-1. 3 (2)**

a. Area for the T-N in digested slurry of 400 mg L^{-1}

The second fertilization: $136.71 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

b. Area for digested slurry with of $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ of T-N

The second fertilization: $683.54 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1}$

(3) Cmr for prototype slurry tanker per area

T-N of 400 mg L^{-1} in digested slurry:

Cmr per area

$= 3.73 \text{ USD day}^{-1} \div (136.71 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \times 6 \text{ shuttle day}^{-1})$

$= 4.55 \times 10^{-3} \text{ USD m}^{-2}$

T-N of $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ in digested slurry:

Cmr per area

$= 3.73 \text{ USD day}^{-1} \div (683.54 \text{ m}^2 \text{ shuttle}^{-1} \times 5 \text{ shuttle day}^{-1})$

$= 1.09 \times 10^{-3} \text{ USD m}^{-2}$

Appendix 3 Calculation procedures of the number of milk cow in Southeast Asia

- 1) Data of the number of dairy cattle (=mentioned as “milk cow” in this study) of the following Southeast Asian Countries is not shown in statistical data: Brunei Darussalam, Cambodia, Lao PDR, Malaysia, Philippines, Singapore, Thailand and Timor-Leste.
- 2) Therefore, these data were estimated by the average ratio of dairy cattle to cattle of Indonesia, Myanmar and Vietnam.
- 3) The numbers and ratio of dairy cattle to cattle in Indonesia, Myanmar and Vietnam are as following table.

	The number of dairy cattle	The number of cattle	Ratio of dairy cattle to cattle	Data for year
	heads	heads	%	year
Indonesia	411,213	12,740,690	3.23	2013
Myanmar	394,135	11,313,425	3.48	2002
Vietnam	174,000	5,156,727	3.37	2013
Average	-	-	3.36	-

4) As shown in above table, average ratio of dairy cattle to cattle in existed data is calculated at 3.36%.

5) 49,271,938 heads of cattle**** in Southeast Asian Countries multiplied by 3.36% of ratio estimated 1,655,537 heads of dairy cattle in Southeast Asian Countries.

* The number of cattle and dairy cattle in Indonesia for 2013, FAO-GLIPHA, <http://kids.fao.org/glipha/>. Accessed 19 November 2015

** The number of cattle and dairy cattle in Myanmar for 2002, FAO-GLIPHA, <http://kids.fao.org/glipha/>. Accessed 19 November 2015

*** The number of cattle and dairy cattle for 2013, Viet Nam News <http://vietnamnews.vn/economy/248720/dairy-sector-looks-to-triple-cattle-population.html> Accessed 19 November 2015

**** FAO (2013a) Live Animals in 2013. In: FAOSTAT. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QA/E>. Accessed 26 November 2015

REFERENCES

- AQUASTAT (2015) (accessed 2015.11.26): Total Renewable Water Resources in 2014. In: AQUASTAT Main Database, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (online), <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>>
- Adiarso G., Murti W. and Priyanto U. (2013): Utilization of biomass for energy: prospect, challenge and industrialization strategy in Indonesia. *J. Jpn. Inst. Energy*, **92**, 89-98.
- Brunner P.H. and Rechberger H. (2004): Practical Handbook of Material Flow Analysis. Lewis Publishers.
- Bunthoeun P., Saoleng L. and Chetra S. (2013): Biogas development to ensure sustainable agriculture and mitigate greenhouse gas emissions in Cambodia. *JIRCAS Working Report*, **79**, 65-68.
- Chen D., Jiang L., Huang H., Toyota K., Dahlgren R.A. and Lu J. (2013): Nitrogen dynamics of anaerobically digested slurry used to fertilize paddy fields. *Biol. Fertil. Soils*, **49**, 647-659.
- Do T.N., Kazama F., Sakamoto Y. and Nishida K. (2013): Application of material flow analysis in assessing nutrient fluxes in Day-Nhue River basin, Vietnam. Southeast Asian Water Environment 5. IWA Publishing.
- Elauria J.C. and Elauria M.M. (2013): Biomass situation in the Philippines. *J. Jpn. Inst. Energy*, **92**, 83-88.
- FAOSTAT (2015a) (accessed 2015.11.19): Download data – Production - Annual Production. In: FAOSTAT. Food and Agricultural Organization of the United Nations Statistics Division. <<http://faostat3.fao.org/download/O/OA/E>>
- FAOSTAT (2015b) (accessed 2015.11.26): Download data – Production – Live Animals. In: FAOSTAT. Food and Agricultural Organization of the United Nations Statistics Division. <<http://faostat3.fao.org/download/Q/QA/E>>
- FAOSTAT (2015c) (accessed 2015.11.26): Download data – Production – Crops. In: FAOSTAT. Food and Agricultural Organization of the United Nations Statistics Division. <<http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>>
- Fujita H., Qian Q., Fujii T., Mochidzuki K. and Sakoda A. (2011): Isolation of ethanol from its aqueous solution by liquid phase adsorption and gas phase desorption using molecular sieving carbon. *Adsorption*, **17**, 869-879.
- General Statistics Office Vietnam (2011): Statistical Yearbook of Vietnam 2011, Statistical Publishing House, Hanoi
- General Statistics Office Vietnam (2013): Statistical Yearbook of Vietnam 2013, Statistical Publishing House, Hanoi
- Hayashi K., Nishimura S. and Yagi K. (2008): Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia. *Sci. Total Environ.*, **390**, 485-494.
- Hidaka N. (1997): Soil Chemistry-Nitrogen. In: Committee of Soil Environment Analysis (ed). Methods for soil environment analysis. Hakuyu-sha, Tokyo. Japan. (in Japanese)
- Huong L.Q., Madsen H., Anh L.X., Ngoc P.T. and Dalsgaard A. (2014): Hygienic aspects of livestock manure management and biogas systems operated by small-scale pig farmers in Vietnam. *Sci. Total Environ.*, **470-471**, 53-57.
- IEA (2013) (accessed 2015.9.14): Southeast Asia energy outlook. World Energy Outlook Special Report. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/SoutheastAsiaEnergyOutlook_WEO2013SpecialReport.pdf>
- IPCC (2006a) (accessed 2015.11.26): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy, Chapter 1, p. 1.19, <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>>
- IPCC (2006b) (accessed 2015.11.26): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 Energy, Chapter 1, p. 1.23, <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>>
- Igarashi Y. (2008): Overview of bioethanol. In: Igarashi Y and Saiki T (eds) Bio-ethanol production from rice straw. JARUS, Tokyo, Japan (in Japanese)
- Iida M., Ohdoi K., Ryu C. and Umeda M. (2009): Basal application of methane fermentation digested liquid using a slurry injector. *J. Jpn. Soci. Agr. Mach.*, **71**(2), 81-87. (in Japanese with English abstract)
- Inomura K., Yuge K., Anan M. and Shinogi Y. (2010): Numerical analysis of anaerobically digested slurry with irrigation water in rice paddy. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.*, **55**(2), 357-363.
- Ishii S., Ikeda S., Minamisawa K. and Sendo K. (2011): Nitrogen cycling in rice paddy environments: past achievements and future challenges. *Microbes Environ.*, **26**(4), 282-292.
- Iwashita K., Fukushi K., Sugita H., Yuge K., Tanaka M. and Nakano Y. (2008): Establishment of rural resource recycling through the effective application of digested slurry from methane fermentation system to paddy and upland fields. *Res. Inst. Resour. Circ., Jpn. Soc. Irrig. Drain. Rural Eng.*, **4**, 55-70 (in Japanese with English abstract)
- Izumi T., Matsubara E. and Iizumi Y. (2013): Registration of clean development mechanism project in Viet Nam. *Water, Land and Environ. Eng.*, **81**(3), 207-210. (in Japanese)
- Kamioka H. and Kamewada K. (2011): Effect of anaerobically digested cattle slurry as basal application on paddy rice Koshihikari. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **82**, 31-40. (in Japanese with English abstract)
- Kihou N. (1997): Instrumental Analysis-Ion chromatograph method. In: Committee of Soil Environment Analysis (ed). Methods for soil environment analysis. Hakuyu-sha, Tokyo. Japan. (in Japanese)
- Kobayashi H., Khai L.T.L., Phan T.T., Yamasaki S., Akiba M., Hata E. and Taniguchi T. (2007): Prevalence and characteristics of pathogenic Escherichia coli in a swine breeding environment in Can Tho Province. *JIRCAS Working Report*, **55**, 35-40.

- Koga Y., Matsuo M., Terao H., Ogawa T., Hiyoshi K., Kagehigashi S., Kurogi Y. and Nishiwaki A. (2010): Effects of anaerobically digested slurry to the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Bull. Fac. Agric., Univ. Miyazaki*, **56**, 15-27 (in Japanese with English abstract)
- Kunimitsu Y. and Ueda T. (2013): Economic and environmental effects of rice-straw bioethanol production in Vietnam. *Paddy Water Environ.*, **11**, 411-421.
- Kyaw, K.M., Toyoya K., Okazaki M., Motobayashi T. and Tanaka H. (2005): Nitrogen balance in a paddy field planted with whole crop rice (*Oryza sativa* cv. Kusahonami) during two rice-growing seasons. *Biol. Fertil. Soils*, **42**, 72-82.
- Li K.Z., Inamura T. and Umeda M. (2003): Growth and nitrogen uptake of paddy rice as influenced by fermented manure liquid and squeezed manure liquid. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**(3), 463-467.
- Li Y.Y. (2005): Toward the holistic use of biomass resources (3)-methane fermentation technology-. *Jour. JSIDRE*, **73**(8), 739-744. (in Japanese)
- Mara D.D. and Cairncross S. (1989): Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture. World Health Organization, Geneva.
- Matsubara E., Izumi T., Nguyen H.C. and Nguyen H.T. (2014): Emission reduction and financial feasibility evaluation of a household biogas CDM project in Viet Nam. *IDRE Journal*, **294**, 55-64. (in Japanese with English abstract)
- Matsumoto N. (2000): Development of estimation method and evaluation of nitrogen flow in regional areas. *Bull. Nat. Inst. Agro-Environ. Sci.*, **18**, 81-152. (in Japanese with English abstract)
- Matsunaka T., Naruse M. and Kumai M. (2002): Change in nutrients content and some other properties of dairy cattle slurry following anaerobic digestion. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **73**(3), 297-300. (in Japanese)
- Matsuno Y., Hacho N., Ieshima A. and Shinogi Y. (2006): Material cycle in peri-urban area: estimation of nitrogen flow in the Yamato River Basin in Nara City. *Environ. Sci.*, **19**(6), 495-506. (in Japanese with English abstract)
- Mihara M., Hyakutake C., Ijichi T. and Mori N. (2011): Fertilizer use of digestive fluids from biogas-plant in rice cultivation. *Rep. Kyushu Br. Crop Sci. Japan*, **77**, 15-18. (in Japanese)
- Miho Y., Tojo S. and Watanabe K. (2004): Utilization in cultivation and its environmental load of digested slurry from biogas plant. *J. Jpn. Soci. Agri. Mach.*, **66**(3), 77-83. (in Japanese with English abstract)
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan. (2014) (accessed 2015.11.26): <http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/syokuryo/140326/pdf/sankou_siryoy2-4.pdf>
- Mochizuki K., Biomass town for sustainable local community, Prep. 4th Symposium of JICA-JST Bio-mass Project in Vietnam, 51-63, Dec. 12 2013, Ho Chi Minh City, Vietnam
- Nakamura M. and Yuyama Y. (2005): Development of a composition database for various types of biomass. *Tech. Rep. Nat. Inst. Rural Eng.*, **203**, 57-80. (in Japanese with English abstract)
- Nakamura M., Yuyama Y., Yamaoka M., Oritate F. and Fujikawa T. (2012): Method for utilization of methane fermented digested slurry as a liquid fertilizer to minimize negative environmental impacts. *Res. Inst. Resour. Circ., Jpn. Soc. Irrig. Drain. Rural Eng.*, **8**, 11-30 (in Japanese with English abstract)
- Nguyen K.T., Nguyen H.H., Doan T.H. and Tran D.M. (2013): Biomass potentials in Vietnam; current status and prospects for biofuel development. *J. Jpn. Inst. Energy*, **92**, 99-105.
- Nguyen Q.C. (2005): Dairy cattle development: environmental consequence and pollution control option in Hanoi province, North Vietnam. Research Report No. 2005-RR2006. Published by the Economy and Environment Program for Southeast Asia (EEPSEA), Singapore
- Nguyen V.C.N., Phan T.H. and Vo H.N. (2012): Review on the most popular anaerobic digester models in the Mekong Delta. *J. Viet. Env.*, **2**(1), 8-19.
- Nicholson F.A., Groves S.J. and Chambers B.J. (2005): Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. *Bioresour. Technol.*, **96**, 135-143.
- Nishikawa T., Li K., Inoue H., Umeda M., Hirooka H. and Inamura T. (2012): Effects of the long-term application of anaerobically-digested cattle manure on growth, yield and nitrogen uptake of paddy rice (*Oryza sativa* L.), and soil fertility in warmer region of Japan. *Plant Prod. Sci.*, **15**(4), 284-292.
- Noike T. (2009): Methane fermentation. Gihodo Shuppan, Tokyo, Japan (in Japanese)
- Ogi T. (2002): Definition and classification of biomass. In: Japan Institute of Energy (ed) Biomass Handbook, Ohm-sha, Tokyo, Japan (in Japanese)
- Ohtomo R., Minato K. and Saito M. (2004): Survival of *Escherichia coli* in a field amended with cow feces slurry. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **50**(4), 575-581.
- Oki M., Osawa T., Tanaka M. and Chihara H. (1994): Chemical dictionary. Tokyo Kagakudojin, Tokyo, Japan p. 165 (in Japanese)
- Oritate F., Nakamura M., Kitagawa I., Nguyen P.D., Dang V.B.H., Nguyen D.K., Yuyama Y., Yamaoka M. and Sakoda S., Condition for use of digested slurry in paddy fields in Southern Vietnam-Effects on rice growth, rice yield, surface water quality and soil in the field by different application timing and application rates-, Prep. Annual Meeting, Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, P8-1-20, Sep. 9-11, 2014, Tokyo, Japan (in Japanese)
- Oritate F., Nakamura M., Yamaoka M., Yuyama Y., Nguyen P.D., Dang V.B.H., Nguyen D.K. and Sakoda S. (2013a): Fertilization effect and nitrogen load in use of methane fermentation digested slurry as fertilizer at paddy field in Vietnam. *J. Environ. Conserv. Eng.*, **42**(12), 23-27. (in Japanese)
- Oritate F., Nakamura M., Yamaoka M., Yuyama Y., Nguyen P.D., Dang V.B.H., Nguyen D.K. and Sakoda S. (2013b): Trial use of methane fermentation digested slurry at paddy field in Southern Vietnam-evaluation from fecal contamination, nitrogen load and fertilization effect-. *J. Sci. Technol., Vietnam*, **51**(5C), 649-655.

- Oritate F., Yuyama Y., Nakamura M. and Yamaoka M., Evaluation of energy, cost and environment effect in use of digested slurry at paddy field in Southern Vietnam, Prep. 10th Conference on Biomass Science, O-34, Jan. 14-15, 2015, Tsukuba (in Japanese)
- Oritate F., Yuyama Y., Nakamura M., Yamaoka M., Nguyen P.D., Dang V.B.H., Mochidzuki K. and Sakoda A. (2015): Regional diagnosis of biomass use in suburban village in Southern Vietnam. *J. Jpn. Inst. Energy*, **94**, 805-829.
- Pham K.T., Nguyen M.B. and Nguyen H.D. (2011): Energy, supply, demand, and policy in Vietnam, with future projections. *Energy Policy*, **39**, 6814-6826.
- Pham Q.H., Mike M. and Ingrid O. (2006): Nutrient recycling for sustainable agriculture in Viet Nam. In Food and Agriculture Organization of the United Nations, regional office for Asia and the Pacific (ed) Improving plant nutrient management better farmer livelihoods, food security and environmental sustainability, Proceedings of a Regional Workshop. FAO, Bangkok, Thailand.
- Phayom W., Iwashita K., Iwata M. and Tanaka M. (2012): Study of a slurry irrigation system by methane fermentation digestion for wet rice cultivation. *EAEF*, **5**(2), 57-64.
- QCVN08: 2008/BTNMT (accessed 2014.11.10), <<https://www.env.go.jp/air/tech/ine/asia/vietnam/files/law/V33.pdf>>
- QCVN09: 2008/BTNMT (accessed 2014.11.10), <<https://www.env.go.jp/air/tech/ine/asia/vietnam/files/pollution/pollution.pdf>>
- Rajendran K., Aslanzadeh S. and Taherzadeh M.J. (2012): Household biogas digesters-A review. *Energies*, **5**, 2911-2942.
- SNV (2013) (accessed 2013.8.20): Biogas program for the animal husbandry sector in Vietnam. <<http://www.biogas.org.vn/english/Home.aspx>>
- Sakata S. (2013): Agriculture and rural areas in Vietnam under the rapid economic growth-“New stage” of development for agriculture and rural area in Vietnam-. In: Sakata S (ed) Development of agriculture and rural area in Vietnam under the rapid economic growth. IDE-JETRO Institute of Developing Economies, Chiba, Japan (in Japanese)
- Sakoda A., Mochidzuki K. and Yuyama Y. (2006): Toward the holistic use of biomass resources (8)-future prospects for biomass utilization system-. *Jour. JSIDRE*, **74**(1), 53-58. (in Japanese)
- Samantha O. and Milou B. (2010) (accessed 2015.9.14): Deploying renewables in Southeast Asia-Executive summary. IEA Working paper. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renew_SEAsia.pdf>
- Sasada Y., Win K.T., Nonaka R., Win A.T., Toyota K., Motobayashi T., Hosomi M., Dingjiang C. and Lu J. (2011): Methane and N₂O emissions, nitrate concentrations of drainage water, and zinc and copper uptake by rice fertilized with anaerobically digested cattle or pig slurry. *Biol Fertil. Soils*, **47**, 949-956.
- Sunaga K., Yoshimura N., Hou H., Win K.T., Tanaka H., Yoshikawa M., Watanabe H., Motobayashi T., Kato M., Nishimura T., Toyota K. and Hosomi M. (2009): Impacts of heavy application of anaerobically digested slurry to whole crop rice cultivation in paddy environment on water, air and soil qualities. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **80**, 596-605. (in Japanese with English abstract)
- Thang N.T., Phuong B.T.M., Dang V.B.H., Nguen P.D., Le T.K.P., Phan D.T., Yuyama Y., Oritate F., Mochidzuki K. and Sakoda A. (2011): Evaluation of the material flows of utilization of husbandry wastes to produce biogas in Thai My Village, Cu Chi District, 8th Biomass-Asia Workshop, Hanoi, Vietnam
- The Prime Minister of Vietnam (2011a): Decision No. 2139/QD-TTg, National strategy on climate change
- The Prime Minister of Vietnam (2011b): Decision No. 1208/2011/QD-TTg, Approving the national master plan for power development in the 2011-2020 period, with considerations to 2030
- The Prime Minister of Vietnam (2012): Decision No. 1216/QD-TTg, The National Strategy on Environment Protection to 2020, with Visions to 2030
- The World Bank (2015) (accessed 2015.11.19): Data – Agriculture, value added (% of GDP). The World Bank Group. <<http://data.worldbank.org/indicator/NV.AGR.TOTL.ZS/countries>>
- Thu C.T.T., Cuong P.H., Hang L.T., Chao N.V., Anh L.X., Trach N.X. and Sommer S.G. (2012): Manure management practices on biogas and non-biogas pig farmers in developing countries-using livestock farms in Vietnam as an example. *J. Cleaner Prod.*, **27**, 64-71.
- Tran U.P.N., Vu K.L.V., Nguyen Q.D., Le P.T.K., Phan T.D., Mochidzuki K., Kobayashi S., Seo D.J. and Sakoda A. (2013): Energy balance of small-scale biorefinery system. *Environ. Sci.*, **26**(6), 489-496.
- UNFCCC (2012) (accessed 2015.12.1): Small-scale programme of activities design document ‘Vietnam national biogas programme’ version 8.1, Reference 5816. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://cdm.unfccc.int/filestorage/Y/U/9/YU9OIQDNPBCXAWT035HJR1LVMEK7GF/PoA_DD_Vietnam%20Biogas.pdf?t=MTV8bnlvMnQ0fDB5_I6ALkYoZT-jCSoqpsWH>
- UNFCCC (2015) (accessed 2015.11.26): Clean Development Mechanism (CDM). United Nations Framework Convention on Climate Change. <<http://cdm.unfccc.int/>>
- USDA (2010): Keys to soil taxonomy –Eleventh Edition 2010, US Government Printing Office, p. 167
- Ueda T., Ishida K., Hata K. and Matsumori K. (2003): Fate of indicator microorganisms in wastewater reuse for paddy field irrigation. Proceedings of the IWA Asia-Pacific Regional Conference, 489, Bangkok, Thailand, October 2003.
- Ueno N., Ishii T. and Hanagata T. (2011): Effect of protein content of brown rice on eating quality of rice. *Bull. Kanto Branch Crop Sci. Soc. Jpn.*, **26**, 46-47. (in Japanese)
- Vietnam Livestock Production Department MARD and Netherlands Development Organization SNV (2013) (accessed 2013.8.20): Biogas program for the animal husbandry sector in Vietnam. <<http://www.biogas.org.vn/english/Home.aspx>>
- Vision Tech Inc. (2011): Report of work for creating the database for agricultural facilities

- Vu L.V.K., Tran P.N.U., Le T.K.P., Seo D.J., Nguyen D.Q., Mochizuki K. and Phan D.T. (2013): Agriculture residues as alternative supplemental nutrients for bioethanol fermentation process from rice straw. *J. Sci. and Technol., Vietnam*, **51**(5B), 32-36.
- Vu T.K.V., Tran M.T. and Dang T.T.S. (2007): A survey of manure management on pig farms in Northern Vietnam. *Livest. Sci.*, **112**, 288-297.
- Vu Q.D., Tran T.M., Nguyen P.D., Vu C.C., Vu V.T.K. and Jensen L.S. (2012): Effect of biogas technology on nutrient flows for small and medium scale pig farms in Vietnam. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, **94**, 1-13.
- Watanabe S., Nakamura K., Ryu C.S., Iida M. and Kawashima S. (2011): Effects of different application methods of methane fermentation digested liquid into the paddy plot on soil nitrogen behavior and rice yield. *IDRE Journal*, **79**(4), 265-274. (in Japanese with English abstract)
- Watanabe T., Son T.T., Hung N.N., Truong N.V., Giao T.Q., Hayashi K. and Ito O. (2009): Measurement of ammonia volatilization from flooded paddy fields in Vietnam. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, **55**, 793-799.
- Win K.T., Toyota K., Motobayashi T. and Hosomi M. (2009): Suppression of ammonia volatilization from a paddy soil fertilized with anaerobically digested cattle slurry by wood vinegar application and floodwater management. *Soil. Sci. Plant Nutr.*, **55**, 190-202.
- Win K.T., Toyota K., Nonaka R., Toyota K., Motobayashi T. and Hosomi M. (2010): Effects of option mitigating ammonia volatilization on CH₄ and N₂O emissions from a paddy field fertilized with anaerobically digested cattle slurry. *Biol. Fertil. Soils*, **46**, 589-595.
- Yamada R. (2008): Diagnosis, design and evaluation of diversified farming in the Mekong Delta of Vietnam: Based on the farming systems research approach. Association of Agriculture and Forestry Statistics. Tokyo. Japan (in Japanese)
- Yamaoka M., Yuyama Y., Nakamura M., Shimizu N. and Oritate F. (2009): A planning model for transportation and land application of digested liquid to farmland and an example calculation with the model. *Res. Inst. Resour. Circ., Jpn. Soc. Irrig. Drain. Rural Eng.*, **5**, 41-55. (in Japanese with English abstract)
- Yamaoka M., Nakamura M., Aihara H., Shimizu N. and Yuyama Y. (2011): Development of a model for planning transportation and application of digested slurry to farmlands. *IDRE Journal*, **79**(3), 89-96. (in Japanese with English abstract)
- Yamaoka M., Yuyama Y., Nakamura M. and Oritate F. (2012): Enhancement of a model for planning transportation and application of digested slurry to farmlands -utilization of plural vacuum trucks and intermediate tanks-. *IDRE Journal*, **80**(4), 53-61. (in Japanese with English abstract)
- Yuge K., Maeda H., Tanaka M., Anan M. and Shinogi Y. (2014): Spatial-uniform application method of methane fermentation digested slurry with irrigation water in the rice paddy field. *Paddy Water Environ.*, **12**, 335-342.
- Yuyama Y. (2004): Developing strategy on Diagnosis Model for Biomass Resources Circulative Use. *Jour. JSIDRE*, **72**(12), 1037-1040. (in Japanese)
- Yuyama Y. (2005): Toward the holistic use of biomass resources (1)-Region-based diagnosis for the holistic use of biomass resources-. *Jour. JSIDRE*, **73**(6), 501-506. (in Japanese)
- Yuyama Y., Nakamura M. and Yamaoka M. (2007): Technologies to use the digested liquid produced by methane fermentation. *Trans. of JSIDRE*, **247**, 119-129. (in Japanese with English abstract)
- Zenmyo T., Yamakawa T. and Kikuchi M. (2009): Effect on rice growth of the different application of liquid phase of digested organic waste. *Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ.*, **64**(1), 1-5. (in Japanese with English abstract)

東南アジアにおける家畜ふん尿消化液の 水田における液肥利用とそれに伴う環境影響

折立文子*

* 地域資源工学研究領域地域エネルギーユニット

要 旨

東南アジアにおける持続可能な地域バイオマス利用システムの構築を目指して、地域診断と現地圃場試験にもとづき、東南アジアの水田における家畜ふん尿消化液の液肥利用とその環境影響について検討した。稲作と畜産がさかんなベトナム南部の都市近郊農村を対象に、バイオマス利用に関する現状を分析し、家畜ふん尿や消化液の垂れ流しによる水域への窒素負荷状況とこれらのバイオガス生産への利用意義および消化液の水田液肥としての利用可能性を示した。また、現地の水田において、消化液の肥効や消化液施用後の田面水中の窒素および衛生指標菌の動態を調査し、施肥に伴う下流水域汚染は、消化液施用後に表面流出を一定期間生じないようにすることで防げることを示した。さらに、消化液の液肥利用を行う場合の施肥コストを試算し、消化液の濃度を現在の5倍にすることで、慣行栽培より施肥コストを下げる事が可能であることを示した。今後の家畜ふん尿利用戦略に資するため、家畜ふん尿のバイオガスへの利用と消化液の水田への液肥利用を、東南アジア全体に導入した場合の水域への窒素負荷削減効果ならびに温室効果ガス削減効果について推定評価した。

キーワード：東南アジア、地域バイオマス利用、バイオガスダイジェスター、水田、消化液、温室効果ガス

本誌は2016年まで発行されていた『農村工学研究所技報』および『農村工学研究所報告』を統合したものです。

This bulletin is an integrated publication of “TECHNICAL REPORT OF THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING” and “BULLETIN OF THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING” issued until 2016.

Bulletin of the NARO, Rural Engineering
農研機構研究報告 農村工学研究部門

No.1 March, 2017

2017年3月28日発行

発行 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究部門

〒305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目1番6号

電話 029(838)7591(企画チーム)

<http://www.naro.affrc.go.jp/>

印刷 筑波印刷情報サービスセンター協同組合

Published yearly by Institute of Rural Engineering, NARO (NIRE)
2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, Japan, Tel. 029-838-7591.

本報告に掲載された原稿（以下「著作物」という。）の著作権は執筆者に帰属します。

農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）では、これらの著作物の利用許諾を行っています。本報告からの著作物の転載、複製（個人の私的利用のための複製を除く）を行う場合は、農研機構の許可を得てください。

The copyright of the article(works) published in this bulletin is owned by the author.

The Agriculture and Food Industry Technology Research Organization(NARO) gives authorization to exploit these works on behalf of the author. Please contact NARO to get authorization to reproduce(exclude making copy for personal use) these works.

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究部門

Institute for Rural Engineering,
National Agriculture and Food Research Organization (NARO)