

BULLETIN
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR
RURAL ENGINEERING

No.53 March 2014

農村工学研究所報告

第 53 号

平成 26 年 3 月



独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構

農村工学研究所



NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING
NATIONAL AGRICULTURE AND FOOD RESEARCH ORGANIZATION(NARO)
INCORPORATED ADMINISTRATIVE AGENCY
TSUKUBA, IBARAKI

農村工学研究所報告

第53号

所	長	小	泉	健
企	画	山	本	徳
管	理	部	長	司
審	議	倉	橋	一
役		博		
技	術	奥	島	修
移	転	二		
セ	ン	小	林	宏
ン	タ	康		
ー	長	毛	利	栄
長		征		
農	地	中	達	雄
基	盤	増	本	隆
工	学	夫		
研	究	石	田	憲
領	域	治		
長				
施	設			
工	学			
研	究			
領	域			
長				
水	利			
工	学			
研	究			
領	域			
長				
資	源			
循	環			
工	学			
研	究			
領	域			
長				
農	村			
基	盤			
研	究			
領	域			
長				

編 集 委 員 会

編	集	委	員	長	山	本	徳	司
委		員			友	正	達	美
		〃			渡	嘉	敷	勝
		〃			濱	田	康	治
		〃			廣	瀬	裕	一
		〃			坂	根		勇
事	務	局			児	玉	正	文

農村工学研究所報告

第53号 2014年3月

目次

灌漑用揚水水車の機能と価値の評価に関する研究	廣瀬裕一	1
コンクリート水路によるカエル類の移動障害と個体群保全に関する研究	渡部恵司	63

BULLETIN
OF
THE NATIONAL INSTITUTE FOR RURAL ENGINEERING

No. 53 March 2014

Contents

HIROSE Yuichi

A Study on Functional Assessment and Valuation of Irrigation Water Wheels
..... 1

WATABE Keiji

Restriction of Frog Migration by Constructing Agricultural Concrete Channels
and Conservation of Frog Populations
..... 63

灌漑用揚水水車の機能と価値の評価に関する研究

廣瀬裕一*

*資源循環工学領域 エネルギーシステム担当

キーワード：揚水灌漑，自然エネルギー，評価構造モデル，心理プロセス，住民参加

I 緒言

1.1 研究の背景

わが国は古くから稲作を行ってきた歴史を有する。稲作には灌漑用水を必要とし、多くの場合は灌漑用水路からゲートの開閉で水田まで導水できるような、重力灌漑による水利システムによって灌漑が行われている。しかし、田面位が水路の水位より高い場合は、重力灌漑による灌漑を行うことができない。このような条件下においては揚水灌漑が行われる。

揚水方法は、一定の受益水田における必要水量を一括して揚水する揚水機場の利用や、電動ポンプ、ガソリンポンプ等を用いて1筆から数筆の水田に揚水するような方法が近年では一般的である。しかし、かつては水路の流水エネルギーを利用した揚水水車や人力による足踏み水車等が用いられた。

ポンプ等の現代的な揚水方法は、電気や燃料を用いるため短時間で多量の灌漑を可能とする一方で、温室効果ガスの排出等の環境負荷も発生する。一方で旧来的な揚水水車は、水力や人力で揚水を行うため、単位時間あたりの揚水量は相対的に少ないものの、温室効果ガスの排出がほとんどないといったメリットを有する。しかし、足踏み水車のような人力による揚水水車は、労働負荷も高いというデメリットがあるため今日では灌漑目的での利用は皆無である。他方、水力を利用する揚水水車（以下揚水水車）は、農業者の労働負荷もほとんどないため、利用が散見される。ここで、揚水水車（Fig. 1）の構造を具体的に説明すると、揚水水車は、水車とそれを支える支柱および汲み上げた水を水田に誘導する樋で構成される。水車の水受板もしくは外周部に水を汲み上げる筒が設置されており、水路の流れによって水車が回転することで、下端で汲んだ水を上端まで持ち上げ、落下した水を樋が受けて水田に水を導く仕組みである。

揚水水車には近年、福岡県朝倉市の三連水車のような揚水に加えて観光目的での利用（後藤ら，2008）も見られる。このように、揚水水車は、現在でも本来の利用目的である揚水目的での利用を維持しつつ、観光資源という新たな利用目的を有している。つまり、揚水水車には揚水を行う機能に加えて、観光目的で利用されるような揚水以外の何らかの機能を有すると考えられる。加えて、その機能の発現

によって何らかの価値が得られると考えられる。そこで、既往研究をレビューすることでこれらの機能や価値について明らかになっていることを整理する。

1.2 既往研究のレビュー

揚水水車に関する既往研究をレビューすると、大きく歴史的分野と地理的分野と農村計画的分野に大別できる。

歴史的分野をレビューすると、揚水水車の起源やわが国に導入された時期が明らかになった。具体的には、揚水水車はノリアとも呼ばれ、古代アラビアが起源である。川からエネルギーを引き出す最も古い方法で、水の流れを巧みに利用したものである（佐野，1998）。わが国では、天長6年（829年）5月27日付の太政官符で、揚水水車が中国から導入されたことと、良峯安世がその普及の中心人物である（今谷，1984）ことが記されている。また、徒然草第51段に「・・・亀山殿の御池に、大井川の水をまかせられんとて、大井の土民に仰せて水車を造らせられけり。・・・終に廻らで、いたづらに立てりけり。さて、宇治の里人を召して、こしらへさせられければ・・・思うやうに廻りて、水を汲み入るゝ事めでたかりけり。・・・」とあり、鎌倉時代には京都の宇治の住民は、揚水水車の製作に長けていたことが記述されている。このように、古代アラビアから中国を経て、少なくとも平安時代にはわが国で実在したことが明らかになった。

地理的分野をレビューすると、末尾（1981）は、わが国で揚水水車が利用された要因を、わが国の地形が山がちで

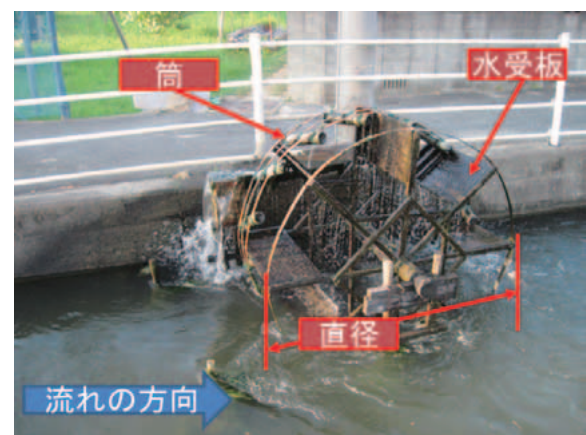


Fig. 1 水力を利用する揚水水車

Irrigation Water Wheel (IWW) using water energy

勾配に富み、河川や用水路より高所に灌漑されるべき耕地を産み出すため、重力灌漑を灌漑体系の中心に据えつつも揚水水車を用いた揚水灌漑に補助的な役割が与えられたためと指摘した。また、日本各地での利用状況については、1980年前後に多く報告されている。青木(1982)は、全国を対象に全ての水車の利用状況を、地方自治体等へのアンケート調査から整理し、当時稼働していた水車のうち農業揚水用の利用は精米・精麦用での利用に次いで多く利用され、利用数は全体のおよそ2割で、農業用揚水水車の利用が一般的な利用用途であることを明らかにした。しかし、アンケート調査を用いているため、未回答の自治体での利用は反映されていない。河野(1997)は、わが国で利用される揚水水車の多くの利用地点や揚水水車の写真から形状を示した。若村ら(1985)(1988)(1994)は、岡山県、中国地方、四国地方を中心に揚水水車の直径や材質、筒の寸法、水車の回転数等を調査し、揚水水車の筒の設置方法から、筒の取り付け方向が水車の回転方向に平行か垂直かで揚水水車を分類した。しかし、分類では揚水量や揚水水車の立地地点の地理的特徴等は、検討されていない。九州地方については、平岡(1984a)(1984b)(1992)や越智ら(1984)の報告から利用される地点が判断できる。九州地方に関する報告でも、揚水水車の直径や筒の寸法等の諸元が整理されている。このように、地理的分野における既往研究を整理すると、揚水水車がわが国で利用される要因や、岡山県や中国地方、四国地方、九州地方における揚水水車の利用地点、揚水水車の直径や筒の寸法等の諸元が明らかになった。しかし、近畿地方以東の利用については青木(1982)や河野(1997)の報告しか判断できる情報がなく、これらの報告からは揚水水車の諸元は不明である。また、揚水水車の受益水田面積や水利システムといった、農業水利学的に重要な情報は、越智ら(1986)が熊本県川原谷地区で利用される揚水水車を整理した報告以外に情報はなく、揚水水車は水田が必要としている用水量を十分に揚水しているかは不明である。さらに、揚水水車は、農業用水路に賦存する流水エネルギーを活用するため、再生可能エネルギーの利用促進が求められる今日において、自然エネルギーを活用できる特徴が重要視されると考えられるが、その具体的な性能は不明である。また、1980年代以降は、揚水水車の利用状況の報告がなく、30年経過した2010年前後においては、わが国でどの程度揚水水車が利用されるか明らかになっていない。

農村計画学的分野をレビューすると、後藤ら(2008)は、インタビュー調査を通して福岡県朝倉市にある三連水車に対して、訪問者が朝倉にとって不可欠なものであり、残したいと考えている傾向があることを明らかにした。このように揚水水車には、揚水機具としての機能に加えて、地域資源としても機能を発揮しうることが示唆された。しかし、後藤らの報告以外に、このような観光目的で利用される揚水水車に対する来訪者等の意識に関する報告はない。

以上の他に、揚水水車を水路に設置したときの、水路の流速と水車の回転数の関係や、水車の回転数と揚水量の関

係といった、揚水水車の揚水性能に関する研究は、越智ら(1986)以外には皆無であった。また、越智らの報告も、実験施設の都合から直径を小さくした縮尺模型を用いており、実寸での性能評価ではない。

1.3 研究の目的と論文の構成

1.3.1 研究目的

既往研究のレビューから、わが国では少なくとも平安時代には揚水水車が利用されたことや、わが国には山地が多く、用水路からは重力灌漑が不可能な水田が発生しやすいため、そのような重力灌漑ができない水田を灌漑するために、揚水水車が利用されたことが明らかになった。1980年代前後にわが国で利用された地点や揚水水車の諸元も、報告者によって整理された諸元に差があるものの、概ね全国規模で明らかになった。他方、揚水水車の受益水田面積や水利システムといった農業水利学的な知見は、ほとんど明らかにされていない。また、1980年代に利用が確認された揚水水車の現在の動向も不明である。

最近、福岡県朝倉市で見られるような、観光目的での利用も少なくないことから、揚水水車には水田に灌漑するための揚水を行う用途に加えて、観光目的で利用されるような何らかの価値があると考えられる。このように、揚水水車には、揚水目的での利用のような水をくみ上げる機能と、観光目的での利用のような人を呼び込む機能がある。水をくみ上げる機能は、水路の流水エネルギーを活用するため、ガソリンポンプ等を利用するより温室効果ガスの排出量が一般的に少なくなるといった社会的意義も有する。また、観光目的で利用されるような機能は、人を呼び込むことができることから都市農村交流の活性化等に寄与するといった社会的意義を有すると考えられる。

つまり、揚水水車を利用することは、揚水目的で利用する人も、観光目的で利用する人もそれぞれ利益を享受でき、社会的意義も有することが考えられるため、継続的に利用することが求められる。

揚水水車を継続的に利用するためには、揚水水車が有する機能とその機能の発揮で得られる価値を適切に評価する必要がある。揚水を行う機能(以下「本来的な機能」)では、既往研究の整理から揚水水車の設置によって得られる回転数と揚水量の関係等の揚水特性が十分に解明されていない。また、観光目的で利用されるような機能(以下「新たな機能」)では、既往研究から地域性を発揮するような機能を来訪者は重視することが報告されているが、それ以外の機能の有無や、来訪者以外の例えば住民の評価は不明である。

そこで本研究は、揚水水車の機能とその機能の発揮で得られる価値を明らかにすることを目的に、揚水を行う「本来的な機能」の価値の解明では、実際に灌漑目的で利用される揚水水車の実寸大模型を用いた模型実験から揚水特性およびエネルギー利用特性を明らかにし、揚水水車を灌漑目的で利用することの価値を検討する。他方、観光目的で利用されるような「新たな機能」の解明では、揚水水車が利用される集落に居住する住民を対象に、農業者と非農業者とい

った属性差を考慮した揚水水車に対する価値認識の解明から、揚水水車の選好性評価の決定要因を定量的に明らかにする。また、保存活動等に参加する人とそうでない人との価値認識の違いから、自ら活動に参加してでも保全したいような、特に重要な機能を明らかにする。明らかにしたこれらの機能や価値から、揚水水車の今後の利活用策を検討する。本研究を通して、揚水水車の機能やその機能の発揮で得られる価値が明らかになると、揚水水車の利用の促進に寄与すると考えられ、ひいては自然エネルギーの利用促進や都市農村交流の活性化等への寄与も期待できることから、本研究を行うことは、意義がある。

1.3.2 論文の構成

既往研究等から揚水水車の有する機能を整理すると、本来的な機能は揚水を行うことで、地球環境に対して温室効果ガス削減や、利用農業者に対して電気代等の運用費の削減といった価値が想定される。また、新たな機能は、現状でははっきりとは解明されていないが、景観形成機能のようなものと考えられ、住民や来訪者に観光したいと思わせるような価値が想定される。これらは Table 1 のように整理できる。

Table 1 揚水水車が有する機能と価値に関する仮説
Hypothesis on IWW's function and amount

機能	利用方法	想定される価値	価値の享受者
本来的な機能	揚水灌漑等	電気代等の運用費節減 温室効果ガス削減	揚水灌漑を必要とする農業者
新たな機能	観光等	良好な景観の形成	住民・来訪者

本論文は、最初に、揚水水車が有する機能や価値を定性的に明らかにするために、現在も利用される揚水水車の存続条件を検討する。それは、現状で利用される揚水水車は、機能が十分に発揮される条件が備わっていると考えられるからである。存続条件は、水車の直径や揚程等の水車諸元に関するものや受益水田面積、水路床勾配のような地理的条件等の様々な要因が複合的に影響を及ぼしていると考えられるが、既往研究だけでは十分に解析できない。そこで、II章において揚水水車の存続条件を、既往文献で利用が確認できる地点への悉皆全数調査から検討する。

III章では、揚水目的で利活用されるために、本来的な機能を発揮させた場合の価値を、存続条件を考慮した事例水車による実寸大の模型実験を用いて、揚水特性やエネルギー利用特性に着目して定量的に明らかにする。また、近年では観光目的での利用が見られるが、これは、揚水水車が有する何らかの新たな機能が働いていると推察される。そこでIV章では、このような新たな機能を、人間の価値認識に着目して明らかにする。また、全国調査から揚水水車の保存活動が行われる地区が確認されたが、これはIV章で明らかにする新たな機能でも、特に保全したい重要な機能があるものと推察される。そこでV章では、保存活動への参加動機に影響を及ぼす要因を、揚水水車が有する新たな機能の価値認識との関係に着目して明らかにする。VI章では、明らかになった揚水水車が有する機能とその機能の発揮によって得られる価値を整理し、今後の利活用について検討を行う。具体的な論文の構成は Fig. 2 のようになる。

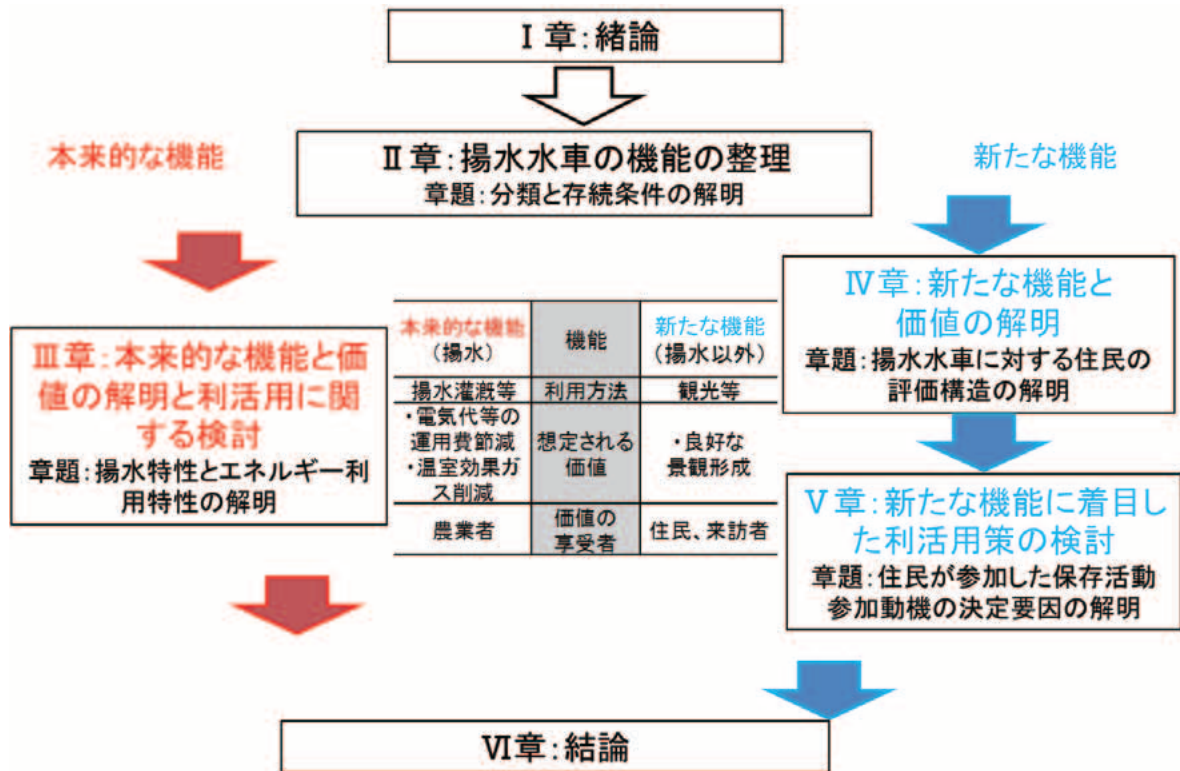


Fig. 2 本研究のフローチャート
Flow chart in this study

II 揚水水車の分類と存続条件の解明

2.1 研究目的と研究方法

近年、揚水水車の利用は減少傾向である。しかし、揚水水車が機能を発揮することで何らかの価値が得られるならば、利用者はその価値を享受するために利用すると考えられる。つまり、揚水水車を現在も利用している理由（存続条件）を明らかにすることで、揚水水車が有する機能や価値が定性的に明らかになると考えられる。

本章では、揚水水車の存続条件を明らかにすることを目的に、揚水水車の利用地点に対する悉皆全数調査（以下悉皆現地調査）で、揚水水車の利用地点の水路床勾配や地表面勾配、受益水田面積等の地理的条件の整理を行う。また、悉皆現地調査に文献調査を加えて、利用者が揚水水車を利用（もしくは廃止）する理由の整理や、揚水水車の直径や回転数、筒の設置方法や寸法といった揚水水車の諸元の整理を行う。その上で、現在の利用状況や利用特性、存廃要因の検討を通して、揚水水車の存続条件を明らかにする。

2.2 わが国における揚水水車の利用状況

以下に2011年12月までに確認された揚水水車の利用状況や性能、特徴を整理する。

2.2.1 現在の利用状況と存廃理由

文献整理から、栃木県から鹿児島県にかけて少なくとも79地区で利用実績があることが明らかになった（Fig. 3, Table 37, Table 38）。この79地区を対象に2007年から2011年にかけて悉皆現地調査を行ったところ、41地区133基の揚水水車が現存することが確認された。最近の利用の特徴として、揚水水車を観光の軸として利用する事例（例えば福岡県朝倉市）や地元自治体等が支援した保存活動を行っている事例（例えば兵庫県神河町）が散見された。保存活動を行う地区も、揚水水車をアピールすることで都市農村交流を行うことから、このような利用を観光保存目的と定義する。具体的には、地域住民や自治体等が主体となって保存を目的に利活用を行っていること、現地で説明板が設置されていること、webで紹介されていること、自治体が利活用を支援していることのいずれかにあてはまることとした。

利用をタイプ分けして、名称を括弧内に記した。まず灌漑目的で利用されるが観光保存目的で利用されていない揚水水車（灌漑利用）は27地区79基、灌漑目的で利用されかつ観光保存目的もある揚水水車（灌漑・観光保存利用）は8地区25基、灌漑利用はないが観光保存目的で存在する揚水水車（観光保存利用）は、3地区18基、休止・放置状態の揚水水車（休止）は、7地区11基であった。59地区

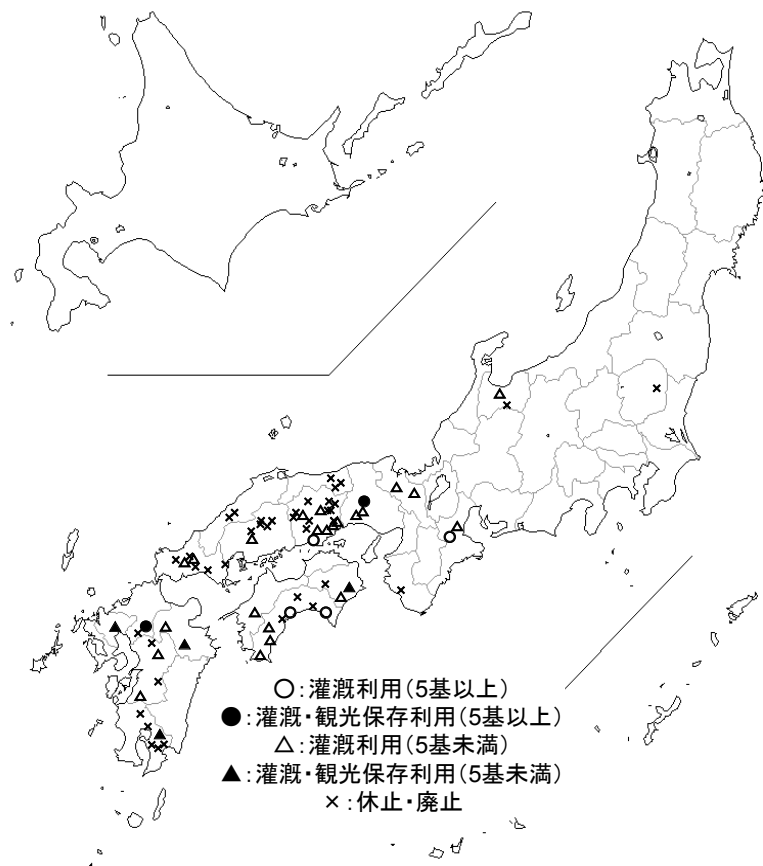


Fig. 3 わが国における揚水水車の利用状況（1980年前後と2010年前後を比較）

Status of utilization of IWW in JAPAN

167 基の揚水水車が廃止され、内 38 地区（108 基）は全廃された。ここで観光目的での利用に加えて保存活動の実施に対しても、I 章で定義した、揚水水車が有する新たな機能と同様の機能の発揮で得られる価値を維持するために行われると推察される。よって今後は観光目的や保存活動によって維持し利用される機能を、揚水水車の新たな機能と定義する。

揚水手段として揚水水車を選択している理由を明らかにするために、揚水水車を利用している農業者やその関係者（土地改良区の職員等）への聞き取り調査、および文献調査を行った。聞き取り調査を行った地区は 29 地区、文献から把握した地区は 13 地区であった。

上記 42 地区から、揚水水車の利用理由をみると、以下の 7 つの項目が挙げられた。

- ①：重力灌漑ができない（41 地区）。
- ②：経済的なメリットがある（8 地区）。
- ③：漏水田である（8 地区）。
- ④：堰上げると下流に迷惑がかかる（4 地区）。
- ⑤：労働が楽になる（7 地区）。
- ⑥：利用者の遊び心（2 地区）。
- ⑦：地域資源を保全するため（7 地区）。

このように、重力灌漑ができないことを理由にする人が最も多かった。これは末尾（1981）が指摘したように、わが国の灌漑方法が重力灌漑を主体としつつも、重力灌漑が不可能な場合に揚水水車が利用されることを示す。

重力灌漑ができないだけならば、発動機付きポンプ等代替手段の利用も考えられる。しかし、経済的なメリットや労働負荷の緩和、下流に迷惑をかけない等の理由は、利用者が考える揚水水車が持つ優位点であり、重力灌漑ができない水田への灌漑方法として、揚水水車が有効である場合もあることを示唆している。遊び心で利用されていたり、地域資源の保存を目的に利用している事例は、農業者も揚水水車が有する新たな機能（景観形成等）を肯定的に捉えつつあるものと推察する。なお、対象 42 地区の内 25 地区で灌漑目的での利用が確認された。

廃止された 165 地点の現在の土地利用を整理すると（Fig. 4）、33 地点は水田、25 地点は畑地、25 地点は休耕地・放棄田、15 地点は宅地・工場等に転用され、51 地

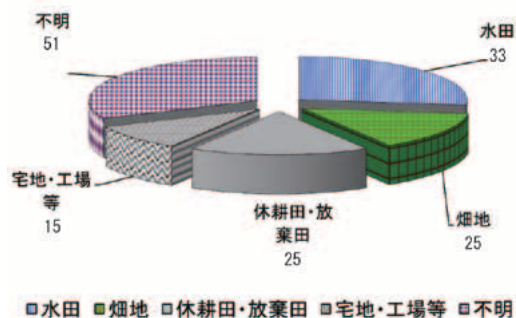


Fig. 4 揚水水車が廃止された水田の現在の土地利用
Current land use of paddy field that removed IWW

点は特定できなかった。

35 地区では、聞き取り調査から揚水水車の利用をやめた理由が明らかになった。具体的には、

- ①：電動ポンプやガソリンポンプ等（以下発動機付きポンプ）に置き換えられた（17 地区）。
- ②：耕作放棄された（17 地区）。
- ③：畑として利用するようにした（13 地区）。
- ④：基盤整備事業が入った（5 地区）。
- ⑤：水車職人がいなくなった（3 地区）。

といった理由が挙げられた。

このように、現在水田利用されている場所は、土地改良事業が行われたか発動機付きポンプに変更され、畑地や休耕地、放棄田になっている場合は、減反が影響している傾向が示唆された。

2.2.2 揚水水車利用地域の偏り

わが国における揚水水車の利用分布を見ると、三重県から富山県を結ぶライン以西に偏在している（Fig. 3）。そこで、揚水水車の利用が偏在している理由を検討する。揚水水車は、電動ポンプ等が普及する昭和 30 年代以降に急減した³⁾ため、昭和 30 年以前のわが国の人口と土地利用の推移を見る。人口は 1840 年（内務省内閣統計局、1993）と 1920 年（総務省統計局、2012）、土地利用は国土面積（林野庁、2012）と、1919 年の農林業センサスデータ（総務省統計局、2012）から得られる、経営耕地面積を用いて検討する。Table 2 に旧国別の 1840 年と 1920 年の人口と明治時代の農地面積を示した。江戸時代の情報と明治時代の情報との整合性をとるために、一部は複数の国の合算値となった。1840 年の一人あたり国土面積を見ると西日本が東日本より相対的に少ないことがわかる。また、江戸時代末期の 1 人あたりの農地面積を推定するために、統計のある 1919 年の経営耕地面積を 1840 年の人口で除した値を比較しても、西日本に散在する揚水水車の利用実績がある旧国は、相対的に値が小さい傾向にある。

以上の結果から、確定的な事は言えないが、西日本は相対的に一人あたりの国土面積や農地面積が少ないため、重力灌漑ができない土地を水田として利用するために揚水灌漑を行う必然性が発生したため、揚水水車の利用が進んだ可能性がある。あるいは、若村（1988）が指摘するように揚水水車は中国から当時の首都である京都に伝来して利用が広まった経緯を鑑みると、地理的に近畿地方を中心とした地域及び近畿地方より中国よりの西日本で利用されやすかったと推察される。

2.3 揚水水車の諸元整理と分類

2.3.1 揚水水車が立地する集落の農業地域類型

2005 年農林業センサスでの農山村地域調査から、揚水水車が立地する集落の農業地域類型を整理した。全 79 地区のうち、農林業センサスにデータの記載がない等で判別できなかった 4 地区を除く 75 地区の農業地域類型は、Fig. 5 のような頻度分布となった。立地集落の約半数が中間農業地域となり、山間農業地域と併せると、中山間地での立地が

Table 2 江戸時代末期と明治時代の旧国単位の農地面積と人口
Farmland area and population of provinces of JAPAN in late Edo Period and Meiji Period

旧国名	国土面積 (ha)	経営耕地面積 (田畑:1919年) (ha)	経営耕地面積 (田:1919年) (ha)	人口 (1920年)	人口 (1840年)	1840年の 1人あたり 国土面積 (ha)	田経営耕地面積 (1919年) / 人口(1920年)	田経営耕地面積 (1919年) / 人口(1840年)
陸奥	4,595,429	594,574	312,485	3,926,512	1,506,193	3.05	0.08	0.21
出羽	2,093,566	269,778	193,406	1,867,462	832,649	2.51	0.10	0.23
常陸	609,569	221,165	92,217	1,350,400	499,761	1.22	0.07	0.18
下野	640,828	132,414	68,032	1,046,479	367,654	1.74	0.07	0.19
上野	636,316	108,054	32,724	1,052,610	426,073	1.49	0.03	0.08
下総	515,658	193,979	105,677	1,336,155	997,663	0.52	0.08	0.11
武蔵	598,467	225,162	83,037	5,018,961	1,721,359	0.35	0.02	0.05
相模	241,584	75,931	24,322	1,323,390	285,196	0.85	0.02	0.09
越後	1,258,346	248,373	172,934	1,776,474	1,202,681	1.05	0.10	0.14
越中	424,740	93,932	79,715	724,276	383,583	1.11	0.11	0.21
加賀	418,547	81,341	53,531	747,360	402,769	1.04	0.07	0.13
越前	418,927	61,318	48,784	599,155	412,173	1.02	0.08	0.12
甲斐	446,537	59,111	20,086	583,453	300,152	1.49	0.03	0.07
信濃	1,356,223	175,969	76,071	1,562,722	775,313	1.75	0.05	0.10
美濃	1,062,117	119,578	65,810	1,070,407	653,774	1.62	0.06	0.10
駿河	778,009	133,580	64,029	1,550,387	736,195	1.06	0.04	0.09
尾張	516,406	159,594	100,588	2,089,762	1,043,971	0.49	0.05	0.10
伊勢	577,687	104,185	76,245	1,069,270	607,858	0.95	0.07	0.13
近江	401,736	77,151	65,848	651,050	527,412	0.76	0.10	0.12
山城	1,490,530	269,129	212,012	6,176,793	2,885,013	0.52	0.03	0.07
大和	369,109	44,204	33,675	564,607	338,571	1.09	0.06	0.10
紀伊	472,612	47,741	33,668	750,411	489,036	0.97	0.04	0.07
因幡	350,726	49,268	34,343	454,675	289,189	1.21	0.08	0.12
出雲	670,757	94,494	56,706	714,712	554,266	1.21	0.08	0.10
備前	711,300	125,554	89,209	1,217,698	795,919	0.89	0.07	0.11
安芸	847,852	113,219	76,630	1,541,905	872,768	0.97	0.05	0.09
周防	611,222	114,474	80,984	1,041,013	665,409	0.92	0.08	0.12
阿波	414,569	55,541	28,604	670,212	431,050	0.96	0.04	0.07
讃岐	187,647	50,716	39,933	677,852	419,969	0.45	0.06	0.10
伊予	567,738	112,108	48,396	1,046,720	580,589	0.98	0.05	0.08
土佐	710,501	125,249	37,414	670,895	451,871	1.57	0.06	0.08
筑前	1,131,550	250,791	171,303	3,048,531	1,333,139	0.85	0.06	0.13
肥前	653,480	164,267	86,519	1,810,077	736,097	0.89	0.05	0.12
肥後	740,521	174,389	76,659	1,233,233	741,677	1.00	0.06	0.10
日向	773,478	97,194	44,191	651,097	249,955	3.09	0.07	0.18
大隅	918,780	232,245	62,215	1,415,582	337,119	2.73	0.04	0.18
合計	29,213,064	5,255,772	2,949,002	53,032,298	25,854,066	1.13	(全国平均)0.06	(全国平均)0.11

※網掛けの旧国は、灌漑用揚水水車の利用が確認されている

多いことが視える。農業地域類型と現在の利用状況 (Fig. 6) からは、都市的地域での灌漑目的利用率が全体の 70.5% に対して山間農業地域になるにつれて利用率が減少する一方で、観光保存目的での利用が増えることが示された。

2.3.2 水車利用地点の水路進行方向の地表面勾配と水路床勾配

揚水水車は、水車自身で堰上げすることで上下流間に水位差を生じさせ、その比エネルギー差を用いて水車を回転させることで揚水している。利用する比エネルギー差は、設置される水路床勾配と関係があると考えられる。揚水水車の立地が適当な水路床勾配を知るためには、現在利用される場所の水路床勾配を知ることが重要である。しかし、日本各地に散在する揚水水車の水路床勾配を全て測定することは、現実的には困難である。そこでわが国で最も多くの揚水水車が利用される岡山県において、揚水水車が設置される地点の水路床勾配を現地での測量から求めた。また、全国を対象とした揚水水車利用地点における水路進行方向の地表面勾配を整理して、岡山県における水路床勾配との関係を解明し、全国を対象とした立地特性および利用特性を検討する。

まず、岡山県内の揚水水車利用 11 地点の水路床勾配を整理する。Fig. 7 に岡山県内で利用が確認された箇所内、具体的な利用地点が判明した、揚水水車が設置される水路の水路床勾配を農業地域類型別に示した。その結果、都市的地域から山間農業地域になるにつれて、水路床勾配の値が高くなる傾向が示された。しかし、山間農業地域以外で

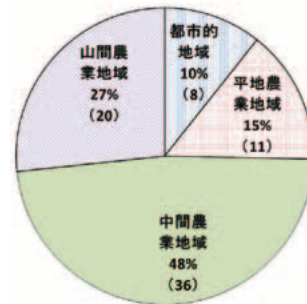


Fig. 5 立地集落の農業地域類型
Classification of agricultural areas of location village

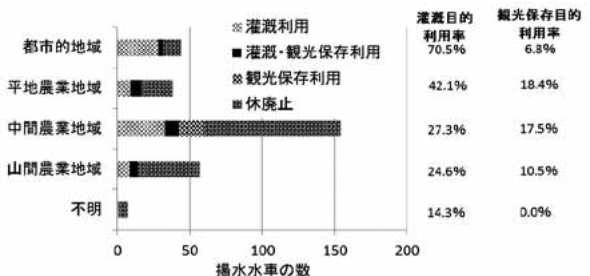


Fig. 6 農業地域類型別の現在の利用状況と灌漑利用率
Current usage situation and ratio of irrigation use by classification of agricultural areas

は、水路床勾配がおおよそ 0.2%※1 より緩い水路に設置される傾向が示された。一方、山間農業地域の揚水水車のうち

1ヶ所の水路床勾配が他と比べて非常に急であったが、これは落差 40cm の段差を設置して下掛け水車として利用したためである。

次に解析ができた 159 地点の水路進行方向の地表面勾配を整理する。ArcGIS10.0 (ESRI 社) を用いて 10mメッシュ標高データから推定した。具体的には、揚水水車利用地点の前後 100m から 200m の標高値を読み取り、2 点の標高差と距離から勾配を算出した。ただし、山間部等では、水路の流下方向に向かい標高が高くなるケースも発生したため、そのような場合は計測不可とした。得られたデータは、あらかじめ設定した階級ごとに整理した。

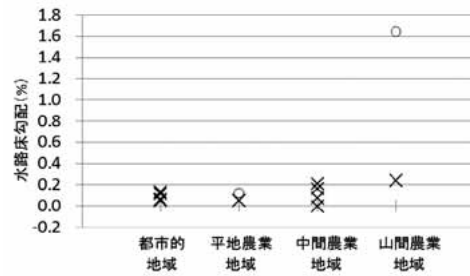
現在灌漑目的で利用が確認されている 104 基の頻度分布 (Fig. 8) を見ると、過半数は地表面勾配が 0.2% よりも急な場所で利用される。一方で、0.1% 以下においても全体の 21% の利用があったが、その場所を見ると、倉敷市祐安地区のみであった。当地区は日本で最も揚水水車の利用数の多い集落であり、高梁川下流域の干拓地の間近に位置する集落である。

さらに地表面勾配が揚水水車の利用形態に及ぼす影響を見るために、両者のクロス集計 (Table 3) を行ったところ、勾配が 0.13% より緩い場所に比べて 0.2% より急な場所で、1980 年代からの 30 年間で揚水水車の廃止や休止が進行したことが示唆された。一方で 0.2% より急な場所においては、観光目的利用も併せて揚水水車を保全している傾向があった。

農業地域類型と地表面勾配のクロス集計 (Table 4) を見ると、都市的地域から山間農業地域になるにつれて緩勾配から急勾配になる傾向が示された。

地表面勾配と水路床勾配の関係 (Fig. 9) を見ると、地表面勾配の緩急に拘わらず、水路床勾配は 0.2% より緩い勾配となり、両者の間に相関関係は見られなかった。

以上の結果から、山間農業地域以外で揚水水車が利用される地点は、地表面勾配に拘わらず水路床勾配はおおよそ



○点は地表面勾配の推定が不可能であった。

Fig. 7 岡山県内の揚水水車の水路床勾配

Bed slope of canal located IWW in Okayama pref.

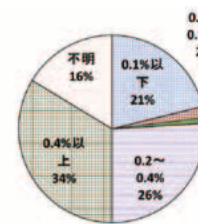


Fig. 8 地表面勾配の頻度分布

Frequency distribution of surface of the ground slope

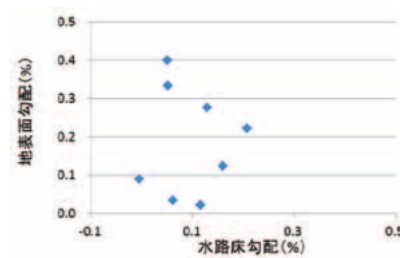


Fig. 9 岡山県内の揚水水車の

水路床勾配と地表面勾配の関係

Relationship between bed slope and surface of the ground slope of

canal located IWW in Okayama pref.

※1 勾配の単位は%を用いた。距離 100m で高さが 1m 発生するような勾配 (1/100 と表現される) は 1%である。

Table 3 利用形態と地表面勾配のクロス集計

Cross table between current usage situation and surface of the ground slope of canal located IWW

	灌漑利用	灌漑・観光保存利用	観光保存利用	休止	廃止	合計
地表面勾配	0.1%以下	22	0	0	3	25
	0.1~0.13%	1	1	0	9	11
	0.13~0.2%	1	0	0	0	1
	0.2~0.4%	12	15	0	16	44
	0.4%以上	30	5	0	5	78
	不明	13	4	18	5	101
	合計	79	25	18	11	167

Table 4 農業地域類型と地表面勾配のクロス集計

Cross table between classification of agricultural areas and surface of the ground slope of canal located IWW

	都市的地域	平地農業地域	中間農業地域	山間農業地域	不明	合計
地表面勾配	0.1%以下	23	0	2	0	25
	0.1~0.13%	4	0	7	0	11
	0.13~0.2%	0	0	1	0	1
	0.2~0.4%	11	8	18	7	44
	0.4%以上	2	5	51	20	78
	不明	4	25	75	30	141
	合計	44	38	154	57	300

0.2%より緩いことが明らかになった。山間農業地域では、1%より急な水路床勾配でも利用があった。地表面勾配は都市的地域から山間農業地域になるにつれて急になるため、水路床勾配も程度は異なるが同様に急になったと推察された。また、同じ地点の水路床勾配は地表面勾配より緩いことが多く、この勾配差が重力灌漑を不可能とする要因となり、揚水灌漑の必要性が生じて揚水水車が利用されたと考えられた。

2.3.3 筒の設置方法

揚水水車は筒の設置方法により大きく3種類に分類できる (Fig. 10)。具体的には、若村 (1985), (1988), (1994) が水筒の取り付け方向が水車回転方向に対して平行 (H型) か垂直 (V型) かで分類した方法に従い、V形式は筒の水出入り口が水車の回転方向と垂直に近く、H形式は筒の水出入り口が水車の回転方向に向いているものとした。B形式は、全国調査で判明したV形式にもH形式にも判別が困難な水車の板と筒 (Bucket) が一体となった形式である。以上3形式と現在の利用状況とのクロス集計を Table 5 に示す。判明しているもので比較すると、H形式の存在がやや多いものの、V形式と差はなく、不明が全体の2割弱あることを考慮すると、全体に占めるV形式とH形式の利用割合は同程度と推察される。筒設置形式と農業地域類型とのクロス集計 (Table 6) からは、V形式が都市的地域と山間農業地域で多い傾向が見られる一方でそれ以外はH形式が多数派となった。これは、地形等で筒設置形式が決定されず、若村が指摘するように、技術の伝来経路によって利用される形式が決定されることを示唆する。

2.3.4 揚水水車の直径

本論文においては、揚水水車の直径を Fig. 11 のように定義する。揚水水車の欠点は、揚程より大きい直径の水車が必要なこと (佐野, 1998) から、利用形態別の揚水水車の直径を見ると (Fig. 12), 多くが直径1.5mから2.5mの間に収まっている。つまり、直径1.5mから2.5mの間で利用可能な揚水水車が利用しやすいものと推察される。また、



V形式
(岡山県倉敷市祐安地区)

H形式
(三重県伊賀市上林地区)

B形式
(富山県富山市寺町地区)

Fig. 10 筒の設置方法による分類
Variety of IWW

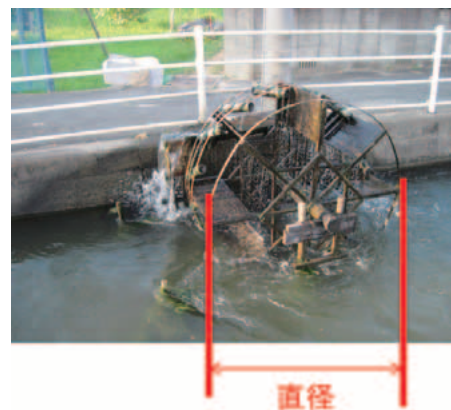


Fig. 11 揚水水車の直径
Diameter of IWW

Table 5 筒の設置方法と現在の利用状況とのクロス集計
Cross table between current usage situation and variety of IWW

		現在の利用状況					
		合計	灌漑利用	灌漑・ 観光保存利用	観光保存利用	休止	廃止
筒設置 形式	合計	300	79	25	18	11	167
	V形式	115	34	10	0	4	67
	H形式	127	43	15	2	6	61
	B形式	2	2	0	0	0	0
	不明	56	0	0	16	1	39

Table 6 筒の設置方法と立地する農業地域類型とのクロス集計
Cross table between classification of agricultural areas and variety of IWW

		農業地域類型					
		全体	都市的地域	平地農業地域	中間農業地域	山間農業地域	不明
筒設置 形式	全体	300	44	38	154	57	7
	V形式	115	29	8	54	24	0
	H形式	127	14	22	67	19	5
	B形式	2	0	0	0	1	1
	不明	56	1	8	33	13	1

灌漑利用している揚水水車の直径と撤去されたそれとは大差がない。これは揚水水車が廃止される要因として、直径は大きく影響していないことを示唆する。筒の設置方式別の直径の頻度分布 (Fig. 13) を見ると、V形式がH形式より直径がやや小さい傾向が見られた。

2.3.5 受益水田面積

ここでは、揚水水車を利用している水田面積を整理する。水田面積は、ArcGIS を用いて地点ごとに測定した。灌漑目的で水車を利用しているか否かでの受益水田面積の頻度分布 (Fig. 14) を見ると、灌漑目的での利用の有無に拘わらず5~10aが最も多く、概ね20a以下で利用されることが示された。一方で、現在でも灌漑目的で利用される揚水水車は、そうでない揚水水車に比べて相対的に受益水田面積が大きいと推察される。ただし、現在灌漑目的で利用される水車が揚水する水田面積は、揚水水車 104 基の全てでデータ整理できたが、そうでない場合は、揚水水車が利用された具体的な場所を特定出来なかった場合も多く、対象 196 基の内 83 基のデータしか整理出来なかったため注意が必要である。また、受益水田面積が 400a 以上と他と比べて広い面積を灌漑する事例もあったが、これは受益水田の中で番水をしている可能性もあり、今後の追跡調査が求められる。

2.3.6 揚水水車が灌漑する水田枚数

揚水水車 1 基が揚水する水田枚数が単数か複数かで、揚水水車の揚水性能が異なることが考えられるため、分類した。詳細な性能差は「2.3.8.周速度」で説明する。

ここでは、揚水水車 1 基で水田 1 枚を灌漑するものを「単数水田対応型水車 (単数対応型)」, 揚水水車 1 基で水田複数枚を灌漑するものを「複数水田対応型水車 (複数対応型)」と定義した。Fig. 15 にそのイメージを示した。

利用状況を見ると、我が国で利用される大半は単数対応型水車で、複数対応型水車が存在する地点は、富山県富山市寺町地区、兵庫県福崎町山崎地区、福岡県朝倉市菱野地区、三島地区、久重地区で利用されるすべての揚水水車である。

2.3.7 回転数

ここでは、各地の揚水水車の回転数を整理する。回転数の計測条件として、灌漑期であることとした。ここでの灌漑期の判断条件として、水路の水位が非灌漑期より明らかに高いことや水路の受益水田で稲作が開始されていることである。また、灌漑期も代かき期と普通期で水位が異なることが考えられるが、ほとんどの水車で5月中旬以降に計測していることや、田植えが終了していることなどから、普通期の回転数として取り扱った。Fig. 16 に回転数の頻度分布を示す。全 104 基のうち、101 基のデータを得ることができた。具体的には、6~7rpm が最も多く、3~7rpm で全体の 67%を占めた。

2.3.8 周速度

揚水水車は直径が異なると同一の流速の水路に導入しても回転数が異なることが考えられる。そのため、直径が異なる揚水水車で水田面積との関係を見るためには、周速

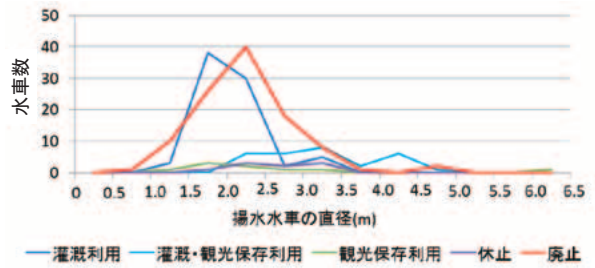


Fig. 12 利用形態別の揚水水車の直径の頻度分布
Frequency distribution of diameter of IWW by usage situation

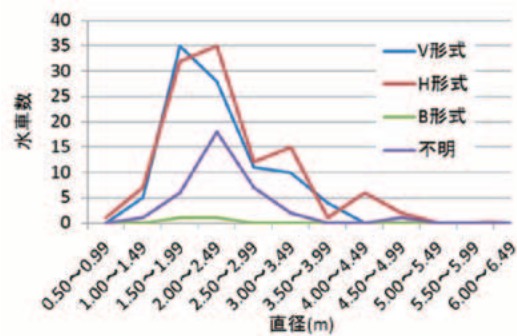


Fig. 13 筒の設置方法別の直径の頻度分布
Frequency distribution of diameter of IWW by variety of IWW

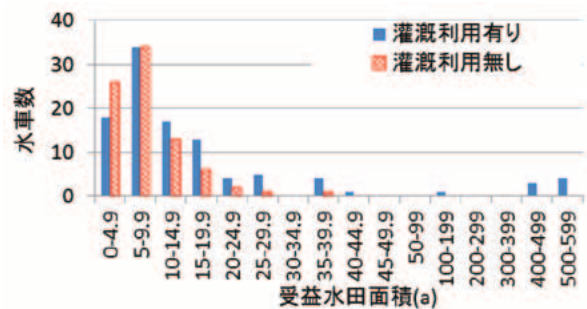


Fig. 14 受益水田面積の頻度分布
Frequency distribution of beneficial paddy area

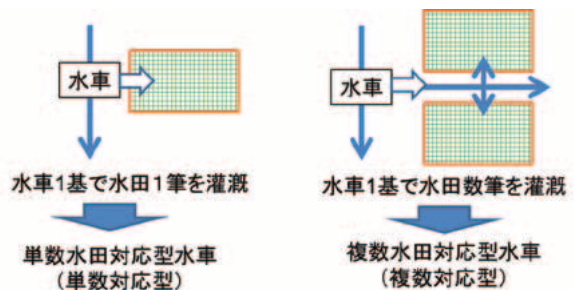


Fig. 15 揚水水車 1 基が揚水する水田枚数
Difference of number of paddy pumped by IWW

度に変換する必要がある。ここで、周速度とは揚水水車の外周での回転の速さとし、揚水水車の外周の長さ (m) を 1 回転するのにかかった時間 (s) で除したものと定義する。

Fig. 17に周速度と受益水田面積との相関関係を示す。対象とした揚水水車は、Fig. 15の複数対応型が単数対応型に比べて受益水田面積が非常に大きく、適切な統計処理ができない懸念があったので、単数対応型のみで分析する。V形式とH形式の両者とも単相関分析における無相関の検定では、1%水準での有意な関係は認められなかった。周速度は、ほとんどで1.0m/s以下であった。

周速度と現在の利用状況のクロス集計 (Table 7) からは、現在灌漑目的で利用される水車の情報が中心となるが、0.3~0.8(m/s)での利用が多いことが示された。

周速度と農業地域類型のクロス集計 (Table 8) からは、相対的に平地農業地域が最も早い傾向があり山間農業地域が遅い傾向が見られた。

2.3.9 揚水水車の性能に関する各種諸元間関係

ここまでの整理したデータのうち、明らかに揚水性能(1基あたりの揚水量)の異なる複数対応型を除いて、揚水水

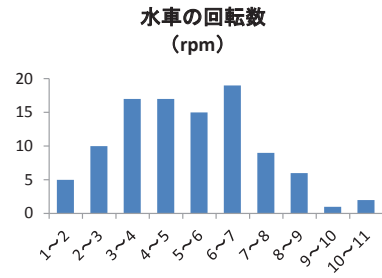


Fig. 16 回転数の頻度分布

Frequency distribution of number of rotations of IWW

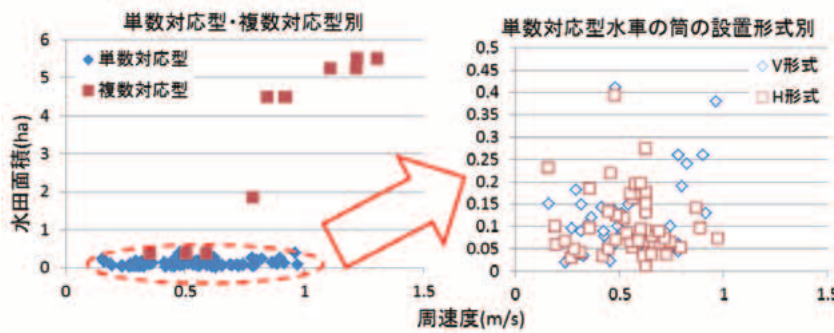


Fig. 17 周速度と受益水田面積の関係

Relationship between circumferential velocity and beneficial paddy area

Table 7 周速度と現在の利用状況のクロス集計

Cross table between circumferential velocity and current usage situation

		灌漑利用	灌漑・ 観光保存利用	観光保存利用	休止	廃止	合計
周速度 (m/s)	0.1~0.19	4	0	0	3	0	7
	0.2~0.29	5	2	0	0	0	7
	0.3~0.39	11	0	0	0	0	11
	0.4~0.49	12	5	0	0	0	17
	0.5~0.59	15	2	0	0	1	18
	0.6~0.69	13	3	0	0	0	16
	0.7~0.79	11	1	1	0	0	13
	0.8~0.89	2	3	0	0	1	6
	0.9~0.99	3	3	0	0	0	6
	1.0~1.09	0	0	0	0	0	0
	1.1~1.19	0	1	0	0	0	1
	1.2~1.29	0	2	0	0	0	2
	1.3~1.39	0	1	0	0	0	1
不明	3	2	17	8	165	195	
合計		79	25	18	11	167	300

Table 8 周速度と農業地域類型のクロス集計

Cross table between circumferential velocity and classification of agricultural areas

		都市的地域	平地農業地域	中間農業地域	山間農業地域	不明	合計
周速度(m/s)	0.1~0.19	0	1	4	2	0	7
	0.2~0.29	0	0	4	3	0	7
	0.3~0.39	4	2	3	2	0	11
	0.4~0.49	3	0	10	4	0	17
	0.5~0.59	5	3	8	2	0	18
	0.6~0.69	6	2	7	1	0	16
	0.7~0.79	6	1	5	0	1	13
	0.8~0.89	3	1	2	0	0	6
	0.9~0.99	3	2	1	0	0	6
	1.0~1.09	0	0	0	0	0	0
	1.1~1.19	0	1	0	0	0	1
	1.2~1.29	0	2	0	0	0	2
	1.3~1.39	0	1	0	0	0	1
合計		30	16	44	14	1	105

車の性能に関する項目である、直径、受益水田面積、周速度、地表面勾配の全てのデータがそろって 80 基を対象に単相関分析を行った (Table 9)。相関係数を見ると、無相関の検定において 1% で有意な関係はなく、5% で有意な関係で受益面積と周速度が正の相関、受益面積と地表面勾配が負の相関が示された。このように、水車の回転が速いほど、地表面勾配が緩いほど受益水田面積が大きくなる傾向があると考えられる。

2.3.10 農業地域類型別の揚水水車の廃止理由

農業地域類型と廃止された地点の現在の土地利用のクロス集計 (Table 10) を見ると、全体の約 32% (53 ヶ所) の現在の土地利用は確認できなかったが、残りの内の約 39% (45 ヶ所) は、引き続き水田として利用された。但し、都市的地域以外では、土地利用が水田である地点数は、半数以下であった。

農業地域類型別で廃止された理由をみると (Table 11)、

Table 9 単数対応型水車の各種諸元間の単相関係数
Coefficient of correlation between elements of 'IWW pumped for one paddy'

	直径	受益水田面積	地表面勾配	周速度
直径				
受益水田面積	-0.1715			
地表面勾配	0.0471	-0.2563*		
周速度	0.1338	0.2526*	-0.1623	

無相関の検定: 判定 (*:5% **:1%)

都市的地域や平地農業地域は転作や耕作放棄といった、減反の影響を受けたと考えられる理由が多数を占める一方で、中間農業地域や山間農業地域は、これらに加えて別の揚水手段への切り替えや基盤整備事業、宅地化、水車職人の途絶といった様々な理由で廃止された。

2.3.11 揚水水車の分類

揚水水車は、設置される農業地域類型によって性能や特徴が異なると考えられる。そこで、本来的な機能である灌漑利用の有無と、新たな機能を利用する観光保存利用の有無および、農業地域類型別に分類を行った (Fig. 18)。分類名で IC, IN, NC で始まる水車は、現存して何らかの利活用がされており、NN で始まる水車は、撤去されたか利用が休止されているものである。次に灌漑利用される水車では、立地や構造、性能で分類間の相違を、灌漑利用されない水車では、利用されなくなった理由等で分類間の相違をそれぞれ検討する。

Table 12 は灌漑利用がある IC および IN で始まるグループの各種諸元の平均値である。揚水水車 1 基が灌漑する水田枚数 (Fig. 15) から揚水水車が複数対応型の場合は、平均直径や平均受益面積が相対的に大きい数値を示し、単数対応型より揚水性能が優れる傾向が見られた。単数対応型に限定して比較すると、観光保存目的でも利用される水車は、相対的に直径が大きく受益水田面積が小さい傾向が見

Table 10 農業地域類型別の廃止地点の土地利用

Current land use of paddy field that removed IWW by classification of agricultural areas

		農業地域類型					
		全体	都市的地域	平地農業地域	中間農業地域	山間農業地域	不明
現在の土地利用	全体	167	9	21	89	42	6
	水田	45	8	1	26	10	0
	畑	24	0	2	13	9	0
	休耕地・放棄田	29	1	10	13	5	0
	宅地・道路	16	0	0	10	2	4
	不明	53	0	8	27	16	2

Table 11 農業地域類型別の廃止理由

Reason of removal by classification of agricultural areas

	ポンプ等へ変更	基盤整備事業	転作	耕作放棄	宅地化	水車職人の途絶	別水源へ切り替え
都市的地域	○		○	○			
平地農業地域			○	○			
中間農業地域	○	○	○	○	○	○	
山間農業地域	○	○	○	○	○	○	○

Table 12 分類されたグループ別の各種平均値 (灌漑利用有り)

Various averages by categorized groups (irrigation use in 2011)

分類タイプ	対応型(単/複)	対象水車数	平均直径(m)	平均周速度(m/s)	平均地表面勾配(%)	平均受益面積(a)
IC-1	単数対応型	3	2.1	0.7	0.2	8
IC-2	複数対応型	7	4.2	1.1	0.2	500
IC-3	単数対応型	9	3.4	0.5	0.8	11
IC-4	単数対応型	6	2.7	0.4	0.2	5
IN-1	単数対応型	28	1.9	0.6	0.1	16
	複数対応型	1	2.0	0.8	N.D	185
IN-2	単数対応型	9	2.5	0.5	0.5	11
IN-3	単数対応型	30	1.9	0.5	0.6	9
	複数対応型	3	3.0	0.5	0.4	39
IN-4	単数対応型	8	1.7	0.4	2.6	6

られた。農業地域類型別では、都市的地域から山間農業地域になるにつれ平均周速度は遅く、平均地表面勾配は急に、平均受益面積は小さくなる傾向が見られた。平均直径は、観光保存目的での利用の有無に拘わらず都市的地域が相対的に小さく、それ以外では平地農業地域から山間農業地域になるほど小さくなった。

Table 13 は灌漑利用がないタイプでかつ観光保存利用もない NN で始まるグループの各種平均値である。都市的地域と平地農業地域では平均受益面積が相対的に大きく利用をやめた理由は少なく、中間農業地域と山間農業地域では、平均受益面積は相対的に小さく利用をやめた理由が多い傾向が見られた。

このように、立地地域と利用で分類することで、利用される諸元や廃止理由等に違いがあることが明らかになった。しかし、灌漑目的のみでの利用では立地地域間で大きな差が見られない傾向があった。

全国での揚水水車の具体的な利用状況は、巻末の付録 (Table 37, Table 38) を参照されたい。

2.4 揚水水車の存続条件

既往文献から確認された揚水水車利用地点への悉皆現地調査から、灌漑目的での利用の有無と観光保存目的での利用の有無で、利用される揚水水車の諸元に差があることが明らかになった。以下に灌漑目的での利用と観光保存目的での利用ごとに揚水水車の存続条件を検討する。

2.4.1 灌漑目的での利用

本来の機能である灌漑目的で利用される揚水水車の存続条件は、揚水水車の性能の範囲内で灌漑される水田に必要な量が揚水されることと考えられる。悉皆現地調査から現在でも灌漑目的で利用される揚水水車の諸元を整理すると以下のことが言える。

- ① 利用が多い直径は 1.5~2.5m であった。田面位と水路の水位との差を実揚程とすると、実揚程は直径の概ね半分であることが多い。よって、実揚程が 0.75~1.25m 程度が揚水水車を利用しやすい条件と考えられる。
- ② 揚水水車 1 基あたりの受益水田面積は最大約 550a であったが概ね 20a 以下で多用された。受益水田面積は小規模である方が揚水水車の利用に適していると考えられる。また、揚水水車 1 基あたり受益水田面積が広い程、番水による利用をしている可能性があり、今後の追跡調査が求められる。
- ③ 回転数と直径で規定される周速度は、概ね 1.0m/s 以下であった。周速度が速いほど回転が増し、揚水量が増えるため有利と考えられるが、悉皆現地調査から上限があることが示唆された。
- ④ 周速度は水路の流速に影響を受け、流速は水路床勾配や流量に規定される。揚水水車は、地表面勾配の如何に拘わらず、概ね 0.2% (1/500) より緩勾配の水路での利用が大半であった。
- ⑥ 廃止理由を見ると、都市的地域や平地農業地域では主に転作や耕作放棄といった理由に限定されたものが、中

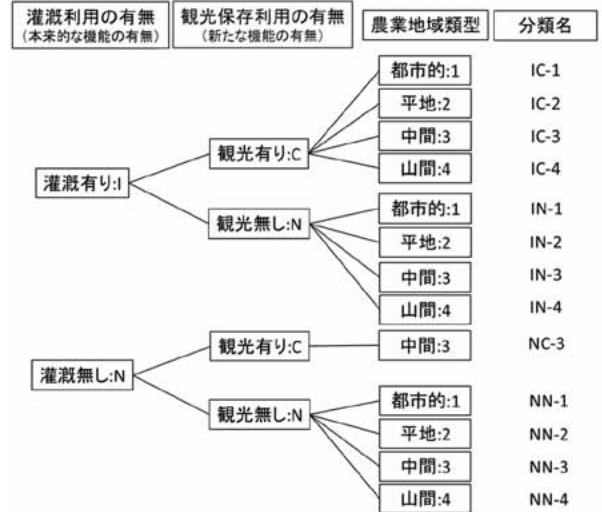


Fig. 18 揚水水車の分類
Classification of IWW

Table 13 分類されたグループ別の各種平均値
(灌漑利用・観光保存利用無し)
Various averages by categorized groups
(removal in 2011)

分類タイプ	対象水車数	平均直径(m)	平均受益水田面積 (a)	利用停止理由数 (最大7つ)
NN-1	13	2.2	12	3
NN-2	22	2.1	12	2
NN-3	94	2.2	5	6
NN-4	43	2.2	9	7

山間地では宅地化や基盤整備事業といった多様な理由で廃止された。しかし、廃止地点の現在の土地利用を見ると都市的地域以外は、畑地や耕作放棄地がある程度存在することが明らかになった。現在も水田として利用している地点と併せると、都市的地域以外では、廃止地点の半数の土地利用は、農地か耕作放棄地であった。このような場所は相対的に、将来、揚水水車を再度利用しやすいと考えられる。

以上のような結果から、揚水水車が灌漑目的で存続する条件としては、直径が 1.5~2.5m で受益面積が 20a 以下と小規模であること、水路床勾配が概ね 0.2% (1/500) より緩い水路に設置されることと推察された。都市的地域や平地農業地域での灌漑目的の利用率が中間農業地域や山間農業地域より相対的に多い理由として、上位のような条件に合致する利用が多いものと推察された。

また聞き取り調査から、漏水田等で常時揚水が必要な場所等では、電気代や油代等が不要といった経済的メリットや、頻りに設置や撤去をする必要がない労働負荷の緩和といったメリットがあることを利用者は意識することが明らかになった。これらは、揚水水車を揚水目的で利用することで得られる価値と推察される。

このように、揚水水車は水力を用いて揚水する機能を有する。この機能に対する価値を定量的に明らかにするため

には、水田が必要とする用水量を十分に揚水できるかといった揚水量と、揚水にどの程度の流水エネルギーを利用しているかといったエネルギー使用量をそれぞれ評価する必要がある。特に、揚水量を明らかにすることは、農業者に揚水目的で揚水水車を利用してもらうためにも、重要である。そこでⅢ章では、本章で明らかになった存続条件を考慮して、本来的な機能の発揮で得られる価値を揚水特性やエネルギー利用特性の解明を通して明らかにする。

2.4.2 観光保存目的での利用

観光保存目的での利用は、新たな機能を発揮させるために行われると考えられる。このうち灌漑目的での利用がある利活用は、Fig. 18 の分類では‘IC’に相当し、兵庫県神河町新野地区や徳島県小松島市西原地区、福岡県朝倉市菱野・久木・三島地区、佐賀県唐津市町切地区、大分県豊後大野市下自在地区、鹿児島県曾於市新田場地区が該当する。これらは、揚水水車の利活用を個人単位ではなく集落等団体で行う地区が散見され、保存活動も集落ぐるみで行う傾向がある。他方灌漑目的での利用がない利活用は、分類‘NC’に相当し、和歌山県日高川町小熊地区や高知県四万十市安並地区、大分県豊後大野市上自在地区、鹿児島県湧水町北方地区が該当し、これらの多くは、土地改良事業等により大容量の揚水が可能な揚水機場等が整備された地区で、揚水水車の管理も主に土地改良区等の団体が関与することが特徴である。このような利活用が行われるようになった背景に、良好な農村景観を求める要望の高まりがあると推察する。

ここで、集落ぐるみでの保存活動が行われている兵庫県神河町新野地区と佐賀県唐津市町切地区での事例を通して、地域住民が保存活動に参加する背景や活動状況の特徴を整理する。

(1) 兵庫県神河町新野地区における保存活動について

兵庫県神河町新野地区は、兵庫県西部を流れる市川の上流に位置する。当地区では現在、灌漑目的で6基の揚水水車が利用されるが、筒が設置されない景観形成目的の水車も数基存在する。当地区は、平成18年から兵庫県中播磨県民局による地域振興策「銀の馬車道プロジェクト」におけるワークショップで、「揚水水車が新野地区の地域資源である」と集落住民の意識が顕在化され、その結果保存活動が開始された地区である。

生田ら(2010)によれば、当地区における揚水水車は古文書から1693年には既に利用されていたが、最近では3基まで利用が減少した。そのような中で、村おこしを目的としたワークショップを平成17年・18年に開催し改めて集落を住民同士で見直した結果、水車の復元と維持管理等を行うとした「新野活性化構想」をまとめた。平成18年より上記の兵庫県の事業を活用して水車8基を復元し、平成20年に都市農村交流を目的とした「新野水車の会」を立ち上げ、観光協会やバス会社と連携した取り組みの結果、平成20年に500人、平成21年に600人の来訪者を得た。

また、平成19年4月に神河町役場の紹介で新野地区に居住する方にインタビューを行った。聞き取り内容は揚水水

車利用全般である。その結果、主に以下の回答を得た。

・かつては最大で20基程度の利用があったが、平成19年当時で農業者3人が3基灌漑目的で利用するまで減少した。その要因は、揚水水車の制作費が50万円程度かかり電動ポンプを利用の方が安価なためである。

・揚水水車は地域を代表するものだと思う。自分の心の中にあるふるさとには揚水水車があるため、現在灌漑利用される揚水水車は、利用者が赤字覚悟で利用している。

以上のように、揚水水車は、保全への意識が高い集落住民からは重要な地域資源として認識されることや、都市住民が農村に来訪するきっかけになることが示唆され、揚水水車は、地域性を発現する施設や都市農村交流施設として社会的意義を有することが考えられる。

(2) 佐賀県唐津市町切地区における保存活動について

佐賀県唐津市町切地区は、厳木川に面して位置する。当地区では現在、灌漑目的で4基の揚水水車が利用される。平成20年に揚水水車の保存活動を行っている自然と暮らしを考える会代表へのインタビューを行った。その結果以下の回答を得た。

・古文書から江戸時代から揚水水車が利用されていることが判明しているが、一時は水車数が2基まで減少した。当時公民館長を務めていた代表の元に、地元の70代の女性から地元のことをもっと知りたいと言われて講習会を行った。そのような中で、揚水水車が重要な地域資源であることに気づかされ、復元活動を開始した。

・揚水水車は地元の工業高校に製作を依頼し、近隣の小中学生に総合学習の一環として揚水水車にふれあってもらえるようにしている。

このように当地区も揚水水車が地域資源であると認識されることで、集落ぐるみでの保存活動を開始したことが示された。しかし、佐藤(2007)によれば当地区において揚水水車が衰退した要因として、減反政策と米価の下落による収入低下が、揚水水車の制作費の捻出を困難にしたことが挙げられ、当地区においても地域資源として揚水水車に社会的意義を持たせないと、揚水水車の継続的な利用が困難であると考えられる。現状は、揚水水車の環境学習への利用や地域ぐるみでの保存活動の実施に対して、佐賀県等が職業訓練校での水車の製作や公園の整備等の支援を行っている。

(3) 観光保存目的での存続条件

2地区での集落ぐるみの保全活動状況を整理した結果、地域住民が活動を行うきっかけは、揚水水車が地域資源であるとの認識の有無であることが示唆された。また、取り上げた2地区の揚水水車は、農業者から灌漑目的のみでの利用は、経済的に不利であると評価されている。

揚水水車を分類した結果、灌漑利用され、かつ観光保存でも利用される揚水水車は、灌漑利用のみの揚水水車に比べて、農業地域類型が同じでも相対的に直径が大きく受益水田面積も狭い傾向が示されている。揚水水車の直径が大きいことは製造費も高くなり、受益水田面積が狭いことは収穫される米も少なくなることから、経済性からみて相対

的に不利な条件で利用される揚水水車であることが推察される。また、町切地区は中間農業地域、新野地区は山間農業地域であるが、灌漑かつ観光保存目的で利用される揚水水車は、中間農業地域や山間農業地域での利用が相対的に多い。観光保存目的で利用される揚水水車は、両地区と同様に電動ポンプと比較してコスト面で不利な条件下で利用されるものと推察される。よって、灌漑かつ観光保存目的で利用される揚水水車の存続条件は、住民等が揚水水車に地域資源としての価値を有すると認識することと推察される。

住民等が関与した、観光保存目的で揚水水車を利活用するためには、住民等の揚水水車に対する評価構造から、住民等から好ましいと評価される価値を明らかにすることや、保存活動への参加動機に影響を及ぼす要因を解明することで多くの人が活動に参加するように働きかけることが有効と推察される。そこで、IV章では観光保存利用で発揮する新たな機能とその機能の発揮で得られる価値を明らかにするために、住民の揚水水車に対する選好性評価の決定要因を価値認識から検討し、V章では、特に重要な新たな機能を、住民の保存活動に参加しようとする動機の決定要因の解明を通して明らかにする。

2.5 小括

本章では、わが国で利用される揚水水車の利用地点への悉皆現地調査から、以下のことが明らかになった。

- ① 2011年度末時点で、我が国では41地区133基の揚水水車が現存した。そのうち灌漑目的で利用されるが観光保存目的で利用されていない揚水水車（灌漑利用）は27地区79基、灌漑目的で利用されかつ観光保存目的もある揚水水車（灌漑・観光保存利用）は8地区25基、灌漑利用はないが観光保存目的で存在する揚水水車（観光保存利用）は、3地区18基、休止・放置状態の揚水水車（休止）は、7地区11基であった。1980年代初頭での利用と比較して灌漑目的での利用は約35%と激減した。
- ② 聞き取り調査から、農業者が揚水水車を利用する理由としては、発動機付きポンプと比較して経済性が有利であることや、堰上げ灌漑と比べて下流に迷惑をかけない等が、利用をやめた理由としては、減反等による耕作放棄や土地改良事業による水利システムの変更、発動機付きポンプ（揚水機場の設置ではない）への置き換え、揚水水車製造者の減少がそれぞれ挙げられた。特に廃止理由については農業地域類型で傾向が異なり、都市的地域と平地農業地域は、主に転作や耕作放棄、発動機付きポンプ等への変更といった理由に限られたのに対して、中間農業地域と山間農業地域では、これらに加えて基盤整備、水車職人の途絶、宅地化といった理由が加わり、相対的に多様な理由で廃止された。
- ③ 水車諸元の整理から、利用される揚水水車の能力は揚水システムで異なった。具体的には、揚水水車1基に

対して複数の水田に灌漑を行うタイプが、揚水水車1基で水田1枚を灌漑する水車に比べて、直径が大きく受益水田面積が広い傾向が見られた。但し、わが国で利用される揚水水車の大半が後者のタイプであるため、揚水水車1基で水田1枚を灌漑するタイプの水車に特化して性能を見ると、観光保存目的での利用の有無や立地する農業地域類型で、利用される揚水水車の諸元に差が見られた。具体的には、平均直径は、観光保存目的での利用の有無に拘わらず都市的地域が相対的に小さく、それ以外では平地農業地域から中間農業地域、山間農業地域へと相対的に小さくなった。また、都市的地域から山間農業地域になるにつれ平均周速度は遅く、平均地表面勾配は急に、平均受益面積は小さくなる傾向が見られた。但し、観光保存目的でも利用される水車は、相対的に直径が大きく受益水田面積が小さい傾向が見られた。このように揚水水車の存廃要因や諸元は、農業地域類型や観光保存目的での利用の有無で分類することができた。

- ④ 観光保存目的で利用する地区から、佐賀県唐津市町切地区と兵庫県神戸町新野地区で聞き取り調査を行った結果、地域住民が保存活動に参加するきっかけは、揚水水車が地域資源であるとの認識の有無であることが示唆された。以上の結果から揚水水車は、従来からの揚水器具としての利用に加えて、地域資源と捉えて地域振興や観光目的で利用されることが明らかになった。
- ⑤ 揚水水車の灌漑目的での存続条件は、直径が1.5~2.5mで受益面積が0.2ha以下と小規模であること、水路床勾配が概ね0.2%より緩い水路に設置されることが明らかになった。また、観光保存目的での存続条件は、住民等が揚水水車に地域資源としての価値を有すると認識することと推察された。

Ⅲ 揚水水車の揚水特性とエネルギー利用特性の解明

3.1 研究目的

揚水水車は、高度経済成長期以降、電動ポンプ等代替手法への置き換えや減反政策、農業者の高齢化、揚水水車製造職人の減少等で、利用数が激減している。一方で、現在でも揚水水車の揚水量や経済性、労働負荷の緩和といったメリットに着目して、利用する農業者も存在する。これは、何らかの条件下では揚水水車も揚水手段として十分な性能を発揮することが可能だからだと推察される。また、揚水水車は自然エネルギーを利用するため、温室効果ガスの削減にも寄与できると考えられ、利用を促進する意義があると考えられる。

農業者に揚水手段として揚水水車を選択してもらうためには、利用水路に設置が可能かどうかという立地条件に関する知見と、設置するとどの程度の揚水量が得られるかという揚水特性に関する知見が重要である。しかし、揚水水車の揚水特性や立地条件等の特性に関する検討は、過去に越智ら（1986）により熊本県川原谷地区の揚水水車を事例に模型実験が行われた報告（以下既報と定義する）以外に見当たらない。揚水水車の利用を促進させるためには、揚水という機能が発揮された場合の価値を適切に評価することが重要である。

ところで、揚水水車は水路に賦存する流水エネルギーを利用して、水車を回転させることで揚水を行う。よって、揚水特性やエネルギー利用特性は、水車の回転数や、揚程と関係する水車の直径等が影響すると考えられる。

そこで本章は、揚水水車が本来の機能である揚水を行うことで得られる価値を明らかにする事を目的に、模型実験による、導入条件となる揚水水車設置による水路への堰上げの影響の有無や、実験水路の流量や水位の変化が水車の回転数と揚水量の関係に及ぼす影響に着目して、揚水特性及びエネルギー利用特性を明らかにする。

3.2 研究方法

揚水水車の揚水特性やエネルギー利用特性を模型実験から検討する。得られた結果を、灌漑目的で実用される揚水水車に適用して、本来の機能の発揮で得られる価値を具体的に明らかにする。以下に実験に用いる揚水水車の諸元と実験方法を述べる。

3.2.1 実験で用いる揚水水車（模型水車）

既報（越智ら、1986）では直径 1.2m で回転数が 3～5rpm での性能が評価されているが、わが国では直径が 1.2m で利用される揚水水車はほとんどない。そこで本章の実験で用いる揚水水車は、灌漑目的で存続する揚水水車の直径の頻度分布から、直径 2.0m 前後が最も利用が多いと判断されたため、直径 2.0m の揚水水車（Fig. 19）とした。詳細な構造は、直径 2.0m クラスの揚水水車が多用される倉敷市祐安地区の揚水水車をモデルにして 1/1 スケールで製作した（Fig. 20）。

実験で用いる揚水水車は、主に木材を利用して製作したが、軸及び軸周辺の材料は、木材での加工が困難であったため鉄を用いた。水受板はベニヤ板を用い、寸法は 0.8m×0.4m で厚さが約 12mm である。軸と水受板を繋ぐ‘日の脚’は角材を用いた。

水をくみ上げる筒の設置方法は、大きく分けて 2 種類あり、一つは細長い筒を揚水水車の回転方向にいくらか角度を付けて設置するもの（V 形式）と、もう一つはミルク缶等の底を水車の水受板に接着させるもの（H 形式）である。わが国ではこれらの利用数はほぼ同等であるが、今回は前者のタイプを実験に用いることとした。その理由は、筒の設置角度によって同じ回転数でも揚水量が異なる（越智ら、1986）ため、性能評価を行うためには、最適な筒の設置角度を明らかにする必要があるためである。具体的には、筒の角度が急な場合は、筒が水面下からくみあがる際の漏水は少ないものの、周速度が速い場合は樋への落水が十分にできず、角度が緩い場合は、水面下からくみあがる際の漏水は多いものの樋への落水は容易である。そのため、水車の直径や筒の寸法ごとに揚水に適した筒の設置角度があると考えられるが、利用が多い直径 2.0m での最適な筒の設置



Fig. 19 模型水車
Model water wheel

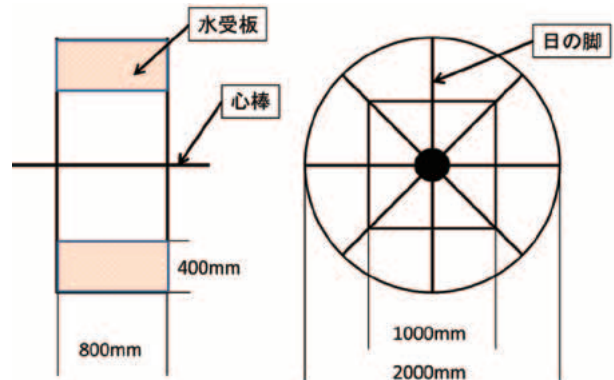


Fig. 20 模型水車の概要
Specification of model water wheel

角度は不明である。

筒の形状は、全国で塩ビ管やペットボトル、木箱、オイル缶等が利用されるが、倉敷市祐安地区を含めて全国で比較利用される傾向があり、既製品のため寸法等の性能が明らかな塩ビ管を採用した。筒の寸法は、同地区で利用が多いVU75タイプで長さ400mmとした。筒の設置角度 θ は、Fig. 21のように定義される。

3.2.2 実験水路と実験方法

(1) 実験水路

実験水路は全長40m、幅1mで最大流量 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ の性能を有する。揚水水車は、実験水路の中間地点に水路床と水車最低部の間に0.15mの間隔を設けるように水路に設置した(Fig. 22)。但し、実験水路の水路壁高は約2mと高く、そのままでは流し得る最大流量 $0.8\text{m}^3/\text{s}$ を実験水路に流しても計測したい範囲の回転数を得られないことが考えられたため、水車設置地点の前後5mに水路床から0.965mの上げ底を設置した。

揚水水車は実験水路の中間地点に設置し、水車軸から直上・直下それぞれ2m地点にサーボ式水位計を設置して水位の計測を行った(Fig. 23)。水位計の設置地点は、実験水路の形状や上げ底設置による水面の乱れ等から、最も適切に水位が計測できる場所を、目視等を通して決定した。

(2) 実験方法

実験は、実験水路を循環させる流量(以下実験流量)と水位を変動させて、各流量と水位ごとに回転数や揚水量を測定した。水位は、実験水路最末端に設置されるゲートの高さ(以下ゲート高さ)で調整した。水位を変化させる理由は、水車の水受板の水没深(Fig. 24; 以下水没深)によって、水受板が受けるエネルギーが変化し回転数に影響を及ぼすと考えられたからである。流量を変化させることで、同一水没深で回転数を変化させ、揚水特性やエネルギー利用特性の違いを検討する。また、水車を水路に設置すると堰上げが発生すると考えられるが、これは水路への水車設置に対する制約条件となるため、水車直上、直下に設置されるサーボ式水位計を用いて、各実験条件で水車設置による堰上げ水位を測定した。

揚水水車がくみあげた水は、水車脇に設置された樋に水を落として三角堰を設置した箱に導水し、三角堰の越流量

から揚水量を測定した。三角堰の公式から計算できない少量の揚水量の場合は、バケツに一旦導水してストップウォッチで満水になる時間を測定することで揚水量を計算した。また、樋は水車の直径と同等の長さを有して、水車がくみ上げた水を極力溢水させないように設置した。また、揚水水車の回転数は、目視からストップウォッチを用いて5回測定し、極値を除いた3回分の平均値とした。

なお、実験で設定する筒の設置角度をあらかじめ検討する目的で、模型水車を用いて筒の設置角度と揚水量との関係を見る予備実験を行った。予備実験は、筒の設置角度を 20° 、 35° 、 50° 、 65° で行い、回転数と揚水量の性能曲線から、 35° と 50° の揚水量が相対的に良好と判断された。

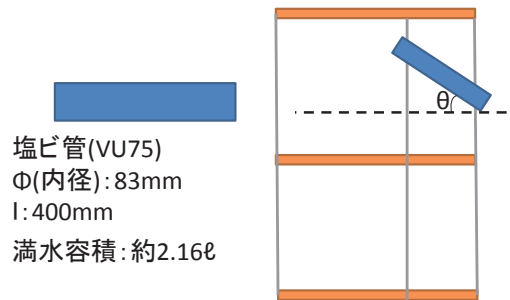


Fig. 21 水車への筒の設置角度の定義
Definition of setting angle of bucket

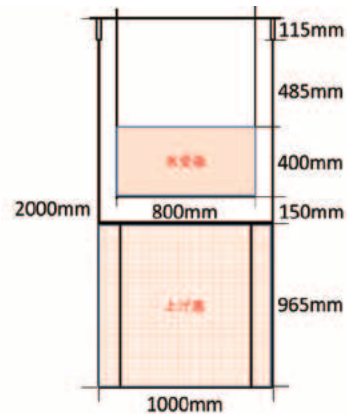


Fig. 22 模型水車の水路への設置状況
Setting position of model water wheel in experimental channel

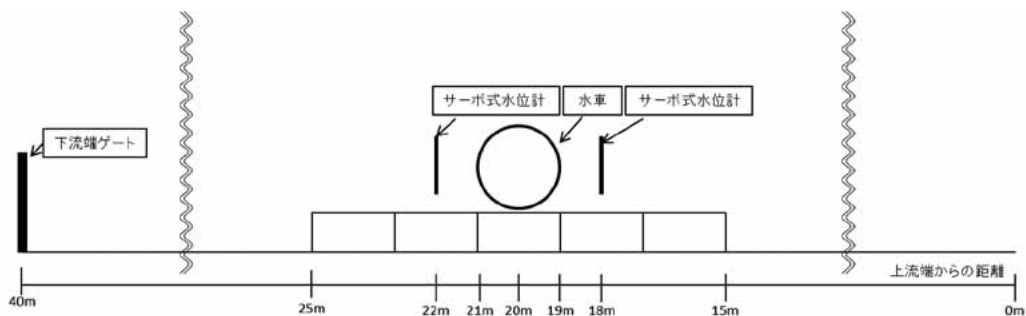


Fig. 23 実験水路の概要
Specification of experimental channel

しかし、予備実験では設定水位を筒の設置角度ごとに統一しなかったため、筒の設置角度で揚水量や回転数を測定した水没深が異なり、筒の設置角度間で同一水没深での揚水量の具体的な比較が困難であった。また、設定した角度も15° 間隔と広いため、間隔を狭くして検討する必要が考えられた。そこで、本実験では筒の設置角度の設定を5° 間隔とし、設定水位も設置角度間でほぼ同一になるようにした。この実験は今後「本実験」と定義し詳細は後述する。また、予備実験で得られた筒の最適設置角度は、既報の結果(越智ら, 1986) と異なった。本実験と既報の実験条件は、

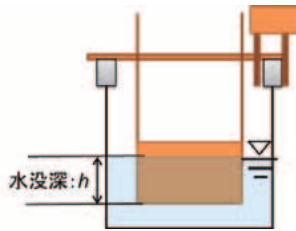


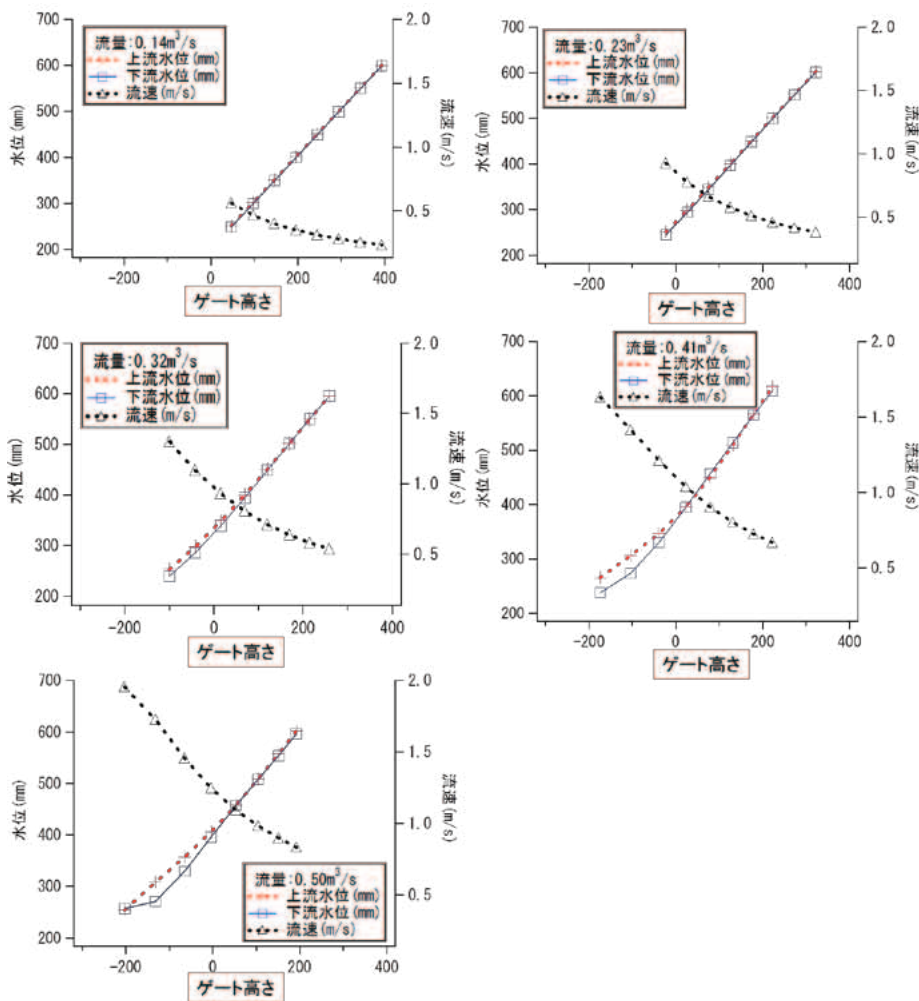
Fig. 24 水没深の定義

Definition of 'submerging depth'

水車の直径や筒の寸法が異なるため、揚水水車の周速度を既報と同条件にして揚水特性の比較を行った。この実験を、今後「確認実験」と定義し詳細は後述する。

a) 本実験

本実験の実験条件として、実験流量を0.14, 0.23, 0.32, 0.41, 0.50m³/sの5ケース設定した。また、各実験流量で水位計の水位がおよそ250mm~600mmまで50mm刻みで調整できるように、下流端ゲートのゲート高さ(以下ゲート高さ)と水位(設定水位)の関係(Fig. 25)を明らかにし、ゲート操作によって基準点に対するゲート高さを調整することで水位を調整した。このように筒の設置角度ごとに実験流量5ケース、設定水位8ケースの合計40ケースで揚水量と回転数、水車直上、直下水位をそれぞれ測定した。なお、設定した流量と水位から、本実験での流速は約0.0~2.0m/sとなった。倉敷市祐安地区において灌漑期に測定した流速(電磁流速計により横断方向に3地点で、6割水深1点で測定した平均値)がおよそ0.8m/sであったことから、本実験ケースは現実性のある流速を再現できていると判断する。



※流速は2ヶ所の水位計の平均値を用いて計算した。

Fig. 25 本実験での水車未設置時のゲート高さ和水位、流速の関係

Relationship between gate height and water level and velocity of flow in this experiment

また、筒の設置角度は 25° ~ 55° まで 5° 刻みとし、各角度で上記の計測を行った。但し、流量とゲート高さの条件次第で、射流となる等の計測が困難な条件が発生したため、その場合は測定しなかった。

b) 確認実験

確認実験は、既報の実験条件と回転数を同条件にして、揚水量を比較する。具体的には既報の実験条件は、水車直径 1.2m で筒 (内径 55mm 長さ 680mm) を 8 つ設置し、筒の設置角度が 5° ~ 25° までの 5° 刻みで回転数は 3, 4, 5rpm の 3 ケースである。このように本研究とは、筒の寸法や水車の直径が異なるため、確認実験においては、実験水車や使用する筒の寸法は本実験と同等とし、周速度が既報

と類似する条件で測定できるようにした。その結果、実験流量は $0.185, 0.230, 0.275, 0.320\text{m}^3/\text{s}$ の 4 ケースで、水位は各流量で 4 点前後設定して、筒の設置角度が $5^{\circ}, 15^{\circ}, 25^{\circ}$ の 3 ケースで揚水量等を比較した。

3.3 本実験の結果

3.3.1 揚水水車設置による堰上げ水位と水路への影響

水車未設置時の水車直上側の水位計設置地点水位と水車設置後の水位との変動差 (以下堰上げ水位) を各設定流量別に見ると (Fig. 26), 流量が $0.32\text{m}^3/\text{s}$ 以下の堰上げ水位は概ね 20mm 前後であるが、流量が $0.41\text{m}^3/\text{s}$ の時は、水車未設置時の水位が 300~350mm の時に堰上げ水位が負の値に

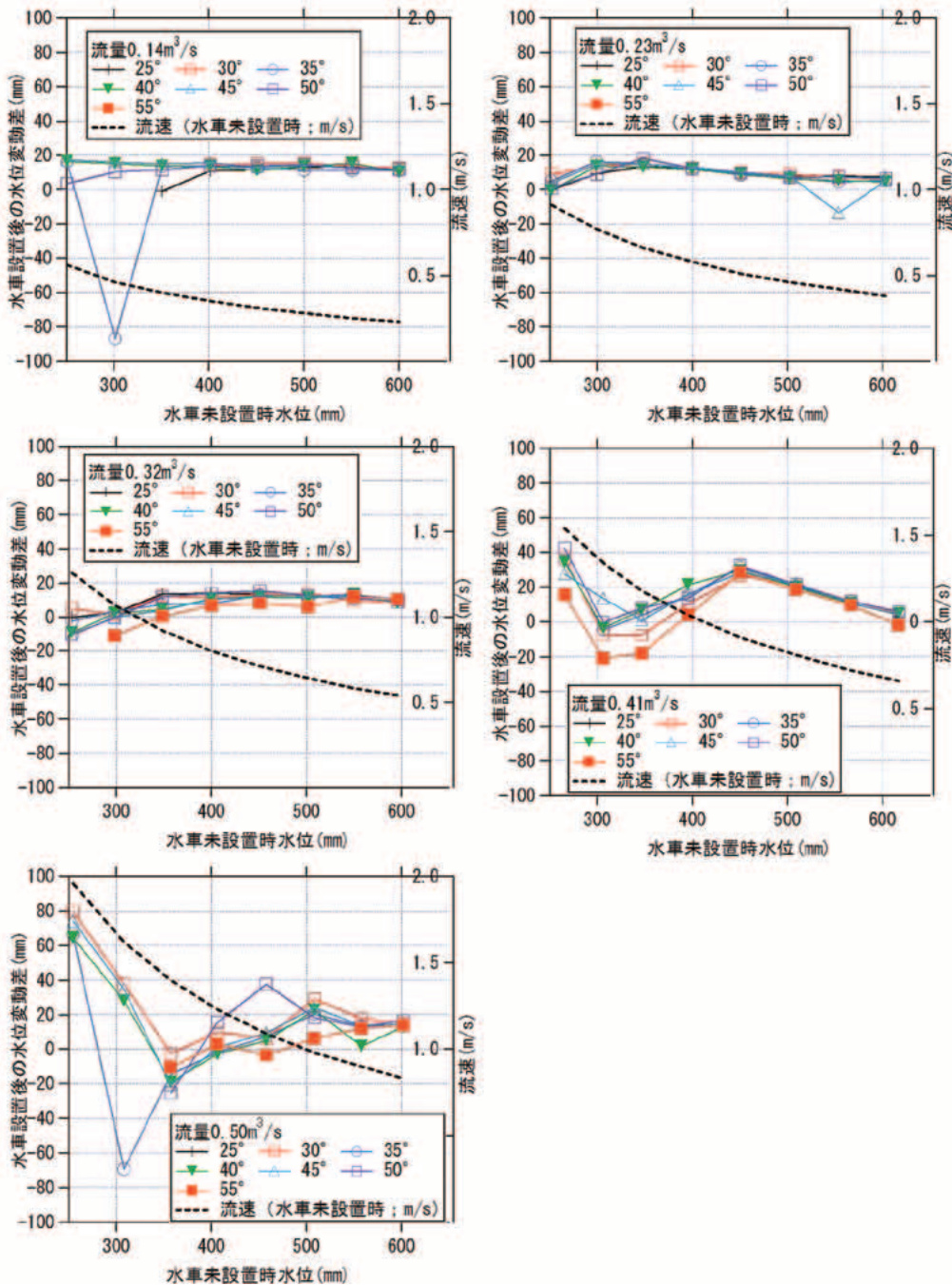


Fig. 26 水車の設置による上流側水位計設置点の水位変動差

Fluctuation of water level in water gauge position located upstream of model water wheel

なる傾向が見られた。0.50m³/s の時の堰上げ水位では、水車未設置時の水位が 350mm 前後の場合に、堰上げ水位がほぼ 0mm 前後になる傾向が見られ、その前後の水位における堰上げ水位も、他の流量と比べて筒の設置角度によって値が異なる傾向が見られた。また、流速が減少するほど、水位変動差は 0~20mm に収束した。

全体的に見ると、本実験条件における最大の堰上げ水位は流速 2.0m/s で水車未設置時水位が 250mm 前後（水没深 100mm 前後）の時に発生し、約 80mm であった。但しそれ以外のケースでの堰上げ水位は、概ね 20~30mm 以下であった。ここで開水路の余裕高は、土地改良事業計画設計基準「設計基準 水路工」（農林水産省，2001）より式（1）で計算される。

$$F_b = \alpha \cdot d + \beta \cdot \frac{v^2}{2g} + h_z \quad (1)$$

F_b ：余裕高 α ：粗度係数に関するパラメータ
 β ：流速水頭に関するパラメータ d ：設計水深
 v^2 ：流速 h_z ：水面動揺に関するパラメータ

本実験で用いた水路条件に即して、 $\alpha = 0.05$ $\beta = 0.5$ $h_z = 0.1$ とした場合、設計水深が 0.35m~0.55m まで 0.05m 刻みに変化した場合の余裕高（Fig. 27）を示す。ここで設計水深が 0.35m だと、揚水水車の水受板が高さ方向に半分水没し、0.55m で全面水没する。

流速や設計水深によって余裕高が異なるが、流速が 2.0m/s 以下で設計水深が 0.55m 以下の場合、最大で余裕高が約 0.23m 程度求められた。また、最も余裕高の条件が厳しいと考えられる流速が 0.0m/s かつ設計水深が 0.35m の場合の余裕高は 0.12m であった。よって、水車設置で最大 80mm 程度発生した堰上げ水位は、水車設置前の水路の余裕高の範囲内に収まると考えられる。但し後述するが、水車未設置時水位が 350mm より低い場合、揚水水車の揚水量が極端に減少するため、現実的に利用可能な条件は水車未設置時水位が 350mm 以上（水車板の水没深：200mm 以上）である。その場合は、水路の流速等の水路条件によって異なるが、堰上げ水位が概ね 20~30mm 以下である。よって、本実験条件のような水路では水車設置による水位変動は微小であり、本実験で用いた揚水水車を設置しても溢水の心

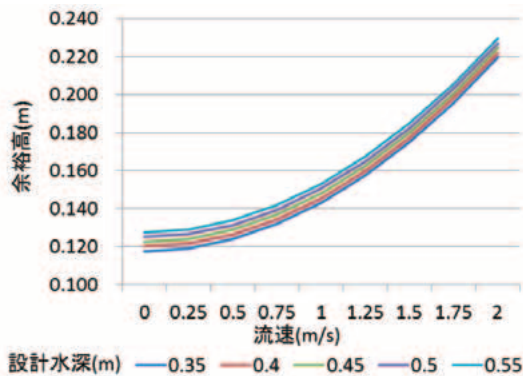


Fig. 27 本実験水路での設計水深ごとの水路の余裕高
 Allowance height of water channel by setting water level

配はないと考えられる。

3.3.2 揚水量

Fig. 28 に各実験ケースでの揚水量を示した。なお、Fig. 28 の横軸は水車水受板の水没深である。これを用いた理由は、水車の水受板に作用する流水の力の影響がわかりやすいためである。水没深に 150mm を加えると水車未設置時の水位となる。

揚水量は、水没深が浅いほど少なかった。これは水没深が浅いと筒に十分水が入る前に水面下から水面上に筒が移動するためと考えられた。また、流量が多い程揚水量が多くなる傾向が見られた。本実験で用いた揚水水車は、条件が良いと 7m³/h (1.94L/s) 程度揚水することが明らかになった。これは、日単位に換算すると、約 164m³/d である。同一水位で、揚水量が多い角度を見ると、流量が 0.14m³/s の場合は角度が 25°~40°である。0.23 m³/s, 0.32 m³/s, 0.41 m³/s の場合は 30°~45°での揚水量が多く、0.50 m³/s では、35°~50°であった。

但し、流量が多い時ほど、筒の設置角度間の揚水量の差が大きいことから、総合的には筒の設置角度は 35°~50°程度が適していると考えられる。この結果は、予備実験と同様であり妥当と考えられる。

3.3.3 揚水水車の回転数

実験条件別の揚水水車の回転数を見ると（Table 14）、流量が 0.14m³/s の時は、全てのケースで回転数が 1 rpm を超えなかった。流量が 0.23 m³/s 以上では、水位が高くなると回転数が小さくなる傾向が見られた。これは、同一流量で水位が高くなると流速が小さくなるため、水車の羽根板を押し力が弱くなったことが影響したと推察された。

3.3.4 揚水特性の検討

(1) 揚水効率

揚水効率は理論上の揚水量に対する実際の揚水量の割合と定義する。揚水効率 η_w は式（2）で計算できる。

$$\eta_w = Q_o / Q_c \quad (2)$$

Q_o ：実際の揚水量(m³/s) Q_c ：理論上の揚水量(m³/s)
 理論上の揚水量は、水車に設置される筒の容積と筒の数および回転数から計算される。具体的には式（3）で説明される。

$$Q_c = V \cdot n \cdot rpm \quad (3)$$

V ：筒の容積(m²) n ：筒の数 rpm ：回転数

本実験で用いた筒は、塩ビ管（VU75）で内径 83mm、長さ 400mm である。よって容積は 0.002163m³ (2.16L) となる。筒の数は 8 つである。よって水車が 1 回転することで理論上は 0.0173 m³ (17.30L) の揚水が行われる。よって揚水効率は

$$\eta_w = Q_o / (0.0173 \cdot rpm) \quad (4)$$

で計算できる。

本実験で得られた結果から揚水効率を算出し、Fig. 29 に示した。Fig. 28 の揚水量と Fig. 29 の揚水効率を見比べると、最も良好な性能を示す水没深は、揚水効率が揚水量よりやや深くなる傾向が示された。Fig. 28 と Fig. 29 では流量を一定条件にして水位を変動させるため、水位が高くなる

と流速が遅くなり、回転数も遅くなる。一方で水位が高くなると、筒はより長く水没するため十分に水が筒に入る。よって、筒一つあたりの揚水量で見ると効率が良くなったと推察された。但し、水位が高くなることは、水面と樋の距離が近くなることから実揚程は低くなる。

揚水効率は、Fig. 29 から最良で 75~80%程度得られた。

(2) 回転数と揚水量・揚水効率の関係

Fig. 30, Fig. 31 に水受板の推定水没深がおおよそ 200~400mm まで 50mm 刻みでの回転数と揚水量（左列）および揚水効率（右列）の関係を示した。

水没深が浅い 200mm では揚水量は、回転数が 6~10rpm の時で揚水量が最も多くなるものの 5m³/h 程度で他の水没深での揚水量と比べて少なかった。また総じて筒の角度は 35°~50° で良い性能が発揮された。揚水効率は最良で約 80%で、おおむね回転数が大きくなるにつれて減少する傾向が見られた。

水没深が 250~400mm では、回転数が 10rpm 以下では揚水量は回転数に比例して多く揚水する傾向が見られ、最大で 7m³/h 程度揚水された。一方揚水効率は回転数がおおよそ 3~8rpm で 70~80%得られた。筒の角度ではここでも 35°~50° で揚水量、揚水効率とも相対的に高い性能を発揮することが示された。

水没深によって回転数と揚水量、揚水効率の関係が異なった要因として、筒への水の入りやすさが挙げられる。筒は水車外周に設置されるため、水没深が浅すぎると筒に水が十分に入らず、揚水量や揚水効率が減少したと考えられた。また、本実験条件では最も水没深が浅い 200mm でしか確認できなかったが、回転数が多くても揚水量が減少した。これは、回転が速すぎるために筒に入っている水が樋に全て落水できなかったと推察される。このように、回転数は揚水量や揚水効率に大きく影響を与えるが、良好な性能を発揮する回転数は、ある一定の範囲にあることが明らかになった。

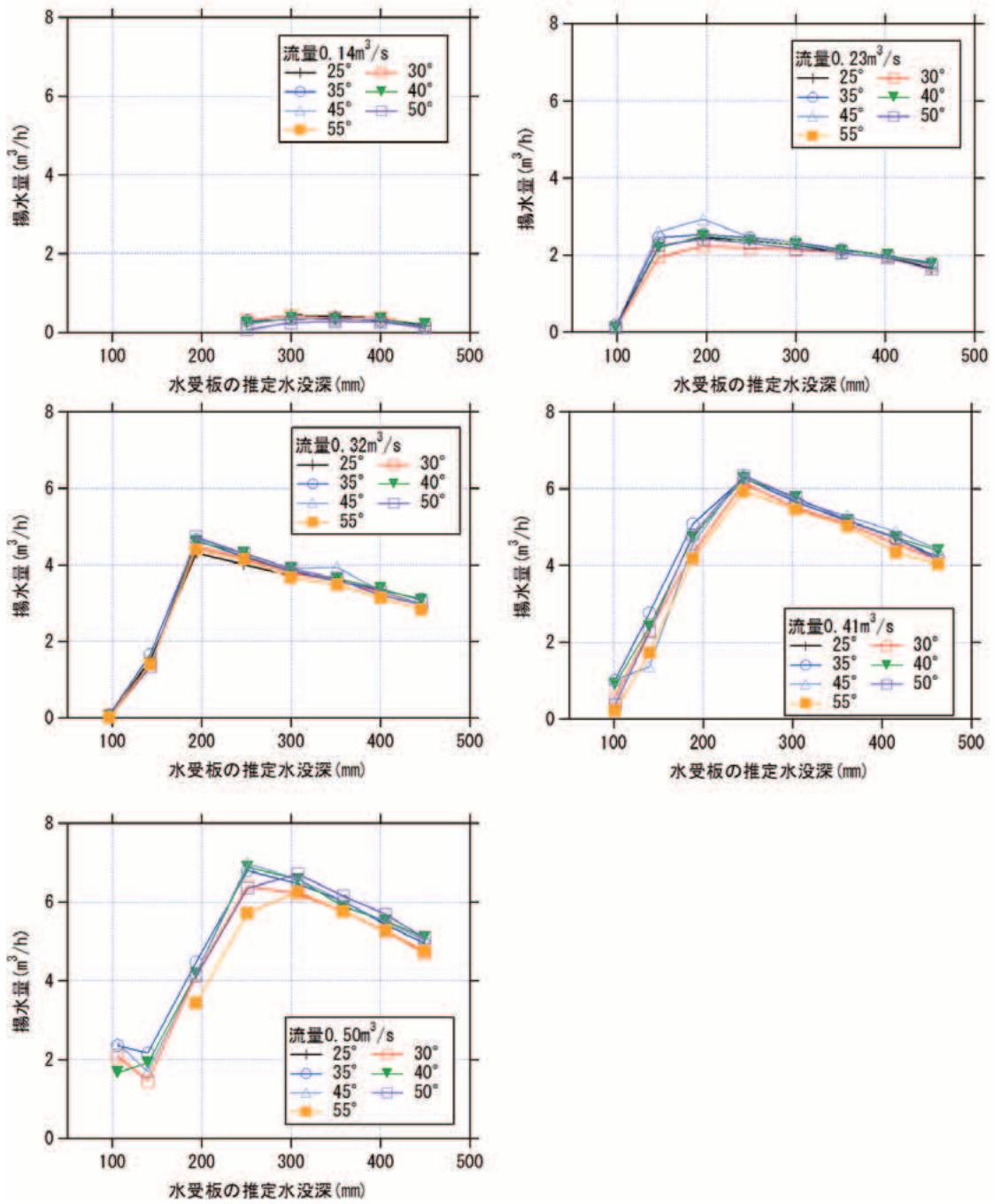


Fig. 28 実験条件（流量・ゲート位置）別の揚水量
Pumping discharge by experimental condition

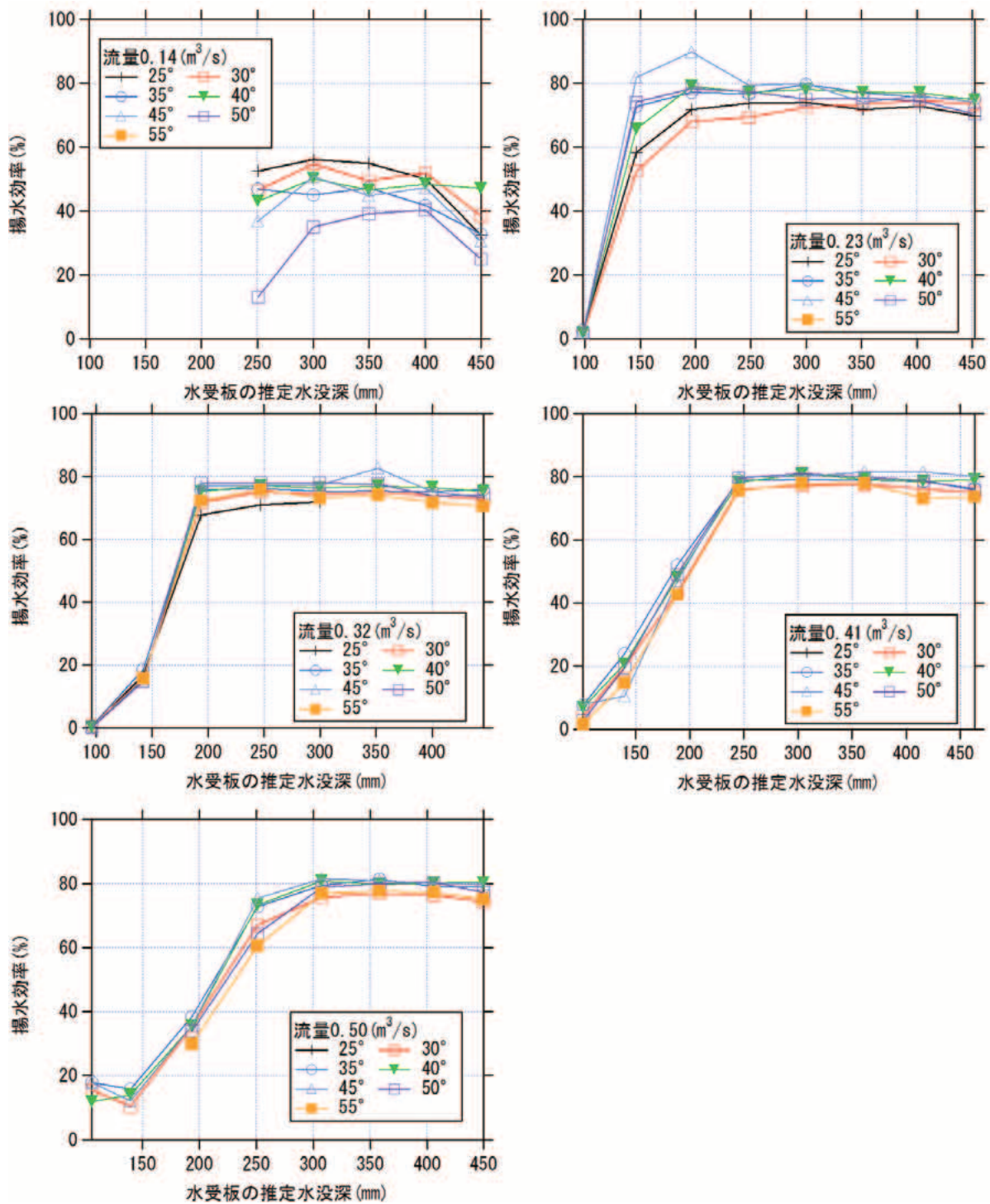


Fig. 29 実験条件 (流量・ゲート位置) 別の揚水効率
Pumping efficiency by experimental condition

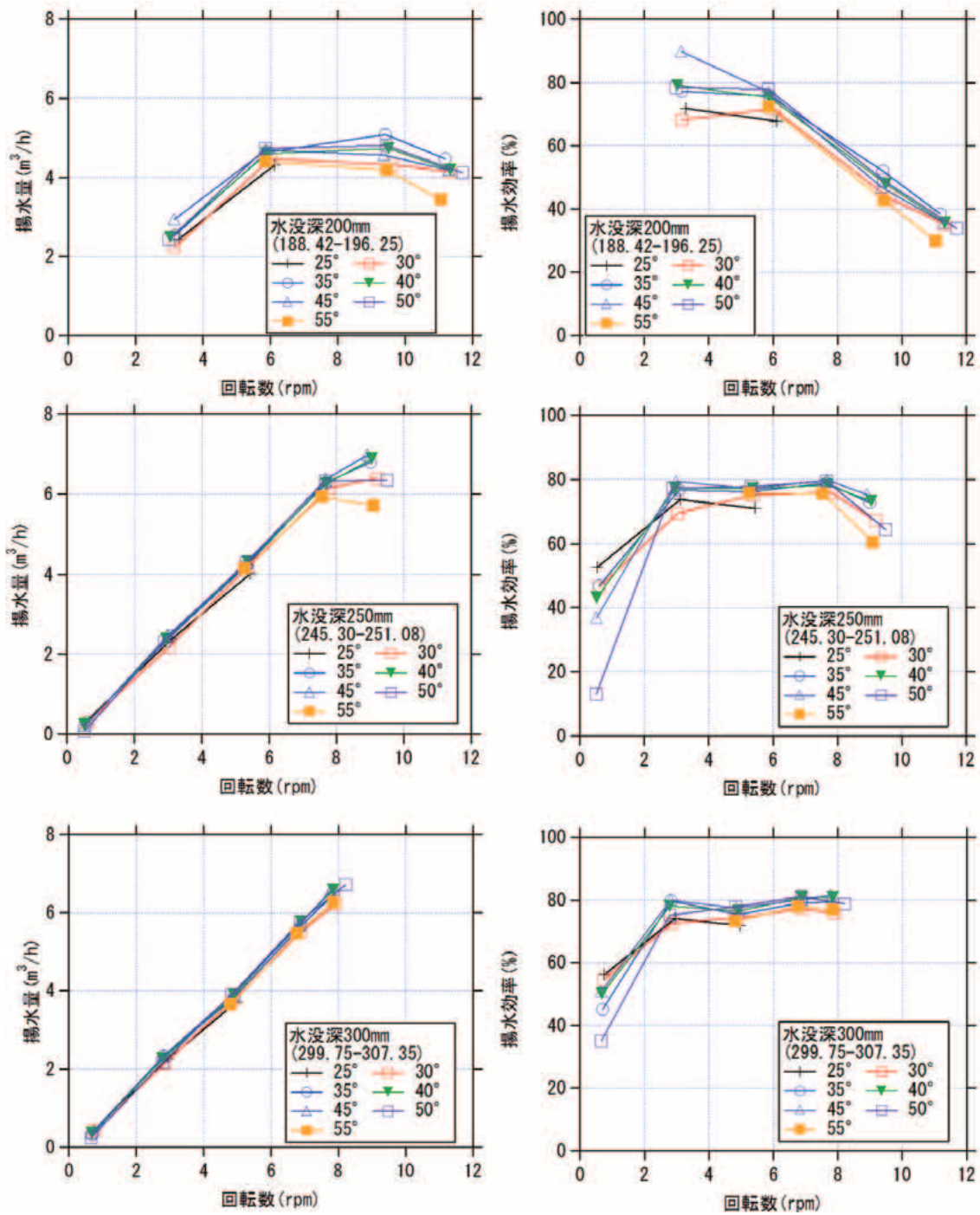


Fig. 30 回転数と揚水量・揚水効率の関係 (1)

Relationship between rotation number and pumping discharge and pumping efficiency

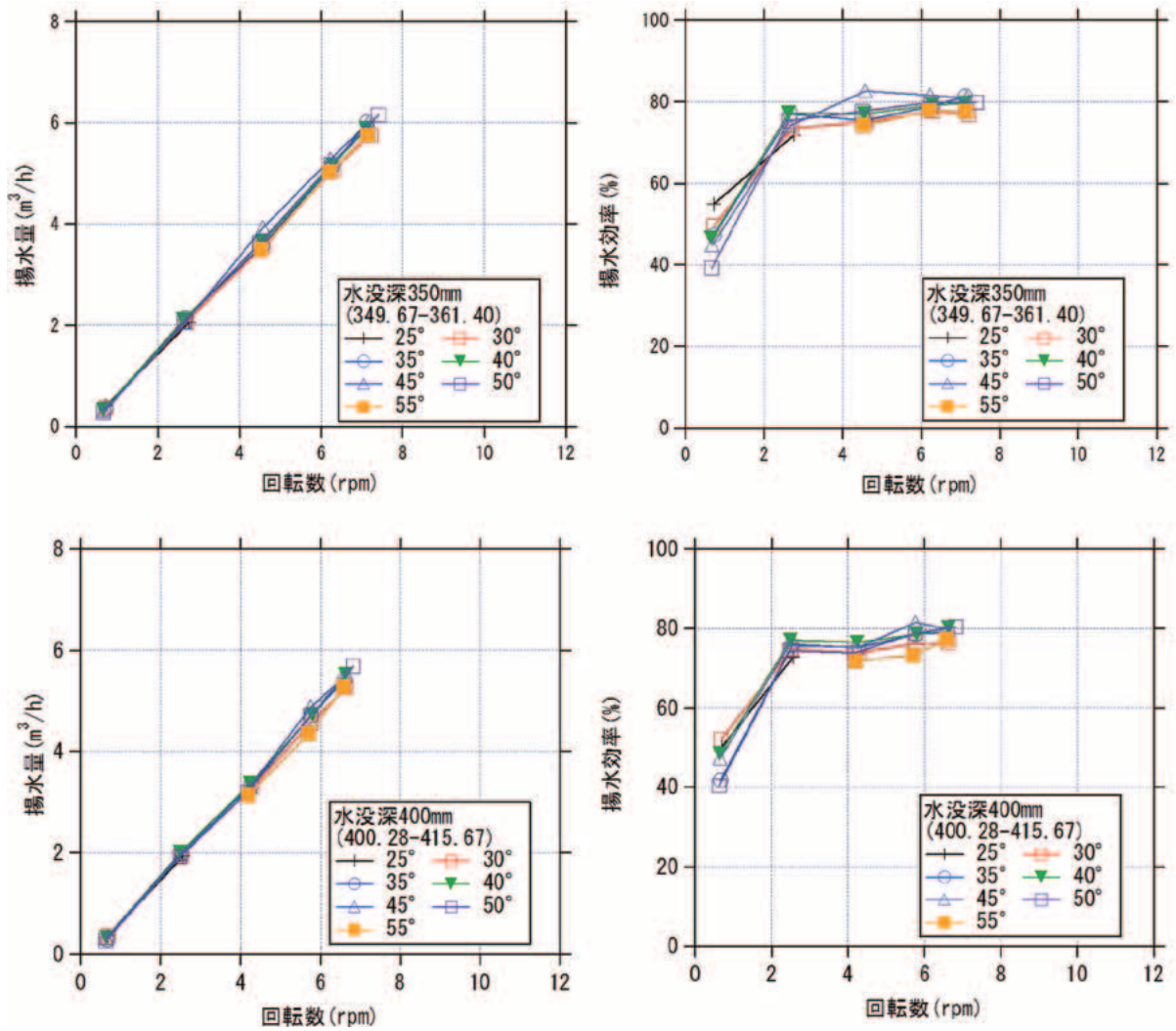


Fig. 31 回転数と揚水量・揚水効率の関係 (2)

Relationship between rotation number and pumping discharge and pumping efficiency

Table 14 実験条件（流量・ゲート位置）別の揚水水車の回転数

Rotation number by experimental condition

揚水水車（Vタイプ）設置最適角度と回転数(rpm)

流量 (m ³ /s)	ゲート位置 (mm)	水車未設置時水位 (mm)	推定 水没深:h (mm)	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	平均
0.14	47	249.69	99.69								
	97	300.29	150.29								
	146	349.88	199.88								
	196	400.49	250.49	0.527	0.603	0.592	0.523	0.517	0.505		0.545
	245	450.08	300.08	0.741	0.754	0.693	0.678	0.661	0.654		0.697
	294	499.67	349.67	0.726	0.728	0.726	0.662	0.681	0.664		0.698
	344	550.28	400.28	0.692	0.673	0.664	0.651	0.652	0.627		0.660
393	599.87	449.87	0.468	0.459	0.434	0.412	0.385	0.403		0.427	
流量 (m ³ /s)	ゲート位置 (mm)	水車未設置時水位 (mm)	推定 水没深:h (mm)	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	平均
0.23	-23	248.25	98.25	6.636	6.493	6.491	6.535	6.562	6.539		6.543
	26	296.39	146.39	3.699	3.579	3.239	3.215	3.060	2.915		3.285
	75	346.25	196.25	3.279	3.154	3.160	3.032	3.146	2.981		3.125
	125	398.26	248.26	3.114	3.027	3.074	2.959	2.986	2.881		3.007
	174	449.75	299.75	2.940	2.832	2.822	2.788	2.813	2.779		2.829
	223	501.12	351.12	2.756	2.695	2.681	2.631	2.661	2.638		2.677
	273	552.82	402.82	2.566	2.518	2.532	2.500	2.483	2.486		2.514
322	602.15	452.15	2.282	2.272	2.300	2.259	2.261	2.239		2.269	
流量 (m ³ /s)	ゲート位置 (mm)	水車未設置時水位 (mm)	推定 水没深:h (mm)	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	平均
0.32	-100	246.30	96.30	10.655	10.255	10.580	10.612	10.618	10.718		10.573
	-42	292.15	142.15	8.646	8.659	8.502	8.627	8.636	8.668	8.502	8.606
	15	343.76	193.76	6.122	6.005	5.899	5.886	5.874	5.854	5.865	5.929
	69	397.03	247.03	5.440	5.360	5.329	5.377	5.353	5.312	5.265	5.348
	120	449.86	299.86	4.966	4.914	4.912	4.905	4.861	4.831	4.806	4.885
	169	501.70	351.70		4.588	4.568	4.557	4.585	4.495	4.525	4.553
	215	550.32	400.32		4.296	4.278	4.244	4.245	4.176	4.200	4.240
259	595.89	445.89		3.929	3.937	3.926	3.920	3.856	3.864	3.905	
流量 (m ³ /s)	ゲート位置 (mm)	水車未設置時水位 (mm)	推定 水没深:h (mm)	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	平均
0.41	-174	251.57	101.57		12.889	12.736	12.755	12.597	13.092	12.661	12.788
	-104	289.81	139.81		11.302	11.107	11.184	12.407	11.225	11.293	11.420
	-39	338.42	188.42		9.620	9.413	9.510	9.371	9.437	9.455	9.468
	23	395.30	245.30		7.786	7.671	7.702	7.687	7.668	7.557	7.678
	79	453.60	303.60		6.870	6.879	6.889	6.848	6.859	6.761	6.851
	131	511.40	361.40		6.303	6.301	6.295	6.234	6.246	6.209	6.265
	179	565.67	415.67		5.767	5.768	5.804	5.769	5.756	5.707	5.762
222	613.01	463.01		5.330	5.327	5.333	5.306	5.267	5.268	5.305	
流量 (m ³ /s)	ゲート位置 (mm)	水車未設置時水位 (mm)	推定 水没深:h (mm)	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	平均
0.50	-203	255.69	105.69		12.928	12.696	13.523	13.026			13.043
	-132	289.50	139.50		13.483	13.187	13.098	13.381			13.287
	-65	343.45	193.45		11.314	11.194	11.349	11.310	11.712	11.066	11.324
	-4	401.08	251.08		9.187	9.006	9.055	8.926	9.504	9.110	9.131
	53	457.35	307.35		7.921	7.852	7.850	7.785	8.215	7.850	7.912
	104	508.21	358.21		7.212	7.128	7.118	7.168	7.411	7.151	7.198
	151	555.90	405.90		6.635	6.608	6.638	6.614	6.824	6.589	6.651
192	599.41	449.41		6.117	6.054	6.122	6.090	6.341	6.094	6.136	

3.3.5 エネルギー利用特性の検討

揚水水車は、水路に賦存するエネルギーを利用して揚水を行う。ここでは、揚水水車のエネルギー利用特性を検討する。Fig. 32のように水路に揚水水車が設置され、揚水をする場合、揚水水車の仕事率は式(5)で計算できる。

$$P_w = \rho \cdot g \cdot Q_u \cdot h_u \quad (W) \quad (5)$$

ρ : 水の密度($1000(\text{kg}/\text{m}^3)$) Q_u : 揚水量(m^3/s)
 g : 重力加速度(m/s^2) h_u : 実揚程(m)

断面 I-II間のエネルギー収支は式(6)となる。

$$H_1 = H_2 + h_a \quad (6)$$

H_1, H_2 : 各断面の全水頭(m) h_a : 損失水頭(m)
 各断面の全水頭は式(7), (8)で計算できる。

$$H_1 = h_1 + z_1 + v_1^2/2g \quad (7)$$

$$H_2 = h_2 + z_s + v_2^2/2g \quad (8)$$

h : 水深(m) v : 流速(m/s) g : 重力加速度(m/s^2)

z : 水路床高(m) H_a : 全水頭差(m)

断面 I-II間の損失水頭は、摩擦損失水頭 h_f と揚水水車による揚水に利用したエネルギーに関する損失水頭 h_w で説明できる。よって、揚水水車の稼働に用いたエネルギー量は式(9)で計算できる。

$$h_w = H_1 - (H_2 + h_f) \quad (9)$$

摩擦損失水頭はダルシーワイズバッハ式を用いて式(10)で計算できる。

$$h_f = f \cdot l \cdot \frac{(B+2h)}{Bh} \cdot \frac{(Bhv)^2}{2gB^2h^2} \quad (10)$$

l : 断面間の距離 B : 水路幅(m) h : 水深(m)

f : 摩擦損失係数

摩擦損失係数は式(11)で計算される。

$$f = \frac{64}{Re} \quad (11)$$

レイノルズ数(Re)は式(12)で計算される。

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (12)$$

水の動粘性係数 ν は水温で決定される。本実験での水温は $5^\circ\text{C} \sim 14^\circ\text{C}$ であったので、動粘性係数は $0.00117 \sim 0.00152$ となった。

ここで揚水水車のエネルギー利用効率 η_w は、断面間で失

われたエネルギーのうち摩擦損失を除いた量(以下断面間損失エネルギー量と表記)に対する、揚水に用いたエネルギー量の割合となり、式(13)で計算できる。

$$\eta_w = \frac{P_w}{\rho \cdot g \cdot h_w \cdot Q} \quad (13)$$

Fig. 33, Fig. 34に水没深がおよそ $200 \sim 400\text{mm}$ まで 50mm 刻みでのエネルギーに関する損失水頭と揚水に伴うエネルギー使用量(仕事率)およびエネルギー利用効率の関係を示す。

ただし、水車を設置することで堰上げが発生するため、水車上流側の断面 I が下流側断面 II より高くなるが、流量と水位の条件次第で断面 II の水位が断面 I より高くなる場合も発生した。これは、特に設定流量が $0.5\text{m}^3/\text{s}$ で多く発生したため、設定流量が $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 以外では堰上げ水位がマイナスになった測定値を、設定流量が $0.5\text{m}^3/\text{s}$ では全ての測定値を除外して解析を行った。

その結果、水没深が 250mm の時に揚水に伴うエネルギー使用量が最も大きく、最大で約 $18 \sim 19\text{W}$ となり、エネルギー利用効率も断面間損失エネルギー量の増加に伴い増加し、最大で約 60% であった。このときの回転数は概ね 9rpm であった。水没深が 300mm 以上になると断面間損失エネルギー量の増加に伴いエネルギー使用量やエネルギー利用効率は増加し、エネルギー使用量は概ね 15W 以下、エネルギー利用効率は概ね 30% 以下を示した。水没深 200mm は、筒に十分な水が入らないことから揚水量が相対的に少なく、エネルギー使用量は 15W 以下、エネルギー利用効率は $20 \sim 50\%$ の間で、断面間損失エネルギー量とエネルギー利用効率の間に関連性は見られなかった。

エネルギー使用量は、揚水量と揚程に規定されるため、水没深が浅い(揚程が高い)ほど、エネルギー使用量が大きくなるが、水没深が約 200mm 以下になると、揚水量が少なくなるため逆にエネルギー使用量が減少した。そのため、揚水効率や揚水量等の性能が良好でかつ揚程も高い、水没深 250mm で最もエネルギー使用量が大きくなったと推察される。

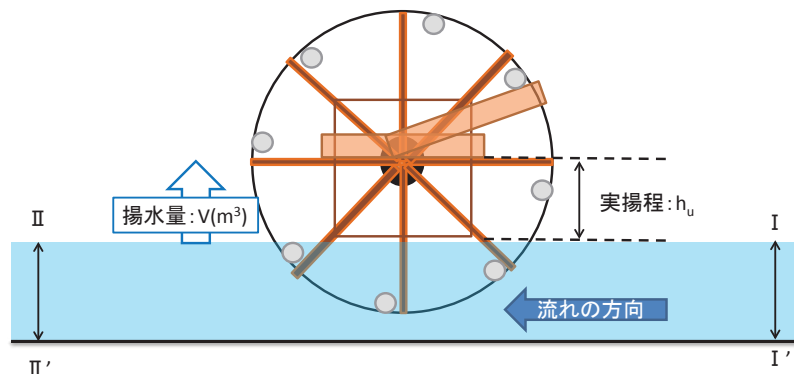


Fig. 32 揚水水車が利用するエネルギー
 Image of the energy used by IW

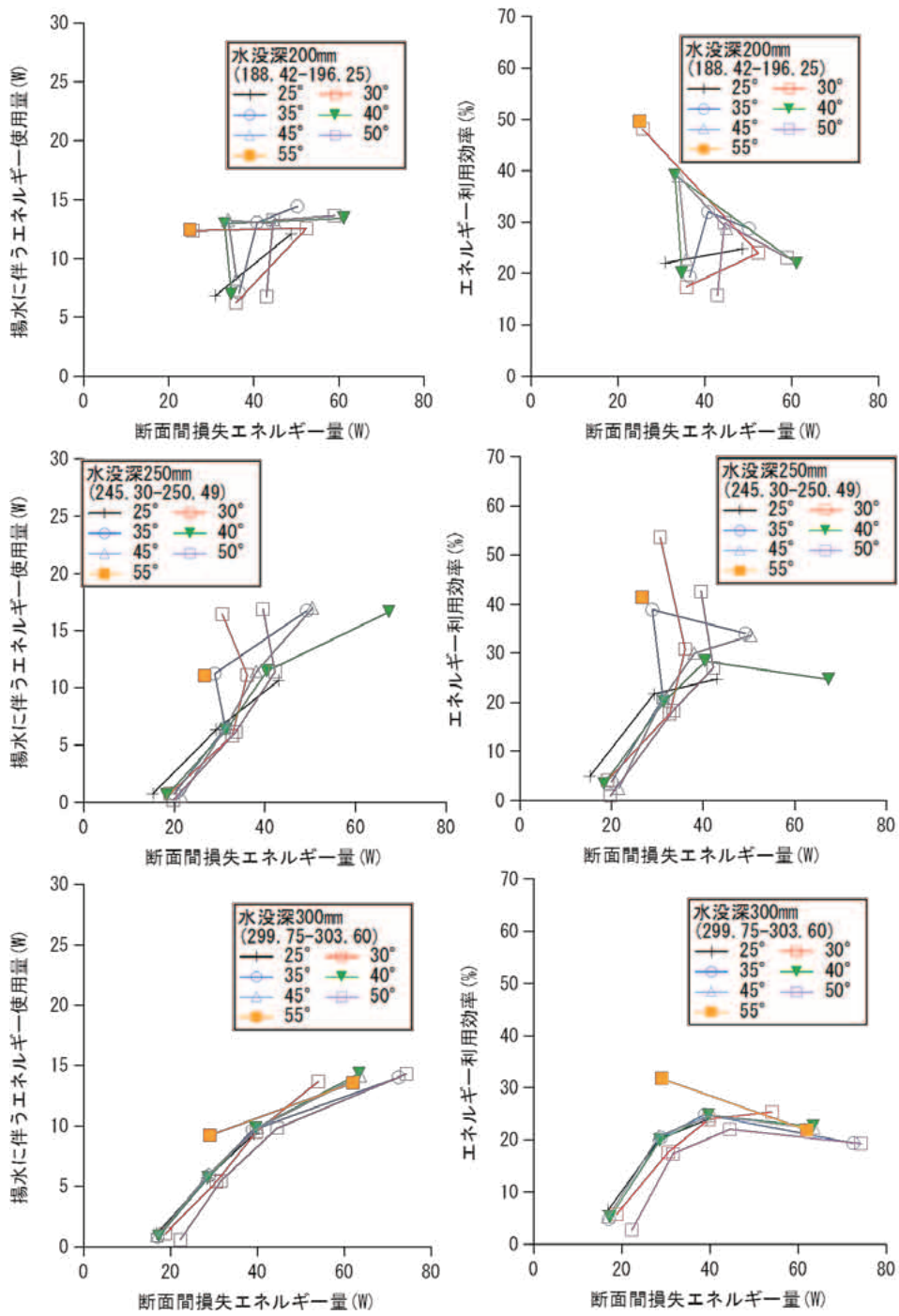


Fig. 33 エネルギーに関する損失水頭と仕事率およびエネルギー利用効率の関係 (1)

Relationship between head loss and power and efficiency of energy use

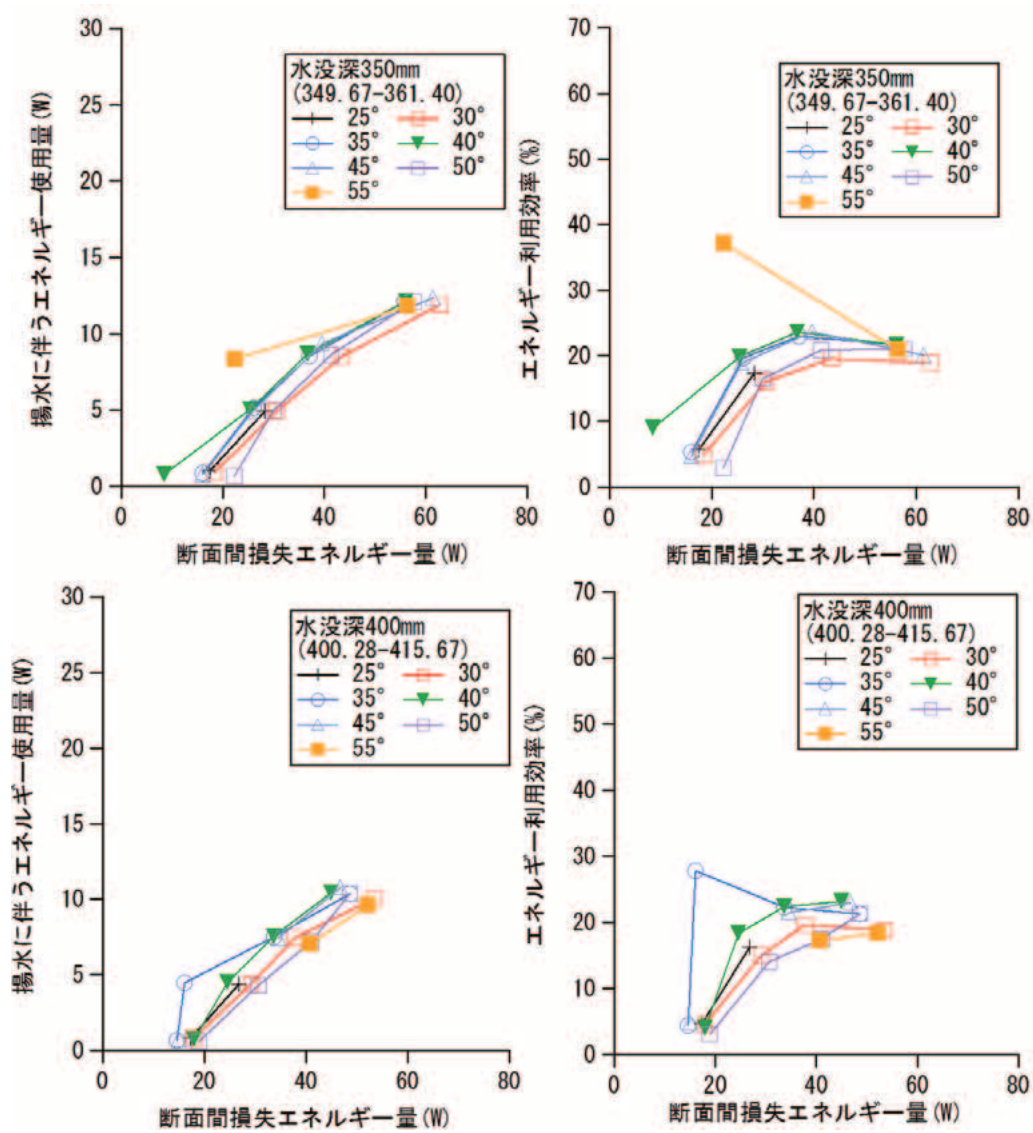


Fig. 34 エネルギーに関する損失水頭と仕事率およびエネルギー利用効率の関係 (2)

Relationship between head loss and power and efficiency of energy use

3.4 確認実験の結果と分析

既報(越智ら, 1986)では, 本研究と同様の筒の付け方をした揚水水車の性能評価を行い, 筒の設置角度が15°が最も効率がよいと結論づけた。しかし, 本研究では流速や水位で傾向が異なるものの, 35°~50°の時に揚水量や揚水効率が最も良くなるが多かった。既報と本研究では, 水車の直径と筒の寸法が異なる。具体的には, 本研究では, 直径はわが国で利用が多い2.0mを, 筒は倉敷市祐安地区で利用される内径83mm長さ400mmを使用した。既報で用いた揚水水車の直径は1.2m, 筒は内径55mm, 長さ680mmである。さらに既報は, 回転数を3~5rpmに限定して実験を行っている。そこで, 本研究においても, 既報の回転数で発生する周速度と同程度の周速度(本実験では回転数が1.8~3.0で同程度の周速度となる)になる水位における揚水量と揚水効率を, 筒の角度が5°, 15°, 25°で測定した。

Table 15に結果を示す。本実験条件において角度が25°以下の実験結果は, 25°以上の実験結果より揚水量, 揚水効率とも劣った。よって, 本実験条件では既報の結果と異なることが明らかになった。ここで, 水没深250mmにおける本実験と確認実験を併せた回転数と揚水量, 揚水効率の関係(Fig. 35)を見ても, 筒の角度が5°や15°は35°~50°の性能に比べて決して良いとは言えないことが確認できる。

但し, 確認実験では, 内径が83mmで長さ400mmの筒を用いた場合は, 設置角度が25°以下での揚水性能が35°~50°より相対的に劣ったことは明らかにしたが, 既報で用いた内径55mmで長さが680mmの筒を用いた場合の揚水特性は明らかにしていない。既報で用いた筒は, 本実験で用いた筒より細長いものである。筒の寸法の違いが揚水特性に及ぼす影響の解明は, 今後の課題である。

Table 15 確認実験での揚水量と揚水効率

Pumping discharge and pumping efficiency in 'confirmation experiment'

流量 (m³/s)	水車未設置時水位 (mm)	推定水没深 (mm)	ゲート位置 (mm)	回転数(rpm)			揚水量(m³/h)			揚水効率		
				5°	15°	25°	5°	15°	25°	5°	15°	25°
0.185			140	2.780	2.166	1.913	0.338	1.202	1.398	11.70%	55.92%	70.41%
			195	2.552	2.071	1.838	0.241	1.098	1.277	9.10%	53.07%	66.90%
			225	2.457	1.992	1.785	0.203	1.049	1.281	7.94%	53.23%	69.14%
			273	2.308	1.898	1.713	0.150	1.018	1.189	6.27%	52.61%	66.87%
			310	2.200	1.864	1.612	0.115	1.168	1.086	5.04%	51.92%	64.88%
0.23			8	5.136	4.869	4.911	0.730	1.403	1.341	13.70%	27.76%	26.30%
			40	4.386	3.701	3.349	0.858	2.218	2.440	18.84%	57.72%	70.18%
			80	4.122	3.461	3.238	0.792	2.126	2.479	18.51%	59.17%	73.72%
			128	3.832	3.293	3.097	0.690	2.070	2.394	17.33%	60.55%	74.44%
			322	2.740	2.460	2.287	0.309	1.452	1.665	10.86%	56.83%	70.13%
0.275			0	6.186	5.735	5.562	1.137	2.833	2.714	17.69%	47.57%	47.00%
			52	5.336	4.812	4.608	1.191	3.175	3.192	21.50%	63.55%	66.71%
			97	4.873	4.437	4.227	1.084	2.868	2.998	21.42%	62.25%	68.30%
			233	3.894	3.620	3.453	0.743	2.371	2.768	18.39%	63.08%	77.21%
0.32			70	5.568	5.133	5.391	1.353	3.392	3.990	23.40%	63.65%	71.28%
			107	5.172	4.758	5.027	1.225	3.245	3.651	22.81%	65.68%	69.96%
			150	4.753	4.469	4.712	1.118	2.986	3.457	22.66%	64.35%	70.65%
			228	4.202	3.979	4.241	0.915	2.616	3.027	20.98%	63.33%	68.75%

網掛け文字 は各ゲート位置での最も揚水量が多かった条件
 赤字 は各角度で最も揚水量が多かった条件
 水色字 は各角度で最も高い揚水効率

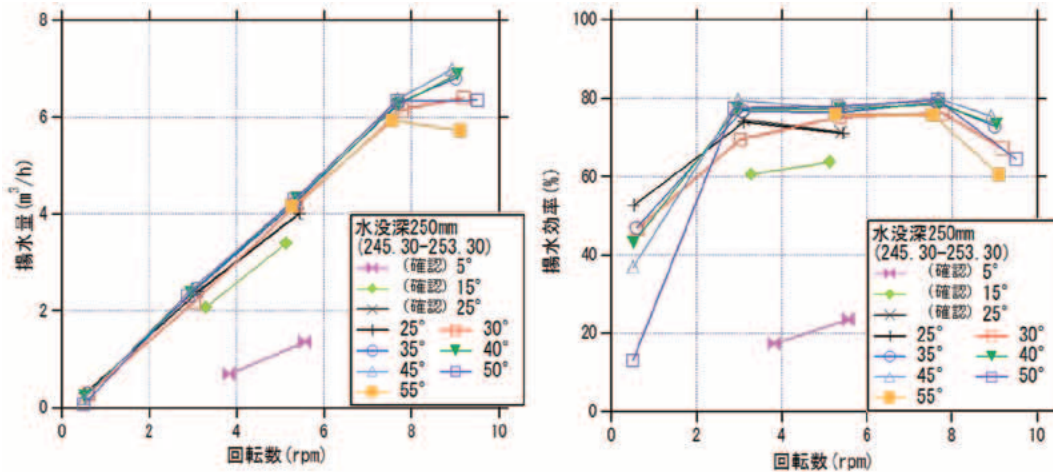


Fig. 35 水没深約250mmでの揚水量・揚水効率の変化

Difference of pumping discharge and pumping efficiency at 250 mm in submerging depth

3.5 揚水水車の特性と本来的な機能の発揮で得られる価値(考察)

岡山県倉敷市祐安地区で利用される揚水水車をモデルにした水車を利用した本実験の結果、揚水水車の特性や、本来的な機能の発揮で得られる価値として以下のことが明らかになった。

3.5.1 揚水水車設置による水路への影響

水路幅 1m の水路に、倉敷市祐安地区で多用される、直径 2.0m 横幅 0.8m の揚水水車を設置すると、最大で 80mm の堰上げが生じた。但し、ほとんどの場合の堰上げ水位は 20~30mm 程度であった。堰上げ水位が大きくなる条件は、流速が約 2.0m/s 以上で水没深が 100mm より浅い場合であり、この場合の回転数は 10rpm を超える。直径 2.0m クラスで回転数が 10rpm を超える揚水水車は、1980 年前後以降ではわが国では存廃に拘わらず、利用実績はない。また、水没深が 200mm 以下だと、筒に水が十分に入らないため揚水量がほとんど得られない。そのため、現実的に利用実績があり、揚水量や揚水効率等の性能も良好な水没深 250mm 以上での揚水水車設置を念頭におくと、水車設置による水路への影響は、20~30mm 前後の堰上げの発生と推察される。

3.5.2 揚水水車の揚水特性

(1) 筒の設置角度

本実験で用いた、筒を外周のワイヤー等に吊してくみ上げる場合、その設置角度によって揚水量や揚水効率が異なることが明らかになった。具体的には、筒の設置角度は、水車の水受板(幅 800mm×深さ 400mm)の水没深が 250mm 以上であれば、その深さに拘わらず、揚水量、揚水効率とも 35°~50° の性能が、それ以外の角度に比べてやや優れる傾向があり、これらの角度間では本実験で設定した条件では性能に大差がなかった。つまり、筒の設置角度によって揚水性能に差が発生する特性を有することが明らかになった。

(2) 揚水量と揚水効率

揚水量や揚水効率は、回転数と水没深で規定された。具体的には高さ 400mm の水受板が水車軸と垂直方向で 250mm 以上水没すれば、回転数が 8rpm 以下では揚水量と回転数は比例関係になり、およそ 3~8rpm では揚水効率も 75%前後と最も良い性能を示した。例えば、水受板が全て水没する水没深 400mm の場合、筒の設置角度 45° で回転数が約 2.5rpm で揚水量は約 2m³/h (揚水効率約 76%)、約 4.2rpm で約 3.3m³/h (約 75%)、約 5.8rpm で約 4.9m³/h (約 82%)、約 6.6rpm で約 5.5m³/h (約 80%) であった。但し、水受板が 250mm 以上水没しても回転数が 2~3rpm 以下では揚水効率が悪くなった。また、回転数が 8rpm 以上でも揚水量や揚水効率の性能が落ちる傾向が見られた。これは周速度が速くなりすぎて筒に入っている水が全て桶に落とすことができなくなったものと推察された。つまり、回転数の増加によって揚水量も増加するが、回転数が多すぎると揚水量は減少に転じる特性を有する。

また、水受板の水没深が水車軸と垂直方向に 200mm 程度

の場合は、回転数が 4~6rpm で筒の設置角度が 35~50° で揚水効率が 75%程度得られるが、揚水量は最大でも約 5m³/h であった。例えば筒の設置角度が 45° の場合で水没深が、水受板が半分水没する 200mm だと、回転数が約 3.1rpm で揚水量は約 2.9m³/h (揚水効率約 90%)、約 5.9rpm で約 4.7m³/h (約 77%)、約 9.4rpm で約 4.6m³/h (約 47%)、約 11.3rpm で約 4.2m³/h (約 36%) であった。これは、水没深が浅いと水車の外周に取り付けた筒に水が十分に満たされる前にくみ上げられるため、水受板が全て水没するケースに比べて揚水量が少なくなることを示す。つまり、水車の水受板の水没深の最大値が浅いと揚程は得られるが、浅すぎると筒に水が十分に入らず揚水量や揚水効率が低下するといった特性を有する。

以上の結果から、水車の水受板がある程度水没しないと良好な揚水性能を得られないことや、一定の範囲以外の回転数の時の揚水性能は相対的に悪化する、といった揚水特性が明らかになった。本実験条件においては、水没深が 250mm 以上でないと揚水水車の性能が十分に発揮されないことが明らかになった。また、水没深が 250mm 以上の場合は、回転数が 3~8rpm であれば、揚水効率も 75%程度得られ、揚水水車が有する性能を有効に利用できることが明らかになった。

(3) 揚程

水受板の水没深は実揚程に影響を及ぼす。実揚程は水面から桶までの距離であり、最も水没している時の水受板の水没していない高さ(400mmと水没深の差)に 830mm を足した値となる。よって本実験で用いた条件では、実揚程は 0.83~1.03m となる。但し、桶の位置の上下で実揚程を変化させることは可能である。本実験条件は、水車軸直上に桶を設置しており、これより低くすることは軸受けと桶の位置関係もあり設置が煩雑になる。また、本実験で採用する水車軸直上に桶を設置する方法は、現在揚水水車を利用している地点においても多くで採用されているため、設置方法としては問題ないと考えられる。また、桶を高くすると実揚程は高くなるが、くみ上げた水を桶に落とす時間が相対的に短くなるため、揚水量と揚水効率は低下すると考えられる。

3.5.3 揚水水車のエネルギー利用特性

本実験条件での揚水に伴うエネルギー使用量の最大値は、水没深 250mm で約 18~19W であり、約 6.8 m³/h の水量を約 1m 揚水した。このときの流速は 1.25m/s であった。水没深がこれより浅いと揚水量が減り、深いと実揚程が低くなるため、エネルギー使用量が減少する。

揚水量や揚水効率等の揚水性能が良好な水没深が 250mm 以上の場合、エネルギー使用量が概ね 15W 以下で利用効率も幅はあるものの概ね 30%程度であった。

このように、揚水水車は家庭用の電球を点灯させるために必要な電力量より少ないエネルギー量で揚水されることが明らかになった。つまり、一般家庭への電力が供給できるほどのエネルギーが賦存せず、一般的に小水力発電施設の設置技術が確立していない緩勾配水路においても、揚水

水車は、そこに賦存する地域資源である微少なエネルギーを利用して揚水できる価値を有することが明らかになった。

3.5.4 揚水水車による灌漑可能水田

本実験で用いた揚水水車を利用すると、どの程度の水田への灌漑が可能か試算する。導入可能水田に関する考察は、測定結果から流速が 1.5m/s 以下の用水路（水路幅 1.0m）に本実験で用いた揚水水車を導入する条件で行う。

設定した揚程は 0.83, 0.88, 0.93, 0.98, 1.03m である。筒の設置角度を、揚水量や揚水効率が相対的に良かった 35° ~ 50° を代表して 45° の値を用いた場合の、水路の流速と揚水量の関係は Fig. 36 のようになる。水路の流速が速くなるほど揚水量も増える傾向にあるが、実揚程 1.03m では流速 0.9m/s 付近をピークに減少に転じた。

ここで、水田への灌漑を想定して必要揚水量と水田面積の関係を検討する。Fig. 37 に圃場単位揚水量ごとに必要水量と水田面積の関係を示す。Fig. 36 と Fig. 37 から、複数の実揚程と流速の関係が明らかになった流速 1.0m/s 以下においては、実揚程が低いほど揚水量が相対的に多くなった。例えば、水路の流速が 0.8m/s の場合、実揚程が 0.83m では 5m³/h 強で、実揚程が 0.98m で約 4.2m³/h であった。この程

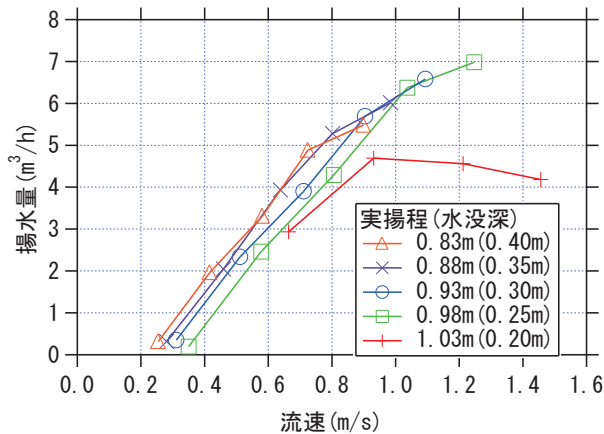


Fig. 36 流速と揚水量の関係 (筒の設置角度 45°)
Relationship between velocity of flow and pumping discharge

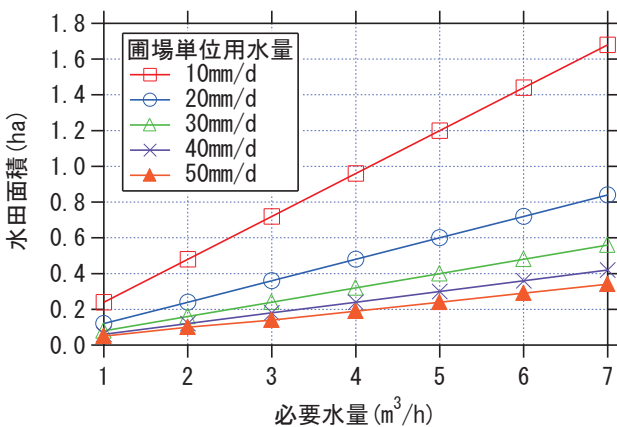


Fig. 37 必要水量と水田面積

Relationship between necessity water requirement and paddy area

度の揚水量が得られた場合、圃場単位揚水量が 20mm/d だと 0.5~0.6ha, 50mm/d だと 0.2ha 程度の水田への灌漑が可能と推察される。Fig. 36 および Fig. 37 より、最も良い性能が得られる条件を見ると、水路の流速が 1.25m/s で実揚程が 0.98m の場合に約 6.8m³/h の揚水量が得られた。これは圃場単位用水量次第だが、圃場整備による大区画化が行われていない水田で特に 0.5~0.6ha 以下の水田に対しては、揚水水車 1 基で必要な水量を揚水することが可能な性能を有すると考えられる。

3.5.5 倉敷市祐安地区で利用される揚水水車の性能評価

ここでは、実際に灌漑目的で揚水に利用される揚水水車の性能評価から、本来的な機能を発揮することで得られる価値を具体的に明らかにする。対象とする揚水水車は、本実験で用いた水車のモデルである、岡山県倉敷市祐安地区で利用されるものとした。

倉敷市祐安地区は、揚水水車が 20 基灌漑目的で利用される地区である。祐安地区には幹線用水路の番水川用水と支線用水路の上井手川用水の 2 本の用水路があり、両方で揚水水車が利用される。水路幅は、番水川用水は約 4.0m で上井手川用水は 2.3~2.5m である。本実験条件に近い上井手川用水で利用される揚水水車は 7 基で直径が 2.0m のものは 1 基である。よってその揚水水車を事例に性能評価を行う。

事例揚水水車の受益水田面積は 0.1ha で回転数は 4.7rpm (2008 年 8 月 23 日に計測) であった。水車や筒の形状は本実験で用いたものとはほぼ同様である。水没深は概ね 400mm (最大で水受板が全面的に水没) である。電磁流速計で水路の中心の 6 割水深で流速を測定したところ、概ね 0.7m/s であった。筒の設置角度は不明であるが、本実験の結果から性能が良かった 35~50° であると仮定する。

本実験において水没深が約 400mm で回転数が 4.7rpm に近い条件での計測点を見ると、流量が 320L/s の場合であった。その場合の測定値を見ると、回転数が約 4.3rpm で揚水量が約 0.92L/s (約 77.8m³/d), 揚水効率は約 75% であった。また、仕事率は 7.5W 前後でエネルギー利用効率は 22% 前後であった。この揚水水車は 0.1ha の水田に灌漑をしているため、単位面積あたりの日揚水量は約 78mm である。聞き取り調査から祐安地区の水田の多くは漏水田であるとの回答を得ていることから、具体的な減水深は不明であるが、日揚水量 78mm は現実性があると考えられる。よって、模型実験から評価された揚水量やエネルギー利用量は妥当であると判断できる。

倉敷市祐安地区で利用される揚水水車を事例に、揚水水車が揚水という機能を発揮することで得られる価値を検討する。まず、祐安地区のように単位面積あたりで多くの揚水量が必要な場合は、農業者にとって電気代等が不要な揚水水車の利用は、運用費節減という価値を得ることができる。また、緩勾配水路は落差に乏しいためエネルギー賦存量は少ないことが一般的である。しかし、揚水水車は微少なエネルギー量 (家庭用の蛍光灯の使用エネルギー量と同程度かそれ以下) で稼働可能なので、緩勾配水路においても利用可能であることが定量的に明らかになった。

つまり揚水水車の本来的な機能の発現で得られる価値は、農業用水路（特に緩勾配水路）が賦存する微少なエネルギーを活用できることや電気代等の運用費の削減であることが明らかになった。また、流水エネルギーを活用する機構は、近年の温室効果ガス削減に対する要求にも応える価値であると推察する。

3.5.6 新規で揚水水車を灌漑目的で利用する上での留意点

本実験結果から揚水水車には、水車の水受板を一定以上水没するように設置することや、回転数が一定の範囲内で利用することで、相対的に良好な揚水性能を發揮するといった特性を有することが明らかになった。これらの条件は、用水路の水路条件や揚水水車の寸法等で変化すると考えられる。また、本実験で用いた水車のような筒を水車の外周に設置するタイプでは、筒の設置角度によって揚水性能に差が生じるが、これも筒の寸法によって揚水に適した設置条件が異なると考えられる。揚水水車を新規に利用する場合は、以上のような揚水特性を考慮して設置する必要がある。

例えば、本実験条件と同様の幅 1.0m の水路に直径 2.0m で VU75 タイプの塩ビ管（長さ 400mm）を 8 つ装備した揚水水車を設置する場合は、水受板の水没深を 250mm 以上にし、筒の設置角度を 35°～50° で利用する必要がある。この条件では回転数が概ね 3～8rpm で揚水効率は 75%前後で回転数に応じた揚水量が得られる。本実験条件では最大で約 7.0m³/h の揚水量が得られた。

3.6 小括

揚水水車の模型実験では、悉皆調査で得られた水車の直径の頻度分布から直径 2.0m、幅 0.8m の揚水水車を製作し、幅 1.0m の水路に設置した場合の堰上げの影響の有無と揚水特性およびエネルギー利用特性を検討した。また、その結果を援用して倉敷市祐安地区で利用される揚水水車の性能評価から、揚水水車が揚水という機能を發揮することで得られる価値を明らかにした。具体的には以下のような結果を得た。

- ① 本実験で使用した揚水水車では、水車を設置することで発生する堰上げ水位が最大 80mm 発生したが、多くの条件では 20～30mm 前後であった。このように、水路に対して大きな影響を与えないが、水車導入を前提に水路整備を行う場合は、本実験条件に準じる場合は、現行の設計基準から計算される余裕高に 0.02～0.03m 程度加算した値を用いると、水車の設置による堰上げに配慮した設計となる。
- ② 筒の設置角度を変化させて揚水量を見たところ、おおむね 35°～50° で設置することで良好な性能を示した。揚水量や揚水効率は回転数と水没深で規定された。具体的には水受板（垂直方向の長さ 400mm）が水車軸と垂直方向で 250mm 以上水没すれば、回転数が 3～8rpm の時に揚水効率も 75%前後と最も良い性能を示し、揚水量も回転数の増加に合わせて増加する。例え

ば筒の設置角度が 45° の場合、水没深 400mm だと、回転数が約 2.5rpm で揚水量は約 2m³/h（揚水効率約 76%）、約 4.2rpm で約 3.3m³/h（約 75%）、約 5.8rpm で約 4.9m³/h（約 82%）、約 6.6rpm で約 5.5m³/h（約 80%）であった。但し、水没深が 200mm では、揚水量は最大でも約 5m³/h で揚水効率は 75%程度であった。例えば筒の設置角度 45° で水没深が 200mm だと、回転数が約 3.1rpm で揚水量は約 2.9m³/h（揚水効率約 90%）、約 5.9rpm で約 4.7m³/h（約 77%）、約 9.4rpm で約 4.6m³/h（約 47%）、約 11.3rpm で約 4.2m³/h（約 36%）であった。このように水没深が 200mm だと性能が劣った理由として、水没深が浅いために、水車の外周に取り付けた筒に水が十分に満たされる前にくみ上げられるためと考えられた。また、回転数が多すぎると揚水量や揚水効率が減少する傾向が見られた。本実験条件で良好な性能を得るには、回転数が 3～8rpm で、水没深が 250mm 以上必要である。

- ③ 揚水水車は、水路に設置することにより発生する上下流間の水位差を位置エネルギーとして利用することで回転する。そのエネルギー量を計算すると本実験条件では最大で水没深 250mm の時で約 18～19W であり、この程度のエネルギー量で約 6.8 m³/h の水量を約 1m 揚水することが可能であることが明らかになった。水没深がこれより浅いと揚水量が減り、深いと実揚程が低くなるため、エネルギー使用量が減少した。例えば、水没深が 250mm 以上の場合には、エネルギー使用量が概ね 15W 以下で利用効率も最大で 30%程度であった。
- ④ 以上の結果から揚水水車の揚水特性として、
 - ・筒の設置角度によって揚水性能に差が発生する
 - ・回転数の増加によって揚水量も増加するが、回転数が多すぎると揚水量は減少に転じる
 - ・水車の水受板の水没深の最大値が浅いと揚程は得られるが、浅すぎると筒に水が十分に入らず揚水量や揚水効率が低下することが示された。これらの条件は、筒の種類や形状及び設置数や水車の寸法によって変化すると推察され、揚水水車の性能を一般化するためには、他の条件での実験が必要である。
- ⑤ 実験条件とほぼ同条件で利用される倉敷市祐安地区の揚水水車（揚程約 1.0m、回転数約 4.7rpm）を事例に性能評価を行ったところ、揚水量が約 0.92L/s（約 77.8m³/d）、揚水効率が約 75%、仕事率が 7.5W 前後、エネルギー利用率は 22%前後と推定された。事例結果ではあるがこのように、実際に利用される揚水水車は、1日に約 80m³の揚水が可能な能力を有することや、7.5W という家庭用の蛍光灯と同程度の少ないエネルギー使用量で稼働できるといったエネルギー利用特性を有することが明らかになった。つまり、緩勾配な農業用水路に賦存する微少なエネルギーで揚水水車は、揚水という本来的な機能を發揮できることを具体的に明らかにした。また、このような自然エネルギーを利

用することは、温室効果ガスの排出量の削減や電動ポンプ等の稼働で必要となる電気代等の運用費の節減が可能である。これらは揚水水車が有する価値と推察される。

IV 揚水水車に対する住民の評価構造の解明

4.1 はじめに

近年、揚水水車は地域資源として観光目的で利用され、保存活動が行われる事例が散見される。これは、重力灌漑ができない水田に対して必要灌漑水量を揚水する本来的な機能に加えて、本来的でない新たな機能が発揮されることによって、観光目的での利用がなされ、保存活動が行われると推察される。しかし、新たな機能がどのようなものかは不明である。

ただし、新たな機能は、揚水するという本来的な機能に対する機能であることから、受益者は農業者に加えて非農業者住民、来訪者等も含まれると考えられる。農業者と非農業者は、農業に対する知識や経験に差があることから、揚水水車についても同様と考えられる。よって、両者は重視する機能が異なると考えられる。同様に非農業者の中でも、例えば出身地等の属性の違いで揚水水車に対する親しみに差があれば、重視する機能が異なることが考えられる。重視する機能が異なると、得られる価値も異なると考えられることから、揚水水車の新たな機能とその機能が発揮することで得られる価値を適切に評価するためには、農業者と非農業者の違いと非農業者を属性に分けて、揚水水車に対する価値認識をそれぞれ検討する必要がある。

本章では、揚水水車の新たな機能とその機能の発揮によって得られる価値を明らかにすることを目的に、人間が揚水水車を好ましいと評価する要因を農業者と非農業者の違いおよび、非農業者は特に出身地等の属性を考慮して解明する。

4.2 対象地区

対象地区は、伊賀市上林地区（以下上林地区）と倉敷市祐安地区（以下祐安地区）である。上林地区は揚水水車を19基、祐安地区は22基利用しており、20基の規模で揚水水車を利用している集落は、わが国ではこの2地区のみ^{※2}である。

上林地区は、木津川上流域にある用水路の取り入れ堰直下に位置する。揚水水車が利用される理由は、一部の水田が用水路の水位より田面が高いため、重力灌漑ができないのだが、用水路を堰止めると下流に十分な水が届かないためである。1985年頃に国道の整備事業が行われた際に、平行する用水路もコンクリート水路に改修された。その際に、揚水水車を設置する台座も整備されたため利用が広まった。揚水水車（Fig. 38）は直径1.3mから2.1mで鉄製のものが利用されている。

祐安地区は、高粱川を水源とする八ヶ郷用水の取り入れ堰直下に位置する。揚水水車が利用される理由は、漏水田のため常時灌漑をする必要があるが、水路を堰き止めると下流まで十分な水が流れないことから下流への水を減らさ

※2 全国悉皆調査から、わが国では現在35地区104基が灌漑目的で利用されている。

ないためである。揚水水車 (Fig. 39) は直径 1.6m から 2.1 m で、過半数は木製であるが鉄製も 2 基存在する。大正末期から昭和初期に近隣集落で利用していた揚水水車を参考に利用され始めた。両地区の農家世帯率等を見ると (Table 16) 倉敷市祐安地区は都市近郊の混住化地区であることから、非農業者住民でも県外や市外から転入した住民が多く居住すると考えられる。そのため、地元生まれの住民と比べて揚水水車に対する知識量に差があると考えられ、その知識量の差は揚水水車を好ましいと評価する要因の決定に影響すると考えられる。また伊賀市上林地区は農家世帯率が約 50% であることから、農業者と非農業者の間



Fig. 38 上林地区の揚水水車の一例 (鉄製)
Irrigation Water Wheel in Uchayashi district



Fig. 39 祐安地区の揚水水車の一例 (木製)
Irrigation Water Wheel in Sukeyasu district

Table 16 2 地区の農家世帯率と各種面積データ
Farm household ratio and settlement data in two object regions

地区名	倉敷市祐安地区	伊賀市上林地区
集落面積 (ha)	45.7	173.6
総経営耕地面積 (ha)	4.9	33.9
田経営耕地面積 (ha)	4.5	32.2
田経営耕地面積率 (%)	9.8	18.5
農家世帯数	6	35
集落総世帯数	98	71
農家世帯率 (%)	6.1	49.3

2005年の農林業センサスデータ及び各市の統計データを抜粋

での揚水水車を好ましいと評価する要因の違いが検討できると考えられる。よって、対象地区に両地区を選定したことは妥当である。

4.3 研究方法

4.3.1 認知心理学的手法を用いた評価構造の階層化と揚水水車の選好性評価への援用

本研究では、新たな機能が発揮されることで何らかの価値が発生し、その価値の受益者は好ましいと評価すると定義する。つまり、受益者の揚水水車の選好性評価は、新たな機能とその発揮によって発生する価値と階層関係にある。この階層関係はパーソナルコンストラクト理論で説明できる。ここで、パーソナルコンストラクト理論とは認知心理学的人間モデルで、人間が目や耳等の感覚器を通じて得た外界からの情報を各人固有の理解、判断の仕組み (以下認知構造) によって情報処理し、その環境を理解するというもので、環境を評価するプロセスを階層的に説明できることが特徴の理論である。景観評価に関する既往研究では、このような認知構造を構築したものがある。例えば、河川を対象とした小池ら (1988)、三阪ら (2006a)、島谷 (1998) などや、自然景観を対象とした児島ら (1995)、水田景観を対象とした田野倉ら (1999)、大都市近郊農地景観を対象とした松本ら (2007)、棚田景観を対象とした栗田ら (2004) の研究が挙げられる。これらの研究結果から、パーソナルコンストラクト理論を援用したモデルを用いることで、人間が環境をどのように評価しているかを構造的に明らかにできることが示された。しかし、揚水水車の評価構造は明らかになっていない。

本研究での階層関係の設定は、小池ら (1988) のモデル (Fig. 40) を援用した。ここで、小池らのモデルは、都市河川の心理的空間の評価構造を、「評価」、「判断」、「外的環境を一時的に感じ取る部分」の 3 層の認知過程を考慮したモデルによって説明したもので、先述したように人間の認知構造を考慮しているため、空間の改変が人間の抱いている判断や評価に及ぼす影響を具体的に表現できることが特徴である。

揚水水車の選好性の評価構造を構築するために、インタ

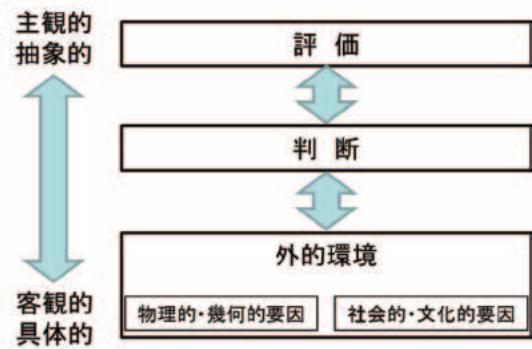


Fig. 40 小池らの「都市河川の心理的空間評価の階層モデル」
Koike's 'hierarchical model of psychological spatial assessment in urban river'

ビュー調査から階層関係を定性的に評価して、その結果を援用したアンケート調査を行うことで階層関係の定量的評価を行う。

4.3.2 インタビュー調査

インタビュー調査は、讚井（1986）が開発した評価グリッド法を援用した。評価グリッド法とは、対象とするエレメント（例えば写真等）を作成し、エレメントの比較から評価項目を抽出し、ラダーリング（ある評価項目の上位や下位の評価項目を抽出する技法）によってヒエラルキー構造を構築する、インタビューによって行う調査法である。

本研究では写真を用いずに、被験者に祐安地区の農業用水路をイメージしてもらい、まず好ましいと思うかを聞き、好ましいと回答した人にその理由を尋ねて判断要素（中位の評価項目）とし、判断要素から得られるより抽象的な価値判断（上位の評価項目）とより客観的かつ具体的な理解（下位の評価項目）を尋ねるラダーリング（讚井ら、1986）によって選好性に関わる要素を階層的に抽出した。その上で、農業用水路への選好性評価の決定に揚水水車が関係する階層関係を抽出し、それらが揚水水車そのものへの選好性の決定と差異があるかを検討した。

ところで、揚水水車は、Fig. 41 に示すように同地区内の東西軸である2本の生活道路沿いの農業用水路の約600mの区間のみ設置され、住宅に近く住民が日常的に視認しやすいこと、大きさや形状がほぼ同様であることから、農業用水路や揚水水車に対して想起されるイメージには大きな差はないと予想される。

4.3.3 アンケート調査

アンケート調査は、インタビュー調査から得られた結果を元に作成された質問票を用いた。具体的には、アンケートの質問項目は、評価グリッド法で抽出した農業用水路に対する評価構造で揚水水車に起因する要素（Table 17 の問

1～問5、問7、10、12、13、15）に、インタビュー調査終了後の被験者との会話の中で出てきた項目（Table 17 の問8）と松浦ら（1986）が示した河川のイメージ評価から Table 17 の問6、9、11、14 を加えて階層構造に留意して設定した。ただし上林地区での調査では、祐安地区より農業者が多いことが判明していたため、農業者独自の視点と判断した質問項目（問A、B）を追加した。属性以外の質問は、リッカート法による4段階評価（例：とても思う【1点】-やや思う【2点】-あまり思わない【3点】-全く思わない【4点】）で求めて点数を与え、量的変数として扱った。また、アンケート調査は、写真を提示するのではなく、地区内の揚水水車を想起してもらいそれについて回答を求めた。

評価構造の階層間の関係は、単相関分析及び重回帰分析によって明らかにする。これらの解析結果から、揚水水車

Table 17 質問項目
Question items

具体的な判断階層	問1	揚水水車は農業に役立っていると思いますか	有効性
	問2	揚水水車は環境にやさしいと思いますか	環境配慮
	問3	揚水水車は風情を感じさせるとは思いますか	風情
	問4	揚水水車は景観形成に寄与していると思いますか	景観形成
	問5	揚水水車は祐安地区(上林地区)らしい施設だと思いますか	地域性
	問6	揚水水車は歴史性があると思いますか	歴史性
	問7	揚水水車は音が良いと思いますか	音環境
	問8	揚水水車は水質浄化に寄与していると思いますか	水質浄化
抽象的な判断階層	問A	揚水水車を利用することで近隣の水争いが減ったと思いますか(上林地区のみの質問項目)	合意形成
	問9	揚水水車は整然していると思いますか	整然
	問10	揚水水車は季節感があると思いますか	季節感
	問11	揚水水車に対して親しみを感ずると思いますか	親しみ
	問12	揚水水車があるとうれしいと思いますか	うれしさ
	問13	揚水水車があると安らぎを感じるとは思いますか	安らぎ
総合評価	問14	揚水水車は美しいと思いますか	美しさ
	問B	揚水水車は便利な農具だと思いますか(上林地区のみの質問項目)	便利さ
水路評価	問15	揚水水車があることは好ましいと思いますか	選好性評価
	問C	祐安地区の農業用水路は好ましいと思いますか(祐安地区のみの質問項目)	水路評価
属性	問16	性別	
	問17	年齢層	
	問18	職業	
	問19	生まれた場所	
	問20	現住居の居住年数	

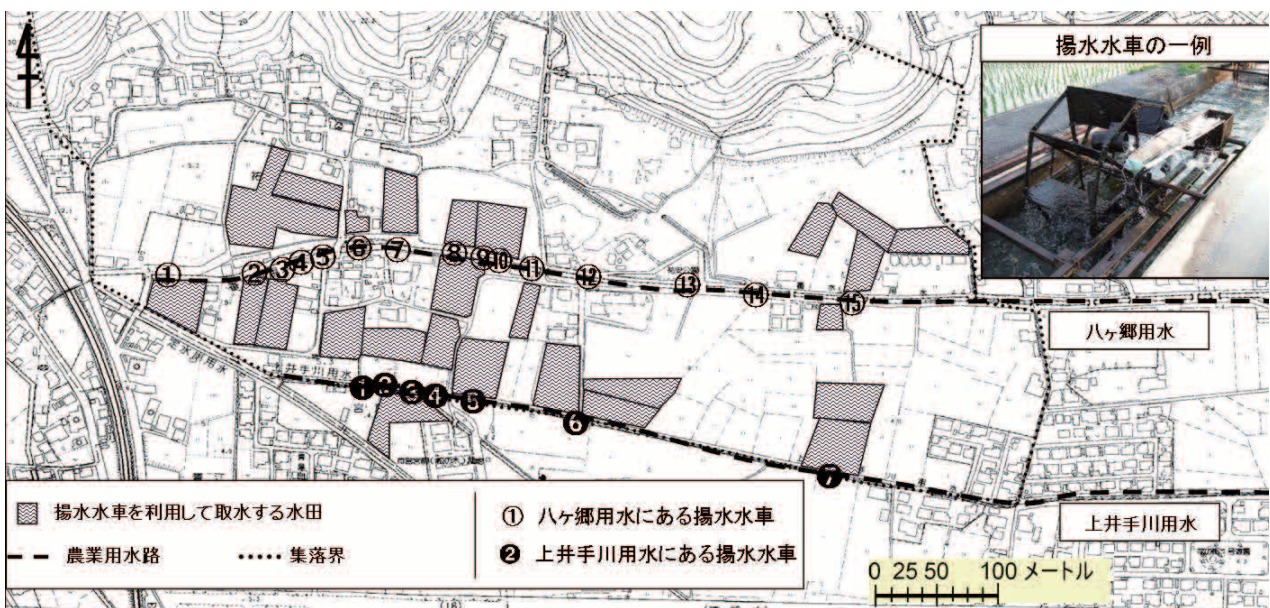


Fig. 41 祐安地区の揚水水車の設置場所 (2008年8月)

Setting location of IWV in Sukeyasu district

を好ましいと評価する要因として強く影響する評価項目を、階層構造を用いて説明する。

本研究で用いる揚水水車の評価構造モデル (Fig. 42) は、目や耳等の感覚器を通して得た揚水水車の情報 (「外的環境を一時的に感じ取る部分」に該当) に対して、具体的な判断と抽象的な判断によって情報を整理して、総合評価 (好ましいか好ましくないかの評価) を行う 4 段の階層構造で構成されるモデルである。

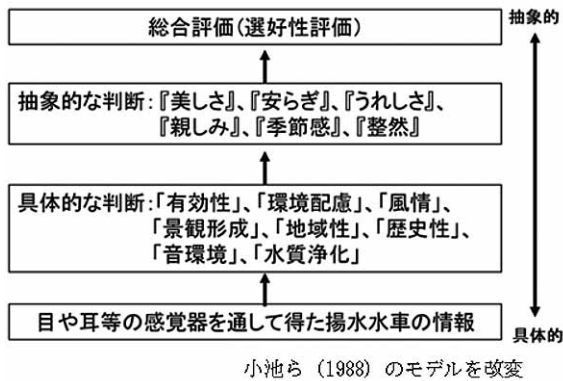


Fig. 42 揚水水車の評価構造モデル

Evaluation Structure Model of Irrigation Water Wheel

4.4 結果

4.4.1 揚水水車の選好性評価の決定要因の定性的評価

揚水水車の選好性評価の決定要因を評価グリッド法によるインタビュー調査から定性的に評価した。具体的には、倉敷市祐安地区で調査を行った。被験者は全員、町内会長から紹介された非農業者 17 名^{※3}で (Table 18), 2007 年 6 月下旬に戸別訪問して調査した。

Fig. 43 に、インタビュー調査で得られた祐安地区の農業用水路を好ましいと評価する要因の構造を示した。得られた個々の要素を、上位階層には抽象的な評価項目、下位階層には具体的な評価項目になるように階層的に整理したものである。

調査の結果、被験者 17 人のうち、11 人 (Table 18) が祐安地区の農業用水路に対する選好性評価の要素として揚水水車の存在を回答し、非農業者が祐安地区の農業用水路を好ましいと評価する要素に揚水水車の存在が影響していることが示唆された。

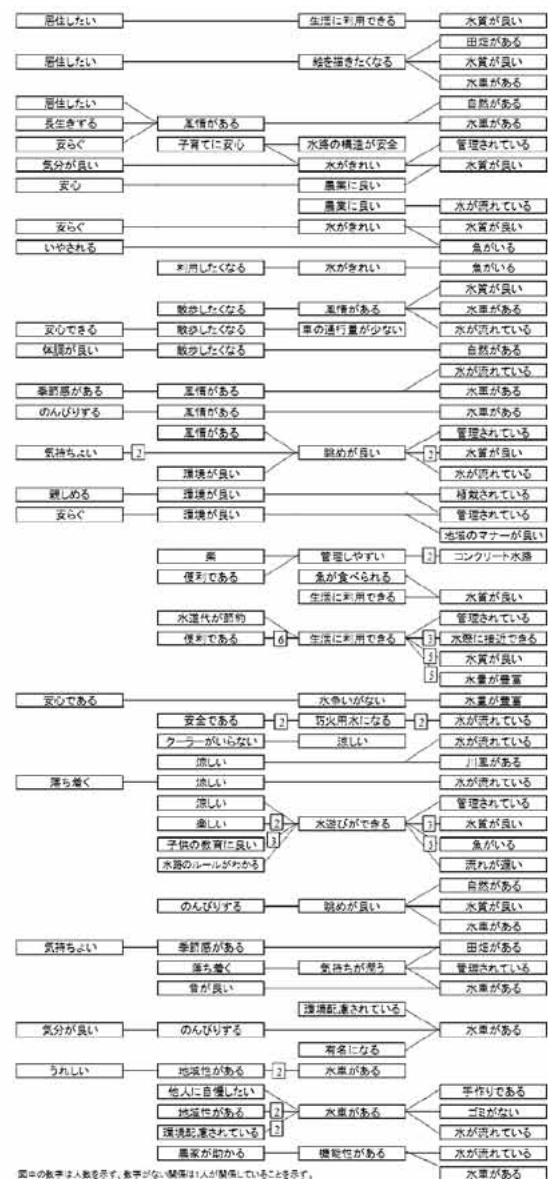
Table 18 インタビュー調査での被験者の性別・年齢
Gender and age of the subject in interview research

	20代	30代	40代	50代	60代	70代	合計
男性	0	0	0	0	6(3)	3(2)	9(5)
女性	1(1)	1(1)	0	1	5(4)	0	8(6)

() の数字は、揚水水車の存在を農業用水路の選好性評価の要素に挙げた人数

揚水水車に関係する要素を整理すると、揚水水車の存在 (下位の評価項目) は、地域性があるといった項目、音が良いといった項目、眺めが良いといった項目、有効性 (例: 機能性がある) に関する項目、風情があるといった項目や、環境配慮されているといった項目等の中位の評価項目に繋がっている。環境配慮の内容について詳しく聞くと、主に石油を利用しないことや水力を利用していることで、地球温暖化対策に関連する理由であった。中位の評価項目は、うれしい、のんびりする、安らぐ等といった上位の評価項目に繋がることが示された。

Fig. 43 で示された評価構造から、揚水水車が関係する構造のみ抽出すると、Fig. 44 のようになる。これは、祐安地区の農業用水路の選好性評価の決定要因として揚水水車の存在が及ぼす影響を示している。



上位 中位 下位
より抽象的な評価項目 やや抽象的な評価項目 より具体的な評価項目

Fig. 43 祐安地区の農業用水路の好ましさの評価構造

Evaluation structure for preference of irrigation channel in Sukeyasu

※3 インタビュー調査は数量的解析を目的とせず、アンケート調査票設計の基礎データとして用いていることから、被験者が 17 名と少数であるが、本研究の目的に照らして問題はないと判断した。

農業用水路の好ましさの評価で揚水水車の存在を挙げなかった6人に対して改めて、揚水水車の存在が好ましいか否かを尋ね、好ましいと回答した人に好ましい理由を尋ね、その階層構造を Fig. 45 に示した。これは、揚水水車の選好性評価の決定要因を示している。

Fig. 44 と Fig. 45 を見比べると、両者の構造は類似しており、Fig. 44 の階層構造を参考に、アンケートを作成しても問題ないと判断した。

4.4.2 揚水水車の選好性評価の決定要因の定量的評価

(1) 祐安地区の全被験者を対象とした定性的評価と定量的評価の結果と関連性

祐安地区において非農業者が揚水水車を好ましいと評価する要因をアンケート調査によって定量的に解析した。アンケート調査 (Table 17) では、Fig. 44 の結果を踏まえて、揚水水車がある (下位)、問 1~8 (中位)、問 9~14 (上位)、問 15 (最上位) とする 4 層で説明される階層構造 (図 4-5) が仮説的に設定された。本章においては、以下の評価構造の質問項目の表現方法は、抽象的な判断階層に位置づけた質問項目は『』で、具体的な判断階層に位置づけた質問項目

※4 1人で複数票の回答がないか、回収時や解析時においても点検を行ったが、回答や属性データの重複等不自然な点はないと判断した。

目は「』」で示す。

アンケート調査の対象は、町内会に参加している全世帯とした。2008年2月~3月に実施し、配布および回収は水利委員に依頼し、回収は郵便による返送も併用した。また、回答率の向上を期待して1世帯あたり2票封入した。具体的には、98世帯196票配布して、88世帯151票^{※4}回収された (世帯回収率89.8%)。このうち、農業者の回答である9票と白紙の1票を除外した141票 (Table 19) を解析対象としたが、出身地別の解析では無効票が2票あったため解析対象が139票となった (Table 20)。

Fig. 46 は、評価項目の集計結果である。ほとんどの質問で肯定回答率が80%を超えるが、音環境、水質浄化、整然の肯定回答率は60%台であった。

また、全ての評価項目間の相関関係は、独立性検定では1%水準で有意であった (Table 21) が、特に揚水水車の選好性評価と高い相関関係を有した上位の評価項目として『安らぎ』、『美しさ』、『親しみ』が挙げられた。

Table 19 祐安地区での回答者の性別・年齢

Gender and age of the subject in questionnaire research

	25歳未満	25歳以上 ~45歳未満	45歳以上 ~65歳未満	65歳以上	不明	合計
男性	1	13	21	26	1	62
女性	3	18	31	27	0	79
合計	4	31	52	53	1	141

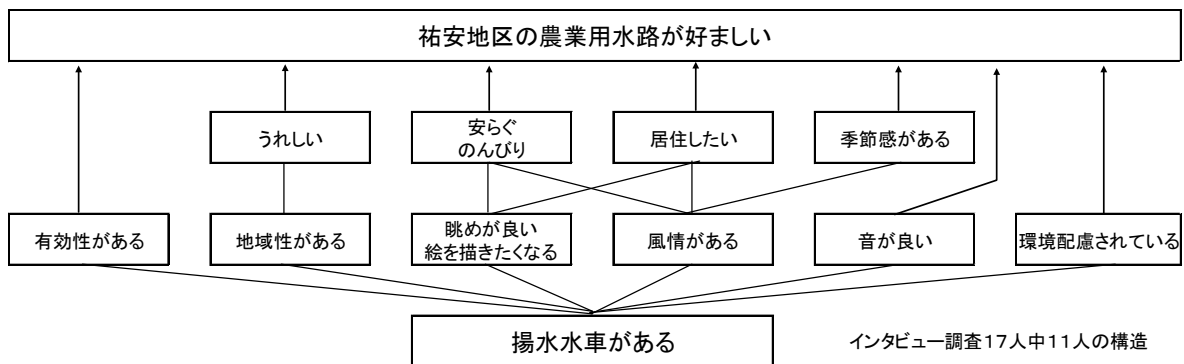


Fig. 44 祐安地区の農業用水路の好ましさの評価に揚水水車が及ぼしている影響
Impact of IWW on preference for irrigation channel in Sukeyasu district

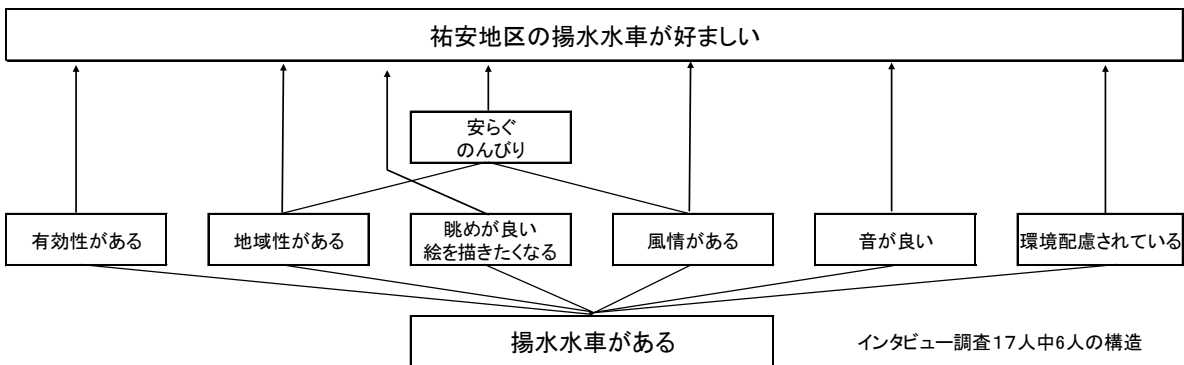


Fig. 45 住民が祐安地区の揚水水車を好ましいと評価する要因
Factor evaluating IWW at good in resident

設定した階層間の関係を、重回帰分析を用いて検討した。ステップワイズ法(田中ら, 1995)を用い、上位階層に位置する評価項目を目的変数に、一階層下の評価項目を説明変数にして、Fig. 47の階層間の関係を得た。上位の評価項目と中位の評価項目の関係は、選好性評価との関係が示された『親しみ』、『安らぎ』、『美しさ』のみ表示した。

上位の評価項目に関しては、Fig. 47での『親しみ』はFig. 44の結果に新たに加えた評価項目で、Fig. 44での『うれしい』に関係すると考える。Table 21で『親しみ』と『うれしさ』の単相関係数が大きいこと、『親しみ』は「地域性」、「有効性」が関連し、Fig. 44で「地域性」が『うれしさ』に繋がることから、地区への愛着と捉えることができ、それが『親しみ』として表現されたと考えた。

また、『安らぎ』は、「音環境」、「環境配慮」、「地域性」と関係し、Fig. 44, Fig. 45で抽出された「風情」、「眺めが良い」(景観形成に相当)との関係は抽出されなかった。ただし、Table 21より『安らぎ』とこれら中位の評価項目との単相関係数は0.58~0.64と近いので、Fig. 44の構造が否定されたわけではなく、むしろ音や環境配慮も関係することが見出されたと考える。

『美しさ』も、Fig. 44に加えた評価項目で「音環境」、「地域性」との関係が抽出された。視覚的要素として強い関係が期待された「景観形成」は単相関係数が0.65で「音環境」、「地域性」の0.68, 0.65と同等であったが、『美しさ』の要素とはならなかった。その理由として、祐安地区の揚水水車は、Fig. 39の写真に見るような簡易な構造でかつ、木板、竹、鉄、塩ビ管等の安価な素材、ミルク缶、ペットボトル等の廃材が利用されていることも一因と考えられる。それは、インタビュー調査で揚水水車を好ましいと評価する理由として『美しいから』という回答がなかったことや、Fig. 46では、回答者の80%が揚水水車を『美しい』と評価しているものの、その半数は美しいと『やや思う』との評価で、他の上位の評価項目の結果と比べると『やや思う』の比率が最も多いことから、揚水水車に対する中位の評価項目『景観形成(見た目のよさ)』は、上位の評価項目『美しさ』を最も強く説明するものではなかったと推察される。

中位と上位の評価項目を通して選好性評価との単相関係数が最も高かったのは「地域性」の0.80である。この地域固有のもので他にない「地域性」が『親しみ』や『安らぎ』、

と関係し、Fig. 44, Fig. 45で抽出された「風情」、「眺めが良い」(景観形成に相当)との関係は抽出されなかった。ただし、Table 21より『安らぎ』とこれら中位の評価項目との単相関係数は0.58~0.64と近いので、Fig. 44の構造が否定されたわけではなく、むしろ音や環境配慮も関係することが見出されたと考える。

Table 20 祐安地区の回答者とその属性
Attribute of respondent in Sukeyasu district

倉敷市祐安地区非農業者の回答者属性(全139人) 世帯回収率=89.8%(88世帯/98世帯)	
性別	男性(60人)、女性(79人)
年齢層	25歳未満(4人)、25~44歳(31人)、45~64歳(52人)、65歳以上(52人)
職業	勤めている(常勤)(35人)、勤めている(パート)(11人)、自営業(12人)、学生(3人)、専業主婦(夫)(24人)、無職(46人)、その他・不明(5人)
出身地	現在の祐安地区(25人)、現在の祐安地区以外の倉敷市(43人)、現在の倉敷市以外の岡山県(34人)、岡山県外(37人)
祐安地区での居住年数	5年未満(14人)、5~20年(26人)、20~40年(61人)、40年以上(36人)

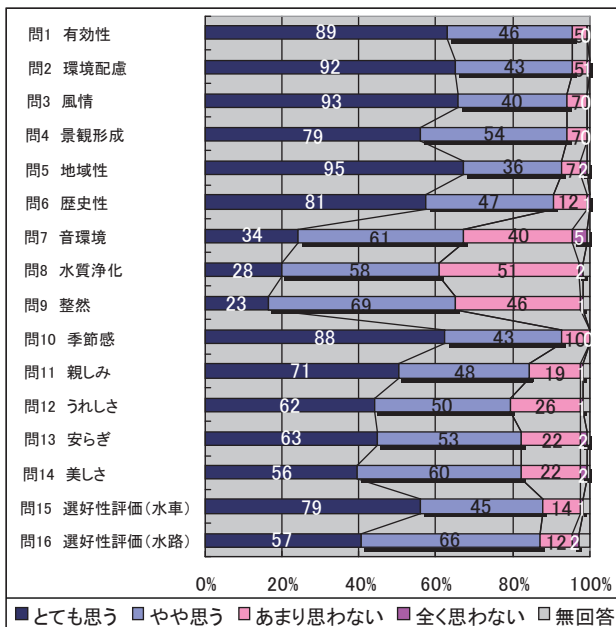


Fig. 46 評価項目の集計結果
Results of question items

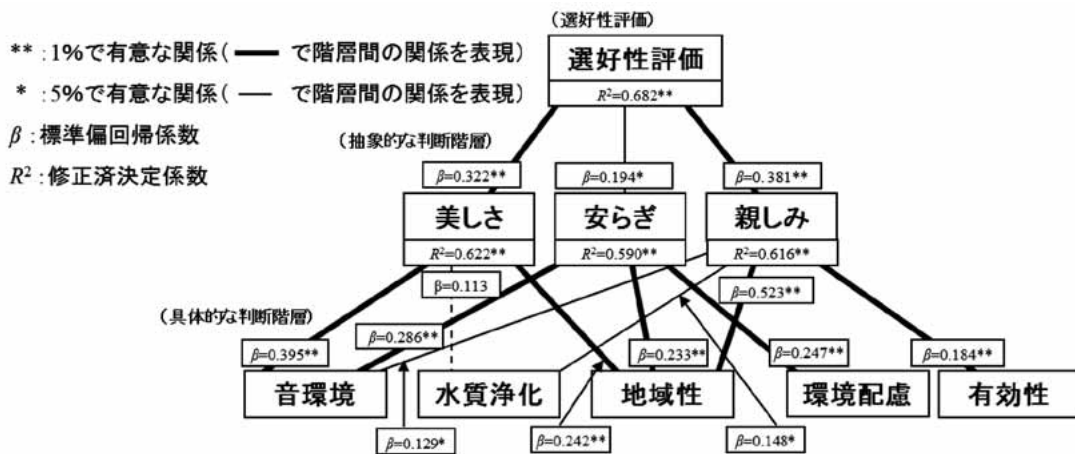


Fig. 47 祐安地区の揚水水車に関する評価構造
Evaluation structure on IWW in Sukeyasu district

『美しさ』という抽象的な感情を通して好ましさの評価に繋がった。

このように、祐安地区にとって地域性のある資源として揚水水車が評価されたが、地域性とは異なる、揚水水車という施設が有する固有の評価について「環境配慮」、「有効性」、「音環境」等が抽出された。自然エネルギーの利用に起因する「環境配慮」が選ばれたことは、地球温暖化など今日的な環境問題の解決への寄与とも併せて、揚水水車保全や利活用等の検討には有用な知見となる。「有効性」は揚水水車が灌漑目的で利用されていることを指し、観光目的等ではなく実際に農業に利活用されていることが選好性評価を高める要因になることが示唆された。

また、非農業者の揚水水車に対する選好性評価と農業用水路に対する選好性評価の関係を知るために、クロス集計を実施し、Table 22 に示した。2項目間で独立性の検定を実施したところ、1%で有意な関係となり、揚水水車を好ましいと評価する非農業者は、農業用水路に対して好ましいと評価する傾向が示された。つまり、揚水水車に対する好ましさの評価が農業用水路に対する好ましさの評価に影響を与えている可能性が示唆された。

(2) 祐安地区と上林地区の比較を通じた属性間の選好性評価の決定要因差の検討

Fig. 42 に示したモデルの階層間の関係は、上位の階層の質問項目を従属変数に、直下の階層の質問項目を独立変数とした重回帰分析（ステップワイズ法）（田中ら、1995）に

よって得られた質問項目間の説明力を示す標準偏回帰係数を参考に検討した。なお、重回帰分析を行うにあたり VIF（分散拡大要因）値を指標に多重共線性の有無を確認し、多重共線性の発生はないと判断した。

i. 農業者と非農業者の評価構造の比較

農業者と非農業者の評価構造の違いは、上林地区で行ったアンケート結果の比較から検討した。調査対象は、町内会に参加している全世帯とした。2008年9月～10月に町内会長に配布と回収を依頼し、回収は郵送も併用した。また、回答率の向上を期待して1世帯あたり2票封入した。71世帯142票配布して32世帯47票回収された（世帯回収率45.1%）上林地区で回収された質問票に無効票はなかったため、47票を対象に解析を行った（Table 23）。

Table 23 から上林地区回答者は、地元生まれか伊賀市生まれで、20年以上居住している人が大半である。χ²検定から両属性について出身地、居住年数の適合度を見たところ、差は認められなかった。

農業者と非農業者の質問項目の平均評点を Fig. 48 に示した。平均値の差の検定を行ったが、1%水準で有意に差がある項目はなかった。ただし、具体的な判断階層「合意形成」では、統計的に有意な差はないものの、図から見てやや農業者が肯定的に捉えていることが示された。

農業者、非農業者ごとに評価構造を構築し、それぞれ Fig. 49（N=24）と Fig. 50（N=23）に示した。母数が少ないため、階層間の関係はステップワイズ法で採用された全ての関係

Table 21 質問項目間の単相関係数

Coefficient of correlation between question items

揚水水車の選好性評価		有効性	環境配慮	風情	景観形成	地域性	歴史性	音環境	水質浄化	整然	季節感	親しみ	うれしさ	安らぎ	美しさ
0.57	有効性	1.00													
0.63	環境配慮	0.62	1.00												
0.70	風情	0.60	0.63	1.00											
0.67	景観形成	0.58	0.67	0.85	1.00										
0.80	地域性	0.57	0.53	0.73	0.72	1.00									
0.61	歴史性	0.46	0.54	0.65	0.65	0.67	1.00								
0.55	音環境	0.39	0.47	0.57	0.54	0.51	0.56	1.00							
0.45	水質浄化	0.37	0.41	0.35	0.42	0.32	0.28	0.39	1.00						
0.51	整然	0.38	0.45	0.38	0.39	0.40	0.40	0.58	0.57	1.00					
0.64	季節感	0.57	0.48	0.63	0.69	0.73	0.53	0.39	0.31	0.48	1.00				
0.77	親しみ	0.57	0.54	0.61	0.64	0.73	0.60	0.51	0.44	0.57	0.74	1.00			
0.64	うれしさ	0.50	0.57	0.59	0.57	0.70	0.63	0.59	0.41	0.50	0.62	0.83	1.00		
0.75	安らぎ	0.49	0.62	0.58	0.63	0.64	0.62	0.63	0.42	0.54	0.66	0.76	0.83	1.00	
0.77	美しさ	0.52	0.51	0.63	0.65	0.65	0.61	0.68	0.44	0.53	0.64	0.76	0.79	0.84	1.00

独立性の検定で、全ての関係が1%水準で有意な関係を示した。

Table 22 揚水水車と農業用水路の両選好性評価のクロス集計
Cross table between preference of IWW and preference of irrigation channel

		Q15.揚水水車があることは好ましいと思いますか					全体
		とても思う	やや思う	あまり思わない	全く思わない	不明	
Q16.祐安地区の農業用水路は好ましいと思いますか	とても思う	52	5	0	0	0	57
	やや思う	25	34	6	0	1	66
	あまり思わない	1	3	8	0	0	12
	全く思わない	0	1	0	1	0	2
	不明	1	2	0	0	1	4
	全体	79	45	14	1	2	141

独立性の検定の結果1%で有意であった。

Table 23 上林地区の回答者とその属性

Attribute of respondent in Uebayashi district

伊賀市上林地区の回答者属性(全47人) 世帯回収率=45.1%(32世帯/71世帯)	
性別	男性(26人)、女性(21人)
年齢層	25歳未満(0人)、25~44歳(1人)、45~64歳(20人)、65歳以上(25人)、不明(1人)
職業	勤めている(常勤)(6人)、勤めている(パート)(5人)、農家(24人)、専業主婦(夫)(3人)、無職(8人)、その他・不明(1人)
出身地	現在のの上林地区(24人)、現在のの上林地区以外の伊賀市(16人)、現在の伊賀市以外の三重県(4人)、三重県外(2人)
上林地区での居住年数	5年未満(0人)、5~20年(1人)、20~40年(10人)、40年以上(36人)

を用いて構築した。

農業者は、「地域性」、「歴史性」があると判断して『安らぎ』を感じて好ましいと評価する構造と、「有効性」、「合意形成」、「風情 (ただしマイナス)」があり、『便利さ』があるから好ましいとする構造で揚水水車を評価していることが示された。

非農業者は、「地域性」、「有効性」があることで『親しみ』を感じて好ましいと評価する構造と、「景観形成」に寄与し

ており『美しさ』を感じるから好ましいと評価する構造があることが示された。

ii. 出身地ごとの評価構造の比較

「地域性」が農業者であるか非農業者であるかに拘らず、選好性評価に影響を及ぼす具体的な判断であることが示されたが、その理由として地域に対する愛着と関係があると考え、出身地別に評価構造を構築した。

祐安地区を例に、非農業者の評価構造を出身地別にそれぞれ構築する。農業者を除外した理由は、農業者の数が少ないことと、農業者の評価構造と非農業者の評価構造が異なることが推察され、混同すると適切に評価構造が構築できないことを懸念したからである。

Fig. 51 に各属性別の質問項目の平均評点を示した。祐安地区生まれと岡山県外生まれの差が大半の質問項目で最も大きいことが示された。そこで両者の平均値の差の検定を行ったところ、抽象的な判断階層『うれしさ』、『親しみ』および選好性評価で、1%水準で有意な差が示された。また、祐安地区生まれの住民が他の属性と比べて肯定的な判断、評価を行う傾向が示された。

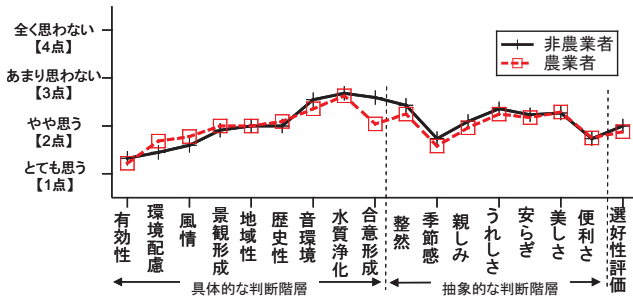


Fig. 48 上林地区の農業者-非農業者別の質問項目の平均評点
Farmer's and Non-farmer's average score in Uebayashi district

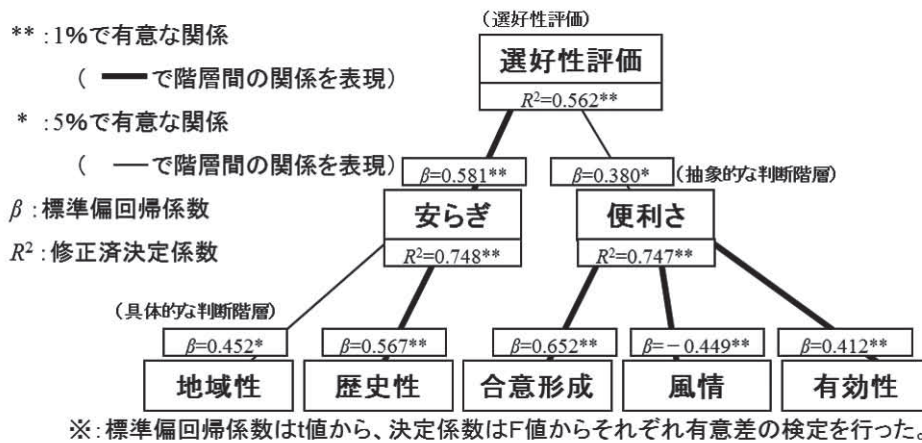


Fig. 49 上林地区農業者の揚水水車に対する評価構造
Evaluation Structure of farmer for IWWs in Uebayashi district

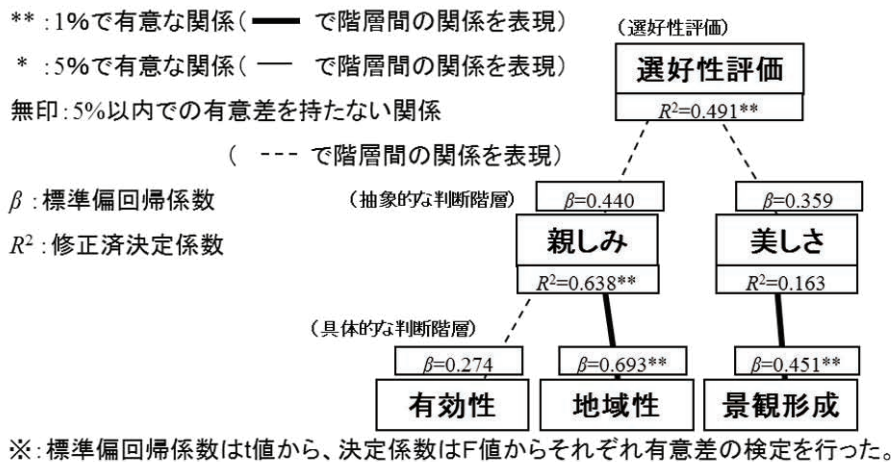


Fig. 50 上林地区非農業者の揚水水車に対する評価構造
Evaluation Structure of non-farmer for IWWs in Uebayashi district

出身地別に評価構造を構築すると、祐安地区生まれ (N=25) は、「景観形成」や「地域性」を感じ取り、『親しみ』があると判断することが、好ましさの評価に強く影響する構造であることが示された (Fig. 52)。

倉敷市生まれ (祐安地区生まれを除く) (N=43) は、祐安地区生まれと同様に「地域性」を感じて『親しみ』があると判断することが好ましさの評価に強く影響する構造として挙げられたが、「有効性」や「水質浄化」が『安らぎ』や『親しみ』があると判断し、好ましいと評価する構造も示された (Fig. 53)。

岡山県生まれ (倉敷市を除く) (N=34) は、「地域性」があり、好ましい「音環境」があると判断すると『親しみ』

を感じて好ましいと評価する構造が示された (Fig. 54)。

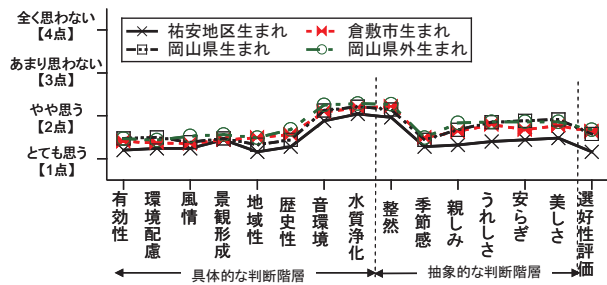


Fig. 51 祐安地区の出身地別の質問項目の平均得点
Average score of question items by place of birth

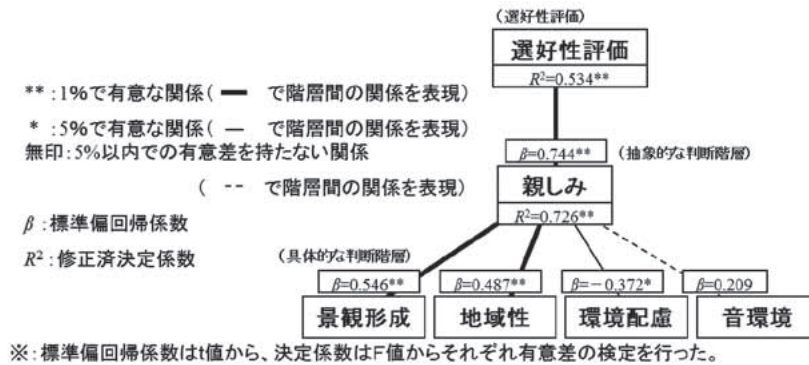


Fig. 52 祐安地区生まれの非農業者住民の評価構造

Evaluation Structure of non-farmer's resident that was born in Sukeyasu district

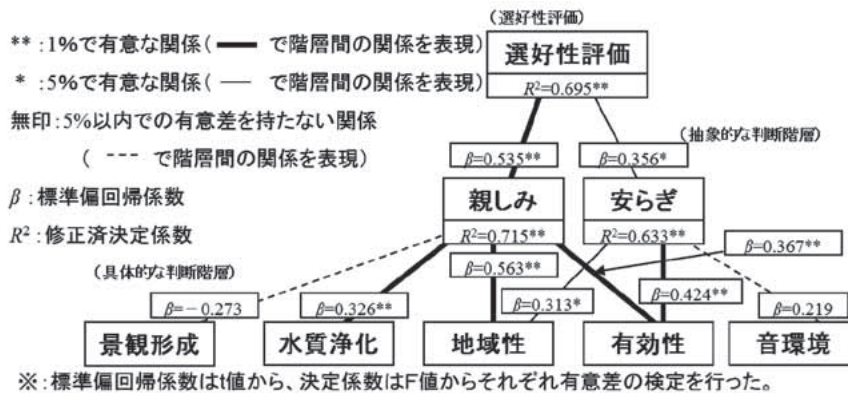


Fig. 53 倉敷市生まれ (祐安地区以外) の非農業者住民の評価構造

Evaluation Structure of non-farmer's resident that was born in Kurashiki city

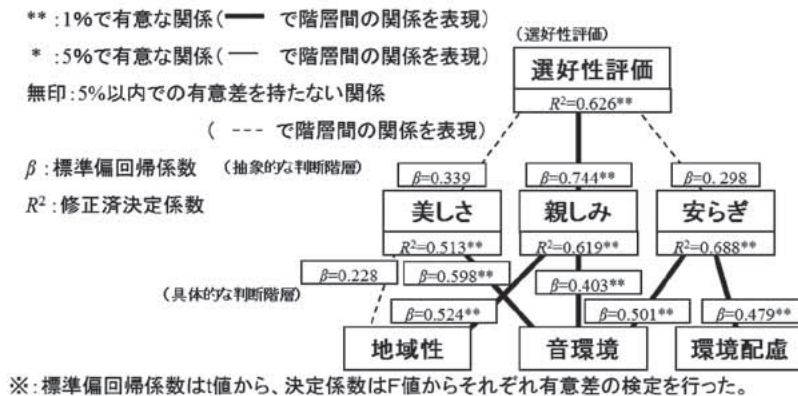


Fig. 54 岡山県生まれ (倉敷市以外) の非農業者住民の評価構造

Evaluation Structure of non-farmer's resident that was born in Okayama pref.

岡山県外生まれ (N=37) は、「景観形成」に寄与して、『美しい』と判断する人が好ましいと評価する傾向が示された (Fig. 55)。

以上 4 つの出身地属性の評価構造から 1%水準で選好性評価と関係がある抽象的な判断を見ると『美しさ』と『親しみ』が挙げられた。そこで居住年数も考慮して属性と平均評点間の関係を見る。居住年数と出身地のクロス集計結果を Table 24 に示す。居住年数と出身地ごとの『美しさ』の平均評点 (Fig. 56) を見ると居住年数が 5 年未満を除いて居住年数が長くなるほど、出身地が祐安地区に近くなるほど肯定的な判断になる傾向が示された。居住年数と出身地ごとの『親しみ』の平均評点 (Fig. 57) を見ると、祐安地区生まれ以外は 5 年未満を除いて居住年数が長くなるほど、出身地が祐安地区に近くなるほど肯定的な判断になる傾向を示し、祐安地区生まれは居住年数に拘らず、強く肯定的な判断をすることが示された。

4.5 揚水水車が有する新たな機能が発揮する価値

本章では、揚水水車が有する新たな機能と、それが発揮する価値を明らかにするために、住民の価値認識に着目して、揚水水車との接し方に差があると考えられる非農業者と農業者の違いや、非農業者でも特に出身地に着目して揚水水車に対する選好性評価の決定要因を解明した。

揚水水車に対する選好性に関わる要素抽出を目的としたインタビュー調査では、揚水水車の存在が農業水路の選好性評価の決定に大きく影響し、その決定要因は、揚水水

車の選好性評価の決定要因と同様であった。具体的には、非農業者が揚水水車を好ましいと評価する判断として、地域らしさや景観、風情がある、環境配慮されている、といった要素が影響を与えることを示し、それらを階層的に整理し評価構造を仮説的に構築した。

アンケート調査から、祐安地区では、揚水水車に対して地区の非農業者の大半が好ましいと評価していることが明らかになった。彼らが揚水水車を好ましいと評価する際に着目する点として、農業利用という目的を果たしていること (有効性)、環境にやさしいこと (環境配慮)、祐安地区の地域性があること (地域性)、音が良いこと (音環境) が挙げられた。それらが『親しみ』、『美しさ』、『安らぎ』といった上位の評価項目を通して揚水水車の「選好性」に繋がる評価構造が示された。

出身地別に選好性評価の決定に最も強く影響を及ぼす抽象的な判断を見ると、岡山県外生まれの住民は『美しさ』で、それ以外の住民は『親しみ』であり、出身地が祐安地

Table 24 居住年数と出身地のクロス集計

Cross table between residence years and birthplace

		生まれた場所				全体
		1:祐安地区	2:倉敷市	3:岡山県	4:岡山県外	
居住年数	1:5年未満	0	5	4	5	14
	2:5-19年	2	10	5	9	26
	3:20-39年	8	20	15	18	61
	4:40年以上	15	7	9	5	36
	不明	0	1	1	0	2
全体		25	43	34	37	139

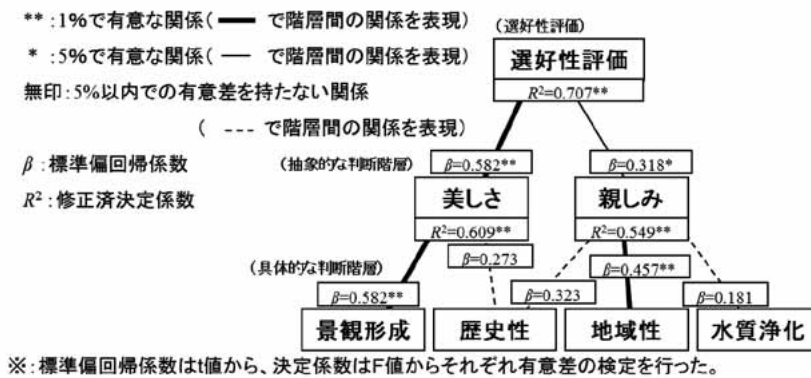


Fig. 55 岡山県外生まれの非農業者住民の評価構造

Evaluation structure of non-farmer's resident that was born in outside of Okayama pref.

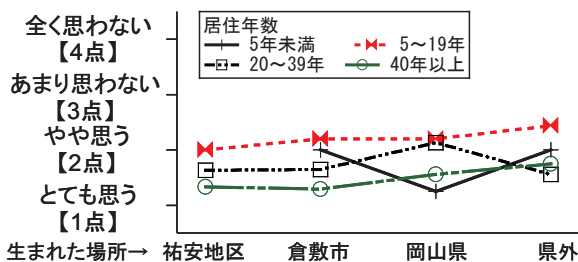


Fig. 56 居住年数と出身地ごとの『美しさ』の平均評点

Average score of 'beauty' between residence years and each birthplace

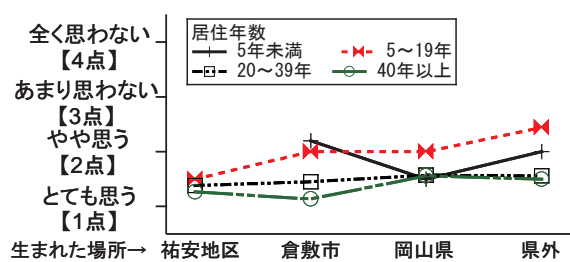


Fig. 57 居住年数と出身地ごとの『親しみ』の平均評点

Average score of 'affection' between residence years and each birthplace

区から遠くなるにつれて、選好性評価を説明する抽象的な判断が『親しみ』から『美しさ』へと段階的に変化する傾向が示された。『美しさ』に関する評価構造は、里山景観に対する地元住民（地区で生まれ育った人）と移入住民の好ましい景観の認識理由の違いとして、移入住民が顕著に美しさを挙げる一方、地元住民にはそのような認識が見られず、その要因を生活の一部となり見慣れすぎたため審美的評価の対象になりにくかったと考察する松島ら（2008）の報告と同様の傾向があると推察された。加えて、本研究で祐安地区から遠くで生まれた人ほど『美しさ』を選好性評価の判断要因にする傾向が示されたように、移入住民でも出身地の遠近で、選好性評価を決定する判断要因に差が生じる可能性が示された。

一方『親しみ』に関する評価構造は、全ての出身地属性において「地域性」が『親しみ』を強く説明する項目として挙げられた。平均評点を見ると「地域性」があると判断する住民が多いことから、住民は揚水水車に対して地域アイデンティティを感じていると推察された。

上林地区の結果も踏まえて属性差が評価構造に及ぼす影響を検討したところ、農業者と非農業者の間では、農業者は揚水水車の利用により近い立場であるために、『便利さ』の判断で揚水水車の本来的な機能を明確に意識することが示された一方、新たな機能に関する「歴史性」や「地域性」がある揚水水車に『安らぎ』を感じることで選好性評価の決定に影響する構造は、本来的な機能より選好性評価の決定に強く影響しており、農業者も新たな機能を重視していることが伺える。非農業者は、新たな機能を重視する評価構造で揚水水車の選好性評価を決定し、農業者と共通する評価構造は示されなかった。しかし、『親しみ』は「地域性」と「有効性」の判断で説明されており、非農業者も揚水水車の実用性に注目していることが示された。また、「景観形成」が寄与する『美しい』揚水水車が好ましいと評価しており、揚水水車に対する美意識に関する評価構造を重視する可能性が示された。

このように、揚水水車を好ましいと評価する要因として農業者は『便利さ』が、非農業者は『美しさ』や『親しみ』がそれぞれ影響した。特に非農業者は出身地の遠近で『美しさ』と『親しみ』の影響度合いが異なった。『美しさ』は「景観形成」や「音環境」といった個人の視覚や聴覚から判断できる情報を元にし、『親しみ』は「地域性」や「有効性」といった個人の視覚や聴覚だけでは相対的に判断しがたい情報を元にしたことは、出身地によって選好性評価の判断材料に差があることが示唆された。また、農業者と非農業者は本来的な機能に対して着目する程度に差が見られたものの、農業利用される揚水水車であることが非農業者の選好性評価にも寄与する傾向も示された。

ところで、揚水水車は住民から様々な理由で好ましいと評価されるが、特に「地域性」や「景観形成」は、特に多くの住民が揚水水車を好ましいと評価する具体的な理由であり、揚水水車の存在が住民に寄与する効果と推察される。これらは揚水水車が有する、主な新たな機能と考えられ、

揚水水車を好ましいと評価する人は、それらの機能があると判断することで親しみや美しさがあると判断する。住民に親しみや美しさを感じさせることが、揚水水車の新たな機能が発揮する価値と考えられる。

4.6 小括

- ① 属性の如何に拘わらず、多数の住民が揚水水車を好ましいと評価した。
- ② 都市近郊地区で揚水水車を灌漑利用する岡山県倉敷市祐安地区では、揚水水車を好ましいと評価する際に着目する点として、農業利用という目的を果たしていること（有効性）、環境にやさしいこと（環境配慮）、祐安地区の地域性があること（地域性）、音が良いこと（音環境）が挙げられた。それらが『親しみ』、『美しさ』、『安らぎ』といった上位の評価項目を通して揚水水車の「選好性」に繋がる評価構造が示された。但し、選好性評価の決定に最も影響を及ぼす抽象的判断は出身地によって異なり、岡山県外生まれの住民は『美しさ』で、それ以外の住民は『親しみ』であり、出身地が祐安地区から遠くなるにつれて、選好性評価を説明する抽象的な判断が『親しみ』から『美しさ』へと段階的に変化する傾向が示された。
- ③ 農家率が50%近い三重県伊賀市上林地区において、農業者と非農業者の選好性評価の決定要因を比較すると、農業者は揚水水車の利用により近い立場であるために、『便利さ』の判断で揚水水車の本来的機能を明確に意識することが示された一方、新たな機能に関する「歴史性」や「地域性」がある揚水水車に『安らぎ』を感じることで選好性評価の決定に影響する構造が見られた。他方、非農業者は、「地域性」や「景観形成」といった新たな機能に関する具体的判断が選好性評価の決定に影響し、農業者と共通する評価構造は示されなかった。しかし、『親しみ』は「地域性」と「有効性」の判断で説明されており、非農業者も揚水水車の実用性に注目していることが示された。また、「景観形成」が寄与する『美しい』揚水水車が好ましいと評価しており、揚水水車に対する美意識に関する評価構造を重視する可能性が示された。
- ④ 「地域性」や「景観形成」は、特に多くの住民が揚水水車を好ましいと評価する具体的な理由であり、揚水水車の存在が住民に寄与する効果と推察される。これらは揚水水車が有する、主な新たな機能と考えられ、揚水水車を好ましいと評価する人は、それらの機能があると判断することで親しみや美しさがあると判断する。すなわち、住民に美しさや親しみを感じさせることが、揚水水車の新たな機能が発揮する価値と推察する。

V 非農業者住民が揚水水車の保存活動に参加するための動機が決定される要因

5.1 はじめに

II章で示したように、最近では集落ぐるみで揚水水車の保存活動を行っている地区が散見される。このような保存活動に参加している集落の住民は、地域性醸成機能や景観形成機能といった、IV章で明らかにした揚水水車が有する新たな機能を今後も発現させるために保存活動に参加していると考えられる。しかし、具体的に揚水水車のどのような機能に対して、住民が自ら保存活動に参加してでも保存したいと考えるのかは不明である。揚水水車が有する機能でも、住民が自ら関わってでも残したい機能は、そうでない機能と異なる、揚水水車が有する特に重要な機能と考えられる。そこで本研究は、住民の揚水水車の保存活動に参加するための動機が決定される要因を、揚水水車が有する機能に対する住民の評価を考慮して明らかにする。その上で、住民が自ら関与してまで保存したい、揚水水車が有する機能を検討する。なお、ここでは特に非農業者住民を対象とした。その理由として、IV章で農業者と非農業者で重視する揚水水車が有する機能が異なることが示されたが、ここでは特に非農業者住民が評価の対象とする傾向が強い新たな機能に着目するためである。

5.2 対象地区

対象地区は、IV章と同じく直径1.6mから2.1mの揚水水車 (Fig. 58) が21基^{※5}利用される倉敷市祐安地区 (人口276人 (2008年3月)) である。祐安地区は、非農業者住民が多くを占める都市近郊の混住化集落であるが、概要は4-2を参照されたい。

5.3 研究方法

5.3.1 環境配慮行動の規定要因に関する既往研究レビュー

揚水水車の保存活動を行う人は、II章の聞き取り調査で明らかになったように、揚水水車を地域資源と認識する等の要因があるものと考えられる。その要因を明らかにするためには、人間の意思決定プロセスを解析する必要がある。揚水水車の保存活動は、環境の保全に寄与しようとする環境配慮行動と同等と考えられる。揚水水車は農村資源の一つと考えられるが、農村資源に対する環境配慮行動に関する既往研究を見ると、水谷ら (2006) は、兵庫県寺田池で行われる保全活動への住民の参加に関して、寺田池に対する関心と保全活動への態度が関係すること等を明らかにした。今井ら (2010) は、兵庫県加古川市投松集落においてため池の環境保全活動の態度や行動意図は、従来の農業に関する価値観に加えて生態系保全等の環境に関する価値観も影響することを明らかにした。また、山本ら (2010) は北海道北見地方の農業水利施設を事例に非農業者の維持

管理作業への参加意志に多面的機能への関心が影響することを明らかにした。このように、農村資源の保全活動への住民等の参加には、その農村資源に対する関心が影響し、特に生態系保全のような多面的機能に対する認識も大きく影響することが示された。しかし、揚水水車の保存活動についても、これらと同様かは不明である。

本研究では、揚水水車の保存活動への参加動機に影響を及ぼす機能で、既に聞き取り調査から定性的に明らかになっている地域資源としての機能が挙げられることを確認し、それ以外の機能の有無を検討する。その結果をもとに、住民が自ら保存活動に参加してでも保全したい機能を解明する。

5.3.2 揚水水車の保存活動への参加動機に関する心理プロセスモデル

揚水水車の保存活動への参加動機を決定する要因は、三阪の心理プロセスモデルと評価構造モデルの統合モデル (三阪ら, 2006b) (以下三阪モデル) を援用した。三阪モデル (Fig. 59) は、心理プロセスモデルにおける意思決定 (三阪, 2003) を認知、知識、関心、動機、行動意図、行動の6段階で説明したものである。小池ら (2003) によれば、動機とは対象に対してなんらかの関わりを持ちたいと考える段階だが、漠然とした目的意識は有しているものの明確



Fig. 58 祐安地区の揚水水車
Irrigation Water Wheel in Sukeyasu district

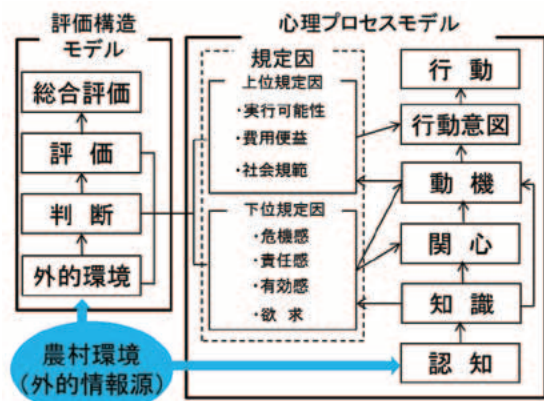


Fig. 59 三阪モデル (一部改変)

Misaka's perception-action model for environmental affair

※5 祐安地区内の農業用水路に揚水水車は22基存在するが、内1基は南隣の宮前地区の水田を灌漑している。

な行動のイメージはまだないと定義される。動機に影響を及ぼす関心、知識のうち関心の定義は、対象に対して関心や興味を有している段階、知識の定義は対象について「知っている」段階とされる。動機や関心を規定する要因（以下規定因）として、危機感、責任感、有効感、欲求がある。このうち前者3項目は、広瀬（1995）が環境リスク認知（問題があることを認知しているか）、責任帰属認知（問題に対して責任を負うと認知しているか）、対処有効性認知（対処することで問題が解決すると認知しているか）と定義したものであるが、欲求は三阪が、動機付けには内発的なもの（課題をすることが目標；満足感を得る等）か、外発的なもの（それに付随する他の何かが目標；金銭を得る等）があり、一般的に内発的であるほど動機付けが高いことに着目して設定した規定因である。さらに、心理プロセスモデルの規定因には評価構造モデルの外的環境、判断、評価が影響を及ぼす。

三阪モデルを本研究に援用することを考えると、非農業者住民は農村資源を直接利用する機会が少ないため、責任感よりも農村資源を保存したいとする欲求の方がより影響を及ぼすものと考えられる。よって、Fig. 59 で示される各階層のうち分析対象である動機が形成されるプロセスに着目して、責任感を除いた Fig. 60 のようなモデル^{※6}を設定して動機の決定に影響を及ぼす要因を解析した。

5.3.3 質問項目

住民の揚水水車に対する選好性の評価構造と保存活動参加動機の決定要因を知るためにアンケート調査を行った。具体的には、2008年2～3月に祐安地区全世帯数108世帯のうち町内会に参加する98世帯を対象に水利委員に配布を依頼し、回収は水利委員による戸別回収と郵送による直接回収を併用した。アンケート票は1世帯あたり2票配布し、88世帯151票^{※7}回収された。

質問項目はTable 25に示した。Q1～Q14は心理プロセスモデルに関する質問項目で、知識の質問によって関心の回答結果に影響を及ぼすことを避けるために、関心に関する項目→動機に関する項目→知識に関する項目の順番に質問した。Q15～Q29は評価構造モデルに関する質問項目である。両モデルとも回答はリッカート法による積極回答から消極回答までの4段階評価(例：とても関心がある【1点】-やや関心がある【2点】-あまり関心がない【3点】-全く関

心がない【4点】)で求めて点数を与え、量的変数として扱った。

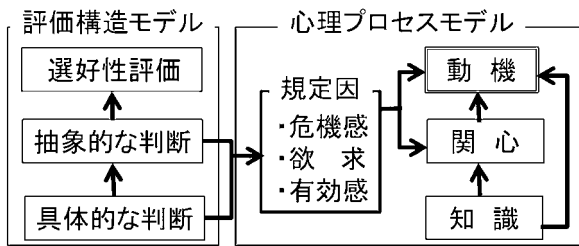


Fig. 60 揚水水車の保存活動への参加動機に関する心理プロセスモデル

Psychology-process model of motive of participation for conservation action of IWW

※6 評価構造モデルの判断階層を具体的な判断と抽象的な判断の2階層としたが、そのようにした理由は、評価グリッド法を用いて揚水水車の評価構造を構築したところ、最も下位に位置づく階層の各要因が、三阪モデルにおける外的環境ではなく判断に近いと考えられたためである。また、祐安地区では保存活動が実施されていないため、心理プロセスモデルは動機を最上位において解析を行った。

※7 1人が複数票を回答していないか点検を行ったが、回答や属性データの重複等の不自然な点はないと判断した。

Table 25 質問項目^{※8}
Question Items

質問			
心理プロセスモデル	関心	Q1	あなたは祐安地区の数の増減に関心がありますか
		Q2	あなたは祐安地区の農業用水路のゴミの量に関心がありますか
		Q3	あなたは祐安地区の水田の増減の関心がありますか
		Q4	あなたは地球温暖化問題に関心がありますか
		Q5	あなたは祐安地区の景観に関心がありますか
	動機	Q6	あなたは祐安地区の揚水水車の保存に関わりたいですか
		Q7	あなたは祐安地区の揚水水車が利用され始めた時期を知っていますか
	知識	Q8	あなたは農業者が揚水水車を用いてどのようにして水田に水を入れているか知っていますか
		Q9	あなたは揚水水車がエンジンつきポンプと比べて優れている点を具体的に知っていますか
		Q10	あなたは揚水水車が破損する原因を知っていますか
		Q11	あなたは揚水水車が現在国内でどの程度利用されているか知っていますか
規定因	Q12	将来的に揚水水車の数が減少すると思いますか(危機感)	
	Q13	揚水水車のある風景を後世に残したいと思いますか(欲求)	
	Q14	揚水水車のある風景を後世に残すために保存活動を行うことが有効だと思いますか(有効感)	
評価構造モデル	具体的な判断階層	Q15	揚水水車は農業に役立っていると思いますか(有効性)
		Q16	揚水水車は環境にやさしいと思いますか(環境配慮)
		Q17	揚水水車は風情を感じさせるとと思いますか(風情)
		Q18	揚水水車は景観形成に寄与していると思いますか(景観形成)
		Q19	揚水水車は祐安らしい施設だと思いますか(地域性)
		Q20	揚水水車は歴史性があると思いますか(歴史性)
		Q21	揚水水車は音が良いと思いますか(音環境)
		Q22	揚水水車は水質浄化に寄与していると思いますか(水質浄化)
	抽象的な判断階層	Q23	揚水水車は整然としていると思いますか(整然)
		Q24	揚水水車は季節感があると思いますか(季節感)
		Q25	揚水水車に対して親しみを感じるとと思いますか(親しみ)
		Q26	揚水水車があるとうれしいと思いますか(うれしさ)
		Q27	揚水水車があると安らぎを感じるとと思いますか(安らぎ)
		Q28	揚水水車は美しいと思いますか(美しさ)
※	Q29	揚水水車があることは好ましいと思いますか	
属性	性別・年齢層・出身地・居住年数		

※:選好性評価

※8 有効感(Q14)は、広瀬モデルにおける対処有効性認知と異なる。広瀬モデル(広瀬, 1995)では対処有効性認知は、自己の活動が目的達成に有効と認識するか否かを問う項目であるが、本研究では、自己の参加に拘わらず保存活動が目的達成に有効と認識するか否かを問う内容になっている。

5.4 結果

5.4.1 心理プロセスモデル内での動機の決定要因

ここでは、心理プロセスモデルに関する質問に1問以上の無回答がある票と、農業者居住世帯からの回答を除外した78世帯127票 (Table 26) を対象に分析を実施した。ところで、除外した農業者居住世帯は6世帯であったが、農林業センサス (2005年) によれば、祐安地区の販売農家世帯数は6世帯であり、非農業者世帯を適切に抽出したと判断する。また、25歳未満の回答者を除き各年齢層で祐安地区人口の40%以上を分析対象としており、性別比も年齢層で大きく偏っておらず、有効回答は祐安地区を代表するデータとして妥当と判断する。

(1) 質問項目の回答結果

Fig. 61に知識に関する回答結果を示す。祐安地区における揚水水車の利用開始時期と国内での揚水水車の利用状況に関する知識は、回答者の約8割は有していない一方、それ以外の項目は少なくとも半数の回答者は認識していることが示された。特に揚水水車の利用方法についての知識を有する割合が高いが、これは、直接揚水水車を観察すればわかる、比較的得やすい情報と考えられた。

Fig. 62に関心に関する回答結果を示す。知識と異なり、全ての質問で少なくとも5割以上の関心があることが明らかになった。しかし、祐安地区の揚水水車の数の増減や祐安地区の水田の増減といった、揚水水車に直接関係するような関心については、他の項目と比較して相対的に低い割合であることが明らかになった。

Fig. 63に動機に関する回答結果を示す。揚水水車保存活動への関与は、肯定的な人と否定的な人がほぼ同数で、その中でも積極回答の人数も類似したものであった。

Fig. 64に規定因に関する回答結果を示す。揚水水車が将来的に減少すると考える人が約8割で、現状では現在の規模での揚水水車の利用を継続することが困難であると認識されていることが示された。一方、揚水水車のある風景を後世に残したいと思う回答者は約9割にのぼり、8割の回答者は、そのために保存活動が有効と考えていることが明らかになった。

(2) 知識・関心の構成

まず知識と関心の回答傾向の類似する質問を整理するため、因子分析 (両者とも主因子法・バリマックス回転) を行った (Table 27)。その結果、知識に関する5つの質問は、揚水水車の利用方法、優位性、破損要因といった揚水水車の機能に関する第1因子と揚水水車の利用開始時期と国内の利用状況といった揚水水車の地域性、希少性といった揚水水車の情報に関する第2因子に整理され、第1因子を『機能』、第2因子を『情報』と命名した。関心に関する5つの質問は、祐安地区の水車数の増減、祐安地区の水田の増減、祐安地区の景観といった、かんがい用揚水水車の存廃に関する第1因子「存廃」と、祐安地区の水路のごみの量と地球温暖化といった、揚水水車の破損要因である水路のごみや温室効果ガスを排出しないかんがい方法といった揚水水車の性能発揮に関する第2因子「性能」に整理さ

Table 26 年齢層別人口と回答者の比率

Population by age-group and ratio of answerer

年齢層	年齢層別人口 (2008年3月)	回答者数	回答者数 (男性)	回答者数 (女性)	人口に対する回答者の割合 (%)
25歳未満	54	4	1	3	7.4
25-44歳	66	29	13	16	43.9
45-64歳	80	47	20	27	58.8
65歳以上	76	46	23	23	60.5
無回答	0	1	1	0	-
合計	276 (男129/女147)	127	58	69	46.0

・年齢層別人口の値は倉敷市統計書の町名別住民基本台帳人口を引用した。

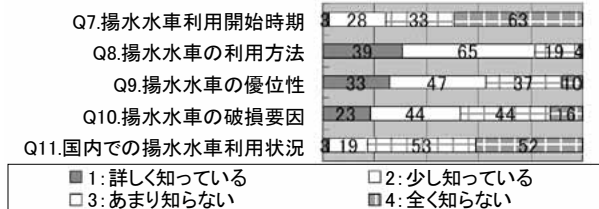


Fig. 61 知識に関する質問の回答結果

Response for knowledge

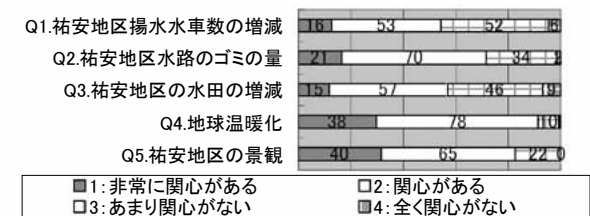


Fig. 62 関心に関する質問の回答結果

Response for regard

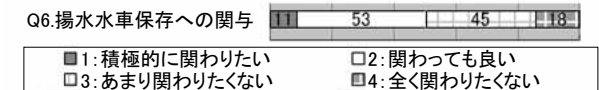


Fig. 63 動機に関する質問の回答結果

Response for motive

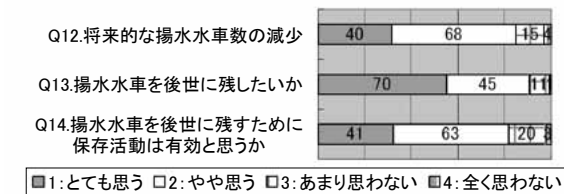


Fig. 64 規定因に関する質問の回答結果

Response for regulative factor

Table 27 知識・関心の因子分析結果

Factor analysis for knowledge and regard

知識	F1		F2		関心	F1		F2	
	0.31	0.59	0.76	0.32		0.70	0.41	0.54	0.64
Q7.祐安地区の揚水水車利用開始時期	0.31	0.59	Q1.祐安地区の揚水水車数の増減	0.70	0.41				
Q8.揚水水車の利用方法	0.76	0.32	Q2.祐安地区水路のごみの量	0.54	0.64				
Q9.揚水水車の優位性	0.74	0.43	Q3.祐安地区の水田の増減	0.77	0.34				
Q10.揚水水車の破損要因	0.63	0.54	Q4.地球温暖化	0.26	0.62				
Q11.国内での揚水水車利用状況	0.30	0.63	Q5.祐安地区の景観	0.66	0.32				
二乗和	1.71	1.32	二乗和	1.88	1.19				
累積寄与率	34.18%	60.57%	累積寄与率	37.51%	61.29%				
解釈	機能	情報	解釈	※1	※2				

※1: かんがい用揚水水車の存廃に関する関心

※2: かんがい用揚水水車の性能に関する関心

れた。以下の分析では、これらの因子ごとに選択された質問項目の評点の平均値を用いた。

(3) 属性の違いが動機の有無に及ぼす影響

動機が肯定的（回答が非常に関与したいと関与しても良い）な人と否定的（あまり関与したくないと全く関与したくない）な人の属性差を Table 28 に示す。性別では女性が、年齢層では 25 歳以上の年少者ほど、職業では専業主婦が、生まれた場所では祐安地区から遠くなるほど、居住年数では 5~19 年で動機が否定的な傾向があることが明らかになった。動機 (Q6) と属性 (Q15~19) のクロス集計を行い、 χ^2 検定を行ったところ、生まれた場所 (Q18) のみ有意確率が 1%未満であった。そこで、生まれた場所ごとの心理プロセスの質問の平均評点 (Fig. 65) を見ると、祐安地区生まれとそれ以外の回答者で平均評点が分かれる傾向が示され、祐安地区生まれの平均評点がより肯定的であった。祐安地区生まれと岡山県外生まれの平均評点の差を検定したところ、地球温暖化への関心 (Q4) と規定因 (Q12~14) 以外の全ての質問項目で、1%水準で有意な差があった。特に知識に関する質問項目で両者の差が大きい傾向が見られた。同様に倉敷市生まれと岡山県外生まれの平均評点の差を検定したところ、5%水準でも有意な差がある質問項目はなく、祐安地区生まれと祐安地区生まれ以外で回答傾向に差があることが示唆された。

(4) 属性の違いを考慮した動機決定に影響を及ぼす要因

i. 生まれた場所が動機決定に及ぼす影響

保存活動参加動機の決定要因を分析するために、パス解析によって心理プロセスモデルの要因連関図を構築する。階層間の関係は、上位の階層の質問項目を従属変数に、直下の階層の質問項目を独立変数とした重回帰分析(ステップワイズ法) (田中ら, 1995) によって採用された関係を全て採用して構築^{※9}した。階層間の関係の強弱は、標準偏回帰係数で判定した。なお、重回帰分析を行うにあたり VIF(分散拡大要因)値を指標に多重共線性の有無を確認し、多重共

※9 Fig. 60 の矢印の先(上位階層)を従属変数に、矢印の元(下位階層)を独立変数にした重回帰分析で採用された項目のうち、下位階層に関する質問項目について、さらにそれを従属変数、下位階層のさらに下位に位置する階層を従属変数とした重回帰分析を行うことで階層関係を構築した。

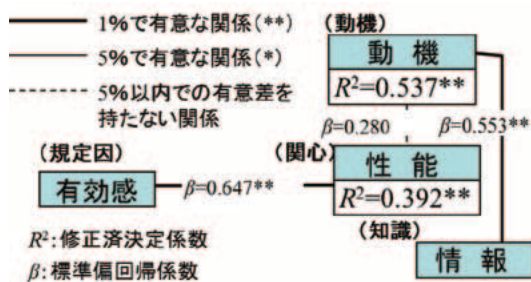


Fig. 66 保存活動参加動機の要因連関 (祐安地区生まれ:N=24)

Factor linkage for participating motive of conservation action (born in Sukeyasu district)

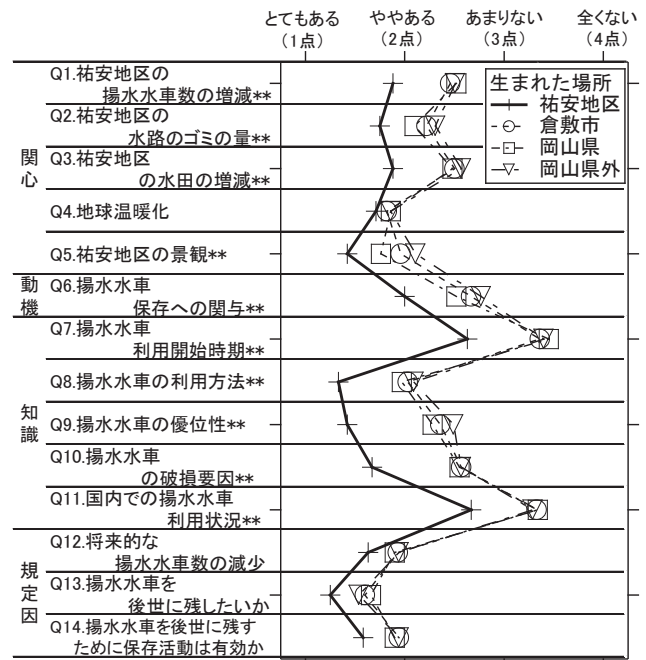
線性の発生はないと判断した。

祐安地区生まれ (Fig. 66) と祐安地区生まれ以外 (Fig. 67) の心理プロセスを構築したところ、モデルで設定したように、動機に規定因、関心、知識が影響する構造が示された。具体的には、祐安地区生まれの動機の決定に最も影響を及ぼす要因は、『情報』に関する知識であった。また、有効感

Table 28 属性ごとの動機の有無 Motive status for each attribute

動機	肯定的	否定的	合計	動機	肯定的	否定的	合計
性別	男性 33(56.9)	25(43.1)	58	25歳未満	3(75.0)	1(25.0)	4
	女性 31(44.9)	38(55.1)	69	25~44歳	13(44.8)	16(55.2)	29
年齢層				45~64歳	23(48.9)	24(51.1)	47
				65歳以上	25(54.3)	21(45.7)	46
職業				生 祐安地区	19(79.2)	5(20.8)	24
				倉敷市	18(48.6)	19(51.4)	37
				岡山県	14(48.3)	15(51.7)	29
				岡山県外	12(34.3)	23(65.7)	35
				5年未満	7(59.1)	7(50.0)	14
				5~19年	5(23.8)	16(76.2)	21
				20~39年	29(52.7)	26(47.3)	55
				40年以上	22(62.9)	13(37.1)	35

※括弧内の数字は合計に対する割合(%)



**：祐安地区と岡山県外で1%水準で有意な差がある。

Fig. 65 生まれた場所ごとの平均評点 Average score of each birthplace

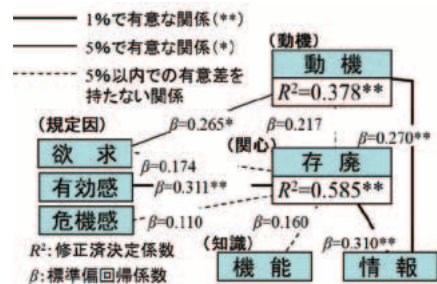


Fig. 67 保存活動参加動機の要因連関 (祐安地区生まれ以外:N=101)

Factor linkage for participating motive of conservation action (except who born in Sukeyasu district)

が「性能」に関する関心を決定して、それが動機の決定に影響するパスも見られた。

祐安地区生まれ以外の動機の決定に影響を及ぼした項目は強い順に、『情報』に関する知識、規定因の欲求、「存廃」に関する関心であった。「存廃」に関する関心の決定に影響を及ぼした項目は強い順に、規定因の有効感、『情報』に関する知識、規定因の欲求、『性能』に関する知識、規定因の危機感であった。

生まれた場所の違いが動機の決定に及ぼす影響をパスの影響力から見る (Table 29) と、生まれた場所に拘らず『情報』に関する知識が動機の決定に最も影響力があり、祐安地区生まれは動機の決定に特に強く影響した。一方『機能』に関する情報はほとんど影響しなかった。規定因との関係は、両者とも有効感が動機の決定に関心を經由して間接的に影響し、祐安地区生まれ以外は、欲求が動機の決定に直接影響した。危機感とは両者とも動機の決定に大きく影響しなかった。

ii. 属性による『情報』に関する知識の差

動機の決定に最も影響を及ぼした『情報』に関する知識の有無の属性差を見るために、『情報』の因子を構成する Q7, Q11 の合算平均で中間値の 2.5 点を閾値としたそれぞれの属性の分布を示す (Table 30)。男性で年齢層が高く、生まれた場所が祐安地区に近く、居住年数が長いほど『情報』に関する知識を知っている傾向があった。一方、女性や職業が専業主婦やパートの人の過半は、この知識がない傾向が示された。

5.4.2 心理プロセスモデルと評価構造モデルの関連性

前項では、非農業者住民の揚水水車の保存活動へ参加する動機の決定要因を心理プロセスモデルから明らかにした。ここでは、揚水水車が有する新たな機能に対する評価が保存活動の参加動機の有無に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、心理プロセスモデルに選好性の評価構造が及ぼす影響を検討する。対象は、農業者世帯及び評価構造モデル及び心理プロセスモデルに関する質問に無回答がある票を除外した 75 世帯 120 票を対象とした (Table 31)。回答者の割合からは 25 歳未満の回答はほとんど得られなかったが、25 歳以上では回答率が集落人口の 50% 程度得られたため、25 歳以上の住民を対象とした解析結果として検討することとした。

(1) 選好性評価と心理プロセスの関連を考慮したグループ分け

揚水水車に対する選好性の評価構造と保存活動への参加動機の心理プロセスの関係を明らかにするにあたり、両者のクロス集計結果からグループ分けを行った (Table 32)。具体的には、選好性評価が肯定回答かつ保存活動への参加動機も肯定回答のグループ 1 (60 人)、選好性評価が肯定回答だが保存活動への参加動機が否定回答のグループ 2 (46 人)、選好性評価が否定回答かつ保存活動への参加動機も否定回答のグループ 3 (13 人) である。選好性評価が否定回答だが保存活動への参加動機が肯定回答は 1 人のみで解析の対象外とした。

Table 29 心理プロセス各項目の動機決定の影響力

Force of determination of motive at each item

		知識		規定因		
		機能	情報	危機感	欲求	有効感
祐安地区生まれ (N=24)	直接	-	0.553	-	-	-
	間接	-	-	-	-	0.181
	合計	-	0.553	-	-	0.181
祐安地区生まれ以外 (N=101)	直接	-	0.270	-	0.265	-
	間接	0.035	0.067	0.024	0.038	0.067
	合計	0.035	0.337	0.024	0.303	0.067

※表の数字は標準偏回帰係数(以下β)

※間接: 動機から関心のβと関心から各項目のβの積

Table 30 属性ごとの『情報』に関する知識の差

Attribution difference of knowledge on 'information'

性別	動機	知っている			知らない		
		知っている	知らない	合計	知っている	知らない	合計
男性	20(34.5)	38(65.5)	58	25歳未満	1(25.0)	3(75.0)	4
	11(15.9)	58(84.1)	69	25~44歳	5(17.2)	24(82.8)	29
女性	8(23.5)	26(76.5)	34	45~64歳	9(19.1)	38(80.9)	47
	0	11(100)	11	65歳以上	16(34.8)	30(65.2)	46
職業	6(50.0)	6(50.0)	12	生 祐安地区	13(54.2)	11(45.8)	24
	1(33.3)	2(66.7)	3	場 倉敷市	7(18.9)	30(81.1)	37
専業主婦	1(4.5)	21(95.5)	22	所 岡山市	4(13.8)	25(86.2)	29
	13(34.2)	25(65.8)	38	た 岡山県外	7(20.0)	28(80.0)	35
無職	1(20.0)	4(80.0)	5	居 5年未満	0	14(100)	14
	1(20.0)	4(80.0)	5	住 5~19年	2(9.5)	19(90.5)	21
その他	1(20.0)	4(80.0)	5	年 20~39年	15(27.3)	40(72.7)	55
	1(20.0)	4(80.0)	5	数 40年以上	14(40.0)	21(60.0)	35

※括弧内の数字は合計に対する割合(%)

※知っている:『情報』の平均評点が2.5点以下 知らない:『情報』の平均評点が2.51点以上

Table 31 年齢層別人口と回答者の比率

Population by age-group and ratio of questionnaire

年齢層	年齢層別人口 (2008年3月)	回答者数	回答者数 (男性)	回答者数 (女性)	人口に対する回答者の割合(%)
25歳未満	54	4	1	3	7.4
25-44歳	66	29	13	16	43.9
45-64歳	80	43	20	23	53.8
65歳以上	76	43	22	21	56.6
無回答	0	1	1	0	-
合計	276 (男129/女147)	120	57	63	43.5

・年齢層別人口の値は倉敷市統計書の町名別住民基本台帳人口を引用した。

Table 32 選好性評価と参加動機のクロス集計

Cross table between preference and participating motivation

	揚水水車があることは好ましいと思うか(選好性評価)				合計	
	1:とても思う	2:やや思う	3:あまり思わない	4:全く思わない		
あなたは祐安地区の揚水水車の保存に関わりたいか(動機)	1:とても関わりたい	10	1	0	0	11
	2:関わっても良い	42	7	1	0	50
	3:あまり関わりたいくない	12	24	6	0	42
	4:全く関わりたいくない	4	6	6	1	17
合計	68	38	13	1	120	

特にグループ 2 は、選好性評価と参加動機の賛否がねじれているため、その要因をグループ 1 との比較を通して検討する。

(2) 各グループの特徴

i. 属性差

グループ 1~3 の属性差を見る。職業 (Table 33) を見ると、対象の 7 割前後はフルタイムで勤めている (以下常勤とする)、専業主婦、無職で占められた。グループ間では、属性に特筆すべき偏りはみられなかった。

出身地 (Table 34) を見ると、対象地区の祐安地区から倉

敷市, 岡山県, 岡山県外と祐安地区から遠くなるにつれて, グループ1は構成する割合が減少し, グループ2は構成する割合が増加する傾向が見られた。グループ3はグループ1,2のような傾向は見られなかった。

居住年数 (Table 35) を見ると, 回答者の多くが居住年数20年以上で, 居住年数が長いほどグループ1に属する割合が高くなる傾向が見られた。また, 居住年数が40年以上では, グループ3に属する人はおらず, 全ての人が揚水水車を好ましいと評価した。

ii. 平均評点差

評価構造モデル及び心理プロセスモデルに関する質問項目の平均評点差を見ると, 評価構造モデル (Fig. 68) では, グループ1とグループ2の間の平均値の差の検定で, 1%水準で有意な差が確認されたが, 程度の差はあっても両者ともほぼ全てで肯定的な回答をした。一方でグループ3は具体的な判断ではやや肯定的な回答がある一方で, 抽象的な判断や選好性は否定的な回答であった。心理プロセスモデル (Fig. 69) では, グループ1とグループ2の間の平均値の差の検定では「将来的に揚水水車の数が減少すると思えますか (Q12)」以外は, 1%水準で有意な差が確認され, ほとんどの住民は今後揚水水車が減少すると考えていることが示された。このように, グループ1は評価構造モデルと心理プロセスモデルの質問で肯定的な回答をし, グループ3は両者のモデルで否定的な回答をし, グループ2は評価構造モデルでは肯定的だが心理プロセスモデルでは否定的な回答をする傾向が示された。

iii. 階層間の関係を考慮した動機の決定要因差

Fig. 60に示した評価構造モデルと心理プロセスモデルの関係を明らかにするために, パス解析によって心理プロセスモデルの要因連関図を構築する。階層間の関係は, 上位の階層の質問項目を従属変数に, 直下の階層の質問項目を独立変数とした重回帰分析(ステップワイズ法) (田中ら, 1995) によって採用された関係を5%以下で有意な関係で説明できるまで繰り返すことで構築^{※10}した。階層間の関係の強弱は, 標準偏回帰係数で判定した。なお, 重回帰分析を行うにあたり VIF(分散拡大要因)値を指標に多重共

線性の有無を確認し, 多重共線性の発生はないと判断した。

Fig. 70に全120人の心理プロセスモデルにおける階層構造を示した。動機の決定要因として知識の「利用開始時期

※10 Fig. 60の矢印の先(上位階層)を従属変数に, 矢印の元(下位階層)を独立変数にした重回帰分析で採用された項目のうち, 下位階層に関する質問項目について, さらにそれを従属変数, 下位階層のさらに下位に位置する階層を従属変数とした重回帰分析を行うことで階層関係を構築した。

Table 33 グループごとの職業

Position for each group

	1:勤めている (常勤)	2:勤めている (パート)	3:自営業	4:学生	
グループ1	18	4	6	2	
グループ2	12	6	4	1	
グループ3	3	0	1	0	
合計	33	10	11	3	
	5:専業主婦	6:無職	7:その他	8:無回答	合計
	8	20	1	1	60
	10	11	2	0	46
	3	4	1	1	13
	21	35	4	2	119

Table 34 グループごとの出身地

Birthplace for each group

	1:祐安地区	2:倉敷市	3:岡山県	4:岡山県外	5:無回答	合計
グループ1	19	15	14	11	1	60
グループ2	5	14	9	18	0	46
グループ3	5	3	4	0	1	13
合計	29	32	27	29	2	119

Table 35 グループごとの居住年数

Residence year for each group

	1:-4	2:5-19	3:20-39	4:40-	5:無回答	合計
グループ1	6	5	26	22	1	60
グループ2	5	11	19	11	0	46
グループ3	2	5	5	0	1	13
合計	13	21	50	33	2	119

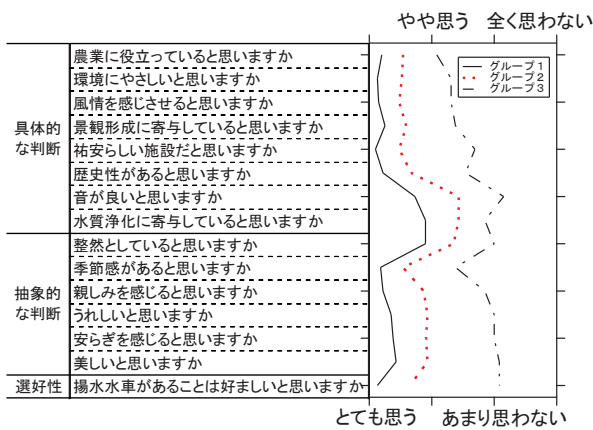


Fig. 68 評価構造モデルの平均評点
Average score of Evaluation Structure Model

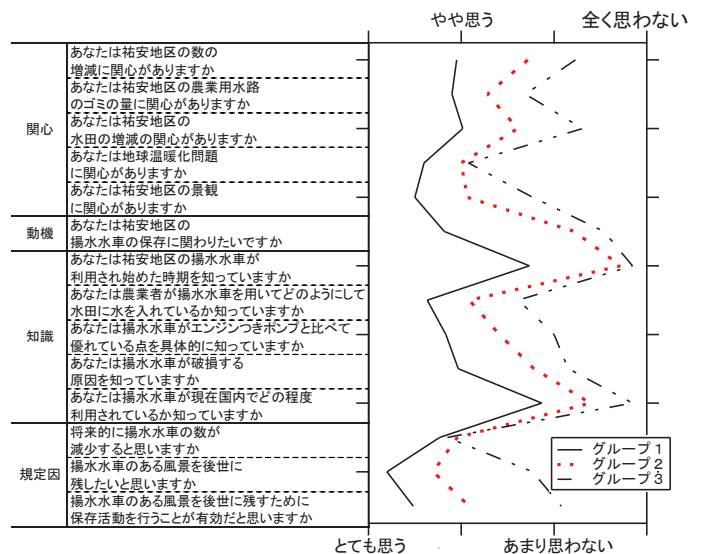


Fig. 69 心理プロセスモデルの平均評点
Average score of Psychological Process Model

(Q7)、「利用法(Q8)」、「破損(Q10)」、「国内利用状況(Q11)」および規定因の欲求(Q13)、有効感(Q14)が影響する関係が明らかになった。これは Table 29 とほぼ同様の結果である。

Fig. 60 より評価構造モデルは心理プロセスモデルの規定因と関係するため、有効感及び欲求の決定に評価構造モデルが及ぼす影響を検討する。欲求と評価構造モデルの関係 (Fig. 71)、有効感と評価構造モデルの関係 (Fig. 72) を示す^{※11}。グループ 1 の欲求と有効感の決定に評価構造モデルの具体的な判断階層の質問項目が及ぼす影響 (Table 36) を見ると、欲求は地域性や音環境、環境配慮に関する判断が

影響する一方で景観形成は負の関係で、特に景観が良いから後世に残したいと考えていないことが示唆された。有効感には風情や歴史性に関する判断が強く影響した。グループ 2 は、グループ 1 よりも決定要因が単純で、欲求の決定に影響する具体的な判断階層は、環境配慮、歴史性、地域性で、有効感の決定には風情のみ影響した。

※11 グループ 3 の規定因と評価構造モデルの関係は、母数が少なく(N=13)、同様の解析が困難であった。

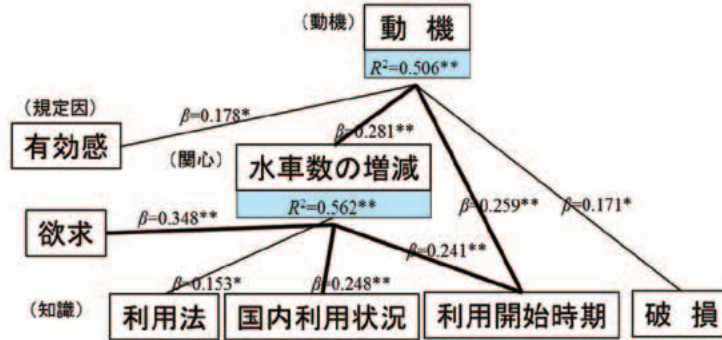
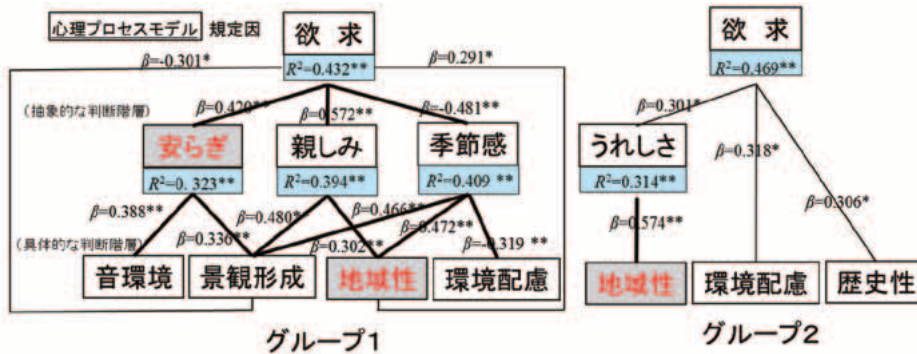


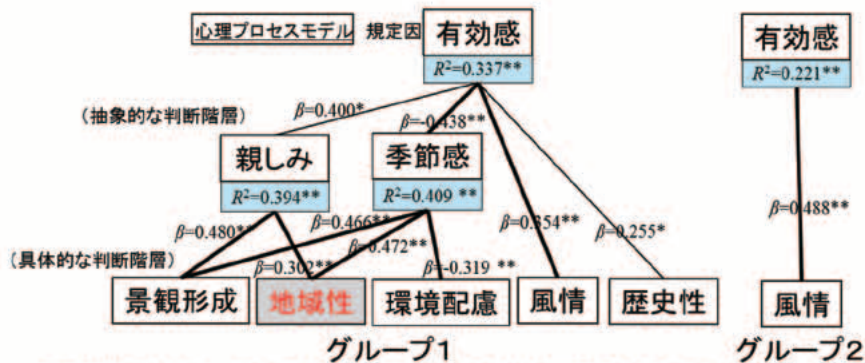
Fig. 70 心理プロセスモデルの要因連関 (N=120)
Factor linkage for Psychological Process Model



- 重回帰分析(ステップワイス法)で関係を抽出。P値が5%以下の関係のみで検討
- 網掛けの要因は評価構造モデルの嗜好性評価の決定にも影響

Fig. 71 欲求と評価構造モデルの関係

Relationship between Evaluation Structure Model and appetite of determinant



- 重回帰分析(ステップワイス法)で関係を抽出。P値が5%以下の関係のみで検討
- 網掛けの要因は評価構造モデルの嗜好性評価の決定にも影響

Fig. 72 有効感と評価構造モデルの関係

Relationship between Evaluation Structure Model and efficacy of determining factor

ところで評価構造モデルにおける選好性評価の決定要因 (Fig. 73) を見ると、グループ1は選好性評価の決定に安らぎや地域性といった、欲求や有効感の決定要因でもある質問項目が含まれ、標準偏回帰係数を見てもそれらが強く影響している一方で、グループ2は、地域性に関する判断のみ選好性評価と欲求の両者に影響を及ぼす項目として抽出されたが、標準偏回帰係数の値からもグループ1と比較して心理プロセスモデルに及ぼす影響は弱いと考えられた。

5.5 小括

5.5.1 心理プロセスモデルによる保存活動への参加動機の決定要因

心理プロセスモデルを用いた解析から、祐安地区における揚水水車の利用開始時期や国内での利用状況といった『情報』に関する知識の有無は、属性に拘らず非農業者住民の揚水水車の保存活動への参加動機の決定に影響を及ぼすことが示された。つまり非農業者住民は、祐安地区で利用され続けている‘地域性’と、わが国で揚水水車がある集落が非常に少なくなっているという‘希少性’が、揚水水車を保存する価値がある要件として考えていることが示唆された。

これらの知識は祐安地区生まれや居住年数の長い人で知っている傾向があり、それらの人の参加動機は相対的に高い。特に祐安地区生まれは、動機の決定にこの知識を重視しており、自らが生まれた集落にある地域性や希少性ある地域アイデンティティとして揚水水車を捉えていることが

考えられた。

参加動機が否定的な傾向を示す属性として、女性や専業主婦、岡山県外生まれ、居住年数5~19年があったが、これらの属性は『情報』に関する知識を知らない人が特に多い属性でもある。今後、揚水水車の保存活動を集落ぐるみで実施することになれば、特にこれらの属性に『情報』に関する知識を啓発することが、参加動機を有する人の底上げに有効と推察する。

生まれた場所の違いから揚水水車の保存活動への参加動機の違いをまとめると、祐安地区生まれは、水路のゴミの量や地球温暖化といった関心が動機の決定に寄与しており、心理プロセスを総合的に見ても、祐安地区における揚水水車の利用開始時期や国内での利用状況といったに関する知識を重視するものの多様な視点で動機を決定するのに対して、祐安地区生まれ以外は、関心「存廃」が動機の決定に影響し、心理プロセスを総合的に見ても、動機の決定に揚水水車の希少性や地域性、景観形成といったものが及ぼす影響が強い傾向が示唆された。

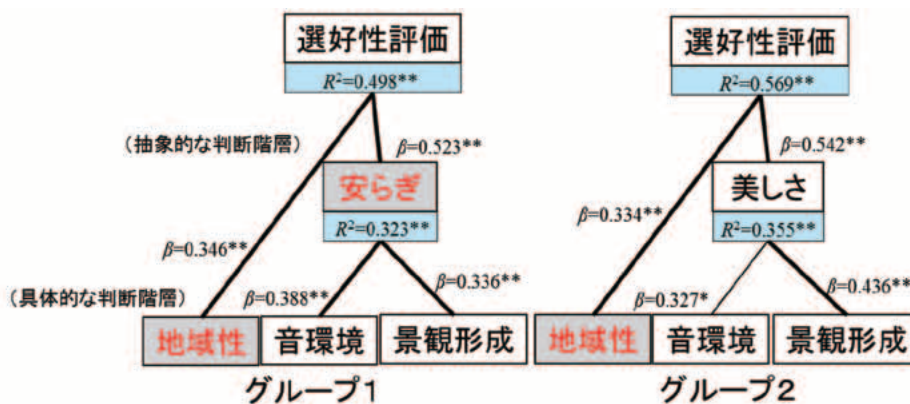
5.5.2 非農業者住民が自ら関わってでも残したい揚水水車が有する新たな機能

選好性評価と保存活動への参加動機の賛否を見ると、両方とも肯定的なグループ1と選好性評価は肯定的だが保存活動参加動機が否定的なグループ2に大別された。グループ1は地元生まれのおよそ3分の2が属するのに対してグループ2は岡山県外生まれのおよそ3分の2が属するといった違いが見られたが、それ以外の人の比率はほぼ同数で

Table 36 グループ1の規定因「欲求」・「有効感」の決定要因
Determinant of appetite and efficacy of determining factor in Group 1

欲求の決定に影響					有効感の決定に影響				
景観形成	地域性	環境配慮	音環境		景観形成	地域性	環境配慮	風情	歴史性
-0.301	0.291	0.000	0.000	直接	0.000	0.000	0.000	0.354	0.255
0.192	-0.054	0.153	0.163	間接	-0.012	-0.086	0.140	0.000	0.000
-0.109	0.237	0.153	0.163	合計	-0.012	-0.086	0.140	0.354	0.255

※数字は標準偏回帰係数(β)



- ・重回帰分析(ステップワイズ法)で関係を抽出。P値が5%以下の関係のみで検討
- ・網掛けの要因は心理プロセスモデルの規定因の決定にも影響

Fig. 73 評価構造モデルの要因連関
Factor linkage for Evaluation Structure Model for each group

あった。グループ1とグループ2で心理プロセスモデルの規定因と評価構造モデルとの関係の強弱を見ると、全体的にグループ1が規定因と関係が強い評価構造モデルの判断要素が多い傾向が見られた。保存活動への参加動機の決定要因に揚水水車に対する選好性の評価構造が及ぼす影響を検討した結果、心理プロセスモデルにおける規定因「欲求」と関係が強かった評価構造モデルにおける具体的な判断である「地域性」や「環境配慮」がグループ1と2の両方で影響した。

選好性評価の決定要因と保存活動への参加動機の決定要因の差異を見ると、グループ1は両者の決定要因で「地域性」と「安らぎ」が採用され、標準偏回帰係数を見ても強い関係を有するのに対しグループ2は「地域性」のみ採用され関係も弱かった。このように選好性評価が肯定的なのに、保存活動への参加動機が否定的な人は、両者の決定要因が異なることが明らかになった。

しかし、グループ1とグループ2の両者とも、保存活動への参加動機に影響を及ぼす評価構造モデルの具体的な判断階層の項目は「地域性」であった。つまり、揚水水車が有する新たな機能でも特に地域性醸成機能は、揚水水車を灌漑目的等で直接利用しない非農業者住民が、自ら行動をおこしてでも保存したい機能であることが明らかになった。

VI 結言

6.1 揚水水車の機能と価値の評価

揚水水車は古くからわが国で利用される歴史的農業水利施設であるが、近年ではポンプへの置き換えや減反等による耕作放棄等で、利用が減少している。そのような中、全国の悉皆調査から揚水水車の利用状況を整理した結果、従来からの灌漑目的での利用に加えて、観光目的での利用や保存活動が実施されるといった新たな利用が確認された。

そこで、従来からの灌漑目的での利用を、揚水水車の本来的な機能を発揮させるための利用、観光目的での利用や保存活動の実施を、揚水水車が有する新たな機能を発揮させるための利用と定義して、両者の機能とその機能の発揮によって得られる価値を検討した。

6.1.1 本来的な機能とその価値

本来的な機能は、揚水を行うことである。現実的に揚水水車が揚水目的で利用されるためには、受益水田が必要とする用水量を揚水できることが求められる。そこで、II章で現在も灌漑目的で利用される揚水水車の存続条件を検討した結果、例外はあるものの直径が1.5~2.5mで受益面積が0.2ha以下と小規模であること、水路床勾配が概ね0.2%より緩い水路に設置されることが明らかになった。これは現在まで淘汰を免れた条件であることから、経験的に揚水水車を用いた揚水に適した条件と考えられる。そこでこの存続条件で利用される揚水水車の本来的な機能を発揮することで得られる価値を明らかにするために、III章で存続条件から倉敷市祐安地区で利用される揚水水車を参考に直径2.0mの模型水車を製作して、模型実験を通して揚水水車の特性を検討した。その結果、回転数と揚水量や揚水効率、エネルギー利用効率との関係を定量的に明らかにした。例えば、倉敷市祐安地区で模型実験とほぼ同条件で利用される揚水水車は、日揚水量は77.8m³/d(0.92L/s)で、仕事率は約7.5W、エネルギー利用効率は約22%であることが明らかになった。

このように、揚水水車が利用するエネルギー量は、家庭で利用される電灯が消費するエネルギー量と同程度であり、本来的な機能の発現で得られる価値は、農業用水路(特に緩勾配水路)が賦存する微少なエネルギーを活用できることや電気代等の運用費の削減であることが明らかになった。

6.1.2 新たな機能とその価値

一方、観光目的で利用したり、保存活動によって維持しようとする新たな機能を明らかにするために、IV章で揚水水車が灌漑目的で利用される集落に居住する住民にアンケート調査を行い、揚水水車を好ましいと評価する要因を、住民の揚水水車に対する価値認識から検討した。その結果、住民が揚水水車を好ましいと評価する要因は、主に地域性があることや、景観形成に寄与すると考えることが明らかになった。つまり、新たな機能は、景観形成機能や、地域性を醸成する機能と考えられた。また、揚水水車にそのような機能があると判断することで、揚水水車に美しさや親

しみを感じることが明らかになった。つまり、住民に美しさや親しみを感じさせることが、揚水水車の新たな機能の発揮によって得られる価値と考えられた。特に、地域性醸成機能は、II章での保存活動実施地区における聞き取り調査から、保存活動を行うきっかけとして挙げられたことや、V章において、非農業者住民が揚水水車の保存活動に参加する動機の決定要因として強く影響した。よって、非農業者住民は、揚水水車が有する新たな機能のうち、地域性醸成機能を重視することが明らかになった。

6.2 揚水水車が有する機能を発揮させる今後の利活用策

揚水水車には、揚水目的での利用によって緩勾配水路が賦存する小規模なエネルギーでも利用できるといった価値を有することや、住民に地域性醸成機能や景観形成機能の発現を通して親しみや美しさを感じさせるといった価値を有することが明らかになった。このように、揚水水車を利活用することは、緩勾配な農業用水路に賦存する微少な流水エネルギーを活用したり、良好な農村空間の発現に有効であるといった社会的意義を有するものと推察され、今後は利用が維持されたり、普及されることが望まれる。そこで、本研究結果から、揚水水車の適切な利用方法を検討する。

まず、揚水目的で利活用するためには、揚水水車が必要用水量を揚水できることを定量的に示す必要がある。模型実験から揚水水車の揚水特性を検討した結果、水車の水受板を一定以上水没するように設置することや回転数が一定の範囲内で利用することで、相対的に良好な揚水性能を発揮するといった特性を有することが明らかになった。また、本実験で用いた水車のような筒を水車の外周に設置するタイプでは、筒の設置角度によって揚水性能に差が生じることが明らかになった。今後揚水水車を新規に設置する場合は、以上のような揚水特性に留意して揚水水車を製造、設置することが重要である。本実験条件のような、水路幅1.0mの水路に直径2.0mかつ幅0.8mでVU75タイプ(長さ400mm)の塩ビ管が8つ装備された揚水水車を設置した場合は、水受板の水没深を250mm以上にし、筒の設置角度を35~50°で利用する必要がある。この条件では回転数が概ね3~8rpmで揚水効率75%前後で回転数に応じた揚水量が得られ、最大で約7m³/h程度揚水された。日減水深等から計算される圃場単位用水量と、受益水田面積から期待される揚水量が明らかになることで、揚水水車適用の可否が定量的に判定される。

他方、揚水水車が有する新たな機能は、主に地域性醸成機能や景観形成機能である。これらの受益者は住民や来訪者と考えられるため、住民等が参加した揚水水車の保存活動の実施が、新たな機能を発揮させた利活用策と考えられる。揚水水車の保存活動への参加動機を決定する要因を、住民へのアンケート調査から検討したところ、特に非農業者住民の参加動機は、揚水水車がその集落で利用が始まった時期や、わが国での揚水水車の利用状況といった、揚水水車の地域性や希少性に関する知識の有無が強く影響する

ことが明らかになった。これらの知識は出身地等の属性で差異が見られた。よって、揚水水車が有する新たな機能を発揮させる利活用策として、保存活動を行う際には、揚水水車の地域性や希少性に関する情報の啓発を通して、多くの人にこれらの情報を知ってもらうことが効果的と考えられる。

6.3 結語(まとめと今後の課題)

近年、文化的景観は、世界遺産への登録やわが国での重要文化的景観の指定等を通して保全の対象になっている。文化的景観の定義は、地域における人々の生活又は生業及び当該地域の風土により形成された景観地で、我が国民の生活又は生業の理解のため欠くことのできないものとされる。灌漑用揚水水車を利用して灌漑を行う景観にこのような価値があるかは、別に議論する必要があるが、灌漑用揚水水車が平安時代から起伏に富むわが国の地形を克服して、水田を灌漑してきた経緯を鑑みると、今後も利用されることが望ましいと考えられる。しかし、揚水水車は高度経済成長期以降、揚水水車と比較して単位時間あたりの揚水性能に優れる電動ポンプ等への置き換えや農業者の高齢化、減反政策等による揚水灌漑を必要とする水田の耕作放棄等で利用数を減らしている。

そこで、本研究は、揚水水車の持続的な利活用に寄与する知見を明らかにするために、揚水水車が有する機能とその機能の発揮で得られる価値を明らかにした。具体的には、揚水水車は揚水をする機能の発現によって、緩勾配水路が賦存する非常に小さいエネルギーでも利用できる価値を得ることや、地域性を醸成する機能や景観を形成する機能の発現によって、人に親しみや美しさを感じさせる価値を得ることを明らかにした。つまり、揚水水車の利用の継続や新たに利用を促進させることは、再生可能エネルギーの利用促進や良好な農村環境の維持に寄与するといった社会的意義がある。そのため、揚水水車の利活用を改めて促進する意味は大きい。

また、それぞれの機能を発揮させるための利用策を検討し、本来的な機能を発揮させるためには、水車の水受板を一定以上水没するように設置することや回転数が一定の範囲内で利用することが有効であることを明らかにし、新たな機能を発揮させるためには、特に揚水水車がその集落で利用が始まった時期や、わが国での揚水水車の利用状況といった、揚水水車の地域性や希少性に関する知識を啓発することが効果的であることを明らかにした。

以上のように、本研究は、揚水水車が有する機能や、その機能の発揮によって得られる価値を明らかにした。最後に、本研究では十分に明らかにできなかったことや今後の課題について整理する。

本来的な機能である揚水特性の解明では、用いたモデル水車は、筒の設置方法で3形式あるうちのV形式を採用し、残りのH形式とB形式については検討しなかった。また、モデル水車の筒の寸法より細長い筒を用いた場合は、揚水特性も異なることが考えられた。本研究では扱わなかった

形式の水車や、V形式でも違う寸法の筒を用いた場合の揚水特性は、本研究で用いた方法で実験を行うことで、定量的に明らかにできる。また、GISを用いた揚水水車の利用適地の評価手法を開発することで、具体的な利用ポテンシャルが明らかにできる。

新たな機能は、評価グリッド法を用いて人間の価値認識から、主に地域性醸成機能や景観形成機能であることを明らかにした。しかし、評価グリッド法で定性的に構築された6層程度の評価構造から、重回帰分析を用いた階層関係の定量的評価を行うために4層程度の評価構造へ整理した結果、具体的な判断階層に所属させた「風情がある」といった項目は、同じ階層に所属する「音がよい」や「歴史性がある」といった項目よりは抽象的であるといった、同一階層内の項目間の具体性や抽象性の程度にバラツキが生じた可能性があった。但し、同一階層内の項目間の具体性や抽象性のバラツキの程度は、あくまで主観的であるため、解釈が困難である。また、評価構造の構築で用いた評価グリッド法は、決まった方法でインタビューを行うため、インタビュアーの能力に拘わらず、ほぼ同一の評価構造が階層的に得られるといった長所があり、得られた評価構造の上下方向の階層関係は妥当と考えられる。よって、評価グリッド法で得られる多数の階層関係を整理する際の、同一階層に所属するべき項目の抽出方法は今後の課題である。現状では、このような可能性を発生させないためには、例えば共分散構造分析を用いることが有効と考えられる。これ以外に、全国調査での利用農業者への聞き取りから得られた「幹線水路に灌漑用の堰上げゲート等を設置することに対して下流受益者と調整がつかなかったため揚水水車を利用している（堰上げると下流に迷惑がかかる）」といった回答は、揚水水車に、限られた用水量を受益者に適切に配分する機能（水利調整機能）が有することを示唆する。この機能は、本研究では一切検討しなかったため、今後検討する必要がある。

繰り返すが、揚水水車を利用することは、エネルギーの地産地消や人に美しさや親しみを感じさせる価値を有するように、社会的意義があることを、本研究で明らかにした。今後は、上記の今後の課題で挙げた点を中心に研究を進めたい。また、揚水水車が灌漑目的で利用されるような、具体的な揚水特性に関する情報も発信したい。

謝辞：本論文の執筆には、多くの方のご指導や励ましを頂きました。特に、ご多忙にも拘わらず、論文作成に関して懇切かつ丁寧なご指導やご助言を頂いた、茨城大学農学部的小林久教授には、深く感謝いたします。また、茨城大学農学部の黒田久雄教授、牧山正男准教授、東京農工大学農学部の千賀裕太郎教授、宇都宮大学農学部の田村孝浩准教授には、多くのご指導やご助言を頂きました。心から感謝いたします。また、東京農工大学農学部の中島正裕准教授や岡山大学環境理工学部の近森秀高教授には、論文の執筆に至るまでの過程で励ましや貴重なご助言を頂きました。心から感謝いたします。所属する農研機構農村工学研究所では、エ

ネルギーシステム担当の後藤真宏上席研究員、上田達己主任研究員、浪平篤主任研究員からは、励ましや特に模型実験に関してご指導を頂きました。石田憲治農村基盤研究領域長、嶺田拓也資源評価担当主任研究員には、特にアンケート調査やインタビュー調査に関してご指導を頂きました。昨年、ご退職された今泉眞之様には、論文作成に対する心構えなどで激励を頂きました。企画管理部農村技術支援チームの野口克行様、寺川淨司様、石島正人様には、模型実験に用いる水車の製作や実験水路の改造等でお世話になりました。非常勤職員の今井真由美様、後藤隆子様にはアンケートの集計やコピー作業でお世話になりました。また、農研機構近畿中国四国農業研究センターの松森堅治上席研究員と農研機構九州沖縄農業研究センターの島武男主任研究員にも、現地調査等でお世話になりました。インタビュー調査やアンケート調査の実施においては、倉敷市八ヶ郷合同用水組合水利委員の藤井様、伊賀市上林地区町内会長の福森様、伊賀市神戸地区公民館長の竹内様にご協力頂きました。株式会社テイコクの甲斐様をはじめ皆様には実験にご協力頂きました。皆様のおかげで論文を完成させることができました。心から感謝いたします。

付録:

Table 37 灌漑用揚水水車の利用状況 (現存地区)
Usage situation of IWW (1)

都道府県	市町村	字名	農業地域類型	現在の土地利用	箇の設置方法	水車の分類 分類形式 IC:灌漑有・観光保存有 IN:灌漑有・観光保存無 NC:灌漑無・観光保存有 NN:灌漑無・観光保存無	I	C	I	N	N	C	NN(存在)	NN(消滅)	受益面積 (ha)	揚水水車の直径 (m)	揚水水車利用理由の確認方法 A:聞き取り調査 B:文献調査
鹿児島	曾於市 湧水町 始良市	新田場 小屋敷 中福良	3	1	V	IC-3	4	0	0	0	0	0	0	0.08~0.26	3.2~3.8	A	
			3	1	N	NN-3	0	0	0	1	1	-	2.5	A			
			1	1	V	NN-1	0	0	0	1	0	0.02	2.3	A			
熊本	菊池市 水俣市	生味 古里	3	1	H	IN-3	0	1	0	0	0	0	0.07	2.4			
			4	1	V	IN-4	0	2	0	0	0	0.02	1.6	A			
大分	九重町 豊後大野市 豊後大野市	後野上 上自在 下自在	3	1	V	IN-3	0	1	0	0	0	0	0	0.18	3.0	B	
			3	3	N	NC-3 NN-3	0	0	1	0	2	0.02	2.8	A			
			3	1	H	IC-3 NN-3	1	0	0	0	6	0.02~0.13	3.0	A			
佐賀	唐津市	町切	3	1.2	H	IC-3 NN-3	4	0	0	0	0	3	0.02~0.14	3.2~3.4	A		
福岡	朝倉市 朝倉市 朝倉市	菱野 三島 久重	2	1	H	IC-2	3	0	0	0	0	0	4.50	4.0~4.8	B		
			2	1	H	IC-2	2	0	0	0	0	5.50	4.0	B			
			2	1	H	IC-2	2	0	0	0	0	5.25	4.0	B			
愛媛	内子町	岡	3	1.3	V	IN-3 NN-3	0	1	0	0	1	0.11~0.13	1.7	A			
高知	宿毛市 四万十市 中土佐町 高知市	和田 安並 萩中 朝倉	3	1	H	IN-3 NN-3	0	1	0	3	0	0	0.05~0.09	2.0			
			3	1	V	IN-3 NC-3	0	1	16	0	0	0.04	2.0	A			
			4	1	V	IN-4 NN-4	0	1	0	0	1	0.03	1.7	A			
			1	1	H	IN-1	0	5	0	0	0	0.04~0.28	1.8~2.0	A			
徳島	阿南市 小松島市	長生町西方 田浦町西原	2	1	H	IN-2 NN-2	0	3	0	0	5	0.09~0.18	1.8~2.3	A			
			1	1	H	IC-1 NN-1	3	0	0	0	4	0.01~0.18	2.0~2.3	A			
			山口	山口市 山口市 徳山市	上八坂 德行 間上	4 4 1	1 1 1	V V V	IN-4 NN-4 IN-4 NN-4 NN-1	0 0 0	1 1 0	0 0 3	0 0 1	0.05~0.10 0.15 -	1.2 1.6 3.0	A	
広島	北広島町 庄原市	中郷 今西	3	1	H	IN-3 NN-3	0	1	0	0	1	0.05~0.25	1.9	B			
			4	1.2,3	H	NN-4	0	0	0	1	2	-	2.6	A			
岡山	倉敷市 岡山市 岡山市 岡山市 備前市 津山市	祐安 平瀬 賞田 吉井 坂根 中島	1	1	V	IN-1 NN-1	0	20	0	0	3	0.03~0.41	1.6~2.1	A			
			3	1	H	IN-3 NN-3	0	3	0	0	1	0.05~0.13	1.7				
			1	1	H	IN-1 NN-1	0	1	0	0	1	0.07~0.13	1.6				
			3	1	H	IN-3 NN-3	0	3	0	1	3	0.06~0.20	2.1~3.4	A			
			2	1	H	IN-2	0	1	0	0	0	0.06	2.0				
			1	1	V	IN-1	0	2	0	0	0	0.09~0.11	1.9	A			
兵庫	赤穂市 福崎町 神河町	檜原 山崎 新野	4	1.2,3	H	IN-4 NN-4	0	1	0	0	13	0.03~0.15	2.2	A			
			3	1.4	V	IN-3	0	3	0	0	0	0.39	3.0				
			4	1.2	V	IC-4 NN-4	6	0	0	0	1	0.04~0.06	2.6~2.8	A			
京都	綾部市 京都市	栗上 京北大野	3	1	H	IN-3 NN-3	0	1	0	0	1	0.03	1.6	A			
			4	1	B	IN-4	0	1	0	0	0	0.09	1.9				
和歌山	日高川町	小熊	3	7	H	NC-3	0	0	1	0	0	-	6.1	B			
三重	伊賀市 津市	上林 栗原	3	1	H	IN-3 NN-3	0	16	0	0	6	0.03~0.22	1.3~2.1	A			
			3	1	H	IN-3	0	1	0	0	0	0.07	2.2				
富山	富山市	寺町	5	1	B	IN-5	0	1	0	0	0	1.85	2.0	A			
合計							25	79	18	11	59						

※廃止は揚水水車が1基も存在しないこと、存在は揚水水車が1基以上存在する(減少も含む)と定義した。

Table 38 灌漑用揚水水車の利用状況（廃止地区）
Usage situation of IWW (2)

都道府県	市町村	字名	農業地域類型 1:都市的地域 2:平地農業地域 3:中間農業地域 4:山間農業地域 5:不明	現在の土地利用 1:水田 2:畑 3:放棄田 4:休耕田 5:宅地 6:工場 7:不明 8:その他	筒の設置方法	水車の分類 分類形式 IC:灌漑有・観光保存有 IN:灌漑有・観光保存無 NC:灌漑無・観光保存有 NN:灌漑無・観光保存無	I	C	I	N	C	NN(存在)	NN(消滅)	受益面積(ha)	揚水水車の直径(m)	揚水水車利用理由の確認方法 A:聞き取り調査 B:文献調査
鹿児島	志布志市	野井倉	2	1,3	N	NN-2	0	0	0	0	0	5	0.09~0.19	2.0~2.2	B	
	志布志市	安良	3	4	H	NN-3	0	0	0	0	6	0.02~0.09	2.2~3.2	B		
	鹿屋市	中山中	2	4	N	NN-2	0	0	0	0	2	0.03~0.10	1.6			
熊本	山都町	小笹	3	1	N	NN-3	0	0	0	0	1	-	2.0	A		
	山鹿市	川原谷	3	1,2	V	NN-3	0	0	0	0	8	-	1.9~2.6	B		
大分	日田市	上釣	3	1	V	NN-3	0	0	0	0	2	0.13	2.0	B		
	豊後大野市	柚木	3	4	V	NN-3	0	0	0	0	6	0.01~0.04	2.6	B		
	豊後大野市	左右知	3	2	N	NN-3	0	0	0	0	4	0.02~0.09	3.2	A		
福岡	立花町	田形	2	7	N	NN-2	0	0	0	0	1	-	-			
高知	土佐町	南境	4	7	V	NN-4	0	0	0	0	1	-	2.4			
	安芸市	加増屋	3	3,4	H	NN-3	0	0	0	0	1	-	3.0			
	高知市	弘岡	5	7	H	NN-5	0	0	0	0	1	-	1.4~2.3			
徳島	吉野川市	山路	5	7	N	NN-5	0	0	0	0	1	-	2.0			
山口	萩市	大下	4	1	H	NN-4	0	0	0	0	1	-	4.8	B		
	山口市	上河内	4	2	V	NN-4	0	0	0	0	3	0.05~0.11	1.6~2.0			
	山口市	西大津	4	7	V	NN-4	0	0	0	0	2	-	1.6~1.8			
	岩国市	牛野谷町	5	5	H	NN-5	0	0	0	0	4	-	1.8~2.5	B		
島根	浜田市	下古和	4	4	H	NN-4	0	0	0	0	1	0.07	2.7			
	浜田市	内村町牛谷	3	2	H	NN-3	0	0	0	0	1	0.02	1.5	A		
広島	北広島町	下漆原	3	4	H	NN-3	0	0	0	0	2	0.04~0.06	1.5~3.0			
	庄原市	濁川川西	4	1	H	NN-4	0	0	0	0	1	0.25	2.5			
	庄原市	濁川山奥	4	7	H	NN-4	0	0	0	0	3	-	1.8~2.4	A		
	庄原市	栗	4	1	H	NN-4	0	0	0	0	5	-	1.5~2.6	A		
鳥取	八頭町	見槻中	3	8	V	NN-3	0	0	0	0	1	0.06	2.4			
	鳥取市	長谷	3	1	V	NN-3	0	0	0	0	2	0.03~0.05	2.0~3.0			
	鳥取市	和奈見	3	1	V	NN-3	0	0	0	0	4	0.06	1.3~1.6			
岡山	高梁市	実相寺口	3	6	V	NN-3	0	0	0	0	5	-	1.5~2.7			
	美作市	立石	3	2,3,4	V	NN-3	0	0	0	0	6	-	1.4~3.5			
	美作市	淀	3	7	V	NN-3	0	0	0	0	1	-	1.8			
	美作市	吉	2	4	V	NN-2	0	0	0	0	3	0.11	2.0~2.4			
	美作市	和田	2	4	V	NN-2	0	0	0	0	5	0.04~0.12	1.2~2.6			
	真庭市	向湯原	4	4	V	NN-4	0	0	0	0	1	0.29	3.0			
	真庭市	上野川	3	7	V	NN-3	0	0	0	0	1	-	1.7			
	和気町	田原上	3	7	H	NN-3	0	0	0	0	5	-	1.0			
	新見市	成松	4	7	H	NN-4	0	0	0	0	2	-	0.9~1.9			
新見市	上町	4	7	H	NN-4	0	0	0	0	1	-	1.0				
富山	富山市	西大沢	1	1	N	NN-1	0	0	0	0	1	0.07	1.3			
栃木	大田原市	川田	3	1	V	NN-3	0	0	0	0	8	-	2.5~3.0	A		
合計							0	0	0	0	0	108				



Fig. 74 揚水水車 (V 形式 : 岡山県津山市)
IWW (V-type in Tsuyama, Okayama pref.)



Fig. 78 揚水水車 (B 形式 : 富山県富山市)
IWW (B-type in Toyama, Toyama pref.)



Fig. 75 揚水水車 (V 形式 : 熊本県水俣市)
IWW (V-type in Minamata, Kumamoto pref.)



Fig. 79 揚水水車 (B 形式 : 京都府京都市)
IWW (B-type in Kyoto, Kyoto pref.)



Fig. 76 揚水水車 (H 形式 : 高知県高知市)
IWW (H-type in Kochi, Kochi pref.)



Fig. 80 模型実験で使用了した揚水水車 (1)
IWW used in this experiment (1)



Fig. 77 揚水水車 (H 形式 : 三重県津市)
IWW (H-type in Tsu, Mie pref.)



Fig. 81 模型実験で使用了した揚水水車 (2)
IWW used in this experiment (2)

参考文献

- 青木国夫 (1982) : わが国における水車稼働の実態調査, 昭和 54 ~56 年度科学研究費補助金 (一般研究 A) 研究成果報告書
- 後藤眞宏・筒井義富・浪平 篤・常住直人・島 武男 (2008) : 歴史的利水施設に対する地域住民の潜在意識を掘り起こすインタビュー手法, 農村工学研究所技報, 207, 149-159
- 平岡昭利 (1984a) : 九州における水車動力利用の残存形態, エネルギー史研究(13), 97-105
- 平岡昭利 (1984b) : 鹿児島県における水車動力利用の残存形態, 鹿児島女子短期大学紀要(19), 37-46
- 平岡昭利 (1992) : 九州水車風土記, 古今書院, 198
- 広瀬幸雄 (1995) : 『環境と消費の社会心理学』, 名古屋大学出版会, 名古屋
- 生田良昭・岩田 勲 (2010) : ~昔ながらの田園風景~ 地域の力で水車が復活, 農業農村工学会大会講演要旨集, 74-75
- 今井葉子・野波 寛・高村典子 (2010) : ため池に対する価値観が環境保全の態度と行動意図に与える影響-兵庫県東播磨地域における社会心理学的研究-, 農村計画学会誌論文特集号, 28, 219-224
- 今谷 明 (1984) : わが国利用揚水車の復元, 国立歴史民族博物館研究報告(4), 17-56
- 河野裕昭 (1997) : 日本列島現役水車の旅, 小学館
- 小池俊雄・玉井信行・高橋 裕・泉 典洋・岡村次郎 (1988) : 都市河川空間の評価構造に関する研究, 土木計画学研究論文集 6, 105-112
- 小池俊雄 (2003) : 環境問題に対する心理プロセスと行動に関する基礎的考察, 水工学論文集, 47, 361-366
- 児島隆政・古谷勝則・油井正昭 (1995) : 自然景観における好ましさの評価構造に関する研究, ランドスケープ研究 58 (5), 177-180
- 栗田英治・木村吉寿・松森堅治・長利 洋 (2004) : 棚田景観の評価構造と関係する物理的指標, 農村計画論文集, 第 6 集, 85-90
- 松本邦彦・澤木昌典・柴田 祐 (2007) : 大都市圏周縁部における農地を中心に構成される景観の評価構造に関する研究, ランドスケープ研究 70 (5), 555-558
- 松島洋介・奥 敬一・深町加津枝・堀内美緒・森本幸裕 (2008) : 琵琶湖西岸の里山地域における地元住民と移住住民の景観認識の比較, ランドスケープ研究 71 (5), 741-746
- 松浦茂樹・島谷幸宏 (1986) : 都市の河川イメージの評価と河川環境整備計画, 土木計画学研究論文集, 4, 205-212
- 三阪和弘 (2003) : 環境教育における心理プロセスモデルの検討, 環境教育, 13-1, 3-14
- 三阪和弘・小池俊雄 (2006a) : 河川環境の評価構造における流域共通性と地域差, 土木学会論文集, 810/II-74, 115-125
- 三阪和弘・小池俊雄 (2006b) : 河川に対する評価構造と心理プロセスの統合モデルの検討, 水工学論文集, 50, 1495-1500.
- 水谷陽介・星野 敏 (2006) : ため池の環境保全活動に対する住民意識と保全活動の活性化方策-兵庫県加古川市の寺田池保全活動を対象として-, 農村計画学会誌論文特集号, 25, 257-262
- 内務省内閣統計局 (1993) : 国勢調査以前 日本人口統計集成 別巻 1, 東洋書林
- 農林水産省 (2001) : 土地改良事業計画設計基準 設計「水路工」, 201-202
- 越智廣志・末次敏明 (1984) : 北部九州における稼働水車の現状について-実地調査のデータを整理して-, 西日本工業大学紀要(14), 151-160
- 越智廣志・池森 寛・末次敏明 (1986) : 熊本県川原谷の揚水水車群について, 西日本工業大学紀要.理工学編 (16), 45-54
- 林野庁 (参照 2012.02.18) : 都道府県別森林率・人工林率, (オンライン), 入手先 <http://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/sinrin_ritu.html>
- 佐野文彦 (1998) : 小規模灌漑と揚水機具, 農業土木事業協会
- 讚井純一郎・乾 正雄 (1986) : レパトリー・グリッド発展手法による住環境評価構造の抽出, 日本建築学会計画系論文集, 367, 15-21
- 佐藤由美 (2007) : 揚水水車の復元でコミュニティを再生, まちむら(96), 20-22
- 島谷幸宏 (1998) : 景観からみた平常時の河川目標流量の設定に関する研究, 土木学会論文集, 587/VII-6, 15-26
- 総務省統計局 (参照 2012.02.18) : 大正 9 年国勢調査, (オンライン), 入手先 <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020101.do?_toGL08020101_&tstatCode=000001036875&requestSender=search>
- 総務省統計局 (参照 2012.02.18) : 農林業センサス, (オンライン), 入手先 <<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001012037&cycode=0>>
- 末尾至行 (1981) : 揚水水車の今昔, 関西大学東西学術研究所創立 30 年記念論文集, 111-135
- 田中 豊・垂水 共之 (1995) : 『Windows 版統計解析ハンドブック 多変量解析』, 共立出版, 東京
- 田野倉直子・横張 真・山本勝利・加藤好武 (1999) : 地元住民による水田景観の認知構造, ランドスケープ研究 62 (5), 727-732
- 若村国夫, 篠原 徹 (1985) : 岡山県の揚水用水車-その分布と構造について-, 岡山理科大学紀要 B(20), 159-183
- 若村国夫 (1988) : 中国地方における揚水用水車の構造, 分布及び伝播経路, 岡山理科大学紀要 B(24), 195-220
- 若村国夫 (1994) : 四国地方の揚水用水車 (構造と伝播経路), 岡山理科大学紀要 B(30), 233~253
- 山本忠男・長澤徹明 (2010) : 地域住民の農業水利施設維持管理への参加要因, 農村計画学会誌論文特集号, 28, 387-392

A Study on Functional Assessment and Valuation of Irrigation Water Wheels

HIROSE Yuichi*

Renewable Resources Engineering Division, Renewable Energy Systems *

Summary

This study assesses the function and value of Irrigation Water Wheels (IWWs) in order to develop a scheme for sustainable utilization of IWWs.

On the basis of field surveys and literature review, IWWs are thought to have two classes of functions. One is the intrinsic function, i.e. pumping of water, and the other is the “derived” function such as an object of sightseeing. Specifically, in 2011, 104 IWWs were used for irrigation purposes and 25 IWWs used for sightseeing and conservation purposes. The number of IWWs used in 2011 was 35% compared to the early 1980s. Interviews revealed IWWs are more economical to use than pumps and can regulate irrigation water without using a diversion weir. Reasons to discontinue IWWs include abandonment of cultivation, changes in canal systems and reduction in the number of IWW carpenters. Classification of IWWs shows the average diameter of IWWs using irrigation, tourism and conservation is larger than IWWs using only irrigation. And beneficial paddy fields of IWWs using irrigation, tourism and conservation is smaller than IWWs using only irrigation. Conditions for continuation of IWWs for irrigation include diameters from 1.5 m to 2.5 m, beneficial paddy fields less than 0.2 ha and bed slope less than 0.2%. From an interview, the residents who participate in the conservation action of IWWs recognize that IWWs has regionality.

The value of the intrinsic function is examined using hydraulic model experiment of IWWs, and found to be the utilization of small hydropower in irrigation canal and contribution to greenhouse gas reduction. Specifically, dimensions of model waterwheels are normally 2.0 m in diameter and 0.8 m in width and the tube has a total volume of approximately 17ℓ. We measured the pumping discharge and number of rotations with changes in the flow rate and water level for a waterwheel with a 1.0 m width waterwheel installed in an experimental channel. The following results were obtained.

- A) Outset of damming: Rise in the water level with installation of IWWs was generally less than 30 mm.
- B) Relationship between angle of the tube and the amount of pumping: Angle of the tube for the best performance was 35° ~ 50°.
- C) Relationship between submerged depth and the amount of pumping: If the submerged depth of the plate was less than 200 mm, the amount of pumping was less than 250 mm.
- D) Relationship between pump rotation and the amount of pumping: The amount of pumping increased in proportion to pump rotation. However, if pump rotation exceeded or didn't reach certain values, the amount of pumping decreased. In this experiment, the amount of pumping decreased at 3 or less rpm and 8 or more rpm.
- E) Best performance for this experiment: If pump rotation was between 3 and 8 rpms, and the submerged depth of the plate more than 250 mm, the maximum pumping discharge was approximately 7.0 m³/h and maximum pumping efficiency was approximately 75%.
- F) Energy utilization characteristics: In this experiment, power of IWWs was almost 20W and energy-use efficiency approximately 30%.

The value of using IWWs for pumping water as fundamental function is that small energy in open channel is utilizable and running cost can reduce.

The value of the derived function is examined using interviews and questionnaires, and found to be the formation of regional identity and landscape, which is regarded ‘beautiful’ and ‘friendly’ by residents. Specifically, many residents evaluated IWWs as good. Factors of the determinants for these preferences differed depending on the attributes of the evaluators. The key determinant for the preferences of both farmers and non-farmers was ‘regionality’. Farmers focus on convenience to determine preference for IWWs and IWWs are adopted based on

regionality and history. Non-farmers focus on ‘affinity’ and ‘beauty’ to determine preference for IWWs. However, non-farmers with a birthplace near the IWWs focus on affinity, which is strongly affected by regionality, when they determine preferences for IWWs. Non-farmers with a remote birthplace focus on beauty that is strongly affected by landscape formation to determine preferences for IWWs. Therefore, the functions of landscape and regionality are the “derived” functions of IWWs. These functions show that IWWs are valuable so residents evaluate IWWs as beautiful and familiar. Derived function which has an effect on motivations to participate in IWW conservation is regionality. Therefore, function of regionality is relatively important.

There is some value in use of IWWs. One is that IWWs can use small energy in open channel and reduce running cost. Another is that residents perceive IWWs as beautiful and familiar when the “derived” functions which are the functions of landscape and regionality are also apparent.

Key words: Pumping irrigation, Renewable energy, Evaluation Structure Model, Psychological process, Resident Participation

コンクリート水路によるカエル類の移動障害と個体群保全に関する研究

渡部恵司*

*資源循環工学研究領域生態工学担当

キーワード：農業水路，生態系配慮，農村生態系，両生類，個体群動態モデル

I 緒言

1.1 研究の背景

1.1.1 農村生態系の特質と生物多様性

農村生態系は、過去から現在までの人間活動によって形成・保全されてきた二次的自然である。その構成要素として、農地（水田，畑，樹園地），農用林野（採草地，放牧地，薪炭林等の農用林），農業施設（農業水路，ため池，農道等），居住地（農家，庭，屋敷林）等，様々な土地利用が混在している。これらの土地利用は日常的な維持管理によって多様な遷移段階にあること，更に様々な遷移段階の土地利用がモザイク状に配置されることにより，生態系の多様性が高い状態が保たれてきた。

その多様な土地利用およびモザイクの組み合わせに，様々な生物が，長い年月をかけて適応してきた。採食や渡り等の一時的な利用も含めて，3,000種以上の動物が農村で観察されている（農と自然の研究所，2009）。これらの中には，生態系のモザイクを利用する種，特に陸域・水域の両方を利用する種も多い。例えばニホンアカガエル *Rana japonica* は，水田で産卵，幼生期を過ごし，変態後は近隣の樹林や草地で生活する。本種の生息には水域と陸域，そして両者の接続性，すなわちネットワークが必要である。

農村生態系に生息する種の中には，形態あるいは遺伝子の地域的な多様性に富む種もいる。例えば，ニホンアカガエルやツチガエル *R. rugosa*，あるいはドジョウ *Misgurnus anguillicaudatus* は，同一種でも，国内での地理的な分布が異なる複数の遺伝子集団に分けられる（Sumida and Ogata, 1998；三浦，2005；小出水ら，2009b）。更に，河川流域内，もしくは数 km スケールの小河川内でも，複数の異なる遺伝子集団が存在することがドジョウやホトケドジョウ *Lefua echigonia* について報告されている（小出水ら，2009a；西田ら，2012）。以上のように，農村生態系は，長い年月をかけて，生態系の多様性，生物種の多様性および遺伝子の多様性，すなわち生物多様性の高い状態が形成・維持されてきた。

二次的自然の重要性は，いまや国際的な共通認識である。2010年に名古屋で開催された生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）において，愛知目標の展望として「2050

年までに生物多様性が評価され，保全され，賢明に利用され」ることとされた。そのための目標の1つとして「2020年までに，農業，養殖業，林業が行われる地域が，生物多様性の保全を確保するよう持続的に管理される」（目標7）こととされた。これは，農村生態系を含む，いわゆる里地，里山，里海等の二次的自然の保全と持続的な利用を推進するものである。

1.1.2 農村生態系の変質と保全

一方で，農村生態系およびその生物多様性は劣化傾向にある。2010年に閣議決定された生物多様性国家戦略2010では，我が国の生物多様性の危機の構造を，4つの危機（①人間活動や開発による危機，②人間活動の縮小による危機，③人間により持ち込まれたものによる危機，④地球温暖化による危機）に大別している。農村生態系では，これらの危機にも関連するが，農業生産性・土地生産性の向上に寄与してきた農業農村整備が，複合的に影響していると考えられる（Fig. 1）。農業農村整備による農村生態系への影響として，①区画の拡大に伴う生物生息空間の喪失，②湿田の乾田化に伴う生物生息空間の悪化，③用排水路の構造の問題，④生息場間のネットワークの分断が考えられる。

農業水路に注目すると，土水路の場合には，水中もしくは陸上の多様な空間が様々な生物にとっての採食場や休息場，捕食者からの一時的な避難場，繁殖場，越冬場を含めた生息場として，あるいは水路の横断・縦断方向の移動経路として機能していた。しかし，コンクリート製の農業水路（以下，「コンクリート水路」とする）では，水深・流速・通水期間の変化，落差工による縦断方向の移動障害，深い側壁による横断方向の移動障害等によって，それらの機能は消失もしくは著しく低下している場合が多い。農業水路において，水理性能・水利性能・構造性能を重視した工法の採用により，農業生産に必要な量の水を必要な時期に供給し，速やかに排除できるようになった一方で，農村生態系がダメージを受ける側面がある。

1999年に制定された食料・農業・農村基本法では，今後の食料・農業・農村政策で目指す基本理念の一つとして，農業の有する多面的機能（国土の保全，水源かん養，自然環境の保全等）の発揮が掲げられ，また「農業の生産性の向上を促進するため，地域の特性に応じて，環境との調和に配慮しつつ（中略）農業生産の基盤の整備に必要な施策

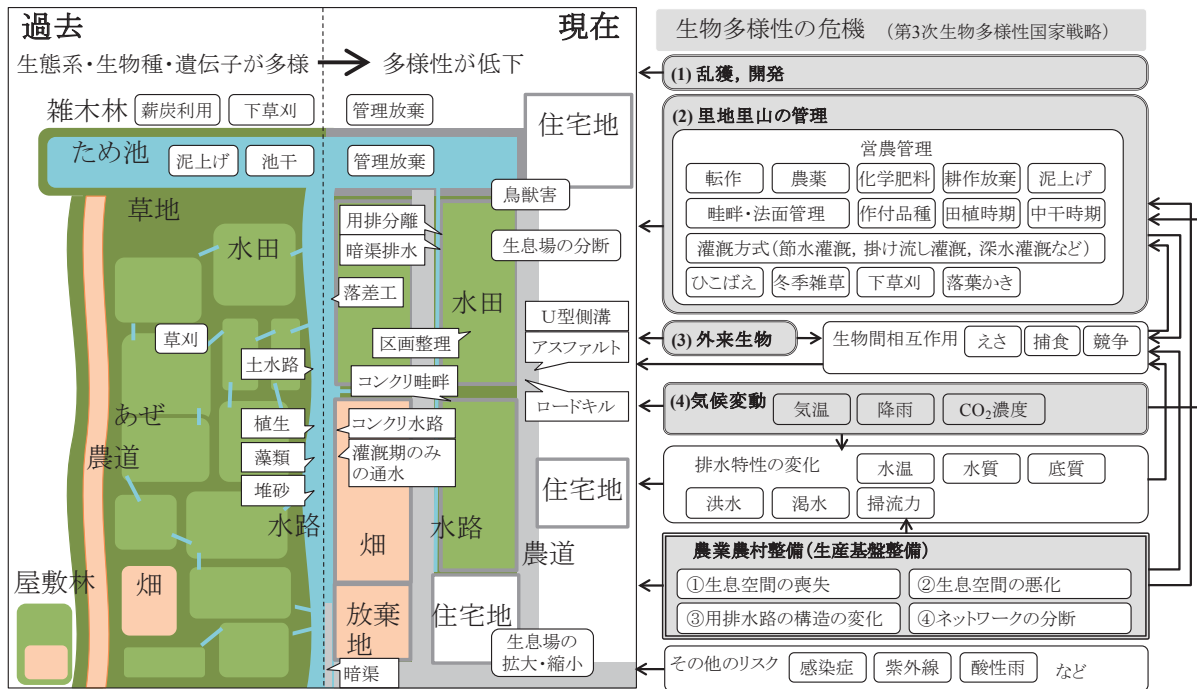


Fig. 1 農村生態系の変質とその要因
Changes of ecosystem in rural areas and their factors

を講ずるものとする」(第 24 条)とされた。2001 年に土地改良法が改正され、農業農村整備事業の実施にあたり環境との調和への配慮が事業実施の原則に位置づけられた。農業農村整備事業では、農業生産性向上と農家や地域住民の生活を重視することと同時に、環境との調和に配慮することが責務となったといえる。

市民団体や地域の組織、NPO 等による生態系保全活動も活発化している。例として、コンクリート水路からのカエル類等の脱出用スロープ(たかしま有機農法研究会による)や水田魚道(メダカ里親の会、たかしま有機農法研究会、ナマズのがっこう等による)の設置が挙げられる。地域での保全活動に関連して、2007 年に始まった農地・水・環境保全向上対策(2011 年から農地・水保管理支払交付金に移行)では、生態系保全や景観形成等の農村環境向上活動が、化学肥料・化学合成農薬を低減する営農活動や農地・農業水利施設の維持管理活動とともに支援されている。

このような情勢の中、様々な生物の生息・生育環境および移動経路の保全策が行われてきた。対策の基本方針や調査・計画手法、工種横断的な環境配慮手法は、食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会(2002, 2003, 2004, 2006)や水谷(2007)にまとめられている。ただし、ミティゲーションの原則によれば事業の影響の「回避」, 低減(「最小化」, 「修正」, 「影響の軽減/除去」), 「代償」の順で検討するべきとされるが(食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会, 2006), 現状では代償としての保全策が採用される場合が多い。例えば土水路を現況保存する事例は少なく、新たに創設されたコンクリート水路の一部の区間で対

策を行う事例が多い。更に近自然的もしくは多自然的な工法よりもコンクリート製のワンドや魚巣ブロック等の人工素材による事例が多い。土水路や近自然的・多自然的な水路が第一に目指されるべきであるが、この現状を考えると、コンクリート水路での保全策を効果的なものとすることは重要な研究課題といえる。

1.1.3 農村生態系におけるカエル類の減少と保全策

カエル類は、生活史の中で陸域と水域の両方を必要とすること、昆虫等の小動物を捕食し、大型の鳥類・哺乳類の餌となる食物網の中位の栄養段階にあること等から、地域の生態系を指標する生物とされる(Mattoon, 2002)。農村生態系における生物多様性の定量評価の一案として提案されている「農業に有用な生物の多様性を評価するための指標生物」(田中, 2010)に、ニホンアカガエルやトウキョウダルマガエル *R. porosa porosa* 等のカエル類数種も含まれる(農林水産省農林水産技術会議事務局ら, 2012a, b)。この理由は、カエル類が農業害虫の捕食者と位置づけられること、そして食物網の中位の栄養段階にあり、その多様性は下位の栄養段階の餌昆虫や上位の捕食者の多様性をある程度反映するだろう(田中, 2010)と予想されることにある。野生復帰が試みられているトキ *Nipponia nippon*・コウノトリ *Ciconia boyciana* や他の大型鳥類の生息場を保全する上で、その餌となるカエル類の安定的な生息が重要と考えられている(例えば環境省自然環境局ほか, 2005)。またカエル類は、その親しみやすい姿や鳴き声から農家や地域住民に季節の楽しみや癒しを与える生物といえる。なお、害虫管理や食物連鎖による物質循環への寄与は生態系サービスのうちの調整サービスと位置付けられ、楽しみや癒しは文

化的サービスと位置付けられる。

農業農村整備事業後の水田域では、カエル類の生息量が少ないことが報告されている (Fujioka and Lane, 1997; 東・武内, 1999; 大澤ら, 2005)。また、茨城県桜川流域の 115 地点でカエル 3 種の生息状況を調べ、分布傾向を解析した結果 (Watabe et al., 2012), トウキョウダルマガエルは 30a 区画の水田での出現率が低く、ニホンアカガエルおよびシレーゲルアオガエル *Rhacophorus schlegelii* は整備済みの水田で出現率が低かった。これらの報告は因果関係ではなく統計的な傾向を示したものであり、カエル類が減少した原因を実際に特定することは困難であるが、コンクリート水路による移動障害が一因とされている。すなわち、移動経路上にあるコンクリート水路に転落し、その後に出出できないこと、更に水田—樹林間の移動、あるいは別の水田への移動が妨げられることが問題とされている。他にも、大区画化や畦畔のコンクリート化による生息に適した畦畔の面積の減少、乾田化によるニホンアカガエル等の繁殖場 (早春期の水たまり) の消失、表土の剥ぎ取りや現況の土水路の埋め戻しによる個体の死亡等が原因と考えられている (Fig. 2)。そのため、カエル類は、農業農村整備事業等で保全対象生物に選定されることが多い。

上述のうち、コンクリート水路による移動障害を解消するため、コンクリート水路に個体が転落しないためのフタ等の構造物 (以下、「転落防止工」とする) や、転落した個

体が脱出できるスロープ等の構造物 (以下、「脱出工」とする) を設ける対策 (以下、「移動対策」とする) が行なわれるようになってきている。しかし II 章で述べるように、これらの対策には、効果の評価がほとんど行われていないこと、開発・改良・施工に不可欠なカエル類の運動能力・行動特性等の知見が乏しいこと等の課題がある。そのため、本報ではコンクリート水路による移動障害とその対策について研究を展開する。

1.2 既往の研究

1.2.1 農業水路における生物の生息場・水域ネットワークの保全策

カエル類と同じく農業水路の新設・改修時に保全対象となりやすい魚類については、様々な生態系配慮策の実施に併せて、工法開発や定量的な評価に関する知見が着実に蓄積してきた。例えば人工ワンド (和田ら, 2006) や井桁護岸 (高橋ら, 2009) を設けた環境配慮型水路、人工池 (杉原・水谷, 2006)、水路の落差工等に設置する魚道 (守山ら, 2006; 大平ら, 2007; 竹村ら, 2009)、水田魚道 (鈴木ら, 2001, 2004; 加藤ら, 2005) での知見が挙げられる。一方で、カエル類の保全策については、コンクリート水路へのフタの設置 (水谷ら, 2005; 川嶋, 2007) に関する知見しか見あたらない。

1.2.2 農村地域に生息するカエル類の生態および行動

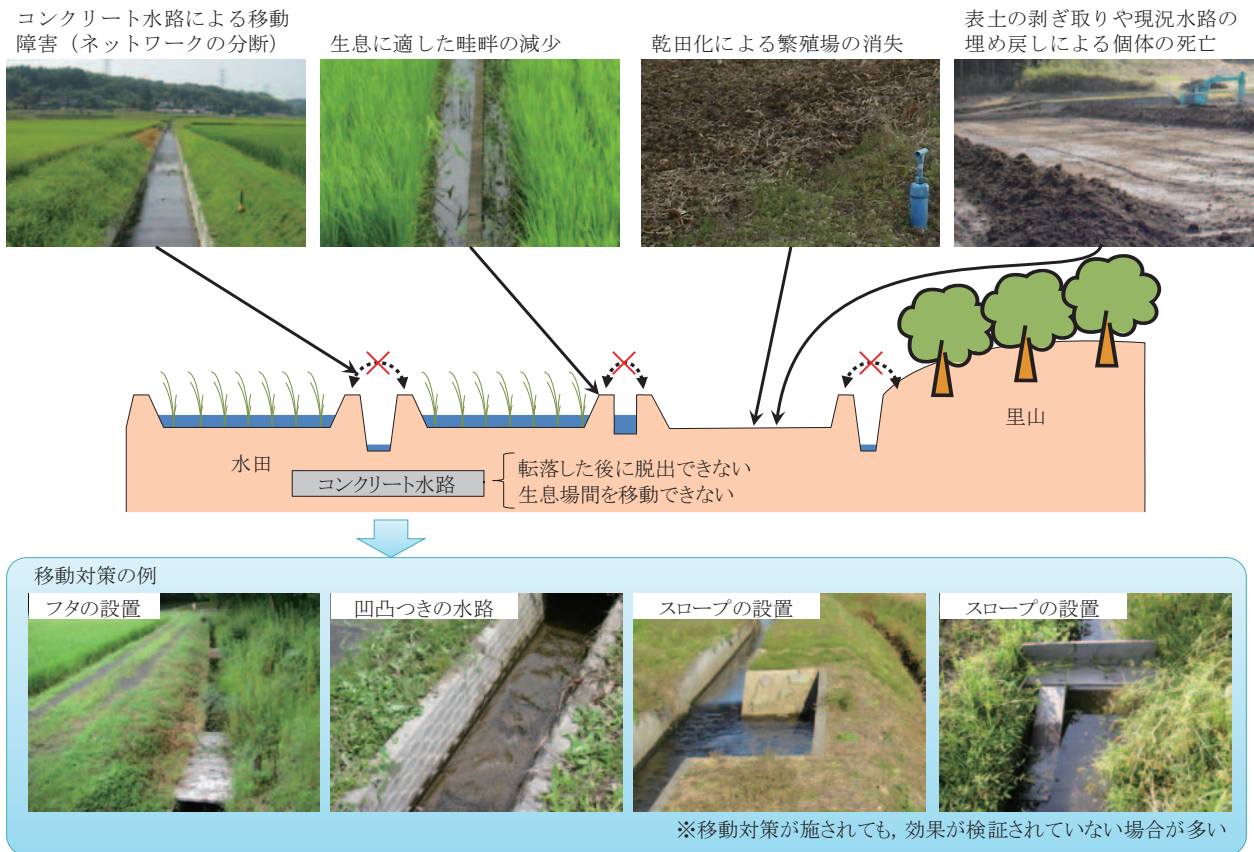


Fig. 2 農業農村整備事業後の水田におけるカエル類の減少要因
Factors causing decrease in frog populations after land improvement projects

本州・四国・九州の本島の水田や農業水路に生息・繁殖するカエル類 12 種 (Table 1) について、生息場の選好性を含めた生息分布特性 (Fujioka and Lane, 1997; 片野ら, 2001; 夏原・神原, 2001; 大澤・勝野, 2001, 2005, 2007; 鈴木ら, 2002; 中荃ら, 2003; 大澤ら, 2003, 2005, 2006; 片桐ら, 2006; 村上・大澤, 2008), 食性 (Hirai and Matsui, 2001, 2002), 移動実態 (Osawa and Katsuno, 2001; 戸金ら, 2010), 産卵生態 (下山, 1982, 1986, 1993, 1996; 芹沢, 1983, 1985; 芹沢・芹沢, 1990; 芹沢ら, 1990; 門脇, 2002; 富岡, 1990; Iwai et al., 2007; 山本・千賀, 2010), 胚・幼生の生存・成長 (Kobayashi, 1962; 倉本ら, 1971; Matsushima and Kawata, 2005; 渡部ら, 2009), 変態後の成長 (戸金ら, 2005), 年齢構造 (Marunouchi et al., 2002; Togane et al., 2009), 個体群動態 (長田, 1978; 富岡, 2000; 松田, 2004; 福山ら, 2007) 等, 生態に関する基礎的な知見が蓄積されている。これらにより, ニホンアカガエルおよびヤマアカガエルが水田一樹林間を移動すること, トウキョウダルマガエルが水田域内を移動すること等が明らかになっている。

水平方向の跳躍能力 (土井, 2002; 工藤, 2011) や斜面の登攀 (とうはん) 能力 (大河内ら, 2001; 土井, 2001, 2009; 池田ら, 2009) 等, 運動能力についても数例の報告がある。これらにより, コンクリート水路の垂直な壁を登攀する能力が低いことがトウキョウダルマガエルおよびアズマヒキガエルについて報告されている。

1.2.3 コンクリート水路によるカエル類への影響

松澤ら (2008) は, ほ場整備済みの谷津田域の U 字溝で, 5 種 (シュレーゲルアオガエル, トウキョウダルマガエル, ニホンアカガエル, ニホンアマガエル, ツチガエル) 602 個体の転落を確認した。またコンクリート水路に接する水田畦畔では, ニホンアカガエルおよびトウキョウダルマガエルの生息密度が低いことが報告されている (Fujioka and Lane, 1997; 東・武内, 1999; 大澤ら, 2005)。

1.3 研究の目的および構成

I 章の「緒言」に続く II 章では, コンクリート水路による移動障害とそれを解消するための対策 (移動対策) の実

態を分析し, 研究課題を論じる。すなわち, 移動対策のうち, 特に脱出工の効果が調べられていないこと, その開発・改良・施工に不可欠であるはずのカエル類の運動能力・行動特性等の知見がほとんどないことが課題である。そこで, III 章では, トウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエルを対象とした実験に基づき, 脱出工の性能を明らかにする。また, 性能を高めるための脱出工の構造および水路の条件を明らかにする。IV 章では, 個体群動態モデルによるシミュレーションに基づき, 移動対策による個体群保全効果を評価する。V 章の「結言」では, 研究成果を整理し, コンクリート水路による移動障害について改めて考察するとともに, よりよい移動対策について検討する。また, 本研究で開発された個体群動態モデルの更なる活用法を検討する。

本報では課題が残るものの, カエル類の保全技術に関する研究の最終的なゴールは, 個別の保全手法をより効果的なものにするのと同時に, 保全予定地域での事前調査に基づいて個体群の消失リスクを診断し, 保全の目標に対して最適と予測される保全策の組み合わせを提案できる手法を構築することである。

1.4 研究対象種

II 章では農村地域に生息するカエル類全般を検討の対象とした。III 章および IV 章では, トウキョウダルマガエル (Fig. 3 の a) およびニホンアカガエル (Fig. 3 の b) に対象種を絞って, 実験および個体群動態のシミュレーション

a トウキョウダルマガエル b ニホンアカガエル



Fig. 3 トウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエル
The Tokyo Daruma Pond Frog and the Japanese Brown Frog

Table 1 農村地域に生息・繁殖するカエル類
Native frog species living and reproducing in rural areas

種名	学名	主な繁殖場	非繁殖期の主な生息場
アズマヒキガエル	<i>Bufo japonicus formosus</i>	水田, 水たまり, ため池	樹林, 人家の庭
ニホンヒキガエル	<i>B. j. japonicus</i>	水田, 水たまり, ため池	樹林, 人家の庭
ニホンアマガエル	<i>Hyla japonica</i>	水田, 水たまり	樹林, 草地, 人家の庭
ニホンアカガエル	<i>Rana japonica</i>	水田, 土水路	樹林
ヤマアカガエル	<i>R. ornativentris</i>	水田, 土水路, 水たまり	樹林
トノサマガエル	<i>R. nigromaculata</i>	水田	水田, 土水路
トウキョウダルマガエル	<i>R. porosa porosa</i>	水田	水田, 土水路
ナゴヤダルマガエル	<i>R. p. brevipoda</i>	水田	水田, 土水路
ツチガエル	<i>R. rugosa</i>	水田, 小川, 溪流	土水路
ヌマガエル	<i>R. limnocharis</i>	水田	水田, 草地
モリアオガエル	<i>Rhacophorus arboreus</i>	ため池, 水田	樹林
シュレーゲルアオガエル	<i>Rh. schlegelii</i>	水田, 土水路	樹林

長谷川 (2003), 林 (2007) をもとに作成。

を行なうこととした。

トウキョウダルマガエルは体長（頭胴長）3～9cmで、仙台平野、関東平野、新潟県中・南部、長野県北・中部の平地に自然分布し、一年を通じて水田や土水路等の水辺に生息する（前田・松井，1999）。ニホンアカガエルは体長3～7cmで、本州・四国・九州の平地ないし丘陵地に分布し（前田・松井，1999）、水田で繁殖し、非繁殖期には周辺の樹林や草地に生息する（Osawa and Katsuno, 2001）。2種の選定理由は以下の4点である。

- ①かつては農村地域の普通種であったが、現在は地域によって個体群の消滅が懸念されている。トウキョウダルマガエルは環境省レッドリストで「準絶滅危惧（NT）」に指定され（環境省自然環境保全局，2006）、8都府県の都道府県版レッドデータブックに記載されている（野生生物調査協会・Envision 環境保全事務所，2011）。ニホンアカガエルは25都府県の都道府県版のレッドデータブックに記載されている（野生生物調査協会・Envision 環境保全事務所，2011）。
- ②両種は、前述のようにコンクリート水路に接する水田では個体数密度が低いことが報告されている（Fujioka and Lane, 1997；東・武内，1999；佐藤・東，2004；大澤ら，2005）。
- ③両種はともに指に吸盤を持たないことから、吸盤を持つ種（ニホンアマガエルやシュレーゲルアオガエル）よりも、コンクリート水路から脱出しにくいと推察される。
- ④実験を行なう上で、捕獲・飼育が比較的容易である。両種はともに、茨城県もしくは栃木県で供試個体を手しやすく、かつ飼育も比較的容易である。

II コンクリート水路による移動障害とその対策の研究課題

2.1 コンクリート水路による移動障害

2.1.1 農村地域に生息するカエルの種および移動生態

本州・四国・九州の本島には、16種・亜種（以下、「種」とする）のカエル類が生息する。そのうち12種が水田や農業水路を繁殖場もしくは生息場として利用する（Table 1）。

ニホンアカガエルおよびヤマアカガエルは、水田で繁殖し、繁殖後の個体および変態後の個体は、水田から、隣接する樹林もしくは草地に移動・分散（以下、「移動」とする）する（Osawa and Katsuno, 2001）。同様に水田（もしくはため池）一樹林間を移動する移動性の種に、シュレーゲルアオガエル、モリアオガエル、ニホンヒキガエルおよびアズマヒキガエルがいる（前田・松井，1999）。

トウキョウダルマガエル、ナゴヤダルマガエル、トノサマガエル、ツチガエルおよびヌマガエルの5種は、水際からほとんど離れない定住性の種とされる（前田・松井，1999）。このうち、ナゴヤダルマガエルの幼体を標識・再捕獲した研究の結果では、同一の畦畔で生活する個体が多かった（吉村，2008）。一方で、定住性の種の中にも、圃区を越えて水田域内を移動する種がいる。例えば、戸金ら（2010）は、

ラジオテレメトリー調査により、トウキョウダルマガエルが非繁殖期にため池を含む水田域内を移動し、移動距離は最大で176m（追跡期間：23日間）であったことを報告している。

カエル類の移動に関して、道路での轢死（ロードキル）は国内外で問題（轢死した個体を食べようとした鳥類が轢かれる、二次的なロードキルも発生しうる）とされている（養父，1997）。ロードキル対策として、道路の下にトンネルを設ける（養父，1997）、壁等を設けてカエル類の道路への侵入を防ぐ（葦名・柳川，2006）、あるいはドイツでは集中的な移動時期に道路を封鎖する（ロイター，2011）等の対策が行なわれている。ただし、農道では一般に交通量が少ないことからロードキルによる影響は小さいと推察され、これに対して後述のように、移動経路上にあるコンクリート水路がカエル類の移動障害としてより大きな問題と考えられる。

2.1.2 カエル類の生息場・移動経路としての農業水路

農業水路のうち土水路では、水中もしくは陸上の多様な空間が、他の生物と同様に、カエル類の採食場や休息場、捕食者からの一時的な避難場、繁殖場、越冬場を含めた生息場となる。また水田一樹林間の移動、もしくは水田域内の移動の際の移動経路でもある。

農業農村整備後の水田域に設置されることが多いコンクリート水路は、以下の特徴をもち（森，2007）、土水路と大きく環境が異なる。

- ・標準断面は矩形または台形である。
- ・水深はほぼ一定である。
- ・流速は大きく、狭い区間でみればほぼ一定である。
- ・底質はコンクリートで、土砂が堆積している箇所もある。
- ・堆積した土砂に植物が生えることがあるが、土水路に比べて少ない。
- ・水路の途中に設けられた落差工や垂直（もしくは急勾配）の水路壁が、生物の移動を妨げている。

そのため、コンクリート水路は、上述の生息場・移動経路としての機能が損なわれている場合が多い。

2.1.3 カエル類のコンクリート水路への転落と移動障害

コンクリート水路では、カエル類が水路から脱出できないことが、生息場としての機能の劣化とともに問題となっている（林・高橋，2007）。コンクリート水路は水田域内を分断していたり、水田一樹林間の境界に敷設されていたりするため、前述のように水田域内を移動する際、もしくは水田一樹林間を移動する際に、移動経路上にあるコンクリート水路に個体が転落する。また、農家による水田の畦畔や水路の草刈りの際、個体が退避しようとして水路に転落することもある。しかし、コンクリート水路の垂直な壁は指に吸盤のない種が登攀できない（例えばダルマガエル類、ヒキガエル類について報告されている。大河内ら，2001；土井，2001）。また吸盤を持つアオガエル類やニホンアカガエルも、水が流れている水路で水路壁にしがみつくと、更に日射等によって乾いた水路壁をよじ登ることは困難だ

と考えられる。

実際、松澤ら (2008) は、ほ場整備済みの谷津田域において、幅 30cm の U 字溝に転落したカエル類を計数し、シュレーゲルアオガエル (全個体数 602 に占める割合 61%)、トウキョウダルマガエル (19%)、ニホンアマガエル (15%)、ニホンアカガエル (4%) およびツチガエル (1%) の転落を確認している。松崎 (2010) は、松澤ら (2008) と同じフィールドで U 字溝に転落したニホンアカガエルを救出し、うち死亡個体の割合は 2~47% (3 年間で、年により傾向が異なった) と報告している。またコンクリート水路に接する水田では、ニホンアカガエルおよびトウキョウダルマガエルの生息密度が低い実態が報告されている (Fujioka and Lane, 1997; 東・武内, 1999; 佐藤・東, 2004; 大澤ら, 2005)。

以上のように、コンクリート水路では、個体が転落し、その後に脱出できない状態にある。更に水田一樹林間の個体の移動もしくは別の水田への移動が妨げられている状態にある。コンクリート水路による移動障害は、ニホンアカガエル等の移動性の種とトウキョウダルマガエル等の定住性の種の両方にとってマイナスと考えられる。

2.2 コンクリート水路における移動対策の実態と課題

2.2.1 コンクリート水路における移動対策の事例

コンクリート水路による移動障害を解消するため、カエル類の転落を防ぐためのフタ等の転落防止工や水路からの脱出を可能にするスロープ等の脱出工が設置され始めている (Fig. 4)。これらの移動対策 (移動障害を解消する対策) について、商業誌や試験報告、講演要旨集等も含めて収集した事例を Table 2 に示す。

事例 (Table 2) を整理すると、移動対策はいくつかのタイプに分けられる。転落防止工では、水路区間の全面 (数

十~数百 m) にフタを設置するもの (全面タイプ, Fig. 4 の a)、それができない場合に一部の区間 (数 m) にフタを設置するもの (部分タイプ, Fig. 4 の b) がある。脱出工では、対象区間のコンクリート壁面を傾斜させ、その斜壁面に凹凸をつけたもの (全面タイプ, Fig. 4 の c)、および一部の区間 (数十 cm~数 m) の両側もしくは片側を拡幅し、スロープやフトンカゴを設置したもの (部分タイプ, Fig. 4 の d) がある。これらの脱出工の多くは、いずれも水利事業等での水路施工時にしか設置できない。仮に既存のコンクリート水路に設置する場合には、既存の水路を撤去して新たに脱出工を設置することになるため、大掛かりな工事が必要であり、現実的ではない。しかし、カエル類の生息地によっては既設のコンクリート水路での対策こそ必要だと考えられるため、アタッチメントとして設置できる簡便な着脱式の脱出工 (Fig. 4 の e) も必要である。この例としてマツ材および麻紐を用いた脱出スロープ (森, 2001) や、集水桝へのネットの設置 (高橋, 2006)、「亀かえるスロープ」 (本多, 2011; Fig. 4 の e) が考案されている。

なお、Table 2 に記載した以外にも、農業農村整備事業の個別地区で対策が行なわれていることがある。しかし、事業計画書や設計書等にすら具体的な工法や仕様の記載がない場合も多い。このことは、事業の完了後もしくは担当者の異動後には、設置された移動対策の詳細を把握できなくなる危険性を示唆する。対策の知見を蓄積・共有する上で、情報の一元的な集約・管理が望まれる。

2.2.2 移動対策の評価の現状と課題

転落防止工のうち、全面タイプの設置によってニホンアカガエルがコンクリート水路を横断できることが確認されている (中村ら, 2002; 水谷ら, 2005; 川嶋, 2007)。部分タイプの転落防止工について、フタの設置場所や設置密度と個体の横断の成功との関係は明らかではない。

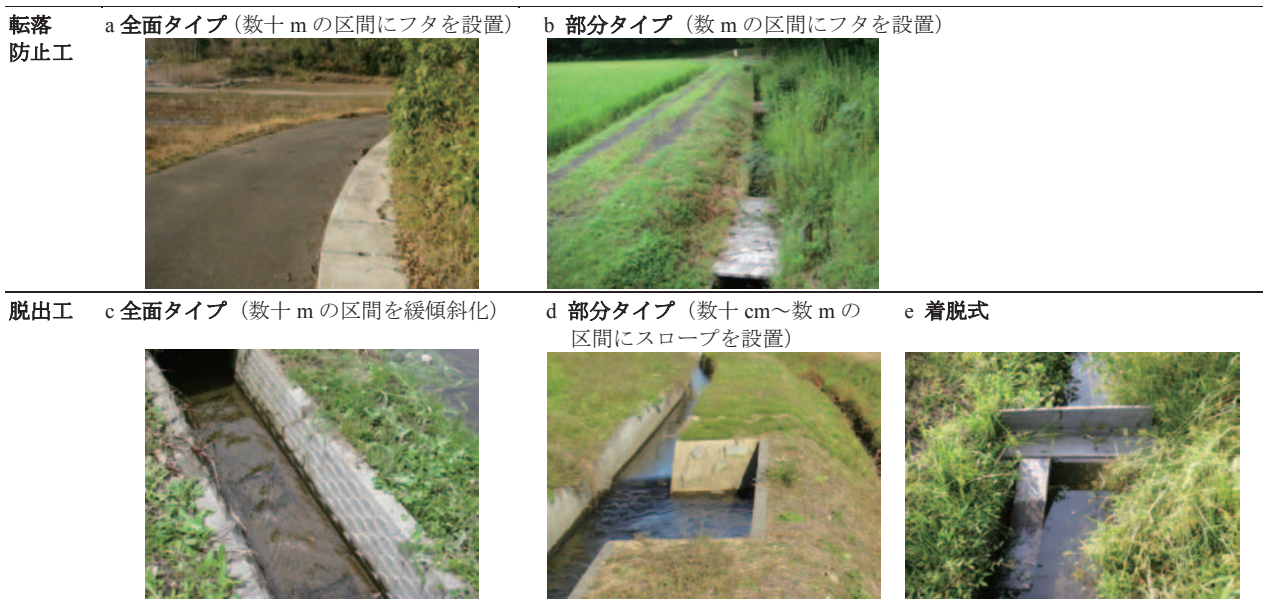


Fig. 4 移動障害を解消するための対策の種類
Types of migration countermeasures

脱出工については、設置事例 (Table 2) が多い一方で、これらの中には開発者の経験に基づいて設計されているものも多い。設置後にも定量的な効果の把握はほとんど行われていない。カエル類がどの程度脱出できるか、もしくは個体群を保全できるか等の効果を示している論文は見当たらない。査読つきでない学会要旨等で報告はあるが (森, 2001; 坂本・岡, 2006; 高橋, 2006; 加島・渡邊, 2006; 大平ら, 2008; 福井県農業試験場, 2009; 池田ら, 2009; 吹田, 2011; 横山ら, 2011), これらは試験方法等が詳細に記載されていないため、効果を判断するには不十分である。したがって、これらの対策の性能を評価することは重要な課題である。

地域の組織や NPO が、生物とのふれあいを楽しむ点に重点を置いて移動対策を講じる際には、カエル類に対する効果が低くても構わない場合があるかもしれない。しかし、農業農村整備事業や国・地方自治体の補助を受けて設置する場合には、地区の実情に応じて、対象の個体群を保全できる対策を講じなければならない。そのため、対策の効果

の検証、更に対策の開発・改良に不可欠なカエル類の運動能力や行動特性等の知見の蓄積が必要である。

なお、林道等の道路側溝に設置する脱出工に関する知見として、川西・西原 (1995), 倉品 (1995), 倉品・阿部 (1996), 石塚・鈴木 (1998), 野上・鈴木 (1999), 大河内ら (2001), 葦名・柳川 (2006) がある。道路側溝は降雨中・後を除けば基本的に水が流れず、灌漑期間中は通水している農業水路とは特性が大きく異なることから、側溝と水路で同じ性能が保障されるとは限らない。側溝で用いられている脱出工を水路に設置する場合には、水が流れている条件での性能の試験が必要である。

脱出工の設計に不可欠なカエル類の遊泳や跳躍、登攀 (とうはん) に関する知見も不十分である。跳躍について、水平方向の跳躍能力 (枅屋ら, 2000; 土井, 2002) の知見はあるが、水路からの脱出につながる垂直方向の跳躍能力は調べられていない。登攀能力の知見 (大河内ら, 2001; 土井, 2001, 2009; 池田ら, 2009) について、大河内ら (2001) は林道の側溝を想定した水が溜まらない装置での実験、土

Table 2 移動障害を解消するための対策の事例

Examples of migration countermeasures

タイプ	概要	施工場所	出典等
転落防止工	全面	コンクリート製のフタ	栃木県 水谷ら (2005), 栃木県農地整備課 HP
	部分	間伐材によるフタ	栃木県 林・高橋 (2007)
		梨の防電ネットによるフタ	栃木県 林・高橋 (2007)
		コンクリート製のフタ	栃木県 筆者ら現地踏査
		コンクリート製のフタ	千葉県 牧ら (2006)
ネットによるフタ	千葉県 緑資源機構 (2006)		
脱出工	全面	製品名「ハイ!アガール」。数 mm 幅の溝をつけた 5 分勾配の斜面	青森県 吹田 (2011)
	部分	製品名「NS 水路」。うろこ状の凹凸をつけた斜面	栃木県 筆者ら現地踏査
		壁面を傾斜させ、多孔質のコンクリートを貼り付け	千葉県 緑資源機構 (2006)
		葦簀を貼り付けたコンクリートフリューム	埼玉県 富岡ら (2007)
		階段状の凹凸をつけた 5 分勾配の斜面	大分県 加島・渡邊 (2006)
		名称「小動物脱出水路工」。片側に脱出用スロープを設置	青森県 青森県農村整備課 (2011)
		名称「木製集水桝」。集水桝を丸太で護岸	青森県 青森県農村整備課 (2011)
		片側を拡幅し、スロープを設置	秋田県 筆者ら現地踏査
		片側を拡幅し、スロープを設置	岩手県 緑資源機構 (2006)
		片側を拡幅し、スロープを設置	岩手県 筆者ら現地踏査
		片側を拡幅し、スロープを設置	福島県 高橋 (2006)
		名称「ミニワンド」。両側を拡幅し、四隅にフトンカゴを設置	栃木県 栃木県農務部 (2004)
	両側を拡幅し、スロープを設置	千葉県 坂本・岡 (2006)	
	片側を拡幅し、スロープを設置	埼玉県 関東農政局農村環境部事業計画課 (2002)	
	片側を拡幅し、スロープを設置	新潟県 筆者ら現地踏査	
	片側を拡幅し、スロープを設置	岐阜県 緑資源機構 (2007)	
	名称「縦型スロープ」。両側を拡幅し、スロープを設置	福井県 前野・上野 (2009), 福井県農業試験場 (2009)	
	片側を拡幅し、スロープを設置	京都府 緑資源機構 (2006)	
	製品名「ハイダセル」。片側を拡幅し、スロープを設置	岡山県 ランデス株式会社 HP	
	集水桝にスロープを設置	岡山県 横山ら (2011)	
	片側を拡幅し、スロープを設置	高知県 高知県 (2007)	
	両側を拡幅し、フトンカゴで護岸	徳島県 徳島県 HP	
	集水桝を空石で護岸	徳島県 徳島県 HP	
片側を拡幅し、スロープを設置	鹿児島県 鹿児島県薩摩川内市 (2008)		
部分 (着脱式)	名称「亀かえるスロープ」	滋賀県 本多 (2011)	
	集水桝に防水ネットを垂らす	福島県 高橋 (2006), 緑資源機構 (2006)	

井 (2009) および池田ら (2009) も乾いた壁面での実験、土井 (2001) は垂直な壁での実験結果である。そのため、通水を前提とする農業水路においてより効果の高い脱出工を検討するのに、直接成果を適用できない。

2.2.3 本研究で注目する課題

1) 脱出工の性能評価

以上のように、コンクリート水路における移動対策の効果に関する知見は全体的に不足しているが、特に脱出工に関する知見が不十分である。そこで、脱出工によって個体がコンクリート水路から脱出できるかどうか、つまり脱出工の性能評価をまず行なう。その評価の指標は、供試個体の水路からの脱出率 (以下、「水路脱出率」とする) とする。

本報では、現場で全面タイプよりも部分タイプの脱出工が多く設置されていること (Table 2)、実験水路の大きさや設置条件等の制約から全面タイプでの試験ができなかったことから、部分タイプの脱出工を評価の対象とした。部分タイプの脱出工を農村工学研究所内 (以下、「所内」とする) の実験水路に設置し、実験により水路脱出率を計測する (3.1 節)。また、3.1 節で得られた知見を活用して着脱式の脱出工を試作し、その水路脱出率を計測する (3.2 節)。併せて、コンクリート水路に転落した個体の挙動、斜面の登攀能力および脱出工への到達を促す水理条件を明らかにする。

トウキョウダルマガエル等の定住性の種では、コンクリート水路の両側に水田があれば、水路のどちらの側に脱出しても生息は可能だと推察される。一方で、ニホンアカガエルのように水田一樹林間を移動する種にとっては、コンクリート水路から脱出する際に、転落前と反対側に脱出できること、すなわち横断の成功がより重要だと考えられる。そこで 3.3 節では、水路脱出率とコンクリート水路の横断成功率との関係を議論する。

2) 移動対策による個体群保全効果の評価

移動対策、例えば脱出工の設置によって、転落した個体がコンクリート水路から脱出できることはまず重要である。しかし、脱出できるだけではなく、次の段階として、移動対策の実施地区で将来にわたって個体群が存続できることが望まれる。そのため、時間的な個体数の変動 (以下、「個体群動態」とする) に注目した評価が必要である。

個体群動態に基づく移動対策の評価には、フィールドでのモニタリングの実施が必要である。しかし、評価のための数年から数十年にわたるモニタリングは困難な場合も多い。仮にモニタリングを継続できたとしても評価するのに長期間を要し、評価結果が得られるのは数十年後となる。これに対し、対策時点で、任意の期間後に個体群が存続する確率 (以下、「個体群存続率」とする) を事前予測・評価できる手法の開発が必要だと考えられる。そこで、本報では個体群存続性分析 (Population Viability Analysis ; PVA) に着目した。個体群存続性分析は、対象種が直面する脅威を識別し、その種が将来の所与の期間を存続する可能性を評価する手続きとされる (Akçakaya et al., 1999)。カエル類については、生息場の分断 (Stephan et al., 2001 ; Hels and

Nachman, 2002 ; 松崎, 2010 ; 戸金, 2010) や移入した捕食者 (Doubledee et al., 2003) に対する影響評価に利用されている。

本報では、移動対策によって個体群の存続を可能にする効果 (以下、「個体群保全効果」とする) に注目した。その評価の指標は、個体群動態モデルにより計算した個体群存続率とする。4.1 節では、対象種と個体群動態モデルの骨格を検討する。4.2 節では、移動を考慮しない場合の個体群動態モデルをまず構築する。その上で、生存率等のパラメータ値を推定するとともに、モデルの妥当性を確認する。4.3 節では、密度依存性を考慮した個体群動態モデルを構築する。4.4 節では、移動対策の個体群保全効果を評価するための、コンクリート水路の横断行動を組み込んだ個体群動態モデルを構築する。その上で、コンクリート水路による移動障害が個体群存続率に与える影響を明らかにするとともに、移動対策の個体群保全効果を考察する。

III 脱出工の性能評価

3.1 部分タイプの脱出工の性能評価

本節では、トウキョウダルマガエルとニホンアカガエルでは前者の運動能力がより低いと考えられたため、トウキョウダルマガエル (Fig. 3 の a) を供試個体として、水路脱出率を指標として部分タイプの脱出工の性能を評価することとした。加えて、スロープの傾斜角並びに水理条件のうち現場水路で操作しやすい水深および流速と水路脱出率との関係を明らかにするとともに、水路に転落した直後の個体の行動特性を明らかにする。なお、本節で注目したスロープの傾斜角および水路の水深・流速は、脱出工を設計する上で最も基本的な条件といえる。しかし、アズマヒキガエルが登攀できるスロープの傾斜角に関する論文 (大河内ら, 2001。ただし、農業水路ではなく、水の流れない道路の側溝を対象としたもの) しか見当たらない。

3.1.1 実験方法

(1) 供試個体

2007年8~10月に栃木県市貝町の谷津田において、素手もしくは手網により捕獲したトウキョウダルマガエル 85 個体を実験に用いた。供試個体の体長 (頭胴長) 分布は Fig. 5 のようになり、体長は 38 ± 10 mm (平均 \pm 標準偏差) であった。捕獲後の個体は体長別に 34~90L 水槽 3 個に収容し、市販のミルワームおよびコオロギを餌として室内で飼育した。

(2) 実験装置

実験装置の概要を Fig. 6 に示す。ここでは、現場で末端・小水路として採用されているコンクリート水路の諸元を参考にしつつ、実験条件の設定や行動観察の容易さ等を考慮して、幅 20cm、深さ 25cm のベニヤ製水路を室内に配置した。実験用水は循環しており、ポンプ (最大流量 2.0L/s) によって貯水槽から汲み上げられ、上流端の三角堰、水路、下流端の水位調節ゲートを順に通って貯水槽に帰還する。流路の途中には 100cm 区間の脱出用スロープ (以下、「ス

ロープ」とする)を両側に設置した。このスロープの傾斜角は5段階(30°, 45°, 60°, 75°, 90°)に調節可能である。なお、事前にベニヤとコンクリートU字溝の壁を個体に登攀させて比較したところ、登攀しやすさに大きな差はみられなかった。

(3) 実験条件

実験では、①スロープの傾斜角、②水理条件のうち現場水路で操作しやすい水深および断面平均流速(以下、「流速」とする)について、段階的に変化させた際のトウキョウダルマガエルの水路脱出率を把握するため、以下のように実験条件を設定した。

1) 実験① スロープの傾斜角と水路脱出率との関係

スロープの傾斜角と個体の水路脱出率との関係を検討するため、Table 3のCase1-1~1-15の実験条件を設定した。流量は捕獲地区での計測値等を参考に2L/sとし、水深は個体の水路への着地(底に後脚が届く)状況に応じて2段階(2cm, 水路底に全個体が着地できる; 5cm, 全個体が着地できず、体が浮き上がる)を設定した。また、コントロールとして流量0L/sを実験条件に加えた。スロープの傾斜角については30°, 45°, 60°, 75°, 90°とした。したがって当実験では流量、水深および傾斜角の全組合せを実験条件とした(Table 3のCase1-1~1-15)。

なお、傾斜角30°のCase1-6およびCase1-11を代表させて表面流速分布を画像解析(ライブラリー社 Flow-PTV を使用)した。プラスチック製の浮き100個による流速分布

はFig. 7のように推定され、表面の水流は拡幅部でわずかにスロープに向かう傾向および逆流する傾向がみられた。

2) 実験② 傾斜角30°のスロープにおける水深、流速と水路脱出率との関係

水深および流速と個体の水路脱出率との関係を検討するため、水深と流速を段階的に変えてTable 3のCase2-1~2-6の実験条件を設定した。スロープの傾斜角を実験①から個体が最も登攀しやすいと推察された30°に固定した。水深は2段階(2cm, 5cm)とし、流速は現場での測定値を参考に実験①の20cm/s, 50cm/sおよび更に遅い5cm/sの3段階を設定した。これらの水深および流速を組み合わせた水理条件となるように流量および水深を調節した。ただし、ポンプの最大流量を超える水深5cm・流速50cm/sの組み合わせは実験しなかった。なお、実験②は実験①と同じ実験方法および解析方法を採用したことから、実験の長期化による個体の疲労や慣れを避けるため、水深・流速・傾斜角が同一の条件(Case2-1, 2-4および2-6)については実験①のデータを使用した(Table 3)。

(4) 実験方法

各Caseの条件(Table 3)を設定した後、飼育水槽から無作為に選んだ45個体を水路の転落地点A(スロープ区間中央)またはB(区間上流1m)に同時に転落させた(Fig. 6)。転落地点はCase1-1~1-5およびCase2-1(流量0L/s)では地点Aとし、Case1-6~1-15およびCase2-2~2-6(0.2~2L/s)では個体の流下行動に配慮して地点Bとした(Table 3)。転落後は水路直上のビデオカメラにより、反応が落ち着く

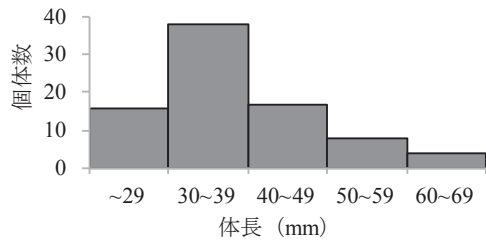


Fig. 5 供試個体の体長分布

Body length distribution of test individuals

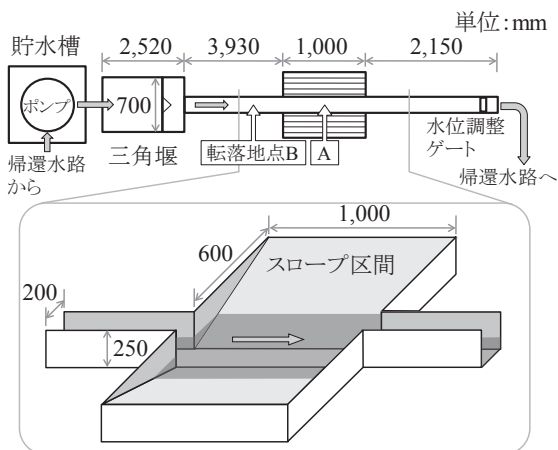


Fig. 6 実験装置の概要

Diagram of experiment device

Table 3 実験条件一覧
Experimental conditions

Case	流量 L/s	水深 cm	平均流速 ¹⁾ cm/s	スロープ の傾斜角 [°]	落下 地点 ²⁾
1-1				30	
1-2				45	
1-3	0 ³⁾	0 ³⁾	0	60	A
1-4				75	
1-5				90	
1-6				30	
1-7				45	
1-8	2	2	50	60	B
1-9				75	
1-10				90	
1-11				30	
1-12				45	
1-13	2	5	20	60	B
1-14				75	
1-15				90	
2-1 ⁴⁾	0 ³⁾	0 ³⁾	0		A
2-2	0.2	2	5		
2-3	0.8	2	20		
2-4 ⁵⁾	2	2	50	30	B
2-5	0.5	5	5		
2-6 ⁶⁾	2	5	20		

¹⁾ 平均流速は流量、水深、水路幅20cmから算出したもの。

²⁾ A: スロープ区間の中央, B: スロープ区間の1m上流 (Fig. 6 参照)。³⁾ コントロール条件。⁴⁾ Case1-1のデータを使用。⁵⁾ Case1-6のデータを使用。⁶⁾ Case1-11のデータを使用。

までの個体の行動を60分間撮影した。実験途中で水路から脱出した個体については、その体長を計測した。終了後は個体を水路から取り除き、元の飼育水槽に戻した。

実験は2007年8~10月に原則として1日1Caseを1~2日間隔で行なった。実験時の室温は $24.6 \pm 3.2^\circ\text{C}$ (平均±標準偏差)、水温は $23.1 \pm 1.7^\circ\text{C}$ であった。どのCaseも個体の重複使用を避けられないため、各Caseの繰り返し数は1回にとどめた。

(5) VTRによる個体の行動解析

解析では、まず各CaseのVTRから、転落後60分間における個体の行動を観察した。次に脱出工の評価指標として、転落した45個体のうちスロープに到達した個体の割合(以下、「スロープ到達率」とする)、およびスロープを登攀して水路外に脱出した個体の割合(以下、「水路脱出率」とする)を計数した。

3.1.2 結果

(1) 転落後の個体の行動

各Caseに共通して、転落後の個体は徐々に転落地点から分散した。通水条件下のうちほとんどのCaseでは、下流側に移動する傾向が強かった。

通水条件下では、流れに逆らう個体の遊泳行動が観察された。この行動は主として3過程が繰り返され、①連続して両脚で蹴り出す、②蹴り出すタイミングがずれ、交互に脚を蹴り出す、③一旦脚を止める、から成っていた。

遊泳行動の休止中に静止行動が観察された。主として後脚が水路底に届く個体は着地し、届かない個体は前肢で水路壁につかまっていたが、総じて同じ位置に静止し続ける

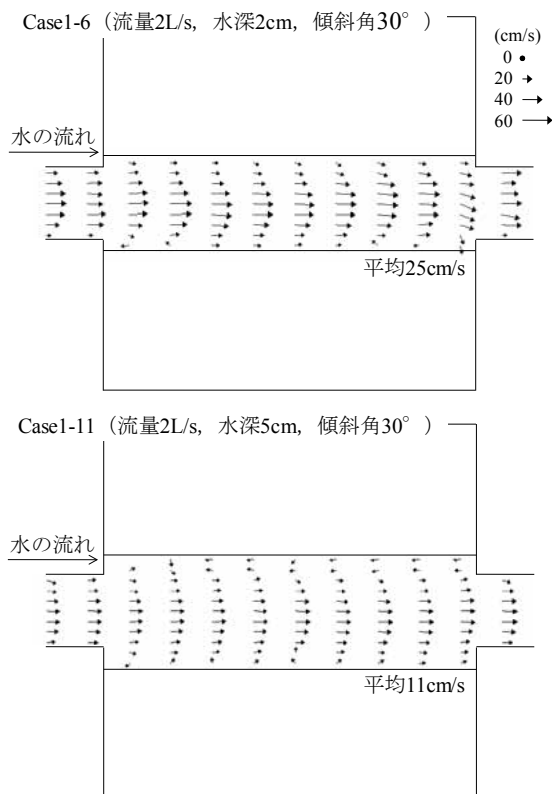


Fig. 7 表面流速分布の例

Example of velocity at water surface

個体はいなかった。

水路から脱出した個体は、ほとんどのCaseにおいてスロープを利用した。その割合は全体で30% (全Case延べ810個体のうち241個体)であった。その他、跳躍して水路外に飛び出す個体(2%, 13個体)もわずかながらみられた。なお、Case1-6 (流量2L/s, 水深2cm, 傾斜角 30°)およびCase1-11 (流量2L/s, 水深5cm, 傾斜角 30°)におけるそれぞれ3個体を代表させて、その軌跡をFig. 8に示した。個体の軌跡は一樣ではなく、スロープに到達しても登攀せずに静止する個体(Fig. 8 Case1-6の個体①)や再び泳ぎ出す個体(Case1-6の個体③)も中にはみられた。

(2) 実験① スロープ傾斜角による水路脱出率への影響

1) Case1-1~1-5 (コントロール)

Case1-1~1-5 (流量0L/s, 水深0cm), Case1-6~1-10 (2L/s, 2cm), Case1-11~1-15 (2L/s, 5cm)のそれぞれについて、スロープ到達率と水路脱出率をFig. 9にまとめて示す。水路から脱出した個体には多様な体長の個体が含まれていた。これを示すため、体長区分(便宜的に30mm未満を小型, 30mm以上40mm未満を中型, 40mm以上を大型とした)ごとに網掛を変えて表わしている。

Case1-1~1-5では傾斜角 30° ~ 60° のスロープ到達率は49 (Case1-3)~60% (Case1-1)、水路脱出率は42 (Case1-3)~58% (Case1-2)であった(Fig. 9のa)。傾斜角 45° ~ 90° では跳躍によって脱出する大型個体が計9個体みられた。

2) Case1-6~1-15 (通水条件下)

Case1-6~1-10 (水深2cm)およびCase1-11~1-15 (水深5cm)では、水路から脱出した個体はすべてスロープを使用し、跳躍して脱出した個体はいなかった。

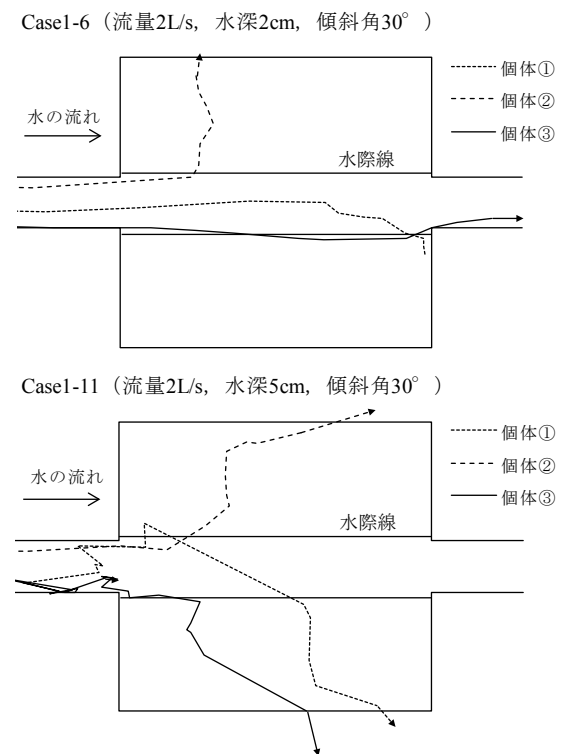


Fig. 8 転落した個体の軌跡の例

Example of individual trajectories after dropping into channel

スロープの傾斜角に着目すると、Case1-6~1-10のうち、

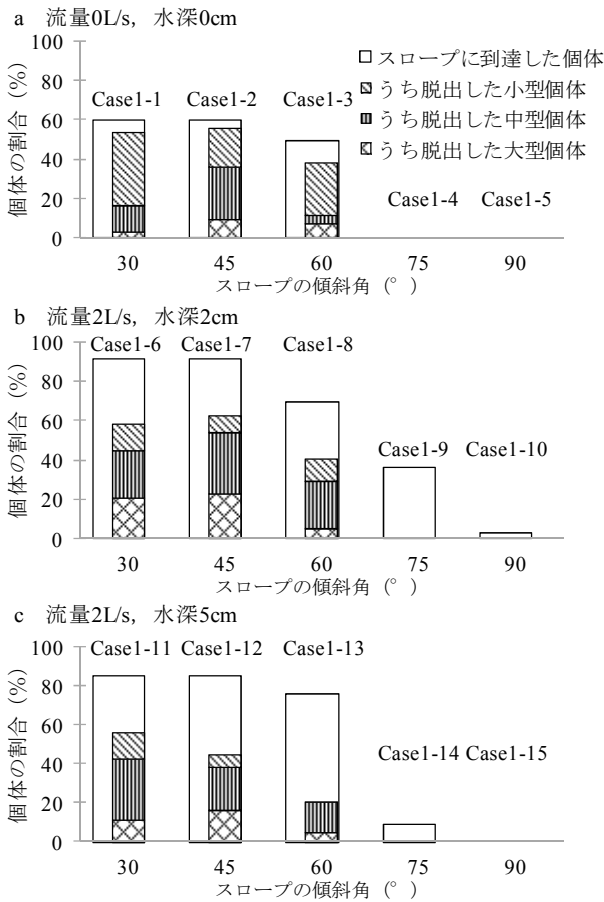


Fig. 9 {流量 0L/s・水深 0cm}, {流量 2L/s・水深 2cm} および {流量 2L/s・水深 5cm} の Case におけるスロープ到達率と水路脱出率

Proportion of individuals reaching sloped walls and escaping from channel after falling into the channel with {flow rate of 0 L/s and depth of 0 cm}, {flow rate of 2 L/s and depth of 2 cm} and {flow rate of 2 L/s and depth of 5 cm}

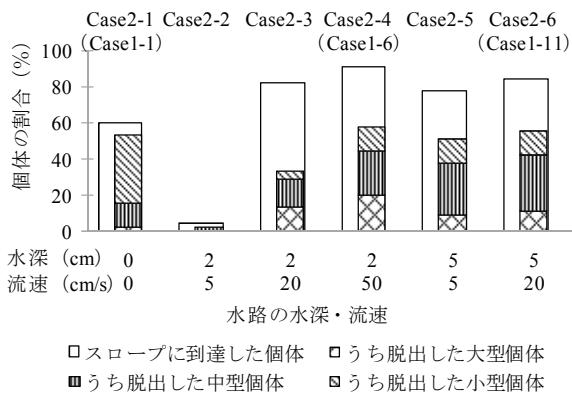


Fig. 10 異なる水深 (0, 2, 5cm)・流速条件 (0, 5, 20, 50cm/s) の組み合わせにおけるスロープ到達率と水路脱出率

Proportion of individuals reaching sloped walls and escaping from the channel after dropping into the channel with a combination of depths of {0, 2 and 5 cm} and average flow velocities of {0, 5, 20 and 50 cm/s}

スロープ到達率は傾斜角 30°で 92% (Case1-6) になったが、傾斜角 90° (スロープなし) では 4% (Case1-10) まで低下した (Fig. 9 の b)。水路脱出率は傾斜角 30°で 62% (Case1-6) であったが、傾斜角 75°以上 (Case1-9, 1-10) になると急激に 0% になった。この傾向は Case1-11~1-15 でも同様であった (Fig. 9 の c)。スロープの傾斜角が大きくなるほど、スロープ到達率および水路脱出率は低くなる傾向がみられた (ANOVA, スロープ到達率: $p < 0.01$, 水路脱出率: $p < 0.01$)。

一方、水深 (・流速) に着目すると、スロープ到達率は水深 2cm (流速 50cm/s) の時 2 (Case1-10) ~91% (Case1-6, 1-7), 水深 5cm (流速 20cm/s) の時 0 (Case1-15) ~84% (Case1-11, 1-12) であった。水路脱出率は水深 2cm (流速 50cm/s) の時 0 (Case1-9, 1-10) ~62% (Case1-7), 水深 5cm (流速 20cm/s) の時 0 (Case1-14, 1-15) ~56% (Case1-11) であった。スロープ到達率と水路脱出率ともに水深 (・流速) による違いは認められなかった (ANOVA, スロープ到達率: $p > 0.05$; 水路脱出率: $p > 0.05$)。

傾斜角 30~60° (Case 1-6~1-8 および 1-11~1-13) では、小型・中型・大型のいずれの体長区分の個体も脱出した。これらの Case について、体長区分別の個体数を VTR の静止画像から推定、体長区分別の水路脱出率を算出し、体長区分、傾斜角および水深 (・流速) による水路脱出率の差を比較した。しかし、どの因子についても特徴的な傾向はみられず、統計的に有意な差もなかった (ANOVA, $p > 0.05$)。水路脱出率と同様に傾斜角 30°と 45°のスロープ到達率はほぼ等しかった (Fig. 9 の b, c)。しかし、傾斜角 45°ではスロープに到達後、上陸する過程で足を滑らせる大型個体が 8 個体みられた。

(3) 実験② 傾斜角 30°のスロープにおける水深・流速による水路脱出率への影響

1) Case2-1 (コントロール)

Case2-1~2-6 について、スロープ到達率と水路脱出率を Fig. 10 に示す。Case2-1 ではスロープ到達率は 60%, 水路脱出率は 53%であった。

2) Case2-2~2-6 (通水条件下)

Case 2-2 (水深 2cm・流速 5cm/s) のスロープ到達率は 4%, 水路脱出率は 2%であった。Case2-3~2-6 (水深 5cm 以上もしくは流速 20cm/s 以上) のスロープ到達率は 78 (Case2-5) ~91% (Case2-4), 水路脱出率は 33 (Case2-3) ~58% (Case2-4) であった (Fig. 10)。Case 2-2 でのスロープ到達率および水路脱出率は Case2-3~2-6 での値と比較して著しく低かった (χ^2 検定, Tukey 検定, $p < 0.01$)。なお、大型 4 個体 (Case2-2 の 3 個体, Case2-5 の 1 個体) はスロープ区間以外で跳躍して水路から脱出した。

3.1.3 考察

(1) 脱出しやすいスロープの傾斜角

スロープの傾斜角を変えてスロープ到達率および水路脱出率を試験した結果 (実験①), 傾斜角 30°と 45°では同程度に高いスロープ到達率および水路脱出率を示した (Fig. 9)。しかし、傾斜角 45°ではスロープに上陸する際に足を滑らせる行動、もしくは登攀する際に滑落する行動が特に

大型個体で観察され、傾斜角 45°のスロープは大型個体にとって登攀しにくかったと推察される。登攀個体の観察から、指に吸盤を持たない本種は、水路壁やスロープの凹凸に指を掛けながら登攀していた。大きな個体ほど、同じ大きさの凹凸に対して指を掛けにくくなるため、登攀能力が相対的に低くなるのかもしれない。

一方で、跳躍による水路からの脱出が体長 38~62mm の個体で観察されており、大きな個体では跳躍による水路からの脱出も期待される。本種の体長と水平方向の跳躍距離との間に正の相関が報告されており(梶屋ら, 2000), 本種と近縁のナゴヤダルマガエルおよびトノサマガエルでも同様の傾向が報告されている(土井, 2002)。水路から脱出する際に必要となる垂直方向の跳躍能力をこれらから議論することはできないが、大きな個体は垂直方向の跳躍能力も大きいと推察される。しかし、水路壁がより高い水路や個体の後脚が水路底に届かない大水深の水路では、跳躍での脱出は困難になるだろう。したがって、部分タイプの脱出工でスロープを設置する場合や全面タイプの脱出工で壁面を傾斜させる場合には、大きな個体の登攀能力にも配慮する必要があり、傾斜角を 30°以下とすることで、個体がより脱出しやすいと考えられる。

スロープの登攀能力について、変態直後のアズマヒキガエル幼体(体長は記載されていない)でも同様の結果、すなわち傾斜角 60°以下で登攀でき、傾斜角が小さいほど道路側溝からの脱出率が相対的に高かったことが報告されている(大河内ら, 2001)。吸盤をもたない他の種についても登攀能力を体長別に把握し、これらの種別にスロープの傾斜角と水路脱出率との関係を明らかにする必要がある。

(2) 脱出を促す水理条件

水路の水深と平均流速を変えてスロープ到達率と水路脱出率を試験した結果(実験②), 水深 2cm・流速 5cm/s (Case2-2)でのスロープ到達率は他の条件 (Case2-3~2-6) と比べて著しく低かった (Fig. 10)。この条件では、個体は自由に移動または静止でき、下流への移動傾向が弱かったことから、スロープ区間にたどり着く個体が少なかったと考えられる。また水のない条件 (Case2-1)において、個体はスロープ区間の中央に転落したにもかかわらず、スロープ到達率は流水条件下 (Case2-3~2-6) での値と比べて低く (Fig. 10), 目の前にあるスロープを必ずしも利用しなかった。すなわち、行動が阻害されない水理条件の場所に転落した個体は、自由に移動するが故に脱出工に到達できない可能性がある。

では、水路を流下してスロープ区間に来た個体は、この区間を通過せずにスロープに到達するのだろうか。個体がスロープに到達する理由について、実験での観察から、後脚が水路底に届かない水深では岸辺を目指すという行動特性によると仮定し、補足的な試験を行なった。補足試験では、FRP 水槽 (116cm×77cm) を水深 10cm (個体の後脚は底に届かない) に湛水し、トウキョウダルマガエル 20 個体を転落させた。水槽に転落した個体は遊泳と静止を繰り返したが、1 分間隔で水槽直上から写真撮影して個体の分布を確認したところ、壁につかまっている個体数 (13±5; 平

均±標準偏差) はつかまっていない個体数 (7±5) に比べて有意に多かった (ANOVA, $df=1$, $F=161$, $p<0.01$)。以上の結果により、自由に遊泳できる静水条件ですら遊泳せずに壁につかまっていることが多かったことから、遊泳行動が制限される流水条件下ではこの傾向がますます強まると考えられる。実際には、実験水路の水面の水流は拡幅部でわずかにスロープに向かう場所もあり (Fig. 7), 流下してきた個体はいつでもスロープに到達しやすかったと推察される。したがって、脱出工より上流において、下流への移動傾向を高める水理条件に設定すれば、本種は水路壁に沿って移動し、下流に配置されている脱出工に到達できると考えられる。

(3) トウキョウダルマガエルの遊泳能力の推定

各 Case では、転落後の個体について、流れに逆らう遊泳行動がしばしば観察された。個体の主な遊泳行動は 3 過程に分類され、このうち連続して両脚で蹴り出す行動を遊泳の基本(以下、「基本遊泳」とする)とみなした。そこで補足的に、流れに対する基本遊泳の遊泳速度 (=移動距離 cm/時間 s) と遊泳時間を、その観察頻度が高かった Case1-10 および Case1-15 について体長区分別に算出した。

その結果、基本遊泳時の遊泳速度は平均 29 (流速 20cm/s, 小型個体) ~62cm/s (流速 50cm/s, 大型個体) であり、体長の大きな個体ほど、また流速が大きいほど遊泳速度は大きかった。一方で、遊泳時間は体長や流速による違いは認められず、平均 1.2~3.2s であった。なお、流速 5cm/s 時でも、流速 20cm/s 時と同程度の遊泳速度 [平均 21 (小型個体) ~32cm/s (大型個体)] および遊泳時間 (平均 1.3s) であった。すなわち、緩い流速であっても 1 回の基本遊泳で上流へ移動できる距離は短く、本種が遊泳して上流へ移動するのは困難であると考えられる。現場のコンクリート水路においても本種が下流に流される様子が頻繁に観察され、本種は流水中の遊泳を得意としないと考えられる。

したがって、部分タイプの脱出工を設置する場合には、流されて脱出工を通過しないように脱出工の周囲の流速を小さくすること、および更に下流へと流された個体が脱出する機会をつくるために複数箇所に脱出工を設けることが必要だと考えられる。特に脱出工の周辺では設計流量に対して流速をできるだけ小さくすることが、個体を脱出しやすくする上で重要だと考えられる。

3.1.4 まとめ

コンクリート水路に転落したカエル類が脱出できるための脱出工について、部分タイプの脱出工の性能を評価した。供試個体には、登攀能力が低く、ほ場整備等の影響を受けやすいとされるトウキョウダルマガエルを用いた。試験条件として、脱出工のスロープの傾斜角および水路の水深・流速を変えながら試験を繰り返した。その結果、以下が明らかになった。

①脱出工のスロープの傾斜角を変えながら水路脱出率を計測した結果、通水している場合、傾斜角 30~45°で水路脱出率は 50~60%であった。傾斜角が大きくなると水路脱出率が低下し、75~90°で水路脱出率は 0%であった。

すなわち、脱出工のスロープの傾斜角は 30~45°で水路脱出率が相対的に高かった。更に、本種の大型個体の登攀しやすさを考慮して、30°以下が望ましいと考えられた。

- ②水路の水深と流速を変えながら水路脱出率を計測した結果、水深 2cm・流速 5cm/s での水路脱出率は 2%と低く、水深 5cm 以上もしくは流速 20cm/s 以上では、水路脱出率は 33~58%であった。前者の条件では、個体が自由に行動できるように脱出工に到達せず、後者の条件では、個体が自由に行動しにくくなり、水路壁にとりつこうとしながら壁沿いを流下する途中で脱出工に到達すると考えられた。したがって、個体が自由に行動しにくい水理条件とすること、例えば脱出工より上流で個体の後脚が水路底に届かない水深に設定することで、脱出を促すことができると考えられた。
- ③個体の遊泳能力を解析した結果、遊泳速度は流速条件によって平均 29~62cm/s、遊泳時間は平均 1.2~3.2s であった。個体が遊泳して上流に移動するのは難しいと考えられることから、脱出工の周辺では、個体が流されて脱出工を通過しないよう、設計流量に対して流速をできるだけ小さくする必要があったと考えられた。

水深・流速のコントロールが容易な現地では、②および③のような水理条件の配慮が特に有効だと推測される。ただし、灌漑期の用・排水路のように本実験での水深・流速条件を上回る場合や、遊泳能力・登攀能力がより低いと推察される変態直後の個体が転落した場合、別の種が転落した場合には水路脱出率は異なると考えられることから、条件を変えて更に知見を蓄積する必要がある。

3.2 着脱式の脱出工の試作および性能評価

本節では、既存のコンクリート水路で移動障害を解消できるよう、簡便に設置・取り外しできる着脱式の脱出工を 3.1 節の成果を参考にして試作し、その性能を評価する。実験には、カエル類の種間で運動能力の違いが指摘されていることから(梶屋ら, 2000; 土井, 2002)、トウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエルの 2 種 (Fig. 3) を用いた。実験条件は、3.1 節でカエル類の脱出行動への影響が示唆された水路の通水の有無、およびこれまで未解明であった脱出工の設置数とした。

3.2.1 実験方法

(1) 供試個体

トウキョウダルマガエルは、2008 年 9~10 月に茨城県つくばみらい市の平地に広がる水田において、手網により捕獲した 40 個体を実験に用いた。捕獲後の個体は 400L 水槽 (幅 60cm×長さ 140cm×深さ 49cm) に収容し、所内で採集した昆虫類を餌として飼育した。

ニホンアカガエルは、実験に必要な個体数を現場で確保するのが困難であったことから、飼育個体を実験に用いた。飼育個体は、本種の卵塊を 2008 年 3~4 月に栃木県および茨城県内の谷津田で採集し、所内の屋外飼育施設 (11m×30m) にて成育したものである。

供試個体の体長(頭胴長)分布図は Fig. 11 のようになり、トウキョウダルマガエルは体長 36±4mm (平均±標準偏差、延べ 159 個体)、ニホンアカガエルは 41±8mm (延べ 158 個体) であった。

(2) 実験施設

実験施設の概要を Fig. 12 に示す。ここでは実験条件の設定や行動観察の容易さ等を考慮して、所内の屋外実験水路を用いた。水路は U 字溝 (JIS A 5372 ベンチフリューム 2 種 500 型、水路幅 50cm、深さ 39cm) であり、水路延長 30m、勾配 1/180 である。実験用水は循環しており、ポンプによって貯水槽から汲み上げられ、上流端の三角堰、水路、下流端の水位調節ゲートを順に通って貯水槽に流入する。水路の土羽は高さ約 1cm に刈り込まれた芝生で、ほぼ水平であった。

実験では、水路延長に制限があることから、個体の転落位置を上流端から 3m 地点に、脱出工の設置位置を 6m および 26m 地点に設定した (以下、脱出工を区別する場合にはそれぞれ「上流脱出工」、「下流脱出工」とする)。貯水槽への個体の転落防止ネットを 29m 地点に設置した。また、水路を脱出した個体が施設の外に逸出することを防ぐため、プラスチック製波板による高さ 40cm の囲いを設置した (Fig. 12)。

(3) 着脱式の脱出工の試作

既設の U 字溝 (用水・排水用の末端水路・小水路を想定) に着脱可能な脱出工として脱出工 A~C を試作した (Fig. 13)。脱出工 A は、個体が水路壁沿いを流下しやすいという 3.1 節の結果を参考に、1m の区間にわたってネット (ポリエチレン製、4mm 目合、青色) を垂らしたものである (Fig. 13 の a)。ネットは鉄製の杭により 3 箇所水路の土羽に固定した。ネットの裏側を個体が登攀した場合を考慮して、土羽へと抜け出せるように、個体がくぐれる隙間を設けた。

脱出工 B は、U 字溝に橋 (幅 4cm) を架け、両脇に木製スロープ (幅 4cm) を設置したものである (Fig. 13 の b)。

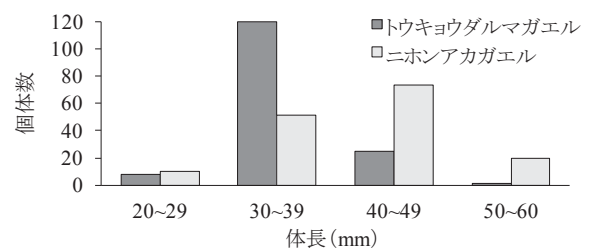


Fig. 11 供試個体の体長分布

Distribution of body length of test individuals

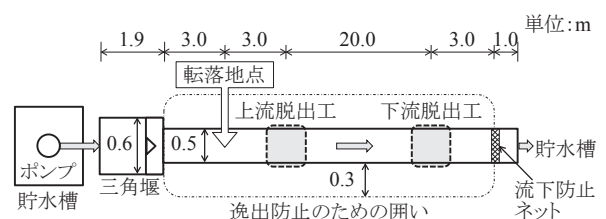


Fig. 12 実験水路の概要図

Diagram of experiment device

スロープの傾斜角は、3.1節の結果を参考に30°とした。スロープと水路壁との間にできた隙間を4mm目合のネットで覆った。このネットをスロープの表面にも貼り、滑り止めとした。

脱出工Cは、脱出工Bの両側のスロープ間に針金を張り、橋部分から4mm目合のネットを垂らしたものである (Fig. 13のc)。ネットは針金に掛けられている。通水させない実験条件では、針金はスロープの最下端の位置に張った。通水させる実験条件では、針金は水面下1cmに適宜調節し、これにより水の流れを遮る部分を極力小さくして、ネットによる通水障害を軽減させるようにした。

(4) 実験条件

脱出工の種類、脱出工の設置数、通水の有無の各条件による対象種の水路脱出率の差異を比較するため、Table 4に示す実験条件を設定した。脱出工の種類は、非設置および脱出工 A~C の4水準とした。脱出工の設置数は、1箇所および2箇所の2水準とした。1箇所の場合には上流脱出工を、2箇所の場合には上流脱出工および下流脱出工を設置した (Fig. 12)。

通水の有無は、通水なし、および通水ありの2水準とした。通水時には、トウキョウダルマガエルが息息する現場の水路で著者が測定した水深および流速 (個体が水面付近で静止・遊泳することが多いため表面流速) の値に近くように通水した。流量は一定 (約20L/s) とした。縦断方向に約2m間隔で測線をとって、水路幅を4等分する3点で水深を測定した結果、水深は16±5cm (平均±標準偏差) であった。同じ測定点において、水面下1cmで流速を測定

(KENEK社製VP2000を使用)した結果、流速は36±8cm/sであった。流量、水深および水路の横断面の形状から通水断面の平均流速を計算すると、断面平均流速は29±10cm/sであった。なお、上記の流量は、用水路に対して適正用水量20~30mm/d (農林水産省構造改善局計画部資源課, 2000) を水田面積5~8ha (概ねほ区レベル) に与える流量に相当する。排水路の流量は、降雨時を除けば、これよりも小さいと推察される。流速について、参照した現場は平地で、水路勾配が比較的小さい地域であり、勾配の大きい地域の水路であれば同じ流量でもより大きな流速になると推察される。

実験では、供試個体数の不足から、同一個体を繰り返し用いることが避けられなかった。実験期間の長期化や反復による疲労や慣れを防ぐため、対象種、脱出工の種類、脱出工の設置数および通水の有無を組み合わせた実験条件 (Table 4) を設定した。実験順は無作為に選定した。

(5) 実験方法

各Caseの条件 (Table 4) を設定した後、対象種 (トウキョウダルマガエルもしくはニホンアカガエル) 20個体を供試個体として無作為に選んだ。本実験では、運動に影響を与える指切りやタグ等の個体識別を避ける必要があり、一方で実験開始からの経過時間を把握する必要があったことから、供試個体を転落地点 (Fig. 12) に一斉に転落させる方法を採用した。転落時点を実験開始とし、以降60分間を実験時間とした。実験中の個体の移動や脱出行動等を目視で観察し、特徴的な行動を記録した。

水路から脱出した個体は除去し、その体長を計測した。また、水路の上・下流端に到達した個体は、実験区間外に移動したとみなして除去し、同様に体長を計測した。なお、個体の観察および除去作業が個体の行動に影響を与えないように注意した。実験終了時に水路内に残留していた個体はすべて水路から除去し、体長を計測した。各Caseの実験

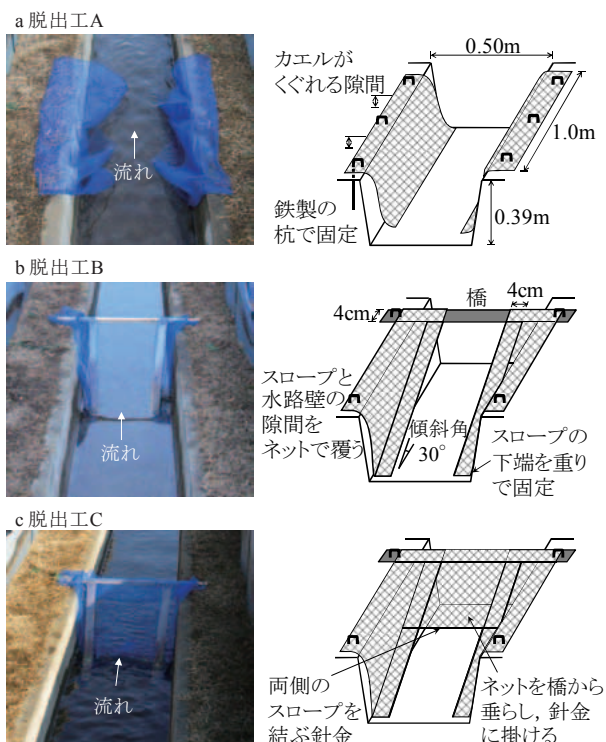


Fig. 13 試作した脱出工

Prototypes of escape countermeasures

Table 4 実験条件一覧
Experimental conditions

Case ¹⁾	対象種 ²⁾	脱出工の種類	設置数	通水の有無	実験順
1	トウ	なし	0	なし	1
2	トウ	なし	0	あり	14
3	トウ	A	1	なし	3
4	トウ	A	2	あり	10
5	トウ	B	1	あり	8
6	トウ	B	2	なし	6
7	トウ	C	1	あり	11
8	トウ	C	2	なし	15
9	ニホ	なし	0	あり	2
10	ニホ	なし	0	なし	9
11	ニホ	A	1	あり	4
12	ニホ	A	2	なし	5
13	ニホ	B	1	なし	7
14	ニホ	B	2	あり	16
15	ニホ	C	1	なし	13
16	ニホ	C	2	あり	12

¹⁾ Case 番号は便宜的に割り振った。²⁾ トウ：トウキョウダルマガエル、ニホ：ニホンアカガエル。

終了後、用いた個体は元の飼育水槽および飼育施設に戻した。

実験は2008年10月3～22日の日中(10～17時)に行なった。原則的に、それぞれの対象種について1日1Caseとして、1～2日間隔で実験を行なった。実験時の気温は $22.5 \pm 1.8^\circ\text{C}$ 、水温は $20.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$ 、湿度は $68.3 \pm 7.7\%$ であった。

(6) 解析方法

各Caseについて、水路脱出率(供試個体数に占める水路から脱出した個体数の割合)を算出した。ただし、実験に用いた延べ320個体のうち3個体が水路下流端のネットを乗り越える等により実験中に水路内から逸出したことから、その個体数は水路脱出率の分母とする供試個体数から除外して、水路脱出率を算出した。

対象種(トウキョウダルマガエル、ニホンアカガエル)、脱出工の種類(脱出工なし、脱出工A、脱出工B、脱出工C)、設置数(1箇所、2箇所)および通水条件(通水なし、通水あり)の主効果並びに2因子間の交互作用による水路脱出率の差異を、分散分析により解析した。ここで、主効果とは各因子による単独の影響のことであり、交互作用とは一方の因子の値によって他方の因子が結果に与える影響が異なることである。分母が異なる比率のデータは母集団の正規性が仮定できないため、水路脱出率を逆正弦変換した値を分散分析に用いた。要因変動の小さい因子は誤差としてプーリングした(中村, 1997)。有意(F 検定, 5%水準)な因子は、多重比較(Tukey's HSD検定)を行なった。解析には統計解析ソフトウェア R version 2.9.0 (R Development Core Team, 2009)を用いた。

3.2.2 結果

(1) 転落後の個体の行動

通水なしの条件(Case1, 3, 6, 8, 10, 12, 13, 15)では、転落後の個体は転落地点から上流・下流方向の両方に分散した。実験開始から3分間で下流端(転落地点から26m下流)に到達した個体や、水路の上流側・下流側を行き来した個体中にはみられた。

通水ありの条件(Case2, 4, 5, 7, 9, 11, 14, 16)では、すべての個体が下流に移動した。その過程で、受動的に流下した個体や、流れに逆らって遊泳した個体、前肢で水路壁につかまった個体が観察された。概して個体は潜らずに、水面を流下・遊泳した。脱出工の設置区間に到達した個体の中には、脱出工を素通りした個体や、ネット(脱出工A)およびスロープ(脱出工B, C)の途中で静止して実験終了まで水路から脱出しなかった個体もみられた。

水路から脱出した個体は、ほとんどのCaseにおいて脱出工を利用した(Table 5)。その割合は全体で26%(317個体のうち81個体, 体長29～54mm)であった。脱出工を利用せずに脱出した個体は1%(通水のないCase10, 12, 15。ニホンアカガエル4個体, 体長43～49mm)であり、跳躍して脱出する様子が観察された。

トウキョウダルマガエルを対象種としたCase1～8について、その体長の範囲が等分されるように2分し(小型: 29～39mm; $n=131$, 大型: 40～51mm; $n=27$), 水路脱出率を比較した。その結果、小型個体の水路脱出率(平均21%)は大型個体の水路脱出率(9%)よりも有意に高かった(Fig. 14, 逆正弦変換した水路脱出率による t 検定, $p<0.05$)。ニホンアカガエル(Case9～16)では、体長区分(小型: 26～40mm; $n=68$, 大型: 41～56mm; $n=85$)による水路脱出率(小型:34%, 大型:35%)の差は見られなかった($p>0.05$)。

Table 5 各Caseにおける観測値

Results of each experiment

Case	実験条件				供試個体数	脱出しなかった個体数					脱出した個体数				水路脱出率 (%)	脱出工到達率 ²⁾ (%)	
	対象種 ¹⁾	脱出工の種類	設置数	通水の有無		実験終了時の個体の位置				合計	脱出工を利用			跳躍等			合計
						上流脱出工	下流脱出工	小計	脱出工以外		上流脱出工	下流脱出工	小計				
1	トウ	なし	0	なし	19 ³⁾	-	-	-	19	19	-	-	-	0	0	0	-
2	トウ	なし	0	あり	20	-	-	-	20	20	-	-	-	0	0	0	-
3	トウ	A	1	なし	20	0	-	0	19	19	1	-	1	0	1	5	5
4	トウ	A	2	あり	20	0	4	4	14	18	0	2	2	0	2	10	30
5	トウ	B	1	あり	20	0	-	0	19	19	1	-	1	0	1	5	5
6	トウ	B	2	なし	20	0	0	0	19	19	0	1	1	0	1	5	5
7	トウ	C	1	あり	20	0	-	0	7	7	13	-	13	0	13	65	65
8	トウ	C	2	なし	20	0	0	0	8	8	11	1	12	0	12	60	60
9	ニホ	なし	0	あり	20	-	-	-	20	20	-	-	-	0	0	0	-
10	ニホ	なし	0	なし	19 ³⁾	-	-	-	17	17	-	-	-	2	2	11	-
11	ニホ	A	1	あり	20	2	-	2	15	17	3	-	3	0	3	15	25
12	ニホ	A	2	なし	20	1	0	1	9	10	5	4	9	1	10	50	50
13	ニホ	B	1	なし	20	0	-	0	17	17	3	-	3	0	3	15	15
14	ニホ	B	2	あり	19 ³⁾	0	5	5	0	5	3	11	14	0	14	74	100
15	ニホ	C	1	なし	20	0	-	0	15	15	4	-	4	1	5	25	20
16	ニホ	C	2	あり	20	0	2	2	0	2	12	6	18	0	18	90	100
計					317	3	11	14	218	232	56	25	81	4	85	27	30

¹⁾ トウ：トウキョウダルマガエル，ニホ：ニホンアカガエル。 ²⁾ 供試個体数に占める脱出工から脱出した個体数および実験終了時に脱出工に留まっていた個体数の和の割合。 ³⁾ 実験中に逸出した1個体を除外。

(2) 各因子の水路脱出率への影響

各 Case の結果 (Table 5) をもとに、水路脱出率を逆正弦変換して分散分析を行なった。水路脱出率に影響する因子として、対象種、脱出工の種類および脱出工の設置数の主効果、並びに対象種—設置数間の交互作用が有意であった (Table 6, F 検定, $p < 0.05$)。トウキョウダルマガエルの水路脱出率 (平均 19%) よりもニホンアカガエルの水路脱出率 (35%) の方が高かった ($p < 0.05$)。なお、通水の有無 (通水なしでの水路脱出率: 21%, 通水あり: 32%) による水路脱出率への影響は小さかった ($p > 0.05$)。以下では、脱出工の種類および脱出工の設置数別の水路脱出率を、対象種別に比較する。

(3) 脱出工の種類と水路脱出率

対象種別および脱出工の種類別に水路脱出率を比較すると (Fig. 15), トウキョウダルマガエルの水路脱出率は、脱出工 C (63%) が、脱出工なし (0%), 脱出工 A (8%) および脱出工 B (5%) よりも有意に高かった (Tukey's HSD 検定, $p < 0.05$)。ニホンアカガエルの水路脱出率は、脱出工 C (58%), 脱出工 B (44%), 脱出工 A (33%), 脱出工なし (5%) の順に高く、脱出工 B および脱出工 C は脱出工なしよりも有意に高かった ($p < 0.05$)。すなわち、脱出工 C では、トウキョウダルマガエルとニホンアカガエルの両種とも水路脱出率が高かった。

(4) 脱出工の設置数と水路脱出率

対象種別および脱出工の設置数別に水路脱出率を比較すると (Fig. 16), トウキョウダルマガエルの水路脱出率は、1 箇所設置する場合 (25%) と 2 箇所設置する場合 (25%) で変わらなかった ($p > 0.05$)。ニホンアカガエルの水路脱出

率は、1 箇所設置する場合 (18%) よりも 2 箇所設置する場合 (71%) の方が高かった ($p < 0.05$)。

3.2.3 考察

(1) コンクリート水路による移動障害の再確認

フィールド調査による既往研究において、水路改修を伴うほ場整備の実施がカエル類の生息に悪影響を及ぼすことを示唆する結果が得られている (Fujioka and Lane, 1997; 田上ら, 2007; 松澤ら, 2008)。その原因として、工事による直接的なダメージ (表土の剥ぎ取りや現況の土水路の埋め戻し)、水路のコンクリート化による移動障害、生息に適した畦畔の面積の減少 (上陸後の生息スペースの減少) 等が推測されるが (Fig. 2), フィールドのデータからそれぞれの影響を分けて定量することは困難である。一方、本章のような実験は、水路のコンクリート化による移動障害の影響を直接、定量的に評価するものであり、その影響の緩和を図る上での重要な知見を与える。

本節の実験結果では、脱出工以外から脱出できた個体は全体の 1% (トウキョウダルマガエル: 0%, ニホンアカガエル: 3%) に過ぎず、それらの個体はいずれも通水していない条件下で水路から脱出していた (Table 5)。水路や実験の条件は異なるが、3.1 節の試験結果でも、幅 20cm, 深さ 25cm の水路において、脱出工を使わずに跳躍して水路から脱出できたトウキョウダルマガエルは、供試個体全体のわずか 2% であった。3.1 節の実験水路の深さは、現場の U 字溝等のコンクリート水路のうち比較的浅い規格に相当するが、脱出工がない場合 (スロープの傾斜角が 90° の時) の水路脱出率は低い。より深いコンクリート水路では、いっ

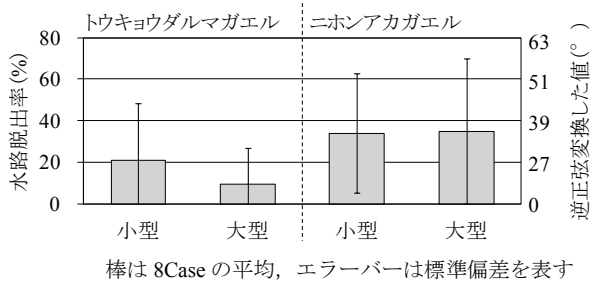


Fig. 14 体長区別の水路脱出率

Differences of proportion escaping between large and small frogs

Table 6 逆正弦変換した水路脱出率に対する分散分析
Allocation on table of orthogonal array

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p
A: 対象種	1	736	736	13	<0.05 *
B: 脱出工の種類	3	4,407	1,469	26	<0.01 **
C: 設置数	1	879	879	15	<0.01 **
A・Bの交互作用	3	474	158	3	n.s.
A・Cの交互作用	1	793	793	14	<0.01 **
残差 ¹⁾	6	298	50		
合計	15	7,587	506		

¹⁾ 通水の有無 (D) 並びに A・D, B・C および B・D の交互作用を残差にプーリングした。

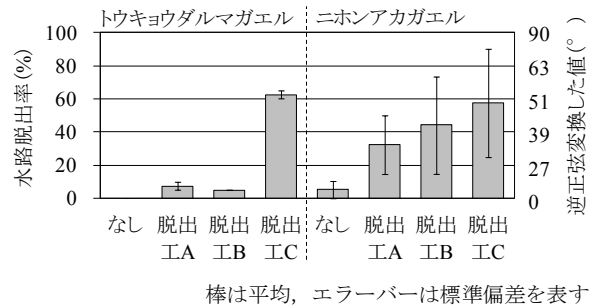


Fig. 15 脱出工の種類別の水路脱出率

Differences of proportion escaping among 3 type countermeasures

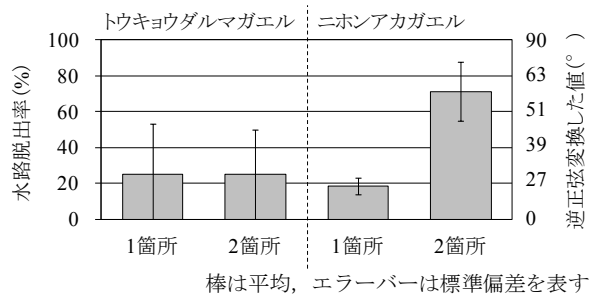


Fig. 16 脱出工の設置数別の水路脱出率

Differences of proportion escaping between the numbers of countermeasures

そうカエル類が脱出しにくくなるであろう。コンクリートの継ぎ目や付着植物、垂下植物等があればそれらを足掛かりに脱出できる可能性があるとしても、何も対策のない従来のコンクリート水路では、転落した後に脱出できる個体は少ないと考えられる。

(2) 水路脱出率の高い脱出工の構造

本節で試作した脱出工のうち脱出工 A および B (Fig. 13 の a, b) は、ニホンアカガエルの水路脱出率が比較的高かったが、トウキョウダルマガエルの水路脱出率は低かった (Fig. 15)。通水している条件下では、どの個体も水路底に着地して静止することができなかつたこと、および水路壁に沿って個体が移動した傾向は、3.1 節と同様であった。しかし、単純に水路の両脇にネットもしくはスロープを設置しただけでは、脱出工に上陸せずに通過してしまう個体も多く、水路脱出率は高くなかつた。

一方で、水路中央を流下する個体も脱出工に到達できるよう、脱出工の橋部分から水面下 1cm にかけてネットを設置した脱出工 C (Fig. 13 の c) では、両種に対して比較的高い水路脱出率が得られた (Fig. 15)。実際、通水している Case7 (設置数 1, トウキョウダルマガエル) および Case16 (設置数 2, ニホンアカガエル) では、それぞれ 65% および 100% の個体が脱出工に到達していた (Table 5)。個体は概して潜らずに水面を移動することが多かつたため、水路の横断面全体を遮らずとも、水面近くにネットが張られているだけでも高い水路脱出率が得られたと考えられる。

脱出工 C の設置時に水の流れが遮られる部分は左右のスロープ部および水面から水面下 1cm にかけて張られたネット部であり、通水をできるだけ阻害しないように配慮されている。その部分の断面積は、水深 10~30cm 時に水路断面の約 3 割であり、脱出工 B の設置時に流れが遮られる断面積と比べて大差がない。しかし、その付近で部分的に流速が減少したり、長時間設置すれば流下するゴミを捕捉したりすることで、通水を阻害する恐れがある。営農や水路の維持管理に支障がないように、通水性の時間変化とそれに伴う水質や見た目への影響の評価を加える必要がある。

(3) 脱出工の複数設置の効果

ニホンアカガエルでは、脱出工を 2 箇所設置した際に 1 箇所よりも水路脱出率が有意に高く、設置数を増やすことで脱出させやすくなることが確認された (Fig. 16)。2 箇所設置時の水路脱出率 (71%) が 1 箇所設置時の水路脱出率 (18%) よりも著しく高かつた理由は明らかではなかつた。実際、2 箇所設置時の上流および下流脱出工それぞれからの脱出個体数 (それぞれ 7±4 個体および 7±3 個体、平均±標準偏差) は、1 箇所設置時の脱出個体数 (3±0) よりも多い傾向があつたが、その差は有意ではなかつた (Kruskal-Wallis 検定, $p>0.05$)。本実験結果からは明らかにできないが、通水していない水路では個体が上流側・下流側を行き来するため、脱出工の密度を 2 倍にした時に脱出工に到達し脱出する機会が 2 倍以上に増すかもしれない。このことは、今後の興味深い検討課題といえる。

トウキョウダルマガエルの水路脱出率は、1 箇所設置時

と 2 箇所設置時で変わらなかつた。しかし、脱出工を 2 箇所設置した Case のうち Case4 および Case6 では、脱出した計 3 個体はいずれも下流脱出工を使用していた。Case4 の 4 個体は、実験時間 (60 分間) 内に脱出しなかつたものの、下流脱出工に登攀する途中だった。したがって、トウキョウダルマガエルについても、脱出工の設置数を増やすことで脱出させやすくなると推察される。

(4) カエル類の種による脱出能力の違い

本実験で用いた 2 種の供試個体間では、ニホンアカガエルの方が水路脱出率は高かつた。更に脱出工を利用せずに脱出した 4 個体はいずれもニホンアカガエルであつた。運動能力の種間差について、梶屋ら (2000) は、ニホンアカガエルの方がトウキョウダルマガエルよりも水平方向の跳躍距離が長いことを報告している。水路からの脱出能力に関わる遊泳能力や垂直方向の跳躍能力および登攀能力を種ごとに明らかにした知見は見当たらないが、本実験の中で跳躍によって水路から脱出できたニホンアカガエルは、トウキョウダルマガエルより垂直方向の跳躍能力が高く、更に水路からの脱出能力も高いと推察される。

トウキョウダルマガエルでは、3.1 節の結果と同様に、大型個体よりも小型個体の水路脱出率の方が高かつた (Fig. 14)。登攀による水路からの脱出という点では、大きい個体ほど有利というわけではないことが示唆される。そのため、脱出工の開発や設置の際には、小さな個体だけでなく大きな個体も脱出できる対策とする必要がある。

なお、本実験では幅広い体長の個体を供試したが (Fig. 11)、変態直後の個体は用いなかつた。変態直後の個体は、本実験での供試個体と遊泳能力や登攀能力が異なると推察され、水路からの脱出に際して致命的となる条件が異なる可能性が残るため、時期や供試個体の体長を変えての実験が更に必要だろう。

本節で対象としたのは、指に吸盤を持たないため、水路からの脱出能力が低いと推察されるトウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエルの 2 種であつた。一方で、それ以外の種について、数種間で跳躍能力の差が指摘されていることから (梶屋ら, 2000)、脱出能力も種間で異なると推察される。また、水路に転落した後の行動特性も種間で異なるかもしれない。そのため、農村生態系に生息するカエル類の種 (Table 1) ごとに、行動特性および脱出能力の知見を更に蓄積する必要がある。脱出工を設置する際には、現場の生息種を把握するとともに、蓄積した知見も活用しながら、脱出能力がより低い種を対象にした対策とすることになる。トウキョウダルマガエルとニホンアカガエルが同所的に生息する地域で移動障害の解消を図る場合には、脱出能力がより低いトウキョウダルマガエルに合わせた対策が必要だと考えられる。

3.2.4 まとめ

コンクリート水路に転落したカエル類が水路から脱出できるように、既存の水路に簡便に設置できる着脱式の部分タイプの脱出工 3 種を試作した。トウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエルを対象に、脱出工の種類、設置数

(1 箇所/2 箇所) および通水条件 (通水あり/通水なし) を変えながら、水路脱出率に基づき性能を評価した。その結果、以下が明らかになった。

- ①脱出工以外から脱出できた個体は全体の1% (トウキョウダルマガエル: 0%, ニホンアカガエル: 3%) に過ぎず、それらの個体はいずれも通水していない条件下で水路から脱出していた。何の対策も施していない従来のコンクリート水路では、コンクリートの継ぎ目や付着植物、垂下植物等があればそれらを足掛かりに脱出できる可能性があるとしても、転落した後に脱出できる個体は少ないと考えられた。
- ②脱出工の種間で比較すると、脱出工 C で水路脱出率が相対的に高く (トウキョウダルマガエルの水路脱出率 63%, ニホンアカガエルの水路脱出率 58%), 脱出工 B (5%, 44%) と脱出工 A (8%, 33%) の水路脱出率は低~中程度であった。水路の両脇にスロープやネットを設置するだけでなく、脱出工 C のように水路中央からも脱出できる構造にすることで、個体を脱出させやすいと考えられた。試作した脱出工は、ゴミの捕捉等に伴って通水を阻害しないかどうかを更に検討する必要があるが、既存の水路に安価かつ容易に設置できるとともに、草刈等の維持管理作業の際に一時的に取り外すことができる特徴を持ち、脱出工として有用であると考えられた。
- ③脱出工を複数箇所に設置することで、個体を脱出させやすくなった。効果的に脱出対策を講じる上で重要となる脱出工の施工密度や設置間隔による水路脱出率の増減の定量評価については未実施であり、流速の違いによる影響の評価を含めて更なる研究が必要である。
- ④供試個体間では、トウキョウダルマガエルはニホンアカガエルよりもコンクリート水路からの脱出能力が低かった。またトウキョウダルマガエルは体長の大きな個体の水路脱出率が低かったが、ニホンアカガエルでは体長による水路脱出率の違いはなかった。両種がともに生息する地区では、トウキョウダルマガエルの脱出を対策の目標とするべきだと考えられた。

3.3 水路脱出率に基づく横断成功率の推定

3.1 節および 3.2 節では、トウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエルの水路脱出率を計測した。移動経路上にあるコンクリート水路を横断して生息場間を移動する上では、コンクリート水路から脱出する際に転落前と反対側に脱出できること (例えば、左岸の土羽にいた個体が、転落後に右岸の土羽に脱出できること)、つまり横断の成功がより重要といえる。そこで本節では、脱出工における水路脱出率と水路の横断成功率との関係を考察する。

渡部ら (2012) は、橋およびスロープ (3.2 節で試作した着脱式の脱出工 B と類似の構造) を設けたコンクリート水路の模型 (Fig. 17) において、水路の土羽にニホンアカガエル (体長 33~46mm, $N=14$, 1case につき 1 個体) を放し、その後 4 時間の行動を観察した。水路の直上に設置したカメラにより 10 秒間隔で水路内を連続撮影し、個体の移

動の軌跡を調べた (Fig. 18)。

実験時に観察された主な行動を Table 7 に列挙する。水路に転落した後、コンクリートの壁を登って土羽に脱出した個体はおらず、水路から土羽に脱出した個体 (計 17 回) は、すべてスロープを通った。このうち、9 回は転落前と反対側に脱出 (横断に成功) し、8 回は転落前と同じ土羽に脱出 (脱出したが横断に失敗) した。すなわち、コンクリート水路への 1 回の転落に対して、横断成功回数は脱出回数の 5 割であった。

上記の結果によれば、水路への 1 回の転落に対して、水路脱出率 E と横断成功率 C は $C=E/2$ で表わせようである。他方、転落前と同じ側の土羽に脱出した個体が、水路の横断を繰り返し試みる場合、横断成功率は $C=E/2+(E/2)^2+\dots$

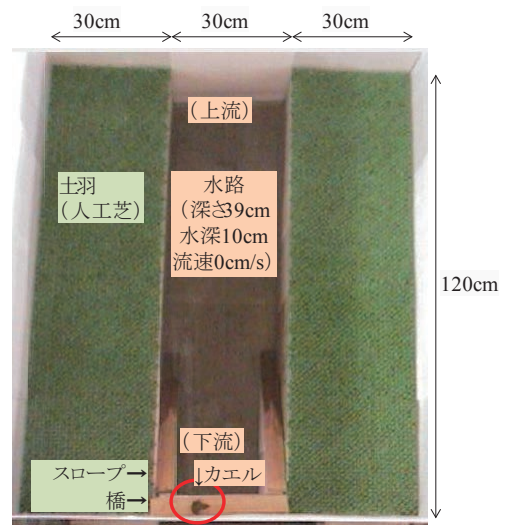


Fig. 17 実験装置の概要
Diagram of experiment device

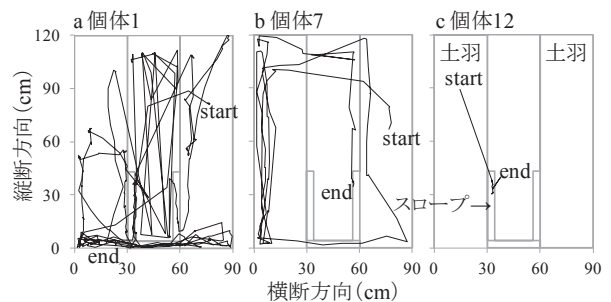


Fig. 18 4 時間の実験における個体の移動軌跡の例
Example of individual trajectories for 4 hours

Table 7 実験水路で観察された個体の行動の例
Example of individual actions

・ 静止している	・ 土羽を歩き回る
・ 水路に転落する	・ 水路内を泳ぎ回る
・ 水路壁にしがみつくとく	・ スロープに上陸する
・ スロープを登って水路から脱出する	
・ 跳躍して水路を横断する	・ 橋を通して水路を横断する

$+ (E/2)^n + \dots \approx E/(2-E)$ と計算される。実際には個体数は整数であり、転落回数が有限であることから、横断成功率は個体数の影響を受けると考えられる。そこで横断を試みる個体数 N を変えながら横断成功率を計算した結果を Fig. 19 に示す。なお、 N が 200 以上では概ね $C=E/(2-E)$ の曲線と一致したが、いずれも横断成功率は 100% 未満であった。そのため、脱出工において、水路脱出率に対する横断成功率の範囲は、 $E/2 \leq C < E/(2-E)$ と推定される。

この結果をもとに、3.1 節および 3.2 節で計測された各脱出工の水路脱出率から、横断成功率を推定した (Table 8)。前述の実験はニホンアカガエルを対象としたが、「1 回の転落に対して、横断成功率が水路脱出率の 5 割」という結果は蓋然性があると考えられるため、トウキョウダルマガエルについてもニホンアカガエルと同様に推定値を計算した。なお、IV 章 (移動対策による個体群保全効果の評価) では、「横断成功率」をパラメータに与えた個体群動態モデルを構築し、個体群存続率を計算する。本節で作成した水路脱出率に基づく横断成功率の推定式は、脱出工を設置した場合の個体群存続率の計算 (4.4 節) に活用できるものである。

IV コンクリート水路での移動対策による個体群保全効果

4.1 対象種と個体群動態モデルの骨格の検討

2.2 節で述べたように、脱出工によってカエル類が水路から脱出できるだけでなく、個体群が存続することが重要で

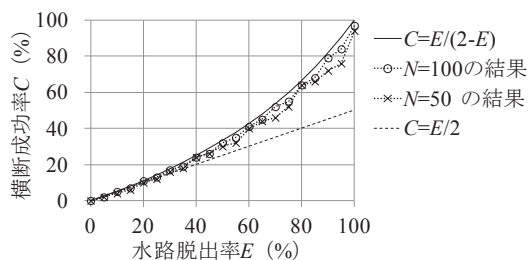


Fig. 19 水路脱出率と横断成功率の関係

Relationship between proportion escaping and proportion succeeding

Table 8 脱出工による横断成功率の推定値

Estimated proportion succeeding via escape countermeasures

		水路 脱出率 ¹⁾	横断 成功率
3.1 節	トウキョウ	30°のスロープ	40%
	ダルマ	45°のスロープ	36%
	ガエル	60°のスロープ	18%
3.2 節	トウキョウ	着脱式脱出工 A	8%
	ダルマ	着脱式脱出工 B	5%
	ガエル	着脱式脱出工 C	63%
	ニホンアカ	着脱式脱出工 A	33%
	ガエル	着脱式脱出工 B	44%
		着脱式脱出工 C	58%

¹⁾水路脱出率は平均を使用。

ある。本章では、個体群保全効果 (カエル類の個体群の存続を可能にする効果) を事前予測・評価するための個体群動態モデルを構築する。更に、個体群動態シミュレーションの結果をもとにコンクリート水路での移動対策 (移動障害を解消する対策) の個体群保全効果の評価する。

本節では、個体群動態モデルの骨格を検討する。カエル類の個体群動態モデルの既往研究では、生息場の分断 (Stephan et al., 2001 ; Hels and Nachman, 2002 ; 松崎, 2010 ; 戸金, 2010) や移入した捕食者 (Doubledee et al., 2003) を考慮した個体群動態モデルが検討されている。またフィールド調査等により、農事暦 (吉田ら, 2007) や畦畔の植生管理 (大澤ら, 2005), 気象条件 (Pellet et al., 2006), 捕食者 (Pope, 2008), 農薬等の化学物質や紫外線, 感染症等 (Mattoon, 2002) によるカエル類への影響が指摘されている。これらの知見をもとに、カエル類の個体群動態モデルに組み込みうる因子を Fig. 20 に整理した。個体属性, 生存・成長, 繁殖, あるいは移動に関連する因子, 人為もしくは人為以外による外部要因等, 様々な因子が考えられる。一方で、個体群動態モデルに組み込むパラメータが増えるほど個体群動態のシミュレーション結果は不安定になる。注目したい事象に応じてパラメータを必要最小限に絞る方が結果の解釈は容易となる。そこで以下では、対象種と、その生態に合わせた個体群動態モデルの骨格を検討する。

第 1 に、生活史の視点から検討する。ニホンアカガエルは移動性の種であり、主に水田で繁殖し (前田・松井, 1999), 繁殖後の親個体および変態・上陸後の当歳個体は、周辺の樹林, 林縁あるいは草地へと移動する (例えば片野ら, 2001 ; Osawa and Katsuno, 2001)。そのため、水田と樹林との間の移動経路上にコンクリート水路がある場合、移動する個体はコンクリート水路に転落する (Fig. 21 の a)。トウキョウダルマガエルは定住性の種であり、年間を通じて水田や土水路に生息し、水田域内を移動している (戸金ら, 2010 ; 森ら, 2009)。水田域を分断するコンクリート水路がある場合、移動する個体はコンクリート水路に転落する (Fig. 21 の b)。したがって、個体群動態モデルは、移動性の種と定住性の種で異なるものになると考えられる。

第 2 に、個体群動態モデルの構築に利用できる生態に関する知見の豊富さについて、ニホンアカガエルでは繁殖生態や移動生態, 年齢構成等に関する知見 (例えば Kobayashi, 1962 ; 倉本ら, 1971 ; 片野ら, 2001 ; Marunouchi et al., 2002 ; Matsushima and Kawata, 2005 ; 大澤・勝野, 2007 ; 森ら, 2008 ; 渡部ら, 2009) がトウキョウダルマガエルを含めた他の種に比べて多い。

第 3 に、個体群動態に関する知見の豊富さについて、ニホンアカガエルは、親個体が 1 年に 1 卵塊を産卵すること (前田・松井, 1999), 早春に稲が植えられる前の水田等, 植生の少ない浅い止水域に産卵するため卵塊を見つけやすいことから、卵塊数をメスの親個体数とみなして計数するモニタリング調査 (以下、「卵塊調査」とする) が水田や池等で行われている (例えば長田, 1978 ; 富岡, 2000 ; 環境省自然環境局生物多様性センター, 2009)。2011 年現在,

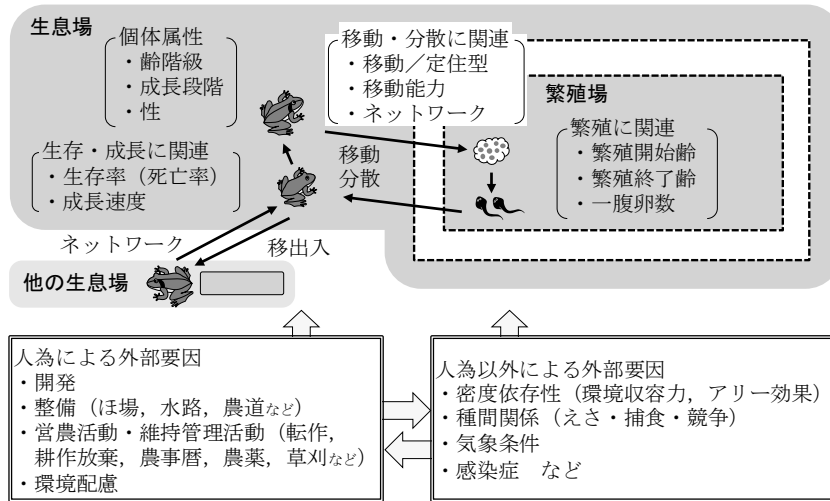


Fig. 20 個体群動態モデルに組み込みうる因子

Variables related to population dynamics models

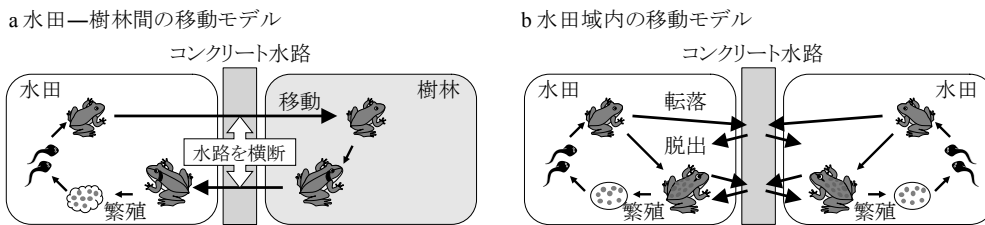


Fig. 21 移動を考慮した個体群動態モデルのイメージ図

Scheme of population dynamics models for migrating frogs

環境省主催の「モニタリングサイト1000里地調査」の一環で、全国の59地区で卵塊調査が行なわれており（環境省自然環境局生物多様性センター，2012）、今後も多地点で、長期間のモニタリングデータの蓄積が進むと見込まれる。

以上のように、知見の豊富さから、まずはニホンアカガエルを評価対象種に設定し、水田—樹林間の移動を考慮した個体群動態モデルを構築することとした。個体群動態モデルは3段階（4.2節～4.4節）で構築する。4.2節では、移動を考慮しない場合の年齢階級別のメス個体数の動態を計算する個体群動態モデル（以下、「基本モデル」とした）をまず構築する。その上で、シミュレーションに必要なパラメータ値を推定するとともに、基本モデルの妥当性を確認する。4.3節では、基本モデルへの密度依存性に関するパラメータの組み込みを検討し、「密度依存モデル」を構築する。4.4節では、水田—樹林間の移動時におけるコンクリート水路の横断行動を考慮し、移動とコンクリート水路の横断成功率のパラメータを組み込んだ個体群動態モデル（以下、「横断モデル」とする）を構築する。コンクリート水路による移動障害の程度が個体群存続率（任意期間後に個体群が存続する確率）に与える影響を明らかにするとともに、移動対策の個体群保全効果を考察する。また、4.5節では、定住性のトウキョウダルマガエルを評価対象とする場合の水田域内の移動モデルの構築可能性を考察する。

4.2 基本モデルの構築およびパラメータ値の推定

本節では、移動を組み込まない場合の年齢階級別の個体数の動態を計算する「基本モデル」を構築する。生存率等のパラメータ値を推定するとともに、個体群動態シミュレーションにより基本モデルの妥当性を検討する。

4.2.1 方法

(1) 基本モデルの構築

年齢構造モデル（age structured model）を用いて年齢階級別個体数の年変動をモデル化した。基本モデルのイメージ図を Fig. 22 に、本節で扱うパラメータを Table 9 に示す。年齢構造モデルは、個体群を複数の年齢階級に分割し、年齢階級ごとに生存率や繁殖率等のパラメータ値を与えて個体数の変動を計算するものであり、カエル類にも適用されている（例えば Hels and Nachman, 2002 ; Govindarajulu et al., 2005 ; 松崎, 2010 ; 戸金, 2010）。

本報では、Akçakaya et al. (1999) を参考に、メスのみの個体数を扱う。これは、本種は、性比の偏りが比較的小さく（Marunouchi et al., 2002 ; 松崎, 2010 によれば概ね 1 : 2 ~ 2 : 1）、オスの鳴き声（mating call）によって集合して繁殖することから、オスの個体数がメスの個体数の制限要因にはなりにくいと考えられるためである。これにより、性比および性に依存する他のパラメータを除外した。また、成長段階ではなく年齢階級に着目することとし、孵化、幼生期の生存および変態の成功を含む1つのパラメータ（後述）

を設定した。本種は年1回、早春の限られた期間に繁殖することから、出生パルス(birth-pulse)型のモデル(Akçakaya et al., 1999)とし、時間単位は1年間とした。

Marunouchi et al. (2002)によると、本種は齢階級1~4の個体が確認され、うち齢階級3~4の個体数は1割と少ない。Akçakaya et al. (1999)は、生存率を推定する際に個体数が少ないと大きな標本誤差を含みうるとし、齢構成の3割程度を占める高齢階級をまとめて結合齢階級(composite age class)として扱っている。これを参考に、ここでは齢階級3以上を齢階級「3+」として扱うこととした。

齢階級別個体数(t 年終了時を基準とした) $N_{t,1}$, $N_{t,2}$, $N_{t,3+}$ は、 $N_{t-1,1}$, $N_{t-1,2}$, $N_{t-1,3+}$ をもとに式(1)~(4)で表わした(Fig. 22)。

$$N_{t,3+} = S_{t,2} \times (N_{t-1,2} + N_{t-1,3+}) \quad (1)$$

$$N_{t,2} = S_{t,1} \times N_{t-1,1} \quad (2)$$

$$N_{t,mother} = N_{t-1,1}^* + N_{t-1,2} + N_{t-1,3+} \\ = A_t \times N_{t-1,1} + N_{t-1,2} + N_{t-1,3+} \quad (3)$$

$$N_{t,1} = F_t \times N_{t,mother} \quad (4)$$

ただし、 $S_{t,1}$, $S_{t,2}$:それぞれ $t-1$ 年終了時に齢階級1, 2の個体の、 t 年終了までの生存率、 $N_{t,1}^*$: $N_{t,1}$ のうち齢階級1から繁殖に参加する個体数、 A_t : 齢階級1の個体のうち繁殖

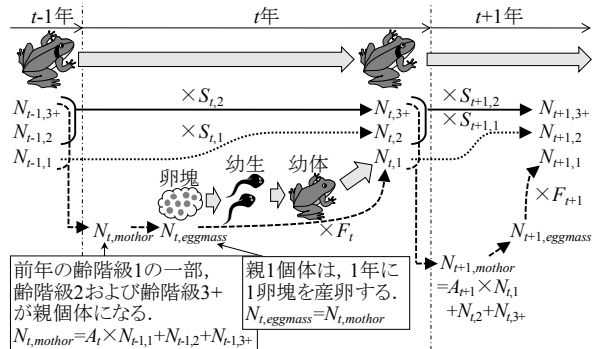


Fig. 22 基本モデルのイメージ図
Scheme of 'basic model'

Table 9 パラメータの一覧

List of parameters

age	齢階級 (age=1,2,3+)
t	年
A_t	齢階級1の個体のうち繁殖に参加する個体の割合。
F_t	繁殖率: t 年の繁殖で1卵塊から孵化し、 t 年終了時まで生残する平均的な子(娘)の個体数。 $F_t = N_{t,1} / (N_{t-1,1}^* + N_{t-1,2} + N_{t-1,3+})$
N_0	シミュレーション開始時($t=0$)の齢階級別個体数の和。 $N_0 = N_{0,1} + N_{0,2} + N_{0,3+}$
$N_{t,age}$	t 年における齢階級ageの個体数。
$N_{t,age}^*$	$N_{t,age}$ のうち齢階級1から繁殖に参加する個体数。
$N_{t,eggmass}$	t 年における卵塊数。 $N_{t,eggmass} = N_{t,mother}$
$N_{t,mother}$	t 年における親個体数。 $N_{t,mother} = N_{t-1,1}^* + N_{t-1,2} + N_{t-1,3+}$
$S_{t,1}$	齢階級1の個体の、 $t-1$ 年から t 年にかけての生存率。 $S_{t,1} = N_{t,2} / N_{t-1,1}$
$S_{t,2}$	齢階級2の個体の、 $t-1$ 年から t 年にかけての生存率。 $S_{t,2} = N_{t,3+} / (N_{t-1,2} + N_{t-1,3+})$

に参加する個体の割合、 F_t : 繁殖率(t 年の繁殖で1卵塊から孵化し、 t 年終了時まで生残する平均的な子(娘)の個体数)である。繁殖は t 年の初めに行われ、前年($t-1$ 年)の終了時に生残している齢階級1の $A_t \times 100\%$ の個体並びに齢階級2および3+のすべての個体が繁殖に参加すると仮定した(Fig. 22, 式(3))。なお、前述のように本種の親個体は1年に1卵塊を産卵することから、卵塊数 $N_{t,eggmass}$ は $N_{t,mother}$ と等しいものとした。

(2) パラメータ値の設定

パラメータ A_t , F_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ の推定値は、Marunouchi et al. (2002)の論文の観測データから計算した。この論文は、1995~1999年に、広島大学構内の谷津(緑地面積約1ha)の湿地(約7a)で繁殖に集まる個体を捕獲し、個体群動態を把握したものである。加えて、標識再捕獲調査および骨組織にみられる成長停止線数(Skeletochronology法; 見澤, 2005)から逆算した体長に基づき繁殖開始年齢を推定し、性別・年齢別・繁殖開始年齢別の個体数の集計結果からコホート分析(同齢出生集団の個体数の経時的追跡)を行なった。ただし、個体群動態シミュレーションを行なった研究ではない。また、本研究の個体群動態シミュレーションに用いるパラメータ値のうち推定値が示されているのは $S_{t,1}$ のみである。そこで、この結果の齢階級別個体数の年変動を基本モデルに当てはめ、Table 9の式により F_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ の年ごとの値、並びにそれらの平均および標準偏差を算出した。

A_t の推定について、Marunouchi et al. (2002)には齢階級1のうち未成熟の個体数は記載されていないため、齢階級1の総個体数は不明である。しかし、前述のように齢階級2以上の個体について齢階級1で繁殖に参加したかどうかを区別して集計しているため、齢階級2の個体数から A_t を推定することとした。 A_t は、式(3)から $N_{t,1}^* / N_{t-1,1}$ であるが、 $N_{t,2}$ およびそのうち齢階級1で繁殖に参加した個体数 $N_{t,2}^*$ を用いて $N_{t,2}^* / N_{t,2}$ で与えた。また、齢階級1の総個体数 $N_{t,1}$ を $N_{t,1}^* / A_{t+1}$ で与えた。なお、繁殖への参加の有無が翌年までの生存率に影響しないと仮定した。

(3) 個体群動態シミュレーション

$S_{t,1}$ 等のパラメータ値は年によって変動することから(Marunouchi et al., 2002), その値に乱数を与えながら計算を繰り返す確率論的なシミュレーションを採用した。計算にはMicrosoft Excel 2007のVBAを用いた。

乱数が従う確率分布について、 A_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ は定義域[0,1]の凸型の分布形状を仮定してベータ分布(式(5))を、 F_t は定義域[0,∞)の凸型の分布形状を仮定してガンマ分布(式(6))を、暫定的に用いた。

$$f(x) = x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} / \int_0^1 r^{\alpha-1}(1-r)^{\beta-1} dr \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (5)$$

$$f(x) = \{x^{\alpha-1}\beta^\alpha \exp(-x/\beta)\} / \int_0^\infty r^{\alpha-1} \exp(-r) dr \quad (x \geq 0) \quad (6)$$

ただし、 α , β は確率密度関数の特性値である。 α , β の値は、確率分布の平均および標準偏差が、前述のように推定した各パラメータの平均および標準偏差と等しくなるように与

Table 10 齢階級別・初産齢別のメス個体数およびパラメータの推定値
Observation of population fluctuation and estimate value of parameters

調査年 <i>t</i>	個体数 ¹⁾							推定値					成熟 個体率 ³⁾ (%)	
	齢階級 1		齢階級 2		齢階級 3+		親個体 (成熟個 体)数 <i>N_{t+1,mothor}</i>	<i>A_t</i>	<i>N_{t,1}</i>	<i>F_t</i>	<i>S_{t,1}</i>	<i>S_{t,2}</i>		
	うち齢階級 1 から繁殖参加 <i>N_{t,1}</i>	<i>N_{t,1}*</i>	うち齢階級 1 から繁殖参加 <i>N_{t,2}</i>	<i>N_{t,2}*</i>	うち齢階級 1 から繁殖参加 <i>N_{t,3+}</i>	<i>N_{t,3+}*</i>								
1995	— ²⁾	57	20	17	9	9	86		143					50
1996	—	62	68	27	12	9	142	0.40	124	1.44	0.47	0.41		70
1997	—	17	46	23	16	8	79	0.50	38	0.27	0.37	0.20		79
1998	—	104	9	4	6	2	119	0.44	199	2.52	0.24	0.10		56
1999	—	95	115	60	0	0	210	0.52			0.58	0.00		
1995~ 98年の和	—	240	143	71	43	28	426		504					
平均	—	60	36	18	10	7	1	0.47		1.41	0.41	0.18		64
標準偏差	—	31	23	9	3	3	1	0.05		0.92	0.13	0.15		11

乱数の分布型	ベータ 分布	ガンマ 分布	ベータ 分布	ベータ 分布
乱率密度関数の特性値 α	48.4	2.4	5.9	0.9
β	55.6	0.6	8.3	4.3

¹⁾ Marunouchi et al.(2002)をもとに集計した。²⁾ 成熟個体のみを対象とした調査のため、総数を把握できていない。³⁾ 総個体数に占める成熟個体の割合 $((N_{t,1}^*+N_{t,2}+N_{t,3+})/(N_{t,1}+N_{t,2}+N_{t,3+}))$ 。

えた。なお、平均 μ 、標準偏差 σ とすると、ベータ分布の α 、 β はそれぞれ $\mu\{\mu(1-\mu)/\sigma^2-1\}$ 、 $(1-\mu)\{\mu(1-\mu)/\sigma^2-1\}$ 、ガンマ分布の α 、 β はそれぞれ μ^2/σ^2 、 σ^2/μ で与えられる。

シミュレーションでは、Marunouchi et al. (2002) の調査開始年(1995年)の齢階級別個体数を初期値に与え、式(1)~(4)に前年の個体数とパラメータ値を代入して、その後4年間(1996~1999年)の齢階級別個体数を計算した。計算の反復回数は、1,000回とした。得られた計算結果を、Marunouchi et al. (2002) が報告した個体数(以下、「観測値」とする)の変動と比較した。

4.2.2 結果

(1) パラメータ値の推定

Marunouchi et al. (2002) の齢階級別のメス個体数を集計し、パラメータ ($A_t, F_t, S_{t,1}, S_{t,2}$) の値および総数が不明の齢階級1の個体数 $N_{t,1}$ を推定した (Table 10)。ある t 年に親1個体から生まれ(1卵塊から孵化し)、その年の終了時まで生残する平均的な子(娘)の個体数(繁殖率 F_t) は平均1.41(0.27~2.52)であり、値のバラツキが大きかった。 t 年に生まれ、翌 $t+1$ 年の繁殖に参加する個体の割合 (A_{t+1}) は、平均0.47(0.40~0.52)であった。 $t-1$ 年終了時に齢階級1の個体のうち、 t 年終了時までの生存する(齢階級2になる)個体の割合(生存率 $S_{t,1}$) は平均0.41(0.24~0.58)であった。 $t-1$ 年終了時に齢階級2および3+の個体のうち、 t 年終了時までの生存する個体(齢階級3+になる)個体の割合(生存率 $S_{t,2}$) は平均0.18(0.00~0.41)であった。これをもとに、各パラメータ値の平均および標準偏差から、ベータ分布もしくはガンマ分布の特性値 α 、 β を算出した。シミュレーションの乱数に用いるための $A_t, F_t, S_{t,1}, S_{t,2}$ の確率分布を Fig. 23 に示した。

Table 10 から、1995~1998年における齢階級1の個体数の推定値の和、並びに齢階級2および3+の個体数の和から

計算すると、 $N_{t,1} : N_{t,2} : N_{t,3+}$ は $504 : 143 : 43$ ($=0.7 : 0.2 : 0.1$) であった。また、総個体数に占める成熟個体数の割合 (Table 10 の成熟個体率) は50~79%であった。

(2) 個体群動態シミュレーション

基本モデルによる齢階級別個体数のシミュレーション結果を Fig. 24 に示す。計算結果は試行ごとに異なり (Fig. 24 の d の下)、個体数は増減を繰り返していた。1,000回反復計算した結果の10%、50%、90%、99%の分布範囲は、中央値を中心に、網掛の範囲となった。観測値は、計算結果の中央値の辺りから80%の分布範囲の辺りまでに位置していた。

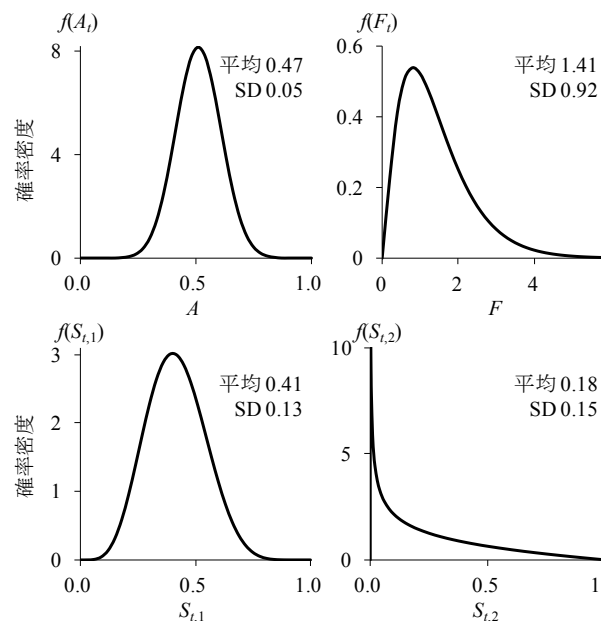


Fig. 23 各パラメータの確率分布
Probability distributions of parameters

計算結果の中には観測値と同様の動態を示す結果もあった。観測値にもっとも近い動態を示した試行について、年齢階級別個体数 $N_{t,1}^*$, $N_{t,2}$, $N_{t,3+}$ それぞれの観測値と計算値の差の絶対値は 0~6 であり、それらを 1996~1999 年について合計した値を誤差とすると、その値はわずか 6% (同期間における年齢階級別個体数の観測値の合計 548 に対して 32) であった。

4.2.3 考察

(1) 個体群動態モデルとパラメータ値の妥当性

1,000 回の反復計算の結果の中に、観測値の動態と完全に一致する結果はなかったが、誤差がわずか 6% と小さい試行結果もみられた。中澤 (1998) は、数理モデルの計算結果が観測値と完全には一致していない場合に、計算結果の 90% 程度の範囲内に観測値が含まれることで、数理モデルの妥当性を示している。基本モデルの計算結果は、この意味での妥当性を有すると考えられる。

シミュレーション結果は大きなバラツキを伴っている。これは、観測値の年変動が大きく、それから推定したパラメータのうち F_t , $S_{t,1}$, $S_{t,2}$ の標準偏差が大きかったことに起因する。ここで、年齢階級別個体数については他にモニタリング結果がないが、卵塊調査の報告 (長田, 1978; 富岡, 2000; 環境省自然環境局生物多様性センター, 2009) が比較に利用できると考えられたため、卵塊数と同数である親個体数 $N_{t,mother}$ に注目する。毎年の親個体数の前年比を求めると、観測値では 1.4 ± 0.5 (平均 \pm 標準偏差, $n=4$), シミ

ュレーション結果では 1.2 ± 0.5 であった。両者の平均の差の 95% 信頼区間 (ブートストラップ法, $n=10,000$) は $-0.29 \sim 0.56$ と推定され、両者に大きな差は認められなかった。

同様に、複数年にわたって実施された卵塊調査 (長田, 1978; 富岡, 2000; 環境省自然環境局生物多様性センター, 2009) から各年の卵塊数の前年比を算出すると (Fig. 25), 長田 (1978) の水田 A では 1.0 ± 0.5 ($n=18$), 水田 D では 1.0 ± 0.3 ($n=5$), 富岡 (2000) では 1.0 ± 0.5 ($n=12$), 環境省のモニタリングサイト 1000 里地調査 (環境省自然環境局生物多様性センター, 2009) のサイト Fr013 では 1.2 ± 0.5 ($n=4$), Fr002 では 1.2 ± 0.6 ($n=3$) であった。ただし、これらは未整備地区での報告であるが、長田 (1978) の調査地は 1970 年代以降に生息環境が悪化していたとされる。いずれも今回のシミュレーション結果から計算された値と同程度といえる。シミュレーションによる 1,000 回の反復計算では個体数が極端に増加する試行も生じるが、シミュレーション結果による個体数の変動の範囲は現実のものと同程度一致していると考えられる。

卵塊数は Fig. 25 のように不規則に増減を繰り返しながら推移していた。基本モデルでのシミュレーション結果 (Fig. 24) では、試行ごとに個体数の計算結果は異なるものの、多くの試行で不規則に個体数が増減する傾向があり、自然状態での個体数変動と同様の傾向が再現されていると考えられた。

以上のように、基本モデルによるシミュレーション結果は、現実の未整備地区における個体群動態をよく再現して

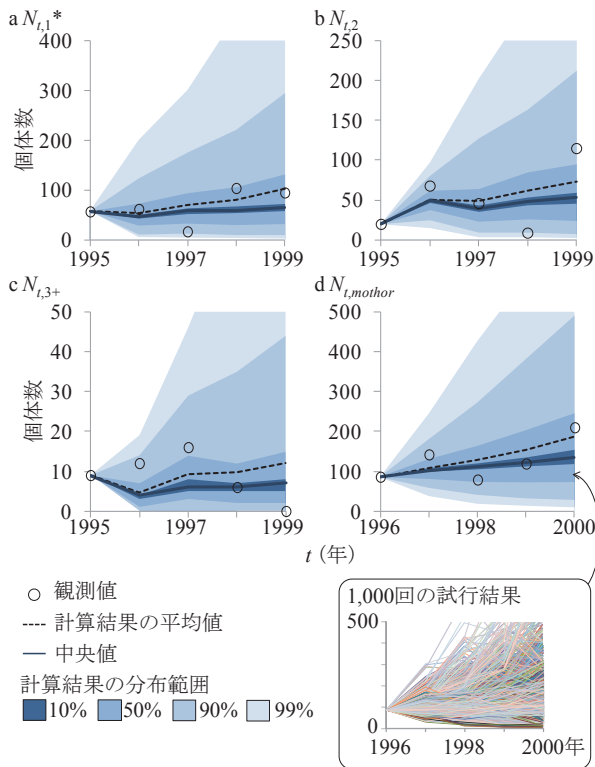


Fig. 24 基本モデルによる年齢階級別個体数のシミュレーション結果
Age-dependent population fluctuations simulated by 'basic model'

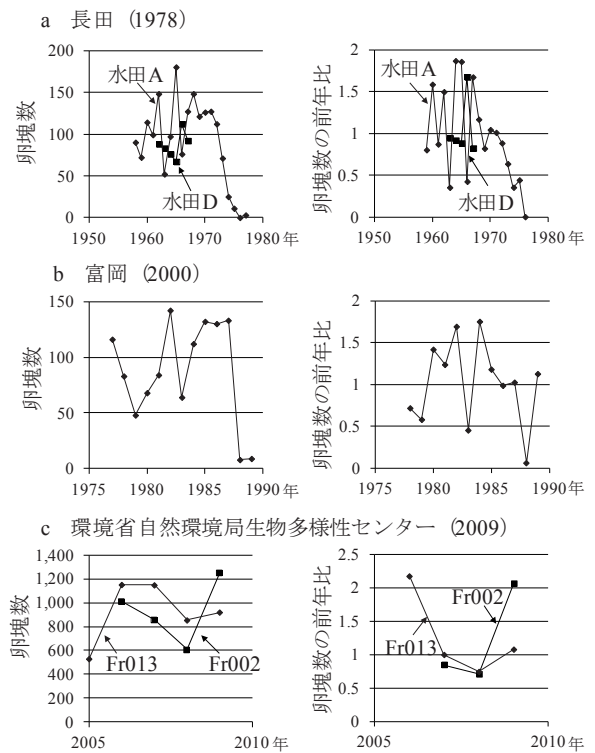


Fig. 25 既往研究における卵塊数の年変動 (左) および卵塊数の前年比の年変動 (右)
Fluctuations of egg-mass numbers and their year-to-year comparison

いると考えられた。ただし、基本モデルは、その構造上、個体数が上限なく増加しうるため、増加に上限を設けた個体群動態モデルを次節で検討する。

4.2.4 まとめ

年齢構造モデルを用いて、ニホンアカガエルの年齢階級別個体数の年変動を計算する基本モデルを構築した。基本モデルによる個体群動態シミュレーションに必要なパラメータ A_t , F_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ は、Marunouchi et al. (2002) が 1995～1999 年に行なった本種の年齢構造の調査データから推定値を求め、それらの平均および標準偏差を算出した。Marunouchi et al. (2002) の調査開始年の年齢階級別個体数を初期値に与え、パラメータ値に乱数を与えながら、その後 4 年間の年齢階級別個体数を 1,000 回計算した。その結果、以下が明らかとなった。

- ① 個体群動態シミュレーションの反復計算の結果の中に観測値と動態が一致する結果はなかったが、計算結果の 90% の範囲内に観測値が含まれており、モデルの妥当性が確認された。
- ② シミュレーション結果は大きなバラツキを伴っていたが、毎年の親個体数の前年比を指標とすると、シミュレーション結果から求めた値と、Marunouchi et al. (2002) および既往の卵塊調査結果での値は同程度であった。シミュレーションによる 1,000 回の反復計算では個体数が極端に増加する試行も生じるが、シミュレーション結果による個体数の変動の範囲は現実のものと同様一致していると考えられた。
- ③ シミュレーション結果では、卵塊数が不規則に増減を繰り返しながら推移し、現実の卵塊数の動態と同様の傾向であった。

以上のように、基本モデルによるシミュレーション結果は、現実の個体群動態をよく再現していると考えられた。

4.3 基本モデルへの密度依存性の組み込み

前節で構築した基本モデルでは、環境収容力等の密度依存性に関連するパラメータを組み込まなかった。これは、密度依存性を組み込むには、密度依存性の型や密度依存性が作用する年齢階級がまず明らかにされる必要があるが、ニホンアカガエルでは知見が十分でないことによる。このため、基本モデルでは、乱数によって得られる生存率もしくは繁殖率が高い年が続くと、年齢階級別の個体数は極端に増加する場合があった。本種に対する密度依存性の検証は今後の課題であるが、本節では試行的に、密度依存性に関するパラメータを組み込んだ個体群動態モデル（以下、「密度依存モデル」とする）を構築し、パラメータの特性を考察する。なお、前節と同様に、個体数とはメスのみの個体数を指す。

4.3.1 方法

(1) 密度依存モデルの構築

本種について、卵塊数が多い繁殖池では孵化個体に占める変態個体の割合が低い結果が実験により得られており (Matsushima and Kawata, 2005)、幼生期に密度依存性があ

ると推察される。そこで、親個体数 $N_{t,mother}$ が多い（すなわち卵塊数 $N_{t,eggmass}$ が多い）と、親 1 個体あたりの変態個体数が減り、更にその年の終了時点の年齢階級 1 の生残個体数（すなわち繁殖率 F_t ）が減少すると仮定する。密度依存性の型には、本種の幼生はなわばりを持たず、餌資源等が平等に配分されると推測されることから、共倒れ競争 (scramble competition) 型を仮定する。これらの仮定のもと、Akçakaya et al. (1999) を参考に、Ricker 型の項を加えて、基本モデルの式(4)を式(7)に変更する。

$$N_{t,1} = F_t^{1-N_{t,mother}/K} \times N_{t,mother} \quad (7)$$

ただし、 K は環境収容力を表す (K の特性については 4.3.3 項で考察する)。

(2) パラメータ値の設定

K の値は一定と仮定し、親個体数 $N_{t,mother}$ (Table 10 では最大 210) より大きな値となると推察されるため、暫定的に 250, 500, 1,000, 2,000 とした。

繁殖率 F_t について、式(7)を変形して得られる式(8)に Table 10 の $N_{t,mother}$ および年齢階級 1 の個体数 $N_{t,1}$ を代入することで、それぞれの K の値に対する F_t の値を計算した。

$$F_t = \frac{N_{t,1}}{N_{t,mother}} \sqrt[1-N_{t,mother}/K]{} \quad (8)$$

(3) 個体群動態シミュレーション

K の値と個体群動態との関係に注目するため、まず決定的なシミュレーションを行なった。パラメータ A_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ に Table 10 の平均の値を与え、繁殖率 F_t には、 K の値ごとに計算した F_t の平均を与えた。Marunouchi et al. (2002) の調査開始年 (1995 年) の年齢階級別個体数を初期値に与え、式(1), (2), (3) および(7) に前年の個体数とパラメータ値を代入することにより、増減が落ち着くまでの 40 年間の年齢階級別個体数を計算した。

次に、確率論的なシミュレーションを行なった。前節と同様に、パラメータ A_t , F_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ の値に乱数を与えながら、各年の年齢階級別個体数を計算した。 F_t に与える乱数は、 $N_{t,mother}$ と K で F_t の平均を調整した値 $F_{mean}^{1-N_{t,mother}/K}$ (ただし F_{mean} は F_t の平均を表す)、標準偏差のそのままの値 (K ごとに一定) をそれぞれ平均、標準偏差に持つガンマ分布に従うこととし、 A_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ に与える乱数は前節 (4.2.2 項) に準拠した。Marunouchi et al. (2002) の調査開始年 (1995 年) の年齢階級別個体数を初期値に与え、式(1), (2), (3) および(7) に前年の個体数とパラメータ値を代入することにより、その後 40 年間の年齢階級別個体数を計算した。計算の反復回数は 1,000 回とした。 K の値ごとの計算結果を比較した。

4.3.2 結果

(1) パラメータ値の推定

密度依存モデルの繁殖率 F_t の推定結果を Table 11 に示す。 K と F_{mean} の値から、年齢階級 1 の個体数 $N_{t,1}$ の最大値 ($= F_{mean} \cdot K / e \cdot \log_e F_{mean}$) とその時の親個体数 $N_{t,mother}$ ($= K / \log_e F_{mean}$) を計算した。この時、 $N_{t,mother}$ と F_t および $N_{t,1}$ の関係を Fig. 26 に示す。Fig. 26 には、密度依存性を組

み込まない基本モデルの場合を実線で示してある。線の形状は、基本モデルでは直線であり、密度依存モデルでは曲線であった。いずれの K についても、基本モデルと比べて、 F_t は、親個体数が概ね 100 未満で高く、100 以上で低くなった。 $N_{t,1}$ も、基本モデルと比べて、親個体数が概ね 100 未満で高く、100 以上で低くなった。

(2) 個体群動態シミュレーション

決定論的なシミュレーションにより得られた親個体数 $N_{t,mother}$ の動態を Fig. 27 に示した。 $K=250$ では、親個体数は漸減する傾向があり、計算を更に続けると約 60 年後に親個体数は 0 となった。 $K=500 \sim 2,000$ では、親個体数は 20~30 年後に概ね収束した。その時の親個体数 $N_{t,mother}$ ($=K[1+\log_{F_t}\{A_t+S_{t,1}/(1-S_{t,2})\}]$) は、 $K=500$ では 460、 $K=1,000$ では 916、 $K=2,000$ では 1,828 であり、 K の約 9 割であった。

確率論的なシミュレーションにより得られた親個体数の動態を Fig. 28 に示した。決定論的なシミュレーションの結果と同様に、 $K=250$ では親個体数は漸減する傾向があった。 $K=500 \sim 2,000$ では、親個体数は増減を繰り返したが、概ね

Table 11 密度依存モデルの繁殖率 F_t の推定値
Estimated F_t for 'density-dependent model'

t	$N_{t,mother}$	$N_{t,1}$	繁殖率	$K=250$	$K=500$	$K=1,000$	$K=2,000$
1995	86	124	F_{1995}	0.79	1.56	1.49	1.47
1996	142	38	F_{1996}	1.77	0.16	0.22	0.24
1997	79	199	F_{1997}	0.53	3.00	2.73	2.62
平均 F_{mean}				1.03	1.57	1.48	1.44
標準偏差 F_{sd}				0.53	1.16	1.03	0.97
$N_{t,1}$ の最大値				273	640	1,392	2,901
(その時の $N_{t,mother}$)				(394)	(1,108)	(2,559)	(5,470)

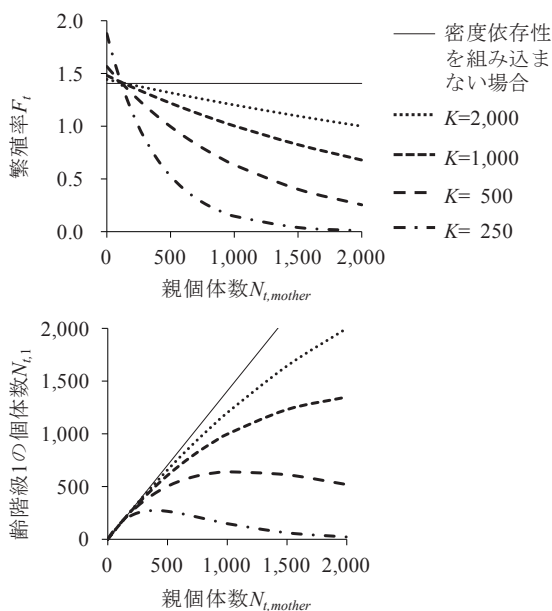


Fig. 26 密度依存モデルにおける親個体数と繁殖率 (左) および年齢階級 1 の個体数 (右) の関係
Relationships of F_t and $N_{t,1}$ to $N_{t,mother}$ for 'density-dependent model'

30 年経過後には親個体数は同程度の値になり、その時の親個体数の分布の 95 パーセンタイルが K と同程度であった。

4.3.3 考察

(1) 環境収容力特性

密度依存モデルに組み込んだ環境収容力 K は、4.3.1 項で述べたように、親個体数 $N_{t,mother}$ (すなわち卵塊数 $N_{t,eggmass}$) が多くと変態個体数が減ると仮定して設定したパラメータである。これは、ニホンアカガエルの生活史と式の構造から、本種の幼生が生息する水田の量 (水田の面積) と質 (餌の量や農薬等) を反映するパラメータと考えられる。ただし、本種は、地域によっては 2~3 月の水を張る前の水田で産卵するため、その場合には水田自体の面積ではなく、水田内の水たまりの面積やその水深を反映すると考えられる。また例えば、耕作放棄によって水田が陸化すると K は減少することや、水田面積が同じでも減農薬栽培等によつ

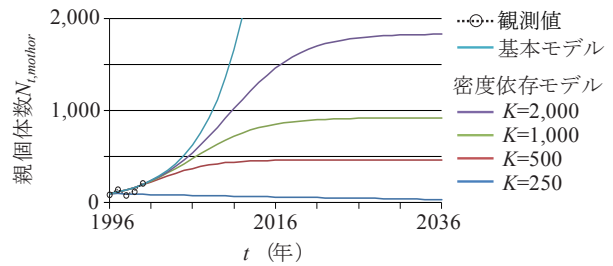


Fig. 27 密度依存モデルの決定論的なシミュレーション結果
Population fluctuations deterministically simulated by 'density-dependent model'

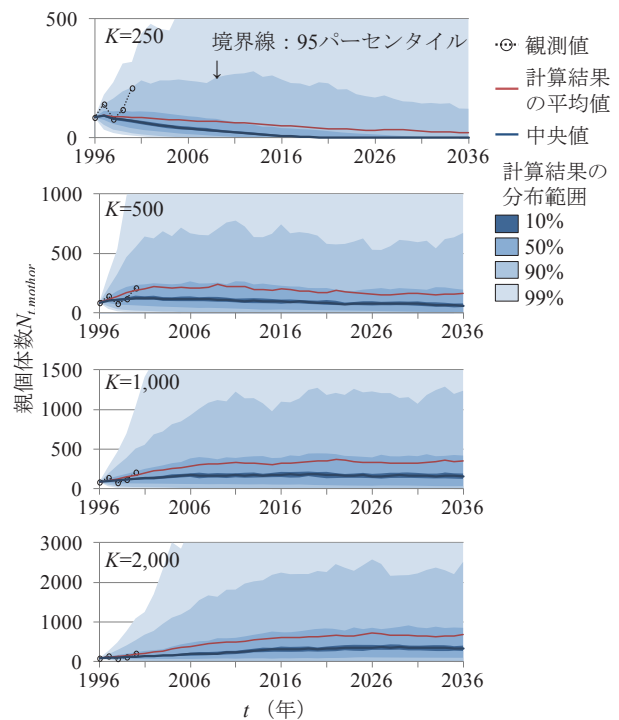


Fig. 28 密度依存モデルの確率論的なシミュレーション結果
Population fluctuations probabilistically simulated by 'density-dependent model'

て K は増加することが予想される。

親個体数 $N_{t,mothor}$ と繁殖率 F_t および年齢階級 1 の個体数 $N_{t,1}$ の関係のみると (Fig. 26), 基本モデルの場合には親個体数の増加に従って直線的に年齢階級 1 の個体数は増加したが, 密度依存モデルでは, 親個体数が大きくなると, 年齢階級 1 の個体数は増加しにくくなる傾向があった。 K が小さい程, 年齢階級 1 の個体数の最大値は小さく, その時の親個体数は小さかった (Table 11, Fig. 26)。このように, K によって年齢階級 1 の個体数の増加が制限されており, K は環境収容力パラメータとして機能している。一方, いずれの K に対しても, 親個体数が概ね 100 未満では, 同じ親個体数に対して K が小さいほど繁殖率は高く, 年齢階級 1 の個体数も多かった (Fig. 26)。これは個体群サイズが小さいときには年齢階級 1 の個体数が増加しやすく, 基本モデルと比べて減少した個体数が回復しやすい性質をもつことを意味する。

決定論的なシミュレーションにおいて, K が 500~2,000 では, 増加が落ち着いた時の親個体数は K の約 9 割の値であった (Fig. 27)。また, K が 500~2,000 の確率論的なシミュレーションでも, 増減が概ね落ち着いた時の親個体数について, その 95 パーセンタイルが K と同程度であった (Fig. 28)。すなわち, モデルの構造から K は年齢階級 1 の個体数に直接影響を与えるパラメータであるが, K は親個体数 $N_{t,mothor}$ の上限の目安にもなることが示唆された。

ここで, 実際のフィールドにおける個体群の大きさについて補足する。著者らによる卵塊調査の結果 (Table 12) では, 調査地点によって, もしくは同じ調査地点でも年によって値が異なったが, 卵塊数 $N_{t,eggmass}$ (親個体数 $N_{t,mothor}$ と同数) は 6~804 の範囲にあった。4.2 節での推定結果によれば, 総個体数に占める親個体数の割合は 50~79%であったことから (Table 10), 卵塊数から総個体数を逆算し, 7~1,608 と推定した (Table 12)。また, 著者が 2010 年に実施した茨城県桜川流域での卵塊調査 (整備地区・未整備地区を含む 181 地点において, 各地点 2 回実施) では, 70 地点 (各地点の調査区間長 0.2~1.0km, 水田の合計面積 0.1~2.7ha) で卵塊が確認された。調査回数が少ないので全数

を把握できていないと推察されるが, 各地点での卵塊数の合計は 1~78 であり, 総個体数は 1~176 と推定された。これらの調査結果から, 水田域の規模や環境にもよるが, 親個体数が 2~4 桁程度の水田域が多いと推察される (Table 12)。このため, $K=1,000\sim 2,000$ というのは, 比較的大きな個体群での値といえる。

本節では, 年齢階級 1 の個体に対して共倒れ競争を仮定して, 個体群動態モデルへの密度依存性の組み込みを検討した。実際には, 密度依存性が作用する年齢階級もしくは成長段階は, 生物種によって, また同種でも生息場によって異なると思われる (Halpern et al., 2005)。フィールドにおける密度依存性の型の検証も不可欠である。また, 環境収容力は, ほ場整備等の人為や人為以外による外部要因の影響から毎年変動すると予想される。そのため, 更なる知見の蓄積を待って, 密度依存性の個体群動態モデルへの組み込み方法やパラメータ値の設定方法を改めて検討する必要がある。

4.3.4 まとめ

年齢階級 1 の個体数に共倒れ競争を仮定した密度依存モデルを構築した。このモデルでは, 環境収容力 K の値に応じて, 親個体数 $N_{t,mothor}$ が増加するのに従って年齢階級 1 の個体数 $N_{t,1}$ の増加が抑制される。また, 4.2 節の基本モデルと比べて, 減少した個体数が回復しやすい特徴を持つ。

いくつかの K の値に対して決定論的なシミュレーションと確率論的なシミュレーションをした結果, K の値によって親個体数が制限されることが確認できた。また, K の値は親個体数の上限の目安にもなることが示唆された。

4.4 横断モデルの構築および個体群保全効果の評価

本節では, 移動対策による個体群保全効果の評価手法の構築に向けて, 水田と樹林間の移動時におけるコンクリート水路の横断行動を考慮した横断モデルを構築する。コンクリート水路の移動障害の程度 (横断成功率) が個体群存続率に与える影響を明らかにするとともに, 移動対策による個体群保全効果を考察する。なお, 前節までと同様に個

Table 12 定点での卵塊調査の結果
Fluctuations of egg-mass numbers observed in paddy fields

調査地点	調査年	調査回数 ¹⁾	卵塊数 $N_{t,eggmass}$	総個体数 ²⁾	調査区間長 ³⁾ , 面積 ⁴⁾	備考
A 地区	2008	3	172	217~344	4.2km, 3.0ha	未整備
	2009	5	804	1,017~1,608		
	2010	3(1)	467	591~934		
	2011	6(2)	792	1,002~1,584		
B 地区	2008	3	147	186~294	5.9km, 5.7ha	2010 年に ほ場整備
	2009	5	631	798~1,262		
	2011	6(2)	6	7~12	5.2km, 7.2ha	
C 地区	2008	5(1)	245	310~490	1.3km, 2.7ha	1970 年代に ほ場整備
	2009	7(1)	305	386~610		
	2010	7(2)	116	146~232		
D 地区	2008	6(1)	46	58~92	0.34km, 0.35 ha	未整備
	2009	6	111	140~222		
	2010	6(4)	59	74~118		

¹⁾括弧内は, うち卵塊が見つからなかった調査回数。²⁾ Table 10 の成熟個体率をもとに, [卵塊数/0.50~0.79] で推定。

³⁾卵塊調査を行なった水田畦畔の総延長。⁴⁾卵塊調査を行なった水田の合計面積。

体数とは、メスのみの個体数を指す。

4.4.1 方法

(1) 横断モデルの構築

ほ場整備済みの谷津田等でみられる水田・コンクリート水路・樹林の配置 (Fig. 29) を単純化して、水田と樹林との間にコンクリート水路がある生息場 (Fig. 30) について、横断モデルを構築することとした。水田から樹林に、もしくは樹林から水田に移動する時に、個体はコンクリート水路を横断する。この時、横断を試みる個体が水路に落ち、一部が水路の横断に成功すると仮定し、その個体の割合を横断成功率 C とした。3.3 節で示したように水路脱出率は横断成功率に換算できることから (Fig. 19, Table 8), III 章や他の試験報告で示された水路脱出率に対して、個体群保全効果の評価を行うことが可能となる。また、本種は、親個体もしくは変態後の個体のすべてが樹林に移動するわけではなく、非繁殖期にも水田や草地等で個体が観察されている (片野ら, 2001; 大澤・勝野, 2007)。これを考慮して、樹林に移動する個体の割合を樹林移動率 M とし、パラメータに加えた。

密度依存性を考慮しない横断モデル (以下、密度依存性の考慮の有無を区別する場合には、密度依存性を考慮しない横断モデルを「横断モデル (基本型)」, 密度依存性を考慮する横断モデルを「横断モデル (密度依存型)」とする) では、基本モデルの式(1), (2)および(4)を、それぞれ式(9), (10), (11)に変更した。樹林に移動する個体 ($M \times 100\%$) は水田—樹林間を往復する間に 2 回、コンクリート水路を横

断し、樹林に移動しない個体 ($(1-M) \times 100\%$) はコンクリート水路を横断しないものとした (Fig. 30)。なお、横断成功率 $C=100\%$ のとき、式(9), (10), (11)は、式(1), (2), (4)と等しくなる。

$$N_{t,3+} = S_{t,2} \times \{M \times C^2 + (1-M)\} \times (N_{t-1,2} + N_{t-1,3+}) \quad (9)$$

$$N_{t,2} = S_{t,1} \times \{M \times C^2 + (1-M)\} \times N_{t-1,1} \quad (10)$$

$$N_{t,1} = F_t \times \{M \times C^2 + (1-M)\} \times N_{t,mother} \quad (11)$$

横断モデル (密度依存型) では、式(11)の代わりに、式(7)と同様に密度依存性を表す項を加えた式(12)を用いる。

$$N_{t,1} = F_t^{1-N_{t,mother}/K} \times \{M \times C^2 + (1-M)\} \times N_{t,mother} \quad (12)$$

(2) パラメータ値の設定

パラメータ A_t , F_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ の値は、横断モデルが横断成功率 $C=100\%$ の時に基本モデルもしくは密度依存モデルと一致することから、横断モデル (基本型) では 4.2 節と同じ値、横断モデル (密度依存型) では 4.3 節と同じ値を用いた。横断成功率 C は、個体の成長段階や体長、横断する時期、あるいは個体が落ちた水路の流れの状態 (非灌漑期で水がない場合や、田植え前後には 50cm/s 程度の流れがある場合がある) によって異なると推測される。しかし、それらの条件別の横断成功率に関する情報が現時点では存在しないことから、ここでは暫定的に同一の値を設定した。

樹林移動率 M の値は、森ら (2008) が調査した谷津では 90%以上と報告されており、これを参考に設定した。

(3) 個体群動態シミュレーション

計算開始時の年齢級別個体数の和 (以下、「初期個体数」とする) N_0 , 横断成功率 C および樹林移動率 M の値の組み合わせを変えて、毎年の年齢級別個体数を計算した。初期個体数について、前述のように総個体数が 2~4 桁程度の水田域が多いと推察されたことを参考に (Table 12), 初期個体数は 100, 1,000 個体の 2 段階とした。4.2 節での結果から $N_{t,1} : N_{t,2} : N_{t,3+}$ は 0.7 : 0.2 : 0.1 とし、 $N_0 (=N_{0,1} + N_{0,2} + N_{0,3+})$ が 100 もしくは 1,000 になるように $N_{0,1}$, $N_{0,2}$ および $N_{0,3+}$ を計算した。

横断成功率 C は、0, 5, ..., 100% の 21 段階とした。樹林移動率 M は、森ら (2008) を参考に、80, 90, 100% の 3 段階とした。

横断モデル (密度依存型) の環境収容力 K について、4.3 節で $K=250$ の時には親個体数が減少し、 $K=500 \sim 2,000$ で比較的安定していたことから、環境収容力は $C=100\%$ であれば安定した個体群とみなせる 500, 1,000, 2,000 とした。

パラメータ A_t , F_t , $S_{t,1}$ および $S_{t,2}$ への乱数の与え方は、4.2 節および 4.3 節に準拠した。横断モデル (基本型) では、式(3), (9), (10)および(11)に前年の個体数とパラメータ値を代入して、毎年の年齢級別個体数を計算した。横断モデル (密度依存型) では、式(3), (9), (10)および(12)に前年の個体数とパラメータ値を代入して、毎年の年齢級別個体数を計算した。

計算期間は 40 年間とした。これは、コンクリート製の水路の標準耐用年数が 20~40 年とされること (農林水産省,



Fig. 29 水田—コンクリート水路—樹林の配置の例
Layout of paddy field, concrete ditch and forest

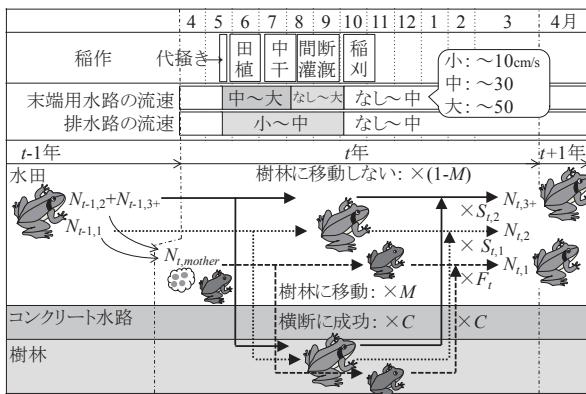


Fig. 30 横断モデルのイメージ図
Scheme of 'crossing model'

2003) を踏まえたものである。

計算の反復は 1,000 回とした。評価の指標は、40 年目時点で、すべての年齢級別個体数の和 (以下、「総個体数」とする) $N_{t,1}+N_{t,2}+N_{t,3}$ が 0 より大きい (個体群が存続している) 事象の発生割合 (以下、「個体群存続率」とする) とした。

4.4.2 結果

(1) 横断成功率と個体群動態との関係

横断モデル (基本型) の個体群動態シミュレーションから得られた、40 年間の総個体数の推移を Fig. 31 に示す。ただし、初期個体数 $N_0=1,000$ 、樹林移動率 $M=90\%$ 、横断成功率 $C=0, 20, \dots, 100\%$ の時の結果を代表させた。総個体数の変動について、 $C=0\sim 40\%$ では、計算開始年の直後から総個体数は単純減少した。6 年以内に総個体数が 0 となり、個体群が消滅した (Fig. 31 の a~c)。 $C=60\%$ および $C=80\%$ では、総個体数が増加した年もみられたが、それぞれ 12 年、38 年以内に個体群が消滅した (Fig. 31 の d~e)。すなわち、 $C=0\sim 80\%$ では、40 年以内に、1,000 回のすべての試行で個体群が消滅した。 $C=100\%$ では、総個体数は、年によって増減しながら、わずかに増加する傾向があった (Fig. 31 の f)。

横断モデル (密度依存型) の個体群動態シミュレーションから得られた、40 年間の総個体数の推移を Fig. 32 に示す。ただし、 $N_0=1,000$ 、環境収容力 $K=500$ 、樹林移動率 $M=90\%$ 、横断成功率 $C=0, 20, \dots, 100\%$ の時の結果を代表させた。 $C=0\sim 80\%$ (Fig. 32 の a~e) での総個体数の推移傾向は、横断モデル (基本型) での結果 (Fig. 31 の a~e) と同様であり、40 年以内に 1,000 回のすべての試行で個体群が消滅した。 $C=100\%$ (Fig. 32 の f) での総個体数は、一時的に大きく増加する試行もあったが (K によって個体数が調整されているが、乱数によって F_t や $S_{t,1}$, $S_{t,2}$ に大きな値が与えられた年は総個体数が多くなった)、概ね $0\sim 1,000$ の範囲で推移した。

(2) 横断成功率と個体群存続率との関係

横断モデル (基本型) の個体群動態シミュレーションから得られた、横断成功率 C と 40 年後の個体群存続率との関係を Fig. 33 に示す。横断成功率が一定の値を超えると個体群存続率が急激に増加する傾向がみられた。樹林移動率 M の増大に伴い、グラフはわずかに右方向にシフトし、同じ横断成功率に対して個体群存続率は低くなる傾向があった。しかし、個体群存続率 100% の付近では、同じ横断成功率に対して樹林移動率による個体群存続率の差異は小さかった。

横断モデル (基本型) および横断モデル (密度依存型) の個体群動態シミュレーションから得られた、横断成功率と 40 年後の個体群存続率との関係を Fig. 34 に並べて示す。ただし、樹林移動率 M に 90% を与えた時の結果を代表させた。横断モデル (密度依存型) では、横断モデル (基本型) での結果と同様に、初期個体数 100 および 1,000 のいずれにおいても、横断成功率が一定の値を超えると個体群存続率が急激に増加する傾向がみられた。また、環境収容力 K が小さいほど同じ横断成功率に対する個体群存続率は低い傾向がみられた。 $K=500$ の時には、横断成功率が 100% であ

っても、個体群存続率は 75 (初期個体数 $N_0=100$) $\sim 81\%$ ($N_0=1,000$) と低かった。

4.4.3 考察

(1) 移動障害による個体群への影響

Fig. 33 および Fig. 34 から、横断成功率 C が個体群存続

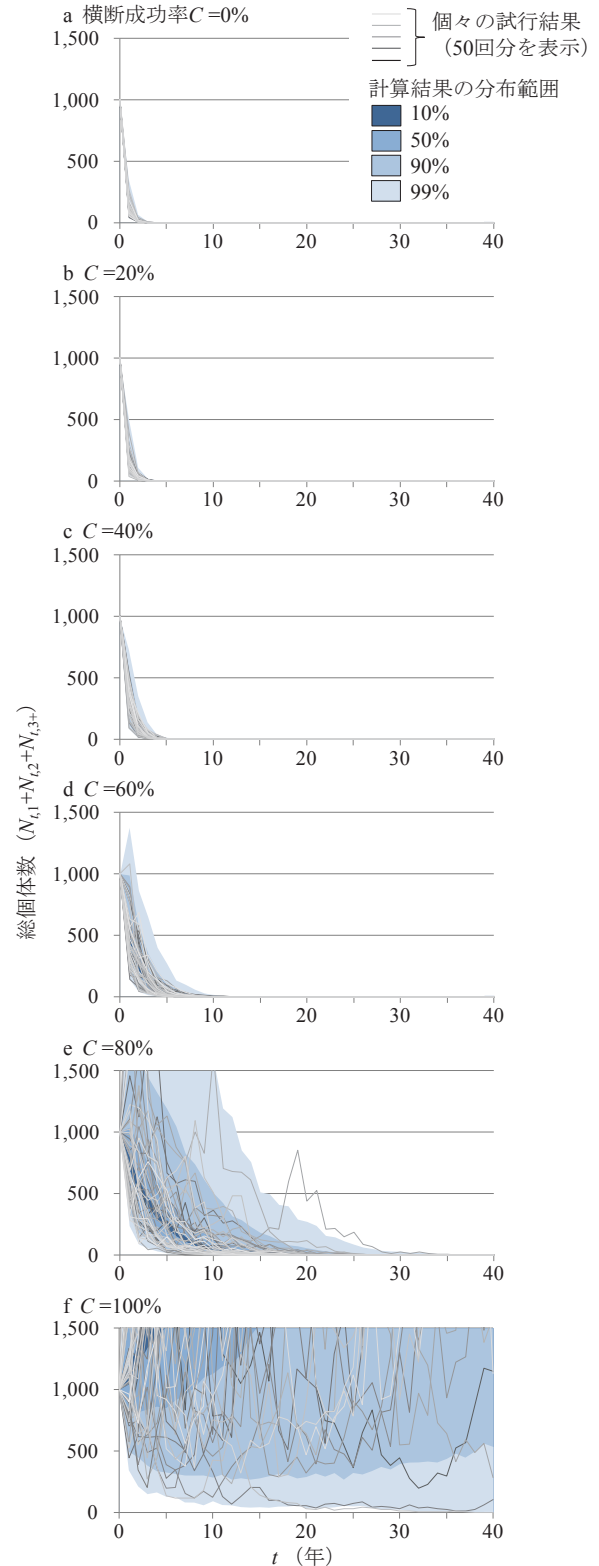


Fig. 31 横断モデル (基本型) で計算した総個体数の推移 (初期個体数 1,000, 樹林移動率 $M=90\%$)

Population fluctuations simulated by 'basic migrating model'

率に大きく影響することが明らかであった。例えば、初期個体数 $N_0=1,000$ 、環境収容力 $K=1,000\sim 2,000$ の時、前述のように比較的大きな個体群だとみなせるが、横断成功率 C

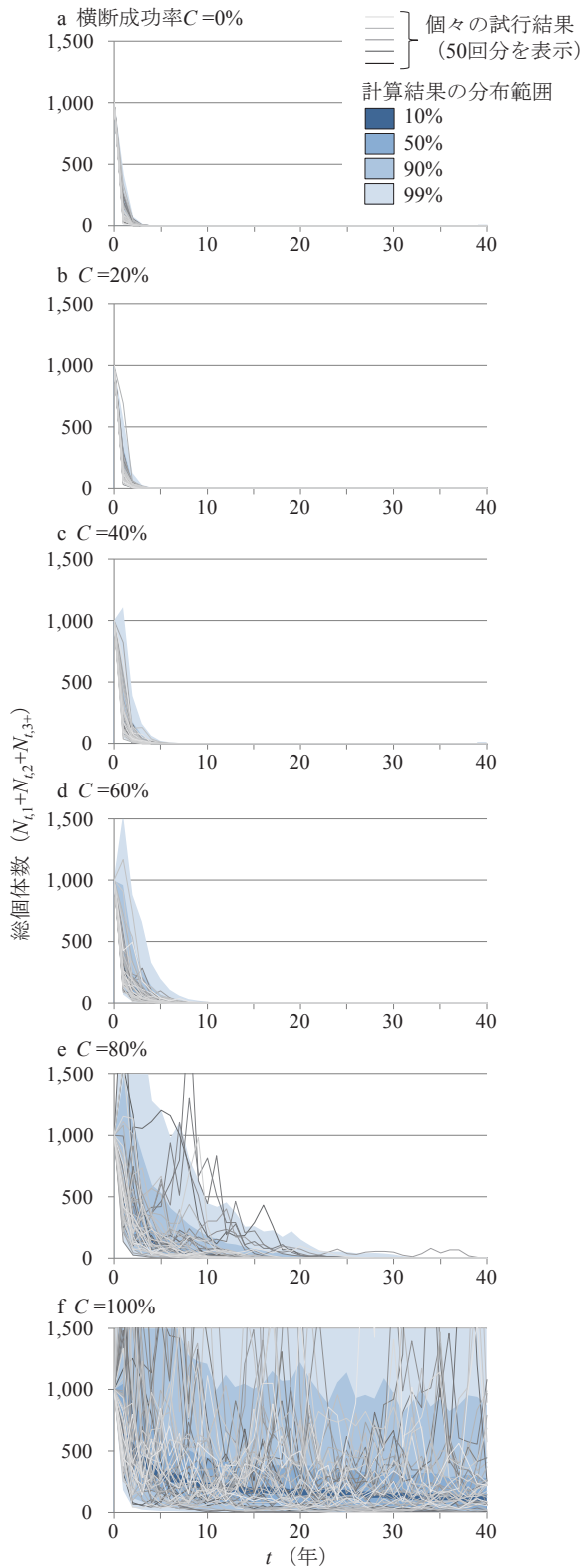


Fig. 32 横断モデル（密度依存型）で計算した総個体数の推移（初期個体数 $N_0=1,000$ 、環境収容力 $K=500$ 、樹林移動率 $M=90\%$ ）
Population fluctuations simulated by ‘density-dependent migrating model’

が 90%未満での個体群存続率は 50%未満であった（Fig. 34）。このことから、コンクリート水路による移動障害は、個体群の存続に致命的な要因と考えられる。

Fig. 31 および Fig. 32 では、横断モデル（基本型）と横断モデル（密度依存型）の両方において、横断成功率 $C=60\%$ および $C=80\%$ の時、1,000 回の試行の中には、いったん総

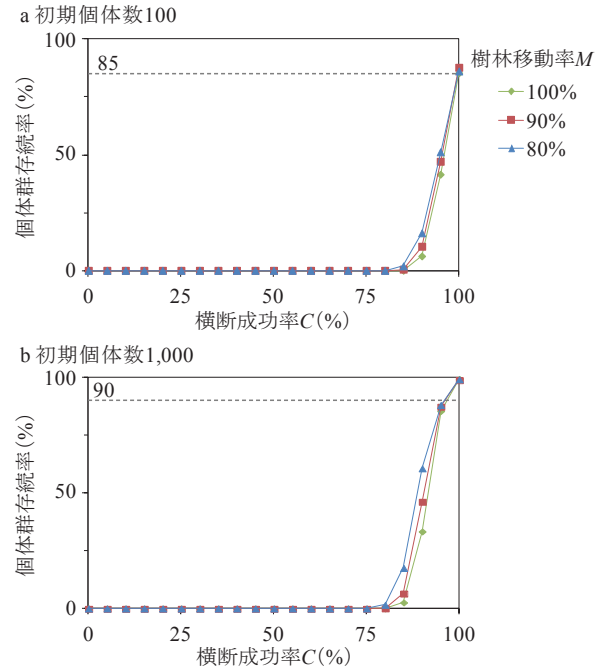


Fig. 33 横断モデル（基本型）で計算した個体群存続率
Population viability simulated by ‘basic migrating model’

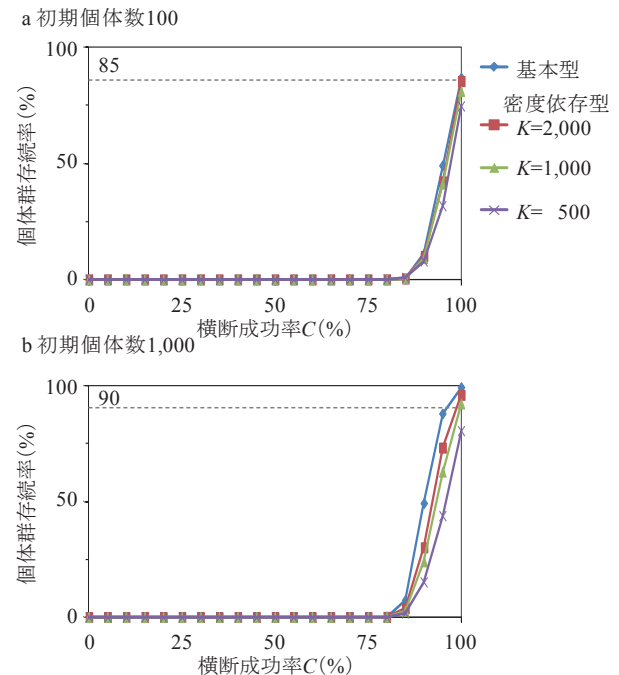


Fig. 34 横断モデル（基本型）と横断モデル（密度依存型）のシミュレーション結果の比較（樹林移動率 $M=90\%$ ）
Population viability simulated by ‘basic migrating model’ and ‘density-dependent migrating model’

個体数が増加した後、やがて減少して 0 になる試行結果もみられた。例えば、横断成功率 $C=80\%$ では、5 年時点で総個体数が 0 より大きい（個体群が存続している）率は 90% 以上であり、総個体数が初期個体数 N_0 の 1,000 を上回る試行もあった。しかし、最終的には 40 年後にはすべての試行で個体群が消滅した。この結果は、コンクリート水路における移動障害の解消が不十分の場合には、対策を施した後いったん個体数が増加しても、長期的には個体群は必ずしも保全されない可能性を意味する。ここに、対策後の長期的なモニタリングの重要性が示唆される。

(2) 個体群存続率への影響が大きい因子

横断モデル（基本型）のシミュレーション結果（Fig. 33）から、樹林移動率 M が高いほど、同じ横断成功率 C に対して個体群存続率は高まった。しかし、個体群存続率 100% の付近では、同じ横断成功率に対して樹林移動率による個体群存続率の差異は小さかった。80~100% の樹林移動率の違いは、個体群存続率に影響するものの、高い個体群存続率を達成するための横断成功率を検討する際には影響は小さいと考えられる。

初期個体数 N_0 が 100 と 1,000 での結果を比較すると、グラフの折れ線が立ち上がる時の横断成功率は 80~85% であり（Fig. 33）、同様の傾向であった。しかし、同じ横断成功率および樹林移動率に対する個体群存続率は、初期個体数 100 の方が、初期個体数 1,000 よりも低かった。これは、個体数が非負の整数しかとらないため、個体数が小さいほど人口学的確率性の影響を受けやすい（Akçakaya et al., 1999）ことによる結果だと考えられる。

横断モデル（密度依存性型）では、環境収容力 K が 2,000 程度に大きい値をとる場合には、横断モデル（基本型）に近い結果を示した（Fig. 34）。このことから、大きな個体群について移動対策の個体群保全効果を検討する場合には、横断モデル（基本型）をそのまま利用できると考えられる。横断モデル（密度依存性型）では、環境収容力が小さいほど、同じ横断成功率に対する個体群存続率は低い傾向があった。4.3 節で述べたように、密度依存モデルは、環境収容力が小さい場合に、減少した個体数が回復しやすい特性を持つ。しかし、本報での密度依存性の組み込み方においては、前述の人口学的確率性の影響が、個体数の回復しやすさよりも大きく作用すると考えられる。環境収容力が 500 の場合には横断成功率が 100% であっても個体群存続率は低かった。この結果はコンクリート水路における移動障害の解消だけでは小さな個体群は必ずしも保全できないことを意味すると考えられる。

本報での結果と同様に、松崎（2010）は、環境収容力が小さい、もしくは本種の初期個体数が小さい局所個体群は消滅しやすいという個体群存続性分析の結果を示している。松崎（2010）の解析では、局所個体群間の移動に関するパラメータ値が高く設定された（毎年、ある局所個体群から別の局所個体群に移動する個体の割合を 13~95% とした。ただし、移動の実態は調査せず、値は仮説として与えたものである）。この場合、局所個体群の存続率は、そこで

の環境収容力に加えて、隣接する別の局所個体群の大きさにも著しく依存すると推察される。局所個体群間の移動実態を明らかにしながら個体の供給を組み込んだ個体群動態モデルを構築することは、今後の興味深い課題である。

(3) コンクリート水路での移動対策による個体群保全効果

脱出工について、3.3 節で示した方法で推定したニホンアカガエルの横断成功率 C を Table 13 に示す。本研究での結果は Table 8 から抜粋したものである。また、発表要旨であり、試験方法が必ずしも明確ではないが、高橋（2006）および池田ら（2009）が示した水路脱出率から横断成功率を推定した結果を併せて掲載した。これらの結果によれば、横断成功率は高くても 40% 程度といえる。ただし、3.2 節で明らかにしたように、脱出工を複数（もしくは高密度に）設置することで、横断成功率も上昇すると推察される。

例えば、Fig. 34 の b によれば、初期個体数 $N_0=1,000$ 、環境収容力 $K=1,000\sim 2,000$ の横断モデル（密度依存性型）の結果では、横断成功率 $C=40\%$ での個体群存続率は 0% であり、現状の脱出工の個体群保全効果は低いと判断される。脱出工を設置する場合には、長期的にモニタリングを行いながら、設置後に個体数が減少した場合に追加の対策を加える、すなわち順応的管理のプロセス（鷲谷，1998）が重要になると考えられる。

全面タイプの転落防止工（コンクリート水路の全区間にフタを設置した場合）では、本種が水路を横断できることが検証されている（中村ら，2002；水谷ら，2005；川嶋，2007）。この場合は水路に転落せずに水路を横断するため、横断成功率 $C=100\%$ とすると、前述と同じ条件（ $N_0=1,000$ 、 $K=1,000\sim 2,000$ ）の時に、個体群存続率は 92（ $K=1,000$ ）~96%（ $K=2,000$ ）と計算される（Fig. 34 の b）。このことから、全面タイプの転落防止工を設置できれば高い個体群保全効果が期待できると考えられる。

部分タイプの転落防止工（断続的にフタをした場合）の横断成功率の知見は見当たらないが、前野・上野（2009）の行動観察によると、本種はコンクリート水路を横断する際に、横断できる場所を探索せずに水路に下りるとされる。また、工藤（2011）は、転落防止工や脱出工のない実験水路（30cm 幅）の土羽に放した後 10 分間の本種の行動につ

Table 13 脱出工によるニホンアカガエルの横断成功率の推定値
Estimated proportion succeeding of the Japanese Brown Frog via escape countermeasures

概要	水路 脱出率	横断 成功率 ¹⁾	出典等
着脱式脱出工 A	44%	22~28%	3.2 節
着脱式脱出工 B	33%	16~19%	
着脱式脱出工 C	58%	29~40%	
部分タイプのスロープ脱出工	43%	21~27%	高橋 (2006)
部分タイプのネット脱出工	53%	26~36%	
45° 斜面での登攀実験	37%	18~22%	池田ら (2009)
63° 斜面での登攀実験	4%	2 %	

¹⁾ 3.3 節の方法による推定値。

いて、50%の個体がもとの土羽に残留し、47%の個体が水路に転落し、3%の個体が反対側の土羽に横断した（横断成功した）と報告している。部分タイプの転落防止工では、いったん水路に転落した個体が脱出できる工夫はないため、フタのない区間での横断成功率は低いと考えられる。このため、フタの設置率（コンクリート水路の区間長に占めるフタの設置区間長の割合）が小さいほど横断成功率は低下し、個体群保全効果も低下すると考えられる。なお、他の転落防止工や脱出工についても、横断成功率を計測できれば、もしくは水路脱出率を計測して 3.3 節で示した式から横断成功率を推定できれば、個体群保全効果を評価できる。

横断モデルでは、予め目標とする個体群存続率を設定して、目標達成に必要な横断成功率の条件を予測することもできる。例えば、水路の改修を計画している谷津田において、本種の生息個体数が 1,000 であることが分かったとする。個体群存続率の目標値をどの程度の値とするかは対象地区の生息場としての保全の優先度によるだろうが、ここでは 90%以上と設定したとする。Fig. 34 の b から、初期個体数 $N_0=1,000$ で、40 年後の個体群存続率が 90%以上となる条件は横断成功率 $C=100\%$ （横断モデル（基本型））、 $K=1,000\sim 2,000$ の横断モデル（密度依存型）であった。この場合、3.3 節での検討結果によれば脱出工で横断成功率を 100%にすることはできず、全面タイプの転落防止工の設置等により、コンクリート水路の横断を確実なものとする必要があると考えられる。以上のように、本節で構築した横断モデルは、転落防止工や脱出工を行なった場合の個体群保全効果を評価できる手法である。

4.4.4 まとめ

コンクリート水路での移動対策による個体群保全効果の評価手法の構築に向けて、水田と樹林との間にコンクリート水路がある生息場におけるニホンアカガエルの水田—樹林間の移動を想定し、樹林移動率 M および横断成功率 C のパラメータを組み込んだ横断モデルを構築した。初期個体数 N_0 (100, 1,000)、横断成功率 C (0, 5, ..., 100%)、樹林移動率 M (80, 90, 100%) および環境収容力 K (500, 1,000, 2,000) の値の組み合わせを変えて 40 年間の年齢別個体数を 1,000 回反復計算し、40 年後の個体群存続率を各条件について計算した。その結果、以下が明らかになった。

- ①横断成功率が個体群存続率に大きく影響を与えており、コンクリート水路による移動障害が個体群の存続に致命的な要因であると考えられた。横断成功率が 60%および 80%の時、いったん総個体数が増加した後にやがて 0 になる試行結果もみられ、コンクリート水路における移動障害の解消が不十分な場合には、長期的に個体数を監視する必要性が示唆された。
- ②個体群存続率への各パラメータの影響について、樹林移動率の影響は小さく、初期個体数、環境収容力の影響が大きかった。初期個体数もしくは環境収容力が小さい場合、横断成功率 100%であっても 40 年後の個体群存続率

は低く、移動障害の解消だけでは小さな個体群は必ずしも保全できないことが示唆された。

- ③移動対策の個体群保全効果について、全面タイプの転落防止工は横断成功率が高いため、個体群保全効果も高いと考えられた。一方で、部分タイプの転落防止工あるいは脱出工の個体群保全効果はあまり高くはないと考えられた。また、生息個体数 1,000 の個体群を 90%以上の率で存続させたい場合、横断成功率を 100%にする、すなわち全面タイプの転落防止工の設置等によりコンクリート水路の横断を確実なものとする必要があると考えられた。

4.5 トウキョウダルマガエルを対象とした水田域内の移動モデルの検討

4.4 節では、ニホンアカガエルの水田—樹林間の移動を数理モデル（横断モデル）で表わした。これに対して、4.1 節で述べたように、定住性のトウキョウダルマガエルを評価対象とする場合には、水田域内での個体の移動実態に応じた、別の数理モデルを構築すべきだと考えられる。そこで本節では、水田域内での移動とコンクリート水路への転落を考慮した個体群動態モデル（以下、「水田域内の移動モデル」とする）の構築可能性を検討する。

水田域内の移動モデルのイメージ図を Fig. 35 に示す。個体のコンクリート水路への転落頻度に関する知見はないが、1 年間でのコンクリート水路への平均転落回数を D とし、 i 番目の個体が水路に転落する回数 D_i は平均 D のポアソン分布に従う乱数で与えられると仮定した。また、水路脱出率 E （コンクリート水路に転落した後の、水路からの脱出率）をパラメータとして設定した。これは、4.4 節の横断モデルではニホンアカガエルが水田—樹林間を移動する生態を持つためコンクリート水路を横断することが重要であったが、定住性の種にとってはコンクリート水路の両側が生息場にも繁殖場にもなるため、水路から脱出できることが重要だと考えられることによる（ただし、個体数が少ない時には、雌雄がコンクリート水路の同じ側にいないと繁殖できないため、この場合は脱出の方向性も重要になると考えられる）。したがって、水田域内の移動モデルでは、4.2 節の基本モデルもしくは 4.3 節の密度依存モデルに、コンクリート水路による移動障害の影響度（平均転落回数 D 、水路脱出率 E および個体数 N に依存する関数のため、 $f_{(D,E,N)}$ とする）の項を組み込めばよい（Fig. 35）。

トウキョウダルマガエルについて生存と繁殖に関するパラメータ値の知見が揃っていないため、現時点では 4.4 節のような個体群動態シミュレーションはできない。また、上述の平均転落回数に関する知見もない。そのため、ここでは、いくつかの D 、 E および N の値に対する $f_{(D,E,N)}$ の値を Fig. 36 に示すに留めておく。移動障害の影響度 $f_{(D,E,N)}$ は、平均転落回数 D 、水路脱出率 E および個体数 N の値に大きく依存することが分かる。

以上のように、生存・繁殖に関するパラメータ値およびコンクリート水路への転落頻度の知見が蓄積すれば、水田

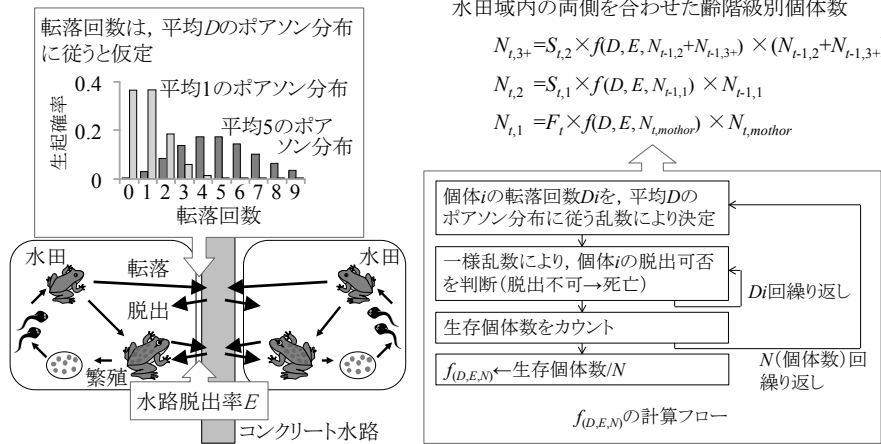


Fig. 35 水田域内の移動モデルのイメージ図
Scheme of 'migration model' for resident frogs

域内の移動モデルを用いて、水田域内を分断するコンクリート水路において移動障害の解消をはかる場合の個体群保全効果についても評価できると考えられる。

V 結 言

5.1 コンクリート水路による移動障害とその対策

本報では、コンクリート水路による移動障害を解消するための脱出工や転落防止工等の移動対策について、脱出工の性能を実験に基づき評価するとともに、移動対策の個体群保全効果を数理シミュレーションに基づき評価した。

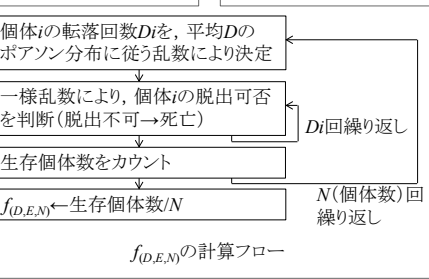
III章では、既存の脱出工の性能について、スロープの傾斜角等の諸元を変えて実験的に明らかにしたうえで、既存水路に簡易に設置できる着脱式の脱出工を提案した。またこれらの実験・観察を通して、カエル類の行動特性や遊泳・

水田域内の両側を合わせた年齢級別個体数

$$N_{t,3+} = S_{t,2} \times f(D, E, N_{t,1,2} + N_{t,1,3+}) \times (N_{t-1,2} + N_{t-1,3+})$$

$$N_{t,2} = S_{t,1} \times f(D, E, N_{t-1,1}) \times N_{t-1,1}$$

$$N_{t,1} = F_t \times f(D, E, N_{t,mother}) \times N_{t,mother}$$



脱出能力について、新たな知見を提出した。3.1節では、脱出工のスロープの傾斜角および水路の水深・流速を条件とし、トウキョウダルマガエルについて水路脱出率（水路からの脱出率）を試験した。傾斜角 30~45° のスロープで水路脱出率が相対的に高く、更に個体の観察から傾斜角 30° がより脱出しやすいと考えられた。また、水深 5cm 以上もしくは流速 20cm/s 以上の条件で脱出しやすかった。流れに対する本種の遊泳能力が低かったため、流速ではなく水深を調整して脱出しやすい条件にすることが望ましいと考えられた。3.2節では、着脱式の脱出工 3 種を試作した。設置数および通水の有無を試験条件に加えながら、試作した各脱出工の性能をトウキョウダルマガエルおよびニホンアカガエルについて評価するとともに、より脱出しやすい脱出工の構造を考察した。3.3節では、水路脱出率による横断成功率（コンクリート水路の横断の成功率）の推定式を個体の行動解析に基づき作成するとともに、試作した脱出工および既存の脱出工での横断成功率を推定した。これらの結果から何の対策も行っていないコンクリート水路では、落ちた後に脱出できるカエルはわずか数%に過ぎないことが明らかとなった。また、水路脱出率が比較的高い条件下でも、現状の脱出工の水路脱出率は平均的に 60%程度であり、それから推定される横断成功率は高くても 40%程度であった。

IV章では、ニホンアカガエルを対象とした個体群動態シミュレーション手法を開発し、個体群存続率を指標として移動対策の個体群保全効果（個体群の存続を可能にする効果）を評価した。個体群存続率を計算するための個体群動態モデルは 3 段階で構築した。4.2節では、ベースとなる「基本モデル」を構築し、シミュレーションに必要なパラメータの値を設定するとともに、シミュレーション結果と本種の個体群動態のデータを比較してモデルの妥当性を確認した。4.3節では、環境収容力のパラメータを加えた「密度依存モデル」を構築し、個体群動態の再現性の向上をはかった。4.4節では、本種の水田と樹林間の移動生態を反映させ、

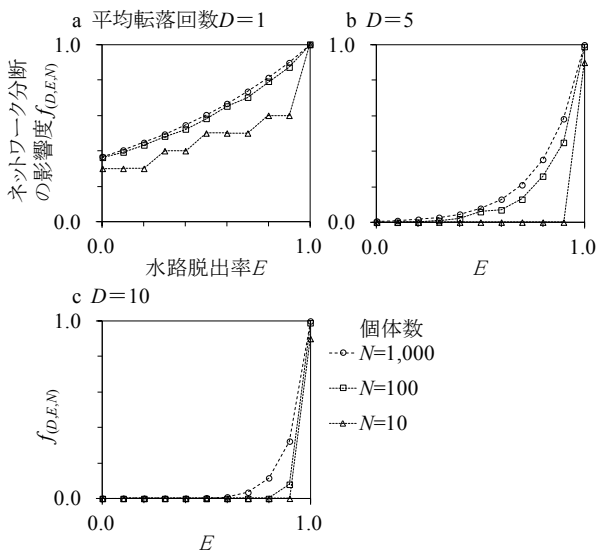


Fig. 36 水田域内の移動モデルにおける移動障害の影響
Influence of drop frequency, escaping proportion and number of frogs on parameter $f_{(D,E,N)}$

横断成功率のパラメータを加えた「横断モデル」を構築した。また、4.5節では、トウキョウダルマガエルの場合の移動モデルについて考察を加えた。横断モデルのシミュレーションの結果、コンクリート水路での横断成功率が90%未満では、40年経過後の個体群存続率は50%未満であった。

I章でも述べたように、ほ場整備後の水田でカエル類の個体数が減少した、もしくは個体群が消失した原因には、生息に適した畦畔の面積の減少、乾田化による繁殖場の消失、表土の剥ぎ取り等による個体の死亡などの複数の要因も重なるであろうから、その原因の特定は困難である。しかし、III章とIV章の検討結果から、コンクリート水路による移動障害が個体群の存続に致命的な要因だと考えられる。また、コンクリート水路に既存の脱出工をわずかに設置したとしても、個体群の保全には至らない可能性が高いといえる。そのため、個体群を保全する上では、土水路（暗渠の上に土水路を設ける二段式の水路を含む）を設置する、あるいは全面タイプの転落防止工（水路の全区間にわたるフタ）を設置するといった根本的な対策が第一に必要なだと考えられる。

通常、農業農村整備事業では、その事業費の一部を農家が負担する。そのため、移動対策等の生態系保全策に伴い事業費が増大する可能性があることは、農家の理解を得る上で重要な問題となる。例えば、幅50cmのコンクリート水路で、転落防止工としてコンクリート製のフタを設置する場合、掛増し経費（材料費）は21千円/10mと試算される。このように、水路の全区間にフタを設置すれば生態系保全効果は高いとしても、費用が高ければ導入にはつながらない。

こうした生態系保全策にかかる費用を農家の負担だけで対応するのは困難であろう。これに対して、農村生態系が豊かになることで恩恵を受けるのが、農家というよりも地域住民、ひいては国民全体であることを考えると、少なくとも生態系保全策に伴う経費は地域住民もしくは国民が平等に負担することが望ましいといえる。実際、三重県による希少生物保全事業では、「絶滅危惧種や地域において保全が必要とされている希少生物等が生息する場合は、従来工法との差額にかかる工事費の地元負担金を県が補助する」としている。また、農家や地域住民による簡便な生態系保全の取り組みや維持管理作業等による費用・労力の一部は、農地・水保全管理支払交付金での補助対象にもなっている。このような補助制度の制定・普及が全国的に進めば、生態系保全策への農家の同意も得られやすくなると期待される。本研究の成果を含めて生態系保全策による効果を定量的に示し、分かりやすく説明していくことは、生態系保全に係る地元負担を軽減する国や地方自治体の補助制度に科学的根拠を与え、生態系保全に関する農家や地域住民の理解を深めることに貢献できると考えられる。

5.2 個体群保全効果の評価手法の活用方法

IV章で構築した個体群保全効果の評価手法では、個体群動態シミュレーションにより、移動対策の個体群保全効果

の事前予測・評価が可能であった。パラメータの1つである移動対策の横断成功率は、試験によって直接計測する、もしくは水路脱出率を計測し、3.3節の関係式に基づき推定することで与えられる。また、反対に予め目標とする個体群存続率を設定して、目標の達成に必要な横断成功率の条件を予測し、工法選択の判断に活用することもできる。

それに加えて、この手法は、生息場や繁殖場の保全策による個体群保全効果の評価にも活用できる。例えば、繁殖場の保全策として、親個体が産卵時に選好する植生環境（抽水植物がない場所を好む）と水深を保つこと（吉田ら、2006；門脇、2002）、孵化率の高い水温（倉本ら、1971）や水分環境（渡部ら、2009）を保つこと、農事暦を工夫して幼生期と中干しのタイミングの重複を避けること（吉田ら、2007）等が挙げられる。これらの保全策は、幼生期の生存率の向上、そして当歳個体数の増加に寄与すると考えられる。これは、横断モデルにおける繁殖率 F_t の増大を意味する。保全策による F_t の増大の程度を定量することは課題となるが、 F_t の値を変更して個体群動態シミュレーションを行うことで、繁殖場の保全策による個体群保全効果も評価できる。

そこで、移動対策と繁殖場の保全策を組み合わせた場合の効果を試算した。Fig. 37は、 F_t の平均を4.4節の1.0~1.3倍に変えながら（標準偏差はもとの値に固定した）、横断成功率 C と40年後の個体群存続率をシミュレーションしたものである。ただし、横断モデル（密度依存型）を用い、初期個体数1,000、環境収容力 $K500$ とし、計算方法および他のパラメータは4.4節に従った。繁殖率 F_t の平均が大きいくらい程、同じ横断成功率 C に対する個体群存続率は高くなるのが分かる。つまり、移動対策を講じつつ、あわせて繁殖場の保全を図ることで、個体群の保全をいっそう確実なものにできると考えられる。

個体群動態シミュレーションを農村生態系の保全策の事前予測・評価に活用するための研究は、魚類のタモロコ *Gnathopogon elongatus elongatus* で進んでいる（竹村ら、2010, 2011a, b, c）。従来、農業水路内の落差工等の移動障害に対して魚道を設置する（ネットワーク化する）際に、魚類の個体群動態を定量的に予測・比較できる手法はなく、施

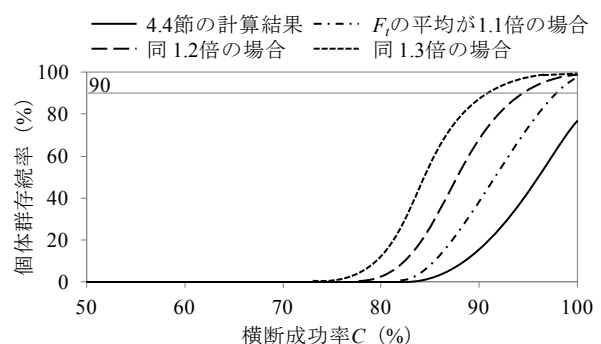


Fig. 37 繁殖率 F_t が増加した場合の個体群存続率
Population viability simulated using larger F_t parameter

工場所等は経験的に決められてきた。竹村ら (2011a) が構築した「ネットワークモデル」は、魚道の施工場所や整備水準が異なる、様々なシナリオに対して予測結果の定量比較が可能である。例えば、水路内にいくつかの落差工（移動障害）が存在し、いずれかの落差工に魚道を設置する場合に、どれに優先的に設置すれば、より早く個体群の回復がはかれるかを事前予測できる。ネットワークモデルの開発（竹村ら, 2011a）と併せて、シミュレーションに必要となるパラメータ値について、タモロコの移動特性（竹村ら, 2010）、自然増加率（竹村ら, 2011c）および環境収容力（竹村ら, 2011b）の値が推定されている。竹村らのネットワークモデルでは、タモロコによる水路の縦断方向の移動を考慮するため、一次元のメッシュ分割（吉野ら, 1993）を採用した。そのため、モデルの機構はより複雑であるが、影響要因を移動障害に絞った個体群動態モデルという点で、本報で構築した横断モデルと共通するものといえる。

このように、個体群動態のシミュレーションに基づく生態系保全策の効果の予測・評価手法は、保全策の計画時に効果を事前評価するため、もしくは限られた予算の中でより高い効果が期待できる工法を選択するための支援ツールとして活用しうる。生態系配慮の効果を定量的に把握するための指標開発が求められている中で（農林水産省, 2007）、本研究で提案した個体群保全効果の評価手法は、生態系配慮手法の設置を検討するための有効なツールになると考えられる。ただし、シミュレーションの結果は施工前に最善の配慮方法を選定するためのものであり、施工後はモニタリングを行いながら適切に管理することが肝要である。

5.3 持続可能な農業・農村の振興への貢献可能性

I 章では、カエル類の生息が、害虫のコントロールや物質循環等の生態系サービスにおける調整サービス、季節の

楽しみ等の文化的サービスにつながることを述べた。ここで、カエル類の保全によってポテンシャルとして期待される多面的な効果を Fig. 38 にまとめた。例えば、たかしま有機農法研究会では、移動対策等を行なった水田で収穫した米を「たかしま生きもの田んぼ米」という生きものブランドで販売している（本多, 2011）。このような生きものブランド化の取り組みが進めば、個々の農家・農業法人の所得向上を通じて、食料の安定供給や持続可能な農業につながるだろう。また、カエル類への関心から、それが生息できる水田・地域への関心を誘導できれば、生態系保全活動を含めた地域活動の活発化、農村振興にもつながるかもしれない。このように、カエル類の保全は、単にカエル類のためだけではなく、食料の安定供給、持続可能な農業、農村の振興・活性化といった政策目標に最終的に結びつくと考えられる。ただし、Fig. 38 における個々の矢印の結びつきを評価する研究や、結びつきを顕在化する仕組み・戦略については今後の長期的な検討課題といえる。なお、カエル類の生息は、餌となる昆虫類や捕食者である大型鳥類だけでなく、カエル類と同様に大型鳥類の餌となる魚類等の水生生物の生息に直接的・間接的に影響する（例えば、カエル類の個体数が減れば、魚類に対する捕食圧が上がると予想される）。そのため、実際には、カエル類とともに他の生物種も生息できる生息環境の保全が重要といえる。

他方、カエル類の保全をはじめ、農村生態系を豊かなものにするための取り組みとして、現在、環境保全型農業の推進がはかられている。農林水産省による「環境保全型農業直接支払交付金」では、有機栽培や冬期湛水、リビングマルチ等の取り組みに対して支援がなされている。また、日本学術会議による「農業における病虫害・植物防除研究に関する提言」（日本学術会議農学委員会植物保護科学分科会, 2011）によれば、生物多様性による生態系サービスを

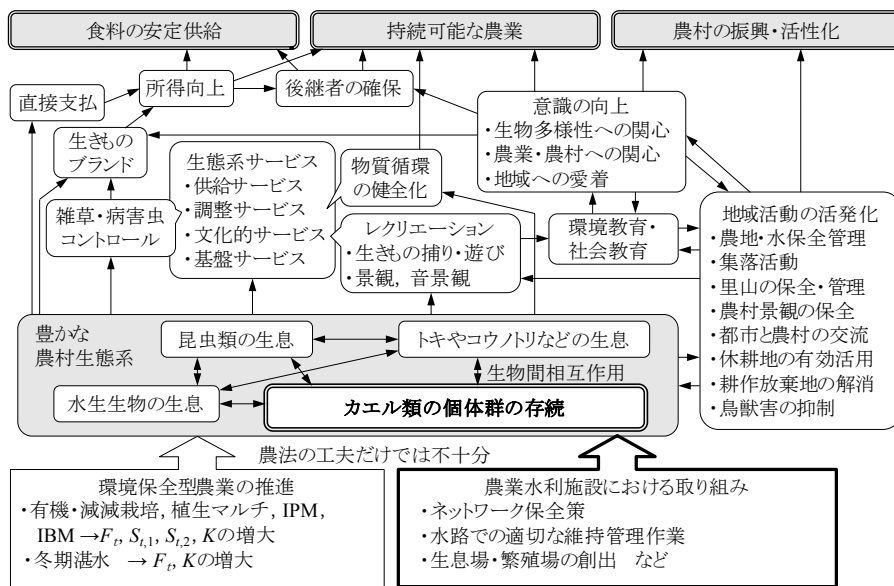


Fig. 38 生態系保全の取り組みの多面的な効果
Multiple effects of activities related to ecosystem conservation

保ちながら持続的な農業体系を確立することが農作物の安定生産とともに期待されている。そのために総合的有害生物管理 (IPM) や総合的生物多様性管理 (IBM) を主体とする環境保全型の農業生産体系の定着を進める必要があるとされる。なお、IPM は現行の耕種的・生物的・化学的・物理的な防除法、適正品種、施肥量、減農薬を互いに矛盾しないように組み合わせて、経済的被害となるレベル以下に病虫害や雑草の発生を低減させる栽培管理体系である。IBM は天敵でも害虫でもない「ただの虫」(中立種) が生息できるように農村生態系の多様性を保つことで、害虫の多発生を抑制しようという概念である。

本研究で構築した個体群動態モデルに照らすと、いずれも定量的な知見はないが、有機栽培や減農薬・減化学肥料栽培、リビングマルチ、IPM、IBM 等は繁殖率 F_t や生存率 $S_{t,1}$, $S_{t,2}$, 環境収容力 K の増大に寄与し、冬期湛水は F_t や K の増大に寄与すると予想される。そのため、これらの環境保全型農業の取り組みはニホンアカガエルの個体群保全に寄与すると予想される。

一方で、IV 章で明らかになったように、コンクリート水路での移動障害がニホンアカガエルの個体群存続に致命的に影響する。カエル類以外でも、例えばネズミ類等の小型哺乳類にとっても、同様にコンクリート水路は移動障害となるため(高中ら, 2008), その生息環境を保全する場合には移動障害の解消が必要であろう。あるいは、水田で繁殖する魚類(例えば前述のタモロコ) が生活史を全うする上でも、水田—水路間の落差の解消や水路内の落差の解消、すなわち移動障害の解消が不可欠である。これらの移動障害の解消は環境保全型農業では解決できない課題といえる。移動障害が未解消のままでは、環境保全型農業だけを推進しても、農村生態系の生物多様性の保全やその生態系サービスの維持は達成できない恐れがある。今後、環境保全型農業を推進する前提として、地域に生息する生物の移動範囲や移動経路の状態を把握し、陸生生物の移動対策や水路の魚道、水田魚道等の導入によって生物の移動経路を確保する必要があると考えられる。カエル類や魚類から評価対象種を広げながら、III 章のような実験もしくは現地調査と、IV 章のような個体群動態シミュレーションに基づき、効果的に移動障害を解消できる手法の開発を進めていくことが重要である。

5.4 今後の課題

本研究での実験や個体群動態シミュレーションにはいくつかの検討課題が残される。それらの課題および課題解決に向けた研究案について、以下の3点を挙げる。

(1) 標準となる移動対策の性能評価手法の確立

II 章で述べたように、現場に設置されている移動対策の多くは性能が評価されていない。今後、性能評価の知見を蓄積する上では、その前提となる望ましい性能評価手法の確立が必要である。ここで、これまでの脱出工の知見のうち、効果に関する情報があつたものを抽出すると (Table 14), 対象種や供試個体数、個体を放す位置、実験時間、評価指

標はそれぞれ異なることが分かる。カエル類は行動の個体差が大きく、ある程度の個体数での試験が必要だと考えられるが、わずか数個体の供試による報告もみられる。また、脱出工の近くに個体を放せば当然脱出しやすい。このように、試験方法によって、同じ脱出工であっても評価結果は大きく変わると推察される。

個々の研究の目的や作業仮説等によって、最適な研究手法が異なるのは当然であろう。しかし、測定方法が未統一のまま性能を評価しても、他との比較ができないために、性能の低い脱出工の導入につながる恐れがある。したがって、評価の前提として、標準となる測定手法の確立が必要である。それには、例えば供試個体や試験方法を少しずつ変えながら水路脱出率等の測定を繰り返し、同程度の測定値が得られる試験条件の範囲を明らかにすることが重要となる。

4.4 節で構築した横断モデルでは、Fig. 19 をもとに脱出工の水路脱出率を横断成功率に換算すれば、これまでの試験報告で示された水路脱出率から個体群存続率の計算が可能である。もしくは横断成功率を実測する場合には、水路の片側の天端に個体を放し、その後、水路を飛び越えて、あるいは水路に転落・脱出して水路を横断した個体の割合を計測すればよい。例えば、渡部ら (2012) では、ビデオ画像解析により横断成功率の計測を試みている。今後、移動対策の試験の際に、水路脱出率とあわせて横断成功率を計測すれば、脱出工と転落防止工間で性能の比較が可能となり、また実測した横断成功率をもとに個体群保全効果を評価できると考えられる。

(2) 多様な試験条件での移動対策の性能評価

コンクリート水路における個体の水路の横断と水路からの脱出について、また移動対策の性能について、現場における多様な水深・流速条件や、水路壁面の材質・凹凸、脱出工の設置場所・密度に着目した知見の蓄積が必要である。このうち水路の凹凸は、壁面の傾斜角とともに登攀への影響が大きいと予想される。水路壁面の凹凸の測定方法の研究は、凹凸すなわち粗度の増大が通水機能の阻害につながるため、機能診断の分野で進んでいる。例えば、レーザー変位計 (中矢ら, 2008) や型取りゲージ (本間ら, 2008) を用いた二次元での計測方法が実用化されている。また、デジタル写真測量を用いて、水路表面の数枚の写真から 2 次元での凹凸の計測も可能である。これらの計測方法を用いながら、カエル類の登攀と壁面の凹凸および傾斜との関連を明らかにすることは、今後の興味深い課題である。

なお、コンクリート水路であっても、磨耗や地衣植物の定着等により壁面の凹凸が増大すれば、カエル類の登攀は容易になると予想される。ほ場整備年代が古い事業実施地区の中には、整備済みにもかかわらずカエル類が多く観察される地域もあることから (渡部, 2008), このようなコンクリート水路では移動対策なしでも本報での結果以上にカエル類が脱出しているかもしれない。しかし、凹凸が小さいであろう施工後間もないコンクリート水路ではカエル類は登攀できないことから、事業自体のインパクト(例えば、

Table 14 既往の知見による脱出工の性能評価方法
Materials and methods to evaluate effectiveness of escape countermeasures

	脱出工のタイプ	対象種 ¹⁾ (体長)	実験方法	実験時間	評価指標	実験条件の記載
森 (2001)	部分タイプ (着脱式スロープ)	トウ (不明)	スロープの下端に個体を放し、脱出までを観察 (50回)	不明	水路脱出率	水深・流速とも不明
坂本・岡 (2006)	部分タイプ (スロープ)	アマ (不明), カエルの模型 (不明)	流水時に、スロープの1~2m上流から、30個体を放し、スロープに到達するまで観察	不明	スロープへの到達率	水深は不明 流速は記載
高橋 (2006)	部分タイプ (スロープ)	アカ (2~5cm)	10個体を水路底に放し、脱出まで観察	不明	水路脱出率	水深は記載 流速は不明
	部分タイプ (ネット)	アカ (2~5cm)	15個体を集水桝に放し、脱出まで観察	不明	水路脱出率	水深・流速とも不明
加島・渡邊 (2006)	全面タイプ	不明 (2~3cm)	不明	不明	脱出個体の有無	水深・流速とも不明
大平ら (2008)	全面タイプ	トノ (3~6.5cm), アマ (1.5cm), スマ (1.5~4cm)	トノ・スマ各10個体, アマ5個体を脱出工の設置区間に放し、放流地点から下流5mの範囲での脱出を観察。	5分間	水路脱出率, スロープへの到達率	水深・流速とも記載
福井県農業試験場 (2009)	部分タイプ (スロープ)	トノ (5~7cm), アカ・ヤマ (2~3cm)	トノ6個体, アカ・ヤマ13個体をスロープの5m上流に放し、スロープの到達まで観察	不明	スロープへの到達率	水深・流速とも記載
池田ら (2009)	全面タイプ	トウ (2~6.5cm), アカ (2.5~6.5cm)	トウ29個体もしくはアカ27~30個体を実験装置に放し、脱出まで観察	30分	実験装置からの脱出率	水深は不明 流速はなし
横山ら (2011)	部分タイプ (スロープ)	トノ・ツチ・スマ (不明)	各1~4個体を水路桝に放し、5時間ビデオ撮影。また翌朝に残存個体を観察。	5時間以上 (夕方~翌朝)	水路脱出率	水深は記載 流速は不明
吹田 (2011)	全面タイプ	トノ・ヤマ (不明)	不明	不明	脱出個体数	水深・流速とも不明
宇賀神 (1993)	部分タイプ (「ハイダセル」 スロープ)	アカ・アマ・ツチ・トウ・シュレ (1.8~5.0cm)	10個体を湿らせた水路内に放し、脱出までの時間を計測。	1時間	水路脱出率	水深はなし 流速はなし

¹⁾ アカ：ニホンアカガエル, アマ：ニホンアマガエル, シュレ：シュレーゲルアオガエル, ツチ：ツチガエル, トウ：トウキョウダルマガエル, トノ：トノサマガエル, スマ：スマガエル。

ほ場整備での表土の剥ぎ取りや現況の土水路の埋め戻しによる個体の死亡, Fig. 2)に追い打ちをかけている恐れがあり, この期間の移動対策が特に重要だと考えられる。

転落防止工の設置場所および密度の検討については, 現場の水路あるいは実験水路において設置場所もしくは設置数を変えながら試験を繰り返すことになるだろう。実験の効率化のために, 実験時における個体の行動の把握にビデオ撮影(横山ら, 2011)やICタグを活用できると考えられる。ICタグは, 魚類の移動の追跡等に関する数例の研究事例(山下ら, 2010; 山本・本田, 2011)があり, カエル類についても活用が可能とされる(福山, 2008)。軽量(0.1g程度)で, 電池が不要なため半永久的に使用可能な製品も実用化されており, ICタグを装着した後は非接触で個体識別が可能である。これらの方法を活用することで, より長時間の実験や観察もできるだろう。そのため, 移動対策の性能の評価とともに, カエル類の行動特性について新たな知見が得られると期待される。

(3) 個体群動態モデルとパラメータ値に関する知見の蓄積

4.4節で構築した横断モデルは, 水田一樹林間の移動を数値モデルで表したものであり, ニホンアカガエル以外の移

動性のカエル類(ヤマアカガエルやヒキガエル類, アオガエル類)に対しても, パラメータ値に関する知見が得られれば適用できる。また, トウキョウダルマガエル等の定住性の種に対しては, 生存・繁殖に関するパラメータ値やコンクリート水路への転落頻度等の知見が得られれば, 4.5節で提案した移動モデルによる個体群動態シミュレーションが可能になる。

横断モデルでは, ニホンアカガエルのメスの親1個体から産まれた個体の生残数は, 親の年齢級によらず一定と仮定した。この仮定を確かめるためには, 親別に生残個体数を明らかにする必要がある。このことについて, DNAマーカーを用いることで, 親(卵塊)別に個体を識別しうる(松島, 2010)。Skeletochronology法では, 切りとった指骨の切片の年輪から, 個体の年齢査定, 更に個体の繁殖開始年齢を推定できる(草野ら, 1995; Marunouchi et al., 2000)。両手法の併用によって, 親別, 更に親の年齢級別に, 子の生残個体数を追跡できると考えられる。また, 水田から樹林に移動する個体の割合(樹林移動率)についても, 年齢級によって異なるかもしれない。このことは, Skeletochronology法および安定同位体比分析を併用することで明らかにでき

る。すなわち、個体の指を切りとり、Skeletochronology法で齢査定を行うとともに、安定同位体比分析によって個体が移動する前の生息場を推定（森ら、2008、2009）すればよいと考えられる。

横断モデルで対象としたニホンアカガエルは、生態に関する知見が比較的多い種であるが、定量的なデータがない生態情報や行動特性については仮定を置きながら個体群動態モデルを構築した。これらの仮定は、上述のように今後のフィールド研究等の作業仮説となるものである。すなわち、個体群動態モデルの研究は、実際のフィールド研究の方向性を検討する上でも役に立つといえる。本報では扱わなかったが、個体群動態モデルの感度分析の結果から、個体群の保全に対してより重要度の高いパラメータが明らかとなれば、重要な順にパラメータ値の定量化を進めるといいう研究方針を立てることもできる（竹村ら、2011a）。更にフィールド研究で新たな調査結果が得られれば、個体群動態モデルおよびパラメータに反映できる。個体群動態モデル研究とフィールド研究を、互いの成果を活用しながら同時並行で推進することが、労力や費用を要する生態系保全手法に科学的根拠を与えていく上で重要である。

謝辞：本研究を取りまとめるにあたり、ご指導、ご鞭撻と暖かい励ましをいただきました東京農工大学 千賀裕太郎名誉教授に心よりお礼申し上げます。宇都宮大学農学部 水谷正一名誉教授、後藤 章教授、茨城大学農学部 小林 久教授、東京農工大学大学院農学研究院 中島正裕准教授、加藤 亮准教授には、研究を取りまとめるにあたり、ご助言と暖かい励ましをいただきました。改めてお礼申し上げます。

農村工学研究所資源循環工学研究領域生態工学担当 森 淳博士、小出水規行博士、同研究所農村基盤研究領域資源評価担当 竹村武士博士、水研センター国際水産資源研究所 西田一也博士には、日頃より研究活動への姿勢についてご指導いただき、本研究を進める際にもご指導、ご助言と多大なるご厚情をいただきました。農村工学研究所農村技術支援チーム 石島正人氏、同研究所山野井京子氏、後藤ポンティップ氏には、研究にご協力いただきました。

岩手県立大学 鈴木正貴准教授、宇都宮大学 守山拓弥博士、長野県佐久地方事務所 松澤真一博士、国土交通省北海道開発局山本康仁氏、宇都宮大学 森 晃氏には、研究をまとめるにあたり、貴重なご意見をいただきました。

ここに記して、深謝の意を表します。

参考文献

Akçakaya, H.R., Burgman, M.A. and Ginzburg, L.R. (1999) : Applied population ecology : principles and computer exercises using RAMAS EcoLab 2.0, *Sinauer Associates*
 青森県農村整備課 (2011) : 青森県農業農村整備環境配慮工事データベース, <http://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/nourin/noson/files/H23.9misawa.pdf> (確認日: 2012/1/24)
 葦名千尋・柳川 久 (2006) : 大雪山国立公園黒石平のエゾアカガエル *Rana pirica* に対する道路横断用スロープの有効性, 「野生

生物と交通」研究発表会講演論文集, 5, 45-48
 東 淳樹・武内和彦 (1999) : 谷津環境におけるカエル類の個体数密度と環境要因の関係, ランドスケープ研究, 62(5), 573-576
 土井敏男 (2001) : ダルマガエルの登はん能力, 両生類誌, 6, 25-27
 土井敏男 (2002) : トノサマガエルとダルマガエルの跳躍力の差はどれくらいか?, 両生類誌, 8, 12-16
 土井敏男 (2009) : 水田に生息するカエル 4 種のコンクリート斜面に対する登はん能力, 爬虫両棲類学会報, 2009(1), 23-28
 Doubledee, R.A., Muller, E.B. and Nisbet, R.M.(2003) : Bullfrogs, disturbance regimes, and the persistence of California Red-Legged Frogs, *The Journal of Wildlife Management*, 67(2), 424-438
 Fujioka, M. and Lane, S.J. (1997) : The impact of changing irrigation practices in rice fields on frog populations of the Kanto Plain, central Japan, *Ecological Research*, 12, 101-108
 吹田全弘 (2011) : 青森県環境保全型水路「ハイ! アガール」の開発, 農業農村工学会誌, 79(7), 538-539
 福井県農業試験場 (2009) : 平成 20 年度 (2008) 水田生態系再生研究事業成績書, 1-25
 福山欣司 (2008) : カエル類におけるマーキング法と個体識別法, 爬虫両棲類学会報, 2008(2), 116-125
 福山欣司・阿部道生・松田久司・佐々木史江 (2007) : 横浜市瀬谷谷戸におけるヤマアカガエルとアズマヒキガエルの長期的なモニタリング調査, 爬虫両棲類学会報, 2007(2), 146-153
 Govindarajulu, P., Altwegg, R. and Anholt, B.R. (2005) : Matrix model investigation of invasive species control: Bullfrogs on Vancouver island, *Ecological Applications*, 15(6), 2161-2170
 Halpern, B.S., Gaines, S.D. and Warner, R.R. (2005) : Habitat size, recruitment, and longevity as factors limiting population size in stage-structured species, *The American Naturalist*, 165(1), 82-94
 長谷川雅美 (2003) : 農業土木技術者のための生き物調査 (その 8), 農業土木学会誌, 71(5), 423-427
 林 光武 (2007) : 水田で産卵する両生類の生態, “水谷正一編, 水田生態工学入門”, 農文協, 57-64
 林 光武・高橋伸拓 (2007) : カエル類の水路への落下対策とその効果, “水谷正一編, 水田生態工学入門”, 農文協, 134-140
 Hels, T. and Nachman, G. (2002) : Simulating viability of a Spadefoot Toad *Pelobates fuscus* metapopulation in a landscape fragmented by a road, *Ecography*, 25(6), 730-744
 Hirai, T. and Matsui, M. (2001) : Food habits of an endangered Japanese frog, *Rana porosa brevipoda*, *Ecological Research*, 16(4), 737-743
 Hirai, T. and Matsui, M. (2002) : Feeding relationships between *Hyla japonica* and *Rana nigromaculata* in rice fields of Japan, *Journal of Herpetology*, 36(4), 662-667
 本多 清 (2011) : 生きもの田んぼの楽しみ方～滋賀県高島市の取り組みから～, シンポジウム小さな自然再生のすすめ part2, 17-21
 本間新哉・北村浩二・加藤 敬 (2008) : 農業用鉄筋コンクリート製開水路壁面の凹凸評価手法, 平成 20 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 202-203
 池田健一・後藤裕一・星 泰彦 (2009) : 脱出用スロープ付水路におけるカエルの水路脱出率 —流速及びスロープの材質・勾配

- との関係一, 東北農業研究, 62, 227-228
- 石塚清一・鈴木保志 (1998): 小動物が脱出できるスロープ付き U 字形側溝の実験, 高知大学演習林報告, 25, 199-208
- Iwai, N., Kagaya, T. and Okochi, I. (2007): Choice of oviposition site by *Rana japonica*: role of the developmental stage of conspecific eggs, *Herpetologica*, 63(1), 31-34
- 門脇正史 (2002): ニホンアカガエルの産卵場所の環境条件 —特に産卵地点間の水温の違いについて, 保全生態学研究, 7(1), 1-8
- 鹿児島県薩摩川内市 (2008): 薩摩川内市農村環境計画, p.96
- 環境省自然環境保全局 (2006): 鳥類, 爬虫類, 両生類及びその他無脊椎動物のレッドリストの見直しについて, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=7849> (確認日: 2012/1/24)
- 環境省自然環境局, 農林水産省農村振興局, 林野庁森林整備部, 国土交通省河川局 (2005): 平成 16 年度社会資本整備事業調整費 (調査の部) トキの野生復帰のための生息環境の整備方策策定調査報告書
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2009): 平成 20 年度重要生態系監視地域モニタリング推進事業 (モニタリングサイト 1000) 里地調査業務報告書, p.52
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2012): 平成 23 年度モニタリングサイト 1000 里地調査報告書, p.59
- 関東農政局農村環境部事業計画課 (2002): 関東農政局における農村の環境保全に係る施策事例集, p.10
- 片桐由希子・大澤啓志・山下英也・石川幹子 (2006): ビオトープタイプの組成とカエル類生息からみた小流域の評価手法に関する研究, ランドスケープ研究, 69(5), 785-788
- 片野準也・大澤啓志・勝野武彦 (2001): ニホンアカガエルの非繁殖期における谷戸空間の利用特性, 農村計画論文集, 3, 127-132
- 加島孝一・渡邊哲也 (2006): 環境保全型水路の開発, 農業土木学会誌, 74(8), 749-750
- 加藤宗英・水谷正一・鈴木正貴・後藤 章 (2005): 小規模魚道の設置諸元を検討するための小型魚類の遊泳能力, 農業土木学会論文集, 235, 59-65
- 川西恵美子・西原正武 (1995): U 字溝における小型動物に配慮した対策工について —小型動物の脱出実験—, 第 8 回環境情報科学論文集, 57-62
- 川嶋一将 (2007): 水路蓋の設置によるカエル類の移動障害の軽減, 農業土木学会誌, 75(6), 44-45
- Kobayashi, M. (1962): Studies on reproductive isolation mechanisms in brown frogs I. Development and inviability of hybrids, *Journal of Science of the Hiroshima University Series B, Division 1, Zoology*, 20, 147-156
- 小出水規行・竹村武士・森 淳・奥島修二 (2009a): 谷津田域におけるドジョウ集団の遺伝構造の解明 —マイクロサテライト DNA を利用した千葉県下田川流域の事例—, 農業農村工学会論文集, 261, 21-29
- 小出水規行・竹村武士・渡部恵司・森 淳 (2009b): ミトコンドリア DNA によるドジョウの遺伝特性 —チトクローム b 遺伝子の塩基配列による系統解析—, 農業農村工学会論文集, 259, 7-16
- 高知県 (2007): 高知県環境白書 2007 (平成 19 年度版), p.24
- 工藤直人 (2011): 実験水路を用いたカエル類の U 字溝水路への転落に関する研究, 平成 20 年度宇都宮大学大学院農学研究科修士論文
- 倉本 満・角田雅美・齊田美佐子 (1971): アカガエル類における胚の温度耐性, 爬虫両棲類学雑誌, 4, 1-4
- 倉品伸子 (1995): スロープ付 U 字溝の有効性の検証 —小動物との共存をめざして, 林業技術, 640, 24-25
- 倉品伸子・阿部 学 (1996): 落ちた小動物が這い出せる道路側溝, 第 31 回林道研究発表論文集, 53-58
- 草野 保・福山欣司・宮下徳子 (1995): 関東地方南西部におけるタゴガエルの体サイズと指骨の骨組織を用いた年齢査定, 爬虫両棲類学雑誌, 16(2), 29-34
- 前田憲男・松井正文 (1999): 改訂版日本カエル図鑑, 文一総合出版
- 前野正博・上野秀治 (2009): カエル類の移動経路確保に配慮した水路工法の検討, 福井県農業試験場研究報告, 46, 43-49, http://info.pref.fukui.jp/nougyou/noushi/data/bulletin/46/46_6.pdf (確認日: 2012/1/24)
- 牧 東史臣・滝口善博・今堀るみ子 (2006): ほ場整備による小動物の生息域分断に対する影響緩和対策について, 第 57 回農業土木学会関東支部大会講演会講演要旨, 20-23
- Marunouchi, J., Kusano, T. and Ueda, H. (2000): Validity of back-calculation methods of body size from phalangeal bones: an assessment using data for *Rana japonica*, *Current Herpetology*, 19(2), 81-89
- Marunouchi J., Kusano T. and Ueda, H. (2002): Fluctuation in abundance and age structure of a breeding population of the Japanese Brown Frog, *Rana japonica Günther* (Amphibia, Anura), *Zoological Science*, 19(3), 343-350
- 榎屋安里・廣田忠雄・長谷川雅美 (2000): カエルの跳躍力とその種間差, 日本動物行動学会第 19 回大会, P1-9
- 松田久司 (2004): 横浜自然観察の森におけるヤマアカガエルの卵塊数 (2002-2004), 爬虫両棲類学会報, 2004(2), 123-127
- 松島野枝 (2010): 両生類の生態, 保全学的研究における遺伝マーカーの適用, 爬虫両棲類学会報, 2010(2), 166-176
- Matsushima, N. and Kawata, M. (2005): The choice of oviposition site and the effects of density and oviposition timing on survivorship in *Rana japonica*, *Ecological Research*, 20(1), 81-86
- 松崎真澄 (2010): 個体群存続性分析を用いたホトケドジョウ, ニホンアカガエルの絶滅リスクの推定と保全策の検討, 平成 21 年度宇都宮大学大学院農学研究科修士論文
- 松澤真一・松崎真澄・水谷正一・吉田大祐 (2008): 生態系保全型圃場整備地域におけるカエル類の生息状況の検証, 平成 20 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 704-705
- Mattoon, A. (2002): Deciphering amphibian declines, In *State of the World 2001: A Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society (State of the World)*, eds. Brown, L. R. et al., W. W. Norton & Co. Inc., US, 63-82
- 緑資源機構 (2006): 平成 17 年度環境報告書
- 緑資源機構 (2007): 平成 18 年度環境報告書
- 見澤康充 (2005): 小型サンショウウオの年齢, “松井正文編, これからの両棲類学”, 裳華房, 52-59

- 三浦郁夫 (2005) : カエルの染色体進化と染色体の分化, “松井正文編, これからの両生類学”, 裳華房, 133-149
- 水谷正一編 (2007) : 農村の生きものを大切にす 水田生態工学入門, 農文協
- 水谷正一・高橋伸拓・林 光武 (2005) : U字溝に設置したフタがニホンアカガエルの生息に及ぼす効果, 農業土木学会論文集, 235, 77-78
- 森 淳 (2001) : カエルをコンクリート水路から脱出させるには～生態系に配慮したほ場整備を目指して～, 農業土木, 623, 30-33
- 森 淳 (2007) : 土水路の生物と食物網, “水谷正一編, 水田生態工学入門”, 農文協, 92-95
- 森 淳・渡部恵司・小出水規行・竹村武士 (2008) : 安定同位体比を用いたニホンアカガエルの移動の推定, 平成 20 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 700-701
- 森 淳・渡部恵司・小出水規行・竹村武士 (2009) : トウキョウダルマガエルの器官別炭素安定同位体比, 農業農村工学会論文集, 261, 93-94
- 守山拓弥・藤咲雅明・水谷正一・後藤 章 (2006) : 新設された魚道における魚類の遡上が上流の農業用小河川の魚類相におよぼす影響, 農業土木学会論文集, 245, 123-124
- 村上 裕・大澤啓志 (2008) : 水稻の栽培型がトノサマガエルとヌマガエルの分布に与える影響, 保全生態学研究, 13, 187-198
- 中茎元一・大島 弘・林 光武 (2003) : カエルの越冬場及び産卵行動に伴う移動方向把握調査について, 平成 15 年度農業土木学会関東支部大会講演要旨集, 21-23
- 中村 寛・水谷正一・後藤 章 (2002) : カエル類の U 字溝への落下と再生産に対するフタの効果, 平成 14 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, 498-499
- 中村義作 (1997) : よくわかる実験計画法, 近代科学出版社
- 中矢哲郎・渡嘉敷 勝・森 充広・森 丈久 (2008) : 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法, 農業農村工学会論文集, 258, 501-506
- 中澤 港 (1998) : シミュレーション人口学: 入門以前, 日本数理生物学会ニュースレター, 26, 50-64
- 夏原由博・神原 恵 (2001) : ニホンアカガエルの大阪府南部における生育適地と連結性の推定, ランドスケープ研究, 64(5), 617-620
- 日本学術会議農学委員会植物保護科学分科会 (2011) : 植物保護科学の展望 —農業生産の向上と生物多様性—
- 西田一也・小出水規行・竹村武士・渡部恵司・森 淳 (2012) : 流域の連続性と分断がホトケドジョウ *Lefua echigonia* の遺伝的構造・多様性に与える影響分析 —ミトコンドリア DNA D-loop の解析—, 農村工学研究所技報, 212, 177-188
- 野上啓行・鈴木保志 (1999) : 側溝内への落下小動物の実態及び脱出用スロープ付き U 字形側溝の実験, 高知大学農学部演習林報告, 26, 13-23
- 農林水産省 (2003) : 土地改良事業における経済効果の測定に必要な諸係数について, 農振第 2624 号
- 農林水産省 (2007) : 農林水産省生物多様性戦略, p.23
- 農林水産省構造改善局計画部資源課 (2000) : 土地改良事業計画設計基準 計画 ほ場整備 (水田) 基準書・技術書, p.147
- 農林水産省農林水産技術会議事務局・農業環境技術研究所・農業生物資源研究所 (2012a) : 農業に有用な生物多様性の指標生物調査・評価マニュアル I 調査法・評価法, 16-19
- 農林水産省農林水産技術会議事務局・農業環境技術研究所・農業生物資源研究所 (2012b) : 農業に有用な生物多様性の指標生物調査・評価マニュアル II 資料, 15-18
- 農と自然の研究所 (2009) : 田んぼの生きもの全種リスト
- 大平 裕・中野芳輔・弓削こずえ・林田 創 (2007) : 農家や地域住民によるエコロジカルコリドーの保全を目的とした小型魚道の開発, 農業土木学会論文集, 247, 93-101
- 大平 裕・弓削こずえ・栗山竜司・安東 茂・阿南光政 (2008) : 水田地域における生態系保全水路の実用可能性の検討, 九州大学大学院農学研究院学芸雑誌, 63(1), 65-69
- 大河内 勇・大川畑 修・倉品伸子 (2001) : 道路側溝での両生類の転落死防止方法, 日本林学会誌, 83(2), 125-129
- 長田 潔 (1978) : 柏地方のニホンアカガエルの衰退について 私のカエル博物誌 (その 2), 千葉生物誌, 27(12), 102-107
- 大澤啓志・片野準也・勝野武彦 (2003) : 広水田域としての散居集落水田の水路におけるトウキョウダルマガエルの生息状況, 農村計画論文集, 5, 7-12
- Osawa, S. and Katsuno, T. (2001) : Dispersal of the Brown Frogs, *Rana japonica* and *R. ornativentris* in the forest of the Tama Hills, *Current Herpetology*, 20(1), 1-10
- 大澤啓志・勝野武彦 (2001) : 丘陵樹林地におけるアカガエル生息空間の林床環境, ランドスケープ研究, 64(5), 611-616
- 大澤啓志・勝野武彦 (2005) : 大分川中流部の農村景観における両生類の分布パターン, ランドスケープ研究, 68(5), 563-566
- 大澤啓志・勝野武彦 (2007) : ニホンアカガエルの生息空間としての棚田畦畔草地, 農村計画学会誌, 26, 221-226
- 大澤啓志・黒田貴綱・勝野武彦 (2006) : 棚田域における管理形態の違いから生じる植生と小動物相 (カエル類, ネズミ類) の関係, ランドスケープ研究, 69(5), 565-570
- 大澤啓志・島田正文・勝野武彦 (2005) : 平地水田地帯の畦畔利用におけるトウキョウダルマガエルの個体数密度を規定する要因, 農村計画学会誌, 24(2), 91-102
- Pellet, J., Maze, G. and Perrin, N. (2006) : The contribution of patch topology and demographic parameters to population viability analysis predictions : the case of the European tree frog, *Population Ecology*, 48(4), 353-361
- Pope, K.L. (2008) : Assessing changes in amphibian population dynamics following experimental manipulations of introduced fish, *Conservation Biology*, 22(6), 1572-1581
- ランデス株式会社 HP : ハイダセル有意性実験, <http://www.landes.co.jp/products/kankyo/haidasel/haidtkjk.htm> (確認日 : 2012/1/24)
- R Development Core Team (2009) : The R project for statistical computing, <http://www.R-project.org/> (accessed: 02/04/2010)
- ロイター (2011) : カエルの移動に配慮, 独サッカー場の周辺道路一部閉鎖へ, ロイター通信 2011 年 11 月 18 日記事, <http://jp.reuters.com/article/oddlyEnoughNews/idJPJAPAN-19628620110219> (確認日 : 2012/3/23)
- 坂本義浩・岡 直子 (2006) : 小動物用脱出スロープの機能向上実

- 験, 農業土木学会誌, 74(3), 235-236
- 佐藤太郎・東 淳樹 (2004) : 扇状地水田におけるカエル類の生息量と畦畔環境との対応関係, ランドスケープ研究, 67(5), 519-522
- 芹沢孝子 (1983) : トノサマガエル—ダルマガエル複合群の繁殖様式 I. 愛知県立田および佐屋における成長と産卵, 爬虫両棲類学雑誌, 10(1), 7-19
- 芹沢孝子 (1985) : トノサマガエル—ダルマガエル複合群の繁殖様式 II. 春先きに水がない場所でのダルマガエルとトノサマガエルの産卵, 爬虫両棲類学雑誌, 11(1), 11-19
- 芹沢孝子・芹沢俊介 (1990) : トノサマガエル—ダルマガエル複合群の繁殖様式 III. トウキョウダルマガエルの性成熟と産卵, 爬虫両棲類学雑誌, 13(3), 70-79
- 芹沢孝子・谷川洋子・芹沢俊介 (1990) : トノサマガエル—ダルマガエル複合群の繁殖様式 IV. 一腹卵数と卵径, 爬虫両棲類学雑誌, 13(3), 80-86
- 下山良平 (1982) : トノサマガエル雄の繁殖期のなわばりについて (予報), 爬虫両棲類学雑誌, 9(3), 99-102
- 下山良平 (1986) : 伊那盆地北部産ダルマガエル雌の成熟と産卵回数, 爬虫両棲類学雑誌, 11(4), 167-172
- 下山良平 (1993) : 長期繁殖するトノサマガエル個体群における雌の繁殖特性について, 爬虫両棲類学雑誌, 15(1), 37-41
- 下山良平 (1996) : ダルマガエルとトノサマガエルの同所的・同時的繁殖について, 爬虫両棲類学雑誌, 16(3), 87-93
- 食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会 (2002) : 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き 第1編「基本的な考え方・水路整備」
- 食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会 (2003) : 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き 第2編「ため池整備 農道整備 移入種」
- 食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会 (2004) : 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の手引き 第3編「ほ場整備 (水田・畑)」
- 食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会 (2006) : 環境との調和に配慮した事業実施のための調査計画・設計の技術指針
- Stephan, T., Ulbrich, K., Grosse, W. and Meyer, F. (2001) : Modeling the extinction of isolated populations of natterjack toad *Bufo calamita*, *Web Ecology*, 2, 47-56
- 杉原知加子・水谷正一 (2006) : 河川と水田間に連結する人工池が魚類の生息に果たす役割 — 栃木県上三川町谷川水系の事例一, 農業土木学会論文集, 244, 49-58
- Sumida, M. and Ogata, M. (1998) : Intraspecific differentiation in the Japanese Brown Frog *Rana japonica* inferred from mitochondrial DNA sequences of the cytochrome b gene, *Zoological Science*, 15(6), 989-1000
- 鈴木圭太・大窪久美子・澤島拓夫 (2002) : 長野県伊那盆地におけるダルマガエルの生息状況とカエル類生息地としての水田の現状, ランドスケープ研究, 65(5), 517-522
- 鈴木正貴・水谷正一・後藤 章 (2001) : 水田水域における淡水魚の双方向移動を保証する小規模魚道の試作と実験, 応用生態工学, 4, 163-177
- 鈴木正貴・水谷正一・後藤 章 (2004) : 小規模魚道による水田, 農業水路および河川の接続が魚類の生息に及ぼす効果の検証, 農業土木学会論文集, 234, 59-69
- 高橋伸拓・水谷正一・後藤 章 (2009) : 設置環境の違いからみた井桁護岸の生息魚類に対する効果, 農業農村工学学会論文集, 262, 17-25
- 高橋信司 (2006) : 排水路からの脱出設備 (マスネット工法) について, 農業農村整備事業成果発表会, http://www.green.go.jp/green/ronbun/pdf/nouyouchi/tokutei_h1804.pdf (確認日: 2012/1/24)
- 高中健一郎・安藤元一・小川 博・土屋公幸・吉行瑞子・天野 卓 (2008) : 常時流水のある側溝による小型哺乳類の落下・死亡, 哺乳類科学, 48(1), 1-9
- 竹村武士・小出水規行・水谷正一・森 淳・渡部恵司 (2010) : 谷津田域の農業水路におけるタモロコ個体の移動のモデル化 — 水域のネットワーク化による魚類個体群の再生を予測するモデルの開発に向けて一, 農業農村工学学会論文集, 269, 55-62
- 竹村武士・水谷正一・小出水規行・森 淳・渡部恵司・西田一也 (2011a) : 水路のネットワーク化による個体群再生過程の予測モデル, 農業農村工学学会論文集, 276, 83-90
- 竹村武士・水谷正一・渡部恵司・小出水規行・森 淳・松森堅治・嶺田拓也 (2011b) : タモロコ個体群の環境収容力の推定 — 千葉県谷津田を流れる水路を対象としたシミュレーション一, 農業農村工学学会論文集, 274, 65-66
- 竹村武士・渡部恵司・水谷正一・小出水規行・森 淳・朴 明洙 (2011c) : 水域のネットワーク化による魚類個体群の再生を予測するモデルの開発に向けた自然増加率パラメータの設定, 農業農村工学学会論文集, 271, 9-16
- 竹村武士・渡部恵司・森 淳・小出水規行・水谷正一 (2009) : 水のをを主材料とする簡易魚道の可能性, 農業農村工学学会論文集, 264, 79-80
- 田中幸一 (2010) : 農業に有用な生物多様性の指標 — 農林水産省プロジェクト研究の概要一, 植物防疫, 64, 600-604
- 田上かほり・水谷正一・松澤真一・後藤 章 (2007) : 生態系保全型圃場整備が魚類, カエル類の生息に及ぼす効果の検証, 平成19年度農業農村工学学会大会講演会講演要旨集, 488-489
- 栃木県農地整備課 HP: 西鬼怒川地区における環境配慮の取り組み, <http://www.pref.tochigi.lg.jp/g07/work/nougyou/nouchi-nouson/documents/1180424027569.pdf> (確認日: 2012/2/1)
- 栃木県農務部 (2004) : 環境との調和に配慮した農業農村整備事業事業実施地区事例集, p.14
- 戸金 大 (2010) : 谷戸田におけるトウキョウダルマガエル *Rana porosa porosa* の生活史特性と個体群存続可能性, *Landscape ecology, Design and Engineering*, 5, 109-126
- 戸金 大・福山欣司・倉本 宣 (2005) : 谷戸田におけるトウキョウダルマガエルの体長組成と成長, 爬虫両棲類学会報, 2005(1), 13-22
- Togane, D., Fukuyama, K. and Kuramoto, N. (2009) : Size and age at sexual maturity of female *Rana porosa porosa* in valley bottoms in Machida city, Tokyo, Japan, *Current Herpetology*, 28(2), 71-77
- 戸金 大・福山欣司・倉本 宣 (2010) : テレメトリー法を用いた

- トウキョウダルマガエルの谷戸田における移動追跡, 爬虫両棲類学会報, 2010(1), 1-10
- 徳島県 HP: 農業農村整備事業の環境配慮 計画・実績 (H18 まで), http://www.pref.tokushima.jp/docs/2002021900060/files/h18_2_shiryou2.pdf (確認日: 2012/2/1)
- 富岡克寛 (1990): 群馬県とその周辺におけるニホンアカガエルとヤマアカガエルのすみわけ, 両生爬虫類研究会誌, 39, 21-28
- 富岡克寛 (2000): 関東平野北部の谷津田におけるアカガエル 2 種の産卵時期と卵塊数の長期動態, 千葉県中央博物館自然誌研究報告特別号, 3, 9-16
- 富岡 誠・菊池 暁・吉田秀樹 (2007): 小動物類の生息に配慮した葦簀 (よしず) 型フリュームを用いた用水路整備, 農業農村工学会誌, 75(11), 1006-1007
- 宇賀神知則 (1993): 谷津田の環境とカエルに関する研究, 平成 4 年度筑波大学卒業研究論文
- 和田 清・桑原真吾・稲川啓太・寺町 茂 (2006): 在来魚類の遊泳能力算定と農業用水路網の避難場所における個体群行動, 河川技術論文集, 12, 371-376
- 鷺谷いづみ (1998): 生態系管理における順応的管理, 保全生態学研究, 3, 145-166
- 渡部恵司 (2008): 圃場整備がカエルの生息に与える影響の評価に向けて, 農村振興, 703, 40-41
- 渡部恵司・森 淳・小出水規行・竹村武士 (2009): ニホンアカガエルの孵化率に対する産卵場の乾燥の影響 一圃場整備水田における産卵場保全手法開発のための基礎的実験一, 農業農村工学会論文集, 265, 63-64
- 渡部恵司・森 淳・小出水規行・竹村武士・西田一也 (2012): 実験水路におけるカエル類の転落行動と脱出行動の予備解析, 平成 24 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 238-239
- Watabe, K., Mori, A., Koizumi, N., Takemura, T. and Nishida, K. (2012): Habitat potential maps of three frog species for paddy field areas of the middle Sakura River basin, Japan, *PAWEES 2012 International Conference on "Challenges of Water & Environmental Management in Monsoon Asia"*, CD-ROM, 027WAT
- 養父志乃夫 (1997): 両生類・は虫類と道路, “亀山 章編, エコロード 生き物にやさしい道づくり”, ソフトサイエンス社, 48-53
- 山本亮介・本田晴朗 (2011): 無線認識技術を用いた小型魚自動検知システムの開発, 電力中央研究所報告, V10024
- 山本康仁・千賀裕太郎 (2010): 繁殖状況からみるトノサマガエルとナゴヤダルマガエルの種間関係, 爬虫両棲類学会報, 2010(1), 46-49
- 山下奉海・河口洋一・谷口義則・鹿野雄一・石間妙子・大石麻美・田中 亘・斉藤 慶・関島恒夫・島谷幸宏 (2010): 佐渡島の小河川における魚類を対象とした農業用取水堰改良効果の検証, 応用生態工学, 13, 61-76
- 野生生物調査協会, Envision 環境保全事務所 (2011): 全国のレッドデータ検索システム, <http://www.jpnrdb.com/index.html> (確認日: 2012/2/1)
- 横山 稔・松本信雄・野村 研 (2011): 水路に落ちたカエルがのぼれる工夫, シンポジウム小さな自然再生のすすめ part2, 13-16
- 吉田正典・養父志乃夫・山田宏之 (2006): ヤマアカガエル (*Rana ornativentris Werner*) の繁殖環境の修復手法に関する研究, 日本緑化工学会誌, 32(1), 183-186
- 吉田正典・養父志乃夫・山田宏之 (2007): 水田におけるカエル類の保全手法に関する研究, 日本緑化工学会誌, 33(1), 284-287
- 吉村友里 (2008): 畦畔におけるカエル類の行動特性の解明, 平成 20 年度岐阜大学大学院農学研究科修士論文
- 吉野秀雄・中 達雄・岩崎和己 (1993): “白石英彦・中道 宏編, 農業水利計画のための数理モデルシミュレーション手法”, 土地改良技術情報センター, 9-47

Restriction of Frog Migration by Constructing Agricultural Concrete Channels and Conservation of Frog Populations

WATABE Keiji*

Renewable Resources Engineering Research Division, Ecological Engineering*

Summary

Recently, eco-friendly facilities have been installed in agricultural channels to improve rural ecosystems. However, it is not always possible to construct channels using natural materials, and, as a consequence, channels are frequently constructed from concrete. Such concrete channels may have adverse ecosystem effects; for example, those that are constructed across the migration routes of frogs would disconnect the links between frog habitats. This report evaluates the migration countermeasures that enable frogs to cross channels, focusing in particular on the Tokyo Daruma Pond Frog, *Rana porosa porosa*, and the Japanese Brown Frog, *Rana japonica*. The report comprises five chapters, with Chapter 1 providing an introduction.

Chapter 2 reviews the migration countermeasures currently implemented in rural areas and the problems associated with these countermeasures. Pond frogs tend to move from one paddy field to another, whereas brown frogs migrate between paddy fields and the neighboring forests. Both types of frog often fall into the concrete channels that bisect their migration routes and are unable to escape. Hence, migration countermeasures, such as the construction of sloped walls that enable frogs to escape from these channels (hereinafter, “escape countermeasure”), and the installation of lid structures that allows frogs to cross channels, have been implemented. However, although various types of sloped wall have been installed, the effectiveness of these walls has not been evaluated.

Chapter 3 describes three experiments that were performed to evaluate the capacity of the sloped walls to enable frog escape. Firstly, the escape effect of partially sloped walls was evaluated based on the proportion of pond frogs that escaped from an experimental channel via a sloped wall (hereinafter, “proportion escaping”). The experiment suggested that walls with slopes of 30 degrees would enable frogs to escape most easily from channels, and that a water depth of 5 cm, and a flow velocity of 20 cm/s or more, would assist frogs in reaching the sloped walls. Secondly, three prototype countermeasures that can be easily implemented in concrete channels were developed. The effectiveness of each countermeasure for the pond and brown frogs was evaluated, and more effective types of structure as escape countermeasures are discussed. Thirdly, the author proposes a relational expression to estimate the proportion of frogs that succeed in crossing a concrete channel (hereinafter, “proportion succeeding”) based on the proportion escaping, and evaluated the proportion succeeding of the prototype and existing countermeasures.

Chapter 4 describes the population dynamics models used to assess brown frog population viability and to evaluate the population conservation effect of the migration countermeasures based on simulations. Three population dynamics models were developed: (1) a “basic model” based on an age-structured model; (2) a “density-dependent model” with the parameter of carrying capacity; and (3) a “crossing model” with the parameters of migration and the proportion succeeding. The simulation results for the crossing model suggest a concrete channel running across a frog migration route would critically endanger the frog population. The simulation results also show that the population conservation effect of the escape countermeasures may be low, although that of lid structures, which completely cover the channel, may be high.

Chapter 5 summarizes the results of this study. The results suggest that concrete channels would critically restrict frog migration and population viability, whereas lid structures would be effective countermeasures for conserving frog populations. The population dynamics models may be useful as prior evaluation tools for selecting the optimum combination of eco-friendly measures to be taken on migration pathways, as well as frog nursery sites and habitats, for the conservation of frog populations. Further research designed to accumulate information on the migration countermeasures and to improve the population dynamics models is also proposed.

Key words : *Agricultural channel, Ecosystem conservation, Rural ecosystem, Amphibian, Population dynamics model*

本報告から転載、複製する場合は、農村工学研究所の許可を得てください。

農村工学研究所報告
第 53 号

平成 26 年 3 月 14 日 印刷

平成 26 年 3 月 14 日 発行

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構

農村工学研究所

〒 305-8609 茨城県つくば市観音台二丁目 1 番 6 号

電話 029 (838) 8169 (情報広報課)

<http://www.naro.affrc.go.jp/nkk/>

印刷：牛久印刷株式会社
