

農業用水路のストックマネジメントにおける 劣化予測に関する研究

北村浩二*

目次

I 緒言	202	V 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測と性能低下	246
1 研究の背景及び目的	202	1 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測と性能低下の関連	246
2 本論文の構成と内容	205	2 スtockマネジメントに対応した農業用水路の劣化予測手法	247
II 道路構造物等の先進的な分野の施設の維持管理の動向	206	3 農業用水路の壁面摩耗による劣化過程と健全度	248
1 道路構造物等の先進的な分野の施設の維持管理と農業水利施設のストックマネジメント	206	4 農業用水路の壁面摩耗による性能低下	249
2 道路構造物等の維持管理の動向	207	5 農業用水路の壁面摩耗の対策	253
3 道路構造物等の維持管理に関する既往の研究	210	6 まとめ	253
4 まとめ	216	VI 西蒲原地区の農業用水路の壁面摩耗による劣化予測	254
III 農業水利施設のストックマネジメントの動向	217	1 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測の必要性	254
1 農業水利施設を取り巻く状況	217	2 調査対象水路および調査方法	256
2 農業水利施設のストックマネジメント導入の必要性と課題	219	3 調査結果	258
3 農業水利施設のストックマネジメントの基本的な考え方	221	4 目視による健全度評価に基づく劣化予測	258
4 農業水利施設のストックマネジメントに関する既往の研究	223	5 算術平均粗さ (Ra) による劣化予測	263
5 経済分析手法としてのライフサイクルコスト計算	224	6 まとめ	266
6 農業水利施設のストックマネジメントへのインフラ会計の導入	228	VII 西蒲原地区の壁面摩耗による劣化予測結果の他地区への適用	268
7 農業水利施設の維持管理の海外事例	234	1 西蒲原地区の壁面摩耗による劣化予測結果の他地区への適用の必要性	268
8 まとめ	238	2 他地区への適用における仮定	269
IV 農業用水路の劣化機構と既往研究	239	3 小場江堰地区への適用	270
1 農業用水路の劣化予測の必要性	239	4 岩手山麓地区への適用	272
2 農業用水路の劣化機構と既往の研究	240	5 猿ヶ石北部地区への適用	273
3 農業用水路の各劣化機構の特徴	245	6 まとめ	275
4 まとめ	246	VIII 結言	275
		Appendix ライフサイクルコストの試算	279
		参考文献	284
		Summary	289

*エジプト水資源灌漑省（国際協力機構派遣専門家）
（農工研在職時の最終所属：農村総合研究部 地域資源保全管理研究チーム）

平成21年3月24日受理

キーワード：農業用水路、ストックマネジメント、劣化予測、単一劣化モデル、マルコフ連鎖モデル、算術平均粗さ (Ra)

I 緒言

1 研究の背景及び目的

農業生産は、適当な気象条件の下、土と水を利用することによって可能となる。自然下における天水農業生産による限界を克服し、農業生産を増大させるために適切な灌漑・排水を実施してきた。灌漑・排水には水の運搬が必要であり、そのために、ダム、頭首工、用排水路等の農業水利施設の整備が積極的に実施されてきた。

わが国においても、農業水利施設は、第2次世界大戦後の食料増産時代から本格的に全国各地で建設が進められてきた。これらは、農業生産に必要な農業用水を適切に供給するために必須の重要な社会資本である。

農業水利施設は、初期建設後は経年によって老朽化し、物理的変状が生じ、施設の有する性能が低下する現象である劣化が進行する。そのため、劣化が進行し施設の有する性能が管理基準以下に低下した場合には、補修や全面更新等の対策が必要となる。

従来は、このような施設の劣化状態の点検手法、その結果に基づく劣化の将来における進行を予測する劣化予測や、補修や全面更新等の対策の実施時期や工法の決定は、技術者の経験と知見によって判断される場合が殆どであり、このような手法は、いわば主観的な判断に基づくものであった。しかし、施設が適切に維持管理され、施設の発揮すべき性能を一定の管理基準以上に維持するためには、より科学的な方法による、施設の劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測手法の開発が必要である。

また、従来は、農業水利施設の新規建設が主体であるとともに、比較的十分な公共事業予算の配分の下で、初期建設後に相当年数が経過した施設については、完全に老朽化し施設が有する性能が発揮できなくなった後に、全面更新するなどのいわゆる事後保全による施設更新が実施されてきたため、科学的な手法による施設の劣化状態の点検とその結果に基づく将来の劣化予測が必要とされる場合が殆どなかった。

しかしながら、戦後の高度経済成長期に積極的に建設された農業水利施設の相当数が、今後順次老朽化する時代を迎えるとともに、平成10年度頃からの公共事業予算の縮減傾向の下で、従来のように施設が完全に老朽化してから全面更新することが予算制約上、困難な状況となってきている。そのため、限られた予算制約の下で、既存施設を有効活用することを目指す、農業水利施設の新たな戦略的な維持管理手法の適用が必要となってきている。

このような農業水利施設の新たな戦略的な維持管理手法は、農業水利施設のストックマネジメントと呼ばれる。農業水利施設のストックマネジメントにおいても、施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の科学的な新たな手法が必要とされるようになってきている。

a 農業水利施設のストックマネジメントの動向

農業水利施設のストックマネジメントには、さまざまな定義があり、その詳細については第三章で述べるが、ここでは、限られた予算制約下で、施設の長寿命化とライフサイクルコスト（建設・維持管理等にかかる全てのコスト）の低減を図るための新たな戦略的な維持管理手法とする。この場合、従来のように施設が老朽化してから事後保全によって全面更新等を実施するのではなく、技術者が施設の現状の劣化状態、並びに、その結果に基づく将来の劣化状態を的確に予測し得る手法の標準化のための技術を開発し、施設が完全に老朽化する前に予防保全によって的確に補修等を実施することを目指すものである。

本研究の背景として、農業水利施設のストックマネジメントがクローズアップされてきた経緯について見る。

まずは、ストックマネジメント導入に関連する食料・農業・農村基本法と、それに基づく食料・農業・農村基本計画における位置付けについて整理する。

平成11年7月に、食料・農業・農村基本法が制定された。この法律は、昭和36年に農業基本法が制定されて以来、38年を経て新たに制定された基本法である。食料・農業・農村基本法の基本理念として、食料の安定供給の確保、多面的機能の発揮、農業の持続的な発展、農村の振興が明記された。農業が有する食料その他の農産物の供給の機能及び多面的機能の重要性にかんがみ、必要な農地、農業用水その他の農業資源の確保に果たす役割として、農業の持続的な発展が基本理念としてあげられた。また、農村が農業の基本的な発展の基盤たる役割を果たしていることにかんがみ、農業の生産条件の整備等により、農村の振興が図られなければならないことも基本理念としてあげられた。この2つの基本理念の実現のためには、農業の生産条件の整備として、必要な農地・農業用水その他の農業資源が将来にわたって持続的に適切に確保されていくことが必要とされた。

その後、平成17年3月に、食料・農業・農村基本法に基づく食料・農業・農村基本計画が制定された。食料・農業・農村基本計画においては、農業の持続的な発展に関する施策の1つとして、農業の持続的な発展のための農業生産の基盤の整備があげられた。農業生産の基盤の整備においては、農地・農業用水は、農業生産にとって最も基礎的な資源であり、良好な営農条件を備えた農地及び農業用水を確保し、これらの有効利用を通じて、国内農業の生産性の向上と食料供給力の確保を図ることとされた。その施策の1つとして、農業水利施設等の適切な更新・保全管理があげられた。農業生産に必要な農業用水を適切に供給するため、基幹から末端まで一貫した用水供給機能・排水条件を確保するとともに、「既存ストックの有効活用の観点から農業水利施設等の長寿命化を図り、これらのライフサイクルコストを低減することを通じ、効率的な更新整備や保全管理を充実する」こと

が明記された。

このように、食料・農業・農村基本法に基づく食料・農業・農村基本計画において、農業水利施設の長寿命化を図りライフサイクルコストの低減を目指す、農業水利施設の新しい戦略的な維持管理手法であるストックマネジメントの必要性が明記された。

次に、このような施設の長寿命化を図りライフサイクルコストの低減を目指す、農業水利施設のストックマネジメントの導入の経緯を、それに関する事業制度を中心として整理する。

わが国の公共事業予算は、平成10年度をピークとして減少傾向にあり、これと時期を同じくして社会資本の既存施設を有効活用しようという機運が公共事業の各種分野で急速に高まってきた。わが国政府の方針としては、平成14年の経済財政諮問会議の経済財政運営と構造改革に関する基本方針に、社会資本の「既存ストックの有効活用」が初めて盛り込まれた。また、農業水利施設に関しては、平成15年に閣議決定された土地改良長期計画にも同様の趣旨が盛り込まれ、前述のように平成17年に策定された食料・農業・農村基本法に基づく食料・農業・農村基本計画にも、「既存施設の有効活用の観点から、施設の長寿命化を図る」ことが記述された。

平成11年度に創設された広域基盤整備計画調査において、農業農村整備事業の制度として初めて農業水利施設のストックマネジメントの考え方が取り入れられた。本調査は、国営土地改良事業が複数実施されるような一定の農業地域において、中長期的な農業水利施設の更新整備構想を取りまとめるものである。この構想に当たって、現況施設の劣化状態を点検調査する機能診断を行うことが初めて盛り込まれた。

平成14年度には、都道府県営事業により造成された土地改良施設の機能診断と対策工事を行う農業水利施設保全対策事業が創設された。平成15年度には、国営事業により造成された施設の機能診断を国が行う国営造成施設保全対策指導事業と、同施設の対策工事を行う国営造成施設保全対策事業が創設された。

このような事業制度を活用して、農業水利施設のストックマネジメントは一部の先進的な地区において試行錯誤的に進められてきた。このような状況から農業水利施設のストックマネジメントを本格的に実施する段階へと移行するために、その基本的な考え方を整理することが必要となった。このような問題意識から、食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会に設置された更新・管理の手引き作成に係る検討部会において、ストックマネジメントの基本的な考え方等の必要な事項が、農業水利施設の機能保全の手引きとして、平成19年3月に取り纏められた。

このように、農業水利施設のストックマネジメントは、平成10年度以降の公共事業予算の縮減傾向によって、限られた予算制約下で、膨大な社会資本を有する農

業水利施設の適時・適切な維持管理・補修等を実施し、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る目的で、関連する事業制度の充実とともに試行的に実施されてきた。

次に、農業水利施設のストックマネジメントに関する基本的な考え方と、その中における、施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の重要性について整理する。

農業水利施設の基本的考え方の詳細については第三章で述べるが、基本的フレームワークは次のように分類できる。①ライフサイクルコスト低減に向けた設計・施工、②点検による施設の劣化状態の把握、③施設の将来における劣化状態の予測、④補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢の検討、⑤複数の選択肢のライフサイクルコストの比較、⑥最適な全体計画の策定。

農業水利施設のストックマネジメントは、事後保全ではなく予防保全によって施設の適切な維持管理を実施する手法である。そのため上述の、②点検による施設の劣化状態の把握に基づいた、③施設の将来の劣化状態の予測を行うことが必要である。精度の高い劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測を行わないことには、その後の、④補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢の検討、⑤複数の選択肢のライフサイクルコストの比較、⑥最適な全体計画の策定が実施できない。

従来は、施設の補修等の各種対策工法と実施時期の検討は、技術者の経験と知見に基づいた主観的もしくは定性的な判断に基づいて行われてきた。また、比較的十分な公共事業予算の配分の下で、複数の対策工法とその実施時期の中から最も安価な選択肢を選定するという手法の必要性も小さかった。しかし、ストックマネジメントにおいては、限られた予算制約下での施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減という目的を達成するためには、科学的もしくは客観性の高い施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測が要求される。また、従来の科学的な施設の劣化状態の点検は、コアの抜き取りによる各種劣化状態の試験（例えば、石井ら、2007）が主であった。しかし、コアの抜き取りには次のような問題がある。すなわち、利用中の施設のコアの抜き取りは困難であり、全面更新または廃棄が決定している施設でしか実施できないこと。コアの抜き取り試験等の方法は、コストが高いため細かく点検しようとする経費が高み、単純に全面更新の方が割安となることがあること。そのため、膨大な社会資本ストックとなっている農業水利施設の劣化状態の点検には、主として目視や簡易な器具を用いた非破壊の精度の高い手法が求められる。しかしながら、現状では、現場の実構造物である農業水利施設を対象とした、このような簡易で精度の高い劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測に関する研究事例は殆ど見当たらない。

農業水利施設にはコンクリート構造物が多い。コンク

リート構造物の劣化に関する研究の詳細については第IV章で述べるが、これまでは主に、各劣化機構ごとに供試体を用いた促進試験機等を用いた室内実験による劣化メカニズムの解明に重点が置かれてきた。ここで、劣化機構とは、施設の物理的な劣化の要因となる事項を言い、劣化メカニズムの解明とは、劣化が進行する仕組みを明確にすることを言う。しかし、このような供試体を用いた室内実験結果と現場の実構造物の現実の劣化進行についての相関性について検討を行った事例がほとんど見られず(石田, 2007)、室内実験結果と実際の劣化進行とが異なっている事例が多いこと(堀口, 1993)が指摘されている。そのため、現場の実構造物を対象とするストックマネジメントにおける施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測を実施するに当たっては、特殊な環境下における供試体を用いた室内実験による劣化メカニズムの解明を待つのではなく、複雑な環境条件下における現場の実構造物に適した、より現実的で実用的な手法の開発が必要である。

現場のコンクリート構造物の施設の劣化予測においては、既に経験的な劣化予測式が存在するコンクリートの中性化や塩害については経験式を用いて予測することが考えられ、これらは力学的メカニズムに基づいた劣化予測と呼ばれる。しかし、摩耗等の経験的な劣化予測式が存在しないその他の劣化機構による劣化は、過去の調査履歴や施設建設当初からの変化の状況、施設管理者からの時系列情報等を基に、点検データに基づく統計的な手法による劣化予測を行うことが現実的かつ実用的である(土木学会, 2008)。

農業水利施設を含むコンクリート構造物の劣化機構としては、凍害、中性化、塩害、化学的侵食、アルカリ骨材反応等があげられる(土木学会, 2008)。農業水利施設の劣化機構としては、これら以外にも、水路の壁面の摩耗、継目の劣化、ひび割れ等が考えられる(農業農村工学会, 2008)。なお、水路の継目は目地と呼ばれることもあるが、土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書・技術書(農林水産省農村振興局, 2001)には「継目」と表記されていることから、本論文においては、継目に用語を統一することとする。コンクリート構造物としての農業水利施設の劣化予測の精度向上には、これらの劣化機構毎の点検データの蓄積と、その点検データに基づく劣化機構毎の施設の劣化予測が必要である(例えば、土木学会, 2008)。

しかし、農業水利施設のストックマネジメントにおける施設の点検は、平成19年度から、全ての国営造成施設の点検を土地改良調査管理事務所が5年間で実施することとなるとともに、県営造成施設の点検を都道府県が主体となって実施するようになった端緒の段階である。このため、施設の劣化機構毎の点検データが蓄積されている途上にあるところであるとともに、現場における点検データの収集手法についても試行的に実施されている

段階に留まっている。そして、これらの点検データを活用して劣化機構毎の施設の劣化予測を行うまでには至っていない。

以上のように、農業水利施設のストックマネジメントは本格的な実施の端緒の段階であり、特にその中でも施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測については、点検データの収集とともに、劣化機構毎の劣化予測の実施に関する技術的課題が多く、これらを解決するための研究を進めることが肝要となっている。

また、施設の点検とその結果に基づく劣化予測に関する手順は、次のように整理できる。そもそも現状では施設の劣化予測に利用可能な点検データが殆ど存在していないため、まずは、①施設の点検データを限定的でも収集する。②その点検データに基づき、暫定的でも劣化予測手法を開発する。さらに、③時系列データを含む点検データを逐次蓄積していく。そして、④開発した劣化予測手法の精度向上を図る。また、この③と④のサイクルを繰り返すことによって、逐次、劣化予測手法の更なる精度向上を図っていくこととなる。しかし、現状では、施設の劣化予測に利用可能な点検データが殆ど存在していないため、まずは、上記の、①施設の点検データの収集手法と、②その収集した点検データに基づく劣化予測手法の開発が必要である。また、これらの手法は、農業水利施設の大半の維持管理を任されている土地改良区の技術職員、あるいは土地改良区が外注可能な一般的な技術者等が利用可能な簡易な手法の開発が望まれる。

さらに、農業水利施設のストックマネジメントを本格的に実施していくためには、施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の研究を推進するだけでなく、ストックマネジメントのその他の課題についても検討することが肝要である。具体的には、経済分析手法としてのライフサイクルコストの考え方についての整理、施設の劣化状態や性能の維持向上に必要な維持管理・補修等の費用を会計手法によって金銭的に把握するインフラ会計の導入の課題等があげられる。

ストックマネジメントにおいては、補修等の実施時期と工法の複数の選択肢の中から最もライフサイクルコストの小さい手法を選択し、限られた公共事業予算の下で施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図ることとしている。しかし、これらの複数の選択肢のライフサイクルコストの比較は、ある種の投資プロジェクトの経済分析に相当し、このような経済分析には費用のみではなく便益をも考慮した費用便益分析を行う場合が多い。そのため、費用のみを対象としたライフサイクルコストの計算を実施する際の、投資プロジェクトの経済分析手法としての留意点について整理することが必要である。

農業水利施設等の社会資本の経年による劣化状態の推移や必要な維持補修費等を定量的に把握する方法として、農業水利施設のストックマネジメントよりも研究や

現場への適用が先行している道路構造物等の先進的な分野では、企業会計手法を用いて施設の劣化状態の推移を金銭的に把握するインフラ会計の導入に向けた検討が実施されている（例えば、江尻，2006）。農業水利施設においても、このインフラ会計の導入に向けた検討を行うとともに、その際の課題について検討することが必要である。

b 研究の目的

農業水利施設のストックマネジメントは本格的な実施の端緒の段階であり、特に、施設の簡易でかつ精度の高い劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測については、これまで殆ど実施されて来なかった上に、未だ開発途上の技術的な課題が多い。

一方、農業水利施設よりも研究や現場への適用が先行している道路構造物等の先進的な分野では、農業水利施設のストックマネジメントと同様の、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を目指す新たな戦略的な維持管理手法をアセットマネジメントと呼び、施設の劣化予測に関する研究も積極的に推進されてきている。これらの道路構造物等の維持管理の動向と、劣化予測を中心とした既往の研究については第II章で述べる。

これまでに造成された農業水利施設は、平成14年3月現在で約25兆円に及んでおり、その種類はダム、水路、用排水機場など多岐にわたっているが、その中でも農業用排水路は末端まで含めると約40万kmもの延長を有している。そのため、農業水利施設の中でも、特に大規模で、かつ、長大な延長を有する農業用水路として典型的な鉄筋コンクリート製開水路の適切なストックマネジメント、特にその中でも施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の研究が肝要である。また、長大な延長を有する農業用水路の劣化状態の点検においては、経済性及び効率性の観点から、高度な機械等を利用することなく、目視もしくは簡易な器具による非破壊の精度の高い点検手法の開発が求められる。

農業用水路等の農業水利施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の研究の重要性は、I.1.aにおいて述べたとおりであるが、各種農業水利施設の各種劣化機構毎の劣化予測についてそれぞれに研究を進めることが重要である。その中で農業用水路としての鉄筋コンクリート製開水路の各種劣化機構とその既往研究については第IV章で述べるが、農業用水路の劣化機構として顕著で、かつ、それによって水路の総合的な劣化状態を表現できるものに水路壁面の摩耗がある。そのため、本研究では、農業用水路の壁面の摩耗による劣化状態の簡易な点検手法と、その点検結果に基づく劣化予測手法を中心に研究を進めることとする。

特に、現状では劣化予測に利用可能な点検データが殆ど存在しないため、I.1.aで示した施設の点検とその結果に基づく劣化予測に関する手順の中における、①施設の点検データの収集手法と、②その収集した点検データ

に基づく劣化予測手法の開発を研究の目的とする。また、これらの手法は、農業水利施設の大半の維持管理を任されている土地改良区の職員等が利用可能な簡易な手法の開発を想定している。

また、農業水利施設のストックマネジメントの適切な実施のために必要なその他の課題として、ライフサイクルコストを経済分析手法として用いる際の留意点と、農業水利施設へのインフラ会計の導入に関する課題について検討する。

2 本論文の構成と内容

本論文では、本章において研究の背景と目的を述べた後、以下の項目から構成される。

- II 道路構造物等の先進的な分野の施設の維持管理の動向
- III 農業水利施設のストックマネジメントの動向
- IV 農業用水路の劣化機構と既往研究
- V 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測と性能低下
- VI 西蒲原地区の農業用水路の壁面摩耗による劣化予測
- VII 西蒲原地区の壁面摩耗による劣化予測結果の他地区への適用
- VIII 結言

以下に、各章の概要を述べる。

第II章では、農業水利施設のストックマネジメントよりも、研究や現場への適用が先行している道路構造物等の先進的な分野における、同様な新たな戦略的な維持管理手法であるアセットマネジメントのこれまでの取り組み状況についてまとめ、本研究を含めた農業水利施設のストックマネジメントの研究の方向性などについて示す。

第III章では、農業水利施設のストックマネジメントのこれまでの取り組み状況についてまとめ、本研究の位置づけなどについて述べる。また、施設の劣化状態の点検と劣化予測以外のストックマネジメントの課題として、ライフサイクルコストを経済分析手法として用いる際の留意点と、農業水利施設へのインフラ会計の導入に関する課題について整理する。さらに、農業水利施設の維持管理に関する海外事例についても整理する。

第IV章では、典型的な農業水利施設として、農業用水路である鉄筋コンクリート製開水路の、コンクリート構造物としての各種劣化機構について整理するとともに、これらに関する研究面からのこれまでの取り組み状況についてまとめ、本研究で対象とする水路壁面の摩耗の位置づけなどについて述べる。

第V章では、農業用水路の壁面摩耗による外観の変状に基づく劣化予測の基本的な考え方と、壁面摩耗による外観変状の進行と農業用水路の有する性能の低下の関係や、低下した性能を回復させるために必要な補修等の対策の関係について述べる。

第VI章では、農業用水路の壁面摩耗による劣化状態

の点検とその結果に基づく劣化予測の具体的な事例として、北陸地域の新潟県西蒲原地区の農業用水路を取り上げ、初期建設時からの供用年数の異なる水路を用いて、壁面摩耗による劣化状態に関する簡易な点検手法と、その点検データを基にした劣化予測手法を提案する。

第七章では、第六章で提案した、西蒲原地区の農業用水路の壁面摩耗による劣化予測結果の普遍性を検証するため、関東地域の茨城県小場江堰地区、東北地域の岩手県岩手山麓地区及び猿ヶ石北部地区の、水路の点検データを用いて、西蒲原地区の水路の点検データに基づく劣化予測結果との比較検討を行う。

第八章では、上記研究結果を取り纏め、本研究の意義、本研究から見出せる今後の留意点などについて総括的に述べる。

本論文をとりまとめるに当たりまして、東京大学大学院農学生命科学研究科教授 田中忠次博士には、本論文の構成から内容に至るまで、懇切、丁寧な御指導、御助言並びに励ましの言葉を賜りました。ここに熱く謝意を表します。また同研究科教授 宮崎毅博士、同教授 塩沢昌博士、同教授 大政謙次博士、同客員准教授 山岡和純博士には、御指導、御助言を賜りましたことに深く感謝する次第です。

本論文は、農村工学研究所に勤務した時に時宣を得て取り組み始めることが出来たもので、研究課題を進める上で多くの方々の御指導、御助言を頂戴しました。農村工学研究所農村総合研究部長 高橋順二博士には、日頃の多忙な研究業務にもかかわらず、本研究の機会と適切な御指導、励ましをいただきました。同農村環境部長 今泉眞之博士には、本論文の研究当初から適切な御指導、励ましをいただきました。農村総合研究部上席研究員 加藤敬博士には、適切な御指導、励ましをいただきました。農村総合研究部地域資源保全管理研究チーム長 本間新哉博士には、御助言をいただくとともに、研究チームとしての日頃の研究業務の遂行に当たり、多大なご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究の遂行に当たっては、農業用水路の現地調査データが必要不可欠でした。これらの現地調査の実施に当たり、西蒲原土地改良区、小場江堰土地改良区、猿ヶ石北部土地改良区、東北農政局北上土地改良調査管理事務所の皆様の御理解と御協力にお礼申し上げます。

最後に、東京大学大学院農学生命科学研究科水環境工学研究室の諸氏には、論文発表などに際し、種々御支援、御協力をいただきました。その他、本論文取りまとめに当たり御指導いただいたすべての方々のお名前を記すことが出来ないことをお詫しいただき、ここに、改めて記して深謝の意を表する次第です。

なお、本論文は、東京大学審査学位論文であることを付記する。

II 道路構造物等の先進的な分野の施設の維持管理の動向

1 道路構造物等の先進的な分野の施設の維持管理と農業水利施設のストックマネジメント

農業水利施設へのストックマネジメントの導入に先立って、道路構造物等の分野において、これと同様の戦略的な維持管理手法を意味するアセットマネジメントの導入が先行している。そのため、本章においては、道路構造物等の先進的な分野の施設の戦略的な維持管理手法であるアセットマネジメントの動向と、それらに関する施設の劣化予測を中心とした既往研究について整理し、農業水利施設のストックマネジメントに関する研究の方向性などについて示す。

従来は、農業水利施設に限らず、道路構造物等のその他の社会資本においても、施設が老朽化し問題が生じてから、補修や全面更新等を実施する維持管理手法が主流であった。しかし、老朽化する施設数の増大や公共事業予算の削減等の影響により、このような事後保全ではなく予防保全によって適時・適切な維持補修等を実施することによって、施設の長寿命化とライフサイクルコスト LCC (life-cycle cost) の低減を図る新しい戦略的な維持管理手法が採用されるようになってきている。ここで、事後保全とは、当該施設に求められる性能が、施設の劣化等により、これ以上の性能低下を許容することが出来ない管理水準以下に低下した後に、補修や全面更新等の性能を回復させる対策工法を実施することとし、予防保全とは、当該施設に求められる性能がこれ以上の性能低下を許容することが出来ない管理水準以下に低下する前に補修等の性能を回復させる対策工法を実施することとする。このような予防保全による新しい戦略的な維持管理手法は、農業水利施設ではストックマネジメントと呼ばれるが、道路構造物等のその他の社会資本においてはアセットマネジメントと呼ばれる場合が多い。

アセットマネジメントは、従来、金融工学の分野で用いられてきた用語で、預金、株式、債権などの個人の金融資産をリスク、収益性などを勘案して、適切に資産運用することにより、その資産価値を最大化するための諸活動を指す。しかし、近年、この考え方を社会資本に適用することが国際的にも注目されている(土木学会, 2005)。しかし、道路構造物等の社会資本のアセットマネジメントに関する明確な定義はない。また、アセットマネジメントとストックマネジメントの用語の定義の相違も明確ではない。

このような社会資本の予防保全による適切な施設の維持管理を行う新しい戦略的な手法は、農業水利施設よりも道路構造物等で先行しており、特に、米国において先行している。これは、道路構造物等の方が、農業水利施設よりも膨大に造成された時期が早く、膨大な施設が早期に老朽化し問題が発生し、それに対する対応が迫られ

たからである。米国では、道路の橋梁等のコンクリート構造物の建設が、わが国よりも先行して実施されてきた。そのため、初期建設後の長期に渡る供用のため、1973年のウエストサイド・フリーウェイのコンクリート落下事故や1980年のブルックリン橋の吊材落下事故および荒廃し交通止めせざるを得なかった高架橋などの事故が生じた。そのため、橋梁の維持管理の重要性を早期から認識し、社会資本のアセットマネジメントの先進国となっている（北村ら、2007a）。

また、わが国においても、道路構造物等の分野においてアセットマネジメントの導入が、農業水利施設のストックマネジメントに先行している。

II.2においては、道路構造物等のアセットマネジメントの動向について整理する。まず、わが国よりも先行している米国の動向について整理する。そして、わが国の国土交通省における道路構造物のアセットマネジメントの動向や、地方公共団体の中で先進的に道路橋梁のアセットマネジメントを実施している青森県の動向について整理する。また、道路構造物等におけるアセットマネジメントの定義が明確になっていないことから、各種の定義について整理する。

II.3においては、道路構造物等のアセットマネジメントにおける既往の研究において、特に、本研究と関連の深い、施設の劣化予測を中心とした主な研究成果について整理する。

2 道路構造物等の維持管理の動向

道路構造物等の維持管理の動向として、まず、アセットマネジメントの導入が先行している米国の動向について整理する。そして、わが国の道路構造物等のアセットマネジメントの動向について整理する。

米国では、1930年代にニューディール政策により多くのインフラが整備された。1960年代後半から公共施設の破損や老朽化による事故が生じた。1967年にウエスト・ヴァージニア州とオハイオ州を連絡するシルバー橋の崩落、1983年にはコネチカット州のインタステートハイウェイの一部であるマイアナス橋の崩落、1980年代には全米各地で橋梁や舗装が劣悪な状態に陥り、大量に整備された道路構造物の老朽化に対応できず、「荒廃するアメリカ」と呼ばれる状況にあった。社会資本の危機について国民の認識が深まってきたが、社会資本に対するマネジメントの欠如と維持管理の長期的な重要性に関する認識不足によって、十分な維持管理予算の投入がなされなかった（池田、2007）。

このため、米国政府は悪化した財政状況の中、1982年に「交通支援法」を制定し、ガソリン税率引き上げによる予算確保により重点的にインフラ維持予算を投入した。また、1991年に成立した「陸上交通効率化法」及び1998年に成立した「21世紀に向けた交通最適化法」により、道路投資額の拡充を行い、維持補修に力を入れ

た結果、現在は欠陥橋梁が減少している。しかし、2004年時点で未だ約27%近い欠陥橋梁が存在し、一度荒廃させたインフラを更新あるいは維持補修して安全に交通を確保することは時間的にも予算的にも容易ではないことが明らかになっており、維持管理の重要性が強く認識されている（池田、2007）。

近年では、連邦高速道路庁 FHWA（Federal Highway Administration）内に、1998年にアセットマネジメント・オフィスを設置して以来、道路の橋梁や舗装のアセットマネジメントを積極的に推進してきている。

次に、わが国における道路構造物等のアセットマネジメントの動向について整理する。

道路、空港、港湾、下水道といった社会資本は、我々の日常生活や生産活動の基盤として、極めて大きな役割を果たしている。内閣府の推計によると、わが国の社会資本は、平成10年度の時点で、総額約630兆円にも上るストックが蓄積されている（内閣府、2002）。しかし、高度経済成長期に集中的に整備された社会資本ストックは、今後数十年の間に、集中的に更新の時期を迎えることになる。また、適切な維持管理を欠いた場合には、老朽化した社会資本が本来の機能を保てなくなるおそれや、その崩壊等による事故の発生などが懸念される（小澤、2007）。

一方、わが国は、近年の厳しい財政状況から、公共事業予算の削減が継続して行われており、本格的な少子高齢化、人口減少時代を迎えて、長期的な投資余力の減少も見込まれる。こうしたことから、近い将来、社会資本ストックの維持管理・更新に要する費用の増大が、社会資本の新設投資を大きく制約し、このまま推移すれば、新設投資が不可能になるとの推計もなされている（国土交通省、2006）。

社会資本整備審議会・交通政策審議会計画部会基本問題小委員会における平成20年度を始期とする社会資本整備重点計画の策定に向けた検討においても、上記のような状況認識の下に、「維持管理・更新投資が拡大していくと見込まれる中で、適切な維持管理・更新と新たなニーズに対応した新規投資は、どのようなバランスで行っていくべきか」（国土交通省、2005）が、今後の社会資本整備のあり方をめぐる検討テーマの1つとなった（小澤、2007）。

こうしたことから、近年、社会資本の適切な維持管理のあり方にも関心が高まり、中でも、社会資本のアセットマネジメントという考え方が注目されている（小澤、2007）。

わが国の社会資本ストックの中でも最大の比重を占め（内閣府、2002）、アセットマネジメントの導入も比較的進んでいる道路構造物等について、ストックや維持管理の現状を整理する。

道路構造物等の維持管理は、これまで、構造物の劣化がある程度激しくなってから大規模な補修や更新を行

う、対症療法的あるいは事後保全的な方法で行われるのが普通であった。しかし、そうした従来型の維持管理方法では、高度経済成長期に大量に蓄積されたストックが、近い将来集中的に更新時期を迎える際に、一時期に巨額の費用が必要となり、対応が極めて困難になる。また、一般に、個々の構造物は、小規模でも適切な補修をこまめに行うことにより、その性能を長期に維持させるとともに、ライフサイクルコストの低減を図ることが可能である(阿部, 2006)。そこで、最近では、構造物の劣化が比較的小さな時点で、小規模な補修を繰り返し行う、予防保全的な維持管理を実施して、構造物を長寿命化させ、ライフサイクルコストの低減を図り、あわせて毎年度の維持更新費用の平準化を目指そうとする動きが、国や一部の地方公共団体に現れてきた。このような動きは、社会資本のアセットマネジメントと呼ばれる(小澤, 2007)。

国や一部の地方公共団体では、道路構造物、特に橋梁を対象にアセットマネジメントの取組みが始まっている。国レベルでの国土交通省の取組みの他に、都道府県では、北海道、青森県、東京都、静岡県、大阪府、三重県等、政令指定都市では横浜市等で開始されている。中でも、青森県の橋梁アセットマネジメントの取組みは、特に先進的なものとして注目を集めている(小澤, 2007)。

国土交通省は、平成17年度から各地方整備局等において、橋梁マネジメントシステムを試行運用している。予防保全による長寿命化を行った場合、大きなコスト低減効果が期待できるとの試算も行われている(小澤, 2007)。

青森県では、平成18年3月に「青森県橋梁アセットマネジメントアクションプラン」を策定し、橋梁アセットマネジメントを本格的に開始した(小澤, 2007)。

そこで、以下では、国土交通省の取組み状況とともに、青森県の取組み状況を整理する。

平成14年6月に国土交通省に設置された「道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会」は、翌15年4月に「道路構造物の今後の管理・更新のあり方 提言」を公表した(国土交通省, 2003a)。提言は、これまで道路の新設に力点が置かれ、道路管理については、将来を見通した長期的な観点からの予算配分が行われてきたとは言い難いとの反省から、アセットマネジメントの考え方を導入した総合的なマネジメントシステムの構築が必要であるとした。提言の中では、アセットマネジメントは、「道路を資産としてとらえ、道路構造物の状態を客観的に把握・評価し、中長期的な資産の状態を予測するとともに、予算的制約の中でいつどのような対策をどこに行うのが最適であるかを考慮して、道路構造物を計画的かつ効率的に管理すること」と定義している(国土交通省, 2003a)。

また、国土交通省が平成15年3月に策定した「公共

事業コスト構造改革プログラム」(国土交通省, 2003b)や、同年10月に閣議決定された「社会資本整備重点計画」(国土交通省, 2003c)の中にも、アセットマネジメント手法の導入を図る旨の記述が盛り込まれた。

国土交通省では、上記提言を受けて、平成15年度にアセットマネジメントの基礎となる点検データベースを構築し、橋梁マネジメントシステムBMS(Bridge Management System)を導入した(原田, 2006)。

国土交通省道路局では、北海道開発局を除く全国8つの地方整備局が管理している直轄国道に架かる15,880本の橋梁を対象に、アセットマネジメントによるライフサイクルコストの低減効果について試算を行った(国土交通省, 2003d)。橋梁の平均寿命を60年に設定し、従来通りの事後保全により建設してから60年後に架け替えるとした場合と、小規模な補修を繰り返し行う予防保全的手法によって、橋梁の平均寿命を90年に長寿命化した場合について、60年間に要する補修費と架替費を試算した。その結果、事後保全では、補修費約1.1兆円、架替費約7.5兆円でトータルコストとして約8.6兆円を要するが、予防保全による長寿命化を図った場合には、補修費は約1.7兆円に膨らむものの、架替費は約3.8兆円に抑えられ、トータルコストは約5.5兆円となることが判明した。トータルコストを比較すると、予防保全の方が、60年間で差し引き約3.1兆円ものコスト低減効果があることになる。

平成17年度から、各地方整備局では、BMSを試行運用し、個別橋梁の補修計画の立案、予算関係資料作成に使用している(原田, 2006)。BMSは、道路管理データベースシステムのデータ、定期点検データ、補修履歴データを基にデータベース化を図り、確認された損傷の評価、劣化予測を踏まえたライフサイクルコストが有利となる補修時期の提案、補修工法や工費を提案する補修計画などを、一元化されたデータから導き出すシステムとして作成されている。

青森県内の橋梁は、高度経済成長後期の1970年代から1980年代にかけて建設されたものが集中している。青森県の置かれた地理・気候条件により、橋梁には、日本海側の沿岸部を中心に、塩害による損傷が多く見られるほか、凍害も多く発生している(小澤, 2007)。

青森県では、30代の若手職員の発案がきっかけとなって、橋梁アセットマネジメントの取組みが開始された(山本, 2006)。道路課内に設置された若手中心の「アセットマネジメント推進チーム」が中核を担い、平成16年度には、有識者からなるシステム開発のための外部委員会も組織され、橋梁アセットマネジメント支援システム(AMSS)の開発に当たった。AMSSの開発には、平成16, 17年度の2年間で、合計1億2千万円の予算が計上された(青森県, 2005a)。

平成16年11月に、青森県は、「青森県橋梁アセットマネジメント基本計画」を策定・公表し、これに従って、

青森県独自の「維持管理・点検マニュアル」を用いて平成17年7月までに、橋長15m以上の全橋梁について点検を行った（青森県, 2005b）。この点検データに基づき、AMSSを用いて50年間の投資シミュレーションを実施したところ、50年間で、橋梁を全て更新するとした場合に要する費用約2,000億円と比べると、ライフサイクルコストは、最大で約1,200億円低減可能との結論が得られた（青森県, 2005c）。

平成18年3月には、「青森県橋梁アセットマネジメントアクションプラン」（青森県, 2006）を策定し、橋梁アセットマネジメントの本格的導入を図っている。アクションプランによると、アセットマネジメントの対象は、青森県管理の橋長15m以上の747橋である。橋長15m未満の橋梁1,569橋については、平成18年度に簡易橋梁データベースを構築し、年に1回実施する日常点検において、安全性の確保を図ることを基本に対応している。

これらの道路構造物等の先進的な分野における新しい戦略的な維持管理手法であるアセットマネジメントの動向については、次のようにまとめることができる。道路構造物等の先進的な分野においては、農業水利施設よりも施設が大量に建設された時期が早く、そのため、老朽化し問題となる時期も早く到来した。また、公共事業予算の削減傾向の中、限られた予算制約下で、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るアセットマネジメントの導入が先行してきた。適切なアセットマネジメントの導入によって、欠陥橋梁の減少や維持補修費の削減等の目標を達成している。そのためには、計画的かつ効率的な中長期的な維持管理計画の策定が重要な役割を果たしている。

道路構造物等のアセットマネジメントの定義については、米国のFHWA、土木学会（2005）、小澤（2007）などがある。

米国のFHWAは、アセットマネジメントを次のように定義している（U.S. Department of Transportation, 1999）。「アセットマネジメントは、コスト効率よく、物理的資産を維持し、機能を向上し、運用する体系化されたプロセスである。それは、工学的な考え方を、しっかりした実務のやり方や経済的な理論を組み合わせ、そして、意志決定に向けた組織的、理論的なアプローチを容易にするツールを提供する。このようにして、アセットマネジメントは、短期計画、長期計画の両方を取り扱うフレームワークを提供する。」

土木学会は、建設マネジメント委員会アセットマネジメント研究小委員会を設置し、わが国における社会資本のアセットマネジメントの意義と導入のための考え方を示した実用書として、「アセットマネジメント導入への挑戦」（土木学会, 2005）を取りまとめている。その中で、アセットマネジメントを次のように定義している。「国民の共有財産である社会資本を、国民の利益向上のために、長期的視点に立って、効率的、効果的に管理・運営

する体系化された実践活動。工学、経済学、経営学などの分野における知見を総合的に用いながら、継続して（ねばりよく）行うものである。」

小澤（2007）は、道路構造物のアセットマネジメントとは、従来の事後保全的な維持管理に代えて、構造物の劣化が小さな時点で、小規模な補修を行う予防保全的な維持管理を実施することで、構造物を長寿命化させ、ライフサイクルコストの低減を図ろうとするものと定義している。また、以下のように、社会資本のアセットマネジメントシステムの流れを詳細に説明している（Fig.1）。

まず、「設計・施工」の段階では、構造物の初期条件や状態が決定され、その後の維持管理への影響も大きい。この段階から長寿命化や維持管理の軽減を目指した設計を行い、必要に応じて設計基準の見直しを検討する。施工時には、構造物の初期状態を記録・保存し、その後の健全度評価や劣化予測のための基礎データとして活用する。

「点検」の段階では、構造物の状況把握に止まらず、その後の健全度評価等に必要なデータの収集を行い、その結果を可能な限り定量的かつ客観的に記録する。

「健全度評価」では、点検の結果得られたデータを、一貫性のある指標を用いて客観的な評価を行う。ここで、健全度とは、施設の劣化状態を複数のグレードで示したものを言う。この健全度を用いることによって、点検実施時の施設の劣化状態を評価する。

「劣化予測」では、理論的予測、データに基づく解析やそれらを組み合わせた予測などを行う。理論的予測では、既往の研究事例から予測方法を定めることにより、また、データに基づく解析では、既存の点検結果や補修等の履歴データを収集・分析することにより劣化予測を行う。

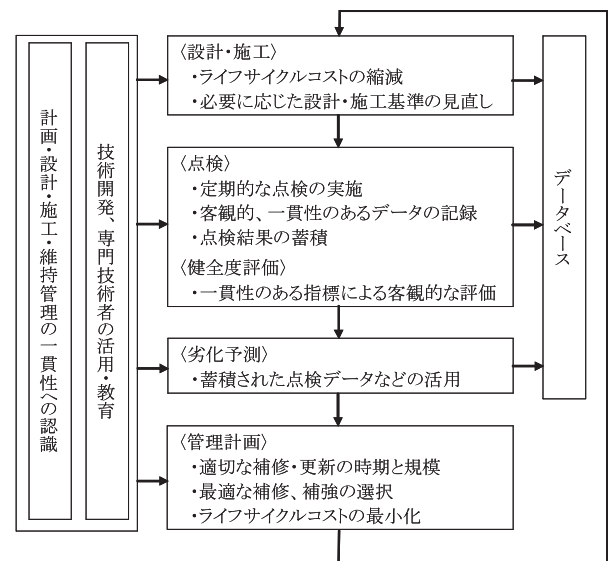


Fig.1 アセットマネジメントシステムのイメージ
出典：小澤（2007）

Image of Asset Management System

「管理計画」の段階では、まず、補修工法ごとに補修工費の単価を設定し、次に、劣化予測に基づき、個々の構造物について、ライフサイクルコストが最小化される最適な補修シナリオを決定する。これにより、その構造物に対して行うべき補修の時期と費用、シナリオ通りに補修を行った場合に予想されるその後の健全度の推移が明らかになる。次に、それらを集計することで、構造物全体のライフサイクルコストを最小化するために、毎年必要とされる補修費用の総額などが明らかとなる。

こうして算出された補修費用には、年ごとの大小の凹凸が存在するため、想定される予算制約の枠内で年々の支出ができるだけ平準化されるように、個々の構造物の補修シナリオに修正を加え、全体の管理計画とする。

管理計画に従った点検や補修を実施する中で、構造物の健全度の推移を確認し、管理計画の内容を検証し、必要があれば管理計画自体を修正する。また、管理の過程で得られた知見を、施設の長寿命化や維持管理費の軽減を目指した設計・施工に活用することも可能である。

このように、道路構造物等のアセットマネジメントは、農業水利施設よりも先行しているが、アセットマネジメントの用語の定義そのものにはさまざまなものがあり、確立されたものはない。しかし、アセットマネジメントの考え方には、ある程度の一定の方向性を見出すことができる。それは、膨大な施設の老朽化が到来する時期を迎え、その一方で、施設の維持管理に必要な公共事業予算の削減の影響を受け、予防保全によって適時・適切な維持補修を実施することによって、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を目指すものである。そのために、従来の工学的視点に加えて、経営学や経済学の視点も加え、中長期的な維持管理戦略を立案し、着実に実施していくことである。

また、アセットマネジメントの基本的なフレームワークとしては、次のように要約できる。①既存構造物を対象とするだけでなく、新規建設の場合においても、設計・施工段階から、ライフサイクルコストの低減を考慮した設計・施工を実施する。②施設の定期的な点検を実施することによって、施設の劣化状態を、健全度という一貫性のある指標で評価する。③点検データを基に、施設の将来における劣化を予測する。④個別の施設について、劣化予測に基づいて、複数の補修等の実施時期と工法の中から、ライフサイクルコストが最も小さい時期と工法を選択する。⑤限られた予算の中での最適な全体計画を策定する。

3 道路構造物等の維持管理に関する既往の研究

農業水利施設のストックマネジメントよりも先行している道路構造物等の維持管理手法であるアセットマネジメントにおける既往の研究において、特に、本研究と関連の深い施設の劣化予測を中心とした主な研究成果について整理する。

道路構造物等の施設の劣化予測を中心とした主な研究成果としては、米国連邦高速道路庁 FHWA の橋梁アセットマネジメントシステムの PONTIS、宮本らの橋梁維持管理システム (Bridge Management System; BMS)、小林らの一連の研究などがある。

米国連邦高速道路庁 FHWA は、1998 年にアセットマネジメント・オフィスを設置して以来、道路の橋梁や舗装のアセットマネジメントを積極的に推進してきている。その代表的な成果が、橋梁アセットマネジメントシステムの PONTIS である。PONTIS とは、ラテン語で橋梁を意味する pons から命名されている。PONTIS は 1991 年に開発されて以来、逐次改良が加えられてきている (例えば、Cambridge systematics, Inc., 2005)。PONTIS の主要な構成要素を Fig.2 に示す。

2005 年現在で米国内 39 州が PONTIS 使用のライセンスを取得しているが、殆どの州が Fig.2 に示す構成要素のうちの最初の段階の点検データの蓄積のみに使用しており、最適な維持補修・更新戦略等の意思決定に使用されているケースは少ない (U.S. Department of Transportation, 2005)。これは、最適な維持補修・更新戦略策定には膨大な施設の点検データが必要であるが、その収集が困難であることが理由とされている (U.S. Department of Transportation, 1999)。

劣化予測モデルは、橋梁は複数の多くの部材から構成されていることから、橋梁を 98 の部材に分割し、各部材の経年による健全度の変化を予測できるように設計されている (Milligan et al., 2004)。各部材の健全度は 3～5 段階に分類されている。劣化予測には、マルコフ連鎖モデルが用いられている。マルコフ連鎖モデルとは、時系列の複数の点検データが存在しない場合に、1 回の点検データを用いて、将来の劣化進行を予測するモデルであり、これは、点検実施時以降の劣化進行は、過去の劣

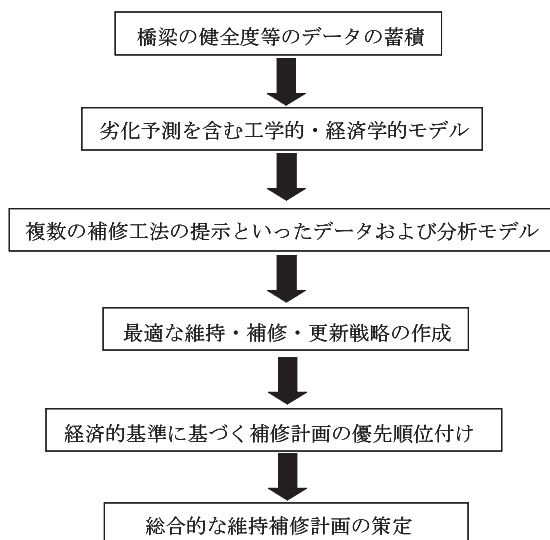


Fig.2 PONTIS の主要な構成要素
出典：U.S. Department of Transportation (1999) に基づき作成
Main Elements of PONTIS

化進行に依存しないことを前提としている。この際に、健全度で示した施設の劣化進行を予測するのに用いる確率を、マルコフ連鎖モデルの遷移率と呼ぶ。PONTIS で用いられているマルコフ連鎖モデルの遷移率の決定手法は、次のように2段階で行われている。点検データが十分に存在しない初期段階では、主に専門技術者の知見に基づいて遷移率を仮定する。2段階目として、その後の点検データの蓄積によって、遷移率を逐次更新していく(Thompson, 1993)。

ライフサイクルコスト (LCC) 計算に使用する費用は事業者費用と利用者費用に分けられる。事業者費用とは、事業実施者が負担する費用のことであり、維持補修・改善費用などが含まれる。利用者費用とは、施設の利用者が負担する費用のことであり、補修の際に要する迂回移動時間等といった負の便益が含まれる。これらの事業者費用と利用者費用を合計してLCCを計算している(Milligan et al., 2004)。

PONTIS の特徴は、次のように整理できる。

- ① 劣化予測にマルコフ連鎖モデルを用いて、将来の劣化の進行に付随する不確実性を確率的手法で予測している。ただし、マルコフ連鎖モデルに用いる遷移率の決定には、点検データ不足を補うため、専門技術者の知見を用いている。
- ② LCC 計算には事業者費用だけでなく利用者費用をも含んでいる。利用者費用とは、橋梁の補修工事等を実施する際に、利用者が受ける負の便益である。
- ③ 適切な劣化予測を行うためには、信頼性の高い膨大

な点検データが必要である。しかしながら、米国内の多くの州では PONTIS を意思決定ツールとして使用するに十分な点検データが存在しないため、PONTIS を点検データを蓄積するデータベースとしてのみ使用している。

宮本らは、コンクリート橋梁の床板および主桁の点検時の健全度診断、将来の劣化予測、最適な補修・補強工法とその費用の算定、さらには道路網の総合的マネジメントが実行可能な「橋梁維持管理システム (Bridge Management System; BMS)」の開発と改良を行っている(例えば、宮本ら, 1997)。ここで、補修とは、施設の低下した性能を初期建設時と同等もしくはそれ以下にまで回復させることを言い、補強とは、施設の低下した性能を初期建設時と同等もしくはそれを上回る程度まで回復させることを言う。

宮本ら(1997)の開発したBMSの概要を Fig.3 に示す。まず、新設橋梁か既設橋梁かによって分岐を行う。新設橋梁の場合は建設費を標準的なものに比べて多くかけるときに、その使い方によって橋梁部材の劣化曲線に対する影響を予測し、LCCを最小化するように最適補修・補強計画の策定を行う。次に、既設橋梁の場合は、まず簡便な目視点検程度の点検と一部詳細点検に分類される点検を組み合わせた約50項目の点検を行い、その結果に基づいて健全度を診断し橋梁部材の点検時における健全度を評価する。そして、その点検結果をもとにして、劣化予測式より劣化の現在までの進行経路とこれからの施設の余寿命を予測する。また既存資料を基にして

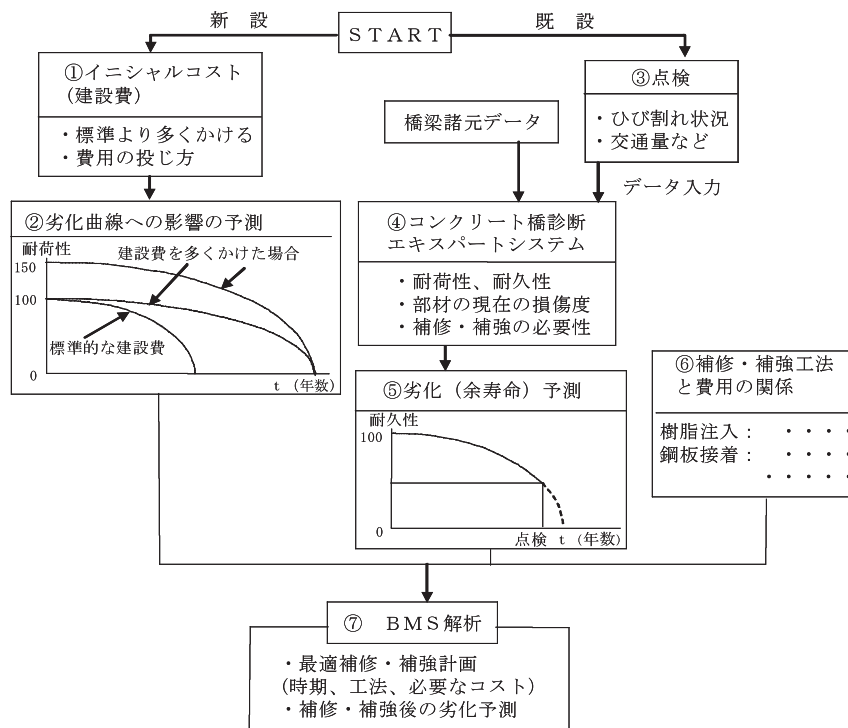


Fig.3 Bridge Management System (BMS) の概要
出典：宮本ら (1997)

Outline of Bridge Management System (BMS)

補修・補強工法とその効果、費用の関係をあらかじめ求めておき、劣化予測曲線への影響を考慮して最適補修・補強計画の策定を行う。本システムの出力項目は、最適補修・補強時期、工法、必要な費用の総計（LCC）である。

宮本ら（1991）は、コンクリート橋梁の点検時の健全度診断には、人工知能（AI）を用いて、専門技術者が判断すると同様に、診断対象橋梁の目視点検程度の情報から総合的な耐用性診断を行うことを可能とする「橋梁診断エキスパートシステム」を開発している。「橋梁診断エキスパートシステム」の概要を Fig.4 に示す。

宮本ら（1997）は、LCC 計算については費用のみではなく、便益をも考慮して経済性を最適化する必要があることを指摘している。すなわち、最適化モデルは各維持管理の内容に対して限られた予算内で最大の便益を得られるものを選択するためのものであり、要した費用と得られる便益とを組み合わせで考えている。具体的には、LCC 計算には、事業者費用だけでなく利用者費用も含めている。利用者費用としては、橋梁の性能の低下または補修・補強実施の際の通行止めあるいは車線規制などの負の便益を考慮している。

本 BMS は、橋梁の状態、交通量の推移および予算を、20 年といったような長期計画で検討することによって、例えば、今後 5 年間で 20% の予算の削減があった場合の橋梁の性能に対する影響や、その結果、サービス水準を落とした場合の利用者に与える影響なども検討することを可能としている。

なお、割引率については、あくまで維持管理費用を投資として考えた場合に考慮すべき項目であるため、公共構造物のように補修・補強に費用を投じることが投資という概念に当てはまらないものについては、当面のところ考慮する必要がないとしている。割引率とは、将来の長期に渡る LCC を比較検討する際に、現在価値に割り戻す場合に用いる率のことを言う。

橋梁部材の劣化については、「耐荷性」と「耐久性」

の 2 つに区分して考えている。耐荷性とは橋梁部材の耐荷力に基づいて評価される橋梁の性能であり、耐久性とは橋梁部材の劣化速度からみた現時点における橋梁部材の劣化に対する抵抗性と定義している。耐荷性の時系列的な劣化傾向を示す劣化曲線については、過去の実験データ（例えば、土木学会、1995）などから 4 次関数と仮定している。耐久性については耐荷性よりも次数が 1 つ少ないという考えが一般的かつ合理的であると考えられるため（森川、1994）、耐久性の劣化曲線を 3 次関数と仮定している（宮本ら、1997）。

補修・補強を行った場合に、部材の耐荷性、耐久性の劣化曲線にそれぞれどのような影響を与えるかについては、専門家の知見に基づいて次のように仮定している。Table 1、Table 2 に示すように、初期建設時の健全度を 100 とした場合に、床板と主桁ごとに部材の設計年次と各補強工法によって異なる回復度を設定している。設計年次の新しい橋梁については、補強によって耐荷性が当初の健全度である 100 に回復するような補強を行うが、設計年次の古い橋梁については、経年による劣化が進行しているため、補強によって耐荷性が当初の健全度である 100 以上に回復させることとしている。また、補修・補強後の劣化曲線の傾きについては、耐久性は補修前と変化しないが、耐荷性については補強後は劣化曲線の傾きが 1/2 倍に緩和されると仮定している。

さらに、LCC 最小化を橋梁マネジメントの最大目的とするのではなく、限られた予算下でコスト上限を設定し、その中で各橋梁ごとに経済性および橋梁部材の品質（耐荷性と耐久性）の両方を考慮した最適維持管理（補修・補強）計画が作成できる機能の追加を行っている（宮本ら、1998）。

宮本らの BMS の特徴は、次のように整理できる。

- ① 点検時の健全度診断には、専門技術者が判断すると同様に、診断対象橋梁の目視点検程度の情報から総合的な耐用性診断を行うことを可能とする「橋梁診断エキスパートシステム」を開発している。
- ② LCC 計算には、事業者費用に加えて利用者費用も含めている。利用者費用としては、橋梁の補修・補強時の交通規制等による利用者の負の便益を考慮している。
- ③ 割引率については、橋梁の補修・補強費用は投資という概念に当てはまらないとして、適用していない。
- ④ 橋梁の健全度を「耐荷性」と「耐久性」に二分している。「耐荷性」の劣化曲線は 4 次関数と仮定し、「耐久性」の劣化曲線は、耐荷性よりも次数がひとつ少ない 3 次関数と仮定している。
- ⑤ 補修・補強を実施した際の「耐荷性」と「耐久性」の回復度は、採用する工法と部材の初期設計年次によって分類して、各々の回復度を決定しており、一律に 100% に回復するとは仮定していない。また、補修・補強後の劣化曲線の傾きについても、「耐久性」

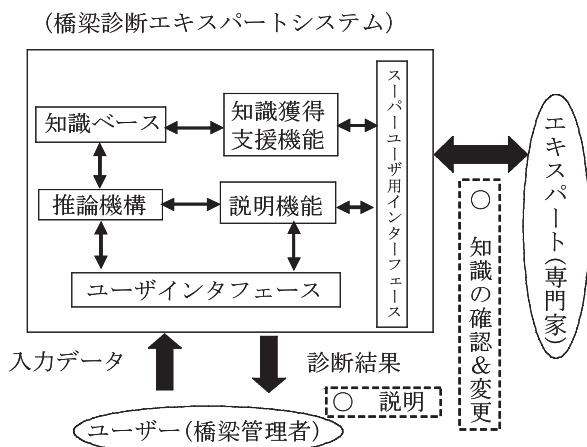


Fig.4 橋梁診断エキスパートシステムの概要
出典：宮本ら（2000）

Outline of Bridge Assessment Expert System

Table 1 設計年次別各補強工法による耐荷性回復度（床板）
出典：宮本ら（1997）

Recovery Level of Load Durability by Reinforcement with Design Years (Floor Board)

設計年次	鋼板接着 (FRP4 枚)	FRP 2 枚接着	床板増厚	床板 打替え
～ 1968 年	140	120	150	150
～ 1971 年	140	120	150	150
～ 1978 年	110	110	130	130
～ 1993 年	110	110	100	110
1993 年～	100	100	100	100

Table 2 設計年次別各補強工法による耐荷性回復度（主桁）
出典：宮本ら（1997）

Recovery Level of Load Durability by Reinforcement with Design Years (Main Pillar)

設計年次	鋼板接着 (FRP4 枚)	FRP (2 枚)	外ケーブル
～ 1939 年	130	120	150
～ 1956 年	120	110	140
1956 年～	100	100	100

は補修・補強前と同じだが、「耐荷性」は傾きが 1/2 倍に回復すると仮定している。

- ⑥ LCC 最小化のみを目的とした維持補修計画ではなく、コスト上限を設定し、「耐荷性」と「耐久性」といった橋梁部材の品質最大化をも目的とした最適化を可能としている。

小林らは、社会資本のアセットマネジメントに関する「建設マネジメント勉強会」を立ち上げ、橋梁等の社会資本のアセットマネジメントに関する研究を精力的に行っている。また、2000 年からは毎年サマースクールを開催し、最新の研究成果を全国の技術者を対象に広く公表している。特にその中で施設の劣化予測に関する研究の主要な成果を以下に整理する。

津田ら（2005）は、マルコフ連鎖モデルを用いて、橋梁の個々の部材の目視検査により判定された健全度情報に基づいて、橋梁の個別部材の劣化のマルコフ遷移率を求める方法を提案している。このモデルの詳細は後述するが、マルコフ連鎖モデルは、操作性が高く、米国の PONTIS をはじめとして、多くの橋梁マネジメントにおける劣化予測モデルとして用いられていることを指摘している。

青木ら（2005a）は、トンネル照明等の施設の劣化状態が故障の有無という 2 値状態で表現される施設の劣化進行を予測するための劣化ハザードモデルを定式化している。劣化ハザードモデルは、マルコフ連鎖モデルのように施設の点検時点をグラフの横軸にとって、ある点検時点における健全度から、次の点検時点における健全度を離散的に確率的に予測するのではなく、時間軸上で施設の点検時点に無関係にどこの時点で、ある健全度から次の健全度へ推移するかを推計するモデルである。この

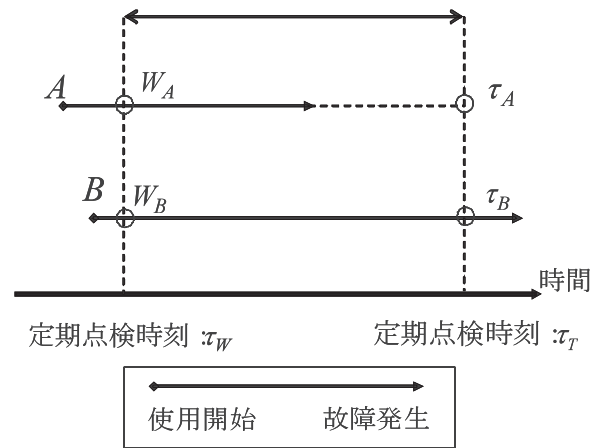


Fig.5 定期点検と施設寿命

出典：青木ら（2005a）

Periodical Inspection and Infrastructure Life-span

考え方を Fig.5 に示す。ここで、 W_A, T_A は施設 A の 2 つの連続する点検時刻を示し、 W_B, T_B は施設 B の 2 つの連続する点検時刻を示す。

この劣化ハザードモデルでは、施設 A が定期点検時刻以外のどの時刻に故障するかを予測することが可能である。

以下に、彼らが定式化した劣化ハザードモデルを示す。初期時点から任意の時点 t まで、施設 i が故障しないで生存する確率 $\tilde{F}_i(t)$ は、全事象確率 1 から時点 t までに施設が故障する累積故障確率 $F_i(t)$ を差し引いた値

$$\tilde{F}_i(t) = 1 - F_i(t) \tag{1}$$

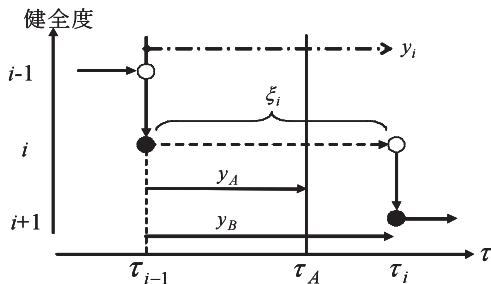
により定義できる。ここで、施設が時点 t まで生存し、かつ期間 $[t, t + \Delta t]$ 中にはじめて故障する確率は

$$\lambda_i(t)\Delta t = \frac{f_i(t)\Delta t}{\tilde{F}_i(t)} \tag{2}$$

と表せる。ここで、 $f_i(t)$ は確率密度関数である。

施設が時点 t まで生存し、かつ当該時点で故障する確率密度 $\lambda_i(t)$ を「劣化ハザード関数」と呼ぶ。この式を解くことによって、劣化状態が 2 値状態で表現される施設の故障が生じるまでの施設寿命を予測することが可能である。

青木ら（2005b）は、上記の施設の故障の有無といった 2 値状態で示される施設の余寿命予測が可能な劣化ハザードモデルを発展させ、施設の健全度が例えば 5 段階といった複数のグレーディングで表現され、施設の使用時間が劣化の進展速度に影響を及ぼすような場合に適用可能な劣化予測モデルを提案している。具体的には、複数グレーディング間の遷移率をワイブルハザードモデルで表現した多段階ワイブル劣化ハザードモデルを提案している。Fig.6 に複数の健全度で評価される施設の劣化進行と点検時刻のモデル化を示す。ここで、 ξ_i は施設が健全度 i に留まる期間長を示す。



注) カレンダー時刻 τ_{i-1} に健全度が $i-1$ から i に変化した場合、検査が行われる時刻 τ_A は時刻 τ_{i-1} を起点とするサンプル時点 y_A と対応する。図中の劣化サンプルパスの場合、時点 y_B に健全度が1つ進行する。目視点検の場合、時刻 τ_{i-1} を観測できないため、サンプル時間軸上の時点 y_A, y_B も観測できない。

Fig.6 劣化進行のモデル化
出典：青木ら (2005b)
Model of Deterioration Progress

式 (2) と同様に、施設の健全度を複数のグレーディングで表現する場合について考える。施設の健全度が時点 y_i まで状態 i で推移し、かつ期間 $[y_i, y_i + \Delta y_i]$ 中に水準 $i+1$ に進展する条件付き確率は

$$\lambda_i(y_i)\Delta y_i = \frac{f_i(y_i)\Delta y_i}{F_i(y_i)} \quad (3)$$

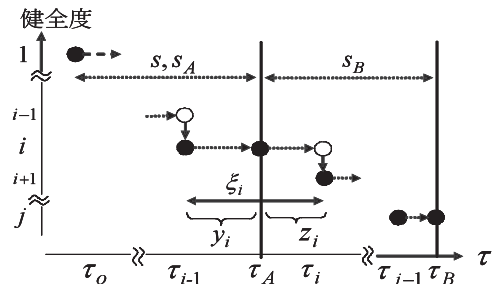
と表せる。今、対象とする施設の健全度が時点 y_i まで i の状態に推移し、かつ時点 y_i で $i+1$ に推移する確率密度 $\lambda_i(y_i)$ がハザード関数である。ここでは、ハザード関数として、ワイブルハザード関数を用いている。すなわち、

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \alpha_i y_i^{\alpha_i - 1} \quad (4)$$

が成立する。 θ_i は健全度 i に固有の定数パラメータ、 α_i は劣化の加速度パラメータである。

次に、複数時刻における健全度の同時生起確率について考える。Fig.7に初期時刻からの劣化進行と健全度の観測を示す。時刻 τ_0 に使用が開始され、時刻 τ_A で健全度 i が観測され、時刻 τ_B で健全度 j が観測される事象が生起するためには、①時刻 τ_0 に使用が開始され、時刻 τ_{i-1} に健全度が $i-1$ から i に推移し、時刻 $\tau_A = \tau_{i-1} + y_i$ までに健全度が i のまま推移する。②時刻 τ_A から時刻 $\tau_i = \tau_A + z_i$ まで健全度 i のまま推移し、時刻 τ_i に健全度が i から $i+1$ に推移する。③時刻 τ_{j-1} までに健全度が $i+1$ から j に推移し、時刻 τ_B まで健全度 j が継続するという事象が同時に生起しなければならない。

ここで、各時刻 $\tau_1, \dots, \tau_{j-1}$ を、それぞれ $\tilde{\tau}_1, \dots, \tilde{\tau}_{j-1}$ に固定し、さらに、 $s_A = \tau_A - \tau_0, s_B = \tau_B - \tau_A$ を定義する。この時、使用開始時刻から時間 s_A が経過した後の第1回目の検査時刻 τ_A で健全度 i が観測され、さらにそれより時間 s_B が経過した第2回目の検査時刻 $\tau_B = \tau_0 + s_A + s_B$ において



注) 初期時刻 τ_0 から時間 s が経過した時刻 τ (図中では τ_A)に健全度 i が観測される。ここでは、2つの検査時刻 τ_A と τ_B に着目する($s_A = \tau_A - \tau_0, s_B = \tau_B - \tau_A$)。その場合、時刻 τ_{i-1} から時刻 τ_A までの期間長を y_i 、時刻 τ_A から時刻 τ_i までの期間長を z_i と表し、健全度 i の寿命を $\xi_i = y_i + z_i$ と表す。

Fig.7 初期時刻からの劣化進行と健全度の観測
出典：青木ら (2005b)
Deterioration Progress and Observation of Soundness Index from Initial Time

健全度 j が観測される同時生起確率 $\pi_{ij}(s_A, s_B)$ は、

$$\pi_{ij}(s_A, s_B) = \int_0^{s_A} \eta_i(s_A, y_i) k_{ij}(s_B | y_i) dy_i \quad (5)$$

と表せる。ここで、 $\eta_i(s_A, y_i)$ は時刻 $\tau_{i-1} = \tau_A - y_i$ に健全度が i に推移する確率密度関数で、 $k_{ij}(s_B | y_i)$ は2回目の検査時刻 $\tau_B = \tau_A + s_B$ において健全度 j が観測される条件付き確率である。

津田ら (2005) は、マルコフ連鎖モデルを用いた橋梁の個別部材の劣化予測モデルを提案している。これは、従来のマルコフ連鎖モデルでは、橋梁全体の劣化予測は可能であるが、個別部材の持つ構造特性や使用環境といった固有の情報が反映できなかったからである。具体的には、隣接する2つの健全度間での推移過程にマルコフ性を表現可能な指数ハザードモデルを用いることにより、施設の部材の劣化により健全度が逐次推移していくという推移関係を表現している。ここで、マルコフ性とは、将来の劣化予測が現時点のデータだけに依存し、過去の劣化履歴に依存しないことを言う。

橋梁部材の劣化過程がマルコフ性を満足し、ハザード関数がサンプル時間軸上の時点に依存せず、常に一定値 $\theta_i > 0$ をとると仮定すると、

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \quad (6)$$

が成立する。この式 (6) の指数ハザード関数を式 (4) のワイブルハザード関数の代わりに式 (3) に代入することにより、橋梁部材の劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現することができる。個別部材の2つの検査時点間で健全度が i から $i+1$ に推移するマルコフ遷移率 π_{ii+1} は、

$$\pi_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{ -\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z) \} \quad (7)$$

と表せる。ここで、 Z は2つの検査時点間の時間間隔である。

津田ら(2006)は、ベイズ推計法を用いて、劣化予測に関する専門技術者の知見の活用と点検データ蓄積による劣化予測モデルの更新を可能とするモデルを提案している。ベイズ推計法では、まず複数の仮説についての尤度の高い確率を考え、その後に収集された新しいデータによって、その確率を逐次改訂していくことが可能である。なお、ここでは、劣化状態が故障の有無という2値状態で表現されるような施設を対象とするもので、青木ら(2005a)の劣化ハザードモデルにベイズ推計法を適用している。この背景には次のことが挙げられる。現在のところ限られた点検データに基づいて劣化予測を推計せざるを得ず、劣化予測モデルの推計精度に問題がある場合が多い。あるいは、専門技術者の経験的判断に基づいて劣化予測モデルを暫定的に用いざるを得ない場合もある。このような場合、最初は専門技術者の経験的判断と限られた点検データに基づいて暫定的劣化予測モデルを作成し、その後点検データが蓄積されるにつれて新しいデータを用いて暫定的劣化予測モデルを逐次更新することが必要となる。この場合、ベイズ推計法を用いることによって、暫定的劣化予測モデルの作成とその後の逐次更新の双方が可能となる。ベイズ推計法の解析手法として、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いている。

Fig.8に、その概念図を示す。

貝戸・小林(2006)は、津田ら(2005)のマルコフ劣

化ハザードモデルにベイズ推計法を適用することによって、施設の健全度を多段階の離散値で評価した目視点検データを用いたマルコフ遷移率をベイズ推計する手法を提案している。基本的な考え方は、Fig.8と同様である。

これらの小林らの一連の研究の特徴は、次のように整理できる。

劣化予測については、主として点検データに基づく統計的劣化予測モデルの開発に焦点を当てている。まずは、マルコフ連鎖モデルが、劣化予測モデルとして操作性が高く、多くの事例で用いられていることを指摘している。また、統計的手法を用いて施設の劣化進行を表現するための各種モデルの開発を行っている。具体的には、①2値状態で劣化状態が表現される施設に対応した劣化ハザードモデル、②健全度といった複数のグレーディングで劣化状態が表現される施設に対応した多段階ワイブル劣化ハザードモデル、③隣接する2つの健全度間での劣化の推移進行に対応した指数ハザードモデル、④2値状態で劣化状態が表現される施設での専門技術者の知見と限られた点検データに基づく暫定的劣化予測モデルの作成と蓄積されたデータに基づくモデルの逐次更新を可能とするベイズ推計法の適用、⑤健全度といった複数のグレーディングで劣化状態が表現される施設での専門技術者の知見と限られた点検データに基づく暫定的劣化予測モデルの作成と蓄積されたデータに基づくモデルの逐次更新を可能とするベイズ推計法の適用等を行っている。

これらの道路構造物等の施設の劣化予測の研究におい

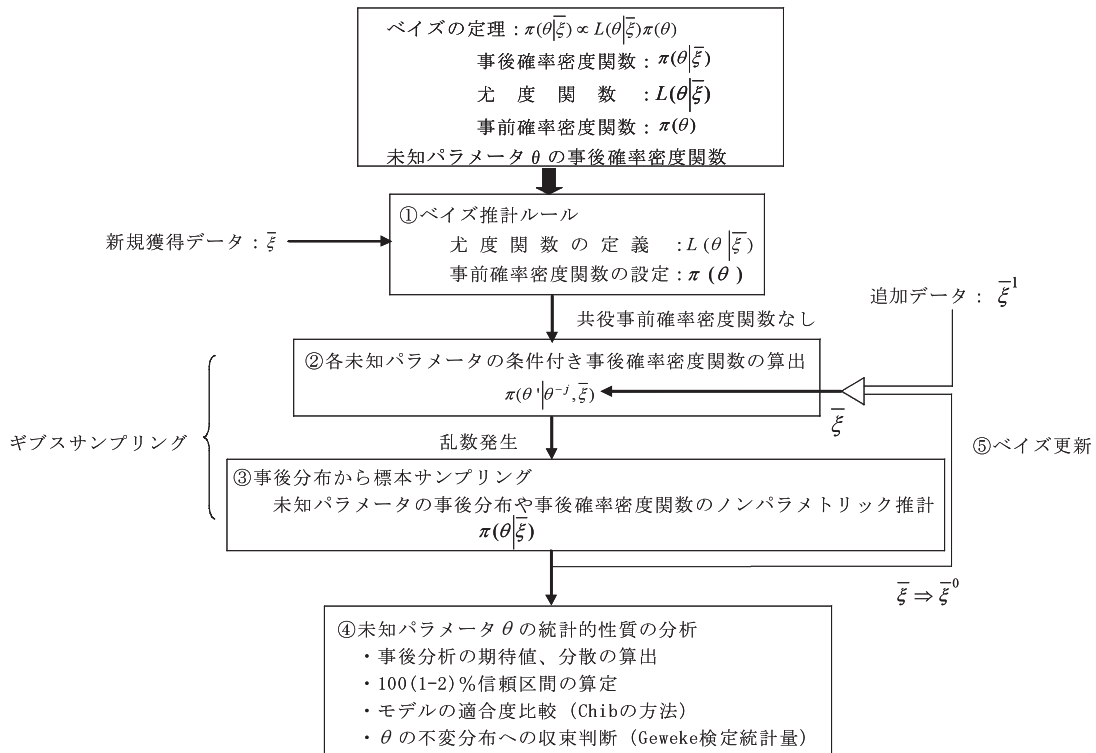


Fig.8 ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計
出典：津田ら(2006)

ては、供試体を用いた室内実験等による劣化メカニズムの解明に基づく力学的劣化予測と呼ばれる劣化予測モデルではなく、主として既存の実構造物の点検データに基づく統計的劣化予測モデルの開発に焦点が当てられている。

また、この点検データに基づく統計的劣化予測モデルは、大きく2種類に分類することができる。第1は、宮本らの劣化予測モデルに見られるように、将来の劣化予測を3次曲線や4次曲線といった確定的な劣化曲線を用いて行うものである。このようなモデルは、施設の平均的な劣化進行を確定的に予測するものであり、単一劣化モデルと呼ぶことができる。第2は、米国のPONTISや小林らのグループが用いているマルコフ連鎖モデルである。マルコフ連鎖モデルは、下位の健全度へ低下していく過程を遷移率という確率で求めるため、同じ時期に建設された施設でも劣化進行にピークとばらつきがある状態を表現することが可能なものである。施設の劣化予測を行う場合には、初期的な段階としては、このような劣化予測が確定的な単一劣化モデルと、劣化進行のばらつきを遷移率という確率で表現するマルコフ連鎖モデルの2種類が用いられることが多い。しかし、これらの劣化予測モデルは、各々、独立して開発されており、双方の関連性に言及した研究事例は見当たらない。

その一方で、小林らのグループでは、マルコフ連鎖モデルだけではなく、ベイズ推計法等の高度なモデルの開発が順次に行われているが、これらの研究は既存の点検データを用いて高度なモデルを開発することに重点が置かれている。そのため、これらの高度なモデルは研究開発段階に留まっており、これらを実際の現場にフィードバックし、現場で適用し運用するところまでには至っていない。

4 まとめ

農業水利施設のストックマネジメントに先行している、道路構造物等の新たな戦略的な維持管理手法であるアセットマネジメントの動向、および、本研究に関連する道路構造物等の施設の劣化予測を中心とした既往の研究について整理した。

道路構造物等の事後保全ではなく予防保全による適時・適切な維持補修を実施し、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るアセットマネジメントは、米国における老朽化した道路構造物と不足する維持管理予算の影響で生じた1970-80年代の橋梁落下事故等を契機として始まった。

わが国においても、同様に初期建設から相当の年数を経過し更新を必要とする道路構造物の増加と、財政難による公共事業費の削減によって、施設を長寿命化しライフサイクルコストを低減するアセットマネジメントが導入されてきている。

II.2においては、米国におけるアセットマネジメン

トの動向、わが国の国レベルでの対応としての国土交通省におけるアセットマネジメントの取組み、県レベルでの先進的な取組みを実施している青森県における橋梁アセットマネジメントの取組みについて整理するとともに、アセットマネジメントの定義について整理した。

II.3においては、農業水利施設のストックマネジメントよりも研究が先行している道路構造物等のアセットマネジメントに関する研究の中で、特に、本研究と関連の深い施設の劣化予測を中心とした既往の研究成果を整理した。

道路構造物等の先進的な分野においては、農業水利施設よりも施設が大量に建設された時期が早く、そのため、老朽化し問題となる時期も早く到来した。また、公共事業予算の削減傾向の中、限られた予算制約下で、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るアセットマネジメントの導入が先行してきた。適切なアセットマネジメントの導入によって、欠陥橋梁の減少や維持補修費の削減等の目標を達成している。そのためには、計画的かつ効率的で中長期的な維持管理計画の策定が重要な役割を果たしている。したがって、農業水利施設のストックマネジメントにおいても、計画的かつ効率的で中長期的な維持管理計画を策定し、それを確実に実施していくことによって、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を実現していくことが重要である。

また、道路構造物等のアセットマネジメントは、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を目指すために、従来の工学的視点に加えて、経営学や経済学の視点も加え、中長期的な維持管理戦略を立案し、着実に実施していくことと捉えることができる。そのため、農業水利施設のストックマネジメントにおいても、このような経営学や経済学の視点も加え、中長期的な維持管理戦略を立案し、着実に実施していくことが重要である。

また、アセットマネジメントの基本的なフレームワークとしては、次のように要約できる。①既存構造物を対象とするだけではなく、新規建設の場合においても、設計・施工段階から、ライフサイクルコストの低減を考慮した設計・施工を実施する。②施設の定期的な点検を実施することによって、施設の劣化状態を、健全度という一貫性のある指標で評価する。③点検データを基に、施設の将来における劣化を予測する。④個別の施設について、劣化予測に基づいて、複数の補修等の実施時期と工法の中から、ライフサイクルコストが最も小さい時期と工法を選択する。⑤限られた予算の中での最適な全体計画を策定する。そのため、農業水利施設のストックマネジメントにおいても、同様のステップの各々を確実に実施していくことが重要である。

道路構造物等の施設の劣化予測の研究においては、供試体を用いた室内実験等による劣化メカニズムの解明に基づく力学的劣化予測モデルではなく、主として既存の実構造物の点検データに基づく統計的劣化予測モデルの

開発に焦点が当てられている。このような点検データに基づく劣化予測モデルとして代表的なものには、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルがある。しかし、双方のモデルは、各々、独立に開発されており、両者の関連性に言及した研究事例は見当たらない。また、マルコフ連鎖モデルだけではなく、ベイズ推計法等の高度なモデルの開発が順次に行われているが、これらの研究は既存の点検データを用いて高度なモデルを開発することに重点が置かれているため、これらのモデルを実際の現場にフィードバックし、適用し運用するところまでには至っていない。

一方、農業水利施設の将来の劣化予測や、補修等の実施時期等の検討は、従来、主として、施設の管理を担っている土地改良区の職員等の現場技術者の経験と知見に基づいて実施されてきた。今後の農業水利施設のストックマネジメントの適切な実施には、劣化予測に基づいて複数の時期と補修等の工法を提示し、その選択肢の中から最もライフサイクルコストの小さいものを選択することを要求されるため、現場でのより科学的な劣化予測手法の適用が必要となる。その一方で、土地改良区の職員等が中心となって、現場の点検データを基に利用可能な劣化予測手法が必要とされる。そのため、難解で高度なモデルではなく、理解が容易で誰もが利用可能な簡易な劣化予測手法の開発が必要である。また、劣化予測の手法としては、道路構造物等の場合と同様に、供試体を用いた室内実験等による劣化メカニズムの解明に基づく力学的劣化予測モデルではなく、主として既存の実構造物の点検データに基づく統計的劣化予測モデルの開発が、劣化機構ごとの劣化メカニズムが解明されていない現段階では適切かつ現実的である。そのため、農業水利施設の劣化予測に用いるモデルとしては、比較的簡易な単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルを用いることが適当である。

第Ⅲ章においては、本章における道路構造物等の先進的な分野の施設のアセットマネジメントの動向を受けて、本研究の主題である農業水利施設のストックマネジメントの動向について整理する。

Ⅲ 農業水利施設のストックマネジメントの動向

1 農業水利施設を取り巻く状況

第Ⅱ章では、道路構造物等の先進的な分野における施設の新しい戦略的な維持管理手法であるアセットマネジメントの動向について整理し、今後の農業水利施設のストックマネジメントに参考となる事項について整理した。本章では、農業水利施設のストックマネジメントの動向について整理し、ストックマネジメントの課題について整理する。

わが国の農業水利施設は、ダム、頭首工、用排水路などその種類は多岐にわたり、第2次世界大戦後の食

料増産時代から本格的に全国各地で建設が進められてきた。現在までに国営土地改良事業等により造成されたダム、頭首工、用排水機場等の基幹的な農業水利施設は約7,100ヶ所、末端受益面積100ha以上の基幹的な農業用排水路の延長は約4万5千kmに達する。さらに、末端の施設まで含めた農業用排水路の延長は約40万kmにも及び、基幹から末端までの施設の総資産額は再建設ベースで約25兆円にのぼる（農業農村工学会、2008）。

これらの農業水利施設は、国民への安定的な食料供給の基盤となり、また、洪水防止や水資源涵養など多面的な機能も有するなど、重要な社会資本ストックとなっている（農業農村工学会、2008）。

農業水利施設は、国営事業や都道府県営事業で造成された大規模ダムや頭首工などの基幹的な施設も含めて、その大半は土地改良区により管理されている。土地改良区による維持管理の内容は、「施設操作による用水の配水」、「施設の日常点検・整備」、「草刈り・土砂上げ」、「施設の軽微な補修」などである。農業水利施設は、土地改良区によるこれらの維持管理が適切に行われることにより、現在までその機能が保たれてきている（農業農村工学会、2008）。

しかしながら、農産物価格の低迷による農業経営の悪化や国・地方公共団体の財政上の制約から、施設の更新整備等の公共事業への投資が抑えられる状況にある。また、施設の老朽化に伴い、維持管理に要する費用も年々増加しつつある。さらに、近年、施設の維持管理を担う土地改良区の合併により、1土地改良区当たりの管理施設数が増加するとともに、職員の高齢化も進み、以前のようなきめ細かな対応が困難になりつつある（農業農村工学会、2008）。

今後、このような状況が一層進み、変状（劣化、損傷、初期欠陥を合わせたもの）の生じた施設に対する適切な対応が行われなくなった場合、農業水利施設の有する食料生産基盤としての機能のみならず、地域の生活用水や防火用水といった多面的機能が十分に発揮されないことになり、国民生活にも影響を及ぼすおそれがある。実際、農業水利施設の再整備は遅れており、現時点での標準耐用年数を超えている基幹的な施設は、その再建設に要する費用が約2兆円にも及ぶ（農業土木事業協会、2007）と言われている（農業農村工学会、2008）。

このような農業水利施設を巡る課題に対応するため、既存施設の長寿命化を図りライフサイクルコストを低減し、計画的かつ効率的に施設の有効利用を行うストックマネジメントの考え方が導入されてきている。平成15年4月の農業農村整備事業等コスト構造改革プログラムや、平成15年10月の土地改良長期計画において、既存ストックの有効活用やストックマネジメントの導入に関する計画について述べられている。平成17年3月に策定された食料・農業・農村基本計画においても、「既存ストックの有効活用の観点から農業水利施設等の長寿

命化を図り、これらのライフサイクルコストを低減することを通じ、効率的な整備更新や保安全管理を充実する。」とされ、農業水利施設のストックマネジメントが導入される契機となった。

農業水利施設のストックマネジメントに関連する農業農村整備の事業制度には、次のものがある。

平成11年度に広域基盤整備計画調査が農業水利施設のストックマネジメントに対応する農業農村整備の事業制度として初めて事業化された。この調査は国土土地改良事業が複数実施されるような一定の農業地域において、中長期的な農業水利施設の更新整備構想をとりまとめるものである。この構想の策定に当たっては、現況施設の機能診断を行うことがはじめて盛り込まれた(杉山, 2008)。現況施設の機能診断とは、施設の点検を実施し、その時点での施設の劣化状態を把握し評価することを言う。

この時点における機能診断は、主に現地踏査による3段階評価で行われていたが、これらの判定は施設管理者の意向や個人の感覚に依るところが大きく、施設の定量的な劣化状態や余寿命の算定が行われているものは少なかった(杉山, 2008)。

平成14年度には、都道府県営事業により造成された土地改良施設の機能診断と補修・補強等の施設の性能を回復させる対策工事を行う農業水利施設保全対策事業が、平成15年度には、国営事業による造成された施設の機能診断を行う国営造成水利施設保全対策事業と、同施設の対策工事を行う国営造成施設保全対策事業が創設された。これらの一連の制度は、予算規模こそ数億円と小さいものの、機能診断や保全対策工事を国営・県営造成施設の現場において実施する契機となった(杉山, 2008)。

一部の先進的な地区において試行錯誤的に進められてきたストックマネジメントの取組みであるが、ストックマネジメントを本格的に実施する段階へと移行させるためには、その基本的考え方を整理するとともに、実行するための裏付けとなる予算制度を整備することが不可欠であった。このような問題意識から、食料・農業・農村政策審議会農業農村整備部会技術小委員会に、更新・管理の手引き作成に係る検討部会が設置され検討が行われ、平成19年3月に、基本的な考え方等の必要な事項が農業水利施設の機能保全の手引きとして取りまとめられた(杉山, 2008)。

ストックマネジメントを本格的に実施するための予算制度としては、平成19年度予算において、機能診断から対策工事の実施までを一貫して実施できる基幹水利施設ストックマネジメント事業が創設され、都道府県が主体となって県営造成施設の対策を本格的に実施できるようになった。また、国営造成施設の機能診断を本格的に実施するため、広域調査と指導事業を連携させ、予算規模を拡充し、5年間で土地改良調査管理事務所が全ての

国営造成施設の診断をするとともに、その後も定期的な継続診断を行うこととなった。さらに、平成20年度予算において、土地改良調査管理事務所が突発的な事故の原因究明を行ったり、大規模な試験施工を実施するストックマネジメント技術高度化事業が認められ、本格的な取組みがさらに加速されている(杉山, 2008)。

一方、道路構造物等の他の社会資本におけるアセットマネジメントと農業水利施設に関するストックマネジメントの違いは、端的にいうと2つの項目に集約される。すなわち、①農業水利施設のほとんどは建設時に一部受益者負担で造られているから、改築・更新および改修(補修・補強)に関しても受益者負担の原則がある。②土地改良区等への管理委託を原則としており、いわば構造物に関しては専門知識を有しない人々のコスト負担も含めた自助努力により維持管理されている。これらの結果、農業水利施設のストックマネジメントは、他の社会資本のアセットマネジメントに比べて、内容的にも異なりその取扱いも格段に難しくなっている(農業農村工学会, 2008)。

また、わが国における農業水利施設のストックマネジメントを適切に推進していくためには、諸外国における農業水利施設の維持管理の課題についての情報を収集し参考とする必要がある。そこで、わが国では殆ど十分な情報収集が行われていない、先進国の豪州と、発展途上国である中央アジア諸国における農業水利施設の維持管理に関する情報収集を行い整理する。

Ⅲ.2においては、農業水利施設のストックマネジメント導入の必要性や課題について指摘した論文の事例を整理する。

Ⅲ.3においては、農業水利施設のストックマネジメントの導入に向けた背景、基本的な考え方、今後の課題と対応の方向について、さらに詳細に整理する。

Ⅲ.4においては、農業水利施設のストックマネジメントに関する既往の研究について整理する。なお、本章では、近年における機能診断手法とライフサイクルコスト計算に関する既往の研究について整理し、本研究の主題と関連の深い劣化予測や劣化に伴う補修工法については、第4章の農業用水路の劣化機構と既往研究の中で整理する。

Ⅲ.5においては、Ⅲ.3において示す農業水利施設のストックマネジメントの考え方の中で述べる、ライフサイクルコスト計算の経済分析手法としての妥当性について検討する。農業水利施設のストックマネジメントの考え方の1つである、複数の選択肢のライフサイクルコストの比較については、提示された複数の補修等の対策工法の選択肢の間のライフサイクルコストを比較し、最もライフサイクルコストが低い選択肢を、最も経済的な対策手法として選択することである。なお、この際には、ライフサイクルコストの計算を、投資プロジェクトに関する経済分析手法として用いる際の留意点について検討

することが求められる。

Ⅲ.6においては、Ⅲ.3において示す農業水利施設のストックマネジメントの今後の課題と対応の方向の中で述べる、インフラ会計導入の課題について検討する。今後の課題と対応の方向の1つである農業水利施設ストックの資産管理の高度化においては、施設の劣化状態や適切な維持補修に必要な毎年度の予算等を金銭的価値で適切に認識する資産管理手法の開発と適用が必要である。これによって、ストックマネジメントの中長期的な戦略の立案や、財政支出と農家負担の年度間の平準化を図るといった高度なマネジメントも展望することが可能となる。このような目的を目指す会計手法は、道路構造物等の先進的な分野ではインフラ会計と呼ばれ、適用に向けた検討がなされている。農業水利施設におけるストックマネジメントにおいても、このインフラ会計の導入に向けた検討が必要である。

Ⅲ.7においては、農業水利施設の維持管理の課題に関する海外事例として、わが国では殆ど把握されていない、先進国の豪州と発展途上国の中央アジア諸国について整理する。

2 農業水利施設のストックマネジメント導入の必要性と課題

Ⅲ.1で示した農業水利施設を取り巻く状況の変化に対応する形でのストックマネジメント導入へ向けた動きが、近年、活発となってきている。そこで、農業水利施設のストックマネジメント導入の必要性や課題について指摘した論文事例を整理する。

農業水利施設のストックマネジメント導入の必要性や課題についてこれまでに言及したのものとしては、宮元(2002)、勝山(2002)、美濃・大内(2005)、難波(2005)、森(2005)、杉山(2008)などがある。

宮元(2002)は、農業水利施設の維持管理の面で取り組むべき新たな施策の展開方向とその課題として、ライフサイクルコストの低減に向けた取組みや、事後保全と予防保全について整理している。

ライフサイクルコストの低減に向けた取組みについては、ライフサイクルコストは、施設の初期の建設費用だけでなく、維持管理費用や更新費用を含めたライフサイクルを通じてのトータルコストを指すものであり、平成12年9月の関係閣僚会議において策定された公共工事コスト縮減対策に係る行動指針において、単に直接的な工事費の低減だけでなく、このライフサイクルコストの低減等を含め、総合的なコスト縮減対策を推進することとされていることを指摘している。

このようなライフサイクルコストの考え方の背景として、少子高齢化社会を迎え、循環型社会への移行が喫緊の課題となる中で、①右肩上がりの経済成長期に建設された構造物が劣化する時期を迎え、より効率的な投資が求められていること、②初期投資を抑えるコスト縮減に

限界が見え始めたこと、③性能設計の導入により構造物の寿命を考慮することが求められるようになったこと、などを指摘している。

事後保全と予防保全については、土地改良区等が管理すべき農業水利施設の増加に伴い、それらの老朽化が着実に進み、既存施設の長寿命化や限られた費用で効率的に管理していくために、悪いところを早めに手当てする予防保全を重視する傾向が強まっていることを指摘している。

すなわち、施設の老朽化に対し、早い段階で対処すれば安い費用で長寿命化を図ることができるが、損傷が進んでから補修すると工事が大規模になるうえ、施工条件も厳しくなり、工事コストも増加することになる。そのため、壊れたら直すという事後保全的な考え方から、施設の変状状況や使用環境を考慮し、適切な時期に適切な補修・補強を行う予防保全への移行の重要性を指摘している。

勝山(2002)は、平成15年度の農業農村整備事業の概算要求に関連して、維持管理を含む保全、更新事業費の割合が増加し、大規模な施設の新設の時代から、これまでに整備してきた施設の効率的な維持管理、的確な保全、機動的な更新の時代に入ってきていることを指摘している。

平成15年度の農業農村整備事業の概算要求の全体額は国費で10,642億円である。そのうち、健全な水循環に資する農業水利施設に関する予算は約4,900億円で、その約6割の約2,800億円が維持管理を含む保全・更新であり、年々増加傾向にあることを指摘している。

そのため、建設後の時間経過とともに徐々に老朽化が進行している農業水利施設を、仮に農林水産省の経済効果算定に用いる計画耐用年数で更新していくとすると、今後、高度経済成長期以降に整備された施設の更新事業が集中し、多大な更新費用が必要となることを指摘している。

このため、今後は、既存施設を大切に、手入れをしながら長く使うといった考えで、増加した農業水利ストックを適切かつ効率的に保全・更新し、有効に活用する施策への転換が不可欠であることを指摘している。

美濃・大内(2005)は、平成17年3月の食料・農業・農村基本計画の見直しによって、農業水利施設等の適切な更新・保全管理に取り組むことが重要であるとされたことを受けて、今後の農業水利施設の維持管理施策の1つの方向性を示すことを試みている。

これまでに造成された農業水利施設の資産価値は、平成14年3月現在で25兆円に及んでおり、その種類はダム、水路、用排水機場など多岐にわたっていることを指摘している。そして、これら膨大な農業水利施設は、わが国の食料安定供給確保のための重要な基盤として、社会の安定および国民の安心と健康の維持を図る上で、その機能を永続的に発揮させることが必要となってきた

ることを指摘している。

そのため、戦後間もなく建設された農業水利施設など、今後、平均40年である耐用年数を迎える施設が大幅に増加している (Fig.9) ことから、施設の長寿命化を図りつつ、適時適切な更新整備を行うなど、計画的な対応を図っていくことが必要であることを指摘している。

難波 (2005) は、農業水利施設のストックマネジメントにおける施設データ整備の重要性を指摘するとともに、国の役割について整理している。具体的には、国の役割として、アカウントビリティ (説明責任)、機能診断関係調査の効率化、リスクマネジメントの将来的な導入に向けた検討などを挙げている。

アカウントビリティ (説明責任) については、国が行政として効率的な事業実施に関する説明責任があるとし、施設管理者や地元関係機関への常時の説明においても、ストックマネジメントを踏まえ、施設状態の現状やその将来予測、補修等対策の選択肢およびこれに伴うライフサイクルコスト等を示し、客観的な技術データをもとに、合理的な説明を行っていくことを指摘している。

機能診断関係調査の効率化については、農業水利施設の調査・計画・管理に関して各種調査が実施されており、その調査項目、調査レベルおよび調査地点が異なっている。そのため、基本的な調査内容は統一化を図り、必要であれば個別に詳細調査を実施するなど、各調査が全体の一環として次につながる調査内容となるよう調整を図る必要性を指摘している。

また、将来的な課題として、リスクマネジメントの導入について検討を進めていく必要性を指摘している。リスクマネジメントとは、現状を放置した場合にどれだけの被害額があるかという考えに基づき、事故の発生確率と被害想定額を定量化し、これらの積を比較することである。しかし、事故歴に関するデータの蓄積がない現状

においては、一定精度の発生確率を把握することはできない。また、すべての施設において予防保全を実施することは不可能であり、これをリスクマネジメントに基づき運用していくことが効率化に繋がることを指摘している。

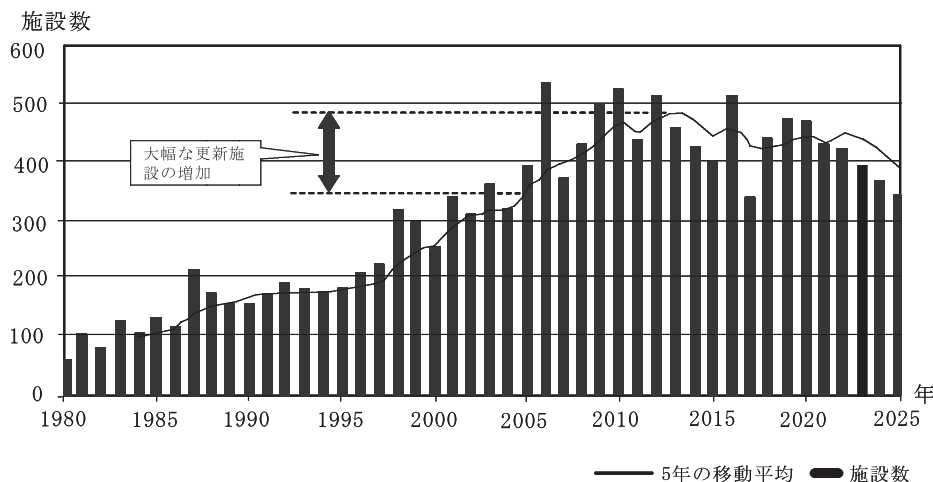
森 (2005) は、農業水利施設のストックマネジメントの導入に当たっての課題と検討方針について整理している。

まず、ストックマネジメントを、「施設状態を的確に把握・評価し、将来的な施設の状態を予測するとともに、更新時期の平準化および補修・更新費用の最小化を図るために、いつ、どのような対策をどこに行うことが最適であるかを考慮して農業水利施設を計画的かつ効率的に管理していくこと」と定義している。そして、具体的なストックマネジメントの基本フレームを提示している (Fig.10)。

本基本フレームに基づき、ストックマネジメントの実施に必要な各種手法等の確立に向けた検討を行っていくことの重要性を指摘している。具体的には、①施設状態の把握・評価、②施設状態の将来予測、③予防保全対策工法の検討、④ライフサイクルコストの算定、⑤最適運用計画の策定、である。

施設状態の把握・評価については、施設状態が将来どのように変化していくかを予測する場合、時々の施設状態を示す定量的なデータを蓄積していく必要があることから、施設データを定量的かつ定期的に把握するための統一的な調査手法の検討を行うことの必要性を指摘している。

施設状態の将来予測については、適切な補修等対策の実施時期を設定するため、施設状態の将来予測を行う必要があることから、全国の農業水利施設について、変状・劣化原因毎や構造形式・構造部材毎等の単位で施設状態



注) 平成7年(1995年)構造改善局地域計画課調べ
 基礎的農業水利総数: 受益面積100ha以上のダム、頭首工、用排水機場、基幹水路等

Fig.9 更新時期を迎える基幹農業水利施設
 出典: 美濃・大内 (2005)

Main Irrigation Infrastructure Facing Renewal Period

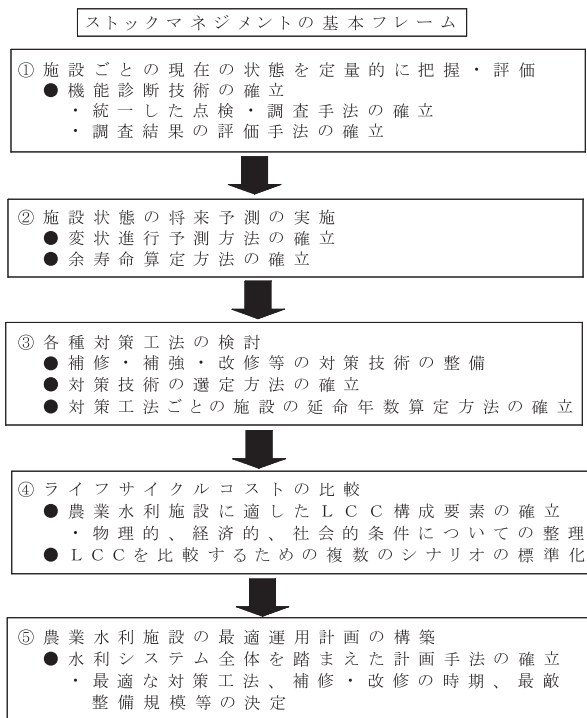


Fig.10 農業水利施設のストックマネジメントの基本フレーム
出典：森（2005）

Main Frame of Stock Management of Irrigation Infrastructure

の将来を予測する手法の検討を行うことの必要性を指摘している。

予防保全対策工法の検討については、予防保全対策の実施に当たっては、変状内容や劣化原因などを考慮し、適切な対策工法の選定およびその実施時期の設定を行う必要があることから、施設の変状内容や劣化原因に応じた対策工法、対策の実施時期、施工単価、対策工法の耐用年数等を体系的に取りまとめ、最適な予防保全対策工法の選定手法の検討を行うことの必要性を指摘している。

ライフサイクルコストの算定については、ライフサイクルコストは、一般的に、構造物の調査・設計費、初期建設費、維持管理費、廃棄処分費等の総計と定義されるが、農業水利施設に適したライフサイクルコスト算定についての考え方を確立していく必要性を指摘している。また、最小となるライフサイクルコストを導き出すため、複数の予防保全対策実施パターンについてコスト比較を行う手法についても検討することの必要性を指摘している。

最適運用計画の策定については、最適運用計画とは、コスト的に最適な施設の維持管理を実現するために、いつ、どこに、どのような対策を、どのくらいの費用を掛けて行えばよいかを表したものであり、具体的な最適運用計画策定の考え方を確立していく必要があることを指摘している。そこで、施設状態の将来予測から最小となるライフサイクルコストの算定までの手順を整理し、施設単位での最適運用計画の策定手法の検討や、さらに、

水利システム全体を踏まえた対策実施の優先順位付けやコストの平準化を視野に入れた、事業地区単位での最適運用計画策定手法についても検討する必要性を指摘している。

また、ストックマネジメントに係る各種技術は未だ発展途上のものであり、農業水利施設に適した劣化予測手法やライフサイクルコスト算定手法などは、今後の技術開発の進展と併せ、長期間にわたる機能診断結果や維持管理に係る情報等の蓄積・分析により、その精度向上を図っていくべきであることを指摘している。

杉山（2008）は、ストックマネジメントの要求する技術が複雑で高度であることや発展途上の技術であることを指摘している。

すなわち、ストックマネジメントとは、新設とは異なり、既存の施設を対象としていることから、新設時の施工条件、気象等の環境条件、利用形態などさまざまな要因が複雑に関連しており、まったく同じ条件の施設は存在しない。さらに施設を利用しながらの対応となると、さまざまな制約条件が出てくる。このため、施設の診断やその結果に基づく対策工法の決定等のプロセスや技術的なアプローチ手法は、工学の分野よりも臨床医学のそれに近い。治療方針に当たる機能保全計画を作成するプロセスは、機能診断に基づく施設の劣化予測を基礎として、長期にわたって性能を確保する無数の技術・手段の組み合わせの中から、技術的・経済的に妥当と思われる複数のシナリオを仮定し、これらのコストを比較するという複雑で高度なものであることを指摘している。

さらに、ストックマネジメントは発展途上の技術であることから、現場での実践を通じて技術を高度化していくとともに、基礎的な研究開発の必要性を指摘している。

3 農業水利施設のストックマネジメントの基本的な考え方

第Ⅱ章における道路構造物等の先進的な分野におけるアセットマネジメントの動向や、2で示した農業水利施設のストックマネジメント導入に向けた動向を示す論文事例を参考に、さらに詳細に、農業水利施設のストックマネジメントの導入に向けた検討の背景、基本的な考え方、今後の課題と対応の方向について整理する。

農業水利施設のストックマネジメントの検討の背景としては、農業水利ストックの蓄積と老朽化の進行と、維持管理に必要な公共事業予算の削減があげられる。

農業水利ストックの蓄積と老朽化の進行については、昭和24年に土地改良法が制定されて以降、国や都道府県により新規の水源開発、取水堰や用排水路の近代化、機場や管理施設の整備等、大規模な農業水利施設の整備が本格的に行われてきた。

この結果、国営、県営事業等で造成された基幹的な農業水利施設は、平成13年度末時点で、ダム、頭首工、用排水機場等の施設が約7千箇所、農業用排水路が延

長約4万5千kmにのぼり、再建設費で約14兆円、末端の施設まで含めて約25兆円の社会資本ストックが形成されるに至っている。

今日、これらの農業水利施設は、食料生産基盤としての機能だけではなく、地下水のかん養や洪水防止などの多面的機能を発揮し、国民全体に便益を供給する社会共通資本となっている。

これらの基幹的な農業水利施設の相当数は、戦後に集中的に整備されてきたことから、順次、老朽化が進行し、更新が必要な時期を迎える施設が増加してきている。

一方、これら施設の再整備は遅れており、現時点で標準耐用年数を超過している基幹的な農業水利施設は再建設費で約2兆円にも及んでいる。最近では、老朽化による施設崩壊等の事故が増加する状況も見られるようになっている。

施設の維持管理に必要な公共事業予算の削減については、近年、各公共事業分野では社会ストックの増大に伴い、その施設更新や保安全管理に係る費用が増加する一方、国と地方の厳しい財政状況から、公共事業への投資は抑制傾向にある。このため、既存ストックの有効利用による公共事業のコスト縮減が大きな課題となっている。

このようなことから、新規施設の建設を優先するよりも、既存施設の有効活用を図る必要性が生じ、農業水利施設の長寿命化を図りライフサイクルコストを低減し、効率的な維持管理を実施していくことが重要となってきた。

農業水利施設のストックマネジメントに関する基本的考え方としては、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るため、次のような段階に分類し、各段階を効率的に実施していくことが必要である(北村ら、2007a)。**①**ライフサイクルコスト低減に向けた設計・施工、**②**点検による施設の劣化状態の把握、**③**施設の将来における劣化状態の予測、**④**補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢の検討、**⑤**複数の選択肢のライフサイクルコストの比較、**⑥**最適な全体計画の策定。

ライフサイクルコスト低減に向けた設計・施工については、ストックマネジメントは既存構造物のみを対象とするものでなく、今後の新規構造物をも対象とすることが必要である。今後の新規構造物の場合は、設計・施工段階から、将来の維持補修計画をも考慮に入れて、施設のライフサイクルコスト低減を目指した適切な設計・施工を実施することが求められる。

点検による施設の劣化状態の把握については、既存構造物の現状での劣化状態を適切に把握するため、定期的な点検を実施することが必要である。特に、土地改良区の職員等が、長大な延長を有する農業用水路等の農業水利施設の点検を実施する際には、目視もしくは簡易な器具を用いた点検手法による、迅速かつ低コストで実施可能な点検手法の開発が必要である。

施設の将来における劣化状態の予測については、予防

保全によって、施設が完全に老朽化する前に、施設の有する性能を適切に維持向上させるために必要な補修等の対策工法を、いつ、どこで、どのように実施するかを検討するためには、施設の将来における劣化を高精度で予測することが必要である。また、技術者の経験や知見に基づく、主観的もしくは定性的な判断ではなく、科学的かつ定量的な客観性をもつ手法を開発することが必要である。しかし、高度な劣化予測モデルではなく、土地改良区の職員等が十分に使用可能な、比較的簡易でかつ精度の高い劣化予測手法が必要である。また、農家や財政局等への説明責任を果たすためにも、より客観的な劣化予測手法の開発が望まれる。

補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢の検討については、前段階の施設の将来における劣化予測結果に基づき、いつ、どのような補修等の対策工法を実施することが適切であるか、それらの複数の選択肢を提示することが必要である。

複数の選択肢のライフサイクルコストの比較については、前段階で提示された複数の補修等の対策工法の選択肢の間のライフサイクルコストを比較し、最もライフサイクルコストが小さい選択肢を、最も経済的な対策手法として選択することである。なお、この際には、ライフサイクルコストの計算を、投資プロジェクトに関する経済分析手法として用いる際の留意点について十分に考慮することが求められる。

最適な全体計画の策定については、個別の施設について実施した前段階までの最もライフサイクルコストが小さい対策工法に要する維持補修費用を、地域全体で合計した場合に、地域全体における毎年の限られた予算計画との整合を図ることが必要である。そのため、地域全体で最適な計画となるように、個別の施設の対策工法の見直しをすることが必要である。

また、ストックマネジメントに関する今後の課題と対応の方向については、次のことが挙げられる。現場での実践に基づく継続的な技術向上の取組み、新技術導入と評価手法の確立、農業水利施設ストックの資産管理の高度化、技術者の育成強化と技術の普及である(農業土木事業協会、2007)。

現場での実践に基づく継続的な技術向上の取組みについては、全国で実施される施設の機能診断や対策工事の結果を分析・評価し、その成果を現場に還元することにより、ストックマネジメント技術の継続的な向上を図ることが重要な課題である。そのためには、ストックマネジメントには多くの技術的な課題があり、かつ、それに関する研究は緒についたばかりであることから、さらなる研究の積極的な推進が求められる。

新技術の導入と評価手法の確立については、近年、機能診断や施設の補修等に関する新技術が多く開発、提案されており、効率的なストックマネジメントを行うためには、これらの新技術の現場適用性や耐用年数等の効果

について適切な評価を行うことが必要である。このため、これまでの適用実績について現場条件等を踏まえた情報を収集・分析し、随時参照・提供できるような体制を整備することが必要であり、十分な情報が蓄積されていない新技術についても、技術的な評価手法の確立や採用のための手続きを整備していくことが重要である。

農業水利施設ストックの資産管理の高度化については、施設の劣化状態や適切な維持補修に必要な毎年度の予算等を金銭的価値で適切に認識する資産管理手法の開発と適用が必要である。これによって、ストックマネジメントの中長期的な戦略の立案や、財政支出と農家負担の年度間の平準化を図るといった高度なマネジメントも展望することが可能となる。このような目的を目指す会計手法は、道路構造物等の先進的な分野ではインフラ会計と呼ばれ、適用に向けた検討がなされている。農業水利施設におけるストックマネジメントにおいても、このインフラ会計の導入に向けた検討が必要である。

技術者の育成強化と技術の普及については、ストックマネジメントで行う施設の機能診断や対策工法の選定等については、基本的視点等を整理しマニュアル化するだけでは判定できない複雑さを有しており、現場毎に立地や社会的な条件等も総合的に加味した技術的な判断が重要な役割を果たすことから、この分野の知見と技術を持った技術者の育成強化が重要である。

4 農業水利施設のストックマネジメントに関する既往の研究

農業水利施設のストックマネジメントに関する、近年における既往の研究は、主に、機能診断手法、ライフサイクルコスト計算、補修工法、劣化予測に大別できるが、研究は緒に就いたばかりであり、その研究事例はまだ少ない。補修工法は、主に水路の継目の目地材の補修工法が中心であり、劣化機構ごとの劣化予測に関する既往の研究事例とともに、第IV章において整理する。また、劣化予測に関する試行的な事例については、第VI章において言及する。そのため、本章では、近年における機能診断手法とライフサイクルコスト計算に関する既往の研究を整理する。

近年における機能診断手法に関する研究としては、中ら（2001）、森ら（2004, 2005, 2008）、長東ら（2005）、工藤（2005）などの論文がある。これら近年における機能診断手法は、従来のコア抜き取りによる劣化診断ではなく、高度な機械を用いた非破壊診断手法が中心となっている。しかし、これらは、まだ試行的な段階に留まっており、現場で本格的に活用可能な段階にまでは至っていない。

中ら（2001）は、水田灌漑を目的とする既存の水路システムの水利機能について、対象とする水路システム、水管理方式などの水利機能およびその機能診断手法について考察した。

森ら（2004）は、実用化されている種々の非破壊調査技術を農業用水路の機能診断に適用できるか、現地適用試験を行い、連続画像スキャニングは、短時間にひび割れなどの劣化情報を電子媒体として記録できる優れた手法であることを明らかにした。

森ら（2005）は、農業水利施設のストックマネジメントに向けて、竣工・施工図面は残されていないとともに、既存の日常点検記録、変状データなどがほとんど残されていないことから、性能低下曲線が描けず、予防保全対策などによる長寿命化の効果の予測が困難であることを指摘し、ストックマネジメントに有用な、特に農業用水路に特化した変状データベースおよび機能診断システムの概要について報告した。

森ら（2008）は、開水路や水路トンネルの変状をデジタル情報として迅速かつ効率的に記録できる農業用水路壁面画像連続撮影技術および水路トンネル覆工背面の地山強度を簡易に測定できる技術を開発し、実証試験の結果、農業用水路の壁面情報を効率的かつ高精度に記録できること、また水路トンネル覆工背面の情報を簡易に把握できることを示した。

長東ら（2005）は、施設の調査、診断、設計・解析、補修・補強などの各段階で、今後早急に議論されるべき基本的な技術的課題を事例に基づいて、①農業水利構造物としてのコンクリート水路の耐久性を反映した許容ひび割れ幅、②沿岸に位置する排水機場基礎の最適な補修・補強工法を選定するための機能診断調査、③内圧管転用など用途変更も含めた既設構造物の補強、④継目など附帯工の更新に主眼をおく既設構造物の補修について整理して示した。

工藤（2005）は、今後とも水利施設が有している機能・効用を維持・向上させるためには、施設機能診断の判断基準を調査計画段階から用いるとともに、劣化に関する知見を深め、施設状態に応じた適切な改修・補修を行う必要性を指摘するとともに、施設機能診断の内容と判断基準を体系的に整理し、水利施設の劣化の特徴を考慮した補修・改修指標を定める必要性を指摘した。

ライフサイクルコスト計算に関する研究としては、中島ら（2004）、静間ら（2004）、蘭（2007）などの論文がある。これらのライフサイクルコスト計算は、試行的にライフサイクルコストを計算した事例であり、その事例の数も少ない。

中島ら（2004）は、管水路等の農業水利システムにおけるライフサイクルコストの試算例を示し、ライフサイクルコストの概念が、施設の補修箇所や改修工法の選定における意思決定の手段として有効であることを示した。

静間ら（2004）は、管水路の事故事例データを有効活用し、管水路網の施設の更新に関する意思決定情報として、経年劣化によるリスクを考慮したライフサイクルコストの比較手法を示すとともに、実在の農業水利施設で

ある管水路網に適用し、最適な更新計画を検討した。

蘭(2007)は、ある国営農業水利事業で整備された農業水利施設の機能診断結果をもとに、劣化モデルを作成して劣化予測を行うとともに、補修工事費に着目したライフサイクルコストの試算を行い、適切な補修工事計画の検討を行った。

5 経済分析手法としてのライフサイクルコスト計算

a 農業水利施設のストックマネジメントにおけるライフサイクルコスト計算

Ⅲ.3において、農業水利施設のストックマネジメントの基本的な考え方について整理した。その中で、複数の選択肢のライフサイクルコストを比較する段階では、複数の補修等の対策工法の選択肢の間のライフサイクルコストを比較し、最もライフサイクルコストが小さい選択肢を、最も経済的な対策手法として選択することから、この際には、ライフサイクルコストの計算を、投資プロジェクトに関する経済分析手法として用いる際の留意点について検討することが求められることを述べた。

しかし、投資プロジェクトの経済分析手法としては、便益と費用の双方を考慮した費用便益分析を用いる場合が多い。それに対して、農業水利施設のストックマネジメントにおけるライフサイクルコストの計算においては、施設の将来の劣化予測を行った後に、施設の劣化によって低下した性能を回復させるための補修・補強・更新等の時期と工法の複数の選択肢を提示し、それらのライフサイクルコスト LCC (life-cycle cost) を比較し、LCC が最も最小な対策工法を選択する。この場合、LCC の比較は維持補修といったプロジェクトへの投資に要する費用のみについて着目した経済分析を行う手法である。そのため、従来の便益と費用の双方を考慮した費用便益分析との相違や、LCC の比較を経済分析手法として利用する際の留意点を明確にすることが必要である。

そのため、LCC 計算に関する施設の維持管理という投資プロジェクトの経済分析手法としての妥当性についての十分な理解を得た上で用いることが必要であるため、LCC 計算の経済分析手法としての妥当性と、使用する際の留意点についての検討を行う。

投資プロジェクトの経済性評価、すなわちプロジェクトの実施に関する意思決定段階でのプロジェクトの経済分析には、広義の意味での費用便益分析が手法として用いられる場合が多い。その手法は大きく2つに分類できる。第1は、プロジェクトに関連する便益と費用の双方を対象とするものであり、代表的な手法として、割引現在価値 NPV (Net Present Value)、費用便益比 B/C (Cost Benefit Ratio)、内部収益率 IRR (Internal Rate of Return) が挙げられる。第2は、プロジェクトに関連する便益を考慮しないで費用のみを対象とするもので、その代表がライフサイクルコスト手法 (LCC 手法) である。また、

LCC 手法に似た手法として、LCC を施設の供用年数で除して1年間当たりの LCC を算出する年間平均費用法がある。

まず、これらの各種経済分析手法の概要と、各々の長所と短所について整理する。次に、農業水利施設のストックマネジメントと関連する土地改良法に示されている経済分析手法について整理する。そして、農業水利施設のストックマネジメントにおいて LCC 手法を投資プロジェクトの経済分析手法として使用する根拠と、使用する場合の留意点について整理する。

b 各種経済分析手法

(1) 費用と便益を考慮する経済分析手法

(i) 割引現在価値 NPV

割引現在価値 NPV は、プロジェクトから得られるキャッシュフローである便益の現在価値から、プロジェクトの投資金額である費用の現在価値を差し引いた金額で、プロジェクトから得られる正味のフリーキャッシュフローの現在価値である (Higgins, 霍見監訳, 1994)。個別のプロジェクトの経済性について評価する場合には、NPV が正の場合には当該プロジェクトへの投資が正当化される。また、複数のプロジェクト間の投資の場合は、各 NPV を比較することによって、単純に NPV が大きい方がプロジェクトの経済的価値が大きいと判断される。

NPV の計算において慎重さが要求されるのは、便益と費用の定量化と、割引率の決定である。便益と費用の定量化には、2つの課題がある。第1は、すべての便益と費用を計算に組み入れるのは困難であるため、どこまでの便益と費用を計算に組み入れるかを決定することが必要である。第2に、具体的に便益と費用を定量化することそのものに困難を伴う場合が多いことである。また、NPV 計算においては一定の割引率を用いて将来の便益と費用を現在価値に変換する。この際に、割引率の大きさによって NPV の計算結果に大きな影響が生じる。

(ii) 費用便益比 B/C

費用便益比 B/C は、プロジェクトの総便益を総費用で割って計算した比率である。その比率の高さで投資プロジェクトの望ましさが評価される。個別のプロジェクトの経済性を評価する場合には、B/C が1より大きい場合には、プロジェクトの便益が費用を上回ることから、その投資が正当化される。

投資プロジェクトの経済分析手法として B/C を用いることの問題として、次のことが挙げられる (例えば、野口, 1982)。① B/C は投資によって生じる富を絶対値で示すのではなく、比率で示されることに問題がある。そのため、複数のプロジェクトの経済性を比較するに当たって、B/C が正しい基準となるのは、一定の範囲内で費用を k 倍すれば便益も k 倍になるという規模に関する収穫不変の法則が成立する場合に限られるが、これが常に成立するとは限らない。②プロジェクトにおける同一

の効果と費用と考えるか、負の便益と考えるかで、計算値が大きく異なる。

(iii) 内部収益率 IRR

内部収益率 IRR とは、純便益の現在価値をゼロとするような割引率をさす。IRR を適切な割引率と比較し、IRR の方が高ければプロジェクトを採択する、というのが IRR による判定法である。

IRR の持つ問題点としては、次のことが挙げられる（例えば、グロービス・マネジメント・インスティテュート、1999：Boarman et al., 岸本監訳、2004）。①各年のキャッシュフローに正負の値が錯綜する場合には、IRR の解が存在しない場合がある。もしくは、解が一つに決定されとは限らない。②各年の割引率が変化する場合、IRR は適切な指標として機能しない。③ IRR は絶対値ではなく比率であるため、規模の相違を反映しない。したがって、規模の違う相互に排他的な一群の事業の中から一つを選ぶ時に使用するには不適切である。④施設の限定された供用期間を設定しないことには計算ができない。⑤絶対値ではなく比率のため、その値の意味するところを瞬時に判断することが困難である。⑥ IRR によって順位付けを行うと、より近い将来に便益をもたらすプロジェクトが不当に高く評価される傾向がある。

(2) 費用のみを考慮した経済分析手法

(i) ライフサイクルコスト手法 (LCC 手法)

ライフサイクルコスト手法 (LCC 手法) は、施設の初期建設から供用期間終了後の廃棄までの施設のライフサイクルを通して必要な総費用を計算する手法である。ここでは、施設への投資が生み出す便益は考慮せずに、費用のみに焦点を当てている。この意味では、LCC 手法は、費用便益分析のうち費用のみに着目した経済分析手法とすることができ、施設のライフサイクルにおける費用が最小となる選択肢を提示することができる手法として利用されている。また、維持補修に必要な予算を確保するための手段として、あるいは維持管理を戦略的かつ合理的に行うための手段として有効である（例えば、貝戸ら、2003）。

LCC 手法の課題として、次のような指摘がある。

米国連邦高速道路庁 FHWA (Federal Highway Administration) は、LCC 手法が適切に使用されるには、複数の投資の選択肢の中でプロジェクトの便益が同じことが前提として必要であることを指摘している (U.S. Department of Transportation, 2003)。もし、複数の投資の便益が異なる場合には、コストのみを基にして、各選択肢の経済性を比較検討することはできない。この場合には、ライフサイクルにおける費用だけではなく便益をも計測し、費用便益分析を行う必要がある。

宮本ら (1997) も、単純な LCC による費用の比較は各選択肢に要する費用を比較しているのであって、経済性を最適化することにはならないと指摘している。そして、経済性の最適化は、便益計算を組み合わせた最適化

モデルによってはじめて実現されるとしている。

小林ら (2003) は、便益を無視して LCC 手法を理論的に用いることが可能な場合として、次の条件を指摘している。社会資本が半永久的に供用される場合、社会資本が供用される限り便益が発生するため、維持補修戦略の検討に社会資本がもたらす便益を考慮する必要はなく、LCC を最小にするような維持補修戦略を検討すれば良いとしている。しかしながら、この場合には、社会資本の半永久的な供用期間中の便益が常に一定であることが前提となっている。すなわち、社会資本の供用期間を半永久的に延長するために、適時・適切に維持補修を実施することによって施設の発揮する性能と便益が常に一定に保たれることを前提としている。つまり、維持補修による性能回復レベルが一定でない場合や、将来時点で施設の転用や容量変更が予定されている場合には、施設の発揮する便益が変化するため、理論的には LCC 手法は適切ではないことを示している。

丹治・蘭 (2002) は、理論的には現在価値と維持管理費用の経年変化が事前に既知であれば、LCC に基づく施設の更新時期の決定は費用対効果を最大にするが、複数の投資の優先順位付けにおいては B/C と同様に人口密度が高く便益が大きい都市周辺における投資を優先する問題があることを指摘している。

(ii) 年間平均費用法

年間平均費用法は、LCC を施設の供用年数で除して 1 年当たりの投資の経済性を計測するものである。施設の供用期間が異なる代替案を比較する場合には、この年間平均費用法で用いることにより、1 年間の平均費用によって戦略の選択を行うことが可能である (Hudson et al., 笠原監訳、2001)。年間平均費用法の基本的な利点は、その簡便さと理解しやすさにある。

その一方で、年間平均費用法も LCC 手法と同様に、すべての代替案の便益が同一であるとの前提に基づいているため、費用のみに基づく比較が可能であるだけである (例えば、Hudson et al., 笠原監訳、2001)。また、貝戸ら (2005) は、施設の劣化進行が確定的ではなく不安定性がある場合には、単純に年間平均費用法を用いることができないことを指摘している。さらに、すべての代替案の施設の供用期間中に割引率が変動する場合には、年間平均費用法を用いることは不適当であることを指摘している。

c 土地改良法で用いる経済分析手法

農業水利施設の事業実施と関連する土地改良法では、土地改良事業実施の際には経済分析を実施することを義務づけており、その際には B/C に相当する総費用総便益比を用いることとしている。

土地改良法に基づく事業の経済性評価は 2 つの面から行うことが義務づけられている (農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課監修、2007)。

第 1 は、経済性の側面からの評価は、国民全体として

土地改良事業を行うことが長期的に見て経済的であるかどうかの評価を行うものであり、総費用と総便益を比較し1.0以上となることが採択の要件となっている。総便益とは、建設した施設の耐用年数期間内に発生する各年の便益額を社会的割引率により、計画時点の価値（現在価）に評価換えをして合算したものである。事業実施の基本的要件に、「すべての効用がそのすべての費用をつぐなうこと」とされ、直接効果のみならず、事業の公益的な効果を含めたすべての効果と国・地方公共団体の補助金等を含めたすべての費用を対比し、事業の効率性を検証することとしており、経済性評価を行うことが義務付けられている。その際、B/Cに相当する総費用総便益比を用いることとされている。なお、現在、わが国の土地改良事業等の公共事業では、社会的割引率として4%が用いられている。

第2は、負担能力の側面からの評価である。事業に要する費用のうち、農家が「負担することとなる金額が、これらの者の農業経営の状況からみて相当と認められる負担能力の限度を超えることとしないこと」とされ、農家負担金について償還の可能性を検証することとしている。

d ライフサイクルコスト手法が使用される根拠

cに示したように、農業水利施設に関する事業実施に関連する土地改良法では、事業実施の際の経済分析手法としては、B/Cに相当する総費用総便益比を用いることとしている。また、通常、投資プロジェクトの経済分析手法としては、NPV, B/C, IRRといった便益と費用の双方を考慮した手法を用いる場合が多い。

その一方で、農業水利施設のストックマネジメントで用いることとされているLCC手法は、投資のもたらす費用のみを考慮した簡易な費用便益分析手法である。ストックマネジメントにおいても、理論的には、投資の経済分析の際には、費用のみならず便益をも考慮の対象とした方が望ましいが、LCC手法は次のようなさまざまな利点を有するため、農業水利施設のストックマネジメントの経済分析手法として用いることとされている（北村ら、2007b）。

第1には、便益の計測が困難であることから、便宜的に便益の計測を捨象して経済性を分析することが可能であるからである。特に、既存施設の維持補修が中心となる、農業水利施設のストックマネジメントにおいては、維持補修に要する費用の計測は比較的容易である。その一方で、便益の計測は、どの便益を対象とするか、また、それをどのようにして金銭価値に換算するかといった、種々の問題を含むことから、費用の計測に比較して困難である。

第2には、異なる複数の代替案の中で、便益が同じと解釈して意思決定を行っても大きな誤りが生じる可能性が小さいことである。既存の個別施設の維持補修によって生じる便益は、新規事業の実施に伴う便益と比較して

小さい。また、既存施設の適切な維持補修は、施設が同レベルの機能を維持することを目的に実施される場合が多い。そのため、既存施設の維持補修に関する複数の代替案によって生じる便益が同じと解釈しても、大きな誤りが生じる可能性が小さい。

第3には、便益計算を除外することによって、計算の簡略化と時間の短縮が可能となることである。新規事業の調査・設計段階では、事業に必要な予算額が大きいため詳細な経済分析が必要となるとともに、調査・設計に必要な全ての事項を準備するのに数年間を要する場合が多い。一方、既存の施設の維持補修に関する意思決定の場合には、個別施設の維持補修に必要な費用が小さいとともに、短期間での意思決定が求められる。そのため、計算が困難で時間を要する便益計算を省略し、費用のみを分析対象とすることによって、計算の簡略化と時間の短縮を図ることが可能である。

第4には、施設の適切な維持補修は限られた予算制約下で行わなければならないため、維持補修に要する費用の最小化が、農業水利施設のストックマネジメントの目的の一つとなることである。公共事業の予算削減傾向の中で、施設の老朽化が進行し維持補修費の高騰が予想されている。また、農業水利施設は社会資本として国民的財産であることから、納税者である国民から求められる予算費用の最小化要求に対応することが必要である。さらに、農業水利施設の維持補修には受益農家の経済的負担も必要となることから、便益の最大化よりも費用の最小化が重要となる。

第5には、意思決定者が理解しやすい手法であることである。既存施設の適切な維持補修においては、必要な予算の確保または限られた予算内での実施可能性の検討が求められることから、意思決定者は必要な費用に関心をもつ場合が多い。そのため、費用に着目したLCCは、NPV, B/C, IRRといった便益を含む手法に比べて、意思決定者にとってその数値が示す意味を理解することが容易である。

e ライフサイクルコスト手法適用上の課題

このように、プロジェクトの費用のみを対象としたLCC手法は、簡易な費用便益手法であり、農業水利施設等の社会資本の経済分析手法として有用である。そのため、農業水利施設のストックマネジメントにおける経済分析手法として用いることとされていると考えられる。

しかしながら、実際にLCC手法を農業水利施設のストックマネジメントの経済分析手法として用いる場合には、留意すべき課題が存在する。LCC手法を実際に適用する場合に留意すべき主要な課題としては、次のものが挙げられる（例えば、U.S. Department of Transportation, 1999）。①適切な割引率の選択。②事業者費用と利用者費用。③施設の供用年数。そのため、これらの留意すべき課題について検討する。

(1) 適切な割引率の選択

便益や費用が長期間にわたって発生する場合、異時点間の便益や費用を同一のウェイトで評価できないことは明らかである。なぜなら、将来時点における財やサービスは、現時点の同一の財やサービスに比べて、低い評価しか受けられないからである。そのため、将来に発生する便益や費用は、適切な割引率を用いて現在価値に変換することが必要である（例えば、野口、1982）。

公共部門が投資の経済分析に使用する割引率は、社会的割引率と呼ばれる。どのような社会的割引率を使用するかによって、LCCの計算結果に大きな影響を与えるので、社会的割引率の決定は極めて重要である。すなわち、LCC手法において社会的割引率を用いる場合には、使用する社会的割引率の大きさによって複数の選択肢間のLCCの大小が逆転し、施設の補修計画の選定に関する意思決定に大きな影響を与える可能性があるため十分な注意を要する。例えば、大きな社会的割引率を用いると、遠い将来に実施する大規模な改修に係る費用の割引現在価値が小さくなることから、近い将来に軽微な補修を実施するよりも、遠い将来まで補修を実施せずに放っておき、大規模な改修を行う方が割り引かれたLCCが小さくなる可能性がある。

このように、LCC計算に用いるべき社会的割引率の決定には慎重さが求められる。しかしながら、社会的割引率は、構造物の重要度とは無関係に、各国のマクロ経済の成長率や公定歩合等に連動して、政府の検査・監視機構によってあらかじめ決められている場合が多い（例えば、Boarman et al., 岸本監訳, 2004）。わが国の現在の公共事業の社会的割引率は4%に統一されている。この理由は、近年20年間及び10年間の国債及び地方債の利回りは平均で約4.5%～2.8%となっていることによる。その一方で、阪田・林山（2002）は、わが国で用いられている社会的割引率の4%という値には客観的な根拠は乏しく、社会的割引率の正確な推定の必要性を指摘している。

また、社会的割引率を用いてLCCを計算する場合には、特定の社会的割引率を用いてLCC計算を行うだけでなく、感度分析を行うことが望ましい。感度分析とは、使用する社会的割引率を変化させた場合に、計算されたLCCの結果にどの程度の変動が生じるかを分析することである。LCCの計算において社会的割引率を使用する場合には、どの程度の大きさの社会的割引率を使用するかによって、LCCの計算結果が変動し、その結果、どのタイミングでどのような対策工法を実施するかという意思決定に影響を与える。そのため、LCC計算に使用する社会的割引率を変動させて、その結果が意思決定にどの程度影響するかを定量的に把握する必要がある。

さらに、LCC手法において社会的割引率を用いるべきかどうかについては、合意が得られていない。具体的には、米国連邦高速道路庁FHWA（Federal Highway

Administration）が開発した橋梁マネジメントシステムであるPONTISやその他の最適補修モデル（例えば、栗野ら、2001：慈道・小林、2003）においては、割引率を用いている場合が多い。割引率を用いる場合には、経済理論と整合が取りやすいのが特徴である。その一方で、割引率を用いる場合には将来のLCCを割り引くため、供用年数の長い社会資本においては、単純なLCCの比較では長寿命化戦略を正当化できないことがあること（貝戸ら、2005）や、往々にして現場の実務者の直感と矛盾する評価結果をもたらすこと（小林、2005）が指摘されている。このような問題を回避するために、割引率を用いずにLCCを直接評価する方法が用いられる場合がある。

また、宮本ら（1997）は、貨幣価値の上昇を考慮した割引率については、あくまで維持管理費用を投資として考えた場合に考慮すべき項目であるため、公共構造物のように補修・補強に費用を投じることが投資という概念に当てはまらないものについては当面のところ考慮する必要がないと指摘している。

さらに、西村（1994）は、LCC計算の目的が限られた資本の下での施設の最適活用ではなく、毎年確保される予算額を最小化することが目的である場合には、割引率を用いずに年間平均費用法を使用することを提唱している。

このように、LCC手法に関連する社会的割引率には、さまざまな議論があり、これらを考慮に入れて、LCC手法を用いることが必要である。

(2) 事業者費用と利用者費用

農業水利施設等の社会資本のLCC計算における費用には、補修等の事業を実施する場合に要する事業費と、施設が破損した場合や補修等の事業を実施する場合に利用者が被る負の便益がある。FHWAは、前者を事業者費用、後者を利用者費用と呼んでいる（例えば、U.S. Department of Transportation, 1999）。橋梁等の社会資本のLCC計算では、多くの場合において事業者費用のみをLCC計算の対象としているが、可能であれば利用者費用も含むことが望ましい（例えば、U.S. Department of Transportation, 2002：中谷、2004）とされている。

農業水利施設のLCC計算における費用についても、補修等の事業を実施する場合に要する事業費と、施設が破損した場合や補修等の事業を実施する場合に利用者が被る負の便益がある。しかしながら、土地改良事業においては、ここでいう事業者費用においても事業実施主体の公的部門が全額を負担するわけではなく、農家の受益者負担も存在することから、問題が複雑となる。そのため、ここでは問題を簡略化するために、事業費のうちの農家の受益者負担は事業者費用に含まれるものとし、施設が破損した場合や補修等の事業を実施する場合に農家等が被る負の便益を利用者費用と呼ぶこととする。どの費用をLCC計算に組み込むかを決定する場合には、ま

ず LCC 最小化に基づく意思決定が誰のためのものかを考慮することが必要である。農業水利施設の LCC 最小化について議論される場合には、公的部門の限られた予算制約下でいかにして最小の費用で施設の長寿命化を図るかという観点で捉えられている場合が多い。この場合は、事業者費用のみを対象とした LCC を最小化することが目的となる。

農業水利施設に関する事業者費用としては、FHWA の道路舗装に関する分類 (U.S. Department of Transportation, 1998) を基にすると、調査設計費用、建設費用、維持修繕費用、改築費用、廃棄処分費用、関連行政費用等が考えられる。一方、利用者費用としては、水路の物的損傷による断水等の損害が考えられる。例えば、中島ら (2004) は、管水路の断水による損害費用を簡易な確率的手法で求める方法を提案しているが、これは利用者費用に相当する。

しかしながら、施設の破壊に伴う損失については、すべての要因を定量化することが出来ず、その評価が困難であることから、LCC 計算にこのような利用者費用を含まない場合が多い。一方で、LCC 手法は施設の建設や維持補修といった事業者費用だけではなく、利用者費用も含むべきであるとの指摘がある (例えば、U.S. Department of Transportation, 2002 : 中谷, 2004)。そのため、可能であれば、事業者費用だけではなく利用者費用も LCC 計算に含むことが望ましい。

(3) 施設の供用年数

施設の供用年数をどのように決定するかが、LCC の計算結果に影響を及ぼす。施設の供用年数を的確に予測することは、施設の劣化速度の予測と密接な関係がある。施設が供用年数に達した場合には、その施設を廃棄または全面更新することとなる。そのため、施設の予測される余寿命が、複数の補修時期と工法の選択肢の中から LCC 計算の比較に基づいて適切な時期と工法を選択する際の、劣化速度が異なる選択肢の比較の方法や LCC として計算する期間の決定に影響を与える。

土地改良事業においては、事業の調査・設計段階における経済分析に用いる施設の耐用年数は、所与のものとして扱われている (農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課監修, 2007)。しかしながら、現実には、何らかの理由によって耐用年数よりも早期に施設の全面更新が実施される場合や、一方で所与の耐用年数を経過しても要求される性能を発揮する場合もあり、所与の耐用年数と実際の供用年数は異なると考えられる。また、予防保全によって適時に適切な維持補修を実施することによって施設の長寿命化を目指すことが農業水利施設のストックマネジメントの目的の一つであることから、適切なストックマネジメントの実施によって農業水利施設の供用年数がどの程度延長されるかを推定することが、LCC 計算には必要である。

施設の供用年数の推定事例として、次のものがある。

貝戸ら (2003) は、LCC の信頼性向上を目的として、構造物の劣化予測手法についてニューヨーク市が過去 9 年間 (1992 - 2000 年) に実施した 828 橋梁に対する目視検査結果を基にした実証的検討を行った。そして、その劣化予測の応用例として、適切な維持管理が橋梁の予測寿命を年々増加させることを定量的に示した。

農業水利施設についても、上記の橋梁の事例のように、予防保全による適時・適切な維持補修によって、施設の供用年数がどの程度延長されるかを推定することが必要である。

6 農業水利施設のストックマネジメントへのインフラ会計の導入

a 農業水利施設へのインフラ会計導入の必要性

Ⅲ.3 において、農業水利施設のストックマネジメントに関する今後の課題と対応の方向について整理した。その中で、農業水利施設ストックの資産管理の高度化において、インフラ会計の導入に向けた検討の必要性について述べた。すなわち、農業水利施設ストックの資産管理の高度化については、施設の劣化状態や適切な維持補修に必要な毎年度の予算等を金銭的価値で適切に認識する資産管理手法の開発と適用が必要である。これによって、ストックマネジメントの中長期的な戦略の立案や、財政支出と農家負担の年度間の平準化を図るといった高度なマネジメントも展望することが可能となる。このような目的を目指す会計手法は、道路構造物等の先進的な分野ではインフラ会計と呼ばれ、適用に向けた検討がなされている。農業水利施設におけるストックマネジメントにおいても、このインフラ会計の導入に向けた検討が必要である。

ストックマネジメントによって、農業水利施設の適切な維持補修を中長期的に実施していくためには、個別施設の LCC 計算時における最適な維持補修計画を策定するだけではなく、その後の中長期的視点からの、施設の劣化状態を考慮に入れた資産価値の推移や、将来に渡って必要な毎年度の維持補修費の適切な把握が必要となる。しかしながら、わが国の農業水利施設の大半の管理を担っている土地改良区は、台帳に施設の建設年や補修年等の情報を記録しているが、当初建設費以外に施設の資産価値等に係るデータを把握していない場合が多い。そのため、効果的・効率的に施設の資産価値や将来の維持補修費等を適切に表現し認識する手法の適用について考える必要がある。

道路等の他の先進的な分野においては、民間企業の会計手法を活用して、施設の資産価値等を財務諸表に金銭的に表示し適切に認識するインフラ会計の導入についての研究が進められている (例えば、江尻ら, 2004)。そのため、農業水利施設へのインフラ会計の導入の必要性と課題について検討する。

農業水利施設等の社会資本を対象としたインフラ会計

は、公的部門の会計である公会計に内包されるものである。そのため、まず、農業水利施設へのインフラ会計導入の検討に当たって、公的部門の会計手法である公会計に、民間の企業会計手法を導入し、社会資本の価値を金銭的に財務諸表に計上する、このような新たな公会計導入の動向について整理する。具体的には、国民経済計算 SNA、米国会計基準審議会、わが国の財務省（旧大蔵省）、総務省（旧自治省）、国土交通省（旧建設省）、日本公認会計士協会が、各々、提案している新しい公会計制度について整理する。

次に、農業水利施設の中長期的で適切な維持補修に必要なインフラ会計の導入において考慮すべき課題について整理する。具体的には、インフラ会計導入のメリット・デメリット、インフラ会計導入の課題として、農業水利施設の金銭的評価手法、農業水利施設の劣化と減価償却の扱い、農業水利施設の廃棄時の取扱いについて整理する。

b 新たな公会計導入の動向

(1) 新たな公会計導入の動き

農業水利施設等の社会資本を対象としたインフラ会計は、公的部門の会計である公会計に内包されるものであることから、新たな公会計導入の動きについて整理する。国や地方公共団体においても、公的部門の保有する資産や負債を適切に表示することが可能な新たな公会計を導入する動きがある。国際的な事例としては国際的な公会計の基準である国民経済計算 SNA（System of National Accounts）があり、海外の事例としては米国の公会計基準審議会制定の公会計報告制度がある。一方、わが国の公会計整備に関する動きは、大きく分けて財務省（旧大蔵省）と総務省（旧自治省）の2つの系列に分けることができる。財務省（旧大蔵省）は国全体の財務諸表作成のための制度づくりを目指しているのに対して、総務省（旧自治省）は地方公共団体の財務諸表作成のための制度づくりを目指している。また、国土交通省（旧建設省）が社会資本と企業会計手法との関係についての研究を行うとともに、日本公認会計士協会が独自に「公会計原則（試案）」を発表している。

(2) インフラ会計導入の目的

インフラ会計は、社会資本の価値を適切に評価することにより、納税者である国民への説明責任向上と戦略的インフラ管理を目指すもの（益山・竹内，2004）である。この場合、ストックとしての社会資本の評価は予算などの財務的な評価との連動も容易となるよう、金銭価値での資産評価額を用いる。インフラ会計では、企業会計的手法を用いて社会資本の金銭的価値と付随する維持補修費等の諸費用などを一元的に記載する貸借対照表などの財務諸表を作成することが可能である。

江尻ら（2004）は、道路等の社会資本の会計情報は、次の3つの役割を有することを指摘しており、これらは、農業水利施設にも該当するものである。

第1は、説明責任の確保であり、公的部門が施設の利

用者と納税者である国民に対しての説明責任を有することである。施設の維持管理を委託されている土地改良区を含む広い意味での公的部門は、国や県が公共財である農業水利施設の整備と維持管理を土地改良区に管理委託しており、施設の資産価値や建設・維持補修等の実施状況を納税者に説明する義務を有するとともに、維持補修・更新には受益者である農家への説明責任をも有する。

第2は、資産の効率的な管理であり、市場原理が適用されない社会資本に関する効率的な資源配分を達成することである。適切な監視を通じて、社会資本に関する資源の非効率的な配分を防止するためには、設計、建設、維持補修、廃棄に至る社会資本である農業水利施設の LCC を適切に会計制度上で表現し、施設の整備・維持補修に関する会計情報の継続性や正確性を確保することが必要である。

第3は、資産の戦略的維持管理であり、インフラ会計が、社会資本の性能水準を持続的に維持するための方策が適切に実施されているかを明示するとともに、それに要する予算確保に必要な情報を提供することである。

(3) 公会計制度のレビュー

(i) 国民経済計算 SNA

国際的な公会計の基準として、国民経済計算 SNA（System of National Accounts）がある。SNA は、国際連合が示す基準にしたがって、世界各国がなるべく相互比較可能なかたちで、各々の経済の毎年の循環の姿を体系的に明らかにすることを目的とする統計である（中村，1999）。SNA は、次の5つの主要な勘定から構成される。①国民所得勘定、②産業連関表、③国際収支表、④資金循環勘定、⑤国民貸借対照表。このうち最後の国民貸借対照表に社会資本を含む有形固定資産が含まれる。SNA は1968年に制定されたが、経済構造変化への対応、諸概念の一層の明瞭化、他の統計体系との調和を目的に、1993年に改訂された。SNA は発生主義に基づいているが、わが国の公的部門の国民経済計算は現金主義に基づいており、SNA 計算においては現金主義会計に基づく財政統計に依拠して推計することで対応している（江尻ら，2004）。このため、国際的な公会計基準である SNA に適切に対応するためには、公的部門の財務諸表は、現金主義から発生主義への変換が求められている。ここで、現金主義とは、現金の受け取り・支払がなされた時に簿記取引を計上する会計処理手法であり、発生主義とは、収益・費用の対象となる役務の提供や事実が発生した時点で簿記取引を計上する会計処理手法を言う。

(ii) 米国会計基準審議会

米国の公会計基準審議会 GASB（General Accounting Standard Board）は、1999年に地方政府の新しい公会計報告制度を制定した。その基本となる基準である GASB 34 では、地方政府に1980年以降に取得もしくは追加・補修された主要な社会資本を財務諸表に計上することを求めている（U.S. Department of Transportation, 2000）。

GASBは1984年に設立され、地方政府の財務状況を評価するために必要な会計基準を設立する機関である。

GASB 34は、社会資本の資産価値減少を会計処理する手法として、地方政府が減価償却もしくはそれに替わる手法を使用することを認めている。しかしながら、減価償却に替わる手法を用いる場合には補足情報として、資産の現在価値を表示すること、資産状況を文書化すること、資産が事前に設定されたレベルに維持されていること、資産の維持に必要な費用を見積もることの4点を最低限の必要事項として要求している。この手法を修正アプローチと呼んでいる。

GASB 34は、地方政府の公会計については、従来の現金主義ではなく、発生主義によることを原則としている。この発生主義によって、地方政府の事業実施結果、財政状況、いつどのようにして行政サービス供給に必要な予算が支出されたか、地方政府間の財務状況の比較に必要な情報提供が可能となる。

一方、米国連邦高速道路庁FHWA (Federal Highway Administration)は、社会資本への減価償却の適用には、以下の問題があると指摘している (U.S. Department of Transportation, 2000)。**①**減価償却を適用するには社会資本の供用期間を特定することが必要であるが、長期にわたって供用される社会資本の供用期間を特定することが困難であること。**②**地方政府の予算支出のうち、どの支出項目を資産化し減価償却の対象とするかを決定することが困難であること。**③**供用期間を満了した除却時の残存価値が、維持補修によって変動し正確に計上することが困難であること。

(iii) 財務省 (旧大蔵省)

財務省においては、2000年に「国の貸借対照表作成の基本的考え方」をとりまとめ、国の貸借対照表 (試案)を1998年度決算分より公表している。また、財政制度等審議会は、2003年に「公会計に関する基本的考え方」を取りまとめている。その中で、財政の透明性の向上と予算の効率化を目的に、今後のわが国における公会計のあるべき姿について、公会計の担うべき意義、目的を検証するとともに、公会計として開示すべき情報等に関する総合的な検討を行っている (財政制度等審議会, 2003)。

その中で、民間の企業会計との比較の中で、わが国の財政制度には次のような問題があることを指摘している。**①**ストックとしての国の資産・負債に関する情報が不十分であること。**②**フローの財務情報とストックに関する財務情報の連動がないこと。**③**予算執行の状況が理解できるのみで、当該年度に費用認識すべき行政コスト、事業毎に間接費用を配賦したフルコストや将来の維持管理費用などを加味したLCCが明らかでないこと。

また、公会計の意義・目的として、**①**議会による財政活動の民主的統制、**②**財政状況等に関する情報開示と説明責任の履行、**③**財政活動効率化・適正化のための財務

情報を指摘している。特に**③**において、費用や便益に関する客観的な情報を活用して歳出の合理化を進めるとともに、予算編成のプロセスにおいて、事業の将来コストや予算の執行実績の状況を的確に把握し、それを予算の編成にフィードバックすることの重要性を指摘している。また、予算及び決算に関する論点として、発生主義の考え方と将来推計あるいは間接費用の配賦といった手法を活用すべき対象の一つとして、社会資本整備における維持管理費用を含む、施設の初期建設から廃棄までに必要な総費用であるLCC等の事前情報を挙げている。

また、2004年に省庁別財務諸表の作成基準を取りまとめ、2003年度決算分から省庁別財務諸表を公表している (財務省, 2004)。本作成基準においては、社会資本といった公共用財産などの価額が管理されていないものについては、歳入歳出決算及び国有財産台帳等の計数に基づき、必要に応じて過去の事業費を累計して作成することとしている。

(iv) 総務省 (旧自治省)

総務省は、地方公共団体の会計に発生主義等の企業会計手法の導入を推進している。地方公共団体決算書にストック情報が欠落している欠陥を補うことを目的として、1981年に地方公共団体の連結・総合決算に関する研究、1986年に地方公共団体のストックの分析評価手法に関する調査研究、さらに、1987年に企業会計の手法による財政分析と今後の財政運営のあり方に関する調査研究を実施し、決算統計から貸借対照表を作成する方法とそれに基づく財政分析手法についての研究成果を発表している (筆谷, 1998)。さらに、2000年3月及び2001年3月に、地方公共団体の総合的な財政分析に関する調査研究会報告書により、貸借対照表や行政コスト計算書などの作成方法を示し、多くの自治体等で貸借対照表等の作成が行われている (土木学会, 2005)。

2006年5月には、新地方公会計制度研究会報告書を発表し、地方公共団体への公会計導入をさらに進めている。報告書では、地方公共団体の公会計は、国の会計制度との整合性を図ることとしている。そして、地方公共団体が財務諸表を作成する目的は、住民に対しての説明責任を達成するために、地方公共団体の、**①**財政状態、**②**業績、**③**純資産の変動、**④**資金収支の状態に関する情報を提供することとしている。

また、財務省と同様に、現金主義ではなく発生主義を導入しているとともに、社会資本の貸借対照表価額の測定は、原則として過去の事業費等を累計することによって取得原価を推計することとしている。これは、社会資本については、道路台帳のように管理台帳が整備されていることを前提としているものである。一方、新地方公会計制度研究会報告書は、総務省方式の課題として次の点を指摘している (総務省, 2006)。**①**有形固定資産は、決算統計の普通建設事業費の累計値を取得原価として計上し減価償却計算を行っているが、計算が簡便であり有

形固定資産の除売却を反映していないため、実態と合わない可能性があること。②有形固定資産計上額の基礎となる個別の資産台帳が整備されていないため、貸借対照表と連動した個別の資産管理が困難であること。

(v) 国土交通省 (旧建設省)

国土交通省は1997年に、英国、米国、ニュージーランド等の公会計への発生主義・複式簿記の採用を行っている先進諸国の事例研究を行い、社会資本と企業会計の手法に関する研究を実施している。それを基にして、わが国における社会資本に関する企業会計の手法導入の意義や問題点について考察している。

その中で、わが国の公会計の問題点と課題として、次の4点を挙げている(建設省建設政策研究センター、1998)。

- ①単式簿記による記帳のため、会計帳簿から誘導的にフローとストックを有機的に結びつける財務諸表である貸借対照表と損益計算書を作成することができないこと。
- ②現金主義会計の採用のため、各会計年度の歳入歳出を現金の収支の事実に基づいて会計処理するだけで、歳入歳出決算報告書は損益計算書等と異なり、歳入歳出について適正な期間的対応ができないこと。
- ③ストックに関する財務情報が存在しないことから、社会資本に関する物理的な管理と財務的な会計システムの間に関連性がないこと。
- ④社会資本に関する新規、更新、修繕、維持補修という内容別の区分整理がなされていないことから、予算削減の際に最低限必要な維持管理費をも一律に削減される恐れがあること。ここで、単式簿記とは、簿記取引をただ1つの会計表に記録・集計する方法を言う。複式簿記とは、すべての簿記取引を、資産、負債、資本、費用又は収益のいずれかに属する勘定科目を用いて、貸方(左側)と借方(右側)に同じ金額を記入する仕訳と呼ばれる手法により、貸借平均の原理に基づいて組織的に記録・計算・整理する方法を言う。

企業会計の手法の意義について、アカウントビリティの向上と資産管理の改善を挙げている。アカウントビリティの向上は、企業会計の手法の導入によって、会計年度間の公平の確保と民間企業との比較が可能となることであり、資産管理の改善は、投資効率の向上、既存資産の効率的利用の促進、費用便益分析への応用、高度経済成長期以降の社会資本の適正な更新・修繕と財政措置のリンクが可能となることである。

その一方で、残された論点として、社会資本の資産計上の是非、資産評価の方法、減価償却等を挙げている。社会資本の資産計上の是非については、資産計上によってアカウントビリティの向上に寄与する一方で、再調達価格等の算出に係る技術的困難性、バイアスがもたらす検証可能性の低さ等のデメリットを指摘している。資産評価の方法については、時価評価と取得原価の二つの方法について比較し、双方のメリットとデメリットについて考察している。減価償却については、会計年度間の公平に資するとともに、適正な維持管理等に係る費用の配

分が可能となる一方で、社会資本の耐用年数の不確実性による減価償却費の算出の技術的困難性を指摘している。

(vi) 日本公認会計士協会

日本公認会計士協会は、2003年に公会計原則(試案)を発表している。これは、日本公認会計士協会は公会計の原則を設定する権限を有するものではないが、公会計分野において先駆的な役割を果たすために、公会計の試案を研究報告としてまとめたものである(日本公認会計士協会、2003)。公会計原則(試案)では、公会計の目的は、①財務報告利用者による公的部門の説明責任の遂行状況の評価に資すること、②財務報告利用者の合理的な意思決定に役立つこと、としている。

なお、社会資本の評価価額については、再調達価額などの時価を用いることによって、将来の当該資産の取替更新に要する資金需要に関する情報を提供することを提唱している。また、社会資本のサービス提供能力の低下の様子は多様であるため、一律に施設の供用期間を定めることは極めて困難であることから、減価償却の採用は適当ではないことを指摘している。そのため、減価償却に替わる手法として、時価をベースにした再調達価額の期首と期末の差額を取替更新費の見積額として計上する方法である更新会計によることを提唱している。

更新会計とは、社会資本等の供用年数を正確に見積もることが不可能であるため、合理的計算によって見積もった取替更新期間に係る再調達額の増差額に基づいて減価償却費に代わる取替更新費を各会計年度に費用計上する方法であり、不確実な見積使用可能期間を想定するよりも適切なサービス提供能力の減少の測定が可能となるものである。

この場合、社会資本としては当初の取得価額を貸借対照表に計上しておき、そのサービス能力の減少を表す再調達価額の増差額に基づく取替更新費累計額を貸借対照表の貸方に記帳する方法を提案している。

c 農業水利施設のストックマネジメントへのインフラ会計の導入の課題

(1) インフラ会計導入のメリット・デメリット

適時・適切な維持補修を行うことによって農業水利施設の長寿命化とLCCの最小化を目指すストックマネジメントにおいては、農業水利施設の現在価値、将来に必要となる維持・補修・更新費等を適切に公会計の中に反映させることが必要であり、農業水利施設に関するインフラ会計の導入が望まれる。なぜなら、インフラ会計の導入によって、納税者である国民だけではなく、受益農家等の全ての関係者に、施設の資産価値や将来の維持補修等に必要な金銭的情報が提示されることにより、施設を大切に利用しようとする意欲の向上や、将来の施設の維持・補修・更新等への的確な意思決定に資することが可能になるからである。

また、国レベル等における従来からの公的部門の会計

制度においては、単年度の予算執行を主目的としており、施設に関わる金銭的価値や維持補修費といった諸費用を中長期的に把握することができない。加えて、従来からの公的部門の会計制度では、中長期的視点からの、施設の経年的価値の変化や、要求される維持補修費額と実際の予算費用の妥当性等を的確に把握し、中長期的戦略立案に資する情報を提供することができない。そのため、国レベルにおいても土地改良区レベルにおいても、農業水利施設の中長期的な戦略的なストックマネジメントを実施するには、施設に関する適切な会計情報を包括的に把握することが可能なインフラ会計の導入が望まれる。

なお、農業水利施設へのインフラ会計を導入する際には、そのメリットとデメリットを十分に考慮することが必要である。メリットとしては、以下のことが考えられる。農業水利施設の資産価値を金銭換算することによって、施設の劣化による資産価値の状況を金銭価値で表現することが可能となる。これによって、毎年の施設の劣化状態の推移を、財務諸表上に記載された施設の金銭価値で把握することが可能となるとともに、将来的に必要な維持管理費や補修費等を中長期的に把握することが可能となる。それによって、中長期的視点からの、施設の劣化による経年的価値の変化や、要求される維持補修費額と実際の予算費用の妥当性等を的確に把握し、中長期的な戦略立案に資する情報を提供することができる。また、納税者である国民、受益者である農家、国及び地方公共団体や土地改良区等のさまざまな関係者への説明責任を確保することが可能となる。その一方で、デメリットとしては、導入に関して解決しなければならない課題が多く、実際の導入には相当の時間とエネルギーが必要となることが挙げられる。解決すべき課題は、施設の資産価値や劣化状態と合致した減価償却手法の選定が困難であり、施設の実態と財務諸表上の資産価値に乖離が生じる可能性があることなどである。そのため、定期的な資産価値の算定や減価償却方法の見直しが必要となると考えられる。また、会計手法の変更に伴う初期段階でのコストや手間の負担が大きいとともに、導入後にも導入した会計手法を適切に運用していくためにも相当のコストと手間が必要となると考えられる。

(2) インフラ会計導入の課題

農業水利施設にインフラ会計を導入する際には、複式簿記と発生主義に基づく企業会計手法を原則とするが、次のような会計上の問題をどのように扱うかが課題となる。すなわち、①農業水利施設の評価時点での価値の金銭的評価手法、②施設の劣化と減価償却の扱い、③施設の廃棄時の取り扱い。そのため、これらの課題の取り扱いについて考察する。

(i) 農業水利施設の金銭的評価手法

農業水利施設は有形固定資産であり、その資産価値が貸借対照表上に金額ベースで適切な評価額として表示されることが必要である。しかしながら、1つの資産に対

して、必ずしも1つの評価額が対応するわけではない。資産評価額の概念として、①取得原価、②再調達価額、③割引現在価値、④正味実現可能価値の4つが考えられる(江尻, 2006)。取得原価は、取得時に支払われた現金または現金同等物、あるいは取得するために提供した対価の公正価格である。再調達価額は、保有している資産を測定日で再取得した場合に支払われる現金または現金同等物である。割引現在価値は、通常の事業活動の過程で期待される将来キャッシュ・フローの割引現在価値である。正味実現可能価値は、現時点での通常の売却によって獲得できる現金または現金同等物である。

農業水利施設の場合には、評価時点における施設の性能提供能力を適切に貸借対照表に反映させることが重要であり、その観点からは、測定時での再取得価額を示す再調達価額が望ましいと考えられる。これは、取得原価方式の場合には、過去に遡って取得原価を示す台帳が適切に保存されていることが必要である。また、初期建設費用のみならず、その後の維持補修費等の詳細な情報も必要となるが、そのような詳細情報が必ずしも正確に台帳に記載され保存されているとは限らないからである。また、農業水利施設は、公共性が高く営利事業に供されていないため、一般に民間企業のファイナンスの観点から使用される割引現在価値と正味実現可能価値の採用は困難であると考えられる。

また、江尻(2006)は、再調達価額を用いる場合の利点として、次の2点を挙げている。①建設・取得時点の異なる社会資本等の価値の比較が可能となること。②施設の更新を繰り返しながら恒久的に行政サービス提供能力を維持するという観点から、再調達原価で評価した資産を減価償却することにより、その価格を維持するのにどれだけの資金を要することになるかが明確になること。

再調達価額を用いる場合においても、測定時における農業水利施設の資産価値をどのようにして算定するかという課題がある。社会資本のストック価値を算定する代表的な方法としては、①ベンチマーク・イヤー法(Benchmark Year Method; BY法)と、②パーペチュアル・インベントリー法(Perpetual Inventory Method; PI法)がある(中村, 1999)。ベンチマーク・イヤー法は、基準年のストック額(ベンチマーク)を直接調査によって確定し、それに前後の価格変化調整後の資本形成を加減し、固定資本減耗(粗資産の場合は除却)分を控除する方法である。パーペチュアル・インベントリー法は、過去の投資系列を価格変化調整し、固定資本減耗(粗資産の場合は除却)分を控除しながら積み上げる点ではベンチマーク・イヤー法と同じであるが、ベンチマークが利用可能でない場合に使用される。

どちらの方法においても、過去の投資系列を価格変化調整し、固定資本減耗分を控除しながら積み上げる方法であることから、再取得価額の算定に用いることは困難

である。再取得価額を算定するためには、算定時点における農業水利施設の物的数量を基礎として、単価データにより資産総額を推定することが必要となる。

しかしながら、再取得価額を採用する場合においても、施設の劣化による資産価値の減少をどのように把握し、毎年の資産価額算出に計上するかという問題がある。また、この問題は、次の農業水利施設の劣化と減価償却の扱いとも密接に関係している。

(ii) 農業水利施設の劣化と減価償却の扱い

民間部門の企業会計においては、有形固定資産の劣化等による価値減耗分を会計処理するために、減価償却という手法が用いられる(高木, 1988)。減価償却とは、費用配分の原則に基づいて、有形固定資産の取得原価をその耐用期間における各年度に配分することを言う。

減価償却を用いる背景としては、有形固定資産の評価額を、その取得した年度または供用年数に達した場合に除却する年度のみの費用として計上するのが、企業会計上合理的ではないからである。有形固定資産の評価額を、供用期間において一定の計画に基づいて定期的に費用として配分するとともに、その金額相当を資産の取得原価から減じていく会計上の手法である。しかし、減価償却を実施するためには、取得原価、供用年数、除却時の残存価額の3つの情報が必要である。

農業水利施設に減価償却を適用すべきかどうかについては、施設の劣化と供用年数をどのように捉えるかによって異なってくる。ここでは、供用年数の長さを次の3つの場合に区分して考察する。①農業水利施設は適時・適切な維持補修を実施することによって半永久的な供用年数を有することが可能であると考えられる場合、②農業水利施設の供用年数が半永久的ではないが、例えば100年以上のような極めて長期にわたると考える場合、③農業水利施設は、どのような適時・適切な維持補修を実施しても半永久的な使用に耐えうるものではなく、いつかは除却すべき時期が到来すると考える場合。

供用年数が半永久的と考える場合

農業水利施設は適時・適切な維持補修を実施することによって半永久的な供用年数を有することが可能であると考えられる場合には、施設は劣化しないことを前提とすることから減価償却の適用は必要ではないこととなる。しかし、この場合には、減価償却に替わる農業水利施設の測定時の資産価値を、貸借対照表上に適切に反映させる手法が必要となる。半永久的な供用期間を有するためには、適時に適切な維持補修が実施されることが必要である。この場合には、農業水利施設の性能は健全に維持されることから、農業水利施設の価値の変動は生じない。そのため、貸借対照表上においても、農業水利施設の価値を示す金銭的価値は変動しない。ここでいう農業水利施設の価値は、施設の性能が一定との前提であるため、初期建設時と同じ価値が継続することとなる。そのため、施設の価値の金銭的表示には、初期建設時の取得原価を

用いることが適当であり、将来に渡る施設が発揮する性能といった便益を割引率を用いて現在価値に割り戻す必要はないと考えられる。その一方で、農業水利施設の価値を一定に保持するために必要な維持補修費を別途、毎年、費用として計上する必要がある。

供用年数が極めて長期にわたると考える場合

農業水利施設の供用年数が半永久的ではないが極めて長期に渡ると考える場合には、不正確な供用年数を用いて減価償却を実施することは困難である。このような場合においても、減価償却を適用するのではなく、維持補修費を費用として計上することが望ましいと考えられる。

供用年数が有限であると考えられる場合

農業水利施設は、どのような適時・適切な維持補修を実施しても半永久的な使用に耐えうるものではなく、いつかは除却すべき時期が到来すると考える場合には、有限の供用年数に応じて減価償却を適用するのが望ましい。企業会計における減価償却の方法には、定額法または定率法のどちらかが用いられることが多い(高木(1988))。定額法は、固定資産の初期価額と除却時の残存価値の差を供用年数で除して1年間の減価償却額を算定する方法である。定率法は、固定資産の初期価額と除却時の残存価値の差を供用年数の間に毎年一定の率で減価償却していくものである。

どの算定手法を用いる場合にも、初期価額、供用期間、残存価値を明確にすることが必要である。しかしながら、農業水利施設へのインフラ会計の導入においては、施設の実際の供用期間は調査・設計時の事業の経済性分析に用いられる標準耐用年数とは異なる場合が多く、供用年数を明確に推定もしくは決定することは困難である。そのため、民間部門の会計手法で用いられるような通常の減価償却で対応するには問題があると考えられる。

また、農業水利施設へのインフラ会計導入の目的の一つは施設の有する性能を金銭的価値で的確に表示することである。したがって、農業水利施設の価値を適切に金銭的価値で表示するために用いる減価償却方法としては、施設の劣化曲線に対応した形で施設の金銭的価値も変化すると考え、減価償却を行うことが望ましいと考えられる。この場合には、減価償却の方法が施設の劣化曲線の傾きと一致することが必要であり、一般に企業会計の減価償却で用いられている定額法や定率法では対応できない場合があり、劣化曲線の傾きに応じた新たな減価償却方法を開発することが必要となる。

一方、この新しく提案した減価償却の方法では、施設の劣化度が減価償却累計額と一致することとなることから、減価償却累計額によって施設の劣化状態を的確に把握することが可能となる。補修によって健全度が回復した場合には、健全度の回復レベルを施設の再調達価額によって適切に算定し、貸借対照表上に表示することが必要となる。減価償却は会計上の手法であって毎年の

キャッシュフローに影響を与えるものではないため、施設の性能を維持するために必要な毎年の維持補修費については別途、貸借対照表上に計上することが必要となる。

この場合、将来の維持補修費の推定額を貸借対照表上に計上し、将来に必要な維持補修費を明確にする。その上で、LCC 計算等によって明らかになった将来の毎年必要な維持補修費と実際に毎年使用された維持補修費に相違がある場合には、その相違を貸借対照表上に計上しなければならない。特に、当該年度に必要とされていた維持補修費よりも実際に用いられた維持補修費の方が少ない場合には、その差額は維持補修引当金として次年度に持ち越す処理が必要となる。

農業水利施設の場合、予防保全により適時・適切な維持補修を実施することによって、施設の長寿命化を図ることとなっている。すなわち、このことは施設の供用年数は有限であることを前提としていえると考えられることから、農業水利施設は、どのような適時・適切な維持補修を実施しても半永久的な使用に耐えうるものではなく、いつかは除却すべき時期が到来すると考える場合を想定することが望ましいと考えられる。この場合には、施設の劣化曲線に対応した減価償却費と、施設の性能を維持するために必要な毎年の維持補修費の双方を貸借対照表上に計上する方法が適切であると考えられる。この場合には、①施設の再評価額の算定、②施設の劣化状態に即した減価償却方法の開発、③毎年の維持補修費の推定、が必要となる。

(iii) 農業水利施設の廃棄時の取り扱い

企業会計制度においては、固定資産を廃棄することを除却という。有形固定資産は供用年数に達するか、もしくは、その利用価値が喪失した場合には除却される。除却には、既存の有形固定資産が実際に滅失した場合のほか、既存の有形固定資産を更新して新たな有形固定資産を取得した結果、既存の有形固定資産を利用しなくなった場合も含まれる。有形固定資産の除却時には、既存の有形固定資産について、直前の貸借対照表に記載された価額を除却損として費用に計上する。

除却時の問題は、除却時に資産の残存価値がどの程度あると推定するかである。もしくは、残存価値は存在せず、逆に撤去費用が要するとの考え方もある。農業水利施設の供用年数が有限であると仮定する場合には、除却を実施することが必要である。その際は、除却時の残存価値もしくは撤去費用が減価償却等の貸借対照表上での会計処理に影響するとともに、LCC 計算にも影響する。そのため、農業水利施設へのインフラ会計導入には、除却時の残存価値または撤去費用をどのように決定するかという課題を解決することが必要である。

7 農業水利施設の維持管理の海外事例

農業水利施設の適切な維持管理を実施し、施設の長寿命化とライフサイクルコスト等の維持管理・補修等に要

する費用の低減を図ることは、わが国だけではなく、海外においても重要な事項である。

農業水利施設の適切な維持管理に関する海外事例に関して、わが国において把握されている情報は限定されている。そのため、ここでは、わが国では殆ど把握されていない海外事例として、先進国の豪州と、発展途上国の中央アジア諸国における農業水利施設の維持管理の事例について整理する。なお、事例として整理する豪州では、農業水利施設の適切な維持管理・補修等を行うことを、農業水利施設を資産（アセット）として捉え、英語でアセットマネジメントと呼んでいる。

a 豪州における農業水利施設の維持管理

先進国の事例として、豪州の農業水利施設の維持管理であるアセットマネジメントについて整理する。特に、豪州における水田灌漑による大規模な稲作が実施されているリベリナ地方を有する、豪州南東部の NSW（ニューサウスウェルズ）州における農業水利施設のアセットマネジメントについて整理する（北村・中矢，2008a, 2008b）。

農業水利施設のアセットマネジメントが本格的に実施されている豪州南東部の NSW（ニューサウスウェルズ）州においては、農業水利施設の建設は主に州政府の主導で実施されてきた。しかし、近年の水利改革の一環として、農業水利施設の維持管理・補修等を実施する管理組織は州政府から分離され、公社化もしくは民営化された組織が施設の維持管理の責任を担っている。ダム、頭首工等の基幹水利施設を管理しているのは公社化された State Water、農業用水路等を管理しているのは民営化された灌漑会社等である。水田灌漑による稲作を中心とした州南部のリベリナ地方における灌漑会社としては、マレー灌漑会社やマランビジー灌漑会社等がある。用水路等を管理している灌漑会社は、民営化されたとは言っても利益追求を目的とはしていない公益的色彩が強いものであり、わが国の土地改良区に相当すると考えることができる。

(1) State Water

State Water は、NSW 州におけるダム等の基幹水利施設を管理し、灌漑会社等に水を供給する組織である。2004 年の State Water Corporation 法によって、NSW 州から分離され、公社化された。約 1,600 の水利用組織に対し、毎年約 55 億 m³ の水を供給している（State Water, 2007）。

State Water が管理する基幹水利施設は、22 の大規模ダム、8 の貯水池、5 のポンプ場、約 300 の堰や水門、約 230km のパイプライン等である。300 人以上の職員が NSW 州内の 43 の事務所に配置されている。

施設のアセットマネジメントに関しては、State Water Corporation 法に基づき、施設の維持管理状態、維持管理戦略、将来の必要経費等について定期的に NSW 州の IPART（Independent Pricing and Regulatory Tribunal, 独立

価格規制裁定委員会)に報告することとなっている。

各施設の供用年数は技術者の判断によって推定されている。ダムは100～200年、堰や水門は50～100年、パイプラインは約40年等となっている。

施設の維持管理に必要な将来の経費については、各種維持管理・補修計画に必要な経費を割引現在価値と比較し最適な経費を算定している。算定に使用する割引率の計算には、民間金融市場の動向を適切に反映するため民間部門の資金調達に必要な機会費用を算定する手法であるWACCを用いている。これは、State Waterが公社化されたため、民間企業と同様のファイナンスの手法を用いて将来に必要な経費を算定することが必要と考えていることによる。実際の割引率は、市場動向を反映して毎年変動し、2006年は9.88%、2007年は10.42%を用いている。また、計算期間については、基幹水利施設の供用年数が長いことを反映して、2006年には50年間、2007年には85年間についての経費を計算している。

State Waterから提出された将来の必要経費と顧客である水利用組織の支払能力を総合的に勘案して、State Waterが水利用組織に販売する水価格を、IPARTが4年に1度決定する。この際には、IPARTは水利用組織の負担軽減のため水価格を極力低価格に設定するため、State Waterに効率的な運営とコスト削減を要求している。

施設の点検については、施設の重要度に応じて3段階に分類し実施している。重要度の高い施設から順に、3～6ヶ月、6～12ヶ月、5年に1度の頻度で点検している。施設の点検は主に技術者の目視によるものであり、施設の補修等の必要な時期や工法については技術者の経験と知見によって決定される。

(2) マレー灌漑会社

マレー灌漑会社は、NSW州南部のマレー川流域の農地に灌漑用水を供給するとともに、用水路等の施設の維持管理を行う組織である。1995年に州政府から分離され民営化された。約1,600の農家の約74.8万haの地域に対して、年間平均約8～12億m³の水を供給している。主要な農産物は、コメ、小麦、大麦、オーツ麦等の穀物と、羊、牛、豚等の畜産である(Murray Irrigation Limited, 2007)。

マレー灌漑会社が管理する水利施設は、約3,000kmの用水路、約1,200kmの排水路、農道、農道橋、水門等であり、約3億豪州ドル(1豪州ドルは約100円、2008年3月時点)の資産価値がある。

1995年の民営化後の2010年までの15年間は、施設の補修・更新に要する費用として州政府から毎年約7～8百万豪州ドルの補助金が供給されている。2010年以降の州政府の補助金が無くなった場合に備えて、マレー灌漑会社は、2008年現在で約35百万豪州ドルの資金を準備しており、2010年には約50百万豪州ドルまで増額する予定である。また、その他に毎年、約4百万豪州ドルの利息収入と約2.5百万豪州ドルの水販売収入を見込んでいる。

施設の平均供用年数は、技術者の判断で100年間を見込んでいる。資産価値の大小によって供用年数が異なると考えており、適切な維持補修の実施によって、資産価値が10万豪州ドル以上の施設の供用年数は120年間、10万豪州ドル以下の施設は80年間、小規模施設は20～40年間と想定している。

用水路は全て土水路であり、10年に1度程度の堆積した土砂上げの実施によって半永久的に使用可能と考えている。維持補修で重要な施設は、用水路に架かる農道橋である。大型作業機械の通行による損傷が激しいため、適切な維持補修が要求される。

施設の点検は全ての施設を5年に1度、主に目視によって点検し、技術者の判断で補修の優先順位を決定している。

(3) マランビジー灌漑会社

マランビジー灌漑会社は、NSW州南部のマランビジー川流域の農地に灌漑用水を供給するとともに、用水路等の施設の維持管理を行う組織である。1997年に州政府から分離され公社化され、1999年に民営化された。約950の農家の約12万haの地域に対して、必要な用水を供給している。主要な農産物は、コメ、トウモロコシ、大麦等の穀物と、牛、羊等の畜産である(Murrumbidgee Irrigation Limited, 2007)。

マランビジー灌漑会社が管理する水利施設は、約2,500kmの用水路、約2,400kmの排水路、2つの取水工等であり、約4.7億豪州ドルの資産価値がある。

1999年の本格的な民営化後は、施設の補修・更新に要する費用として州政府から毎年約7～8百万豪州ドルの補助金が供給されて、自己資金と合わせて毎年約14百万豪州ドルを施設の補修・更新に支出している。2012年以降の州政府の補助金が無くなった場合については、それまでの間に全ての施設の補修・更新が終了し施設の供用年数が約100年となり、補修・更新に要する費用は毎年約4百万豪州ドルで賄えると想定している。

約2,500kmの用水路のうち約90%が土水路であり、約10%の250kmがコンクリート製開水路である。土水路については適度な頻度の堆積した土砂上げの実施によって半永久的に使用可能と考えている。コンクリート製開水路は初期建設後60年以上を経過し劣化が激しいものが多く、LCCを比較計算し、コンクリート製開水路として更新するよりもパイプラインに変更する方が効率的であるとしている。LCCの計算には、割引率6%、計算期間100年間を使用している。また、パイプラインの供用年数は60年を想定している。

施設の点検は全ての施設を5年に1度、主に目視によって点検し、技術者の判断で補修の優先順位を決定している。

(4) 豪州の農業水利施設のアセットマネジメントの特徴

豪州における農業水利施設のアセットマネジメントの

特徴は次のように整理することができる。

(i) 経営学的視点

農業水利施設等の社会資本のアセットマネジメントは、従来からの工学的な知見だけではなく、経営学などの分野における知見を総合的に用いることによって、社会資本を住民の利益向上のために、効率的、効果的に管理・運営するものと捉えられている場合が多い（例えば、土木学会、2005）。

豪州の農業水利施設のアセットマネジメントにおいて特徴的なことは、水利利用者の農家を顧客として捉え、顧客満足度を最大化することに主眼を置いていることである。

また、水利施設を管理する組織は州政府から分離され公社化または民営化されたため、顧客の負担増を招かないように徹底的なコストダウンを図っていることも特徴である。State Water の水販売価格を決定する IPART は、State Water にコスト削減を要求している。マレー灌溉会社やマランビジー灌溉会社は、民営化されたが利潤追求を目的とする組織ではなく費用と収入のバランスが取れるように、職員数の削減や週休3日の導入等のコスト削減を行っている。

マレー灌溉会社が州政府からの補助金がなくなった後の健全な経営を達成するために必要な資金を準備しているところにも経営学的視点が伺える。

このような顧客満足度の向上、徹底的なコスト削減と中長期的な財務状況の健全性を図ることこそが、アセットマネジメントに要求される経営学的視点の一つであると考えることができる。

(ii) 割引率

State Water は、将来の必要費用の算出に使用する割引率は、民間部門と同様の WACC を使用し、豪州の近年の民間部門の好景気も反映して、それは約 10% の高率となっている。施設の維持管理を実施する組織は公社化や民営化されても、施設が提供するサービスの公共性を勘案し公的部門として、国債等の利回りを考慮して決定される社会的割引率を使用すべきと考えられる。

(iii) 施設の供用年数

施設の供用年数は、基本的に技術者の経験と知見によって設定されている。しかし、より精度の高い施設の維持管理を行うためには、補修の実施後も含めて施設の供用年数をより正確に推定する手法を確立することが必要である。

(iv) 劣化予測

施設の補修の時期や工法は、点検結果に基づいて技術者の経験と知見によって判断されており、施設の劣化予測は殆ど実施されていない。しかし、より適切な施設の維持管理を実施するためには、施設が何年後にどの程度まで劣化が進行するかをより精度の高い手法で予測することが重要である。わが国の道路の橋梁等においては、劣化予測がアセットマネジメント研究の中心となってい

る（例えば、貝戸ら、2003）ことから、農業水利施設においても精度の高い劣化予測手法の開発が必要である。

b 中央アジアにおける農業水利施設の維持管理

発展途上国の事例として、旧ソ連時代に大規模な灌漑施設が建設された中央アジア諸国の農業水利施設の適切な維持管理の課題について整理する。中央アジアにおいては、アジア開発銀行（ADB）や世界銀行等のドナーが中心となって、老朽化した灌漑排水施設等の改修を実施する（北村、2007a）とともに、農政改革や、施設の維持管理の責任を担う農民水利組織 WUAs（Water Users Associations）の設立や訓練を実施している。中央アジアにおける農業水利施設の適切な維持管理には、WUAs の持続的な発展が最も重要な課題であること（北村、2007b）から、これに焦点を当てて整理する。

中央アジアは、アラル海流域のキルギス、ウズベキスタン、カザフスタン、タジキスタン、トルクメニスタンで構成されている地域で、1991年の旧ソ連の崩壊によって独立した。旧ソ連時代には国家予算による灌漑排水施設の維持管理と大規模農業のため、小規模な農民主体の WUAs による灌漑排水施設の維持管理の必要性はなかった。しかし、旧ソ連崩壊後の各国の社会主義経済から市場経済への移行政策に伴う政府予算の減少や農地制度改革等によって、大規模な灌漑排水施設の適切な維持管理が行われず、施設の老朽化が急速に進行している。

ここでは、中央アジア諸国の中でも特に急進的な農政改革を推進しているキルギスと、市場経済への移行を段階的に実施する漸進主義による改革を行っているウズベキスタンを具体的事例として取り上げ、WUAs の灌漑排水施設の維持管理における役割や課題を整理する（Kitamura, 2008）。

(1) キルギス

(i) WUAs の設立と強化

キルギスにおける灌漑施設の維持管理を適切に実施するために重要な課題は、維持管理の責任を誰が担うかである。そのためキルギス政府は、1994年1月の関連法やその他の行政命令によって、灌漑施設の所有権を旧来の大農場から個別の灌漑水利用者へ移転することを推進した。1995年6月には、農場レベルでの灌漑施設の維持管理の責任を担う WUAs の設立を推進した。

ADB は 1995 年に農業分野の競争的市場システムへの移行を促進する農業セクタープログラムローン（ASP）に付随する WUAs の設立と管理に関する技術協力を提供した。ADB は本技術協力において、キルギス政府水資源省の WUAs 設立に必要なキャパシティ・ビルディングを目的として、① WUAs に関する法制度のレビュー、② WUAs 設立・灌漑料金の徴収・圃場レベルでの灌漑施設管理に関するアドバイス、③ 水資源省職員の訓練等を実施した。

キルギス政府は、ADB の ASP におけるアドバイス等に基づいて、2002年に中央アジア諸国内で最初の

WUAsに関する法律を制定した。本法は、水利料金の徴収、予算の制定、灌漑施設の維持管理に関する意思決定、適正な用水配分、灌漑施設の補修等に関するWUAsの権利と責任について定めている。

また、1995年以降、ADBや世界銀行等のドナーが、老朽化した灌漑施設の改修とともに、灌漑施設の維持管理の責任を担うWUAsの設立や訓練を行う各種プロジェクトを実施している。特にそれらの中で、WUAsの設立と訓練に効果的なプロジェクトとして、ADBのAgriculture Area Development Project (AADP)と世界銀行のOn-Farm Irrigation Project (OFIP)が挙げられる。

両プロジェクトの最大の特徴は、ADBと世界銀行が共同で、WUAsの設立及び訓練に積極的に取り組んでいるところである。具体的には、両プロジェクトにおいては、各WUAの管轄する灌漑施設改修実施予定地区において、実際の改修計画の準備、改修工事の実施とその時期は、WUAsの発展段階に依存する仕組みとなっている。WUAsの発展について、次の7段階のステップを規定している(Johnson III et al., 2002)。①法的登録を含むWUAの正式な設立。②WUA職員の雇用・賃金支払と訓練プログラムの開始。③WUA協議会・委員会による水利費の決定を含む維持管理計画の策定と総会の承認。④組合員による合意された水利費の支払。⑤委員会による技術的・経済的・環境的に実施可能な灌漑施設改修計画の代替案の準備と組合員の意見表明。⑥組合員による灌漑施設改修案の選択。⑦組合員による灌漑施設改修に要する資金借入可否についての投票と、協議会による改修工事实施の正式要請。両プロジェクトにおいては、この7段階のステップのうち第4段階を終了したWUAが灌漑施設改修地区の候補となり、プロジェクトの技術者が灌漑施設改修計画の準備を開始する。第7段階を終了した時点で、改修工事の請負業者と工事請負契約を締結する。この要求されたステップを達成できないWUAにおいては、改修工事開始の延期もしくはプロジェクトの対象地区からの除外が決定される。この設定された7段階のステップによって、改修工事終了後の施設の維持管理の責任を有するWUAsの法的な設立・運営と、水利利用者の改修工事の設計への積極的な参加が実現される。

(ii) WUAsの課題

キルギスにおけるWUAsの持続的発展の最大の課題は、その財政基盤の脆弱性である。そこで問題となるのが、灌漑施設改修プロジェクトにおける改修工事費を受益農家が負担するコストリカバリーと、灌漑施設の維持管理に必要な水利費の価格設定と徴収率の向上である。

コストリカバリーについては、上述のAADPとOFIPではともに、灌漑施設改修工事費の25%を受益農家が負担することとなっている。しかしながら、この負担率は経済的・財務的妥当性から導き出されたものではなく、政治的意思に基づいて決定された色彩が強く、受益農家の支払能力を適切に考慮しているとは言い難い。

水利費については、キルギス政府は1995年に1トン当たり0.03ソム(約0.08円)と決定した。しかし、その水利費が100%回収できた場合においても実際に必要な維持管理費の30%しか賄えないと推定されている。また、実際の回収率は80%程度に過ぎず、その中でも農産物による物納や役務によるものが多く、現金での回収は約30%のみである。

(2) ウズベキスタン

(i) WUAsの設立と強化

ウズベキスタン政府は、政府の灌漑施設の維持管理予算不足に対応するため、農業用水管理の地方分権化を推進している。具体的には、水文境界毎に地域灌漑施設部局を創設するとともに、WUAsを設立し、WUAsに圃場内灌漑施設の維持管理の責任を担わせようとしている。しかしながら、地域灌漑施設部局やWUAsの職員が、適切な用水配分等のサービスを実施するために必要な経験を有しているわけではなく、更なる人材育成が必要である。そのため、ADBや世界銀行等のドナーが、老朽化した灌漑排水施設の改修とともにWUAsの設立・訓練を実施している。

(ii) WUAsの課題

ウズベキスタンでは現在のところ、WUAsの役割、責任、権利・義務、法的地位等を包括的に規定するWUA法が制定されていない。政府としては、WUAsの役割の重要性は認識しながらも、WUA法の制定には後ろ向きのようなのである。

ウズベキスタン政府の財政不足解消の観点から、ADBや世界銀行のプロジェクトにおいては、灌漑排水施設の改修に要する工事費の一部を受益農家が負担することとなっている。しかしながら、このコストリカバリーの受益農家の負担率は、各プロジェクトの計画時に政治的判断によって決定されており、経済的・財務的妥当性に基づいているものではない。そのため、同じADBが実施する灌漑排水プロジェクトにおいても、各プロジェクトによって受益農家の負担率が異なっている。

ウズベキスタンの農業水管理省の推定によると、2002年における政府の灌漑排水施設の維持管理予算は約130百万ドルであったが、その一方で、1年間に必要とされる維持管理費は550百万ドルであった。このうち約46%が圃場内施設に関する維持管理費である。しかし、この推計はポンプ運転に要する電気料金を含んでおらず、更に毎年200百万ドルが必要と推定されている。これらの施設の維持管理に必要な費用は、WUAsが農民から徴収する水利費で賄わなければならない。

(3) 中央アジア諸国の農業水利施設の維持管理の課題

旧ソ連崩壊後の中央アジアにおける農業水利施設の維持管理に重要なWUAsの役割や課題について、キルギスとウズベキスタンを事例として整理した。WUAsは、旧ソ連からの独立以降の政府の財政不足等を要因とし

て、ADBや世界銀行等のドナーの支援によって、導入された新しい概念であり、わが国の土地改良区のように農村社会の中で歴史的に形成されてきたものではない。

WUAsが適切に灌漑排水施設の維持管理を行っていくためには、WUAsの責任や義務を明確化する法制度の確立と適切な運用、健全な財政運営と人材育成が急務である。

WUAsの健全な財政運営については、適切なコストリカバリーの農家負担率と水利費の価格設定が不可欠である。これらの設定は、政治的に決定するのではなく、農家の支払能力を考慮して経済的・財務的に適切なレベルに設定することが必要である。また、いかにして回収率を向上させていくかも課題である。

WUAsの人材育成については、ドナーの灌漑排水施設の改修プロジェクト終了後においても、政府部門等による適切な訓練の実施が可能となるような枠組みの設立が必要である。

中央アジアにおける、旧ソ連時代に建設された膨大な農業水利施設を適切に維持管理し、施設の長寿命化と、維持管理や補修等に必要な費用の確保と低減を図るためには、施設の利用者である農民で組織された農民水利組織であるWUAsの持続的な発展が重要である。

c 農業水利施設の維持管理の海外事例のまとめ

農業水利施設の適切な維持管理は、わが国に限らず、諸外国においても重要な事項である。しかし、わが国で把握されている諸外国における農業水利施設の維持管理の事例は限定されている。

そのため、わが国では殆ど把握されていない、先進国の豪州と、発展途上国の中央アジア諸国、特にキルギスとウズベキスタンの農業水利施設の維持管理の事例について整理した。

豪州のNSW州では、水利改革によって公社化または民営化された組織が農業水利施設の維持管理・補修等の責任を担っている。その特徴の1つは、水供給のサービスを受ける農家を顧客として捉え、顧客である農家の水供給サービスへの満足度を最大化するとともに、組織の徹底したコスト削減努力によって農家へ販売する水価格を低く設定するという、経営学的視点の重視である。道路構造物等の先進的な分野の社会資本のアセットマネジメントにおいては、従来の工学的視点に加えて、経営学的視点の重要性が指摘されているが、このような顧客満足度の最大化と、徹底したコスト削減は、経営学的努力の現れとして、わが国の農業水利施設の適切な維持管理・補修等のストックマネジメントにおいても、十分に考慮すべき事項である。

中央アジアにおいては、旧ソ連時代に大規模な灌漑施設が建設され、その後の旧ソ連崩壊による独立後の政府の財政難による施設の維持管理・補修費等が十分に確保できず、施設の老朽化が問題となっている。キルギスやウズベキスタンにおいては、アジア開発銀行（ADB）

や世界銀行等のドナーが中心となって、農業水利施設の維持管理を農家が主体性を持って実施する農民水利組織WUAsの設立・強化を実施している。しかし、WUAsの持続的発展を図るためには、財務的安定性に関連するコストリカバリーや水利費の適正な水準の設定や、WUAsの職員や農家への十分な訓練が必要である。WUAsは、わが国の土地改良区に相当するものである。そのため、わが国においても、農業水利施設の適切なストックマネジメントの実施のためには、施設の管理を任されている土地改良区の中長期的な財務的安定性や、職員や農家へのストックマネジメントに関する十分な訓練の実施が必要である。

豪州と中央アジア諸国では、農業水利施設の適切な維持管理・補修等に必要課題は大きく異なるが、このような農業水利施設の維持管理に関する海外事例をより多く収集し分析することによって、わが国の農業水利施設の適切な維持管理・補修等を実施するストックマネジメントの更なる改善を図っていくことが重要である。

8 まとめ

農業水利施設のストックマネジメント導入の背景、必要性と課題、今後の方向性、および、ストックマネジメントに関連する既往の研究成果のうち、近年における機能診断手法とライフサイクルコスト計算について整理した。また、ストックマネジメントの課題の中で、ライフサイクルコスト計算の経済分析手法として用いる際の留意点と、インフラ会計の導入に関する課題について整理した。さらに、農業水利施設の維持管理に関する海外事例を整理した。

第2次世界大戦後の食料増産時代から本格的に全国で建設が進められてきた農業水利施設は、再建設ベースで約25兆円にもものぼる膨大な社会資本を形成している。今後は、初期建設から相当年数が経過し更新時期を迎える施設数が増大していくことが予想される一方で、公共事業費の削減によって、施設の老朽化に伴う維持管理費の増大に対応することが困難となってきている。

そのため、従来の事後保全ではなく予防保全によって、適時・適切に維持補修を実施することによって、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図ることが必要となっており、農業水利施設のストックマネジメントの導入の契機となった。しかし、ストックマネジメントに関する研究は緒に就いたばかりで各種の技術は開発途上のものであり、今後の更なる研究開発が求められている。

また、ストックマネジメントに対応した既往の研究事例も少ない。本章で整理した近年における機能診断手法やライフサイクルコスト計算に関する研究についても、未だ試験的に実施されている状況であり、更なる研究の推進が求められている。

農業水利施設のストックマネジメントにおける課題と

して、ライフサイクルコスト計算の経済分析手法として用いる際の留意点と、インフラ会計の導入に関する課題について整理した。

さらに、わが国における農業水利施設のストックマネジメントの更なる適切な推進には、同様の農業水利施設の維持管理に関する海外事例を収集し、参考にすることが必要であることから、海外事例について整理した。

Ⅲ.2においては、農業水利施設のストックマネジメント導入の必要性と課題に関する論文事例について整理した。

Ⅲ.3においては、農業水利施設のストックマネジメントの導入に向けた検討の背景、農業水利施設のストックマネジメントに関する基本的な考え方、今後の課題と対応の方向について、さらに詳細に整理した。

Ⅲ.4においては、農業水利施設のストックマネジメントに関する既往の研究のうち、近年における機能診断手法とライフサイクルコスト計算に関する研究成果について整理した。

Ⅲ.5においては、農業水利施設のストックマネジメントにおいて、施設の維持補修等の投資プロジェクトの経済分析手法として使用することとなっているライフサイクルコスト手法（LCC手法）の、経済分析手法としての妥当性と、それを使用する際に留意すべき事項等について整理した。具体的には、投資プロジェクトの経済分析手法として使用される場合が多い、費用と便益の双方を考慮に入れた手法である、割引現在価値NPV、費用便益比B/C、内部収益率IRRの考え方と比較し、費用のみを考慮に入れたLCC手法がストックマネジメントにおいて、施設の維持補修等の投資プロジェクトの経済分析手法として使用されている根拠について整理した。また、LCC手法適用上の課題として、①適切な割引率の選択、②事業者費用と利用者費用、③施設の供用年数、について整理した。

Ⅲ.6においては、既存施設の適時・適切な維持補修によって、施設の長寿命化とLCCの低減を図るとともに、施設の金銭的価値、劣化状態、中長期的に必要な維持補修費等を適切に表示する会計システムとしてのインフラ会計の導入の必要性や導入における課題について整理した。農業水利施設へのインフラ会計導入の検討に当たって、公的部門の会計手法である公会計に、民間の企業会計手法を導入し、社会資本の価値を金銭的に財務諸表に計上する、このような新たな公会計導入の動向について整理するとともに、インフラ会計の導入において考慮すべき課題として、インフラ会計導入のメリット・デメリット、農業水利施設の金銭的評価手法、農業水利施設の劣化と減価償却の扱い、農業水利施設の廃棄時の取扱いについて整理した。

Ⅲ.7においては、海外事例として、わが国では殆ど把握されていない、先進国の豪州と、発展途上国の中央アジア諸国における農業水利施設の維持管理における課

題について整理した。

農業水利施設のストックマネジメントの基本的なフレームワークは、①ライフサイクルコスト低減に向けた設計・施工、②点検による施設の劣化状態の把握、③施設の将来における劣化状態の予測、④補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢の検討、⑤複数の選択肢のライフサイクルコストの比較、⑥最適な全体計画の策定、と整理することができる。特に、最適な全体計画を策定するためには、いつ、どのような補修等をどこに実施することが最適かを判断するために必要な、精度の高い施設の劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測が重要である。しかし、道路構造物等の先進的な分野においては施設の劣化予測に関する研究が進んでいるが、農業水利施設においては、現在のところ殆ど研究事例が見当たらない。また、施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測は、劣化機構ごとに精度の高い手法で行うことが求められる。

そのため、第Ⅳ章では、幹線から末端まで合計すると全国で約40万kmという長大な延長を有する農業用排水路、特に農業用水路として代表的な鉄筋コンクリート製開水路の劣化機構の整理と、それら劣化機構に対応した既往の研究成果について整理する。

Ⅳ 農業用水路の劣化機構と既往研究

1 農業用水路の劣化予測の必要性

第2次世界大戦後の食料増産時代から本格的に全国各地で建設が進められてきた農業水利施設の中でも、長大な延長を有するのが農業用排水路である。国営土地改良事業等によって造成された基幹水利の延長は約4万5千kmに達し、末端の施設まで含める延長は約40万kmにも及ぶ（農業農村工学会、2008）。これらの農業用排水路は、農業水利施設の有するさまざまな性能を的確に発揮するのに重要な役割を担っていると同時に、延長が長大であるため、施設の劣化状態を把握するための点検の実施とそれに基づく適切な維持補修計画を策定するには、簡易に実施可能な施設の点検手法の開発と、それに基づく精度の高い劣化予測手法の開発が必要となる。

そこで、本研究では、長大な延長を有する農業用水路の中でも典型的な施設である鉄筋コンクリート製開水路を対象として、施設の簡易な点検手法と劣化予測手法に関する提案を行う。

コンクリート構造物である農業用水路の精度の高い、劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測を実施するためには、総合的な劣化状態を評価するのではなく、各種劣化機構毎に分類し、それら劣化機構毎の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測を行うことが重要である（例えば、土木学会、2008）。そのため、コンクリート構造物としての農業用水路に関連する劣化機構の整理と、それらの中で特に農業用水路に特徴的な劣化機構を

特定する。そして、その劣化機構についての簡易な点検手法と、その点検結果に基づく劣化予測手法を提案する。このような特徴的な劣化機構に関する点検と劣化予測を行うことによって、農業用水路の総合的な将来の劣化を推定することが可能となる。

従来の農業用水路の劣化状態の点検手法としては、コンクリート躯体のコアを抜き取り、各種劣化機構の劣化状態を判断する場合（例えば、石井ら、2007）が多かった。しかし、コア抜き取りには、次のような問題がある。コアを抜き取ることは、既に全面更新または廃棄が決定している水路でしか行うことができず、実際に利用中の水路のコア抜き取りは困難であること。また、水路の全てのバレルのコアを抜き取り、全てのバレルの劣化状態を判断することは困難であること。そのため、現在利用中の水路の劣化状態を判断することが必要なストックマネジメントに適した点検手法としては、簡易な器具もしくは目視による非破壊の点検手法が主体となる。さらに、本研究では、農業用水路の維持管理を主に実施している土地改良区の職員等が、長大な延長を有する農業用水路の点検を実施し、それに基づいて劣化予測を行うことが可能となる、簡易な手法を想定している。

農業用水路は長大な延長を有するため、施設の点検としては、目視もしくは簡易な器具を用いた点検が中心となる。目視調査は、最も基本的な調査手法であり、熟練した技術者が実施すれば、構造物の耐久性能に関する重要な情報が入手できる（農業農村工学会、2008）。また、特別な機器を用いないため、容易に実施可能な調査である。そのため、長大な延長を有する農業用水路の点検においては、現状では効率性と容易性の観点から、目視もしくは簡易な器具を用いた点検手法が最も有効である。

施設の維持補修計画を策定するためには、「どのような内容（補修、補強、全面改修等）の対策工法を、いつ、どの程度の規模で実施すべきか？」などを判断する必要がある。このためには、まず、今のままの維持管理を続けた場合、施設の劣化がどのように進行していくかを予測する必要がある。劣化の進行は、施設の立地環境や劣化要因に大きく依存しているため、本来、立地環境や劣化要因別に劣化予測手法を設定すべきである。しかしながら、現状では、これに資する十分な点検データの蓄積がなされておらず、適用できる劣化予測手法の運用も限定的である（農業農村工学会、2008）。

現在適用が考えられる劣化予測手法は、個別劣化機構による劣化現象の進行過程である力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデルと、過去の点検データに基づいた施設の劣化の統計的推移に着目した統計モデルに大きく区分される（例えば、土木学会、2008）。詳細な予測結果を得るためには、力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデルを用いて劣化機構ごとの予測を行うことが望ましいが、現在のところ力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデルとして確立されている劣化機構は、中性化と

塩害に限定されている。このため、中性化と塩害以外の劣化機構については、今後、より詳細な点検の実施と点検データの蓄積を行い、個別の劣化機構による劣化現象を予測する手法を開発する必要がある。こうした状況を受けて、中性化と塩害以外の劣化機構による劣化現象については、当面、過去の点検データに基づいた施設の劣化の統計的推移に着目した統計モデルを利用した劣化予測を行うことが必要である（例えば、土木学会、2008）。そのため、現状では、農業用水路の施設の劣化予測は、目視もしくは簡易な器具を用いた点検によるデータを用いて、施設の劣化の統計的推移に着目した手法によることが望ましい。

本章では、農業用水路である鉄筋コンクリート製開水路の、劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の対象となり得る各種劣化機構を整理し、それら劣化機構に関連した既往の研究を整理する。農業用水路の劣化機構としては、コンクリート構造物としてのひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食に加えて、農業用水路に特徴的な水路の壁面の摩耗、継目の劣化がある。これらの中で、特に農業用水路の劣化機構として特徴的なものとして、水路の壁面の摩耗があり、壁面の摩耗は、目視や簡易な器具を用いた劣化状態の点検とその結果に基づく将来の劣化予測が可能であることを示す。そして、壁面の摩耗の点検と将来の劣化予測によって、水路の総合的な劣化傾向を推定できることを示す。

IV.2においては、これらの農業用水路の劣化機構について整理し、関連する既往の研究を整理する。

IV.3においては、農業用水路の各劣化機構の特徴について整理し、農業用水路に特徴的な劣化機構として、水路の壁面の摩耗があることを示し、壁面の摩耗による劣化状態の点検とその結果に基づく将来の劣化予測が重要であることを示す。

2 農業用水路の劣化機構と既往の研究

農業用水路の鉄筋コンクリート製開水路の劣化機構として、壁面の摩耗、継目の劣化、ひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食がある。そのため、これらの劣化機構の特徴と既往の研究成果について整理する。

a 壁面の摩耗

農業用水路に見られる特徴的な劣化として、水路の壁面における摩耗によるセメントペーストや細骨材の洗出しやコンクリート表面の粗骨材の露出や剥離がある。

一般的なコンクリートの摩耗についての研究の現状や水理構造物の摩耗試験方法を整理したものとして、堀口（1993）、石田（2007）、野中（2001）、緒方ら（2004）などの論文があげられる。

堀口（1993）は、コンクリートの摩耗が複雑な要因の1つとして、摩耗現象自体の複雑性に加えて、われわれが使用している摩耗用語等の曖昧性、さらには、摩耗

に対する一般的な誤解が影響していることを指摘している。また、コンクリートの摩耗に関する研究は、古くから数多く発表されているが、摩耗研究全体の総括やその位置付けを示した論文が不足していたことを指摘し、摩耗の複雑性および曖昧性を多少なりとも解消するため、摩耗現象の分類を行い、これまでに実施されてきた数多くの摩耗研究の成果を総括している。

摩耗現象の多くは、単一の摩耗機構によるものではなく、複数の摩耗機構が複雑に作用していることを指摘し、水理構造物の摩耗現象は、流れの作用によるエロージョン摩耗が代表的であるが、通常は、この流れに固体粒子や液体粒子も伴うが、流れのみで発生するキャビテーションも含まれることを指摘している。

水理構造物のエロージョン摩耗をシミュレートする室内試験としては、サンドプラスト試験、鋼球を水中で落下させるシェーカー試験、あるいは掃流式の摩耗試験が用いられることを指摘している。

また、摩耗を、摩耗を受けたコンクリート表面の損傷程度により、大きく3段階の状態に分類している。コンクリートの摩耗は、Fig.11に示すように、セメントペーストが流出するレベル、細骨材が流出し粗骨材が露出するレベル、粗骨材が剥離するレベルの3段階の状態があるとしている。

今後の課題として、水理構造物の場合は、室内試験で実施する摩耗レベルと実際の摩耗レベルとが異なっている事例が多いとし、室内試験と実際の現象との相関性に疑問が残ることを指摘している。

石田（2007）は、摩耗現象はコンクリート表面に作用する外力の違いによって異なり、非常に複雑であることから、摩耗特性を評価するための試験方法は多岐にわたっているが、規格化された試験方法が少ない現状を指摘している。

水理構造物において発生する摩耗現象を、比較的ゆっくりとした流速の流れに固体が運ばれることによって生じる摩耗、流速の速い流れにより固体や液体が運ばれることによって生じるエロージョン摩耗、流れの方向が急激に変化することなどによって圧力が発生するキャビ

テーション摩耗に分類している。

現状では、水理構造物に発生する摩耗現象を全て模擬できる試験方法の規格の整備までには至っておらず、規格整備においては、それに対応した試験方法を体系的に整備する必要があることを指摘している。

また、現在提案されているいずれの試験方法もその試験結果は相対評価の指標として使用されており、室内試験結果と実構造物の摩耗現象についての相関性について検討を行った事例がほとんど見受けられず、試験方法と実構造物の相関性に関する検討が重要な課題であると指摘している。

野中（2001）は、コンクリート水利施設の劣化機構の1つとして摩耗を指摘している。砂礫混じりの水が流下するコンクリート構造物では、水路面に平行な、すり磨き作用、水路の屈曲部やシュートに沿う面での転がり摩擦、エプロン部での面に直角に作用する衝撃力などによって摩耗が生じることを指摘している。すり磨き作用はコンクリート面を一様に摩滅し、転がり摩擦はモルタルを剥離して粗骨材を露出し、コンクリート面が凹凸になり、さらに、ここに衝撃力が加わると、露出した粗骨材が破壊され、または抜け出し、摩耗による損食が一層進行することを指摘している。また、コンクリート水利施設における摩耗の速度は、流水によって運搬される砂礫の形状、寸法、硬さ、その量および流速、渦の存在などによって影響されることを指摘している。

緒方（2004）は、農業水利施設に要求される耐久性として、耐摩耗性という性能も不可欠であることを指摘している。農業水利施設は、流水や土砂流によるすり減りおよびキャビテーション等による掃流摩耗、あるいは土石流による衝撃やひっかけ等による衝撃摩耗により、耐久性だけでなく水利用性能等が損なわれる。掃流摩耗および衝撃摩耗に抵抗することは、農業水利施設の機能を保持するうえで重要であるが、現時点では耐摩耗性に関する照査方法が確立されていないことを指摘している。また、照査方法に立脚した摩耗試験機および試験方法の開発が行われていないことから、農業水利施設に適した照査方法を早急に構築しなければならないことを指

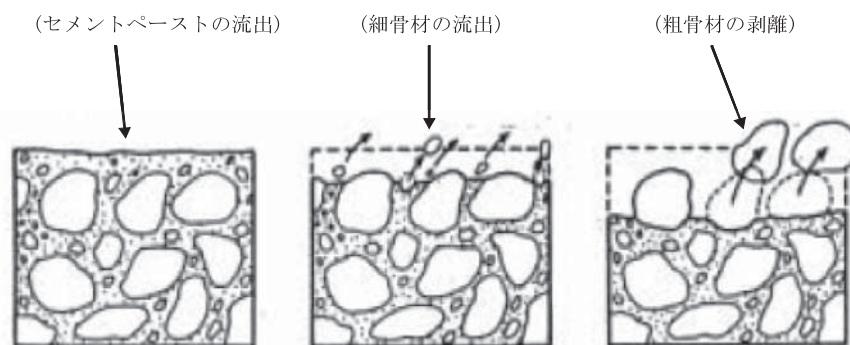


Fig.11 摩耗レベルによる摩耗の分類
出典：堀口（1990）

Classification of Abrasion Based on Abrasion Level

摘している。

さらに、普通コンクリートの耐摩耗性の特性を既往の研究を基に、次のように整理している。①水セメント比が小さいほど耐摩耗性は大きくなる。②圧縮強度が大きいほど耐摩耗性は大きくなる。③単位セメント量を増やせば耐摩耗性は大きくなる。④骨材の硬度が小さければ耐摩耗性は小さくなる。そのうえで、摩耗は長期間にわたり作用することから、本質的には劣化予測を行い、劣化曲線や性能低下曲線を求める必要があることを指摘している。

水路構造物のコンクリートの摩耗についての研究は、供試体を用いた室内実験が主であり、実構造物を対象とした摩耗に関する研究事例は見当たらない。摩耗に関する供試体を用いた室内試験による研究としては、松尾ら(1993)、石神ら(2005)、渡嘉敷ら(2006)などの論文があげられる。また、モデルを用いたコンクリート製水路の摩耗予測に関する研究には、新井ら(1996)がある。摩耗による水路壁面の凹凸と粗度係数の関係については、中矢ら(2008)の模擬摩耗水路を用いた実験がある。

松尾ら(1993)は、衝撃すりへり試験、落下試験および掃流試験などの結果から、水路構造物を対象としたコンクリートの耐摩耗特性に関連すると思われる要因は、試験方法によって様ではなく、未検討の因子の多いことを示した。また、掃流摩耗形態は、表層モルタルの摩耗による摩耗量の多い初期摩耗と、それ以降の安定した定常摩耗に区別できることを明らかにした。

石神ら(2005)は、高圧水流を用いた試験により、農業用水路に見られる表面のモルタルが選択的に流出し粗骨材のみが露出する摩耗現象は、物理的な砂礫のすり減り作用によるものだけではなく、水路内の流水に曝されることによるコンクリートのカルシウムの流出などの化学的変質が、その要因の1つとなり得ることを明らかにした。また、摩耗の進行速度は、水セメント比が大きくなるにしたがい、増加する傾向を明らかにした。

渡嘉敷ら(2006)は、水流摩耗試験機によるペースト供試体とモルタル供試体を用いた実験の結果から、試験時間と摩耗重量、摩耗体積、平均摩耗深さ、最大摩耗深さとの関係については、同様の傾向を示すことを明らかにした。また、摩耗表面形状を定量的に把握するため、また、計測作業における供試体の欠けなどによる試験結果への影響を排除するためには、摩耗量の評価指標として摩耗深さが適切であることを提案した。

新井ら(1996)は、コンクリート製水路の摩耗を的確に予測することが、水路の施工計画や保守管理等の対策に重要な課題となっている一方で、流砂によるコンクリート壁面への衝突による摩耗過程に不明な点が多いことや、経年的な流砂量の把握が容易ではないこと、また局所流における挙動等不明な点も多く、摩耗量の定量化が必ずしも十分ではないことを指摘している。そのため、流水中の流砂による摩耗過程を砂粒子の壁面への衝突を

モデル化し、摩耗量を検討している。本モデルを用いた結果、初期建設後のコンクリート製水路の摩耗深さの進行速度がほぼ一定に進むことを示した。

中矢ら(2008)は、水路の摩耗が、どの程度までマンシングの粗度係数の増加に影響するかは定かではないことから、摩耗を模擬したコンクリート水路を製作し、この模擬摩耗水路において、粗度係数 n を求め、摩耗による凹凸の程度を示す指標である算術平均粗さ (Ra) との関係求めた。マンシングの粗度係数は、式(8)で示される。ここで、 n は粗度係数、 k_s は相当粗度 (m)、 g は重力加速度 (m/s^2) である。

$$n \approx 0.13 \frac{k_s^{1/6}}{\sqrt{g}} = 0.042 k_s^{1/6} \quad (8)$$

算術平均粗さ (Ra) が 0.5mm の時、粗度係数 $n=0.013$ であることから、水路の壁面の摩耗による凹凸をレーザー変位計で求め、それによって計算した算術平均粗さ (Ra) (mm) と、相当粗度 k_s (m) には、おおまかに式(9)の関係があることを示した。

$$k_s = 0.002 Ra \quad (9)$$

このことから、水路の摩耗による凹凸を示す指標である算術平均粗さ (Ra) から、粗度係数 n を推定できることを示した。なお、算術平均粗さ (Ra) の定義については、第VI章において示す。

b 継目の劣化

農業用水路においては、水路躯体自体は健全であるものの、止水板が劣化して継目からの漏水が発生している事例が見られる。背面への漏水が継続すると、背面土砂が流亡・空洞化し、人的影響度が極めて高くなる場合がある。また、継目は躯体温度により日および年変動の伸縮をしているため、止水板がこの変動に追従できなくなると、断裂が生じ漏水が発生する(農業農村工学会, 2008)。

継目の構造を Fig.12 に示す。継目には、バレル間の接着や一体化を避けるために設ける収縮継目と、水路が温度の上昇・下降に伴い生じる伸縮量に対し水路のひび割れや過大な応力の上昇を制限するために設ける伸縮継目がある(農業土木学会, 2001)。どちらの場合においても、継目には止水板を挿入することによって、漏水を防止する構造となっている。止水板が断裂すると、継目からの漏水が生じることとなる。

農業用水路の継目の劣化に関する研究は補修工法が中心であり、劣化状態の点検手法や劣化予測に関する研究事例は見当たらない。補修工法に関する研究事例には、石神ら(2006)、長東ら(2007)などの論文がある。これらは、止水板の断裂防止よりも、伸縮継目において、止水板を覆っている目地材の補修工法が中心となっている。

石神ら(2006)は、農業用水路の継目における効果的

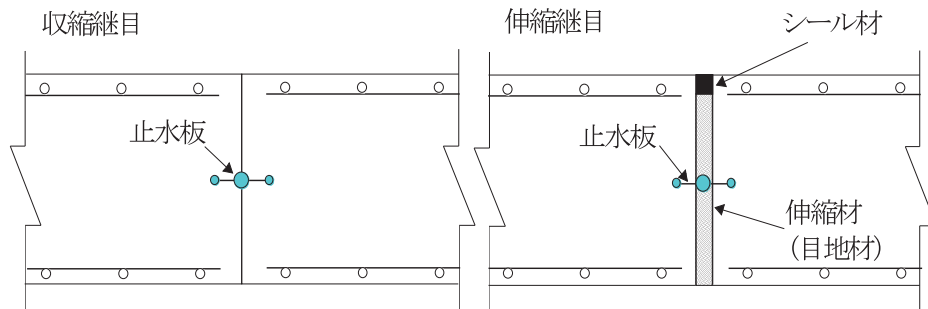


Fig.12 継目の構造
(農業土木学会, 2001 による)
Structure of Joint

な漏水防止対策として、目地材におけるゴム弾性の活用とその断面形状により、継目が伸縮しても目地材表面に引張応力を発生させず、高耐久化が図られることを特徴とする継目の補修工法を開発した。

長東ら (2007) は、継目における効果的な漏水防止補修に用いる、多様な断面形状の目地材について目地挿入完了時および最大圧縮変形時の応力状態を FEM 解析により調べたところ、適切な空隙量を有する中空リム構造とすれば、継目が伸縮しても目地材の水路側壁面には引張応力が発生しないことを明らかにした。

c ひび割れ

農業用水路躯体に見られるひび割れの要因は、①施工直後に発生したと考えられる初期欠陥、②地震や想定外の荷重が作用したことによる損傷、③コンクリートの劣化に起因して発生するひび割れ (凍害、アルカリ骨材反応、化学的侵食など)、④鋼材の腐食・膨張に起因して発生するひび割れ (中性化、塩害など) がある (農業農村工学会, 2008)。

農業用水路におけるひび割れは、鉄筋腐食の有無が構造性能に影響するとともに、中性化など他の劣化機構との複合劣化に影響する。ひび割れと鉄筋腐食との関係については、コンクリートの劣化に起因して生じるひび割れの場合には、ひび割れが生じた直後の鉄筋はまだ腐食していない可能性が高いが、鋼材の腐食・膨張に起因して発生するひび割れの場合には、ひび割れが見られた時点で既に鉄筋腐食が進んでいることを意味し、ひび割れから錆汁を伴うこともあり、このようなひび割れは、鉄筋腐食先行型ひび割れと称される (農業農村工学会, 2008)。ひび割れによるかぶりの減少のため、中性化の進行が速くなる可能性もある (北村ら, 2007a)。

本研究におけるひび割れは、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食等に起因するひび割れや、地震や想定外の荷重が作用したことによるひび割れは対象とはせず、それ以外の自然発生によるひび割れに限定することとする。なお、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食等に起因するひび割れは、各々の劣化機構による劣化に含めることとする。

農業用水路のひび割れについての研究には、丸茂・大

森 (2005)、片山 (2007)、石井ら (2007)、北村ら (2007a) などの論文がある。

丸茂・大森 (2005) は、コアの抜き取りによって、農業用水路の組織的なひび割れ調査を実施し、ほとんどのひび割れが温度応力や乾燥収縮ひび割れであると推定した。

片山 (2007) は、初期欠陥の発生頻度が高い「セメントの水和熱に起因するひび割れ」に着目し、鉄筋コンクリート水路を対象にひび割れ照査を試みた。

石井ら (2007) は、コアの抜き取りによって、農業用水路を対象としたひび割れと鉄筋腐食の関係を調査し、ひび割れの多くは収縮や温度応力による貫通ひび割れであり、幅 0.4mm 以上のひび割れが建設後早期に発生すると、水路の耐用期間中に有害な鉄筋腐食を誘発する可能性が高いことを明らかにした。

北村ら (2007a) は、農業用水路の壁面におけるひび割れと中性化の関係について、現地調査に基づき、ひび割れ上では、それ以外の箇所と比較して中性化深さが深いことを示した。

d 凍害

農業用水路に影響を与える凍害は、凍上と凍結融解作用に分けることができる。凍上は、背後の土砂が凍結し、側壁等を水路の内側へ押し出す作用力である (高田, 1983)。凍結融解作用とは、コンクリート中の水分の凍結膨張によって発生するものであり、長年にわたる凍結と融解の繰返しによってコンクリートが徐々に劣化する現象である (日本コンクリート工学協会, 2006)。凍結融解作用が生じると、亀裂の発生や、セメントペーストや細骨材が剥離し、その後、粗骨材が剥落するポップアウトが生じる。

農業用水路の凍上対策についての研究には、吉田・高田 (1980)、大内 (1981)、山平 (1998)、秀島 (2004b)、石田ら (2004)、藤田ら (2005) などの論文がある。

吉田・高田 (1980) は、積雪、寒冷に伴う、大・中規模用水路の破損はほぼ 100% が側壁の傾倒破損であり、その主原因は凍上力であることを指摘し、凍害対策として、水路側壁の背面が土砂に接しないようにして凍上を回避する置ヒ工法、側壁背後の凍結浸入部を置換材料で

置き換えて凍上を減殺あるいは回避する回避工法、断熱材を用いて凍結の侵入を抑制し置換断面を縮小する断熱工法に整理した。

大内(1981)は、凍上害対策の置換工法において、置換断面を決める際に重要となる凍結前線について、現場水路での観測結果から、凍結の進行には積雪状態、気温および背面地盤の土質が関係することを明らかにするとともに、数値解析モデルでは初期条件および融解期における地中からの熱伝導量の検討が必要であることを示した。

山平(1998)は、従来の主流であった置換工法に代わる工法として、水路の側壁背面に透水性断熱材(発泡ポリエチレン)を用いて断熱し、水路背面土を凍結させない断熱工法の採用を試み、凍上力の作用の軽減とともに経済性に優れていることを明らかにした。

秀島(2004b)は、側壁背面のかなりの範囲を高透水性材料の切込砕石で置換える工法は凍上対策として有効であるが、一方でその分の排土を伴うことから、従来の置換工法に代わるものとして、透水性断熱材を用いた断熱工法が考案されたことを指摘した。

石田ら(2004)は、凍上力の統計パラメータを整理し構造信頼性解析を行い、現行の凍上力を考慮した構造計算に関する設計指針(北海道開発局農業水産部監修, 1998)に基づく設計の工学的構造安全性が高いことを明らかにした。

藤田ら(2005)は、性能照査型の設計に対応するため、農業用開水路の設計荷重のうち、積雪寒冷地の特有荷重である凍上力に対し、荷重に対する安全に関する農業水利分野独自の部分安全係数の設定を試みた。

農業用水路の凍結融解作用に関する研究には、高橋・細川(1983)、高橋(1989)、秀島(2004b)などの論文がある。

高橋・細川(1983)は、北東北地方における用排水路の現地調査の結果から、コンクリートの多くに亀裂の発生や損傷が見られ、これは、寒冷地の過酷な気象作用の影響だけではなく、コンクリート製品の品質や成形方法、製造工程によることを指摘した。

高橋(1989)は、農業用水路のコアの抜き取りによる試験結果から、凍結融解作用による劣化は、水面付近より上方で、かつ天端にかけて進行が速いことを明らかにするとともに、コンクリート圧縮強度と耐久性の間には相関が認められず、凍結融解作用を受ける積雪寒冷地帯に使用されるコンクリート製品の品質管理が、主として圧縮強度で行われていたことに対して、新たな問題を提起した。

秀島(2004b)は、農業用水路の凍結融解作用による被害の発生部位は、側壁天端部、打ち継ぎ目と側壁の接合部などに観察される場合があることを指摘した。

e 中性化

中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵

入し炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液のpHが低下する現象である。これにより、コンクリート内部の鋼材に腐食の可能性が生じる。鋼材腐食の進行により、ひび割れの発生、かぶりの剥離・剥落、鋼材の断面欠損による耐荷力の低下等、構造物あるいは部材の性能低下が生じる。また中性化は、水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、鋼材の腐食だけではなくコンクリートの強度変化などを引き起こす可能性もある(日本コンクリート工学協会, 2006)。

農業用水路の中性化についての研究には、秀島(2004a, 2004b)、北村ら(2007a)などの論文がある。

秀島(2004a, 2004b)は、中性化深さは、20～30年経過の水路では約5mm以下で、深くても10mm前後のものが散見され、内部の構造鉄筋から離れた表面付近のみに中性化が止まっており、構造部材厚の減少としては無視できるオーダーで、このような場合には、そのまま継続使用したり、簡易な表面補修で供用期間を延長できることを明らかにした。

北村ら(2007a)は、水路の壁面の灌漑期水位以下では、灌漑期水位以上に比べて湿潤状態に置かれる期間が長いこと、中性化の進行が遅いこと、ひび割れ上では中性化の進行が速いことを示した。

f 塩害

塩害は、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在によって促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鋼材の断面減少などを伴うことにより、構造物の性能が低下し構造物が所定の機能を果たすことができなくなる現象である。このような劣化を促進する塩化物イオンは、海水や凍結防止剤のように構造物の外部環境から供給される場合と、コンクリート製造時に材料から供給される場合とがある(日本コンクリート工学協会, 2006)。

なお、農業用水路の塩害に関する研究事例は、見当たらない。

g アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応は、コンクリート中に溶脱したアルカリ成分と特定の骨材が反応し、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生させる現象である。無筋コンクリートまたは鉄筋量の少ないコンクリート構造物の場合、ひび割れは網の目状、亀甲状を示すことが多いが、軸方向鋼材やPC鋼材によりアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張が拘束される鉄筋コンクリート構造物やプレストレストコンクリート構造物では、軸方向鉄筋やPC鋼材に沿った方向性のあるひび割れが発生することがある(農業農村工学会, 2008)。

農業用水路のアルカリ骨材反応についての研究には、長東ら(1995)などの論文がある。

長東ら(1995)は、香川用水における農業用水路のコンクリート壁面に顕在化してきたひび割れ等の劣化現象の原因が、アルカリ骨材反応に起因するものである疑い

がもたれたため、調査を実施し補修工法の検討を行った。

h 化学的侵食

化学的侵食は、コンクリートが外部からの化学的作用を受け、その結果として、セメント硬化体を構成する水和生成物の変質あるいは分解して結合能力を失っていく劣化現象を言い、化学的侵食を及ぼす要因は、酸類、アルカリ類、塩類、油類、腐食性ガスなど多岐にわたり、その結果として生じる劣化状態も一様ではない（日本コンクリート工学協会、2006）。

化学的侵食は、以下の三種類の現象に大別される（戸田、2005）。①劣化因子がセメントの水和生成物と化学反応を起こし、水に溶けにくいセメント水和物を可溶性物質に変化させ、コンクリートの組織を多孔化したり、分解したりする劣化現象。②劣化因子がセメントの水和生成物と化学反応を起こして新たに膨張性の化合物を生成し、生成時の膨張圧によってコンクリートを劣化させる現象。③コンクリートが長期間にわたって水に接することにより、セメント水和物の成分が外部に溶脱してコンクリート硬化体の組織が多孔化する現象。

農業水利施設関連では、微生物により生成された硫酸による農業集落排水処理施設のコンクリートの劣化、地下水の炭酸濃度が高い地域で埋設されたコンクリート管のカバーモルタルの侵食などに留意が必要であるとの指摘はある（農業農村工学会、2008）が、具体的な研究事例は見当たらない。

3 農業用水路の各劣化機構の特徴

IV.2 に示した農業用水路の各劣化機構による劣化現象が必ずしも、わが国の多くの地域の多くの水路において一般的に見られるものとは限らない。そのため、各劣化機構による劣化現象の発生地域や発生時期等について考察し、どの劣化機構による劣化現象が、わが国の農業用水路に多く見られるものかを特定し、その特徴的な劣化機構による劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測手法を開発することが必要である。

各劣化機構による劣化現象の発生に関する特徴は、以下の通りである。

農業用水路における殆どのひび割れは、温度応力や乾燥収縮ひび割れであると推定され（丸茂・大森、2005）、これらは施工時に発生する初期欠陥である（長束ら、2002）。

凍害は、凍上と凍結融解作用の双方とも、寒冷地に限定されたものである。凍上対策は、北海道を中心として実施されてきた（吉田・高田、1980）。凍結融解作用については、長谷川・藤原（1988）が、各地域の凍結危険度を計算し、凍結危険度を6段階に分類した凍結危険度の分布図を作成している。これによると、わが国におけるコンクリート構造物の凍結融解作用の危険性は、山間部、内陸部を中心に分布している。

中性化は、農業水利コンクリートの特徴として、十分

なかぶりが確保されていれば、中性化による鉄筋腐食、ひび割れの事例は、これまでの調査範囲では殆ど見られていない（森、2006）。

塩害は、塩害の原因となるコンクリート中に最も塩化物イオンが浸入し易い環境の1つが海洋環境であり（土木学会、2001）、大気中の塩分量は、海岸から250mぐらいまで多く、1km以上の内陸では極めて少ない（大即ら、1986）。

アルカリ骨材反応には、アルカリシリカ反応（ASR）とアルカリ炭酸塩岩反応があるが、わが国で主に被害が報告されているのはASRである（土木学会、2001）。わが国では、1989年にASRの骨材試験方法・判定基準、抑制対策が規定され、それ以降、ASRによるコンクリート構造部の損傷は少なくなっている（日本コンクリート工学協会、2006）。

化学的侵食は、一般的な環境において問題となることは少なく、温泉地や酸性河川流域に建造された構造物等がその代表例である（日本コンクリート工学協会、2006）。

そのため、農業用水路の劣化機構の中で、ひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食は、ある特定の時期、地域や環境条件において限定的に発生する劣化現象であると言える。一方、壁面の摩耗と継目の劣化については、農業用水路の多くの場合に発生する劣化機構である。

また、長大な延長を有する農業用水路の点検を実施する際には、時間的あるいは予算的制約や、点検実施者に要求される熟練度等の観点から、目視もしくは簡易な器具を用いた点検手法が主になる。このような手法で点検することが比較的容易な劣化機構としては、壁面の摩耗がある。

その一方で、継目の劣化では、継目内部に挿入されている止水板の断裂による漏水が問題となる。しかし、止水板の劣化状態を目視や簡易な器具を用いて判断できるのは、水路の壁面の天端に露出している部分に限定され、継目内部における止水板の劣化を直接的に評価できない。また、継目からの漏水は、それが未だに発生していないか、もしくは、既に発生しているかのどちらかの2値状態を示す。したがって、たとえ、目視や簡易な器具を用いて、継目の劣化を評価できた場合においても、原則的には2値状態の評価となる。そのため、継目の劣化は、止水板の断裂による漏水が生じた後に事後保全によって補修等が実施される場合が多い。

一方、壁面の摩耗は、経年によって、セメントペーストの流出、細骨材の流出、粗骨材の剥離といったように、外観の変状を複数の段階（グレード）で評価することが可能であり、適切な評価手法を確立することができれば、将来のどの時点で、どの程度の劣化が進行するかを精度良く予測することが可能となる。また、壁面の摩耗と継目の止水板の劣化の進行は、ともに初期建設後の

経年によって進行することから、両者には相関があるものと考えられる。この両者の相関については、第V章において、水路の有する水利用性能の低下との関連において述べる。そのため、現状では、目視または簡易な器具を用いた劣化状態の点検とその点検結果に基づく劣化予測を必要とし、かつ、現実的にそれらが可能なものとしては、壁面の摩耗があり、壁面の摩耗によって、農業用水路の経年による総合的な劣化進行を代表させることが可能である。

そのため、本研究では、農業用水路の壁面の摩耗を対象として、目視または簡易な器具を用いた劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測手法の提案と検討を行う。そして、壁面の摩耗による劣化状態の点検とその結果に基づく将来の劣化予測によって、農業用水路の総合的な劣化傾向を推定することが可能である。

4 まとめ

長大な延長を有する農業用水路の中でも特徴的である鉄筋コンクリート製開水路の各種劣化機構と、それに関連する既往研究について整理した。

鉄筋コンクリート製農業用水路の各種劣化機構に関する既往の研究事例は少ない。これは、これまでは農業用水路がほぼ完全に劣化または崩壊し、農業用水路が果たすべき性能を十分に発揮できなくなった場合に、事後保全によって補修・補強または全面更新する場合が多かったためと考えられる。

また、これまでの用水路の劣化機構に関する既往の研究は、コンクリート構造物としての供試体を用いた室内実験が主であり、現場の実構造物の初期建設後の経年による劣化を対象としたものは少ない。また、室内実験の結果と実構造物の劣化現象とが合致することは稀であり、これらの間の相関性に疑問が残るとの指摘もある。

IV.2においては、農業用水路の劣化要因となる劣化機構を分類し、農業用水路の各々の劣化機構に関する既往の研究成果を整理した。

IV.3においては、農業用水路の各劣化機構の特徴について整理した。農業用水路における劣化機構の中で、ひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食は、ある特定の時期、地域や環境条件において限定的に発生するものである。また、継目に挿入された止水板の劣化は、目視や簡易な器具を用いた劣化状態の点検を実施することが困難である。さらに、継目における止水板の断裂による漏水は、漏水が生じた場合に初めて確認が可能である。そのため、長大な延長を有する農業用水路の点検は、その作業の効率性から、目視もしくは簡易な器具を用いた点検が主となることから、このような点検が可能な農業用水路の劣化機構としては、壁面の摩耗があることを示した。さらに、壁面の摩耗による劣化状態の点検とその結果に基づく将来の劣化予測によって、水路の総合的な劣化傾向を推定できることを示

した。

水路の壁面の摩耗によるセメントペーストや細骨材の流出や、粗骨材の露出や剥離は、水路の本来有すべき諸性能に影響を与える。しかし、実構造物である農業用水路を取り巻く環境条件は非常に複雑であることから、摩耗によって水路の壁面の劣化が進行していく現象のメカニズムを解明することは困難であり、供試体を用いた室内実験によって、実構造物の経年による劣化現象を促進もしくは再現することは難しい。

そのため、現場の実構造物である農業用水路を対象としたストックマネジメントの適切な実施には、複雑な環境条件下で生じる水路の壁面の摩耗による外観の変状の適切な点検手法とその結果に基づく劣化予測手法を用いることが必要である。また、外観の変状とそれによる水路の有する諸性能の低下の関係、外観の変状が進行した場合に考慮すべき、低下した性能を回復させるために実施する補修等の対策の関係について、明確にすることが必要である。したがって、第V章においては、これらについて整理する。

V 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測と性能低下

1 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測と性能低下の関連

第IV章において整理したように、農業用水路に特徴的な劣化機構として壁面の摩耗があり、V.4で後述するように、壁面の摩耗によって水路の総合的な劣化を代表させることができる。流水や流砂に起因する摩耗によって劣化が生じる壁面は、灌漑期には水位以下にあり点検が困難であるが、非灌漑期には目視や簡易な器具を用いた外観の変状の点検が可能であり、その点検結果に基づく外観の変状の劣化予測が可能である。しかし、その際には、どのような劣化予測手法が、水路壁面の摩耗による外観の変状の予測に適しているかを明確にすることが必要である。

そして、水路壁面の摩耗による外観の変状は、水路の有する諸性能の低下に影響を及ぼす。そのため、水路壁面の摩耗による外観の変状と、水路の有する性能の低下の関係について、明確にすることが必要である。

ストックマネジメントにおいては、現場の実構造物である農業用水路を対象として、水路壁面の摩耗による外観の変状の点検とその結果に基づく劣化予測を行うことが必要となる。この際には、供試体を用いた室内実験とは異なり、現場での複雑な環境条件下での点検データを基に、劣化予測を行うことが要求される。そのため、供試体を用いた室内実験等による劣化メカニズムの解明を待つのではなく、初期建設後の供用年数を変数として、劣化の進行を予測することがより現実的な劣化予測手法と考えられる。

また、水路壁面の摩耗による外観の変状と、それに伴う性能の低下の関係については、性能低下そのものの予測を定量的に明示することは、性能照査手法が確立されていない現段階では困難であり、今後の研究が待たれているところである(野中, 2006)。しかしながら、可能な限り明確にすることが求められる。

そこで、本章においては、既往の研究成果と現地調査の結果に基づいて、農業用水路壁面の摩耗による外観の変状と性能低下との関係について明らかにする。また、外観の変状による劣化と、低下した性能を回復させるために必要な補修等の対策との関連についても整理する。

V.2においては、ストックマネジメントに対応した農業用水路の劣化予測手法について整理する。

V.3においては、農業用水路壁面の摩耗による外観の変状のグレーディングである劣化過程と健全度について整理する。

V.4においては、農業用水路壁面の摩耗による外観の変状と、それに伴う水路の有する性能の低下の関係について明らかにする。

V.5においては、農業用水路壁面の摩耗による外観の変状が生じた際に、低下した性能を回復させるために必要な補修等の対策について整理する。

2 スtockマネジメントに対応した農業用水路の劣化予測手法

農業水利施設のストックマネジメントの基本フレームは、第Ⅲ章で示したように、次のように分類できる。①ライフサイクルコスト低減に向けた設計・施工、②点検による施設の劣化状態の把握、③施設の将来における劣化状態の予測、④補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢の検討、⑤複数の選択肢のライフサイクルコストの比較、⑥最適な全体計画の策定。

この中で、農業水利施設に関して、既に研究が開始されているものに、②の点検による施設の劣化状態の把握を行う高度な機械を用いた非破壊の機能診断手法や、④の継目の補修工法等がある。一方、③の施設の将来における劣化状態の予測に関する研究事例は殆ど見当たらず、現実的には、施設の劣化予測を行わないで、現場技術者の知見と経験に基づく判断で、補修や全面更新等の工法と実施時期の決定が行われてきた。また、②の高度な機械を用いた非破壊の機能診断手法は、未だ試行段階であり、現場に適用可能なレベルには達していない。しかし、②の現場に適用可能な簡易な点検手法と、③の精度の高い劣化予測手法の開発がなければ、その後の④各種対策工法の検討、⑤ライフサイクルコストの比較、⑥最適な全体計画の策定は、現実的には困難であり、農業水利施設の適切なストックマネジメントの実施は困難である。そのため、現在、最も研究開発が急務となっているのが、②の現場に適用可能な簡易な点検手法と、その結果に基づく③の精度の高い施設の劣化予測手法の開発

である(北村ら, 2007a)。

長大な延長を有する農業用水路の劣化機構には、第Ⅳ章に示したように、コンクリート構造物に一般的な、ひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食以外に、農業用水路に特徴的なものとして壁面の摩耗と継目の劣化がある。継目の劣化についても、漏水の要因となる止水板の劣化を直接的に点検することが困難であることから、劣化進行の目視による点検が可能な壁面の摩耗で代表させることとしたところである。農業用水路壁面の摩耗による劣化は、流水や流砂に起因するものであるが、摩耗に関する独自の調査・評価法の開発が必要であること(長束ら, 2002)が指摘されている。

水路壁面の摩耗といったストックマネジメントにおける施設の劣化予測は、既往の研究や知見に基づく適切な劣化予測モデルを用い、このモデルに点検によって得られた構造物の形状や配筋状況、コンクリートの品質ならびに鋼材の状態などのデータを加味して、定量的に行うことが望ましい(土木学会, 2008)。ただし、定量的な予測を行うためには、劣化予測モデルの精度を高めるとともに、点検において、量および質なども含め適切なデータを収集することが必要となる。実際の点検では、点検実施の効率性を考えて、比較的簡易な目視観察を主体とした調査を実施し、必要に応じて定量的なデータが得られる調査を行うことになるため、劣化の程度をいくつかの段階(グレード)に区分し、それぞれの長さを予測できるような予測モデルを用いて、劣化予測を行うことが現実的である。

実構造物を対象とした劣化については、農林水産省、旧運輸省、旧建設省の3省合同の土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の2000年3月の調査結果では、施設の劣化度と供用年数の間には高い相関があり(長束ら, 2000)、コンクリート構造物の劣化は経年による影響が最も大きいこと(渡嘉敷, 2003)が指摘されている。

実構造物である土木施設の初期建設後の供用年数を変数とした劣化予測モデルとしては、劣化メカニズムがある程度解明されている力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデル(例えば、小林ら, 2001; 鍵本ら, 2002)と、過去の目視検査結果に基づいた統計的な劣化予測モデルがある(例えば、貝戸ら, 2003; 津田ら, 2005)。力学的メカニズムに基づいた劣化予測手法には今後の研究の蓄積が望まれており信頼性に欠ける面があることが否定できないことから、現状での予測手法として点検結果に基づく方法が望ましい(土木学会, 2001a)とされている。

さらに、農業用水路は長大な延長を有するため、点検の効率性の観点から、目視あるいは簡易な器具を用いた点検を主とせざるを得ないという特徴がある。また、水路の各バレル毎に、それらを構成する材料条件や、流速、水質、流水中に含まれる砂礫分などの水路の劣化に係わる環境条件を詳細に調査することは困難である。

そのため、水路壁面の摩耗といったストックマネジメ

ントに対応した農業用水路の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測は、目視あるいは簡易な器具を用いた手法で評価可能な外観の変状を複数の段階（グレード）に区分し、点検データを収集し、それらを統計的に処理することによって、供用年数を変数とした劣化進行を予測する手法が現時点では有効かつ適切である。

3 農業用水路の壁面摩耗による劣化過程と健全度

コンクリートの表面は、初期建設後の経年によって、摩耗が進行する。Fig.11 に示したように、コンクリートには、主な構成要素として、セメントペースト、細骨材、粗骨材があり、これらが経年によって、順に流出または剥離していく。

本研究では、農業用水路壁面の摩耗による外観の変状の複数の段階（グレード）を劣化過程と健全度によって表現する。劣化過程と健全度は、施設の初期建設後の経年によって劣化が進行し、外観の変状が生じた状態を、複数のグレードで表現するものである（北村ら、2008a）。本研究では、劣化過程は、施設の劣化状態をその劣化進行の外観の変状に応じて5段階の複数のグレードに分類するものであり、健全度は、施設の劣化進行の外観の変状を、より詳細に11段階の数値で表現することによって示す複数のグレードであるものとする。

劣化予測に用いる各種劣化機構による外観の変状のグレードは、5段階に分類する人が多い（例えば、土木学会、2008）。コンクリート構造物の中性化の場合は、5段階の分類を中性化の進行特性から、潜伏期、進展期、加速期前期、加速期後期、劣化期と呼んでいる（土木学会、2008）。本研究では、農業用水路壁面の摩耗の想定される進行特性から、劣化過程を潜伏期、進展期、顕在期前期、顕在期後期、劣化期の5段階とすることとする。また、健全度は、さらに詳細に5.5～0.5の0.5刻みの数値の11段階に分類したものである。点検実施者が訓練を行うことによって、この11段階の健全度を用いて、さらに詳細な点検とそれに基づく劣化予測を可能とするものである。

施設の初期建設時とほぼ同じ状態を劣化過程では潜伏期と呼び、それに対応する健全度は5.5～4.5とし、劣化過程が劣化期になり健全度が1.5～0.5に達した場合には補修等による施設の性能の回復が困難であり全面更新または廃棄が必要となる。その間の劣化過程が進展期、顕在期前期、顕在期後期で、健全度が4.5～1.5の場合で、複数の補修・補強や更新の時期と工法の選択肢の中から、LCC算定結果に基づいて最適と判断される場合には補修・補強や更新を行うこともあり得る。劣化過程及び健全度と、水路の劣化と補修による劣化の回復の概念図をFig.13に示す。すなわち、初期建設後の水路は、供用年数が経ることによって劣化が進行し、劣化の度合いを示す健全度が低下する。ある設定された整備水準に達した場合に補修を実施すると、健全度が回復し、その後は補

修後の再劣化が進行する。また、壁面の摩耗による劣化過程の標準的な状態と、健全度評価基準をTable 3とTable 4に示し、壁面の摩耗の健全度4.0, 3.0, 2.0, 1.0の例をFig.14に示す。また、実際の水路壁面の摩耗による表面の凹凸の進行をスケッチした例をFig.15に示す。これらに示すように、壁面の摩耗の進行による劣化過程を、以下の5段階に分けることとした。コンクリートの表面に変状がない期間であり、施工完了後のようにコンクリートが滑らかな状態である潜伏期。セメントペーストが流出する期間であり、表面のセメントペーストが流出し、ざらついている状態である進展期。細骨材の流出が始まり、表面の細骨材が流され、粗骨材が見え始めている顕在期前期。細骨材の流出が進み、粗骨材の粒子が半分程度露出している顕在期後期。粗骨材が流出する期間であり、粗骨材が剥離している劣化期。また、健全度については、壁面の摩耗による劣化進行をより詳細に評価するため、5.5～0.5までの0.5刻みとした。これは、また、劣化過程の潜伏期は健全度5.5～4.5、進展期は健全度4.5～3.5、顕在期前期は健全度3.5～2.5、顕在

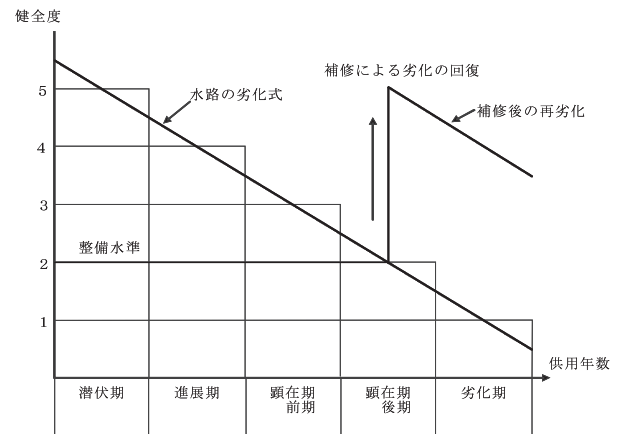


Fig.13 農業用水路の劣化と補修による劣化の回復の概念図
Concept of Deterioration and Recovery with Rehabilitation of Irrigation Canal

Table 3 農業用水路の壁面摩耗による劣化過程の評価基準
Evaluation Criterion of Deterioration Progress by Abrasion of Irrigation Canal

劣化過程	定義	標準的な状態
潜伏期	コンクリートの表面に変状が無い期間	施工完了後のように、コンクリート表面が滑らかな状態
進展期	セメントペーストが流出する期間	表面のセメントペーストが流出し、ざらついている
顕在期前期	細骨材の流出が始まった期間	表面の細骨材が流され、粗骨材が見え始めている
顕在期後期	細骨材の流出が進んだ期間	粗骨材の粒子が半分程度露出している
劣化期	粗骨材が流出する期間	粗骨材が剥離している

Table 4 農業用水路の壁面摩耗の健全度の評価基準
Evaluation Criterion of Soundness Index of Abrasion of Irrigation Canal

劣化過程	健全度	劣化の状態
潜 状 期	5.5	施工完了直後で、コンクリート表面が極めて滑らかな状態。
	5.0	セメントペーストの流出が開始しておらず、施工完了直後のように、コンクリートの表面が滑らかな状態。
	4.5	セメントペーストの流出が開始し、コンクリートの表面がざらつきはじめる状態。
進 展 期	4.0	セメントペーストの流出が進行し、コンクリートの表面がざらついている状態。
	3.5	細骨材の流出が開始するが、表面に粗骨材がまだ見え始めていない状態。
顕在期前期	3.0	細骨材の流出が進行し、表面の細骨材が流され、粗骨材が見え始めている状態。
	2.5	細骨材の流出が進行し、表面の細骨材が流され、粗骨材の粒子が1/3程度露出している状態。
顕在期後期	2.0	細骨材の流出が進行し、表面の細骨材が流され、粗骨材の粒子が半分程度露出しているが、剥離していない状態。
	1.5	粗骨材の流出が開始し、粗骨材の剥離が始まる状態。
劣 化 期	1.0	粗骨材の流出が進行し、粗骨材が既に剥離している状態。
	0.5	粗骨材の剥離が著しく、広範囲に断面欠損が生じている状態。

注) 水路壁面の灌漑期水位以下の部分を評価対象とする。

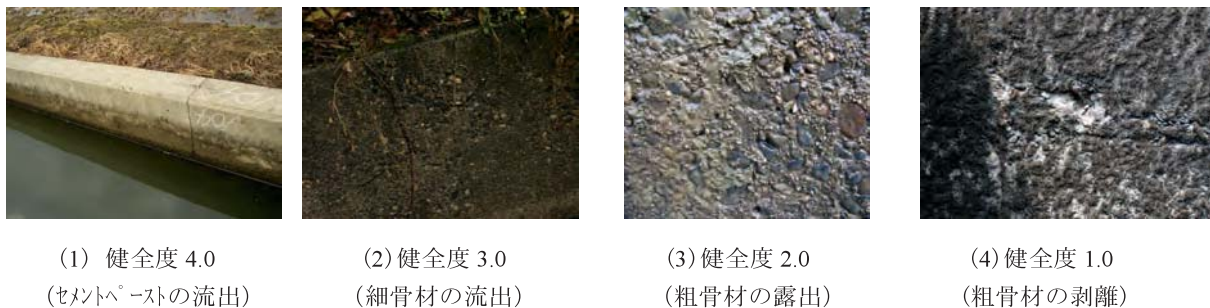


Fig.14 健全度 4.0 ~ 1.0 の例
Examples of Soundness Index 4.0 ~ 1.0

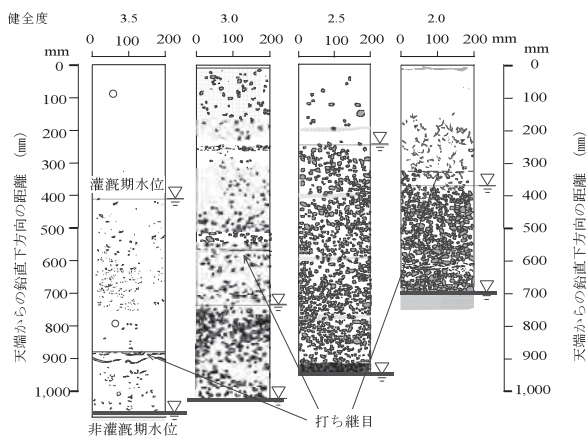


Fig.15 実際の水路壁面の摩耗のスケッチ図
Sketch of Abrasion of Irrigation Canal

期後期は健全度 2.5 ~ 1.5、劣化期は健全度 1.5 ~ 0.5 に相当するものである。また、水路壁面の摩耗による劣化は、灌漑期計画最大流量流下時水位（以下、灌漑期水位と言う。）以上に比べて灌漑期水位以下の方が進行が速いと考えられるため、これらの水路壁面の摩耗による劣化過程と健全度は、水路壁面の灌漑期水位以下の部分を評価対象とすることとする。これは、灌漑期水位以下の方が、流水や流砂による摩耗を生じる環境に曝される条件が、灌漑期水位以上よりも激しいことによる。

4 農業用水路の壁面摩耗による性能低下

農業用水路等の農業水利施設に要求される性能は、Table 5 に示すように、水力性能、構造性能、水利用性能、社会的安全性能に整理される（農業農村工学会，2008）。

Table 5 農業用水路の要求性能
Required Performance of Irrigation Canal

性能分野	内 容	要求性能
水理性能	用水を輸送する水理学的性能	通水性能 理学的安全性能 流水制御機能
構造性能	水利用性能と水理性能を実体化するための水利構造物の形態を保持する機能	力学的安全性能 安定性能 使用性能 耐久性能
水利用性能	管理者が用水を送配水し、農家はその用水を利用できる機能	均等分水性能 水利用弾力性能 システム操作性能
社会的安定性能	地震発生時に支障を生じない性能	耐震性能

水理性能、構造性能、水利用性能は以下のように定義されている。水理性能は、用水を輸送する水理学的性能。構造性能は、水理性能と水利用性能を実体化するための水利構造物の形態を保持する性能。水利用性能は、管理者が用水を送排水し、農家はその用水を利用できる性能(中ら, 2003)。また、社会的安定性能は、地震発生時に支障を生じない性能と言える。

農業用水路の壁面の摩耗が進行することによって、これらの要求される性能にどのような影響を与えるかを明確にすることが必要である。しかし、性能そのものを直接的に評価する性能設計や性能照査の手法は、現状では確立されておらず、今後の研究が待たれているところである(野中, 2006)。

コンクリート表面の摩耗に関する耐久性の照査については、次のものがある。すなわち、摩耗に関する照査は、式(10)に示すように、構造物の照査対象部分において、摩耗深さの設計値 A_d と許容摩耗深さ A_{max} の比に構造物係数 γ_i を乗じた値が、1.0以下であることを確かめることにより行ってよい(農業農村工学会, 2008)とされている。ここに、 γ_i は構造物係数、 A_{max} は許容摩耗深さ(mm)、 A_d は摩耗深さの設計値(mm)である。

$$\gamma_i \frac{A_d}{A_{max}} \leq 1.0 \quad (10)$$

しかし、これは、あくまで概念的なものであり、許容摩耗深さ A_{max} や構造物係数 γ_i を具体的にどのようにして決定するかについては、明確なものがない。そのため、このように現状では摩耗に関する性能照査の手法が確立されていないことから、水路壁面の摩耗の進行が、水路の有する各種性能にどのような影響を及ぼすかを、既往の研究成果と現地調査の結果に基づいて明らかにする。

水路壁面の摩耗と水路の水理性能の関係については、次のように整理できる。

水路の水理性能を示す指標としては、マンニングの粗度係数がある。粗度係数は、開水路の平均流速の公式において断面の流水抵抗を示す係数である。竹村ら(2001)

は、現場の農業用水路における粗度係数の供用後の変化は、十分に把握されておらず、また、供用後の粗度係数の現地調査による算定には、水面勾配の高精度な測定が必要であることを指摘している。そして、実際に、現場の水路における流量観測に基づいて、経年による粗度係数の変化を明らかにしようと試みた。しかし、その結果は、現地の水路における流量観測に基づく算定では、粗度係数は、設計標準値の $n=0.015$ よりも良好な値となったとともに、経年による粗度係数の悪化が確認できず、「造成後の経年による粗度係数の悪化」との予想に反する結果となったことを報告している。このことから、水路の壁面の摩耗が進行しても、水理性能に与える影響は小さいと言える。

水路壁面の摩耗と水路の構造性能の関係については、次のように整理できる。

本間ら(2008)は、現状では性能照査手法が十分に確立されていないことから、従来の許容応力度法を用いて、水路の摩耗による壁面厚の減少と鉄筋の許容引張応力度の関係について整理している。水路幅250cm、深さ150cm、側壁厚20cmの鉄筋コンクリート製開水路において、かぶり50mm、鉄筋径D13mm、鉄筋許容引張応力度 176.5N/mm^2 とした場合、壁面厚が摩耗によって22mm減少した際に、鉄筋の引張応力度が設計値を超える。この場合、構造性能の観点からは、側壁が倒壊する可能性がある。また、摩耗深さ22mmは、コンクリートの最大骨材寸法を20mmとすると、ほぼ粗骨材が剥離した状況であり、劣化期(健全度1.0)に相当する。すなわち、劣化期(健全度1.0)では、鉄筋の引張応力度が設計値を超え、構造性能に問題が生じる。また、新井ら(1996)は、モデルを用いて流砂によるコンクリート製水路の摩耗に関する検討を行っており、初期建設時からの摩耗の進行は、ほぼ定常的に進行することを示している。これを基にすると、初期建設時の健全度5.5の摩耗深さ0mmから、健全度1.0の場合の摩耗深さ22mmまで、摩耗によって初期断面からの摩耗深さが定常的に進行すると考えることができる。

水路壁面の摩耗と水路の水利用性能の関係については、次のように整理できる。

水路に特徴的な水利用性能に影響を与える要因として、水路からの漏水がある。漏水の多くは、水路の継目から生じる場合が多い。水路の継目の構造はFig.12のようになっており、継目に挿入されている止水板によって漏水を防止する構造となっている。

初期建設後の経年によって継目の止水板が断裂することによって、継目からの漏水が生じる。しかし、継目は、側壁の天端部分でしか目視で判断することができず、側壁内部において止水板が断裂しているかどうかの判断は目視ではできない。水路を堰き止めて漏水試験を行うことによって、漏水の有無を確認することは可能であるが、漏水試験の実施には時間と困難性を伴うことから、水路

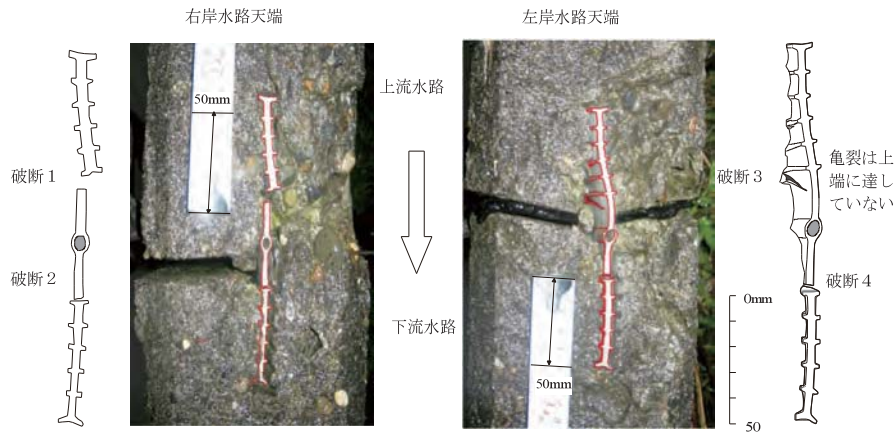


Fig.16 供用 39 年水路の継目の止水板の天端部での断裂状況
Cutting of Waterproof Plate on Top of Canal of 39 Years Elaped

の全ての区間で実施することは現実的ではない。

水路の側壁の天端部分の止水板の経年における劣化に関する調査事例（北村ら，2008a）では，目視による止水板の天端部分の断裂状況の確認と，ピック貫入試験による止水板の天端部分の経年による硬化の調査を行っている。供用 39 年の水路の継目では，**Fig.16** に示すように，側壁の天端部分の止水板に断裂が生じていることが確認できたが，内部まで貫通しているかどうかは不明である。この水路の場合の壁面の摩耗の進行は顕在期後期（健全度 2.0）である。また，ピック貫入試験とは，軟岩の調査・試験の指針（土木学会，1991b）に定められた針貫入試験法に準拠した，軟岩ベネトロ計 SH-70（丸東製作所製）の針部分を鋼製ピックにして行うものである。試験結果は，貫入量（cm）と貫入荷重（N）の比である貫入勾配（N/cm）で表現され，これは，その材質の硬度を表現するものである。**Fig.17** に示すように，初期建設後の経年によって，止水板の天端部分が硬化していくことがわかる。ある程度まで硬化が進行し，コンクリート躯体の伸縮に追従できなくなった場合に，止水板が断裂し，継目から漏水が発生するものと考えられる。

このように，継目からの漏水は，止水板の経年による硬化によって，コンクリート躯体の伸縮に追従できなくなった場合に，止水板が断裂し，継目から漏水が発生することが多いと言える。しかし，止水板の大半は，目地

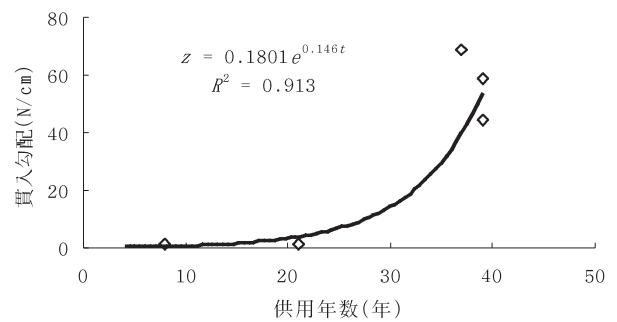


Fig.17 ピック貫入試験による止水板の天端部の経年による硬化
Hardness of Waterproof Plate on Top of Canal
with Elapsed Years by Pick Sticking Test

材やコンクリート躯体の間に隠れており，目視によって断裂の有無の判断ができず，漏水発生後の事後補修が対策工法の主体となっている。

しかし，壁面の摩耗が経年によって進行するのと同様に，初期建設後の経年によって，止水板の硬化と断裂による漏水の発生の可能性が大きくなっていくと考えられる。過去に漏水が発生し既に補修されている継目と，点検実施時に漏水が生じている継目の様子を **Fig.18** に示す。第 VI 章で本研究の調査対象地区とする北陸地域の西蒲原地区の調査対象水路における，目視による壁面の摩耗の健全度と，その壁面のバレルに隣接する継目の，過去に漏水が生じたために既に補修が実施されている箇所



補修された継目



継目からの漏水

Fig.18 補修された継目と，継目からの漏水
Rehabilitated Joint and Water Leak from Joint

数と、点検実施時に漏水が確認できた箇所数の合計の全体に占める割合の関係を Fig.19 に示す。

図中の丸の大きさは点検データ数を示し、丸が大きいほど点検データ数が多いことを示す。このことから、壁面の摩耗の健全度が5.5～4.5までの間には、隣接する継目での漏水は発生していないが、壁面の摩耗の健全度がそれ以下の場合には、隣接する継目における漏水が発生する箇所の割合が定常的に増加し、式(11)によって示すことができる。ここで、 S は壁面の摩耗の健全度であり、 r は隣接する継目の既補修または漏水箇所の割合

である。

$$r = -0.3597S + 1.6361 \quad (R^2=0.857) \quad (11)$$

このことから、従来は漏水発生後の事後補修でしか対応できなかった継目における漏水について、壁面の摩耗の健全度によって、隣接する継目において漏水が発生する割合を将来的に推定することが可能であることがわかる。すなわち、壁面の摩耗の健全度は、継目の劣化による漏水が発生する割合を推定可能な定量的な指標であり、壁面の摩耗で、水路の総合的な劣化を代表させ、経年による水路の総合的な劣化進行を推定することが可能である。また、壁面の摩耗の健全度が4.0以下の場合には、隣接する継目からの漏水が発生し、水路の水利用性能に影響を与えるため、継目単独の補修や、水路全体の改修などの対策工法が必要となる。

水路壁面の摩耗と水路の社会的安定性能の関係については、次のように整理できる。

社会的安定性能は、地震発生時に水路が破壊され、その他の構造的な性能、水理性能、水利用性能に影響を与えることがないような、耐震性の性能である。今後の地震発生確率については、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2008)が、今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図(平均ケース)を作成してい

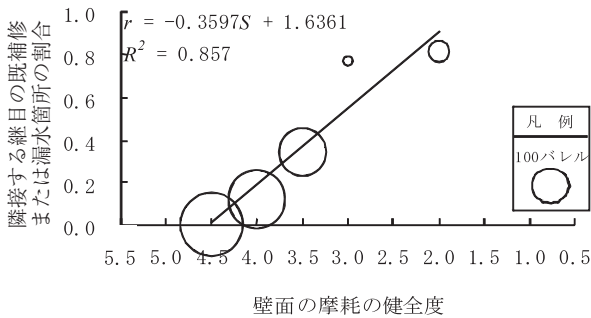


Fig.19 壁面摩耗の健全度と、隣接する継目の既補修または漏水箇所の割合
Soundness Index of Abrasion and Ratio of Adjacent Joints Already Rehabilitated or Water Leak

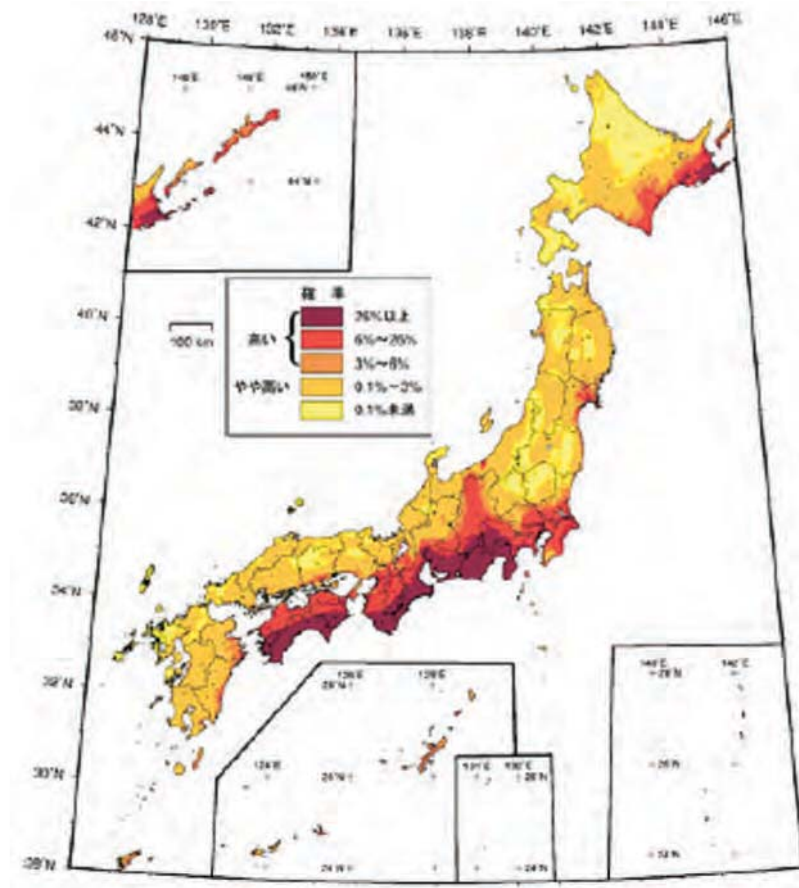


Fig.20 今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図(平均ケース)
出典：地震調査研究推進本部地震調査委員会(2008)

Distribution Map of Probability of Attacked by Quake of More Than Intensity of 6- During Coming 30 Years

る (Fig.20)。太平洋側では確率が大きくなっているが、その他の地域では、確率は小さい。

地震による農業用水路の被害に関する調査報告には、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震に関するものがある。この地震による被害は新潟県内に集中しており、農業用施設の被災箇所は506箇所、このうち農業用水路は277箇所に及んでいる(新潟県農地部, 2007)。森ら(2008)は、被害が集中した新潟県柏崎地域振興局管内を中心に現地調査を行い、水路側壁天端の止水板の延長線上の水路上下流方向のひび割れ、側壁コンクリートの剥離、継目部のコンクリートや止水板の剥落があったことを報告している。しかし、第VI章で本研究の調査対象地区とした西蒲原地区内では、震度は最大で5強であり、地震発生後に目視による健全度評価を実施したTable 8に示すA~J用水路の全延長の全てのバレルと隣接する継目についての目視による調査結果では、継目部のコンクリートのひび割れもしくは剥離が4箇所確認できたのみで、被害が極めて少なかった。このことから、水路壁面の摩耗が社会的安定性能に与える影響は小さいと言える。

なお、参考までに、水路壁面の摩耗の進行と、これらの水路の有する性能の低下の関係については、次のような整理の仕方も可能である。すなわち、2007年版コンクリート標準示方書〔維持管理編〕(土木学会, 2008)では、構造物の性能低下の予測の方法としては、摩耗等の劣化機構による劣化予測を行う場合には定量的に予測する必要があるが、それが困難な場合には、劣化の進行を考慮して、潜伏期、進展期等の期間を予測することによって換えてもよいとしている。また、性能照査型の維持管理体系が確立されていない現時点の技術レベルでは、性能低下の定量的な予測を行うことは必ずしも容易ではないことから、摩耗等の劣化機構による劣化の進行を考慮して、潜伏期、進展期等の期間を予測することが現実的であるとしている。そのため、現実的には構造物の外観の変状からTable 3に示したようなグレーディングを行い、構造物の外観上のグレードと標準的な性能低下を参考に、点検実施時における構造物の性能を半定量的に評価することもできるとしている。

農業用水路等の農業水利施設に要求される性能は、Table 5に示すように、水理性能、構造性能、水利用性

能、社会的安定性能に整理される。農業用水路の壁面の摩耗の外観上のグレードと、これらの要求される性能の標準的な性能低下は、Table 6のように示すことができる。これを参考に、点検実施時における農業用水路の性能を半定量的に評価することができると考えられる。

また、2007年版コンクリート標準示方書〔維持管理編〕(土木学会, 2008)の考え方によると、グレーディングは、本来、農業用水路等の構造物の現在の劣化程度を半定量的に分類するものであり、将来の劣化の進行を評価するものではないが、例えば、摩耗の進行程度を示す点検結果を基に予定供用期間終了時の劣化進行を推定することで、Table 6から、予定供用期間終了時の農業用水路の性能を予測することもできる。

5 農業用水路の壁面摩耗の対策

農業用水路のストックマネジメントにおいては、初期建設時からの経年による劣化進行に伴い低下した性能を、適時に適切な補修等の対策を実施することによって回復させることが必要である。その際には、対策の時期と工法の複数の選択肢の中から、最もLCCが小さく経済的なものを選定することとなる。

なお、参考までに、2007年版コンクリート標準示方書〔維持管理編〕(土木学会, 2008)に示されている考え方に基づいて、次のように整理することもできる。すなわち、摩耗等による構造物の性能の低下に対して対策が必要と判断された場合には、対策後の構造物が要求性能を満足するような対策を選定することを基本とし、性能照査に基づいた対策の選定が難しい場合には、構造物の外観上のグレードを基準として対策を選定してよいとしている。対策は、構造物の種類や重要度、劣化の進行速度、維持管理区分によって異なるが、標準的な構造物の外観上のグレードと対策を設定し、それを参考に、ライフサイクルコストを考慮して対策の時期と工法を選定することとなる。農業用水路の壁面の摩耗に関する外観上のグレードと対策は、Table 7のように示すことができる。

6 まとめ

農業用水路の壁面の摩耗による劣化進行の評価手法と、摩耗の進行と水路の有する性能の低下の関係、摩耗

Table 6 農業用水路の外観上のグレードと性能低下
Grading of External Appearance and Performance Decline of Irrigation Canal

構造物の外観上のグレード	水理性能	構造性能	水利用性能	社会的安定性能
潜 状 期	-	-	-	-
進 展 期	通水性能の低下 水理学的安全性能の低下 流水制御性能の低下	力学的安全性能の低下 安定性能の低下 使用性能の低下 耐久性能の低下	均等分水性能の低下 水利用弾力性能の低下 システム操作性能の低下	耐震性能の低下
顕在期前期				
顕在期後期				
劣 化 期				

Table 7 農業用水路の外観上のグレードと対策
Grading of External Appearance and Measures of Irrigation Canal

構造物の外観上の グレード	点検強化	摩耗に対する補修	摩耗に対する補強	全面更新
潜 状 期	○			
進 展 期	◎	○	○	
顕在期前期	◎	◎	○	○
顕在期後期	◎	◎	◎	◎
劣 化 期	◎	◎	◎	◎

◎：標準的な対策

○：場合によっては考えられる対策

の進行によって低下した性能を回復させる対策の考え方について整理した。

壁面の摩耗による水路の性能低下の評価については、性能照査手法が確立されていない現状においては、性能の低下そのものを直接的に評価することは困難であるが、既往の研究成果と現地調査の結果に基づき、明らかにした。

V.2においては、現場の実構造物である農業用水路の劣化を予測する手法としては、劣化の程度を外観の変状に基づいていくつかの段階（グレード）に区分し、点検データを統計的に処理することによって、供用年数を変数として、それらの長さを予測することで、劣化進行を予測する手法が現時点では有効かつ適切なものとなることを示した。

V.3においては、農業用水路の壁面の摩耗による外観の変状のグレードを劣化過程と健全度によって表現する手法について整理した。劣化過程は、施設の劣化状態をその劣化進行の外観の変状に応じて5段階の複数のグレードに分類するものであり、潜伏期、進展期、顕在期前期、顕在期後期、劣化期に分類した。健全度は、施設の劣化状態の外観の変状をさらに詳細に11段階の数値で表現することによって示す複数のグレードであり、5.5～0.5の間の0.5刻みの数値で表現した。より精度の高い点検と劣化予測を可能とするため、この健全度を用いて、点検実施者が水路の壁面の摩耗を点検し、その結果に基づいて将来の劣化予測を行うことを想定している。

V.4においては、農業用水路の壁面の摩耗と、水路の有する各種性能の関係について、既往の研究成果と現地調査の結果に基づいて明らかにした。

水理性能については、現場水路における粗度係数は、設計値よりも良好な値を示し、経年による粗度係数の悪化を明らかにすることができなかった研究事例から、壁面の摩耗の進行による影響は小さいと言える。

構造性能については、摩耗深さ22mmで、鉄筋の引張応力度が設計値を上回ることから、構造性能に問題が生じ、この場合、水路壁面の摩耗による外観の変状は劣化期（健全度100）に相当する。

水利用性能については、現地調査の結果から、壁面の

摩耗の健全度の悪化によって、隣接する継目からの漏水が生じる箇所数の割合が増加することから、壁面の摩耗の進行によって、水利用性能の低下を予測することが可能である。

社会的安定性能については、現地調査の結果から、震度5弱の地震発生時の水路の破損箇所数が極めて少なかったことから、壁面の摩耗の進行による影響は小さいと言える。

V.5においては、農業用水路の壁面の摩耗によって低下した性能を回復させるための対策については、異なる時期と工法の複数の選択肢の中からライフサイクルコストを考慮して選定することとなるが、参考として、構造物の外観上のグレードを基準として対策を選定する方法を示した。

VI 西蒲原地区の農業用水路の壁面摩耗による劣化予測

1 農業用水路の壁面摩耗による劣化予測の必要性

第IV章で示したように、農業用水路の各種劣化機構の中で、特徴的な劣化機構として壁面の摩耗があり、壁面の摩耗で水路の総合的な劣化状態や将来の劣化進行を予測することが可能である。第V章で示したように、水路壁面の摩耗は、水路の有する構造性能や水利用性能等の諸性能に影響を与える。また、農業用水路は長大な延長を有するため、目視を中心とした簡易な点検手法とその点検結果に基づく劣化予測手法の開発が求められている。

そのため、本章においては、簡易な点検手法とその結果に基づく劣化予測手法を提案する。水路壁面の摩耗の点検手法としては、第V章で示した健全度に基づく目視が主体となる。しかし、目視による健全度評価には、点検実施者の主観による誤差が生じる可能性があるため、簡易な器具を用いた定量的な手法で、主観による誤差を最小化する手法を提案する。また、目視による健全度評価に基づく劣化予測手法として、単一劣化モデルとマルチコフ連鎖モデルを提案する。これらの点検手法と劣化予測手法の適用は、北陸地域の新潟県の西蒲原地区を調査対象地区として実施する。

農業用水路の施設の長寿命化とLCC低減には、水路の劣化機構ごとの経年による劣化予測式の適切な推定が必要である。第V章で示したように、実構造物である農業用水路の初期建設後の供用年数を変数とした劣化予測モデルには、劣化メカニズムがある程度解明されている力学的メカニズムに基づく劣化予測モデルと、過去の目視等の点検結果に基づいた統計的な劣化予測モデルが考えられる。しかし、力学的メカニズムに基づいた劣化予測手法には、今後の研究の蓄積が望まれており信頼性に欠ける面があることから、現状では、点検結果に基づく統計的な劣化予測モデルの適用が現実的である。また、農業用水路の維持管理は主に、土地改良区の職員等が実施していることから、点検結果に基づく統計的な劣化予測モデルの中でも、現場で適用可能で、かつ、操作が容易なモデルが望ましい。このようなモデルとしては、第二章の道路構造物等の先進的な分野における施設の維持管理において整理したように、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルがある。

単一劣化モデルは、下位の健全度への平均到達年を統計的に求め、これらの到達年を通過する曲線または直線を近似して、劣化曲線とするものである。マルコフ連鎖モデルは、過去の統計データに基づき、任意の健全度の施設の集団において1年間で健全度が1つ下がる施設の割合である遷移率を求め、この遷移率を一定として、離散的に健全度分布の推移を予測するモデルである。単一劣化モデルは、比較的少ない点検データで劣化予測が可能であり、平均的な劣化進行を推定するもので、簡易で理解も容易なモデルである。マルコフ連鎖モデルは、同一時期に建設された複数の施設が同様に劣化進行するのではなく、劣化進行にピークとばらつきがあることを表現可能なモデルであるが、複数の点検データが必要となるものである。

農業用水路に関する劣化予測手法として、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルの基本的な考え方を示したものとして、農業水利施設ストックマネジメントマニュアル共通編（保全対策センター、2007：以下「マニュアル共通編」と略）で提示されているものがある。しかし、これらは、基本的な考え方を示したもので、概念的に留まっており、現場で適用可能なものとなっていると言えない。

マニュアル共通編（保全対策センター、2007）で示された単一劣化モデルは、広域基盤整備計画調査の点検データを用いて、供用年数を変数として健全度の低下を2次曲線で近似した直感的でわかりやすいモデルであるとしている。しかし、広域基盤整備計画調査における農業用水路の劣化診断は、農業用水路の摩耗等の劣化機構毎の評価ではなく、目視によって総合的に農業用水路の劣化状態を評価したものである。また、実際には、2次曲線で示した単一劣化曲線のイメージとは異なる劣化進行となる場合があるため、他の手法の適用も含め現場条

件にあった手法を検討するとともに、実際と乖離する場合があることに留意する必要があるとしている。

マニュアル共通編（保全対策センター、2007）で示されたマルコフ連鎖モデルでは、広域基盤整備計画調査の点検データを用いて計算した遷移率を使用し、実際の点検データを用いて遷移率の補正を行うとしている。しかし、広域基盤整備計画調査の点検データに基づく水路の供用年数と健全度の関係は、各種劣化機構による複合的要因によって生じる水路の総合的な劣化進行パターンを示しており、個別の劣化機構を対象としていない。また、特定の要因による劣化予測は困難なことが多いことを指摘している。

農業用水路にマルコフ連鎖モデルを適用したその他の試行的な事例としては、蘭（2007）のものがある。この場合は、水路の劣化診断として、ひび割れ、変形、摩耗のうち最も劣化が著しいレベルをそのパレルの変状の劣化の代表値として使用し、水路の劣化予測にマルコフ連鎖モデルを用いている。また、蘭（2007）は、時系列データが得られないために、用いたマルコフ連鎖モデルの遷移率の妥当性のチェックができなかった問題点を指摘している。

精度の高い施設の劣化予測を行うには劣化機構毎の劣化予測が必要である（土木学会、2008）が、水路の特定の劣化機構による劣化予測に、マルコフ連鎖モデルを用いた事例は見当たらない。

このように、これらの現状で提示されている農業用水路の劣化予測の推定手法は、あくまで暫定的なものであり、農業用水路に特徴的な劣化機構である壁面の摩耗に関する、より精度の高い劣化予測手法の開発が必要である。また、今後の研究によって、より具体的かつ現場で活用可能な手法を提示することが必要である（北村ら、2008a）。

コンクリート構造物の農業水利施設の摩耗については、供試体と摩耗促進機を用いた摩耗試験（渡嘉敷ら、2006）、モデルを用いた水路の流砂による摩耗予測の検討（新井ら、1996）や、摩耗を模擬した水路を用いた摩耗と粗度係数の関係に関する実験（中矢ら、2008）は行われているが、実構造物の農業用水路を対象とした水路の壁面の摩耗に関する研究事例は見当たらない。

このため、本研究では、農業用水路として典型的な鉄筋コンクリート製開水路を対象とし、北陸地域の新潟県の西蒲原地区の農業用水路の現地調査を実施し、水路壁面の摩耗に関する劣化予測を行った。西蒲原地区は、凍害の影響がない上、供用年数が約10～40年と異なる水路が存在し、供用年数と健全度の関係を調査するのに適した地区である。

VI.2においては、西蒲原地区における調査対象水路および調査方法を示す。

VI.3においては、調査結果の概要を示す。

VI.4においては、目視による水路壁面の摩耗の健全

度評価に基づく、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルによる劣化予測の推定手法を提案する。

VI.5においては、点検実施者の目視による水路壁面の摩耗の健全度評価基準に基づく評価結果の主観的な誤差を最小化するため、摩耗による壁面の凹凸を型取りゲージを用いて計測し、算術平均粗さ (Ra) を用いて凹凸を数値化し、摩耗による壁面の凹凸の進行を定量的に評価する手法について提案する。また、算術平均粗さ (Ra) の数値の持つ意味や、水路の有する諸性能との関連について整理する。

2 調査対象水路および調査方法

a 調査対象水路

調査地区は、北陸地域の沖積平野に位置する新潟県の西蒲原地区である。この沖積層はいわゆる海岸沼沖積に属し、土壌断面内に泥炭層を介している場合が多い。本地域の年平均気温は13.2℃で、年間降水量はおよそ1,700mmである。気温は1月下旬から2月上旬頃が最も低い(2℃)が、日本海沿岸に位置するため降雪量は概して少ない。長谷川・藤原(1988)の凍害危険度の分布図によると、凍害危険度が零であることから、凍害のおそれはない。また、海岸からも相当の距離にあるため、塩害のおそれも少ない。

さらに、本調査地区は、地震によって水路の損傷を受ける可能性も低い。地震調査研究推進本部・地震調査委員会(2008)の今後30年以内に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率の分布図によると、確率は0.1%~3%であり、全国の平均的なケースの中では相対的に小さい。また、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震においては、本調査地区における震度は最大で5強であった。しかし、地震発生後に、後述する目視による健全度評価を実施したA~J用水路の全延長の全てのバレルと継目について、目視によって地震による水路の損傷を

調査したが、継目部のコンクリートのひび割れもしくは剥離が4箇所確認できたのみであり、本地震による水路の損傷は極めて少なかった。そのため、本研究では、地震による損傷は水路の劣化の対象とはせず、初期建設後の経年による劣化のみを対象とすることとする。

また、本調査地区は、供用年数が約10~40年と異なる供用年数の水路を有することに大きな特徴がある。時系列の点検データが存在しない現状では、異なる供用年数の水路の点検データを用いて、供用年数を変数として、水路壁面の摩耗により劣化予測を行うことが可能である。

調査対象水路は、Table 8に示すA~K用水路である。

b 調査方法

調査は、目視による健全度評価と、型取りゲージを用いた算術平均粗さ (Ra) の計算の2つの方法で行った。目視による水路壁面の摩耗の健全度に基づく評価は、Table 8の目視対象水路の欄に丸の付いているA~J用水路の全てのバレルについて行った。

目視による健全度評価においては、点検実施者の主観による点検結果の誤差が生じる可能性がある。また、点検実施者が異なる場合には、同じバレルを評価する場合においても、評価結果に誤差が生じる可能性がある。そのため、目視による健全度評価に伴う主観による誤差を最小化するための、壁面の摩耗状態を定量的に評価する指標を提案する。これが、後述する型取りゲージを用いた算術平均粗さ (Ra) の計算である。これは、摩耗による壁面の凹凸を定量的に数値化するもので、これと健全度の関係を明確にすることによって、目視による健全度評価基準に基づいた評価に伴う主観による誤差を最小化することを目指すものである。

型取りゲージを用いた算術平均粗さ (Ra) の計算は、Table 8の算術平均粗さ (Ra) 対象水路の欄に丸の付いている5つの水路の特定のバレルにおいて行った。

Table 8 調査対象水路
Surveyed Canals

水路名	調査対象延長 (m)	水路のバレル数	主な初期建設年	目視対象水路	算術平均粗さ (Ra) 対象水路
A用水路	808.5	81	1983	○	
B用水路	3,762.5	433	1967	○	○
C用水路	661.0	72	1967	○	○
D用水路	376.0	38	1967	○	○
E用水路	511.5	81	1969	○	
F用水路	1,627.5	194	1995	○	
G用水路	985.0	127	1997	○	
H用水路	873.5	104	1980	○	
I用水路	1,404.0	161	1997	○	○
J用水路	1,082.5	130	1979	○	
K用水路			1969		○
計	12,092.0	1,421			

(1) 目視による健全度評価の方法

調査対象のA～J用水路延長を対象に、これら水路の全てのバレルにおける壁面の摩耗について、目視によって健全度に基づく劣化状態の評価を実施した。壁面の摩耗は継目と継目の間の1バレル（長さ9～12m）ごとに評価した。同時に、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食、変形、変位（上下、水平、傾斜）の程度も、目視によって調査したが、これらが要因となる劣化現象の経年変化を明らかにすることは出来なかった。

(2) 型取りゲージによる算術平均粗さ (Ra) 計算の方法

壁面の摩耗は、B, C, D, I, Kの各水路の特定のバレルにおいて（Table 9）、壁面の天端から鉛直下方向に1cm間隔に幅150mmの型取りゲージ（Fig.21）を用いて水平方向の凹凸を測定した（Fig.22）。また、そのバレルの健全度を目視によって評価した。

なお、壁面の摩耗による凹凸を直接測定する方法には確立されたものはない（日本水士総合研究所，2006）が、ここでは、型取りゲージで測定した凹凸を定量的に表現するために、算術平均粗さ (Ra) を用いた（北村ら，2008c）。これは、次のような理由による。コンクリートの摩耗に関する実験は、供試体を用いた室内実験が多い（例えば、渡嘉敷ら，2006）。このような摩耗実験では、供試体の初期断面が明確であるため、摩耗の進行を、初期断面からの摩耗深さで計測する人が多い。しかし、既存構造物である実用水路の壁面では、初期建設時の初期断面が特定できない。これは、設計図面は残っていても施工が設計図面通りに行われているとは限らないこと、また、設計図面通りの施工が行われているとした場合においても、現地において初期断面からの摩耗深さの測定が困難であるためである。そのため、本研究では、型取りゲージを用いて壁面の凹凸を型取り、算術平均粗さ (Ra) という壁面の凹凸の度合いを定量的に表現する指標を用いることによって、壁面の摩耗の進行を表現しようとするものである。

型取りゲージ（Fig.21）は、幅150mmに直径0.8mmのステンレス製の針が185本取り付けられており、これを水路の壁面に平行に押し当てることによって（Fig.22）、壁面の凹凸の形状を型取ることができる。

本研究では、算術平均粗さ (Ra) を用いて水路壁面の摩耗による凹凸の数値化を行った。算術平均粗さ (Ra) は、工業製品の表面粗さを表すパラメーターとしてJIS B0601の附属書2に参考として記述されているもので、概念図をFig.23に示す。JISでは、算術平均粗さ (Ra) とは、粗さ曲線からその平均線の方に基準長さ l だけを抜き取り、この抜き取り部分の平均線の方に x 軸を、縦倍率の方に y 軸を取り、粗さ曲線を $y=f(x)$ で表した時に、式(12)によって求められる値をマイクロメートル (μm) で表したものをいう。

Table 9 型取りゲージを用いた調査対象水路
Canals Surveyed with Roughness Profile

水路名	供用年数	健全度
B用水路	21	4.0
C用水路	39	2.0
D用水路	39	3.5
I用水路	9	4.5
K用水路	37	3.5

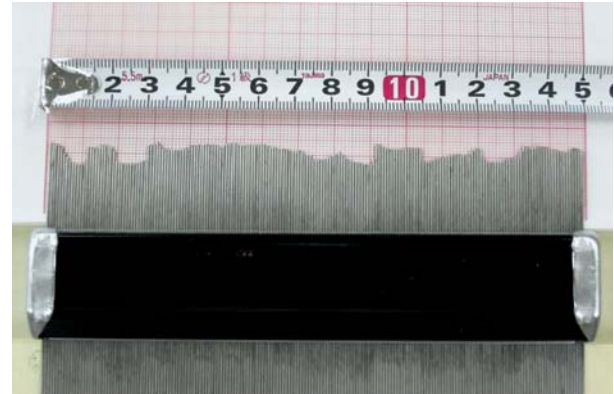


Fig.21 型取りゲージ
Roughness Profile



Fig.22 型取りゲージによる水路壁面の凹凸測定
Roughness Measurement of Canal with Roughness Profile

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (12)$$

本研究では、壁面の摩耗による凹凸を数値化するために、このJISで示されている算術平均粗さ (Ra) の x 軸方向の平均線の長さを型取りゲージの水平幅である150mmとし、 $y=f(x)$ の値をミリメートル (mm) で表し、式(12)の値を求めた。具体的には、壁面の凹凸を型取った後の型取りゲージを方眼紙の上に置き、デジタルカメラで撮影し、それをパソコンの表計算ソフト上に読み込み、凹凸を数値化した。これによって、型取りゲージの直径0.8mmのステンレス製の各針の先端の位置を数値化し、合計185本のステンレス針の先端の位置の変化から、 $y=f(x)$ を決定した。

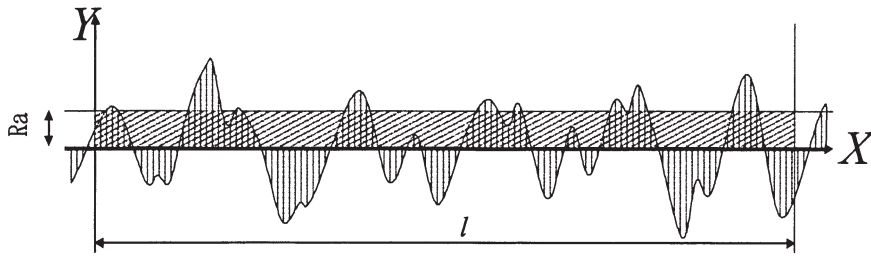


Fig.23 算術平均粗さ (Ra) の概念図
Concept of Arithmetic Mean Roughness (Ra)

3 調査結果

a 目視による健全度評価

目視による健全度評価の結果を Table 10 に示す。これは、各健全度に評価された壁面のバレル数を示している。既に補修が実施されているバレルについては、補修実施時に健全度が2.0であったと仮定し、その際の健全度2.0を示している。なお、明らかに初期建設時の施工不良による健全度の低下と考えられるバレルは、分析対象から除外した。

A~J用水路の壁面の摩耗の健全度は、健全度4.5~2.0の範囲に分布し、健全度4.0が最も多い。Fig.24に、初

Table 10 目視による健全度評価結果
Result of Soundness Evaluation with Persons' Eyes

健全度	壁面摩耗		施工不良
	補修無し	補修有り	
5.5	0	0	0
5.0	0	0	0
4.5	351	0	0
4.0	292	0	0
3.5	199	0	1
3.0	13	0	7
2.5	0	0	0
2.0	64	470	24
1.5	0	0	0
1.0	0	0	0
0.5	0	0	0
計	919	470	32

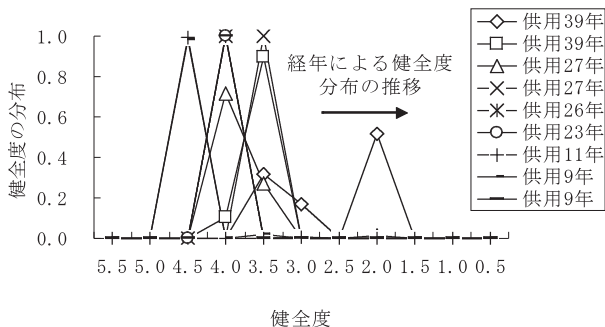


Fig.24 摩耗の供用年数による健全度分布
Distribution of Soundness of Abrasion with Elapsed Years

期建設後に補修が実施されていない壁面のバレルの調査結果を基に、各水路の供用年数ごとの摩耗の健全度分布をプロットした図を示す。なお、B用水路は、既に補修が実施されたバレルが多いため、分析対象から除外している。壁面の摩耗の経年進行は、同時期に建設されたものの全てが同様に推移するのではなく、各箇所ごとのばらつきがある。しかし、ある健全度にピークを持ち、経年によって健全度が低下していく傾向がある。

b 型取りゲージによる算術平均粗さ (Ra) の計算

目視による健全度評価結果と、壁面の凹凸を算術平均粗さ (Ra) で数値化した結果を Fig.25 に示す。本調査は非灌漑期に実施したが、非灌漑期にも生活用水等の配水があるため、調査可能であった壁面の天端から鉛直下方向に非灌漑期の水位までの凹凸を算術平均粗さ (Ra) で数値化した結果を示している。この凹凸を数値化した算術平均粗さ (Ra) の、健全度別の各水路壁面の調査データ全体、灌漑期水位以上、灌漑期水位以下の平均値の推移を Fig.26 に示す。これらから、健全度が低下すると、算術平均粗さ (Ra) の値が大きくなり、ばらつきも大きくなることがわかる。摩耗によって細骨材や粗骨材が表面に露出した場合に、算術平均粗さ (Ra) の値が大きくなり、同じ壁面でも骨材の頂点に接する測定点とそうでない点で算術平均粗さ (Ra) の大きさに相違があることが考えられる。壁面では、灌漑期水位以上よりも以下の方が算術平均粗さ (Ra) の値が大きく、ばらつきも大きい。これは、灌漑期水位以下の方が流水や流砂による摩耗が大きいことを示している。そのため、本研究では、灌漑期水位以下の壁面の摩耗を検討対象とする。

壁面の凹凸を直接測定する方法には確立されたものはない(日本水土総合研究所, 2006)が、型取りゲージを用いて壁面の凹凸を測定し、算術平均粗さ (Ra) によって定量的に表現できることが確認できた。

4 目視による健全度評価に基づく劣化予測

a 単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデル

第II章で整理したように、点検データに基づく統計的な劣化予測の簡易な手法には、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルがある。また、農業水利施設のストックマネジメントにおいても、マニュアル共通編(保全対策セ

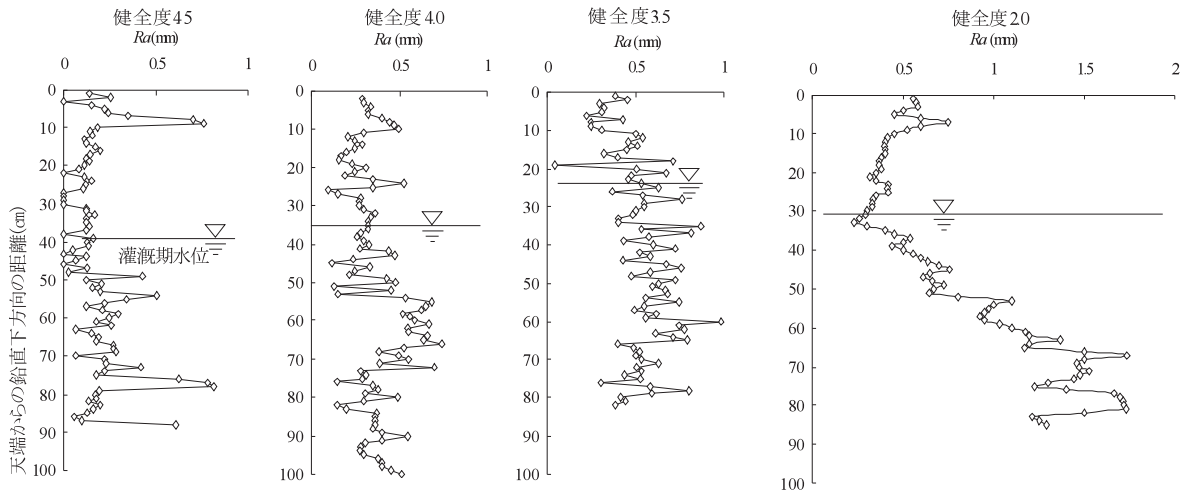


Fig.25 算術平均粗さ (Ra) による水路壁面の摩耗状態
Roughness Status of Canal with Arithmetic Mean Roughness (Ra)

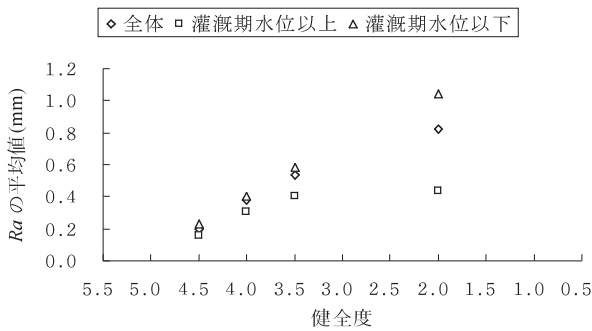


Fig.26 灌漑期水位上下の算術平均粗さ (Ra) の平均値の分布
Distribution of Average of Arithmetic Mean Roughness (Ra)
below Water Level during Irrigation Period

ンター, 2007) では, 点検データに基づく統計的な劣化予測手法として, 単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルの基本的な考え方を参考事例として提示している。これらは, 農業用水路の総合的な劣化状態を5~1の5段階のグレードで劣化進行を表現するものである。そのため, 本研究とは, 次のような相違がある。すなわち, 農業用水路の精度の高い劣化予測を行うためには, 水路の総合的な劣化を評価するのではなく, 劣化機構毎に劣化予測を行う必要があり, 本研究では, 農業用水路に特徴的な劣化機構である壁面の摩耗に焦点を当てた劣化予測を行うものであること。また, 劣化状態の評価指標も5段階のグレードでは, 劣化状態の点検時の評価と将来の劣化予測を高い精度で行うことは困難であることから, 本研究では, さらに詳細な5.5~0.5までの0.5刻みの11段階の健全度を用いて, 点検評価と劣化予測を行うことである。

マニュアル共通編 (保全対策センター, 2007) に示された単一劣化モデルでは, 5~1のグレードを用いており, 初期建設時ではグレードが5であったと仮定し, 式(13)の2次曲線で劣化傾向が近似されるとしている。

Sはグレード, tは供用年数である。ここで, 切片を5としているのは, グレードを5~1の1刻みの5段階で評価しているためである。また, 2次曲線を用いているのは, 広域基盤整備計画調査の結果に基づくとしている。しかし, 広域基盤整備計画調査では, 3段階の評価基準で劣化状態を評価していたものを, 5段階のグレードに再整理して劣化曲線を引いたものであり, 5段階評価の精度に疑問が残る。また, 全国において実施された調査結果を集計して劣化予測を行っているため, 異なる点検実施者間の点検結果の誤差を含んでいる可能性があるという問題が考えられる。そのため, 2次曲線による単一劣化曲線のイメージとは異なる劣化進行の場合は, 他の手法も含め現場条件に適した手法を検討することが必要である。

$$S=at^2+5 \tag{13}$$

単一劣化モデルは, 点検データに基づく, 施設の平均的な劣化傾向を示すもので, 劣化曲線を引くことが容易であるとともに, 理解も容易である。

一方, マニュアル共通編 (保全対策センター, 2007) では, マルコフ連鎖モデルの基本的な考え方も示している。すなわち, マルコフ連鎖モデルは, 過去の統計データに基づき, 任意の劣化状態のグレードの施設の集団において, 1年間でグレードが1つ下がる施設の割合である遷移率を求め, この割合を一定として, 離散的にグレードの分布の推移を予測するモデルであるとしている。しかし, マルコフ連鎖モデルの基本的な考え方を示しているだけで, さまざまなマルコフ連鎖モデルがある中で, 具体的にどのようなマルコフ連鎖モデルを用いて劣化予測を行うかについては明示していない。

実際の水路壁面の摩耗には, 同時期に建設された同一水路の全てのバレルが同じ劣化進行を示すものではない。すなわち, 同時期に建設された同一水路の異なるバ

レルにおいて、点検実施時には健全度のピークとばらつきがある。そして、この健全度のピークとばらつきが、経年によって健全度の悪い方に移行していく現象がある。マルコフ連鎖モデルを用いることによって、このような同時期に建設された同一水路の異なるバレルの健全度のピークとばらつきを表現できる。

第II章で整理した、道路構造物等の先進的な分野における劣化予測においては、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルによる劣化予測モデルが開発されている。しかし、この場合、各々のモデルが独立に開発されており、その双方の関連性に言及している研究事例は見当たらない。また、マニュアル共通編（保全対策センター、2007）では、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルには、各々、長所と短所があるため、なるべく双方のモデルを用いて予測の精度を上げることが望ましいとしている。しかしながら、具体的にどのようにして双方のモデルを用いて、劣化予測の精度を上げるかについては言及していない。そのため、本研究においては、単一劣化モデルにおける健全度と供用年数の関係から、適合性の高いマルコフ連鎖モデルを選定することとする。

まず最初に、壁面の摩耗の経年による劣化予測を単一劣化モデルで検討する手法を提案する。そして、単一劣化モデルにおける健全度と供用年数の関係から、適合性の高いマルコフ連鎖モデルを選定し、それを用いる劣化予測を提案する（北村ら、2008d）。

b 単一劣化モデルによる劣化予測

壁面の摩耗に関する目視による健全度評価によって得られた点検データのうち、初期建設時から調査実施時の2006年までの間に補修が実施されていない点検データによる劣化進行を1次直線と2次曲線で近似した結果をFig.27に示す。丸の中心は各供用年数の点検データの健全度平均をプロットしている。図中の丸の大きさは点検データ数の大きさを表し、丸の大きい方が点検データ数が多いことを示す。

壁面の摩耗の経年進行は式(14)と式(15)の回帰式で表現できる。Sは健全度、tは供用年数である。S軸の切片を5.5としているのは、初期建設時の健全度を5.5と想定しているためである。

$$1 \text{ 次直線} : S = -0.0694t + 5.5 \quad (R^2=0.641) \quad (14)$$

$$2 \text{ 次曲線} : S = -0.0054t^2 + 5.5 \quad (R^2=0.559) \quad (15)$$

1次直線の方が決定係数が大きく、かつ感覚的にも点検データへの適合性が高いと思われること、また、モデルを用いたコンクリート製水路の摩耗深さが摩耗時間に比例するとの事例（新井ら、1996）などから、1次直線の方が経年劣化を適切に表現している。このことから、次のことが言える。単一劣化モデルによる平均的な劣化傾向を示す劣化曲線は、2次曲線のように上に凸な形状を想定し、供用年数が長くなり健全度が悪くなるほど、

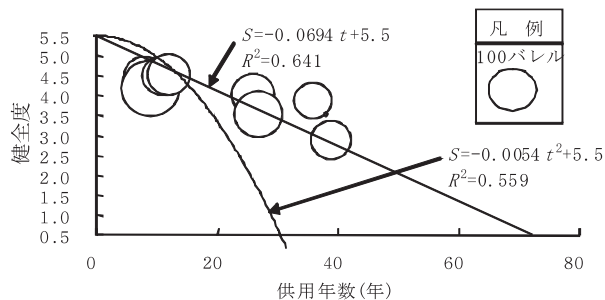


Fig.27 補修無しの壁面の摩耗の回帰式
Regression formulas of Abrasion without Rehabilitation

劣化速度が加速されるというイメージがある。しかし、水路壁面の摩耗に関しては、この点検データに基づく分析結果から、2次曲線ではなく1次直線で示すことが適切である。このことから、健全度と供用年数には1次直線で表現できる関係があり、第V章で定義した健全度は定量的な指標であると言える。

c マルコフ連鎖モデルによる劣化予測

水路壁面の摩耗は、同時期に建設された同一水路の異なるバレルが同様に経年によって劣化進行するのではなく、各バレルごとのばらつきがある。しかし、ある健全度にピークを持ち、経年によって健全度が低下していく。

このような健全度分布の経年推移は、マルコフ連鎖モデルで表現できる。マルコフ連鎖とは、状態と推移という2つの概念を用い、物事がある状態から、ある遷移率で次の状態へと移行する様子を確率的に捉える統計手法の一つである。マルコフ連鎖モデルには、新都市社会技術融合創造研究会インフラ試算評価・管理の最適化に関する研究プロジェクトチーム（2006）による Bridge Management System や、小牟禮ら（2002）が開発した栈橋劣化進行モデル等がある。マルコフ連鎖モデル（小牟禮ら、2002）は、式(16)で表現できる。

$$\begin{matrix}
 \text{健全度の割合} \\
 \begin{pmatrix} P_{5.0} \\ P_{4.5} \\ P_{4.0} \\ P_{3.5} \\ P_{3.0} \\ P_{2.5} \\ P_{2.0} \\ P_{1.5} \\ P_{1.0} \\ P_{0.5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)
 \end{matrix}$$

x:遷移率

xは遷移率、tは施設の供用年数である。P_{5.0}～P_{0.5}は、各々、健全度が5.0～0.5のバレルの割合を示している。マルコフ連鎖モデルには、各健全度間の遷移率を異なるように設定することもできる。そのため、各健全度間の遷移率をどのように設定した場合に、実際の点検データとの整合性が高くなるかを検討する必要がある。

ここでは、水路壁面の摩耗において最も適合性の高い

マルコフ連鎖モデルの各健全度間の遷移率を決定するために、VI.4.aで示した単一劣化モデルで、健全度と供用年数の関係が1次直線で表現することができたことを用いる。すなわち、壁面の摩耗の劣化においては、健全度と供用年数の関係が1次直線であることから、マルコフ連鎖モデルの各健全度間の遷移率 x が一定であるように設定することによって、水路壁面の摩耗の劣化進行に適合させることが可能である。そのため、本研究では、式(16)の小牟禮ら(2002)の遷移率は経時的に変化しない施設ごとに固有の一定値と考えているモデルを用いる。実際の構造物では、劣化進行が時間的に平均的に進むと想定できないとの指摘もある(谷口ら, 2003)が、ここでは上述の理由により、経年による劣化速度は一定と仮定する。すなわち、各健全度間の遷移率 x は一定とするものである。

小牟禮ら(2002)は、式(16)で示したマルコフ連鎖における1つの状態に対し、1つの健全度を割り当てるだけでなく、以下のようなモデルについても考えている。例えば、状態2つに対して1つの健全度を割り当てた場合でも、健全度の期間が全て同じという条件は満足する。同様に考えれば、健全度1つに相当する状態の数を増加させることで、この劣化進行モデルは無数に存在する。そして、式(17)に示すように、健全度1つに状態3つを割り当てたモデルも作成可能である。

このように、健全度1つに割り当てる状態の数を1~3まで増加させることによって、Fig.28に示すように、割り当てる状態の数が増加した方が、より健全度のばらつきが少なく、ピークが鋭くなる性質を持つ。ここでは、状態と健全度の比率が1:1, 2:1, 3:1のものを、それぞれモデル1、モデル2、モデル3と呼ぶ。本研究では、調査実測値とモデル計算値のピークがより一致するように、健全度1つに状態3つを割り当てたモデル3を採用する。モデル3の場合には、式(17)で求められる1つの状態の遷移率を1/3倍して、1つの健全度の遷移率に

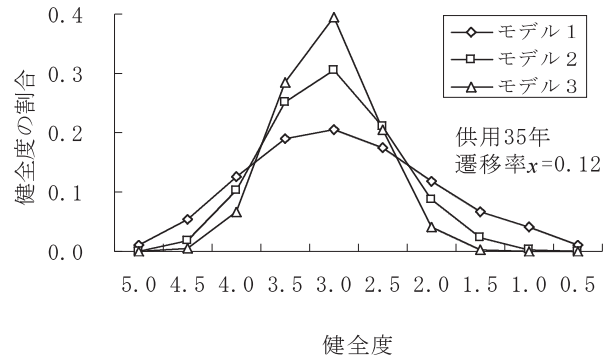


Fig.28 モデルの違いが健全度分布に与える影響
Impact on Soundness Distribution with Different Models

換算する。また、この場合、モデル3では、最初の健全度から次の健全度へ移行するまでに、しばらく時間を要するため、初期建設時の健全度5.5からではなく、健全度5.0から開始することによって、モデルの適合性を高めるようにする。

なお、マルコフ連鎖を使用したモデルには、次のような利点と欠点があることが指摘されていることから、使用するには、これらを考慮することが必要である。利点としては、現時点のデータに過去の全情報が集約されると考えてそのデータのみを使用するため、ある時刻の劣化状態のみによって劣化の将来予測が可能で取り扱いが簡便であること(津田ら, 2005)。その一方で、次のような問題が指摘されている。土木施設の中には明らかに施設の劣化進行が過去の履歴に依存する特性を持つ場合が少なくないこと(青木ら, 2005)。施設の劣化予測の全体的傾向は把握できても、劣化進行速度を部位ごとに追跡評価や確認することができないこと(金氏, 2007)。

また、小牟禮ら(2002)のモデルでは、遷移率はある種の劣化速度指標であり、経時的に変化しない施設ごとに固有の一定値と考えている。そのため、水路壁面の摩

	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5
5.0	1-x	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	x	1-x	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	0	x	1-x	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	x	1-x	0	0	0	0	0	0
3.0	0	0	0	x	1-x	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	x	1-x	0	0	0	0
2.0	0	0	0	0	0	x	1-x	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0	x	1-x	0	0
1.0	0	0	0	0	0	0	0	x	1-x	0
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	x	1-x

(17)

耗に小牟禮ら(2002)の手法を適用すると、水路ごとに固有の遷移率を設定し、劣化進行を推定することとなる。しかし、この場合、個別の水路の時系列データがない場合には将来の劣化予測モデルの妥当性を評価することが不可能である(小牟禮ら, 2002)とともに、ある地域の水路系全体の平均的な劣化進行の推定に適用することができない。

そのため、まず、各水路の遷移率を求める。そして、それらの各水路の供用年数と遷移率の関係について検討する。

(1) 各水路に適用する遷移率の算定

まず、小牟禮ら(2002)の考えに基づいて、初期建設時から補修を実施していない水路ごとの壁面の摩耗の健全度分布の調査実測値とマルコフ連鎖モデルによる計算値の健全度のばらつきが最も適合する遷移率を求めた(Fig.29)。なお、多くのバレルで補修等が実施されているB用水路は、遷移率の算定から除外している。その他の水路についても、既に補修が実施されているバレルは除外し、初期建設後に補修が実施されていないバレルを対象としている。

次に、Fig.29で求めた各水路の固有の遷移率と供用年数の関係をプロットした(Fig.30)。図中の丸の大きさは点検データ数の大きさを示し、丸の大きい方が点検データ数が多いことを示す。このことから、供用年数の

異なる水路においても、ほぼ同じ遷移率で表現できることがわかる。そのため、各水路の点検データ数による重み付き平均を計算することによって、B用水路を除くA~J用水路に適用可能な遷移率を求めたところ、遷移率 $x=0.12$ で、B用水路を除くA~J用水路の異なる供用年数の水路の壁面の劣化進行を推定することが可能であることがわかった。すなわち、遷移率は各水路に固有の値で異なるのではなく、供用年数に関係なくB用水路を除くA~J用水路が同じ遷移率で健全度が低下していくと仮定することが可能となる。

各水路の調査実測値の健全度算術平均値と、遷移率 $x=0.12$ の場合の健全度算術平均値の初期建設後の経年変化をFig.31に示す。遷移率 $x=0.12$ を用いることによって、B用水路を除くA~J用水路の壁面の摩耗の進行過程推定にマルコフ連鎖モデルを適用できることがわかる。また、Fig.31には、式(14)で示す初期建設時から補修を実施していない壁面の摩耗を供用年数の1次直線で示した単一劣化モデルの劣化予測式のグラフも示している。遷移率 $x=0.12$ の健全度算術平均値の初期建設後の経年変化は、式(14)の劣化予測式とも、ほぼ一致している。これは、この隣接する各健全度間で毎年同じ遷移率で健全度が低下していくと仮定したマルコフ連鎖モデルの、1次直線で表現される単一劣化モデルの劣化予測式との適合性が高いことを示している。

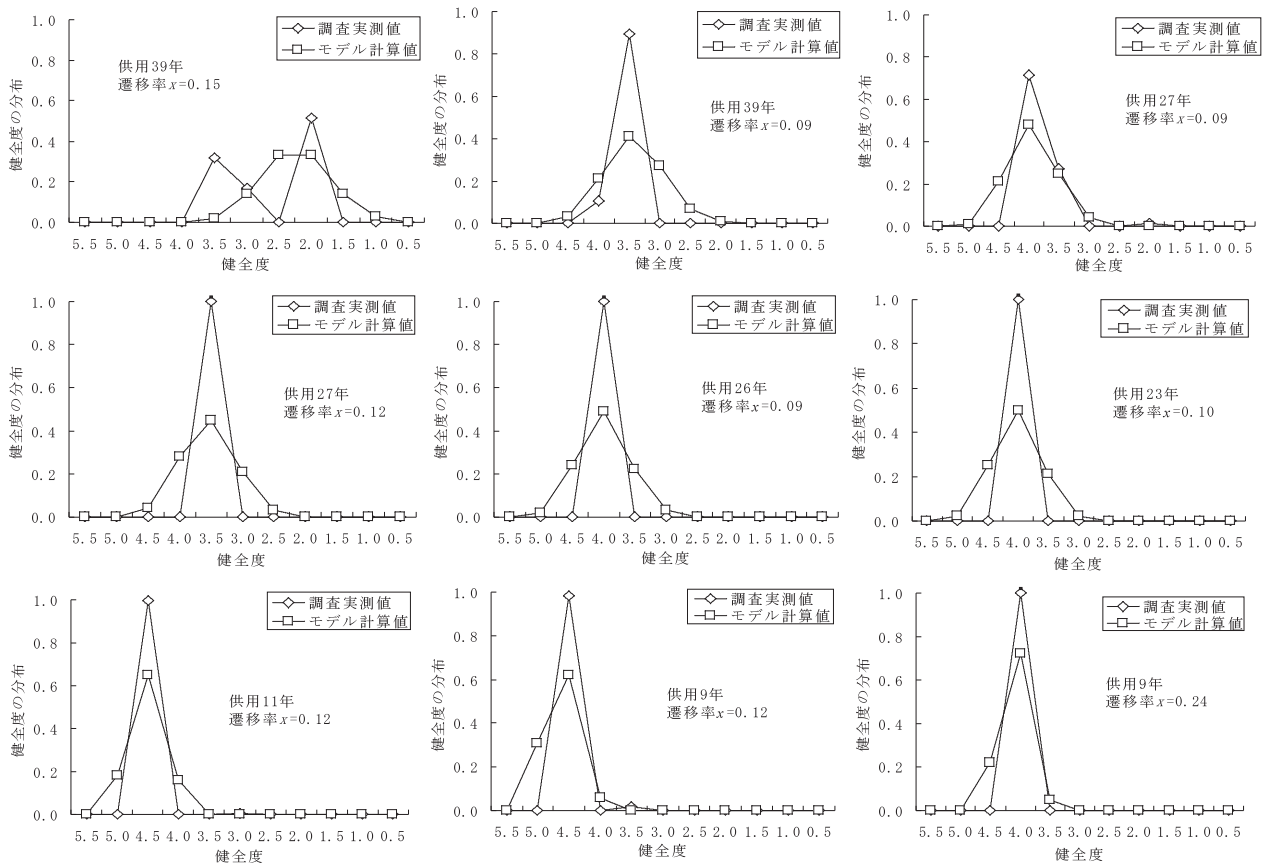


Fig.29 壁面の摩耗のマルコフ遷移率
Markovian Transition Rates of Abrasion

これまで、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルの双方を活用して劣化予測の精度の向上を図ることが望ましいとはされながらも、その具体的な手法には言及されていなかった。しかし、このように、単一劣化モデルにおける健全度と供用年数の関係から、それとの適合性の高いマルコフ連鎖モデルを選定することが可能である。

さらに、今回の場合と異なり、単一劣化モデルの劣化曲線の形状が1次直線ではない場合にも、単一劣化モデルを用いて健全度と供用年数の関係を推定し、その劣化曲線の形状と合致するように、隣接する各健全度間の遷移率を異なるように設定することによって、単一劣化モデルとの適合性の高いマルコフ連鎖モデルを作成することが可能である。

(2) B用水路を除くA～J用水路に適用する遷移率を用いた劣化進行の推定

B用水路を除くA～J用水路に適用可能な遷移率 $x=0.12$ を用いた場合の供用11, 27年水路の各々の健全度の分布の調査実測値とモデル計算値を Fig.32 に示す。

モデル計算値の健全度のばらつきと調査実測値のピークがほぼ一致している。このことから、遷移率 $x=0.12$ を用いることによって、異なる供用年数の点検データを用いることによって計算した遷移率による、水

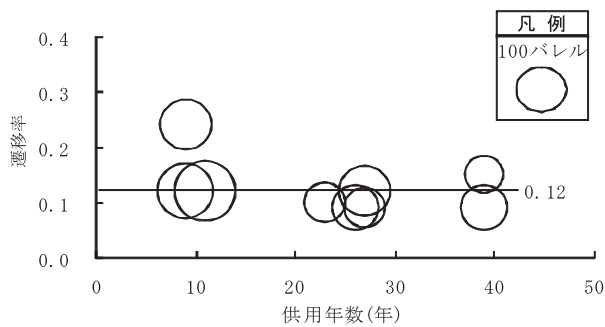


Fig.30 各水路の遷移率と供用年数
Transition Rates and Elapsed Years of Canals

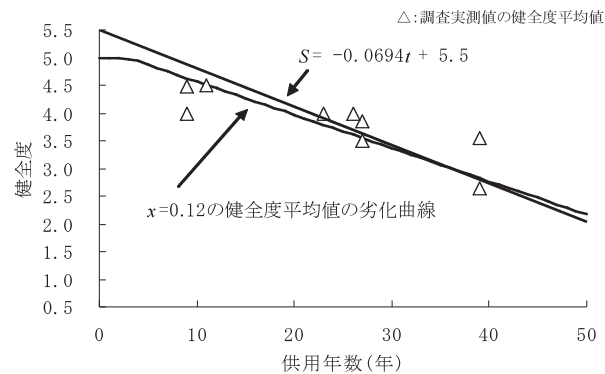


Fig.31 マルコフ連鎖モデルによる健全度平均値の劣化曲線
Deterioration Curve of Soundness Average with Markovian Transition Model

路壁面の摩耗による将来の劣化予測の妥当性を検証することができるのと同時に、本調査地区の水路系全体の水路壁面の摩耗による平均的な劣化進行の推定が可能となったことを示す。また、これは、個別の水路壁面の摩耗の時系列データが得られない場合でも、異なる供用年数の水路壁面の摩耗の点検データを用いることによって、将来の劣化予測モデルの妥当性を評価できることを示している。

遷移率 $x=0.12$ を用いた場合の健全度が3.0, 2.0以下のバレル数の全バレル数に占める割合の初期建設後の経年変化を Fig.33 に示す。マルコフ連鎖モデルに基づいて劣化予測を行った場合、ある健全度以下のバレルが全体に占める割合を基準として、補修や全面更新等の対策工法とその実施時期を決定することが可能となる。補修や全面更新等を実施する適切な時期については、例えば、健全度3.0以下もしくは2.0以下の占有率が一定の基準値を超えた場合に実施することが考えられる。

5 算術平均粗さ (Ra) による劣化予測

農業用水路の壁面の摩耗に関する5.5～0.5の0.5刻みの健全度評価基準は、鉄筋コンクリートのセメントペースト、細骨材、粗骨材の流水や流砂による流出また

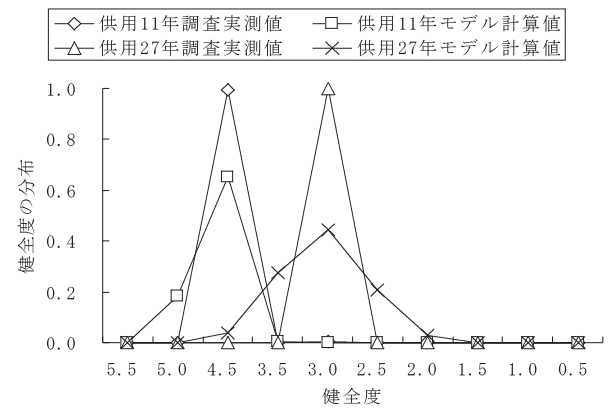


Fig.32 遷移率 $x=0.12$ でのモデル計算値と調査実測値
Model Calculation Figures with Transition rate of $x=0.12$ and Observed Figures

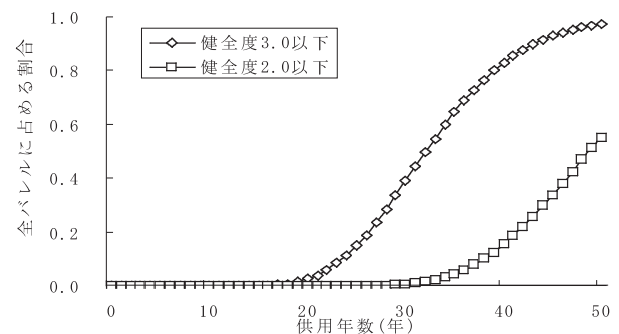


Fig.33 遷移率 $x=0.12$ での経年による健全度の低下
Soundness Decline with Elapsed years with Transition Rate of $x=0.12$

は露出や剥離の程度に基づいて設定された、外観上のグレードによる定性的なものである。そのため、この健全度評価基準を基に壁面の摩耗の進行の評価を実施しても、点検評価者が健全度を評価する際には、点検評価者の主観によって評価結果の誤差が生じる可能性がある。壁面の摩耗の点検データの収集・蓄積と劣化予測手法の精度向上には、このような主観的な誤差を極力小さくする定量的な評価指標が必要である。このような定量的な指標と健全度の関係を明確にすることによって、健全度に基づく目視による評価の主観的な誤差を最小化することを目指す。

そこで、算術平均粗さ (Ra) と健全度の関係について考察する。調査対象水路の目視による健全度評価と灌漑期水位以下の Ra の平均値 (以下、 Ra 平均値と言う。) の関係を、Fig.34 に示す。壁面では、灌漑期水位以上よりも以下の方が流水や流砂の影響のため摩耗の進行が大きい。そのため、灌漑期水位以下の Ra 平均値を使用している。健全度 5.5 と判断される初期建設時の壁面状態の Ra を近似的に零とすると、健全度と灌漑期水位以下の Ra 平均値の関係は、式 (18) で表現できる。 S は健全度、 z は灌漑期水位以下の Ra 平均値である。式 (18) は、有意水準 5% で有意である。このことから、健全度と灌漑期水位以下の Ra 平均値には 1 次直線で表現できる関係があることがわかる。

$$z = -0.2943S + 1.6232 \quad (R^2 = 0.859) \quad (18)$$

また、健全度と灌漑期水位以下の Ra の標準偏差 (以下、 Ra 標準偏差と言う。) の関係を、Fig.35 に示す。健全度 5.5 と判断される初期建設時における壁面状態の Ra 標準偏差を近似的に零とすると、健全度と灌漑期水位以下の Ra 標準偏差の関係は、式 (19) で表現できる。 S は健全度、 v は灌漑期水位以下の Ra 標準偏差である。式 (19) は、有意水準 10% で有意である。

$$v = -0.1266S + 0.7059 \quad (R^2 = 0.607) \quad (19)$$

摩耗による健全度の低下によって、灌漑期水位以下の Ra 標準偏差が大きくなり、 Ra の数値のばらつきが比例的に大きくなる。

式 (18) および式 (19) が有意であることから、摩耗の定性的な健全度評価基準は、型取りゲージで測定した壁面の凹凸を数値化した、灌漑期水位以下の Ra 平均値で定量的に表現できることが確認できた。また、健全度の低下で、 Ra 平均値とともに Ra 標準偏差も比例的に増加することがわかった。

また、水路壁面の供用年数と、摩耗による灌漑期水位以下の Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係を、各々 Fig.36 と Fig.37 に示す。壁面の摩耗による、供用年数と灌漑期水位以下の Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係は、各々式 (20) および式 (21) で表現できる。 t は供用年数、 z 及び v は Ra 平均値及び Ra 標準偏差である。式

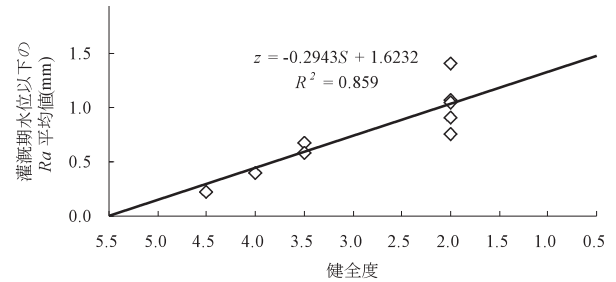


Fig.34 摩耗による灌漑期水位以下の Ra 平均値と健全度
Ra Average below Water level during Irrigation
Period with Abrasion and Soundness Index

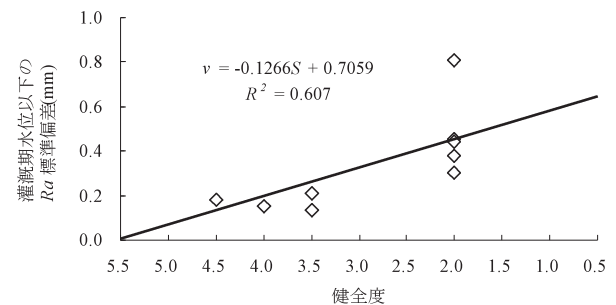


Fig.35 摩耗による灌漑期水位以下の Ra 標準偏差と健全度
Ra Standard Deviation below Water level during Irrigation
Period with Abrasion and Soundness Index

(20) に 1 次直線を用いたのは、 Ra 平均値と健全度の関係、及び健全度と供用年数の関係が双方とも 1 次直線で表現されることから、 Ra 平均値と供用年数の関係は 1 次直線で表現できることが示唆されるからである。

$$z = 0.0236t \quad (R^2 = 0.572) \quad (20)$$

$$v = 0.0101t \quad (R^2 = 0.388) \quad (21)$$

式 (20) が有意水準 10% で有意であり、供用年数と灌漑期水位以下の Ra 平均値の関係が 1 次直線で表現できることから、初期建設時からセメントペーストの流出が始まるまでに要する期間、その後にセメントペーストが流出し細骨材の流出が始まるまでに要する期間、その後に細骨材が流出し粗骨材が表面に見え始めるまでに要する期間、その後に粗骨材の粒子が半分程度露出するまでに要する期間、その後に粗骨材が剥離する期間は、ほぼ同じ長さであると言える。

一方、式 (21) から、供用年数と灌漑期水位以下の Ra 標準偏差の関係は、供用年数の増加によって Ra 標準偏差が大きくなる傾向がある。これは、供用年数の増加によって、セメントペーストや細骨材が流出し粗骨材が露出することによって、同じ壁面でも骨材の頂点に接する測定点とそうでない点で Ra の大きさに相違があり、 Ra 標準偏差が大きくなるためと考えられる。

水路壁面の摩耗の主要因と考えられる摩耗に関する実験には、次のようなものがある。水利構造物の摩耗

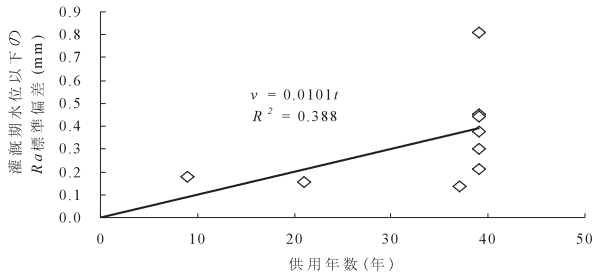


Fig.36 摩耗による灌漑期水位以下の Ra 平均値と供用年数
 Ra Average below Water level during Irrigation
 Period with Abrasion and Elapsed Year

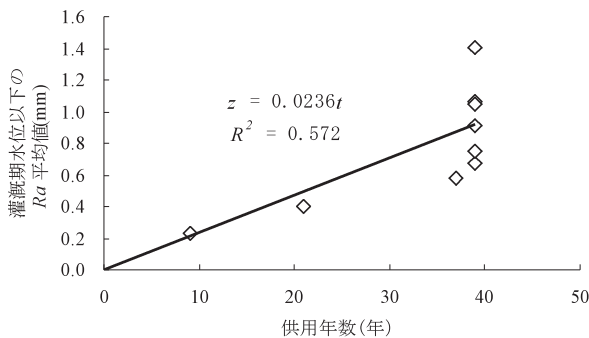


Fig.37 摩耗による灌漑期水位以下の Ra 標準偏差と供用年数
 Ra Standard Deviation below Water level during Irrigation
 Period with Abrasion and Elapsed Year

の現象は、流れの作用によるエロージョン摩耗によるものが代表とされており（堀口，1993），エロージョン摩耗の模擬には掃流摩耗試験機が使用されている（石田，2007）。松尾ら（1993）の実験結果によると、摩耗形態は表層部の摩耗量が多い掃流1時間までの初期摩耗と、それ以降の時間と摩耗量がほぼ比例する定常摩耗とに分けられる。渡嘉敷ら（2006）は、水流摩耗試験機の実験結果から、モルタル供試体では骨材が表面に露出した後は摩耗進行速度が低下することを示している。また、モデルを用いたコンクリート製水路の流砂による摩耗進行の検討（新井ら，1996）では、初期建設後の経年による摩耗の進行を示す摩耗深さは、初期建設時から定常的に進行することが示されている。一方、中矢ら（2008）は、摩耗を模擬した水路を製作し、レーザー変位計で計測した摩耗による凹凸を示す算術平均粗さ（ Ra ）と、マンシングの粗度係数の関係について検討している。しかし、水利構造物に発生する摩耗現象を全て模擬できる試験方法の規格の整備までには至っておらず、また、室内試験結果と実構造物の摩耗現象の相関性について検討を行った事例は殆ど見られない（石田，2007）。

掃流摩耗試験機や水流摩耗試験機による実験やモデルを用いた流砂による摩耗の検討では、実験開始後の経過時間と供試体表面の摩耗深さ（mm）の関係について考察している。それに対して、本研究では、壁面の摩耗に

よる凹凸を算術平均粗さ（ Ra ）（mm）で表現している。これは、既設構造物である実用水路では、掃流摩耗試験機や水流摩耗試験機を用いた実験やモデルを用いた流砂による摩耗の検討とは異なり、初期建設時の壁面の初期断面の位置や、その後の経年による摩耗深さの推定が困難であるからである。そのため、壁面の凹凸の大きさによって、摩耗の進行の程度を定量的に評価することを意図している。

コンクリート製水利構造物の室内試験結果やモデルを用いた検討と、実構造物の摩耗現象の相関性について検討を行った事例は殆ど見られないが、本研究の結果に基づき、灌漑期水位以下の算術平均粗さ（ Ra ）の平均値の数値の持つ意味や、水路の有する性能の低下との関係について整理する。ここでは、灌漑期水位以下の算術平均粗さ（ Ra ）の平均値と、初期断面からの推定される摩耗深さの関係や、推定される粗度係数の関係について整理する。また、壁面の摩耗の進行と隣接する継目からの漏水の発生する箇所数の全体の継目の箇所数に対する割合についても整理する。そして、それらを基に、水路の有する諸性能との関係について整理する。

まず、灌漑期水位以下の算術平均粗さ（ Ra ）の平均値を用いたマンシングの粗度係数の推定と、それを基にした水路の有する水利性能への影響について検討する。

中矢ら（2008）は、摩耗を模擬した水路を製作し、レーザー変位計で測定した摩耗による凹凸から計算した算術平均粗さ（ Ra ）と、マンシングの粗度係数との関係について検討している。マンシングの粗度係数は、式（22）で示される。ここで、 n は粗度係数、 k_s は相当粗度（m）、 g は重力加速度（ m/s^2 ）である。

$$n \approx 0.13 \frac{k_s^{1/6}}{\sqrt{g}} = 0.042 k_s^{1/6} \quad (22)$$

実験結果では、レーザー変位計で求めた算術平均粗さ（ Ra ）が0.5mmの時、粗度係数 $n=0.013$ であることから、レーザー変位計で求めた算術平均粗さ（ Ra ）（mm）と相当粗度 k_s （m）には、おおまかに式（23）の関係があることを示した。

$$k_s = 0.002 Ra \quad (23)$$

このことから、水路の摩耗による凹凸を示す指標である算術平均粗さ（ Ra ）から、粗度係数 n を推定できることを示した。

この関係式を用いて、実用水路において型取りゲージを用いて算定した、灌漑期水位以下の算術平均粗さ（ Ra ）の平均値から、粗度係数 n を計算する。劣化期（健全度1.0）の場合の灌漑期水位以下の算術平均粗さ（ Ra ）の平均値は1.33mmであり、この場合、推定される粗度係数は $n=0.016$ となる。現場打ち水路の設計基準で示される粗度係数は $n=0.012 \sim 0.016$ である（農林水産省農村振興局，2001）。初期建設後の経年の摩耗による灌漑

期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値の増加に伴い、推定される粗度係数も大きくなる。しかし、初期建設時の推定される粗度係数は $n=0.006$ と極めて良好な値となっている。また、劣化期 (健全度 1.0) における推定される粗度係数も $n=0.016$ と、設計基準の範囲内にある。そのため、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値から推定される粗度係数は、初期建設後の経年によって増加する傾向にはあるが、劣化期 (健全度 1.0) においても設計基準の範囲内に収まっている。このことから、粗度係数で代表される水路の有する水理性能は、劣化期 (健全度 1.0) においても、性能低下を憂慮する必要性は小さい。

次に、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値と、初期断面からの推定される摩耗深さの関係について整理する。

本研究の結果では、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値と、健全度や供用年数との関係は、1次直線で表現できることがわかった。このことから、ここでは、モデルを用いた流砂によるコンクリート製水路の摩耗進行に関する検討結果 (新井ら, 1996) において示された、摩耗深さと経過時間には1次直線で示される関係があるものとの相関があるとする。また、本間ら (2008) の許容応力度法を用いた水路壁面のかぶり厚の減少と鉄筋の許容引張応力度の関係を用いて、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値を用いて、初期断面からの摩耗深さの推定と、水路の有する構造性能への影響に関する検討を行う。

本間ら (2008) は、水路幅 250cm、水路深さ 150cm、側壁厚さ 20cm、鉄筋径 D13mm、鉄筋のかぶり厚 50mm の標準断面の水路の場合、かぶり厚が 22mm 減少した場合に、鉄筋の引張応力度が許容引張応力度の設計値 176.5N/mm^2 を超えるとの計算結果を示している。コンクリートに配合される最大骨材寸法を 20mm とすると、これは、粗骨材が剥離する状態を示し、劣化期 (健全度 1.0) に相当する。健全度 1.0 の場合の灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値を、式 (18) を用いて計算すると 1.33mm となる。すなわち、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値が 1.33mm の場合は劣化期 (健全度 1.0) に相当し、初期断面からの推定される摩耗深さが 22mm と考えられる。また、初期建設時からの推定される摩耗深さを、新井ら (1996) のモデル計算結果の定常的に摩耗が進行することを前提にすると、各健全度に相当する灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値に対応する推定される摩耗深さを計算することが可能である。

また、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値と水路の有する性能との関係では、本間ら (2008) の計算結果を用いると、灌漑期水位以下の算術平均粗さ (Ra) の平均値が 1.33mm の場合は劣化期 (健全度 1.0) に相当し、水路の有する構造性能に問題が生じることと

なる。すなわち、粗骨材が剥離し、鉄筋の引張応力度が許容引張応力度の設計値 176.5N/mm^2 を超え、側壁が倒壊する可能性があることを意味する。そのため、この場合には、対策として全面更新が必要となると考えられる。また、ストックマネジメントにおいては、施設の長寿命化とライフサイクルコスト低減の観点から、劣化期 (健全度 1.0) より以前の段階の顕在期後期 (健全度 2.0)、顕在期前期 (健全度 3.0)、進展期 (健全度 4.0) においても、ライフサイクルコストを考慮に入れて、適切な時期に適切な補修等の対策を実施することも考えられる。

さらに、壁面の摩耗の進行と「隣接する継目からの漏水の発生する箇所数」の「水路系全体の継目の箇所数」に対する割合についても整理する。第V章で検討した、壁面の摩耗の健全度と、隣接する継目の既に補修が実施されているか、点検実施時に漏水が確認された箇所数の「水路系全体の継目の箇所数」に対する割合との関係は、式 (24) で表現できる。ここで、 S は壁面の摩耗の健全度であり、 r は隣接する継目の既補修または漏水箇所の割合である。

$$r = -0.3597S + 1.6361 \quad (R^2 = 0.857) \quad (24)$$

これから、壁面の摩耗の健全度と、隣接する継目の漏水する箇所の割合の関係について計算することができる。壁面の摩耗の進行が進展期 (健全度 4.0) で灌漑期水位以下の Ra の平均値が 0.45mm の場合で、漏水する継目の割合が 0.20 であり、その後、順次、漏水する継目の割合が増加していく。そのため、継目からの漏水に代表される水路の有する水利用性能については、壁面の摩耗の進行が進展期 (健全度 4.0) の場合から、既に継目の補修等の対策が必要となることを示している。

壁面の摩耗と社会的安定性能との関係については、第V章で示した、2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震後の西蒲原地区における現地調査では水路の被害は極めて少なかった。しかし、西蒲原地区の調査対象水路の壁面の摩耗は、最も悪い状態が顕在期後期 (健全度 2.0) であった。劣化期 (健全度 1.0) においては、構造性能に影響が生じることから、社会的安定性能にも影響が生じると考えることができる。

これらをまとめると、Table 11 のように示すことができる。

6 まとめ

農業用水路に特徴的な劣化機構である水路壁面の摩耗について、北陸地域の新潟県の西蒲原地区の供用年数の異なる水路の点検データを用いて、点検手法と劣化予測手法の提案と適用を行った。

目視による健全度評価基準に基づく点検結果を用いて、農業用水路の壁面の摩耗の進行を、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルによって予測する手法を提案した。

単一劣化モデルでは、水路壁面の摩耗については、初

Table 11 灌漑期水位以下の Ra 平均値と、推定粗度係数、推定摩耗深さ、漏水する継目の割合や性能低下との関係
Relationship between Ra Average below Water level during Irrigation Period, and Estimated Roughness Coefficient,
Estimated Abrasion Depth, Ratio of Water leak Joints and Performance Decline

灌漑期水位下の Ra 平均値 (mm)	0.00	0.15	0.45	0.74	1.03	1.33
劣化過程	潜在期		進展期	顕在期前期	顕在期後期	劣化期
健全度	5.5	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
推定粗度係数	0.006	0.011	0.013	0.014	0.015	0.016
推定摩耗深さ (mm)	0.0	2.4	7.3	12.2	17.1	22.0
漏水する継目の割合	0	0	0.20	0.56	0.92	1
水理性能			○	○	○	○
構造性能			○	○	○	◎
水利用性能			◎	◎	◎	◎
社会的安定性能			○	○	○	◎

◎：要対策

○：場合によっては、要対策

各性能に関する対策の時期と工法は、ライフサイクルコストを考慮して検討。

期建設後の健全度の低下を供用年数の1次直線で推定することが可能であることを示した。すなわち、水路壁面の摩耗は、2次曲線のように供用年数が経過するほど健全度の低下が加速するのではなく、劣化速度が一定であることを示した。このことから、第V章で示した壁面の摩耗の劣化進行を表現する健全度は、水路の供用年数と1次直線の関係にある定量的な指標であると言える。

マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法については、以下のようにまとめることができる。

- ①調査実施地区の点検データに適合するマルコフ連鎖モデルを設定するために、単一劣化モデルにおいて検証された、健全度と供用年数の関係が1次直線で示されたことを用いて、各健全度間の遷移率 x が一定であるモデルを適用した。これによって、同じ時期に建設された同一水路の異なるバレルについて、健全度のピークとばらつきを適切に表現できることを示した。
- ②水路壁面の摩耗にマルコフ連鎖モデルを適用し、調査を実施した各水路に適用可能なマルコフ遷移率を算定した。これらの供用年数の異なる水路において、供用年数に関係なくほぼ同じ遷移率が適用できることを示した。これによって、供用年数の異なる水路の点検データを用いて、遷移率の妥当性の検証が可能となった。
- ③本マルコフ連鎖モデルの、単一劣化モデルの1次直線による劣化予測式との適合性が高いことを示した。

単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルの利用方法としては、次のようなことが想定される。

単一劣化モデルは、簡易で理解が容易であるため、地元農家等へ説明する際に、水路壁面の摩耗による平均的な劣化進行を明示するのに有効である。

マルコフ連鎖モデルは、同一水路の異なるバレルの健全度のピークとばらつきを表現できることから、どの健全度以下のバレルの割合が何%になった場合に、補修、全面更新等の対策工法を実施するかという整備水準をあ

らかじめ設定し、その状態に達した場合に、その対策工法による整備を実施するというように、具体的な補修等の対策工法とその実施時期の推定に使用可能である。

農業用水路は長大な延長を有するため、目視による各バレルの健全度評価が点検の主体となるが、点検実施者の主観的な評価となるため、同じ劣化状態の水路でも点検結果に誤差が生じる可能性がある。そのため、摩耗による水路壁面の凹凸を、型取りゲージを用いて計測し、算術平均粗さ (Ra) を用いて数値化し定量的に評価する手法を提案した。この定量的な算術平均粗さ (Ra) と健全度には1次直線で表現できる関係があることを示した。これによって、点検実施者が、実際に目視による健全度評価を実施する前に、算術平均粗さ (Ra) と健全度の関係を習得することによって、目視による健全度評価の主観的な誤差を最小化することが可能となることを示した。

算術平均粗さ (Ra) を用いた水路壁面の摩耗による劣化進行の検討結果は、以下のようにまとめることができる。

- ①水路の摩耗による壁面の凹凸は、型取りゲージを用いて数値化し、算術平均粗さ (Ra) で定量的に表現できる。
- ②摩耗による壁面の凹凸の健全度評価基準に基づく評価と、灌漑期水位以下の Ra の平均値及び標準偏差には、1次直線で示される関係がある。その結果、摩耗による壁面の凹凸の健全度による定性的な評価を、灌漑期水位以下の Ra の平均値で定量的に表現できる。
- ③摩耗による壁面の凹凸の灌漑期水位以下の Ra の平均値と供用年数には、1次直線で示される関係がある。このことから、初期建設時からセメントペーストの流出が開始するまでに要する期間、その後にセメントペーストが流出し細骨材の流出が開始するまでに要する期間、その後に細骨材が流出し粗骨材が表面に見え

始めるまでに要する期間、その後粗骨材の粒子が半分程度露出するまでに要する期間、その後粗骨材が剥離する期間は、ほぼ同じ長さと言える。また、 Ra の標準偏差と供用年数には、供用年数の増加によって Ra の標準偏差も増加する傾向がある。

④灌漑期水位以下の Ra の平均値の有する意味や、水路の有する性能低下との関係について整理した。灌漑期水位以下の Ra の平均値が1.33mmの場合、劣化期(健全度1.0)に相当するが、推定される粗度係数は $n=0.016$ であり、設計基準の範囲内であることから、水理性能に与える影響は小さい。灌漑期水位以下の Ra の平均値が1.33mmの場合、劣化期(健全度1.0)に相当し、推定される初期断面からの摩耗深さは22mmとなり、鉄筋の引張応力度が設計許容応力度を越えるため構造性能に支障が生じる。壁面に隣接する継目からの漏水が生じる割合は、壁面の摩耗の進行が進展期(健全度4.0)で灌漑期水位以下の Ra の平均値が0.45mmの場合に既に0.20であり、その後の健全度の低下によって、さらに漏水する継目の割合が増加し、水利用性能に影響を与える。社会的安定性能については、構造性能に支障が生じる劣化期(健全度1.0)の場合には、支障があると考えられることができる。灌漑期水位以下の Ra の平均値を用いることによって、これらの水路の有する諸性能に関連する指標との関連を明らかにした。すなわち、灌漑期水位以下の Ra の平均値は、水路壁面の摩耗の進行を表現する指標であるとともに、水路の有する諸性能の低下をも表現可能な定量的な指標であると言える。

⑤定量的な算術平均粗さ(Ra)と健全度には1次直線で表現できる関係があることから、点検実施者が、この関係を習得することによって、目視による健全度評価の主観的な誤差を最小化することが可能となる。

目視による健全度評価の誤差を最小化する具体的な方法については、次のようなことが考えられる。点検実施者が、長大な延長を有する農業用水路の目視による健全度評価を実施する前に、典型的な劣化状態を示すバレルにおいて、算術平均粗さ(Ra)を計算し、健全度との関係を習得する。そのうえで、長大な延長を有する農業用水路の目視による健全度評価を実施することによって、目視による主観的な健全度評価の精度を向上させる。

なお、本章において提案した、水路壁面の摩耗に関する点検手法である目視による健全度評価と算術平均粗さ(Ra)を用いた定量的評価と、目視による健全度評価結果を用いた単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法による劣化予測結果は、調査対象地区である北陸地域の新潟県の西蒲原地区に限定されたものである。そのため、これらの結果に、全国的に展開することが可能な普遍性があるかどうかの検証が必要である。そのためには、他地区への適用を行うことによって、その検証を行うことが必要である。

そのため、第Ⅶ章においては、本章において提案した点検手法と劣化予測手法及びその劣化予測結果を、他地区に適用した場合の適用結果について検討する。

Ⅶ 西蒲原地区の壁面摩耗による劣化予測結果の他地区への適用

1 西蒲原地区の壁面摩耗による劣化予測結果の他地区への適用の必要性

第Ⅵ章では、農業用水路壁面の摩耗に関する簡易な点検手法と、その点検結果に基づく劣化予測手法を提案し、北陸地域の新潟県の西蒲原地区における現地調査によって、調査結果を基に、農業用水路壁面の摩耗の経年による劣化予測を行った。

水路壁面の摩耗の点検手法としては、目視による健全度評価が基本となる。しかし、目視による健全度評価の際には、点検実施者の主観による誤差が生じる可能性がある。そのため、主観による誤差を最小化するための定量的な評価指標を提案した。すなわち、型取りゲージを用いて壁面の摩耗による凹凸を数値化し、算術平均粗さ(Ra)で表現することを提案した。水路壁面の灌漑期水位以下の算術平均粗さ(Ra)の平均値と健全度には1次直線で表現できる関係があり、この関係を用いることによって、点検実施者の主観による誤差を最小化する手法を提案した。また、灌漑期水位以下の算術平均粗さ(Ra)の平均値から、粗度係数を計算し、水路の有する水理性能への影響について整理した。灌漑期水位以下の算術平均粗さ(Ra)の平均値と、推定される初期建設時からの摩耗深さや、水路の有する構造性能との関係について整理した。さらに、水路壁面の隣接する継目からの漏水が生じる割合や、水路の有する水利用性能への影響について整理した。社会的安定性能についても、構造性能との関連で整理した。

また、目視による健全度評価結果を基に、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法の提案と、西蒲原地区での現地調査に基づく劣化進行の予測の推定を行った。単一劣化モデルにおいては、壁面の摩耗による劣化進行は、初期建設時からの健全度の低下を供用年数の1次直線で表現できることを明らかにした。これによって、壁面の外観の変状に基づく定性的な健全度評価基準が、供用年数と1次直線の関係で表現される定量的な指標となることを示した。この関係から、マルコフ連鎖モデルにおける各健全度間の遷移率を一定とすることによって、適切なマルコフ連鎖モデルを選定できることを示した。

マルコフ連鎖モデルでは、同時期に建設された同じ水路においても、それに含まれる各バレルにおける壁面の摩耗の劣化進行が同一の進度で一律に進行するのではなく、ある健全度にピークを持ちながらもある程度の健全度のばらつきがあり、その健全度のピークが経年によ

て低下していく傾向を適切に表現できることを示した。また、各水路の遷移率は個別に異なるのではなく、供用年数の異なる水路の遷移率は、供用年数に関係なく、ほぼ一定であり、調査対象水路全体に同じ遷移率を適用することが可能であることを示した。

しかし、これらの農業用水路の壁面の摩耗による劣化予測結果は、北陸地域の新潟県の西蒲原地区の調査結果に基づくものであり、他地区での適用性があるかどうかの検証が必要である。そのため、本章では、関東地域の小場江堰地区、東北地域の岩手山麓地区及び猿ヶ石北部地区を事例として、他地区への適用性の検討を行う。

Ⅶ.2では、他地区への適用における検討の際の仮定について示す。

Ⅶ.3では関東地域の茨城県の小場江堰地区への適用結果を示す。

Ⅶ.4では東北地域の岩手県の岩手山麓地区への適用結果を示す。

Ⅶ.5では東北地域の岩手県の猿ヶ石北部地区への適用結果を示す。

2 他地区への適用における仮定

農業用水路の壁面の摩耗によって、セメントペーストや細骨材が流出し、粗骨材が露出し剥離する。また、コンクリート構造物におけるその他の劣化機構として、凍害がある。ここでいう凍害は、凍上ではなく、凍結融解作用のことである。凍結融解作用とは、コンクリート中の水分の凍結膨張によって発生するものであり、長

年にわたる凍結と融解の繰り返しによって、コンクリートが徐々に劣化する現象である。凍害を受けた構造物では、コンクリート表面に微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウトなどの形で劣化が顕在化する（土木学会、2008）。ポップアウトとは、粗骨材が剥離することで、その前には、粗骨材の周辺のセメントペーストや細骨材も剥離する。このような現象は、摩耗による劣化現象と類似している部分がある。そのため、本章における西蒲原地区の劣化予測結果の他地区への適用においては、水路壁面の摩耗による劣化進行速度は、調査実施地区の凍害の被害を受ける危険度の大きさと関連性があるものと仮定し、実際の調査結果に基づき検証することとする。

わが国の凍害危険度の分布図（長谷川・藤原、1988）を Fig.38 に示す。これには、各調査地区の凍害危険度も示している。凍害危険度とは、年間の凍結融解日数、日射による融解率等によって計算した凍害危険度を0～5の6段階に分類したものであり、数値が大きいほど凍害の危険度が大きいことを示すものである。西蒲原地区と小場江堰地区は、凍害危険度が零で、凍害の危険がない。猿ヶ石北部地区は、岩手県であるが低平地に位置するため、凍害危険度が1で、「ごく軽微」である。岩手山麓地区は、岩手県で山間部に位置するため、凍害危険度が3で、「やや大きい」である。

ここでは、凍害危険度が大きい地区の方が、水路壁面の摩耗による劣化進行速度が速いことを仮定し、実際の調査結果に基づいて検証する。

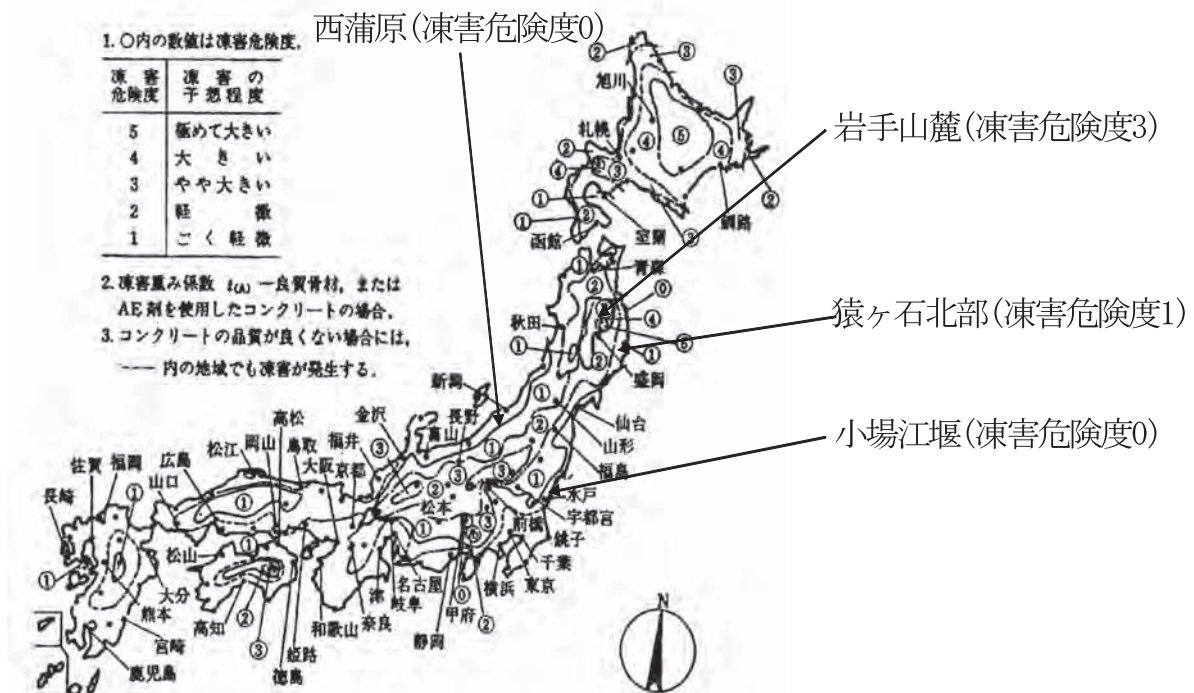


Fig.38 凍害危険度の分布図
 出典：長谷川・藤原（1988）

Distribution Map of Risk Degree of Frozen Damage

3 小場江堰地区への適用

a 地区の概要

関東地域の小場江堰地区は、茨城県水戸市近郊に位置する。本地区是那珂川沿いに帯状に展開する1,076haの地域で、標高19.70～2.0mの地質第四紀新層の壤土及び埴壤土から成っており、年平均気温12.8℃、平均降水量1,442mmの地域である。長谷川・藤原(1988)による凍害危険度は零であり、これは凍害のおそれがないことを示している。

昭和42～47年度の県営かんがい排水(用水障害対策)事業、昭和45～56年度の県営かんがい排水(一般)事業、昭和42～50年度の県営圃場整備事業によって整備された地区である。

この地区の幹線水路を、壁面の摩耗の調査対象水路とした。

b 調査対象水路と調査方法

調査対象水路は、供用年数5, 32, 37年のL～N水路(Table 12)で、目視による健全度評価に基づく単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルの適用と、型取りゲージを用いて壁面の凹凸を計測した算術平均粗さ(Ra)の算定を行った。

c 調査結果

(1) 目視による健全度評価

Fig.39に、目視による各パレルの壁面の摩耗の健全度評価結果を基に、供用年数ごとの摩耗の健全度分布をプロットした図を示す。壁面の摩耗の経年進行は、同時に建設されたもの全てが同様に推移するのではなく、各箇所ごとにばらつきがある。しかし、ある健全度にピークを持ち、経年によって健全度が低下していく傾向があることがわかる。

Table 12 小場江堰地区の調査対象水路
Surveyed Canals in Obaezeki District

水路名	供用年数	調査対象延長(m)	水路躯体数
L用水路	5	108	9
M用水路	32	450	50
N用水路	37	276	23

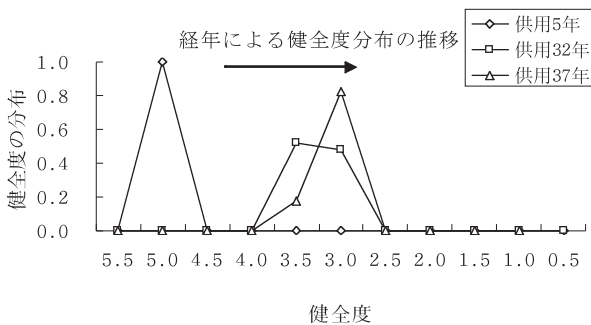


Fig.39 小場江堰地区の経年による健全度分布の推移
Transition of Soundness Index Distribution with Elapsed Years in Obaezeki District

単一劣化モデルについては、健全度評価基準に基づく、目視による評価結果の壁面の摩耗の供用年数と健全度評価結果の関係を、Fig.40に示す。Fig.40には、西蒲原地区の調査結果による壁面の摩耗の劣化予測式も示している。この西蒲原地区の劣化予測式は、今回の小場江堰地区の調査データと有意水準10%で有意であることから、西蒲原地区と、小場江堰地区の劣化進行速度はほぼ同じと言える。

マルコフ連鎖モデルについては、小場江堰地区の各水路の調査実測値の健全度算術平均値と、遷移率 $x=0.12$ の場合の健全度算術平均値の初期建設後の経年変化をFig.41に示す。Fig.41には、西蒲原地区の調査データによる壁面の摩耗の劣化予測式も示している。小場江堰地区の調査水路の壁面の摩耗は、マルコフ連鎖モデルを用いて、西蒲原地区と同じ遷移率 $x=0.12$ で表現することができる。また、西蒲原地区の1次直線による単一劣化モデルの摩耗の劣化予測式ともよく適合している。このことから、小場江堰地区の水路壁面の摩耗は、西蒲原地区と同様の劣化進行をしていると言える。

(2) 算術平均粗さ (Ra)

水路の供用年数と、水路壁面の凹凸を算術平均粗さ(Ra)で数値化した結果をFig.42に示す。本調査は、非灌漑期に実施したが、非灌漑期にも生活用水等の配水があるため、調査可能であった壁面の天端から鉛直下方向に非灌漑期の水位までの凹凸を算術平均粗さ(Ra)で

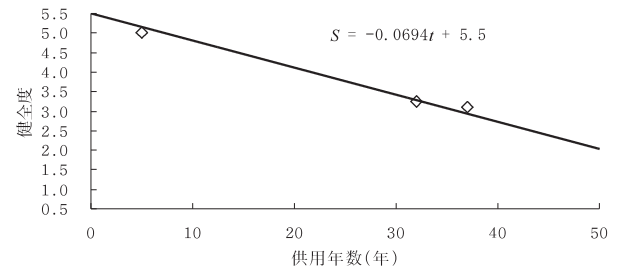


Fig.40 小場江堰地区の供用年数と健全度の関係
Relationship between Elapsed Year and Soundness Index in Obaezeki District

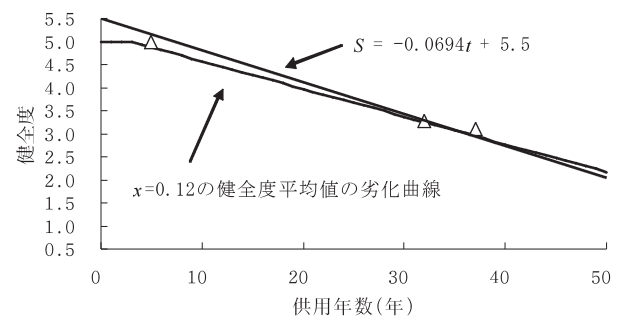


Fig.41 小場江堰地区のマルコフ連鎖モデルの健全度平均値と劣化曲線
Average of Soundness Index of Markovian Transition Model and Deterioration Curve in Obaezeki District

数値化した結果を示している。これから、水路の供用年数の増加に伴い、特に灌漑期水位以下の壁面の凹凸が大きく、算術平均粗さ (Ra) の数値が大きくなっていることがわかる。

調査対象水路の目視による健全度評価と灌漑期水位以下の Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係を、各々、**Fig.43** と **Fig.44** に示す。これらには、第VI章で示した西蒲原地区の調査データに基づく回帰式も示している。健全度と Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係は、各々、西蒲原地区の調査データに基づく回帰式と、有意水準 10% で

有意である。

また、水路の供用年数と灌漑期水位以下の Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係を、各々、**Fig.45** と **Fig.46** に示す。これらにも、第VI章で示した西蒲原地区の調査データに基づく回帰式も示している。供用年数と Ra 平均値の関係は、西蒲原地区の調査データに基づく回帰式と、有意水準 10% で有意である。

これらから、小場江堰地区の水路壁面の摩耗の経年による進行は、西蒲原地区とほぼ同じ劣化進行の傾向を示していると言える。

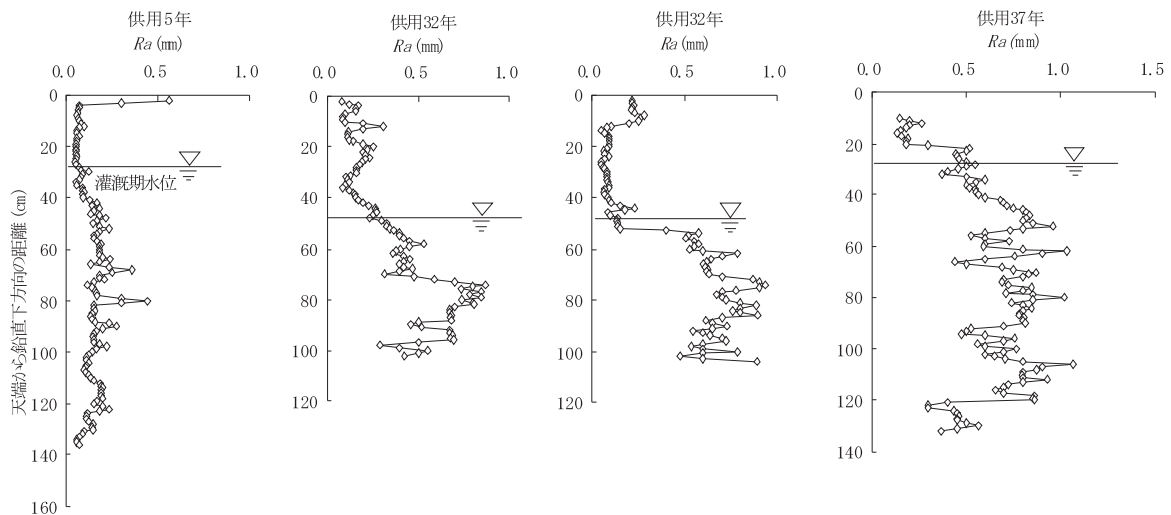


Fig.42 小場江堰地区の水路の供用年数と算術平均粗さ (Ra)
Canals' Elapsed Years and Arithmetic Mean Roughness (Ra) in Obaezeki District

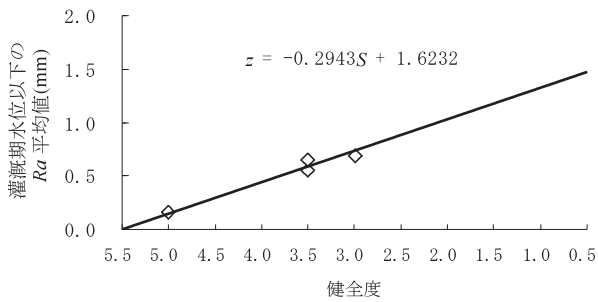


Fig.43 小場江堰地区の灌漑期水位以下の Ra 平均値と健全度
 Ra Average below Water level during Irrigation Period and Soundness Index in Obaezeki District

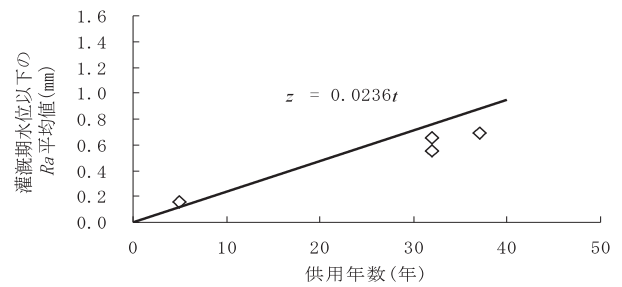


Fig.45 小場江堰地区の灌漑期水位以下の Ra 平均値と供用年数
 Ra Average below Water level during Irrigation Period and Elapsed Year in Obaezeki District

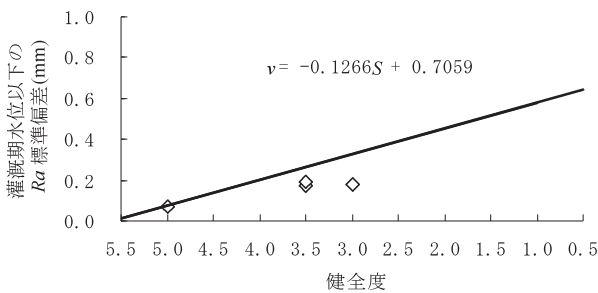


Fig.44 小場江堰地区の灌漑期水位以下の Ra 標準偏差と健全度
 Ra Standard Deviation below Water level during Irrigation Period and Soundness Index in Obaezeki District

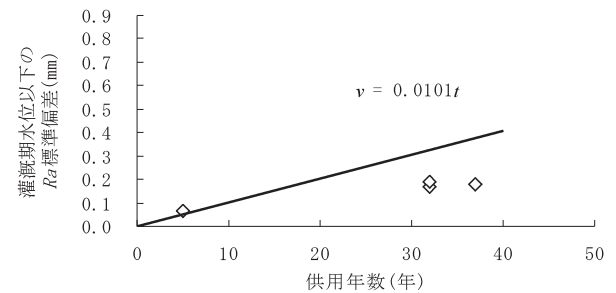


Fig.46 小場江堰地区の灌漑期水位以下の Ra 標準偏差と供用年数
 Ra Standard Deviation below Water level during Irrigation Period and Elapsed Year in Obaezeki District

これらのことから、小場江堰地区の水路壁面の摩耗は、目視結果による単一劣化モデルやマルコフ連鎖モデルによる劣化予測においても、算術平均粗さ (Ra) においても、西蒲原地区とはほぼ同様の劣化進行をしている。なお、長谷川・藤原 (1988) の凍害危険度の分布図によると、小場江堰地区の凍害危険度は、西蒲原地区と同じく零であり、凍害のおそれがないことを示している。

4 岩手山麓地区への適用

a 地区の概要

東北地域の岩手山麓地区は、岩手県盛岡市近郊に位置する。本地区は、開拓と用水改良を目的として、昭和23～43年度に国営農地開発事業が実施された地区で、11,838haの受益面積を有する。山間部に位置するため、長谷川・藤原 (1988) による凍害危険度は3であり、これが凍害の予想程度が「やや大きい」ことを示している。

この地区の幹線水路を、壁面の摩耗の調査対象水路とした。

b 調査対象水路と調査方法

調査対象水路は、供用年数25, 44年のOとP用水路 (Table 13) で、目視による健全度評価のみを実施し、型取りゲージを用いた算術平均粗さ (Ra) の算定は行っていない。

c 調査結果

Fig.47に、各パレルの壁面の摩耗の目視調査結果を基に、供用年数ごとの摩耗の健全度分布をプロットした図を示す。壁面の摩耗の経年進行は、同時期に建設されたもの全てが同様に推移するのではなく、各箇所ごとにばらつきがある。しかし、ある健全度にピークを持ち、経年によって健全度が低下していく傾向があることがわかる。

Table 13 岩手山麓地区の調査対象水路
Surveyed Canals in Iwate-Sanroku District

水路名	供用年数	水路躯体数	健全度平均
O用水路	25	10	3.10
P用水路	44	58	2.07

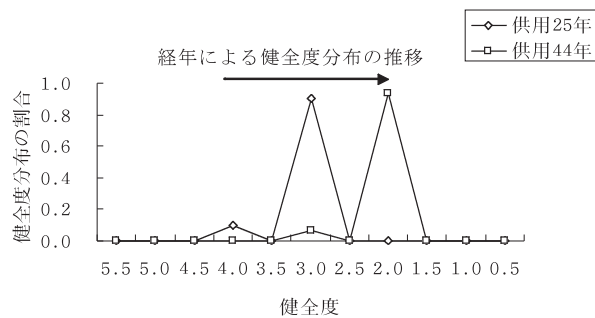


Fig.47 岩手山麓地区の経年による健全度分布の推移
Transition of Soundness Index with Elapsed Year in Iwate-Sanroku District

単一劣化モデルについては、健全度評価基準に基づく、目視による評価結果の壁面の摩耗の供用年数と健全度評価結果の関係を、Fig.48に示す。Fig.48には、西蒲原地区の調査結果による壁面の摩耗の劣化予測式とともに、岩手山麓地区の調査データに最も適合する劣化予測式 (25) を示している。ここで、tは供用年数、Sは健全度である。

$$S = -0.0824t + 5.5 \quad (R^2 = 0.711) \quad (25)$$

この結果から、岩手山麓地区の水路の方が、西蒲原地区の調査結果よりも劣化進行が速いことがわかる。

マルコフ連鎖モデルについては、岩手山麓地区の各水路の調査実測値の健全度算術平均値と、遷移率 $x=0.15$ の場合の健全度算術平均値の初期建設後の経年変化を Fig.49に示す。Fig.49には、岩手山麓地区の調査データによる1次直線の壁面の摩耗の劣化予測式である式 (25) も示している。岩手山麓地区の調査水路の壁面の摩耗は、マルコフ連鎖モデルを用いて、西蒲原地区の遷移率 $x=0.12$ よりも大きい遷移率 $x=0.15$ で表現することができる。また、岩手山麓地区の1次直線による摩耗の劣化予測式 (25) ともよく適合している。このことから、岩手山麓地区の水路の壁面の摩耗は、西蒲原地区よりも速く劣化進行をしていると言える。

西蒲原地区と岩手山麓地区の水路壁面の摩耗による劣

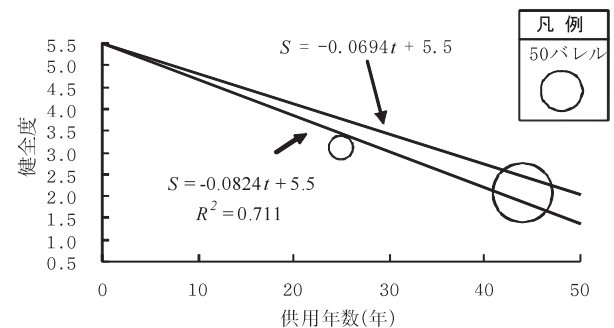


Fig.48 岩手山麓地区の供用年数と健全度の関係
Relationship between Elapsed Year and Soundness Index in Iwate-Sanroku District

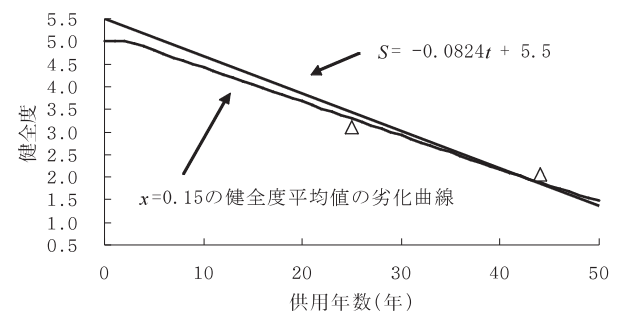


Fig.49 岩手山麓地区のマルコフ連鎖モデルの健全度平均値と劣化曲線
Average of Soundness Index of Markovian Transition Model and Deterioration Curve in Iwate-Sanroku District

化進行速度の相違を示すマルコフ連鎖モデルの遷移率の相違の影響について考える。Fig.50 に、西蒲原地区の遷移率 $x=0.12$ の場合と、岩手山麓地区の遷移率 $x=0.15$ の場合の、供用年数による健全度の平均値の推移を示す。農業用水路の標準耐用年数は 40 年であり、また、実際にも供用 40 年を超える前に補修や全面更新が実施される場合が多く、供用 40 年を超える水路の存在は少ない。そのため、西蒲原地区と岩手山麓地区の遷移率の差による劣化進行の相違を、供用 40 年で比較する。供用 40 年では、遷移率 $x=0.12$ と $x=0.15$ の場合で、健全度の平均値が各々 2.77 と 2.17 である。また、Fig.51 に、西蒲原地区の遷移率 $x=0.12$ の場合と、岩手山麓地区の遷移率 $x=0.15$ の場合の、供用年数による健全度 2.0 以下のバレルの割合の推移を示す。これは、第 VI 章の西蒲原地区の調査結果から、健全度 1.0 の劣化期には水路の有する構造的な問題が生じることから、それ以前の健全度 2.0 の顕在期後期に補修を実施することと仮定することができることによる。供用 40 年では、遷移率 $x=0.12$ と $x=0.15$ の場合で、健全度 2.0 以下のバレルの割合が各々 0.15 と 0.56 で、その差が大きい。また、供用 30～40 年の間に、健全度 2 以下のバレルの割合の差が急速に大きくなるのがわかる。

岩手山麓地区では、西蒲原地区よりも、水路壁面の摩耗の進行速度が速い傾向がある。この理由の 1 つとしては、岩手山麓地区の方が気象条件が厳しく、凍害等の影響があることが考えられる。長谷川・藤原 (1988) の凍

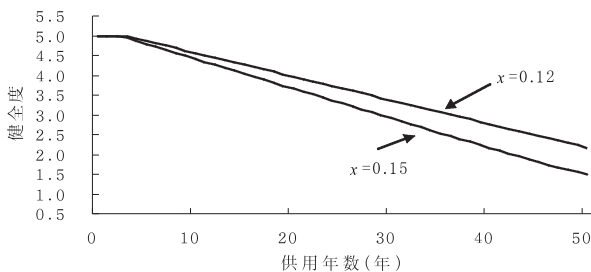


Fig.50 遷移率の相違による健全度の平均値の推移
Transition of Average Soundness Index with Different Transition Rates

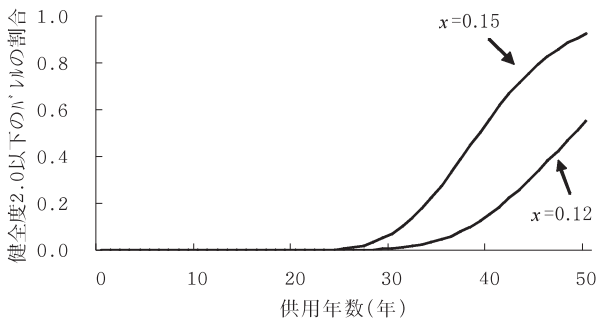


Fig.51 遷移率の相違による健全度 2.0 以下のバレルの割合の推移
Transition of rate of below Soundness Index 2.0 with Different Transition Rates

害危険度の分布図によると、西蒲原地区は凍害危険度が零であり、凍害のおそれがないが、岩手山麓地区は凍害危険度が 3 であり、これは凍害の予想程度が「やや大きい」ことを示している。

5 猿ヶ石北部地区への適用

a 地区の概要

東北地域の猿ヶ石北部地区は、北上川左岸に展開する岩手県花巻市を中心とした地域に位置する。標高 100～200m 程度の低平地であり、田瀬ダムを水源とする。猿ヶ石川兩岸の農地に農業用水を供給することを目的として、昭和 28～38 年度に国営土地改良事業（かんばい）、昭和 34～45 年度に国営土地改良事業（農地開発）を実施した地区で、2,504ha の受益面積を有する。低平地に位置するため、長谷川・藤原 (1988) による凍害危険度は 1 であり、これは凍害の予想程度が「ごく軽微」であることを示している。

施設の一部は 2 度の国営造成施設整備事業（昭和 50～55 年度、昭和 63～平成 4 年度）を実施し、老朽箇所 の改修・補強を実施してきているが、この地区の幹線用水路を、壁面の摩耗の調査対象水路とした。

b 調査対象水路と調査方法

調査対象水路は、供用年数 27, 44 年の Q～R 用水路 (Table 14) で、型取りゲージを用いて壁面の凹凸を計測し算術平均粗さ (Ra) の算定を実施するとともに、そのバレルの目視による健全度評価を実施した。水路の複数のバレルの健全度のばらつきを把握するだけの多くのバレルの目視による健全度評価は実施していない。これは、殆どのバレルが 2 次製品によって全面更新されており、現状では、現場打ち鉄筋コンクリート製のバレル数が限定されているためである。

c 調査結果

水路の供用年数と、水路壁面の凹凸を算術平均粗さ (Ra) で数値化した結果を Fig.52 に示す。本調査は、非灌漑期に実施したが、非灌漑期にも生活用水等の配水があるため、調査可能であった壁面の天端から鉛直下方向に非灌漑期の水位までの凹凸を算術平均粗さ (Ra) で数値化した結果を示している。これから、水路の供用年数の増加に伴い、特に灌漑期水位以下の壁面の凹凸が大きくなり、算術平均粗さ (Ra) の数値が大きくなっていることがわかる。

調査対象水路の目視による健全度評価と灌漑期水位以下の Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係を、各々、Fig.53 と Fig.54 に示す。これらには、第 VI 章で示した西蒲原

Table 14 猿ヶ石北部地区の調査対象水路
Surveyed Canals in Sarugaishi-Hokubu District

水路名	供用年数	健全度
Q用水路	27	4.0
R用水路	44	2.0

地区の調査データに基づく回帰式も示している。健全度と Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係は、各々、西蒲原地区の調査データに基づく回帰式と、有意水準 10% で有意である。

また、水路の供用年数と灌漑期水位以下の Ra 平均値及び Ra 標準偏差の関係を、各々、**Fig.55** と **Fig.56** に示す。これらにも、第VI章で示した西蒲原地区の調査データに基づく回帰式も示している。点検データ数が少ないが、ほぼ同じ劣化傾向を示している。

なお、型取りゲージによって算術平均粗さ (Ra) を

計算したバレルの、目視による健全度評価結果による、壁面の摩耗の供用年数と健全度評価結果の関係を、**Fig.57** に示す。**Fig.57** には、西蒲原地区の調査結果による壁面の摩耗の劣化予測式も示している。この西蒲原地区の劣化予測式は、今回の猿ヶ石北部地区の調査データと有意水準 10% で有意であることから、西蒲原地区と、猿ヶ石北部地区の劣化進行速度はほぼ同じと言える。

これらから、猿ヶ石北部地区の水路壁面の摩耗の経年による進行は、西蒲原地区とほぼ同じ劣化進行の傾向を示すと言える。なお、長谷川・藤原 (1988) の凍害危険

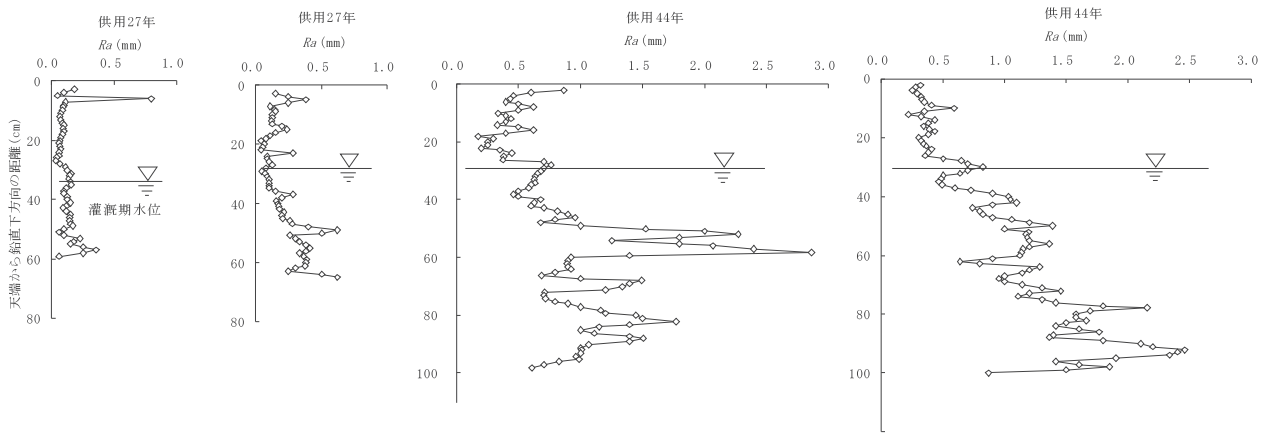


Fig.52 猿ヶ石北部地区の水路の供用年数と算術平均粗さ (Ra)
Elapsed Year of Canals and Arithmetic Mean Roughness (Ra) in Sarugaishi-Hokubu District

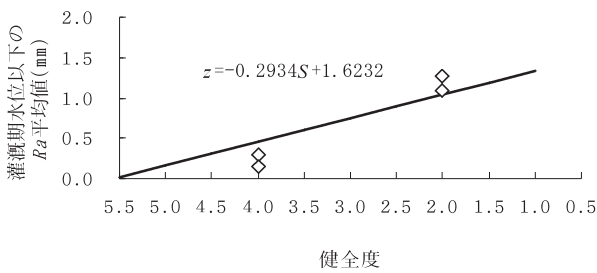


Fig.53 猿ヶ石北部地区の灌漑期水位以下の Ra 平均値と健全度
 Ra Average below Water level during Irrigation Period and Soundness Index in Sarugaishi-Hokubu District

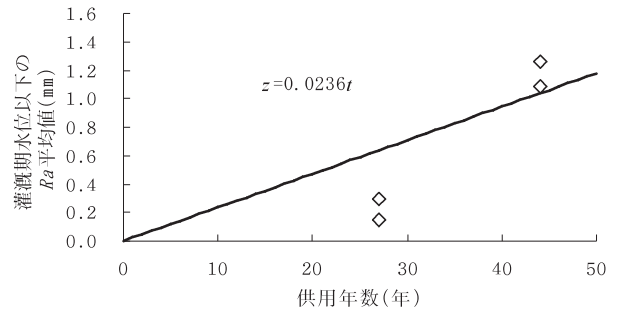


Fig.55 猿ヶ石北部地区の灌漑期水位以下の Ra 平均値と供用年数
 Ra Average below Water level during Irrigation Period and Elapsed Year in Sarugaishi-Hokubu District

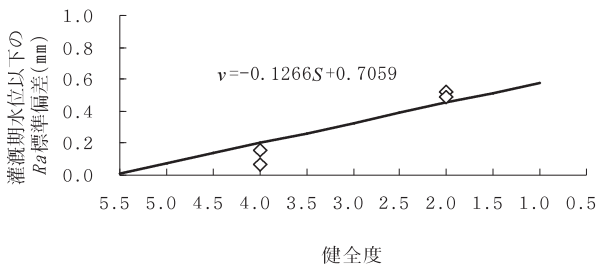


Fig.54 猿ヶ石北部地区の灌漑期水位以下の Ra 標準偏差と健全度
 Ra Standard Deviation below Water level during Irrigation Period and Soundness Index in Sarugaishi-Hokubu District

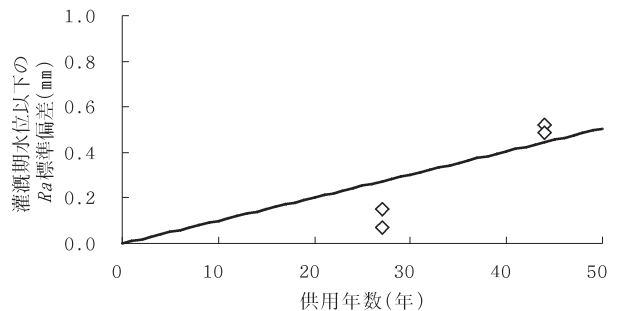


Fig.56 猿ヶ石北部地区の灌漑期水位以下の Ra 標準偏差と供用年数
 Ra Standard Deviation below Water level during Irrigation Period and Elapsed Year in Sarugaishi-Hokubu District

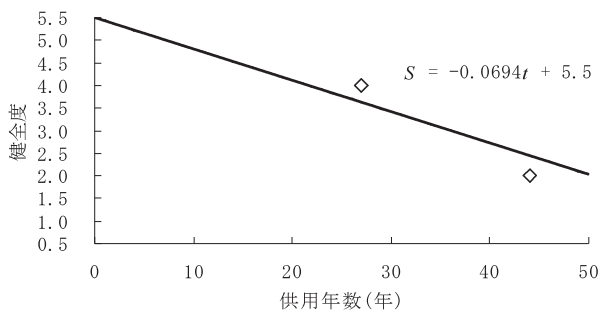


Fig.57 猿ヶ石北部地区の供用年数と健全度の関係
Relationship between Elapsed Year and Soundness
Index in Sarugaishi-Hokubu District

度の分布図によると、小場江堰地区の凍害危険度は1で凍害の予想程度が「ごく軽微」であり、西蒲原地区は凍害のおそれがない零である。

6 まとめ

第VI章で行った西蒲原地区の調査データに基づく、農業用水路壁面の摩耗による劣化予測結果の他地区への適用の可能性を検討した。

VII. 2では、調査地区の水路壁面の摩耗による劣化進行速度と、凍害危険度に関連があることを仮定し、調査結果に基づいて検証することを示した。

VII. 3では、関東地域の茨城県の小場江堰地区の水路への適用を行った。目視による健全度評価については、供用年数と健全度の1次直線による単一劣化モデルと、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測の双方について、西蒲原地区と同様の劣化傾向を示した。マルコフ連鎖モデルの遷移率は、西蒲原地区と同じ $x=0.12$ であった。算術平均粗さ (Ra) と健全度および供用年数の関係では、水路壁面の灌漑期水位以下の Ra 平均値および Ra 標準偏差と、健全度や供用年数との関係は、西蒲原地区の場合とほぼ同様の傾向を示した。これらから、小場江堰地区の水路壁面の摩耗による劣化進行は、西蒲原地区とほぼ同様の傾向であることを示した。

VII. 4では、東北地域の岩手県の岩手山麓地区の水路への適用を行った。目視による健全度評価について、供用年数と健全度の1次直線による単一劣化モデルと、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測の双方について、西蒲原地区よりも劣化進行が速い傾向があることを示した。マルコフ連鎖モデルの遷移率は、西蒲原地区の $x=0.12$ よりも大きい $x=0.15$ であった。

VII. 5では、東北地域の岩手県の猿ヶ石北部地区の水路への適用を行った。算術平均粗さ (Ra) と健全度および供用年数の関係では、水路壁面の灌漑期水位以下の Ra 平均値および Ra 標準偏差と、健全度や供用年数との関係は、西蒲原地区の場合とほぼ同様の傾向を示した。また、目視による健全度評価については、供用年数と健全度の1次直線による単一劣化モデルについて、西蒲原地区と同様の劣化傾向を示した。これらから、猿ヶ石北

部地区の水路壁面の摩耗による劣化進行は、西蒲原地区とほぼ同様の傾向であることを示した。

西蒲原地区よりも劣化進行が速い岩手山麓地区は、山間部に位置し凍害による被害の危険性が大きい地域である。長谷川・藤原(1988)の凍害危険度の分布図によると、西蒲原地区と小場江堰地区は凍害危険度が零であり凍害のおそれがない。猿ヶ石北部地区は凍害危険度が1であり、凍害の予想程度が「ごく軽微」であるが、岩手山麓地区は凍害危険度が3であり、凍害の予想程度が「やや大きい」である。これから、岩手山麓地区の水路壁面の摩耗進行が他地区よりも速い傾向を示す要因の1つとして、凍害の影響があることが示唆された。

このことから、凍害のおそれがない、または、凍害の予想程度が「ごく軽微」である場合には、水路壁面の摩耗による劣化進行速度はほぼ同じである一方、凍害の予想程度が「やや大きい」場合には、壁面の摩耗による劣化進行速度が速い。すなわち、凍害の危険度が小さい地区においては、第VI章で示した西蒲原地区の水路壁面の摩耗による劣化進行とほぼ同様の傾向を示すことから、西蒲原地区の水路壁面の摩耗による劣化予測結果には、他地区への適用の可能性があると言える。なお、実際に、全国的に展開する際には、当該地区における点検データを収集し、それをを用いて、西蒲原地区の劣化予測結果を補正し、当該地区への適合性を向上させることが必要である。

VIII 結 言

わが国においては、農業水利施設は、第2次世界大戦後の食料増産時代から本格的に全国各地で建設が進められてきた。これらは、農業生産に必要な農業用水を適切に供給するために必須の重要な社会資本である。

農業水利施設は、初期建設後は経年によって、施設が老朽化し、物理的な変状が生じ、施設の有する性能が低下する現象である劣化が進行する。そのため、劣化が進行し施設の有する性能が管理水準以下に低下した場合には、補修や全面更新等の対策が必要となる。

従来は、このような施設の劣化状態の点検手法、その結果に基づく劣化の将来における進行を予測する劣化予測や、補修や全面更新等の対策の実施時期や工法の決定は、技術者の経験と知見によって判断される場合が殆どであり、このような手法は、いわば主観的な判断に基づくものであった。しかし、施設が適切に維持管理され、施設の発揮すべき性能を一定の管理水準以上に維持するためには、より科学的かつ定量的な方法による施設の劣化予測手法の開発が必要である。

また、戦後の高度成長時代に積極的に建設された農業水利施設の相当数が今後順次老朽化する時代を迎えるとともに、平成10年度頃からの公共事業予算の縮減傾向の下で、従来の施設が完全に老朽化してから全面更新す

ることが予算制約上、困難な状況となってきた。そのため、限られた予算制約下で、既存施設を有効活用し、農業水利施設の長寿命化を図り、ライフサイクルコストの低減を図る、新たな戦略的な維持管理手法であるストックマネジメントが導入されてきている。農業水利施設のストックマネジメントにおいても、施設の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測の科学的かつ定量的な手法が必要とされるようになってきている。

このような中、農業水利施設の中でも長大な延長を有し重要な位置を占める農業用水路について、特に、農業用水路として典型的である鉄筋コンクリート製開水路の、特徴的な劣化機構であり、かつ、それによって水路の総合的な劣化を表現することが可能な壁面の摩耗の簡易な点検手法と、その点検結果に基づく劣化予測手法に焦点を当てて研究を行った。

さらに、農業水利施設のストックマネジメントに関連するその他の課題として、経済分析手法としてのライフサイクルコスト計算の留意点や、インフラ会計導入の課題についても整理した。

以下に、各章における研究成果を要約し、本研究の結論とする。

第I章では、本研究の背景について、農業水利施設を取り巻く動向を中心にまとめた。平成10年度以降の公共事業予算の縮減傾向に伴い、平成17年に策定された食料・農業・農村基本計画に、農業水利施設の「既存ストックの有効活用の観点から、農業水利施設等の長寿命化を図り、これらのライフサイクルコストを低減することを通じ、効率的な更新整備や保安全管理を充実する」ことが記述され、その後、試行的に農業水利施設のストックマネジメントが実施されてきた。平成19年には農業水利施設の機能保全の手引きが策定され、農業水利施設のストックマネジメントの実施が本格化した。農業水利施設のストックマネジメントとは、限られた予算制約の下で、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る、新たな戦略的な維持管理手法と言える。また、この場合、従来の施設が老朽化してから事後保全によって全面更新等を実施するのではなく、施設の劣化状態を点検し、その結果に基づき将来の劣化状態を的確に予測し、施設が完全に老朽化する前に予防保全によって補修等を実施するものである。ストックマネジメントにはさまざまな技術的な課題があるが、その中で特に、研究面での取り組みが殆ど実施されていない分野が、施設の簡易で精度の高い劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測であり、このための研究を進めることが肝要である。

農業水利施設の中でも長大な延長を有する農業用水路の劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測が重要であり、特に、鉄筋コンクリート製開水路に特徴的な劣化機構であり、かつ、それによって水路の劣化を総合的に表現することが可能な壁面の摩耗に関する、効率性の観点からの簡易な点検手法とその結果に基づく劣化予測手

法の開発が重要である。

また、農業水利施設のストックマネジメントの実施に当たって検討すべき課題として、ライフサイクルコスト計算の経済分析手法としての留意点、施設の劣化状態や維持補修に必要な毎年度の費用等を会計的手法を用いて金銭的に把握するインフラ会計の導入の課題が重要である。

また、本研究の目的について述べ、続いて論文各章の内容と構成について簡単にまとめた。

第II章では、農業水利施設のストックマネジメントに先行している、道路構造物等の先進的な分野における同様の戦略的な維持管理手法であるアセットマネジメントの動向、および、本研究に関連する道路構造物等の劣化予測を中心とした既往の研究について整理した。

道路構造物等の事後保全ではなく予防保全による適時・適切な維持補修を実施するアセットマネジメントは、米国における老朽化した道路構造物と不足する維持管理予算の影響で生じた1970-80年代の橋梁落下事故等を契機として始まった。わが国においても、同様に初期建設から相当の年数を経過し更新を必要とする道路構造物の増加と、財政難による公共事業費の削減のため、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図るアセットマネジメントが導入されてきている。米国におけるアセットマネジメントの動向、わが国の国レベルでの対応としての国土交通省のアセットマネジメントの取組みと、県レベルでの先進的な取組みを実施している青森県における橋梁アセットマネジメントの取組みについて整理した。

また、本研究において展開しようとしている農業水利施設の劣化予測と関連して、研究が先行している道路構造物等の施設の劣化予測を中心とした既往の研究成果を整理した。

これらを基に、本研究を含めた農業水利施設のストックマネジメントの研究の方向性などについて示した。

第III章では、農業水利施設のストックマネジメント導入の背景、必要性と課題、今後の方向性、および、ストックマネジメントに関連する既往の研究成果のうち、近年の機能診断手法とライフサイクルコスト計算について整理した。また、農業水利施設のストックマネジメントの実施に当たって検討すべき課題として、ライフサイクルコスト計算の経済分析手法としての留意点と、施設の劣化状態と維持補修に必要な毎年度の費用等を会計的手法を用いて金銭的に把握するインフラ会計の導入の課題について整理した。さらに、農業水利施設の維持管理の海外事例として、先進国の豪州と、発展途上国の中央アジア諸国の事例について整理した。

第2次世界大戦後の食料増産時代から本格的に全国で建設が進められてきた農業水利施設は、再建設ベースで約25兆円にもものぼる膨大な社会資本を形成している。今後は、初期建設から相当年数が経過し更新時期を迎え

る施設数が増大していくことが予想される一方で、公共事業費の削減によって、施設の老朽化に伴う維持管理費の増大に対応することが困難となってきた。そのため、従来の事後保全ではなく予防保全によって、適時・適切に維持補修を実施することによって、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図ることが必要となっている。

農業水利施設のストックマネジメントに関する各種技術は開発途上のものであり、今後の更なる研究の推進が求められている。ここで紹介した近年の機能診断手法やライフサイクルコスト計算に関する研究についても、未だ試験的に実施されている状況であり、更なる研究の推進が求められている。

ストックマネジメントにおいて経済分析手法として用いられるライフサイクルコスト計算は、便益を捨象して費用のみを対象とした簡易な経済分析手法であり、その適用における留意点と適用される根拠について明らかにした。

施設の劣化状態と必要な維持管理費等を会計的手法を用いて金銭的に把握するインフラ会計の導入の必要性和課題について明らかにした。

さらに、わが国における農業水利施設のストックマネジメントの適切な実施には、農業水利施設の維持管理に関する海外事例を収集し参考にすることも必要であることから、わが国では殆ど把握されていない、先進国の豪州と、発展途上国の中央アジア諸国の事例を整理し、わが国の農業水利施設のストックマネジメントの今後のあり方のための参考とした。

第IV章では、長大な延長を有する農業用水路である鉄筋コンクリート製開水路の各種劣化機構と、それに関連する研究について整理した。農業用水路の各種劣化機構に関する既往の研究事例は少ない。これは、これまでは農業用水路がほぼ完全に劣化または崩壊し、農業用水路が果たすべき性能を十分に発揮できなくなった場合に、事後保全によって補修・補強または全面更新する場合が多かったためと考えられる。

また、これまでの水路の劣化機構に関する既往の研究は、コンクリート構造物としての供試体を用いた室内実験が主であり、現場の実構造物の初期建設後の経年による劣化を対象としたものは殆どない。さらに、実験結果と現場の実構造物の劣化進行過程の間の整合性には問題があることも指摘されている。

農業用水路の劣化要因となる劣化機構を分類し、農業用水路の各々の劣化機構に関する既往の研究成果を整理した。具体的には、壁面の摩耗、継目の劣化、ひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食について整理した。また、農業用水路の各劣化機構の特徴について整理した。農業用水路における劣化機構の中で、ひび割れ、凍害、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的侵食は、ある特定の地域、環境条件や時期に

おいて限定的に発生する劣化現象であると考えられる。したがって、農業用水路の多くの場合に見られる劣化機構としては、壁面の摩耗と継目の劣化があることを示した。また、継目の劣化は、継目の止水板によって漏水を防止しているが、止水板の劣化を目視によって判断できず、漏水が生じた後に事後補修で対応する場合は殆どである。そのため、特に、壁面の摩耗が、目視もしくは簡易な器具を用いた点検が可能で、かつ、農業用水路に特徴的な劣化予測を必要とする劣化機構であることを示した。また、壁面の摩耗による劣化予測を行うことによって、水路全体の総合的な劣化予測が可能であることを示した。

第V章においては、農業用水路の劣化機構として特徴的な壁面の摩耗による劣化進行をどのように評価し、壁面の摩耗の進行と水路の有すべき性能の低下の関係を明確にし、壁面の摩耗の進行によって低下した性能をどのような対策によって回復させるかについて整理した。

ストックマネジメントに対応した現場の実構造物である農業用水路の劣化を予測する手法としては、外観の変状を中心として、供用年数を変数とする劣化進行を予測する手法が現時点では有効かつ主なものとなることを示した。

壁面の摩耗による水路の経年による劣化の評価については、性能照査手法が確立されていない現状においては、実用性の高い、外観の変状によるグレーディングに基づく評価及び判定を、性能照査に基づく評価及び判定に代用することが現実的である。そのため、水路壁面の摩耗による外観の変状のグレーディングを劣化過程と健全度によって表現する手法について整理した。劣化過程は、施設の劣化の状態をその劣化進行の外観の変状に応じて5段階のグレーディングに分類するものであり、潜伏期、進展期、顕在期前期、顕在期後期、劣化期に分類した。健全度は、施設の劣化状態を数値で表現することによって示す11段階の複数のグレーディングであり、5.5～0.5の間の0.5刻みの数値で表現した。

また、水路壁面の摩耗による外観の変状と水路の有する性能の低下の関係について、既往の研究成果と現地調査の結果に基づいて明らかにした。粗度係数の経年による低下は小さく、設計値内に収まっているため、水理性能への影響は小さい。劣化期（健全度1.0）においては、鉄筋の引張応力度が設計値を超えるため、構造性能に問題が生じる。現地調査の結果から、壁面の摩耗は進展期（健全度4.0）の場合においても、壁面に隣接する継目からの漏水が生じる割合が無視できず、何らかの対策が必要となるため、水利用性能への影響は大きい。現地調査の結果から、地震による被害は極めて少ないため、社会的安定性能への影響は小さい。

さらに、水路壁面の摩耗によって低下した性能を回復させるための補修等の対策について、構造物の外観の変状のグレードを基準として対策を選定する方法を示し

た。

第Ⅵ章においては、農業用水路に特徴的な劣化機構の1つである水路壁面の摩耗について、北陸地域の新潟県の西蒲原地区の供用年数の異なる水路を用いて、簡易な点検手法とその点検データを用いた劣化予測手法を提案した。

目視による健全度評価基準に基づく点検データを用いて、水路壁面の摩耗による劣化進行を、単一劣化モデルとマルコフ連鎖モデルを用いて予測する手法を提案した。

単一劣化モデルでは、壁面の摩耗による劣化については、健全度の低下を供用年数の1次直線で推定することが可能であることを示した。このことから、健全度は定量的な指標であると言える。

マルコフ連鎖モデルによる劣化予測手法については、次のようにまとめることができる。

①調査実施地区の点検データに適合するマルコフ連鎖モデルを設定するために、単一劣化モデルにおいて検証された、健全度と供用年数の関係が1次直線で示されたことを用いて、各健全度間の遷移率 x が一定であるモデルを適用した。これによって、同じ時期に建設された同一水路の異なるバレルの、健全度のピークとばらつきを適切に表現できることを示した。

②水路壁面の摩耗にマルコフ連鎖モデルを適用し、調査を実施した各水路に適用可能なマルコフ遷移率を算定した。これらの供用年数の異なる水路において、供用年数に関係なくほぼ同じ遷移率が適用できることを示した。これによって、供用年数の異なる水路の点検データを用いて、遷移率の妥当性の検証が可能となった。

③本マルコフ連鎖モデルの、単一劣化モデルの1次直線による劣化予測式との適合性が高いことを示した。

農業用水路は長大な延長を有するため、目視による各バレルの健全度評価が点検の主体となるが、点検実施者の主観的な評価となるため、同じ劣化状態の水路でも点検結果に誤差が生じる可能性がある。そのため、摩耗による水路の壁面の凹凸を、型取りゲージを用いて計測し、算術平均粗さ (Ra) を用いて数値化し定量的に評価する手法を提案した。この定量的な算術平均粗さ (Ra) と健全度には1次直線で表現できる関係があることを示した。これによって、点検実施者が、実際に目視による健全度評価を実施する前に、算術平均粗さ (Ra) と健全度の関係を習得することによって、目視による健全度評価の主観的な誤差を最小化することが可能となることを示した。

算術平均粗さ (Ra) を用いた水路壁面の摩耗による劣化進行の検討結果は、次のようにまとめることができる。

①水路の摩耗による壁面の凹凸は、型取りゲージを用いて数値化し、算術平均粗さ (Ra) で定量的に表現できる。

②摩耗による壁面の凹凸の健全度評価基準に基づく評価と、灌漑期水位以下の Ra の平均値及び標準偏差には、1次直線で示される関係がある。その結果、摩耗による壁面の凹凸の健全度による定性的な評価を、灌漑期水位以下の Ra の平均値で定量的に表現できる。

③摩耗による壁面の凹凸の灌漑期水位以下の Ra の平均値と供用年数には、1次直線で示される関係がある。また、 Ra の標準偏差と供用年数には、供用年数の増加によって Ra の標準偏差も増加する傾向がある。このことから、初期建設時からセメントペーストの流出が開始するまでに要する期間、その後にセメントペーストが流出し細骨材の流出が開始するまでに要する期間、その後に細骨材が流出し粗骨材が表面に見え始めるまでに要する期間、その後に粗骨材の粒子が半分程度露出するまでに要する期間、その後に粗骨材が剥離する期間は、ほぼ同じ長さと言える。

④灌漑期水位以下の Ra の平均値の有する意味について整理した。灌漑期水位以下の Ra の平均値が1.33mmの場合、劣化期 (健全度1.0) に相当するが、推定される粗度係数は $n=0.016$ であり、設計基準の範囲内であることから、水理性能に与える影響は小さい。灌漑期水位以下の Ra の平均値が1.33mmの場合、劣化期 (健全度1.0) に相当し、推定される初期断面からの摩耗深さは22mmとなり、鉄筋の引張応力度が設計許容応力度を越えるため構造性能に支障が生じる。壁面の隣接する継目からの漏水が生じる割合は、壁面の摩耗の進行が進展期 (健全度4.0) で灌漑期水位以下の Ra の平均値が0.45mmの場合に既に0.20であり、その後の健全度の低下によって、さらに漏水する継目の割合が増加し、水利用性能に影響を与える。社会的安定性能については、構造性能に支障が生じる劣化期 (健全度1.0) では、同様に支障が生じると言える。灌漑期水位以下の Ra の平均値を用いることによって、これらの水路の有する諸性能に関連する指標との関連を明らかにした。すなわち、灌漑期水位以下の Ra の平均値は、水路壁面の摩耗の進行を表現する指標であるとともに、水路の有する諸性能の低下をも表現可能な定量的な指標であると言える。

⑤定量的な算術平均粗さ (Ra) と健全度には1次直線で表現できる関係があることから、点検実施者が、この関係を習得することによって、目視による健全度評価の誤差を最小化することが可能となる。

第Ⅶ章においては、第Ⅵ章で行った西蒲原地区の調査データに基づく、水路壁面の摩耗による劣化予測結果の、他地区への適用の可能性を検討した。関東地域の茨城県の小場江堰地区、東北地域の岩手県の岩手山麓地区および猿ヶ石北部地区に適用した。

小場江堰地区では、目視による健全度評価については、供用年数と健全度の1次直線による劣化予測式と、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測の双方について、西蒲

原地区と同様の劣化傾向を示した。算術平均粗さ (Ra) と健全度および供用年数の関係についても、西蒲原地区の場合とほぼ同様の傾向を示した。これらから、小場江堰地区の水路壁面の摩耗による劣化進行は、西蒲原地区とほぼ同様の傾向を示すことが明らかとなった。

岩手山麓地区では、目視による健全度評価について、供用年数と健全度の1次直線の劣化予測式と、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測の双方について、西蒲原地区よりも劣化進行が速い傾向があることを示した。

猿ヶ石北部地区では、目視による健全度評価については、供用年数と健全度の1次直線による劣化予測式について、西蒲原地区と同様の劣化傾向を示した。算術平均粗さ (Ra) と健全度および供用年数の関係においても、西蒲原地区の場合とほぼ同様の傾向を示した。これらから、猿ヶ石北部地区の水路の壁面の摩耗による劣化進行は、西蒲原地区とほぼ同様の傾向を示すことが明らかとなった。

西蒲原地区よりも劣化進行が速い岩手山麓地区は、山間部に位置し凍害による被害が大きい地域である。長谷川・藤原(1988)の凍害危険度の分布図によると、西蒲原地区と小場江堰地区は凍害危険度は危険性がない零であり、猿ヶ石北部地区は凍害危険度が「ごく軽微」の1であるが、岩手山麓地区は凍害危険度が「やや大きい」の3である。これから、岩手山麓地区の水路の壁面の摩耗進行が他地区よりも速い傾向を示す要因の1つとして、凍害の影響があることが考えられることを示した。

このことから、凍害危険度が小さい場合には、西蒲原地区の劣化予測結果に、他地区への適用の可能性があることを示した。なお、西蒲原地区の劣化予測結果を他地区に適用する場合には、当該地区の点検データを収集し、その結果を基に、当該地区に適應するように補正を行うことが必要であると考えられる。

これらの結論を総括し、取りまとめると以下の通りである。

- ①農業水利施設は経年とともに老朽化によって劣化が進行するため、科学的かつ定量的な手法による、劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測手法の開発が求められている。これは、近年、導入されてきている農業水利施設のストックマネジメントにおいても必要とされている重要な課題である。
- ②農業水利施設のストックマネジメントは本格的に開始されたばかりであり、同様の戦略的な維持管理手法である道路構造物等のアセットマネジメントの方が先行しており、施設の劣化予測に関する研究も積極的に進められている。その一方で、農業水利施設のストックマネジメントにおいては、施設の簡易で精度の高い劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測に関する研究が殆ど行われていない。
- ③農業水利施設の中でも長大な延長を有する農業用水路である鉄筋コンクリート製開水路に特徴的な劣化機構

として、壁面の摩耗があり、それによって水路の総合的な劣化を表現することが可能であるとともに、特に劣化予測を必要とする劣化機構として、壁面の摩耗が特徴的であることを示した。

- ④水路壁面の摩耗の進行と水路の有する性能の低下の関係について、水理性能、構造性能、水利用性能、社会的安定性能の各々について明らかにした。
- ⑤農業用水路に特徴的な劣化機構である壁面の摩耗について、西蒲原地区の現地調査データを用いて、目視による健全度評価に基づく劣化予測を供用年数の1次直線で示す単一劣化モデルと、マルコフ連鎖モデルで表現する手法を提案するとともに、水路壁面の摩耗による凹凸を算術平均粗さ (Ra) で定量的に表現する手法を示した。算術平均粗さ (Ra) の数値の持つ意味と、推定される粗度係数や摩耗深さ、継目から漏水の発生する割合との関係や、水路の有する諸性能との関係を明らかにした。
- ⑥西蒲原地区の現地調査データに基づく劣化予測結果の全国的に展開可能な普遍性を、小場江堰地区、岩手山麓地区、猿ヶ石北部地区の調査データを用いて検証した。その結果、凍害危険度が小さい地区では、西蒲原地区の劣化予測結果に全国的に展開可能な普遍性があることを示した。

限られた予算制約下で、農業水利施設の適切な維持管理を実施していくためには、特に、効率性の観点から、簡易な点検手法とその点検結果に基づく施設の劣化予測手法の開発が重要である。

現状では、劣化予測に利用可能な点検データの収集が殆ど行われていないため、本研究では、施設の劣化状態の点検手法の提案とそれに基づく点検データの収集、その点検結果に基づく劣化予測手法の提案を行った。しかし、劣化予測手法のさらなる精度向上のためには、時系列データを含む点検データのさらなる蓄積と、それに基づく劣化予測手法の精度向上を、継続的に実施していくことが必要である。

Appendix ライフサイクルコストの試算

本研究においては、農業用水路のストックマネジメントにおける劣化状態の点検とその結果に基づく劣化予測に焦点を当て、研究を行った。農業用水路等の農業水利施設のストックマネジメントの主な目的は、限られた予算制約下で、施設の適時・適切な維持・補修等を実施することによって、施設の長寿命化とライフサイクルコストを低減することである。また、第Ⅲ章で示したように、農業水利施設のストックマネジメントの流れは、次のように整理することができる。すなわち、①ライフサイクルコスト低減に向けた設計・施工、②点検による施設の劣化状態の把握、③施設の将来における劣化状態の予測、④補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択

肢の検討, ⑤複数の選択肢のライフサイクルコストの比較, ⑥最適な全体計画の策定。そのため, 本研究において得られた, 西蒲原地区における劣化予測結果に基づいて, 補修等の各種対策工法と実施時期の複数の選択肢を設定し, それらのライフサイクルコストの試算及び比較を行った。

なお, ここでは, ライフサイクルコストとして, 補修・更新費用のみを計上し, その他の維持管理費等は除外して単純化している。また, 第三章で示したように, 本来, 経済分析を行う場合には, 費用だけではなく便益をも考慮すべきであるが, ここでは, 便益は, どのような補修・更新の対策工法を選択した場合においても, 一定であると仮定しているため, コストのみを評価の対象として単純化している。現実には, 経年による劣化が進行し, 漏水等の水路の有する性能の低下が発現した場合には, それによる便益の低下をも考慮に入れて検討することが必要である。そのため, ここで示したライフサイクルコストの試算は, あくまで単純化した場合の計算結果を参考事例として示すものであって, そのまま, 現実の農業用水路のストックマネジメントに適用可能なものではないことに留意することが必要である。

1 単一劣化モデルによるライフサイクルコストの試算

第VI章で示したように, 西蒲原地区における, 農業用水路の壁面の摩耗に関する健全度と供用年数の関係は, Fig.58 及び式 (26) で示すことができる。ここで, S は健全度, t は供用年数である。 S 軸の切片を 5.5 としているのは, 初期建設時の健全度を 5.5 と想定しているためである。

$$S = -0.0694t + 5.5 \quad (R^2 = 0.641) \quad (26)$$

この単一劣化モデルによる劣化予測式に基づいて, 水路壁面の摩耗の健全度が, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0 に達した場合に, 各々, その健全度に適した補修や全面更新の対策工法を実施する対策シナリオを設定した (Table 15)。健全度 1.0 の場合は, 全面更新となるが, その他の健全度の場合は, その健全度に適した補修工法を実施すること

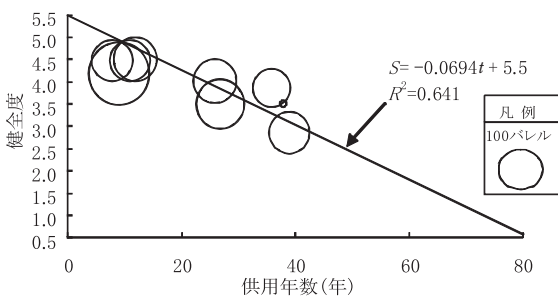


Fig.58 単一劣化モデルによる劣化予測
Deterioration Forecast with Linear Deterioration Function

とする。また, 補修や全面更新による健全度の回復レベルは, 全面更新の場合は初期建設時と同等の 5.5 とし, その他の補修の場合は 5.0 とする。補修や全面更新に要する費用は, 業者からの聞き取りによるもので, 水路壁面の単位面積当たり (円 / m²) であり, ライフサイクルコストの計算も, この単位面積当たり (円 / m²) で行う。

この単一劣化モデルによる初期建設後の補修・更新サイクルは, Fig.59 のようになる。ここでは, 補修や全面更新実施後の再劣化の速度は, 初期建設後の式 (26) の傾きと同じと設定している。初期建設時から供用 100 年までについて考えると, 補修や全面更新を実施する健全度によって, 補修や全面更新を実施する回数が異なることがわかる。すなわち, 健全度が比較的良好な場合に予防保全によって安価な補修を実施する場合の方が補修を実施する回数が多くなり, 健全度が比較的悪い場合により高価な補修や全面更新を実施する場合の方が補修や全面更新を実施する回数が少なくなる。

この補修・更新サイクルに基づいて, 初期建設から供用 100 年までの間の, 水路壁面の単位面積当たり (円 / m²) のライフサイクルコストの累積額を計算した。ここでは, ライフサイクルコストとしては, 補修または全面更新に要する費用のみを計上した。割引率を用いない場合すなわち割引率 0.0% の場合 (Fig.60) と, 割引率 4.0% の場合 (Fig.61) を示す。

割引率を用いない場合すなわち割引率 0.0% では, 補修や全面更新に要する費用を, 補修や全面更新を実施す

Table 15 単一劣化モデルによる対策シナリオ
Measures Scenario with Linear Deterioration Function

健全度	対策工	健全度の回復レベル	対策費 (円 / m ²)
4.0	壁面清掃 + 表面被覆	5.0	10,200
3.0	断面修復 (深さ 10mm) + 表面被覆	5.0	24,200
2.0	断面修復 (深さ 20mm) + 防錆 + 表面被覆	5.0	34,100
1.0	全面更新	5.5	107,900

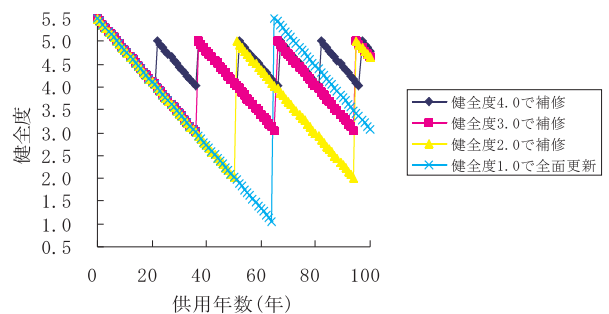


Fig.59 単一劣化モデルによる補修・更新サイクル
Cycle of Rehabilitation and Renewal with Linear Deterioration Function

る場合に単純に累計していくこととなる。水路壁面の摩耗による劣化の進行が比較的小さく健全度が大きい場合には、1回当たりの補修に要する費用は小さいが、補修を実施する回数が多いため、補修の実施回数に応じて累積されたライフサイクルコストが増加していく。健全度4.0, 3.0, 2.0で補修を実施する場合には、補修1回当たりの補修費は健全度4.0, 3.0, 2.0の順で小さい方から大きくなるが、補修を実施する回数は逆に健全度4.0, 3.0, 2.0の順で多い方から少ない方になり、各健全度に対応した対策シナリオ間における累積されるライフサイクルコストには大きな相違はない。しかし、初期建設後の計算期間を何年で計算するかによって、これらの累積されたライフサイクルコストの順位に逆転が生じる。すなわち、計算期間がどのような長さの場合においても、健全度4.0で最も低コストで補修する場合が最もライフサイクルコストが小さくなるとは限らない。そのため、各健全度に相当する補修費の算出とともに、計算期間を何年で計算

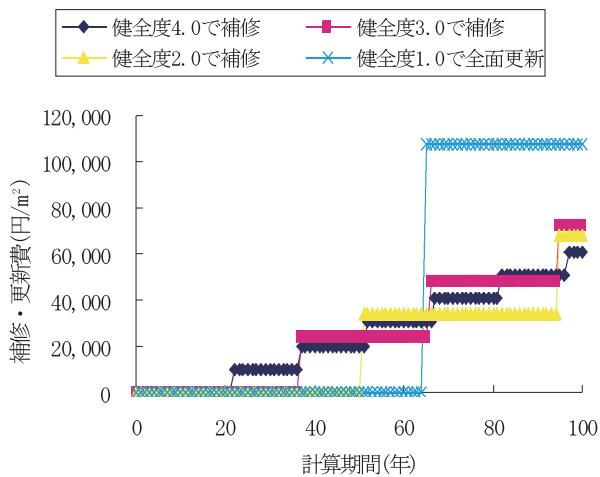


Fig.60 割引率0.0%の場合のライフサイクルコスト累積額
Accumulated Life-Cycle Costs with Discount Rate of 0.0%

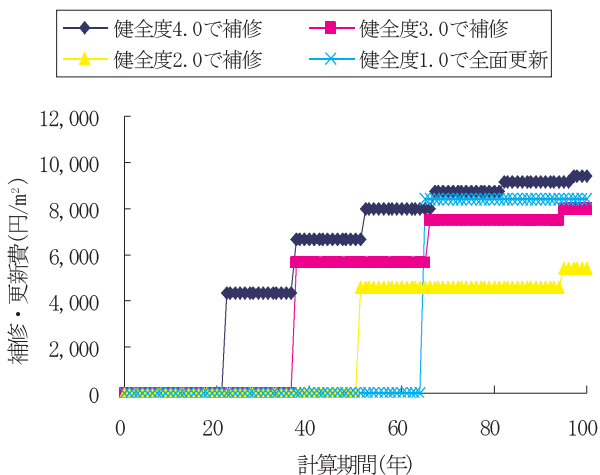


Fig.61 割引率4.0%の場合のライフサイクルコスト累積額
Accumulated Life-Cycle Costs with Discount Rate of 4.0%

するかが、累積されたライフサイクルコストの大小を判断する場合に重要な意味を持つ。一方、健全度1.0で全面更新する場合には、全面更新を実施する回数が少ないが、1回当たりの全面更新に要する費用が、その他の健全度で補修を実施する場合に比べて格段に大きい。しかし、この場合も、計算期間を何年で計算するかによって、他の健全度において補修を実施する場合と、累積されたライフサイクルコストの大小に逆転が生じる。このことから、補修や全面更新に要する費用の算出とともに、ライフサイクルコストを計算する期間を何年に設定するかが、複数の補修や全面更新といった対策工法とその実施時期を決定するために、それらの複数の選択肢のライフサイクルコストを比較する場合に重要である。

次に割引率4.0%を用いた場合について考える。ここで、割引率4.0%を用いているのは、農業水利施設を対象とした公共事業である土地改良事業を実施する際に行う事業の経済効果分析においては割引率4.0%を用いることとなっていること（農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課, 2007）と、それに基づいて、農業水利施設のストックマネジメントにおいてライフサイクルコストを計算する際には割引率4.0%を用いることとなっていること（農業土木事業協会, 2007）に依る。割引率を用いると、近い将来に低コストで補修を実施する場合よりも、遠い将来に高コストの補修や全面更新を実施する方が、累積されるライフサイクルコストが小さくなることがある。実際に、短期間に頻繁に低コストで補修を実施する場合である健全度4.0で補修する場合が、累積するライフサイクルコストが最も大きくなっている。その一方で、最も高コストである健全度1.0で全面更新する場合は、初期建設から相当年数が達した場合に全面更新を実施することとなるため、割引率を用いたライフサイクルコストは小さくなる。

このように、複数の補修や全面更新の工法や実施時期の選択肢のライフサイクルコストを比較し、最もライフサイクルコストが小さい選択肢を最も経済的な対策シナリオとして選定する場合には、ライフサイクルコストの計算期間と割引率の設定が、複数のライフサイクルコストの大小に逆転を生じる要因となることから、これらをどのように決定するかが重要となる。

2 マルコフ連鎖モデルによるライフサイクルコストの試算

第VI章で示したように、西蒲原地区において、用いたマルコフ連鎖モデルは式(27)で示すことができる。ここで、 x は遷移率、 t は供用年数である。 $P_{5.0} \sim P_{0.5}$ は、各々、健全度が5.0～0.5のバレルの割合を示している。西蒲原地区における目視による健全度評価に基づいて計算された遷移率は $x=0.12$ である。

$$\begin{matrix}
 \text{健全度の割合} \\
 \begin{pmatrix} P_{5.0} \\ P_{4.5} \\ P_{4.0} \\ P_{3.5} \\ P_{3.0} \\ P_{2.5} \\ P_{2.0} \\ P_{1.5} \\ P_{1.0} \\ P_{0.5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 x:\text{遷移率}
 \end{matrix} \tag{27}$$

このマルコフ連鎖モデルにおける遷移率 $x=0.12$ による劣化予測に基づいて、水路壁面の摩耗の健全度の割合について初期建設後の経年による変化を Fig.62 に示す。

マルコフ連鎖モデルを用いて、複数の補修や全面更新といった対策工法とその実施時期をライフサイクルコストを比較して検討する場合には、まず、ある健全度以下のバレルの割合がどの程度になった場合に、補修や全面更新を実施するかを設定することが必要である。Fig.62 において、健全度 2.0 以下の割合が 0.25 になるのが供用 43 年である。実際の現場水路においては、粗骨材が露出した健全度 2.0 程度まで水路壁面の摩耗が進行した場合には補修等の対策が実施される場合が多く、また、初期建設から補修等が実施されずに供用 40 年を超える水路も少ない。そのため、ここでは、ある健全度以下のバレルの割合が 0.25 に達した場合に、その健全度に対応した補修や全面更新といった対策を実施することとする。そのため、健全度 4.0, 3.0, 2.0 の割合が各々 0.25 に達した場合に、その健全度に適した補修や全面更新の対策工法を実施する対策シナリオを設定した (Table 16)。健全度 1.0 の場合は、全面更新となるが、その他の健全度の場合は、その健全度に適した補修工法を実施することとし、その対策工法は全てのバレルにおいて実施するものとする。また、補修や全面更新による健全度の回復レベルは、マルコフ連鎖モデルの場合は式 (27) に示すように健全度 5.0 から開始しているため、初期建設時と同様の 5.0 とする。補修や全面更新に要する費用は、単一劣化モデルの場合と同様とし、水路壁面の単位面積当

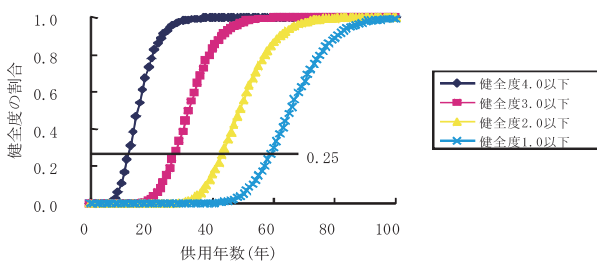


Fig.62 マルコフ連鎖モデルの遷移率 $x=0.12$ の場合の健全度の割合
Ratio of Soundness Index with Transition rate of 0.12 of Markovian Transition Probability

Table 16 マルコフ連鎖モデルによる対策シナリオ Measures Scenario with Markovian Transition Probability

健全度	対策工	健全度の回復レベル	対策費 (円/m ²)
4.0	壁面清掃 + 表面被覆	5.0	10,200
3.0	断面修復 (深さ 10mm) + 表面被覆	5.0	24,200
2.0	断面修復 (深さ 20mm) + 防錆 + 表面被覆	5.0	34,100
1.0	全面更新	5.0	107,900

各健全度以下の割合が 25% に達した場合に、対策工法を実施。

たり (円/m²) であり、ライフサイクルコストの計算も、この単位面積当たり (円/m²) で行う。

このマルコフ連鎖モデルによる初期建設後の補修・更新サイクルは、Fig.63 のようになる。初期建設時から供用 100 年までについて考えると、補修や全面更新を実施する健全度によって、補修や全面更新を実施する回数が異なることがわかる。すなわち、健全度が比較的良好な場合に予防保全によって安価な補修を実施する場合の方が補修を実施する回数が多くなるが、健全度が比較的悪い場合により高価な補修や全面更新を実施する場合の方が補修や全面更新を実施する回数が少なくなる。

この補修・更新サイクルに基づいて、初期建設から供用 100 年までの間の、水路壁面の単位面積当たり (円/m²) のライフサイクルコストの累積額を計算した。ここでは、ライフサイクルコストとしては、補修または全面更新に要する費用のみを計上した。割引率を用いない場合すなわち割引率 0.0% の場合 (Fig.64) と、割引率 4.0% の場合 (Fig.65) を示す。

単一劣化モデルの場合と同様に、割引率を用いない場合すなわち割引率 0.0% の場合では、補修や全面更新に要する費用を、補修や全面更新を実施する場合に単純に累計していくこととなる。水路壁面の摩耗による劣化の進行が比較的小さく健全度が大きい場合には、1 回当たりの補修に要する費用は小さいが、補修を実施する回数が多いため、補修の実施回数に応じて累積されたライフサイクルコストが増加していく。健全度 4.0, 3.0, 2.0 で補修を実施する場合には、補修 1 回当たりの補修費は健全度 4.0, 3.0, 2.0 の順で小さい方から大きくなるが、補修を実施する回数は逆に健全度 4.0, 3.0, 2.0 の順で多い方から少ない方になり、累積されるライフサイクルコストには大きな相違はない。しかし、初期建設後の計算期間を何年で計算するかによって、これらの累積されたライフサイクルコストの順位に逆転が生じる。すなわち、計算期間がどのような長さの場合においても、健全度 4.0 で最も低コストで補修する場合が最もライフサイクルコストが小さくなるとは限らない。そのため、各健全度に相当する補修費の算出とともに、計算期間を何年で計算するかが、累積されたライフサイクルコストの大小を判断する場合に重要な意味を持つ。一方、健全度 1.0 で全

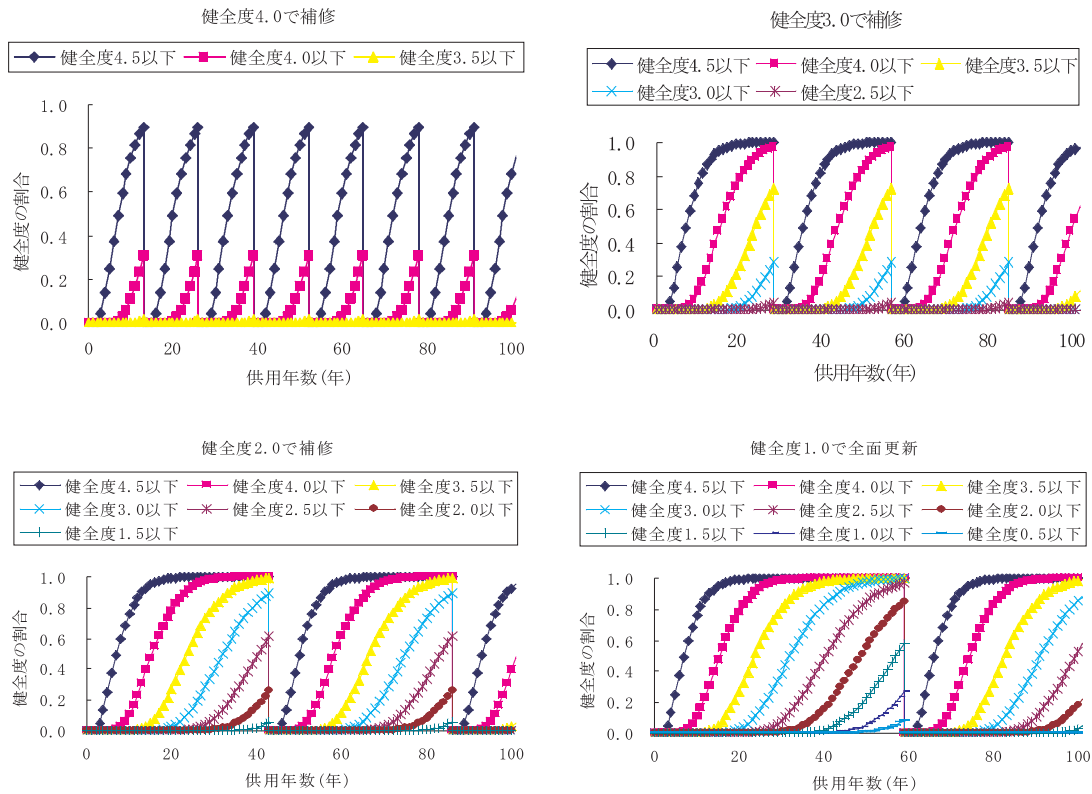


Fig.63 マルコフ連鎖モデルによる補修・更新サイクル
Cycle of Rehabilitation and Renewal with Markovian Transition Probability

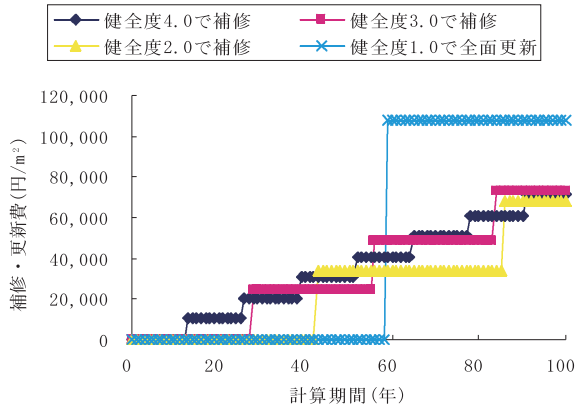


Fig.64 割引率0.0%の場合のライフサイクルコスト累積額
Accumulated Life-Cycle Costs with Discount Rate of 0.0%

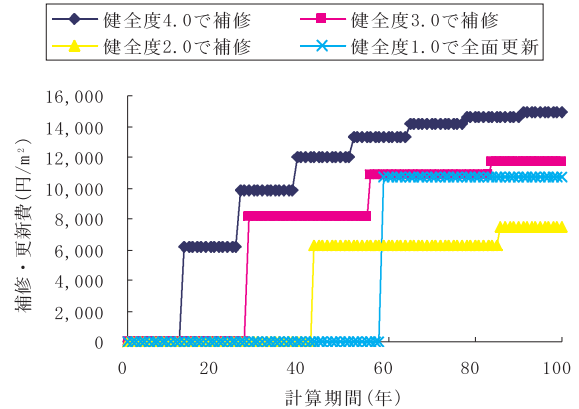


Fig.65 割引率4.0%の場合のライフサイクルコスト累積額
Accumulated Life-Cycle Costs with Discount Rate of 4.0%

面更新する場合には、全面更新を実施する回数が少ないが、1回当たりの全面更新に要する費用が、その他の健全度で補修を実施する場合に比べて格段に大きい。しかし、この場合も、計算期間を何年で計算するかによって、他の健全度において補修を実施する場合と、累積されたライフサイクルコストの大小に逆転が生じる。このことから、補修や全面更新に要する費用の算出とともに、ライフサイクルコストを計算する期間を何年に設定するかが、複数の補修や全面更新といった対策工法とその実施時期を決定するために、それらの複数の選択肢のライフサイクルコストを比較する場合に重要である。

次に割引率4.0%を用いた場合について考える。ここで、割引率4.0%を用いていた理由は、単一劣化モデルの場合と同様である。割引率を用いると、近い将来に低コストで補修を実施する場合よりも、遠い将来に高コストの補修や全面更新を実施する方が、累積されるライフサイクルコストが小さくなる可能性がある。実際に、短期間に頻繁に低コストで補修を実施する場合である健全度4.0で補修する場合が、累積するライフサイクルコストが最も大きくなっている。その一方で、最も高コストである健全度1.0で全面更新する場合は、初期建設から相当年数が達した場合に全面更新を実施することとなるた

め、割引率を用いたライフサイクルコストは小さくなる。

このように、マルコフ連鎖モデルの場合も、単一劣化モデルの場合と同様に、複数の補修や全面更新の工法や実施時期の選択肢のライフサイクルコストを比較し、最もライフサイクルコストが小さい選択肢を最も経済的な対策シナリオとして選定する場合には、ライフサイクルコストの計算期間と割引率の設定が、複数のライフサイクルコストの大小に逆転を生じる要因となることから、これらをどのように決定するかが重要となる。

3 まとめ

本研究において得られた、西蒲原地区における水路壁面の摩耗による劣化予測結果に基づいて、ライフサイクルコストの試算を行った。なお、ここで行ったライフサイクルコストの試算は、さまざまな条件を単純化して行ったものであり、現場における実際の運用においては、より総合的な視点からの試算を行うことが必要であり、本試算結果が、そのまま現場に適用可能なものではないことに留意することが必要である。

単一劣化モデルにおいては、劣化の平均的な進行がある健全度に達した場合の補修や全面更新を行う対策シナリオを設定し、各シナリオのライフサイクルコストを計算した。ライフサイクルコストの計算結果においては、対策シナリオに用いる補修や全面更新の単価、計算期間、割引率の設定によって、各対策シナリオ間のライフサイクルコストの大小に逆転が生じることから、これらの設定が重要である。

マルコフ連鎖モデルにおいては、ある健全度以下のバレルの割合が0.25に達した場合の補修や全面更新を行う対策シナリオを設定し、各シナリオのライフサイクルコストを計算した。マルコフ連鎖モデルにおいても、単一劣化モデルの場合と同様に、ライフサイクルコストの計算結果においては、対策シナリオに用いる補修や全面更新の単価、計算期間、割引率の設定によって、各対策シナリオ間のライフサイクルコストの大小に逆転が生じることから、これらの設定が重要である。また、マルコフ連鎖モデルにおいては、ある健全度以下のバレルの割合が具体的にいくりに達した場合に、その健全度に応じた補修や全面更新を行う対策シナリオを設定するかも重要である。

本研究においては、主に、水路壁面の摩耗による劣化状態の点検手法とその結果に基づく劣化予測を中心に研究を行った。しかし、農業用水路等の農業水利施設のストックマネジメントを適切に実施していくためには、劣化予測に基づく、補修や全面更新といった複数の対策シナリオの設定、それらのライフサイクルコストの計算と比較、それに基づく最適な対策シナリオの選定を実施していくことが重要である。

参考文献

- 1) 阿部允 (2006): 実践土木のアセットマネジメント, 「やりくり」で防ぐ社会資本の荒廃, 日経 BP 社, pp.20-25.
- 2) 青木一也・山本浩司・小林潔司 (2005a): 劣化予測のためのハザードモデルの検討, 土木学会論文集 No. 791/VI-67, pp.111-124.
- 3) 青木一也・山本浩司・津田尚胤・小林潔司 (2005b): 多段階ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集 No. 798/VI-68, pp.125-136.
- 4) 青森県 (2005a): 青森県橋梁アセットマネジメントシステム開発コンソーシアム「50年間投資計画シミュレーション結果等報告書(概要版)」
- 5) 青森県 (2005b): これから始めるアセットマネジメント 第2回青森県の橋①, 日経コンストラクション 384号, pp.69-71.
- 6) 青森県 (2005c): これから始めるアセットマネジメント 第2回青森県の橋②, 日経コンストラクション 386号, pp.65-67.
- 7) 青森県 (2006): 青森県橋梁アセットマネジメントアクションプラン
- 8) 蘭嘉宜 (2007): 農業水利施設の劣化状況の分析とライフサイクルコストを考慮した補修計画, 農村工学研究所技報 第206号, pp.141-149.
- 9) Asian Development Bank (2001): *Report and Recommendation of the President to the Board of Directors on a Proposed Loan and Technical Assistance Grant to the Republic of Uzbekistan for the Ak Altin Agricultural Development Project*
- 10) Boarman A. E., Greenberg D. H., Vining A. R., Weimer D. L., 岸本光永監訳 (2004): 費用・便益分析, 公共プロジェクトの評価手法の理論と実践, 萩原印刷, 673p.
- 11) Cambridge Systematics, Inc. (2005): *Pontis Release 4.4 Technical Manual*
- 12) 土木学会 (1995): コンクリート構造物の維持管理指針(案), コンクリートライブラリー 81
- 13) 土木学会 (2001a): コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.1-182.
- 14) 土木学会 (2001b): 軟岩の調査・試験の指針(案) - 1991年版 -, pp.56-60.
- 15) 土木学会 (2005): アセットマネジメント導入への挑戦, 技報堂出版
- 16) 土木学会 (2008): 2007年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.1-228.
- 17) 江尻良・西口志浩・小林潔司 (2004): インフラストラクチャ会計の課題と展望, 土木学会論文集 No.770/Vi-64, pp.15-32.
- 18) 江尻良 (2006): インフラ会計(2) - 政府財務諸表の改革動向とインフラ資産 -, サマースクール2006「建設マネジメントを考える」テキスト, pp.81-92.
- 19) 筆谷勇 (1998): 公会計原則の解説, 自治体外部監査にお

- ける実務指針の検討, 中央経済社, 319p.
- 20) 藤田宗久・石田暢士・中島賢二郎 (2005) : 凍上圧を考慮したコンクリート開水路の部分安全係数の設定, JIID 研究レポート No.26, pp.21-26.
- 21) グロービス・マネジメント・インスティテュート (1999) : MBA ファイナンス, ダイアモンド社, 285p.
- 22) 原田吉信 (2006) : 橋梁のアセットマネジメントについて, 建設マネジメント技術 340 号, pp.12-15.
- 23) 長谷川寿夫・藤原忠司 (1988) : コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 凍害, 技報堂出版, pp.71-80.
- 24) 秀島好昭 (2004a) : 水利施設の設計・維持・改修における寒冷地対策, 農業土木学会誌 70(4), pp.15-18.
- 25) 秀島好昭 (2004b) : 北海道における農業用水路の変遷と維持管理, 北海道開発土木研究所月報 No.619, pp.20-26.
- 26) Higgins R. C., 霍見芳浩監訳 (1994) : ファイナンシャル・マネジメント, ダイアモンド社, 243p.
- 27) 北海道開発局農業水産部監修 (1998) : 寒地フルーム水路設計施工要領
- 28) 本間新哉・北村浩二・加藤敬 (2008) : 水路摩耗における健全度評価と構造的機能に関する考察, 農村工学研究所技報 207, pp.1-12.
- 29) 堀口敬 (1990) : 繊維補強コンクリートの表面疲労摩耗に関する基礎的研究, 北海道大学学位論文
- 30) 堀口敬 (1993) : コンクリートの摩耗に関する研究の現状, コンクリート工学 Vol.31(10), pp.17-27.
- 31) 保全対策センター (2007) : 農業水利施設ストックマネジメントマニュアル～調査計画を中心とした実務のために～ 共通編, pp.65-71.
- 32) Hudson W. R., Haas R., Uddin W., 笠原篤監訳 (2001) : 社会資本マネジメント [維持管理・更新時代の新戦略], 森北出版, 373p.
- 33) 池田一壽 (2007) : 道路構造物のストックマネジメントのための技術動向, 科学技術動向研究 No.74
- 34) 石田知子 (2007) : 水理構造物のコンクリートの摩耗評価に関する試験方法の現状, コンクリート工学 Vol.45(3), pp.50-54.
- 35) 石田暢士・中島賢二郎 (2004) : 凍上圧を考慮したコンクリート開水路の工学的安全度の解析, JIID 研究レポート No.25, pp.69-84.
- 36) 石神暁郎・森充広・渡嘉敷勝・増川晋 (2005) : 農業用コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.27(1), pp.805-810.
- 37) 石神暁郎・渡嘉敷勝・森充広・増川晋 (2006) : 農業用コンクリート水路における断面修復材の耐摩耗性評価, コンクリート工学年次論文集, 28-1, pp.1739-1744.
- 38) 石井将幸・佐藤周之・緒方英彦・野中資博 (2007) : 現場打ち RC 開水路におけるひび割れ幅と鉄筋腐食の関係, 農業土木学会論文集 75(1), pp.73-82.
- 39) 慈道充・小林潔司 (2003) : 不確実性下における最適補修投資ルール, 土木学会論文集 No.744/IV-61, pp.39-50.
- 40) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会 (2008) : 「全国を概観した地震動予測地図」2008 年版, p.2.
- 41) Johnson III Sam H., Stoutjesdijk J., and Djailobayev N. (2002) : Irrigation Reform in the Kyrgyz Republic, *Sixth International Seminar on Participatory Irrigation Management*
- 42) 鍵本広之・佐藤道生・川村満紀 (2002) : アルカリシリカ反応により劣化した施設の劣化度評価と細孔溶液分析による劣化進行の予測, 土木学会論文集 641/V-46, pp.241-251.
- 43) 貝戸清之・阿部允・藤野陽三 (2003) : 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集 No.744/IV-61, pp.29-38.
- 44) 貝戸清之・保田敬一・小林潔司・大和田慶 (2005) : 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集 No.801/I-73, pp.83-96.
- 45) 貝戸清之・小林潔司 (2006) : マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, サマースクール 2006 「建設マネジメントを考える」テキスト, pp.97-115.
- 46) 金氏眞 (2007) : ブリッジマネジメントシステム構築のポイント, JACIC 情報, 85, pp.75-82.
- 47) 勝山達郎 (2002) : スtockマネジメントの導入による農業水利施設の有効活用, ARIC 情報 No.67, pp.17-21.
- 48) 建設省建設政策研究センター (1998) : 社会資本と企業会計的手法に関する研究—英国, 米国, ニュージーランド等の事例研究を中心として—, 242p.
- 49) 北村浩二 (2007a) : 中央アジアの灌漑排水におけるアジア開発銀行等の役割, 農業土木学会誌 75(5), pp.9-14.
- 50) 北村浩二 (2007b) : 中央アジアの農民水利組織の役割と課題, 農業農村工学会誌 75(7), pp.59-64.
- 51) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤敬 (2007a) : インフラ資産のアセットマネジメントに関する研究レビューと農業水利施設を対象とした研究の方向性, 農村工学研究所技報 第 206 号, pp.83-104.
- 52) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤敬 (2007b) : 農業水利施設のライフサイクルコスト計算の経済分析手法としての妥当性, 農村工学研究所技報 第 206 号, pp.105-118.
- 53) 北村浩二・本間新哉 (2008) : 基幹水利施設のストックマネジメントの諸課題, 農業農村工学会誌, 76(7), pp.27-30.
- 54) 北村浩二・本間新哉・今泉眞之・加藤敬 (2008a) : 農業用水路の壁面の摩耗劣化と継目劣化の予測, 農業農村工学会論文集 76(2), pp.39-50.
- 55) 北村浩二・本間新哉・加藤敬 (2008b) : 農業水利施設へのインフラ会計導入の必要性と諸課題, 農村工学研究所技報, 第 207 号, pp.13-24.
- 56) 北村浩二・本間新哉・加藤敬 (2008c) : 農業用水路における壁面粗化による劣化予測の定量的評価, 農業農村工学会誌, 76(9), pp.35-40.
- 57) 北村浩二・本間新哉・加藤敬 (2008d) : マルコフ連鎖モデルによる農業用水路の壁面摩耗の劣化予測, 農業農村工学会誌, 77(7), pp.19-23.
- 58) 北村浩二・中矢哲郎 (2008a) : 豪州の農業水利施設等のアセットマネジメントの事例, 農業農村工学会誌, 76(10),

- pp.37-41.
- 59) 北村浩二・中矢哲郎 (2008b) : 豪州における農業の干ばつに関する定量的数値の近年の動向, 農業農村工学会誌, 76 (12), pp.33-37.
- 60) Kitamura K. (2008): Issues of Water Users' Associations for Sustainable Irrigation and Drainage in Central Asia, *Japan Agricultural Research Quarterly* 42(3), Japan International Research Center for Agricultural Sciences, pp.203-210.
- 61) 小林潔司・上田孝行 (2003) : インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望, 土木学会論文集 No.744/IV-61, pp.15-27.
- 62) 小林潔司 (2005) : 分権的ライフサイクル費用評価と集約的効率性, 土木学会論文集 No.793/IV-68, pp.59-71.
- 63) 小林孝一・宮川豊章 (2001) : 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究, 土木学会論文集 669/V-50, pp.173-186.
- 64) 国土交通省 (2003a) : 道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会, 道路構造物の今後の管理・更新のあり方 提言
- 65) 国土交通省 (2003b) : 公共事業コスト構造改革プログラム
- 66) 国土交通省 (2003c) : 社会資本整備重点計画
- 67) 国土交通省 (2003d) : 対症療法から予防保全へ, 平成16年度国土交通省道路局重点施策「①効率的・計画的な道路構造物の保全手法の本格導入 (アセットマネジメントシステム)」, 日経コンストラクション 338号, pp.42-43.
- 68) 国土交通省 (2005) : 社会資本整備審議会・交通政策審議会計画部会基本問題小委員会第2回資料「新たな社会資本整備重点計画等に向けた論点 (案)」
- 69) 国土交通省 (2006) : 国土交通白書 平成17年度版, pp.78-80.
- 70) 小牟禮建一・濱田秀則・横田弘・山路徹 (2002) : RC 栈橋上部工の塩害による劣化モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, 41(4), pp.1-36.
- 71) 工藤敏光 (2005) : 水利施設における機能診断の現状と課題, 日本農業土木総合研究所, JIID 研究レポート No.26, pp.79-87.
- 72) 栗野盛光・小林潔司・渡辺晴彦 (2001) : 不確実性下における最適補修投資ルール, 土木学会論文集 No.667/IV-50, pp.1-14.
- 73) 丸茂伸樹・大森博志 (2005) : 鉄筋コンクリート水路のひび割れ現状調査について, 水と土, 142, pp.87-92.
- 74) 益山高幸・竹内恭一 (2004) : 社会資本の管理に会計的視点を取り込んだインフラ会計, 土木学会誌 89(8), pp.21-23.
- 75) 松尾久幸・丸山武彦・村上俊夫・多田東臣 (1993) : コンクリートの耐摩耗特性におよぼす各種要因の検討, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.15(1), pp.835-840.
- 76) Milligan J.H., Nielsen R.J., Schmeckpeper E. R., (2004).: *Implementing PONTIS as a Bridge Management Tool in Idaho*, University of Idaho, 101p.
- 77) 美濃眞一郎・大内毅 (2005) : 今後の農業水利施設の維持管理の方向, 農業土木学会誌 73(10), pp.19-22.
- 78) 宮本文穂・益成一郎・西村昭 (1991) : コンクリート橋診断エキスパートシステムの開発と実用化, 材料 No.40-450, pp.2-7.
- 79) 宮本文穂・串田守可・足立達郎・松本正人 (1997) : Bridge Management System (BMS) の開発, 土木学会論文集 No.560/VI-34, pp.91-106.
- 80) 宮本文穂・河村圭・中村秀明 (1998) : Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集 No.588/VI-38, pp.191-208.
- 81) 宮元均 (2002) : 適切な施設の維持管理に向けた取組みについて, 農業土木学会誌 70(5), pp.13-16.
- 82) 森充広・渡嘉敷勝・長東勇・石村英明 (2004) : 農業用水路機能診断における非破壊調査技術の有効性, 農業土木学会論文集 72(2), pp.123-130.
- 83) 森充広・渡嘉敷勝・増川晋・吉田典明・藤原鉄朗 (2005) : 農業用水路変状データベースおよび診断システムの開発, 農業土木学会誌 73(11), pp.21-24.
- 84) 森充広 (2006) : 農業水利施設の性能設計, 第23回水土木技術セミナー, 農業土木学会, p.141.
- 85) 森充広・藤原鉄朗・齋藤豊・増川晋・渡嘉敷勝 (2008) : 農業用水路変状調査システムの開発, 農業農村工学会論文集 76(1), pp.71-78.
- 86) 森丈久 (2005) : 農業水利施設へのストックマネジメント導入に向けた取り組み, 農業土木学会誌 73(11), pp.3-6.
- 87) 森丈久・森充広・渡嘉敷勝・中矢哲郎・増川晋・田頭秀和 (2008) : 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震による農業用水路被害と災害調査, 農村工学研究所技報 第208号, pp.89-101.
- 88) 森川英典 (1994) : 既存コンクリート橋の安全性および寿命評価に関する基礎的研究, 神戸大学学位論文
- 89) Murray Irrigation Limited (2007): *Annual Report 2007*
- 90) Murrumbidgee Irrigation Limited (2007): *Annual Report 07*
- 91) 内閣府 (2002) : 日本の社会資本, 世代を超えるストック, 内閣府政策統括官編, p.202.
- 92) 中達雄・島武男・田中良和 (2001) : 更新・改修のための水路システムの水利機能診断, 農業土木学会誌 69(5), pp.1-6.
- 93) 中達雄・田中良和・向井章恵 (2003) : 施設更新に対応する水路システムの性能設計, 農業土木学会誌 71(5), pp.51-56.
- 94) 中島賢二郎・鹿田朋義・中村博樹・井戸本靖史 (2004) : ライフサイクル・コストの計算例, 主として水利システムのリスクに着目して, ARIC 情報 No.72, pp.54-61.
- 95) 中村洋一 (1999) : S N A 統計入門, 日本経済新聞社, 197p.
- 96) 中谷昌一 (2004) : 国土交通省における道路アセットマネジメントの考え方, 土木学会誌 89(8) no.8, pp.24-26.
- 97) 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の表層形状からの粗度係数推定手法, 平成20年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.126-127.

- 98) 難波和聡 (2005)：農業水利施設のストックマネジメントのあり方 (他分野に学ぶべきこと), 農業土木学会誌 73(10), pp.72-74.
- 99) 長東勇・松岡肇・廣戸俊夫・木村良 (1995)：アルカリ骨材反応による農業用水路の劣化と補修, -香川用水地区を事例として-, 水と土, 103, pp.58-69.
- 100) 長東勇・藤本直也・菅原教泰・重森篤 (2000)：農業用施設コンクリート構造物の劣化についての現状分析, 水と土 120, pp.22-30.
- 101) 長東勇・甲本達也・青山成康・野中資博・服部九二雄 (2002)：農業水利コンクリート構造物の更新と維持管理, 農業土木学会誌 70(12), pp.3-6.
- 102) 長東勇・石井将幸・森充広・野中資博 (2005)：水利施設の機能診断および補修・補強における技術的課題, 農業土木学会誌 73(11), pp.13-16.
- 103) 日本コンクリート工学協会 (2006)：コンクリート診断技術 06' [基礎編]
- 104) 日本公認会計士協会 (2003)：公会計原則 (試案), 32p.
- 105) 日本水土総合研究所 (2006)：「水土の知」を語る Vol.11, [性能設計を考える - その3] 水利施設の機能評価, p.101.
- 106) 新潟県農地部 (2007)：新潟県中越沖地震農地部関係被害状況, 平成 19 年新潟県中越沖地震に伴う被害状況について (最終版)
- 107) 西村和廣 (1994)：道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文 No. 501/I-29, pp.1-10.
- 108) 野口悠紀夫 (1982)：公共経済学, 日本評論社, 228p.
- 109) 野中資博 (2001)：コンクリート水利施設の劣化機構と老朽化診断, 農業土木学会誌 69(5), pp.13-17.
- 110) 野中資博 (2006)：農業水利施設の性能設計, 第 23 回水土木技術セミナー, 農業土木学会, pp.11-12.
- 111) 農業土木学会 (2001)：土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書・技術書, pp.348-349.
- 112) 農業土木事業協会 (2007)：農業水利施設の機能保全の手引き
- 113) 農業農村工学会 (2008)：機能保全における性能設計入門, 農業農村工学会選書 17
- 114) 農林水産省農村振興局 (2001)：土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」基準書・技術書, pp.348-349.
- 115) 農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課 監修 (2007)：新たな土地改良の効果算定マニュアル, 大成出版社, 738p.
- 116) 緒方英彦・服部九二雄・野中資博・石井将幸 (2004)：性能照査を踏まえた農業水利施設の耐久設計, 農業土木学会誌 72(3), pp.23-27.
- 117) 大即信明・檉野紀元・片脇清士・小林明夫・宮川豊章 (1986)：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害 (I), 技報堂出版, pp.4-5.
- 118) 大内幸則 (1981)：用水路背面域の凍結前線について, 現場水路での実測と数値解析例, 土と基礎 29(2), pp.31-37.
- 119) 小澤隆 (2007)：道路維持管理の現状と課題, レファレンス 2007.4, pp.53-70.
- 120) 阪田和哉・林山泰久 (2002)：社会資本整備における社会的割引率に関する研究, 土木計画学研究・講演集 Vol.26
- 121) 新都市社会技術融合創造研究会インフラ試算評価・管理の最適化に関する研究プロジェクトチーム (2006)：Bridge Management System
- 122) 静間俊郎・中島賢二郎・井戸本靖史 (2004)：農業水利施設更新の最適化に関する研究, JCOSSAR' 2004 論文集
- 123) 総務省 (2006)：新地方公会計制度研究会報告書, 49p.
- 124) State Water (2007): *Annual Report 06-07*
- 125) 杉山一弘 (2008)：農業水利施設のストックマネジメントのあゆみと今後の展望, 農業農村工学会誌 76(3), pp.11-14.
- 126) 高田健治 (1983)：農業土木における凍害とその対策 (その 5), 水路の凍害対策, 農業土木学会誌 51(6), pp.61-69.
- 127) 高木泰典 (1988)：会計学要論, 中央経済社, 324p.
- 128) 高橋和雄・細川吉晴 (1983)：用排水路のコンクリート製品の劣化, コンクリート製品の凍結融解に対する耐久性に関する研究 (I), 農業土木学会論文集 No.107, pp.65-71.
- 129) 高橋和雄 (1989)：現場打ちコンクリート水路の凍害による劣化と製品による改修, コンクリート製品の凍結融解作用に対する耐久性に関する研究 (II), 農業土木学会論文集 No.143, pp.47-55.
- 130) 竹村武士・丹治肇・蘭嘉宣 (2001)：数理モデルと現地観測による開水路の粗度係数の評価, 農業工学研究所技報 第 199 号, pp.109-117.
- 131) 谷口 修・田村 保・佐野清史・濱田秀則 (2003)：栈橋 RC 上部工の劣化進行予測手法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 25-1, pp.1817-1822.
- 132) 丹治肇・蘭嘉宣 (2002)：排水機場の更新時期と順位の設定方法の考察, 農業土木学会誌 No.70(12), pp.11-15.
- 133) Thompson P.D. (1993): PONTIS: the maturing of bridge management systems in the USA, *Bridge management 2*. Thomas Telford, London, pp.971-978.
- 134) 戸田靖彦 (2005)：ポイント徹底解説, コンクリートの知識, セメントジャーナル社, pp.165-169.
- 135) 渡嘉敷勝・長東勇・森充広・石村英明・石神暁郎 (2003)：コンクリート構造物の劣化度データに対するワイブル分布の適用, JCOSSAR 2003 論文集, pp.947-952.
- 136) 渡嘉敷勝・石神暁郎・森充広・増川晋 (2006)：水流摩耗試験機を用いたモルタルおよびペーストの摩耗試験, コンクリート工学年次論文集, 28-1, pp.695-700.
- 137) 津田尚胤・貝戸清之・青木一也・小林潔司 (2005)：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No. 801/I-73, pp.69-82.
- 138) 津田尚胤・貝戸清之・山本浩司・小林潔司 (2006)：ワイブル劣化ハザードモデルのバイズ推計法, サマースクール 2006「建設マネジメントを考える」テキスト, pp.31-49.
- 139) U.S. Department of Transportation (1998): *Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design*, 107p.
- 140) U.S. Department of Transportation (1999): *Asset Management*

- Primer*, 30p.
- 141) U.S. Department of Transportation (2000): *Primer: GASB Statement 34*, 48p.
- 142) U.S. Department of Transportation (2002): *Life-Cycle Cost Analysis Primer*, 24p.
- 143) U.S. Department of Transportation (2003): *Economic Analysis Primer*, 35p.
- 144) U.S. Department of Transportation (2005): *Transportation Asset Management Case Studies, Bridge Management, Experiences of California, Florida, and South Dakota*, 28p.
- 145) World Bank (1996): *Handbook on Economic Analysis of Investment Operations*, 160p.
- 146) 山本昇 (2006) : 青森県における橋梁アセットマネジメントの導入, 行政経営の現場 16 号, pp.18-21.
- 147) 吉田重一・高田健治 (1980) : 寒冷地における用水路の構造設計, 農業土木学会誌 48 (7), pp.11-17.
- 148) 財政制度等審議会 (2003) : 公会計に関する基本的考え方, 23p.
- 149) 財務省 (2004) : 省庁別財務諸表の作成基準, 116p.

Study on Deterioration Forecast in Stock Management of Irrigation Canal

KITAMURA Koji

Summary

The stock management for irrigation infrastructure has just been adopted to extend the life-span of the infrastructure and reduce the life-cycle costs under the limited budget constraints. For appropriate implementation of the stock management, precise deterioration forecast of infrastructure is required. The typical deterioration of irrigation infrastructure is abrasion of reinforced irrigation canals. Deterioration forecast methods for canal abrasion are developed by using soundness index and arithmetic mean roughness (Ra). Deterioration forecast function and Markovian transition probability model are used for forecasting canal abrasion deterioration with soundness index. Arithmetic mean roughness (Ra) is used for expressing numerically canal abrasion deterioration to minimize errors among inspecting results by inspectors with soundness index.

Keywords: *Irrigation Canal, Stock Management, Deterioration Forecast, Deterioration Forecast Function, Markovian Transition Probability, Arithmetic Mean Roughness (Ra)*