

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

北村浩二*・本間新哉*・今泉眞之*・加藤 敬**

目 次

緒 言	83	今後の農業水利施設のアセットマネジメント	
インフラ資産のアセットマネジメント	84	研究の方向性と主要検討事項	93
レビューの対象とする研究	85	1 点検データの信頼性と蓄積の必要性	93
橋梁等の研究のレビュー	86	2 ライフサイクルコストLCC計算式の決定	94
1 米国の橋梁マネジメントシステムPONTIS ...	86	3 施設の劣化予測	95
2 Bridge Management System(BMS)	86	結 言	98
3 一連の確率統計的手法による研究	88	参考文献	98
4 青森県の橋梁マネジメントシステム	92	Summary	100
		Appendix	101

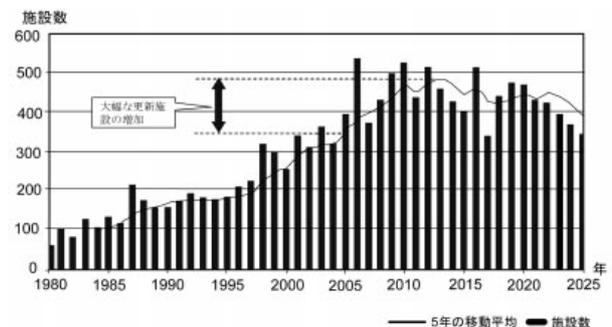
緒 言

わが国の農業水利施設は、膨大な社会資本ストックを形成している。Fig.1に示すように、今後これらの莫大なインフラ資産の大半が初期建設から相当年数が経過し、順次に更新時期を迎えることから、莫大な維持補修費が必要になると予想されている。そのため、農林水産省では、農業水利施設が完全に老朽化し全面更新時期を迎える前に、予防保全的に適時・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とともに施設の初期建設から廃棄までの総費用であるライフサイクルコストLCC(Life-Cycle Cost)の低減を図ることとしている(例えば、美濃・大内, 2005)。

しかしながら、このような予防保全的な適時・適切な維持補修によって、施設の長寿命化とLCC最小化を目指す動きは、農業水利施設に限られたものではない。例えば、莫大な総延長を有する道路網においては橋梁や舗装を中心として、既に米国やわが国においても研究や実務への適用が積極的に推進されている。一方、農業水利施設のストックマネジメントの行政ニーズの認識は大きい(例えば、岩村, 2005)が、研究はようやく緒に就いた

ばかりである。具体的には、農業水利施設の維持管理や更新技術の重要性について近年では、農業土木学会誌の2001年5月号、2002年12月号、2005年10月号及び11月号で特集が組まれている。しかしながら、その中でストックマネジメントに関する特集は、2005年11月号のみである。具体的な農業水利施設に関するストックマネジメントの研究事例としては、中島ら(2004)が施設の故障の確認が比較的容易な管水路についてのLCC計算を試験的に行っているのみであり、鉄筋コンクリート製開水路に関する研究事例は存在しない。そのため、今後の本格的な研究が必要とされている。

一方、道路の橋梁等の分野では、施設の劣化状況の把握だけでなく、点検データの処理手法、劣化予測、LCC計算手法、予算管理手法等を含む包括的な研究が先



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.1 更新時期を迎える基幹農業水利施設
(美濃・大内, 2005)

Number of Irrigation Infrastructure Which Should Be Rehabilitated

* 農村総合研究部地域資源保全管理研究チーム

** 農村総合研究部上席研究員

平成19年3月12日受理

キーワード: インフラ資産, アセットマネジメント, 農業水利施設, ライフサイクルコスト

行している。このような道路の橋梁等の分野では、橋梁等のインフラ資産の老朽化や経済的・機能的な劣化が進む中、インフラ資産の新規投資財源を確保しつつ、既存のインフラを効率的に維持補修・更新していくことをアセットマネジメントと呼んでいる(例えば,小林,2003)。また、農業水利施設以外の分野では、このようなインフラ資産の効率的な維持補修・更新の手法をストックマネジメントではなく、アセットマネジメントと呼んでいる場合が多い。このことに関して、岩村(2006)は、農業水利施設の場合は未だアセットマネジメントのレベルには達しておらず、農業水利施設の機能保全費用をいかに低減させるかが目的であるため、ストックマネジメントの用語を用いていることを指摘している。そのため、本報告では、混乱を避けるため、便宜上アセットマネジメントに用語を統一することとする。

本報告では、まずは農業水利施設を含むインフラ資産のアセットマネジメントの概念整理を行う。そして、先行する道路の橋梁等のアセットマネジメントの主要な研究事例をレビューし、今後の農業水利施設のアセットマネジメント研究の方向性と諸課題について検討する。

インフラ資産のアセットマネジメント

インフラ資産のアセットマネジメントの定義や概念には様々な解釈がなされており、共通の認識が存在しないことが指摘されている(例えば,大津,2006)。そこで、筆者らは主要なインフラ資産のアセットマネジメントの概念をレビューし、農業水利施設に必要なアセットマネジメントの概念整理を行った。レビューの対象とした研究は、道路の橋梁等の分野である。Appendixには、代表例として米国連邦高速道路庁、ニュージーランド国立アセットマネジメント・ステアリング・グループ、わが国の土木学会、国土交通省道路局、東京都の道路に関するアセットマネジメントの概念図を示した(Ap-Fig.1~Ap-Fig.5)。また、AppendixのAp-Fig.6とAp-Fig.7は、わが国の農業水利施設の維持管理・更新フロー(案)と、農業水利施設のストックマネジメントの基本フレームを示している。

レビュー結果をもとにして、筆者らが提案する農業水利施設のアセットマネジメントの概念図をFig.2~Fig.4に示す。ここでは、農業水利施設のアセットマネジメントを狭義と広義に分類する。Fig.2とFig.3に狭義のアセットマネジメントの概念図を示す。Fig.2は既存施設を対象としたものであり、Fig.3は新規施設を対象としたものである。狭義においては、既存施設の予防保全的な維持補修を実施するためのLCC計算だけではなく、新規施設事業の調査・計画の際においても施設建設から廃棄までの一貫したLCCを考慮することが必要である。また、Fig.4に広義のアセットマネジメントの概念図を示す。広義においては、狭義のアセットマネジメント実施に必

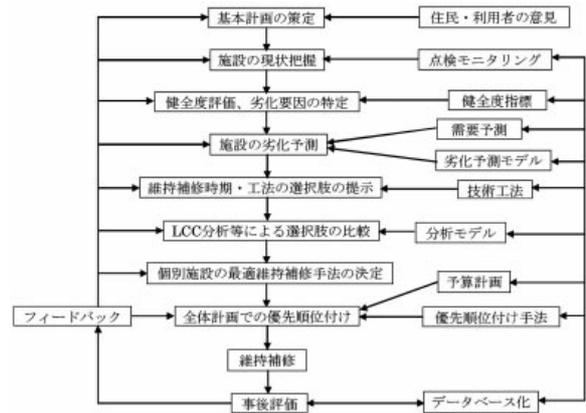


Fig.2 既存の農業水利施設を対象とした狭義のアセットマネジメントシステム

Narrow Asset Management System for Existing Irrigation Infrastructure

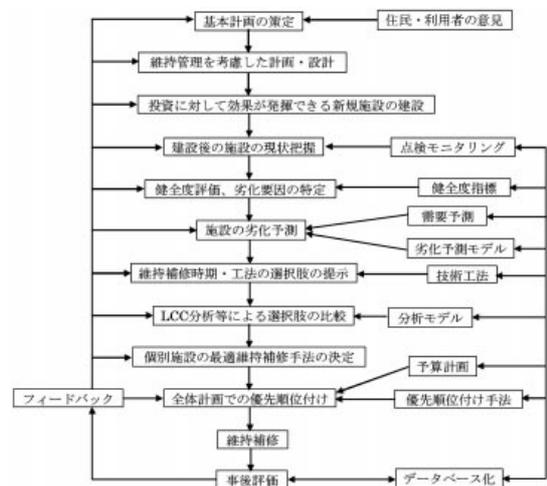


Fig.3 新規の農業水利施設の狭義のアセットマネジメントシステム

Narrow Asset Management System for New Irrigation Infrastructure

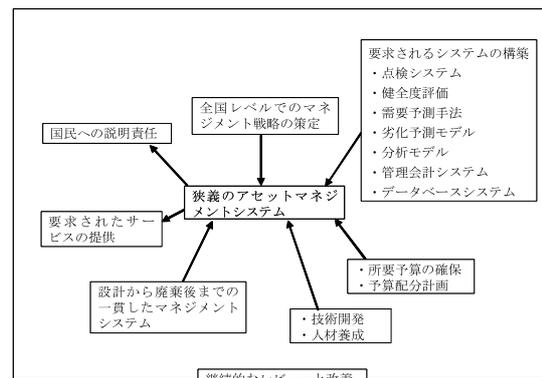


Fig.4 農業水利施設の広義のアセットマネジメントシステム

Broader Asset Management System for Irrigation Infrastructure

要な各種システムの構築、施設の点検を実施する人材の育成、納税者である国民への説明責任等を含む。

次に、アセットマネジメントの主要要素である健全度および施設の劣化予測について考察する。その概念図をFig.5に示す。ここでは、健全度とは、施設の新規建設

後の経年によって劣化が進行し発揮すべき機能・性能が低下した状態を、劣化の度合いを複数の段階に分類したレーティングで表現することを示す。具体的には、健全度を5段階に分類する場合が多く、その際には施設の新規建設時の健全度を5として、経年による施設の劣化によって健全度が1に達した場合に施設の廃棄または全面更新が必要となる。なお、その間の健全度が4~2の場合においても、複数の補修や更新の時期と工法の選択肢の中から、LCC低減の観点から、補修や更新を行うこともあり得る。

施設の予防保全的な維持補修のためには、施設の点検時点の健全度の把握だけでなく、将来の施設の劣化予測が必要となる。劣化予測とは、施設の健全度が経年によって、どの程度低下するかを将来にわたって予測することを言う。その劣化予測に基づいて、どの健全度の時期にどのような補修工法を実施することによって、施設の長寿命化とLCC最小化を達成するのが適当かを判断す

る。この概念図においては、健全度2の場合に簡易な補修を実施することによって、健全度が回復し施設の長寿命化が実現することを示している。

レビューの対象とする研究

インフラ資産のアセットマネジメントは、道路の橋梁等を中心として精力的に研究や適用が行われてきている。その一方で、農業水利施設に関するアセットマネジメントの研究はようやく緒に就いたばかりであり、特に鉄筋コンクリート製開水路に関する研究事例は存在しない。そのため、次の研究事例をレビューの対象とする。

インフラ資産のアセットマネジメントにおいては米国が先進国であり、米国連邦高速道路庁FHWA (Federal Highway Administration) が1998年にアセットマネジメント・オフィス (Office of Asset Management) を立ち上げ、道路の橋梁や舗装に関するアセットマネジメントを積極的に推進している。その代表的成果が橋梁アセットマネジメントモデルのPONTISであり、これはわが国の文献でも数多く引用されている (例えば、津田ら、2005)。

一方、わが国における代表的な橋梁等のアセットマネジメントの研究事例としては、次の2つを取り上げる。(1) 山口大学の宮本文穂らのBridge Management Systemと、(2) 京都大学の小林潔司らのグループの一連の確率統計的手法による橋梁等のマネジメント研究である。さらに、わが国における橋梁マネジメントの具体的適用事例として、地方自治体ではじめて本格的に導入した青森県の事例を取り上げる。

これらの橋梁等のアセットマネジメント研究の主要な特徴と各々から得られた知見の概要をTable 1に示す。

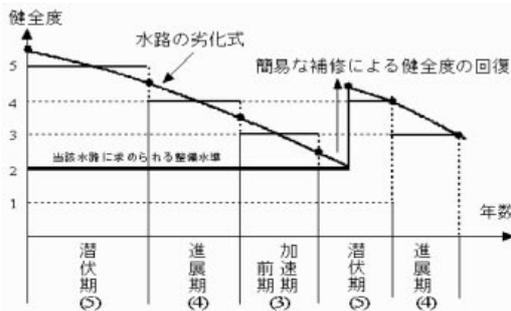


Fig.5 健全度劣化予測と補修による健全度の回復
Health Index, Deterioration Forecast and Recovery of Health Index with Rehabilitation

Table 1 各研究の主要な特徴と各々から得られた知見の概要

Main Characteristics of Asset management Models and Acquired Knowledge by Reviewing Them

	橋梁モデル			
	PONTIS	Bridge Management System(宮本ら)	確率統計的手法(小林ら)	青森県
目的	米国各州における橋梁の点検データの蓄積と適切な維持補修戦略の策定	人工知能を用いた橋梁の耐用性診断を行うシステムの開発と、それを用いた最適維持補修戦略の策定	確率統計的手法を用いた橋梁等のインフラ資産の不確実性を伴う施設の劣化予測手法の開発	今後50年間の県内の橋梁に関する維持補修費の平準化
健全度評価と劣化予測	点検データと専門技術者の知見の併用	目視点検データと専門技術者の判断と同様の「橋梁エキスパートシステム」	(1) 点検データと確率統計手法 (2) 補修が実施された施設のデータの健全度評価への影響を指摘	点検データと専門技術者の知見
劣化モデル	マルコフ推移確率	(1) 力学的特性から、耐荷性は4次曲線、耐久性は3次曲線 (2) 補修後の回復度は初期建設年度と部材によって異なると設定	(1) 劣化速度を座標軸にした劣化曲線を提案 (2) 故障の有無といった施設の故障時刻を予測する劣化ハザードモデル (3) 複数の健全度で評価される施設の健全度移行時刻を予測する多段階ワイル劣化ハザードモデル (4) マルコフ推移モデルを用いた個別部材の劣化予測モデル (5) ベイズ推計法を用いた故障の有無といった施設の故障時刻を予測するワイル劣化ハザードモデル (6) ベイズ推計法を用いた複数の健全度で評価される施設の健全度移行時刻を予測するマルコフ劣化ハザードモデルなど	5段階の健全度の時間軸での各時点を直線で結ぶ
LCC計算	事業者費用+利用者費用	事業者費用	LCC計算式についての合意は形成されていないことを指摘	維持費(点検、清掃、修理、補修)+解体費+更新費
割引率	使用	補修費用は投資ではないため、割引率は使用しない	(1) 割引現在価値法が必ずしも現場の感覚と一致しない (2) 割引率を使用しない年間平均費用法 (3) 補修計画に不確実性が存在する場合には割引率を使用 (4) 割引率使用の可否については、更なる検討が必要	毎年予算の平準化が目的のため、割引率は使用しない
その他	(1) PONTISを使用するには膨大なデータが必要 (2) 米国の多くの州がデータ管理にのみ使用	LCC最小だけではなく、コスト上限下での「耐荷性」と「耐久性」といった品質最大化にも対応	点検データ蓄積の重要性を指摘	(1) 今後50年間の毎年の維持補修予算の平準化のため、個別橋梁の補修時期・工法を見直す (2) 点検コスト削減のため、IT活用の携帯情報端末の利用 (3) 点検作業効率化のため、劣化進行の激しい箇所を重点的に点検

橋梁等の研究のレビュー

1 米国の橋梁マネジメントシステムPONTIS

米国では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年のブリ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、インフラ資産のアセットマネジメントの先進国となっている。

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 (Office of Asset Management) 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.6に示す。

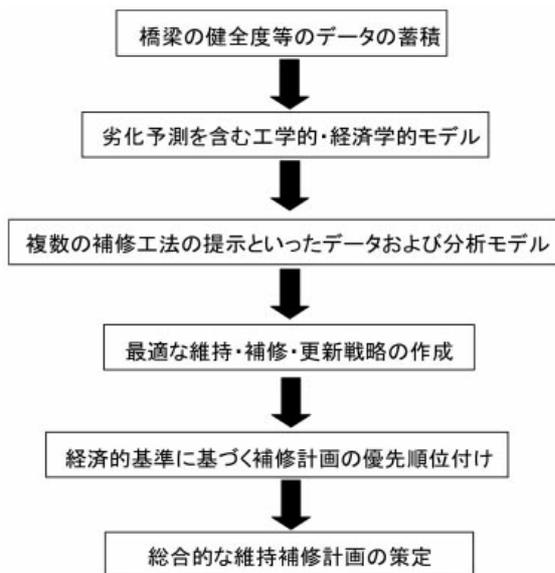


Fig.6 PONTISの主要な構成要素
(U.S. Department of Transportation (1999) を基に作成)
Main Elements of PONTIS

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、殆どの州が上記構成要素のうちの(1)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、マルコフ推移確率が用いられている。マルコフ推移確率とは、現在の健全度のみに基づいて将来の特定の時点における健全度を予測するものである。PONTISで用いられている推移確率の決定手法は、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推移確率を仮定する。2段階目として、その後の点検データの蓄積によって、推移確率を逐次更新していく (Thompson, 1993)。

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。事業者費用としては、維持補修・改善費用などが含まれる。利用者費用としては、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。

劣化予測にマルコフ推移確率を用いて、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、推移確率の決定には、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。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。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。

2 Bridge Management System (BMS)

山口大学の宮本文穂らは、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な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)。

宮本ら (1997) の開発したBMSの概要をFig.7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.8に示す。

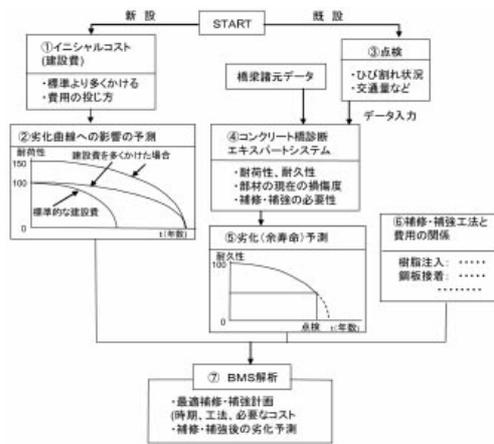


Fig.7 Bridge Management System (BMS)の概要 (宮本ら, 1997)

Outline of Bridge Management System

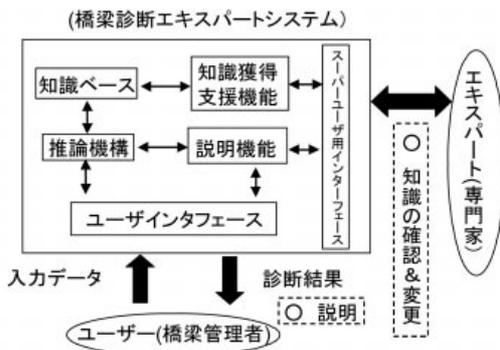


Fig.8 橋梁診断エキスパートシステムの概要 (宮本ら, 2000)

Outline of Bridge Diagnosis Expert System

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が組み合わせて考えられている。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機能・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。

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)、耐久性の劣化曲線式を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 2, Table 3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

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

Recovery of Durability by Each Rehabilitation Method and Construction Year

設計年次	鋼板接着 (FRP4枚)	FRP2枚接着	床版増厚	床版打替え
~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 3 設計年次別各補強工法による耐荷性回復度(主桁) (宮本ら, 1997)

Recovery of Durability by Each Rehabilitation Method and Construction Year

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

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）。

本BMSの特徴は、次のように整理できる。

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。

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。

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。

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。

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」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。

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。

3 一連の確率統計的手法による研究

京都大学の小林潔司らのグループは、インフラ資産のASET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、橋梁等のインフラ資産のASET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。その研究の主要な成果を以下に示す。

a 点検データの蓄積とサンプル欠損

小林（2006）は、施設の定期的点検の重要性を次のように指摘している。データが少ない段階では、点検結果を蓄積することにより、劣化予測モデルの精度を向上させていくことが必要である。定期的点検の目的は2つある。(1)施設をまれなく点検することにより、劣化が進行している箇所を発見し、適切な補修方針を検討することである。(2)多くの施設を同時に点検することにより、施設の平均的な劣化傾向を把握することである。

また、小林ら（2006）は、施設の補修が実施されることにより、集計された点検データの中に初期建設からの自然な劣化状態を示していないサンプルが混在し、その分だけ実質的にサンプル数が不足するサンプル欠損の問題を指摘している。サンプル欠損が存在する場合、劣化の進展が相対的に遅いサンプルに基づいて劣化予測モデルを推定するため、施設寿命を過大に評価する危険性があることを指摘している。Fig.9に補修によるサンプル欠損を示す。ここで、サンプルパスAは補修が実施されなかったため、時系列的に劣化が進行している。一方、サンプルパスBは補修が実施されたためにサンプルパスCに移行し、点検時点 T_c では健全度が補修されなかった場合よりも向上している。また、Fig.10に理論的健全度分布を示す。理論的健全度分布とは、すべてのサンプルにおいて一切補修が実施されておらず、健全度の分布が左右対称になることを言う。ここで、補修が実施されなかった場合の理論的な健全度分布は実線で表されている。しかし、補修によるサンプル欠損がある場合には、健全度分布が破線のように良好な方向に移動し、斜線の領域が補修によるサンプル欠損を示している。

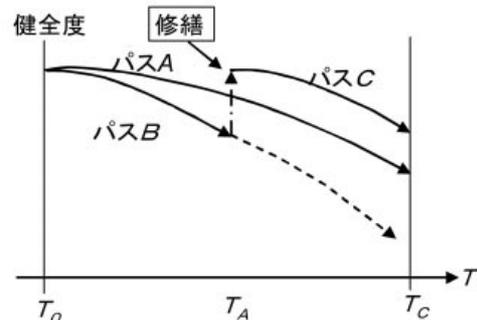


Fig.9 補修によるサンプル欠損 (小林ら, 2006)
Sample Dropping by Rehabilitation

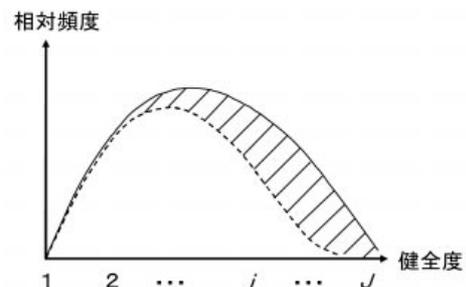


Fig.10 理論的健全度分布 (小林ら, 2006)
Ideal Distribution of Health Index

b 施設の経済的寿命予測

織田澤ら(2004)は、施設の経済的寿命に不確実性が介在する場合に、施設管理者が施設運営による期待経済価値を最大にするような施設の運営計画と補修計画を同時に検討することが可能となる最適アセットマネジメントモデルを提案している。この背景には、既存の研究では、対象とする施設が無限に供用されること、もしくは確定的に決められた有限期間にわたって供用されることが想定され、LCC最小化を目的とする最適補修計画が導出されているが、実際には、施設の経済的寿命には不確定要素が含まれることが挙げられる。施設寿命が不確定な場合には、施設管理者は施設の経済的劣化と物理的劣化の双方を同時に観察しながら、施設の運営を終了する時期と施設の補修計画を同時に決定することが必要である。この施設管理者が取るべきマネジメント政策の概念図をFig.11に示す。図の横軸は経済状態 m を、縦軸は劣化状態 j を表している。 m が大きいほど経済的価値が減少し補修の実施が必要となることを示し、 j が大きいほど物理的劣化が進行して施設の運営が困難になることを示す。マネジメント政策は各格子点において、(1)施設運営を継続するかどうかと、(2)修繕を実施するかどうかの2つの変数で決定される。図中の記号 \square は施設を継続しかつ修繕を実施しない施設状態(m, j)を表している。記号 \circ は施設の修繕が実施される施設状態を、記号 \triangle は施設の運営が終了される施設状態を表す。例えば、施設の劣化水準 j が観察された場合(図中の線分 α' '),点Aが施設の運営を継続するか否かを判断する臨界水準を表し、経済便益が点A以下になった場合に施設の運営が終了する。

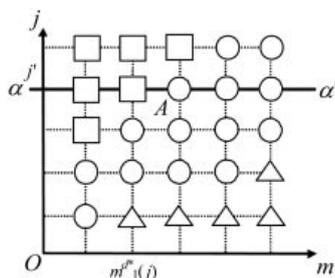


Fig.11 経済性と劣化状態を考慮したマネジメント政策
(織田澤ら, 2004)

Management Policy Based on Economy and Deterioration

c 割引率の適用

小林(2005)は、LCC手法において割引率を用いた方が良い場合と、割引率を用いない方が良い場合について考察している。その背景としては、次のことが挙げられる。LCC手法として、(1)割引率を使用してLCCの割引現在価値を用いる方法、(2)割引率を用いずにLCC費用を直接評価する方法がある。このうち、割引現在価値法は経済理論と整合が取りやすく、多くのアセットマネジ

メントモデルで用いられている。しかしながら、割引現在価値法は将来のLCCを割引くため、供用年数の長いインフラ資産のアセットマネジメントにおいて、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が指摘されている。このため、実務では非割引現在価値法が採用される場合が少なくない。また、単純なLCCの割引現在価値に基づく評価では、将来時点における費用を割り引くため、インフラ資産の長寿命化の効果を積極的に評価できないという指摘がある(例えば、西川, 1994)。

しかし、小林(2005)は、割引現在価値法においてインフラ資産の長寿命化便益を積極的に評価できない原因は割引率を用いる点にあるのではなく、あるインフラ資産に関する補修計画を、それ以外のインフラ資産の補修計画から切り離し、個別にLCCを評価するという方法論にあることを指摘している。すなわち、複数のインフラ資産の補修時期が互いにずれている場合においては、個別インフラ資産の補修計画を割引率を用いずにLCC総費用を資産の供用年数で除した年間平均費用法を用いて評価することにより、システム全体の持続的費用の最小化を達成できる。一方、インフラ資産の補修計画に不確実性が存在する場合には、割引率を用いた割引現在価値法を用いるべきであるとしている。しかしながら、同時に、この結論に関しては、今後さまざまな角度から、より深く吟味することが必要であることも指摘している。

また、貝戸ら(2005)も、割引率を用いたLCC評価が施設の長寿命化戦略を正当化できないことを指摘している。それは、施設の長寿命化戦略における管理者の最大の関心は、初期時点から無限に続く各年度の年平均費用を最小化することにあるからである。

d 劣化予測

インフラ資産の劣化予測については一般に、(1)過去の点検データに基づいた統計的な劣化モデル(例えば、貝戸ら, 2003; 津田ら, 2005)、(2)土木施設の力学的劣化メカニズムに着目した劣化予測モデル(例えば、鍵本ら, 2002)が提案されている。小林らは、主に点検データに基づいた統計的な劣化予測モデルを用いて施設の劣化予測を行っている。

貝戸ら(2003)は、統計的劣化予測モデルに多く用いられているマルコフ推移確率の問題点を指摘し、その改善策として経年を座標軸にした劣化曲線の代替として、劣化速度を座標軸にした劣化曲線を提案している。マルコフ推移確率の問題点として、現時点のデータのみを使用するために、過去の劣化履歴が異なっても現時点で同じ劣化度合いであれば、同じ予測結果を与えるという問題がある。また、経年を座標軸とした平均劣化曲線の算出手法では、実際の劣化を精度良く把握することが困難である理由として、次の2点を挙げている。(1)部材の補修等によって健全度が回復した構造物のデータが含まれるため、劣化予測が実際と比べて緩やかになる。(2)補修等を実施したことにより見かけ上健全度が回復した

データを単純に計算から除外してよいかという問題である。そのため、劣化速度に着目し、2つの健全度間に相対的な時間変化の算出に問題を置き換えている。この概念図をFig.12に示す。ここで、横軸は時間を表し、縦軸の i は健全度を示す。本手法の利点は、対象とする構造物に対して2回の健全度と検査日を得ることができれば、平均劣化曲線の算出が可能となることである。

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過程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、マルコフ推移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確率を推計するモデルである。この考え方をFig.13に示す。ここで、 W_A, τ_A は施設Aの2つの連続する点検時刻を示し、 W_B, τ_B は施設Bの2つの連続する点検時刻を示す。

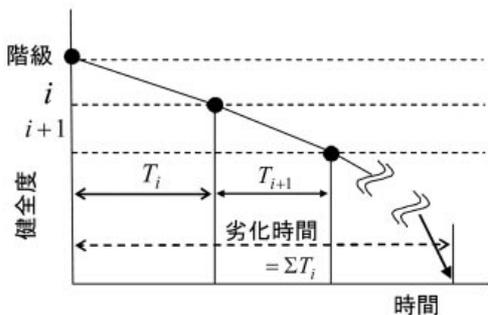


Fig.12 劣化速度に基づく平均劣化曲線算出の概念 (貝戸ら, 2003)

Concept of Estimating Average Deterioration Curve Based on Deterioration Speed

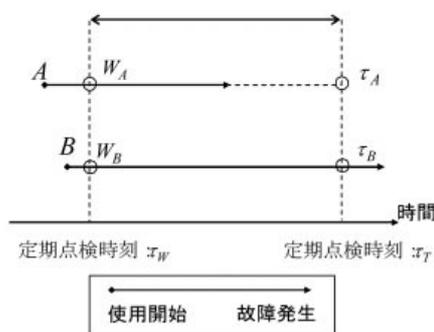


Fig.13 定期点検と施設寿命(青木ら, 2005a)
Periodical Monitoring and Life-Span

マルコフ推移モデルでは定期点検時刻における施設の故障の有無しか予測できないが、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

生存する確率 $\tilde{F}_i(t)$ は、全事象確率 1 から時点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

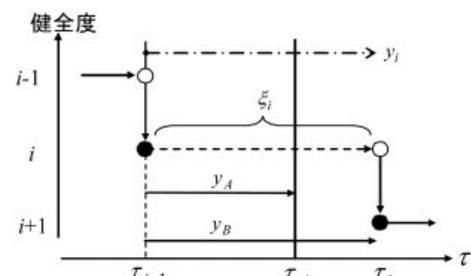
$$\tilde{F}_i(t) = 1 - F_i(t) \tag{1}$$

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

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

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 $f_i(t)$ 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。

また、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レーティングで表示され、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、複数レーティング間の推移確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.14に複数の健全度で評価される施設の劣化過程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 t_{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 t_A は時刻 t_{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 t_B に健全度が1つ進行する。目視点検の場合、時刻 t_{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.14 劣化過程のモデル化(青木ら, 2005b)
Model of Deterioration Process

式(2)と同様に、施設の健全度を複数のレーテ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

$$f_i(y_i) \Delta y_i = \frac{f_i(y_i) \Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \tag{3}$$

と表せる。今、対象とする施設の健全度が時点 y_i まで i

の状態へ推移し、かつ時点 Y_i で $i+1$ に推移する確率密度 $f_i(Y_i)$ 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、

$$f_i(Y_i) = \lambda_i Y_i^{\lambda_i - 1} \quad (4)$$

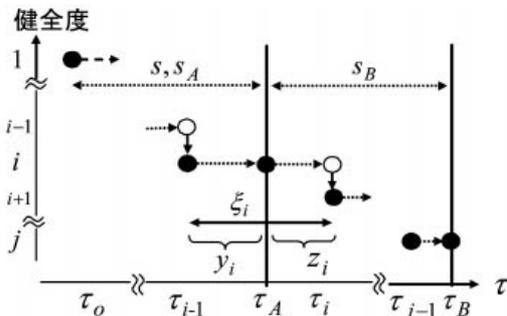
が成立する。 λ_i は健全度 i に固有の定数パラメータ、 λ_i は劣化の加速度パラメータである。

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.15に初期時刻からの劣化過程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 $\bar{\tau}_1, \dots, \bar{\tau}_{j-1}$ 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 $\tau_B = \tau_0 + s_A + s_B$ において健全度 j が観測される同時生起確率 $f_{ij}(s_A, s_B)$ は、

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

と表せる。ここで、 $f_i(s_A, Y_i)$ 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



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.15 初期時刻からの劣化過程と健全度の観測 (青木ら, 2005b)

Deterioration Process from Starting Period and Observation of Health Index

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、マルコフ推移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、従来のマルコフ推移モデルでは、橋梁全体の劣化予測は可能であるが、個別部材のも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。

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 $\lambda_i > 0$ をとると仮定すると、

$$f_i(Y_i) = \lambda_i \exp(-\lambda_i Y_i) \quad (6)$$

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推移確率 $p_{i \rightarrow i+1}$ は、

$$p_{i \rightarrow i+1} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \lambda_{i+1}} \{ \exp(-\lambda_i Z) + \exp(-\lambda_{i+1} Z) \} \quad (7)$$

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。

また、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の一手法で

あるギブスサンプリングを用いている。Fig.16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推移確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.16と同様である。

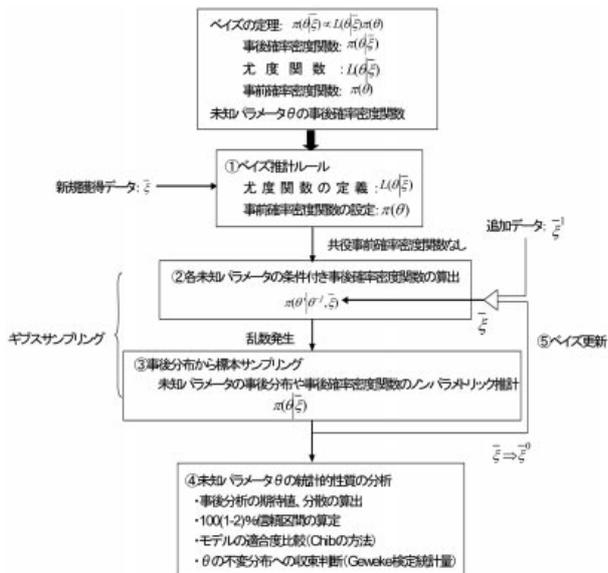


Fig.16 ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計 (津田ら, 2005)

Bayesian Estimation of Weibull Hazard Model for Deterioration Forecasting

この一連の研究の特徴は、次のように整理できる。インフラ資産のアセットマネジメントに関するさまざまな不確定要素をモデル化するために、確率統計的手法を用いている。点検時点の劣化の現状と将来の劣化予測の精度向上のために、点検データの蓄積の重要性を指摘している。補修が行われた施設や部材の点検データがもつバイアスであるサンプル欠損の問題を指摘している。施設の経済的寿命と物理的寿命の双方を考慮に入れたLCC最小化モデルを提示している。割引率を用いた割引現在価値法の結果が必ずしも現場の感覚と一致しないことを指摘している。割引率を用いない年間平均費用法の採用を提案している。しかしながら、インフラ資産の補修計画に不確実性が存在する場合には、割引率を用いることが望ましいとしている。なお、割引率適用の可否については、更なる検討が必要としている。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。過去の劣化履歴を考慮しないマルコフ推移確率の問

題点を指摘し、劣化速度を座標軸とした劣化曲線の作成を提案している。また、統計的手法を用いて施設の劣化過程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、(1) 2 値状態で劣化状態が表現される施設に対応したハザードモデル、(2) 健全度といった複数のレーテ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過程に対応した指数ハザードモデル、(4) 2 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レーテ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。

4 青森県の橋梁マネジメントシステム

青森県では、県内の橋梁の老朽化が進み、近い将来に莫大な維持更新費用が必要となると予想されている。このため、Fig.17に示すような大量更新時代に対応するため、全国に先駆けて橋梁アセットマネジメントシステムを導入している。このシステムでは、県内の延長15m以上の720橋梁を対象としている(青森県土整備部道路課, 2004)。

青森県の橋梁維持管理体系の全体像をFig.18に示す。その中心部が「橋梁アセットマネジメント支援システム」であり、次の4つのステップで構成されている。(1) シナリオ選定、(2) 劣化予測、(3) LCC算定、(4) 優先順位決定(青森県土整備部道路課, 2004)。

青森県の橋梁マネジメントシステムの最大の目的は、納税者からの税金で賄われる維持管理予算を、今後50年間に渡って均等に保つことである。しかしながら、個別の橋梁のLCC計算を行い、それを積み上げて県内全橋梁の維持補修費を積算した場合には、毎年必要な維持補修費が最初から均等にはならない。そのため、いくつかの橋梁についての維持補修手法の代替案を検討し、LCCを計算して毎年の維持補修費が均等になるように調整している(Kanaji et al., 2006)。

橋梁の点検手法については、橋梁アセットマネジメントに必要なデータ収集を実施する新たな点検サポートシステムを採用し、通常橋梁の伝統的な点検では収集していない橋梁の劣化予測やLCC計算に必要なデータをも適切に収集することとしている。(Kigure et al., 2006)。また、点検コストの削減のため、Fig.19に示すようにITを活用して携帯情報端末によって現場作業を行う点検支援システムを開発し、点検の事後作業の大幅な省力化を図っている。また、劣化進行が激しい箇所である端支点

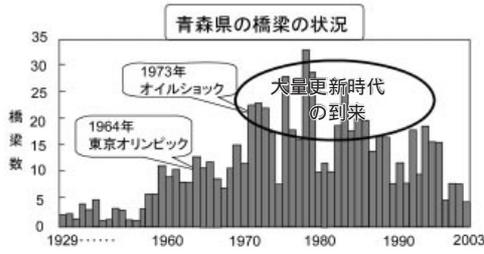


Fig.17 青森県の橋梁の状況 (青森県土整備部道路課, 2004)
Status of Bridges in Aomori Prefecture

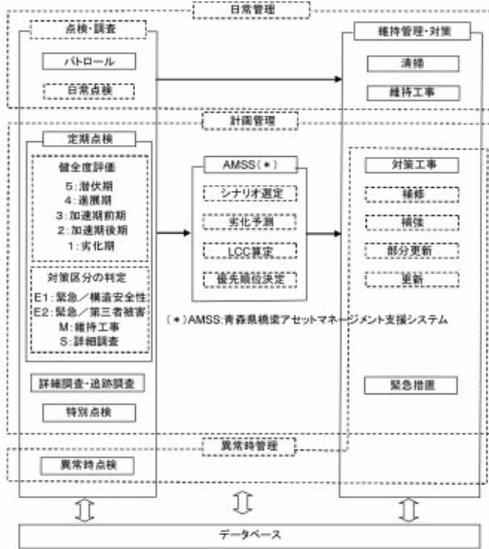


Fig.18 青森県の橋梁維持管理体系
(青森県土整備部道路課, 2004)

Outline of Bridge Operation and Maintenance in Aomori Prefecture

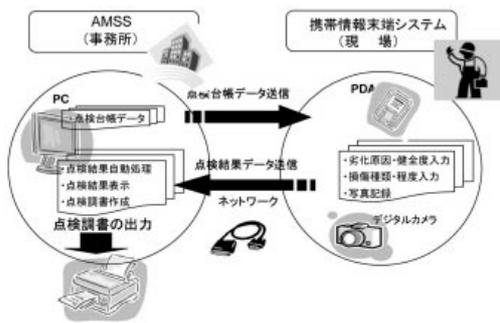


Fig.19 青森県の点検支援システム
(青森県土整備部道路課, 2004)

Inspection Supporting System in Aomori Prefecture

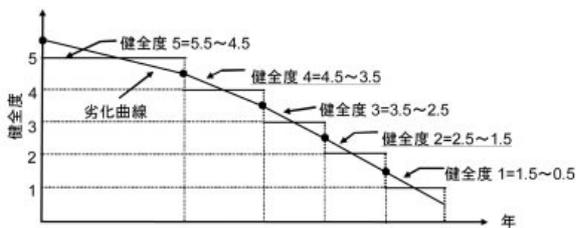


Fig.20 劣化曲線 (Matsunura et al., (2006) より作成)
Deterioration Curve

部を重点的に点検することによって、省力化を図っている。また、橋梁の定期的な点検に加えて、日常のパトロールや点検などの充実を図り、LCC最小化に対応可能な点検データ収集を行っている（青森県土整備部道路課，2004）。

LCC計算式を、維持費（点検，清掃，修理，補修），解体費，更新費の総和と定義している（Matsunura et al., 2006）。劣化曲線の作成には、技術専門家の知見と現地データに基づく手法を用いている。これは、部材の力学的特性等に基づく理論的手法による作成は環境条件や部材の特徴の多様性から困難であり、点検データのみに基づく統計的手法は点検データの不足から困難であるからである。青森県では、2003～2005年の3年間に延長1.5m以上の橋梁の点検を行い、その点検データの分析に基づいて、5段階に分類した健全度の時間的長さを推定している。そして、Fig.20に示すように、各段階の点を直線で結んで劣化曲線を作成している（Matsunura et al., 2006）。ここでは、健全度を離散的ではなく連続的に評価するために、例えば健全度4は4.5～3.5の範囲としている。LCC最小化を実現するために、橋梁の健全度に応じた異なる維持補修手法を準備している（Kanaji et al., 2006）。

青森県の橋梁モデルの特徴は、次のように整理できる。

今後50年間に於ける毎年の維持補修予算を平準化させることを目的に、個別橋梁のLCC最小化を計算した後に、さらに総合的見地からの個別橋梁の補修時期・工法の見直しを行っている。

点検コスト削減のため、ITを活用した携帯情報端末によって現場作業を行う点検支援システムを開発し、点検の事後作業の大幅な省力化を図っている。また、点検作業の省力化のため、劣化進行が激しい箇所である端支点部を重点的に点検することとしている。

劣化曲線の作成には、専門技術者の知見と点検データを活用した手法を用いている。そして、健全度を5段階に分割し各段階の経過時間を推定し、その間は直線で結んでいる。

今後の農業水利施設の資産マネジメント研究の方向性と主要検討事項

ここでは、上記レビューによって得た知見に基づき、今後の農業水利施設の資産マネジメントに関する研究の方向性と主な検討事項について考察する。主要な検討事項として、施設の点検とデータ処理、LCC計算式の決定、施設の劣化予測が挙げられる。

1 点検データの信頼性と蓄積の必要性

施設の健全度の現状と将来予測を的確に行うために

は、膨大かつ適切な施設の点検データが必要である。しかしながら、農業水利施設に関する現存する点検データは質・量ともに十分とは言えない。

劣化予測モデルを作成する際に必要なデータ数と精度については、例えば、津田ら(2005)は、橋梁部材の統計的劣化予測のためのマルコフ推移確率を推定する方法論を提案し、ニューヨーク市が過去10年間(1987~1996年)に実施した目視検査結果を用いて、マルコフ推移確率を任意の時間間隔に対して時間整合的に推定することが可能となることを示した。用いたデータは、ニューヨーク州の定める橋梁検査マニュアルに従い、ニューヨーク市が行った上部構造25部材、下部構造22部材を対象とした目視検査結果で、合計32,902個のサンプルで構成されるデータベースを用いている。これは、どの程度のサンプル数を確保すれば、十分な推定結果が得られるか検証するために、データベースの中から、データをランダムサンプリングしたデータベースを人為的に再構成し、サンプル数の多寡が指数ハザード関数の推定結果に及ぼす影響をChowテストにより分析した。ここで、Chowテストとは、時系列データの構造変化の有無を判定するため、ある時点でデータを2つに分割し、それぞれの期間で推定されたパラメータが等しいかどうかを統計的に検定する方法である。すなわち、指数ハザードモデルの一致性を検定するための帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 を定義し、検定統計量 $\rho(\omega)$ が、有意水準 α %で帰無仮説 H_0 を棄却できるかを計算した。Fig.21は抽出データベースのサンプル数 ω と仮説 H_0 の棄却率 $\rho(\omega)$ の関係を示している。その結果、抽出データベースに含まれるサンプル数が多くなるにつれて、仮説 H_0 が棄却される割合が減少することが読みとれる。この図から仮説 H_0 の棄却率を5%以下に抑えるためには、少なくとも2,000個以上程度のサンプル数を確保することが必要となると考えられる。彼らの結果は、この研究で用いたデータベースに対してのみ成立する事項ではあるが、施設の劣化予測モデルのある程度の推定精度を確保するためには、目視点検の実績を相当程度(2,000サンプル以上)に蓄積することが必要であることが理解できる。

また、小林(2006)は、定期的点検の重要性を次のよ

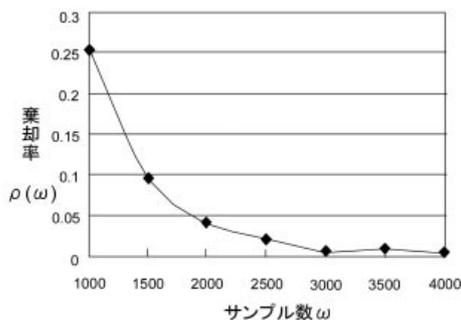


Fig.21 サンプル数と推定精度(津田ら, 2005)
Sample Number and Estimated Accuracy

うに指摘している。定期的点検の目的には2つあり、施設をもれなく点検することによって劣化が進行している箇所を発見し適切な補修方針を検討することと、多くの施設を同時に点検することにより施設の平均的な劣化傾向を把握することである。

点検データの信頼性については、既に補修が行われた施設の点検データをどのようにして扱うかという問題がある。既に補修が行われた施設の点検データを含む場合には、劣化の進展が相対的に遅いデータに基づいて劣化予測モデルを推定するため、施設の寿命を過大に評価する可能性があるとともに、このようなデータを除外して残されたデータのみを用いて劣化予測モデルを推定すると、データ不足から推定量の効率性の保証が困難となる問題が生じることが指摘されている(例えば、小林ら, 2006)

このように、点検データのサンプル数と施設の補修履歴の把握が劣化予測モデル作成に与える影響が大きいことから、施設の定期的点検を継続的に実施することによる点検データの蓄積と、施設の補修履歴の正確な記録が、信頼性の高い劣化予測モデル作成のために必要である。

そのため、施設の健全度評価や劣化予測を行うためには、まずは限られた既存の点検データを用いることとなるが、場合によって特定地域の農業水利施設全体についての一斉調査の実施や、定期的な点検によるデータの蓄積が必要となる。

また、施設の点検を実施する前に、農業水利施設のアセットマネジメントに必要な施設の点検データとして、どのようなものが必要であるかを明確にすることが必要である。その際には、上記の施設の劣化傾向とその施設の機能・性能への影響との関連性を十分に持つものにするのが望ましい。なお、農林水産省が2007年度から本格導入する「農地・水・環境保全向上対策」において、活動の対象とする施設の点検・機能診断を毎年実施することとなっているおり、これによる点検データの蓄積も期待される。しかし、地域住民等が点検・機能診断を実施することから、LCC低減と施設の長寿命化に必要な点検データの精度を確保するための手法の開発も課題である。

具体的な施設点検においては、可能であれば、青森県の橋梁マネジメントで採用しているITを活用した携帯情報端末の利用や、劣化進行が激しいと想定される箇所や部材を重点的に点検するといった省力化措置の採用についても考えることが望ましい。これらによって、点検データの収集と事後処理の大幅な省力化が可能となるからである。

2 ライフサイクルコストLCC計算式の決定

インフラ資産のアセットマネジメントの意思決定ツールとしてLCC手法を用いることにはおおまかな合意はあるが、具体的なLCC計算式については合意が形成されて

いない（例えば、貝戸ら，2005）。そこで、農業水利施設に適したLCC計算式を提案することが必要となる。このためには、例えば、次の事柄についてどのように考えるのが適当かを整理することが必要である。（1）初期建設費を含むかどうかとその取り扱い。（2）事業者費用のみではなく、利用者費用も含めるべきか。（3）維持補修費に何を含まべきか。（4）施設の供用期間の推定。（5）施設の残存価値あるいは廃棄・撤去費用の推定。（6）地震、豪雨等の自然災害による被害である負の便益を含むべきか。（7）割引率を用いるべきかどうか、また、割引率を用いる場合には何パーセントを適用すべきか。

筆者らは、試案として次のことを提案する。（1）中島（2003）は、土地改良事業の費用便益分析においては、他の公共事業と異なり減価償却を適用することとなっている（農林水産省構造改善局計画部監修，1997）ことから、LCC計算に初期建設費とその減価償却を適用すべきと指摘している。しかしながら、既存施設のLCC計算にとっては初期建設費は埋没費用（sunk cost）であるから、そもそも含めるべきではないと考える。また、減価償却は会計上の手法であってLCC計算に含むべきフリーキャッシュフローに影響を与えないことから、不適当と考える。（2）事業者費用だけではなく、可能であれば利用者費用も含めるべきである。農業水利施設の場合は、補修・更新においても事業費用の一部を農家が負担することが考えられる。また、農業用パイプライン・モデル（水資源開発公団，財団法人日本農業土木総合研究所，2003）のように、事故発生時に農家が被る被害も大きい。そのため、事業者費用とともに利用者費用も含むべきと考える。（3）維持補修費は、施設の点検頻度によって点検作業に係る費用が変化したり、異なる補修工法によってその後要求される維持費が変動すること等が考えられる。そのため、維持補修費には、点検作業費用、補修工法の費用、通常の維持管理費等のあらゆる費用を可能な限り含むことが望ましい。（4）施設の供用期間の設定によってLCCの計算結果が大きく影響を受ける。そのため、補修を実施しない場合の施設の供用期間と、各種補修工法を実施した後にどの程度に渡って施設の寿命が延長されるかを推定することが必要となる。土地改良事業の調査・設計時に行う費用便益分析においては、施設の耐用期間は所与のものとして計算することとなっており、例えば鉄筋コンクリート製開水路では40年（農林水産省構造改善局計画部監修，1997）である。しかしながら、施設の実際の利用可能な供用期間は所与の耐用期間と異なる場合が多い。そのため、施設の補修を行わない場合の供用期間と、各種補修工法実施後の供用期間の延長期間（長寿命化した年数）を推定することが必要である。（5）施設の残存価値あるいは廃棄・撤去費用は施設の供用期間や使用環境等の様々な要因に依存する。そのため、一律に決定するのではなく、可能な限り現実に即した価額を推定することが望ましい。（6）地震、豪雨等

の自然災害による負の便益についても、可能であればLCC計算式に含めることが望ましい。この場合の自然災害の発生には不確定要素を含むので、確率的手法でLCC計算式に含めることが望ましい。（7）割引率をLCC計算に用いるかどうか、また、割引率を用いる場合に何パーセントを用いるべきかはLCC計算結果に大きな影響を与える。レビューした研究においても、割引率を用いるかどうかについては意見が分かれており結論は出ていない。しかし、土地改良事業の事業計画時に実施されている費用便益分析では4%の社会的割引率を用いている。そのためLCC計算においても、暫定的に4%の社会的割引率を用いることが望ましい。

3 施設の劣化予測

施設の劣化予測には、（1）点検データに基づく統計的手法（例えば、貝戸ら，2003；津田ら，2005）、（2）部材の力学的特性に基づく予測手法（例えば、鍵本ら，2005）の2つがある。しかし、現状では研究のレビューでも明らかになったように、施設のすべての部材のすべての劣化傾向を力学的手法で予測することは困難であり、点検データに基づく統計的手法が用いられている場合が多い。また、劣化傾向を統計的に的確に予測するために十分に信頼性のある点検データの蓄積は存在しない。そのため、橋梁等では専門技術者の経験・知見と既存点検データに基づいて暫定的な劣化予測モデルを作成する事例が多い。しかしながら、橋梁等の場合と比較して農業水利施設に関しては、施設の劣化機構に関する専門技術者の十分な経験・知見が蓄積されているとは言い難く、また、統計的手法を用いるために十分な点検データの蓄積が不足している。そのため、農業水利施設の劣化予測においては、コンクリートの中酸化や塩害による劣化のように劣化の進行過程に関する力学的特性が把握されており経験式が存在する劣化については、部材の力学的特性に基づく手法を用いることとし、その他の要因による劣化予測については、施設の一斉点検を実施し、それによって得られた点検データを用いた統計的手法に基づくことが望ましいと考える。いずれにしても、その後の点検データの蓄積に応じて劣化予測モデルを逐次更新していくことが望ましい。

ここでは、その中で、劣化予測の具体的事例として、著者らが調査を進めているN地区の開水路の鉄筋コンクリート製躯体の中酸化による劣化予測手法の一例を示す。N地区には、供用8年～40年の水路があり、水路躯体の劣化と初期建設からの経年の関係の調査・分析に適した地区である。

まず、調査を実施する前に、全く点検データが無い状況で、鉄筋コンクリートの中酸化の力学的特性に基づく劣化曲線を作成する。その後、実際の点検データを用いて劣化曲線を補正する。鉄筋コンクリートの中酸化による劣化予測は、潜伏期、進展期、加速期前期、加速期

後期, 劣化期に分類することができる(土木学会, 2001)。

ここで, 潜伏期は中性化深さが鋼材の腐食発生限界に到達するまでの期間, 進展期は鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間である。加速期前期は, 腐食ひび割れが発生してから腐食量がそれほど増大せず, ひび割れがコンクリート表面に確認されるだけの期間であり, 加速期後期は, 腐食により錆汁が見られ, さらに部分的なはく離・はく落が生じる期間である。劣化期は, 鋼材の腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間である。インフラ資産の健全度は5段階に分類することが多いことから, 潜伏期, 進展期, 加速期前期, 加速期後期, 劣化期が, それぞれ健全度5, 健全度4, 健全度3, 健全度2, 健全度1に相当する。

潜伏期の進行予測には式(8)を用い(例えば, 土木学会, 2001), 進展期の進行予測にはYokozaki et al. (1997)が提案している式(9)を用いることとする。ここでは健全度5と健全度4の境界を中性化深さが10mmに到達する時期と定義した。加速期前期, 加速期後期, 劣化期の進行予測には確立された手法がない(土木学会, 2001)ため, 港湾施設に用いられている鋼材の腐食速度(社団法人日本港湾協会, 1999)を参考に, 腐食が一定速度で進行すると仮定する。

$$y = R(-3.57 + 9.0W/B)\sqrt{t} \quad (8)$$

ここに, y : 中性化深さ (mm)

W/B : 有効水結合材比 = $W / (C_p + k \cdot Ad)$

W : 単位体積あたりの水の質量

B : 単位体積あたりの有効結合材の質量

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

Ad : 単位体積あたりの混和材の質量

R : 環境の影響を表す係数

乾燥しやすい環境: $R = 1.6$

乾燥しにくい環境: $R = 1.0$

k : 混和材の影響を表す係数

フライアッシュの場合: $k = 0$

高炉スグ微粉末の場合: $k = 0.7$

$$T_1 = W_{cr} / W \quad (9)$$

ここに, T_1 : 進展期 (y)

W : 鉄筋腐食速度 ($mg/cm^2/y$)

W_{cr} : 腐食ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm^2)

Fig.22に, これらの力学的特性に基づく開水路の鉄筋コンクリート躯体の中性化の劣化曲線と, 実際の点検データに基づいて劣化曲線を補正する方法を示す。ここでは, 潜伏期, 進展期, 加速期前期, 加速期後期, 劣化期

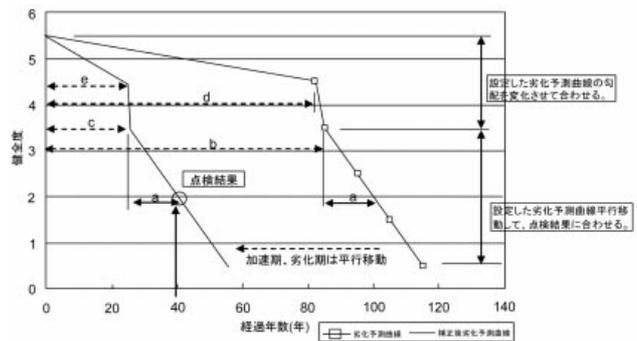


Fig.22 鉄筋コンクリート製躯体の劣化予測
Deterioration Forecast of Reinforced Concrete Body

Table 4 鉄筋コンクリート水路のひび割れタイプ
Different Cracks of Reinforced Concrete Canals

ひび割れタイプ		発生メカニズム
初期ひび割れ		乾燥収縮, 温度応力ひび割れなどで, 他に劣化要因がなければ数年で進行が止まる
供用開始後ひび割れ	外部要因 (構造外力起因)	オーバーロードなど, 外力によって部材が変形して生じるひび割れ(外力との釣り合いでひび割れが進行しない場合もあるが, 釣り合い条件が微妙なので進行性に区分した)
	内部要因 (材料劣化起因)	鉄筋腐食先行型ひび割れ 主に中性化・曝露による鋼材腐食によって生じるひび割れ ひび割れ先行型ひび割れ ASR, 凍害, 化学的腐食, 疲労などによりコンクリートが劣化して生じるひび割れ

が, それぞれ健全度5, 健全度4, 健全度3, 健全度2, 健全度1に相当する。

鉄筋コンクリートのひび割れには様々なタイプがある (Table 4)。中性化と関係したひび割れは「供用開始後のひび割れ - 内部要因 - 鉄筋腐食先行型ひび割れ」に分類されるものである。Fig.23には供用37年と8年の水路のひび割れの分布状況を示した。供用年数によりひび割れの長さが異なるが, 観察されたひび割れの多くは, 水路上部面を胴切りにし, 水路上部から下方にほぼ垂直に伸びる形態を示す。供用37年水路では, ひび割れは, 右岸と左岸のほぼ同じ位置に発達し, ひび割れ間隔は, 約0.8mに規則的に発達していた。このような形態のひび割れは「初期ひび割れ」と呼ばれるもので, 中性化とは関係していないひび割れである。

Fig.24には, 調査地区の供用8年, 21年, 37年, 39年, 40年の5水路を選定し, 灌漑期水位の上下部において, ひび割れが無い部分とひび割れ線上で, 簡易中性化深さ試験による中性化深さ測定の結果を示している。灌漑期水位以下のひび割れのない部分の中性化深さは, (8)式を用いても近似できるが, この地区の中性化式としては $y = 0.3001 t^{0.8115} (r^2 = 0.97)$ (10)

の回帰式の方が相関が高いので, 今後の中性化予測では (10)式を用いる方が適当であると考ええる。また, ひび割れ上では, 中性化は (8)や (10)式より数倍深く進行している。そのため, Fig.22では, ひび割れにより中性化深さが20年で10mmに達した場合の劣化式の修正方

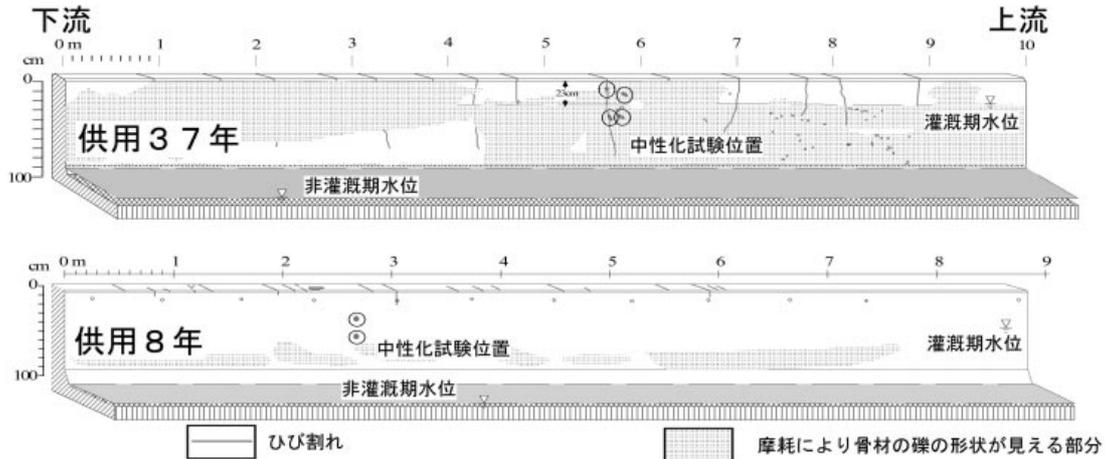


Fig.23 N地区の鉄筋コンクリート水路のひび割れの分布状況

Status of Cracks on Reinforced Concrete Canals in N Area

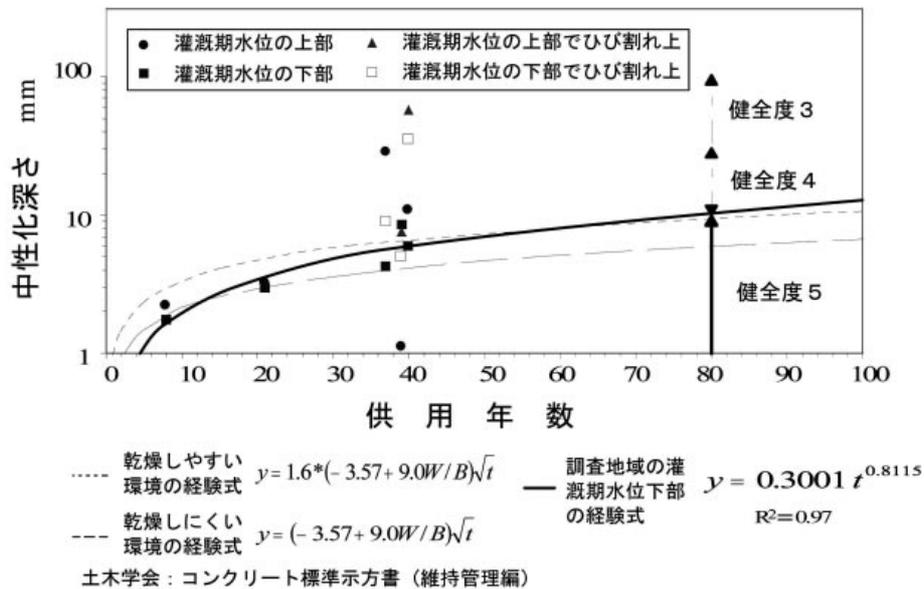


Fig.24 N地区鉄筋コンクリート水路の中性化深さと供用年数の関係

Relationship Between Neutralized Depth and Elapsed Years of Reinforced Concrete Canals in N Area

法を例示している。

実際のコンクリートの劣化は、さまざまな劣化要因が複雑に影響して劣化が進行する複合劣化であり、劣化要因の特定が困難なことが予想される。複合劣化のメカニズムに関する研究は、凍害とアルカリ骨材反応ASR（鳥居ら，1998），凍害と酸性雨（伊藤ら，1999），凍害と塩害（竹田・十河，2001），凍害と中性化，塩害（竹田・十河，2002）など、凍害と他の劣化因子との複合劣化を研究したものが多く。また、塩害と中性化に関しては、植木ら（2001）などがある。武田ら（2005）は、塩害、中性化およびASRなどの劣化機構の複合を供用環境に応じて考慮して構造物の劣化曲線を算出することによって、構造物のLCC評価を試みている。彼らは複合劣化機構として、塩害と中性化，塩害とASR，塩害、中性化とASRの複合について検討している。劣化曲線を求めるために、塩化物イオンや中性化の進行を拡散現象として解

析的に求め、次に、これらの劣化要因を入力とするニューラルネットワークによって鉄筋の腐食グレードを状態確率として求め、最終的に鉄筋腐食によって構造物に生じる浮き、はく離などの変状確率から劣化進展モデル化を行い、以下の興味ある結果を示した。

中性化と塩害が複合することによって、塩害単独の場合と比較して、より早期に劣化が開始し、その後の劣化の進展も促進される。

ASRの複合により塩害による劣化が促進される。劣化機構が複合して作用する場合には単独の劣化機構が作用する場合よりも、劣化の進展が早くなる場合や、対策後の劣化の進展が早くなる場合がある。構造物のLCCは劣化曲線の設定によって大きく変化する。

補修対策後の再劣化の進展について試算した結果、断面修復厚さが不十分な場合には、対策後の再劣化

が早期に現れる。LCCの精度向上のためには、再劣化を考慮することが重要である。

劣化曲線の求め方としては、現在、統計的手法が主流であるが、劣化現象は、劣化機構によっても劣化機構の複合によっても異なると考えられるため、劣化曲線とそれを基に計算されるLCC評価の精度向上のためには、劣化機構および劣化機構の複合現象を研究していくことがますます重要になると思われる。

結 言

農業水利施設のアセットマネジメントに関する研究は、ようやく緒に就いたばかりであり、まずは関連する研究をレビューし、そこから様々な知見を獲得することが必要である。そのため、インフラ資産のアセットマネジメントの研究や適用が進んでいる道路の橋梁等の研究のレビューを行った。そのうえで、今後の農業水利施設のアセットマネジメントに関する研究に必要な主要な課題について検討した。今後は、これらの研究レビューから得た知見を活用しながら、農業水利施設の特性に適したアセットマネジメント手法を開発していくことが必要である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 青森県土整備部道路課 (2004): 青森県橋梁アセットマネジメント基本計画, 36p.
- 4) Cambridge Systematics, Inc. (2005): Portis Release 4.4 Technical Manual
- 5) Cambridge Systematics, Inc. (2005): Portis Release 4.4 Users Manual
- 6) 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
- 7) 土木学会 (2001): コンクリート標準示方書 [維持管理編], 185p.
- 8) 伊藤祐二・来海 豊・田中健治郎・田中 斉 (1999): 酸性雨と凍結融解の複合劣化を受けた超高性能コンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21 (2), pp. 379-384.
- 9) 岩村和平 (2005): ストックマネジメント時代の制度づくりに向けて, 農業土木学会誌 No.73 (11), pp.1-2
- 10) 岩村和平 (2006): 農業水利施設のストックマネジメントに取り組む, 日本水道鋼管 No.78, pp.4-7
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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 No.641/V-46, pp.241-251
- 15) Kaneuji M., Asari H., Takahashi Y., Ohtani Y., Ukon H., Kobayashi K. (2006): Development of a BMS for a Large Number of Bridges, IABMAS2006, 9p.
- 16) Kigure T., Ishizawa T., Hosoi Y., Fujii H., Iwai M., Kaneuji M. (2006): Development of the Inspection Support System for Bridge Asset Management, IABMAS2006, 8p.
- 17) 小林潔司 (2003): アセットマネジメント研究のフロンティア, 土木学会論文集 No.744/IV-61, pp.11-13
- 18) 小林潔司 (2005): 分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性, 土木学会論文集 No.793/IV-68, pp.59-71
- 19) 小林潔司 (2006): 定期的点検とベンチマーキング, サマースクール2006「建設マネジメントを考える」テキスト, p.1
- 20) 小林潔司・熊田一彦・佐藤正和・岩崎洋一郎・青木和也 (2006): サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル, 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.117-130
- 21) Matsumura E., Senoh Y., Satoh M., Miyahara Y., Kaneuji M., Sakano M. (2006): Condition Evaluation Standards and Deterioration Prediction for BMS, IABMAS2006, 8p.
- 22) Milligan J.H., Nielsen R.J., Schneckpeper E. R., (2004): Implementing PONTIS as a Bridge Management Tool in Idaho, University of Idaho, 101p.
- 23) 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法, 農業土木学会誌 No.73 (10), pp.19-22
- 24) 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
- 25) 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
- 26) 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
- 27) 宮元 均 (2002)：適切な施設の維持管理に向けた取り組みについて，農業土木学会誌 70 (5), pp.13-16
- 28) 水資源開発公団，財団法人日本農業土木総合研究所 (2003)：平成14年度水路施設更新の最適化に関する検討業務報告書，55p.
- 29) 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組み，農業土木学会誌 No.73 (11), pp.3-6
- 30) 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
- 31) 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ー，ARIC情報 No. 72, pp.54-61
- 32) 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 vol.89 no.8, pp.24-26
- 33) National Asset Management Steering Group (2006)：International Infrastructure Management Manual - 2006 Edition
- 34) 西川和廣 (1994)：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集 No.501/I-29, pp.1-10
- 35) 農林水産省構造改善局計画部監修 (1997)：改訂解説土地改良の経済効果，大成出版社，761p.
- 36) 織田澤利守・石原克治・小林潔司・近藤佳史 (2004)：経済的寿命を考慮した最適修繕政策，土木学会論文集 No. 722/IV-65, pp.169-184
- 37) 大津宏康 (2006)：アセットマネジメント概論 (2)，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.19-29
- 38) 社団法人土木学会編 (2005)：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版，195p.
- 39) 社団法人日本港湾協会 (1999)：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻)，323p.
- 40) 高木千太郎 (2004)：東京都の道路現況と道路アセットマネジメント，土木学会誌 vol.89 no.8, pp.30-31
- 41) 武田 均・小山 哲・丸屋 剛 (2005)：複合劣化を受けるRC構造物のライフサイクルの評価 - LCC算出によるコンクリート構造物の維持管理計画の試算 - ，大成建設技術センター報，第38号，pp. 28-1 ~ 28-13.
- 42) 竹田宣典・十河茂幸 (2001)：凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集 Vol. 23 (2), pp.427-432.
- 43) 竹田宣典・十河茂幸 (2002)：凍結融解と中性化の複合劣化作用を受けるコンクリートの耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24 (1), pp.735-740.
- 44) 竹田宣典・十河茂幸 (2003)：凍害あるいは中性化を受けたコンクリートの塩化物イオン浸透性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25 (1), pp.797-802.
- 45) Thompson P.D. (1993)：PONTIS: the maturing of bridge management systems in the USA, Bridge management 2. Thomas Telford, London, pp.971-978
- 46) 鳥居和之・奥田由法・松田康孝・川村満紀 (1998)：凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋脚の調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 20 (1), pp.173-178.
- 47) 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
- 48) 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ベイズ推計法，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
- 49) 植木 聡・佐伯竜彦・嶋 毅 (2001)：塩害と中性化の複合劣化に関する反応モデルの基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23 (2), pp.433-438.
- 50) U.S. Department of Transportation (1999)：Asset Management Primer, 30p.
- 51) U.S. Department of Transportation (2005)：Transportation Asset Management Case Studies, Bridge Management, Experiences of California, Florida, and South Dakota, 28p.
- 52) Yokozaki K., Motohashi K, Okada K, Tsutsumi K (1997)：A Rational Model to Predict the Service Life of RC Structures in Marine Environment, Forth CAN-MET/ACI International Conference on Durability of Concrete, pp.777-799

Review of Studies on Asset Management of Infrastructure Asset and Direction of Study for Agricultural Irrigation Infrastructure

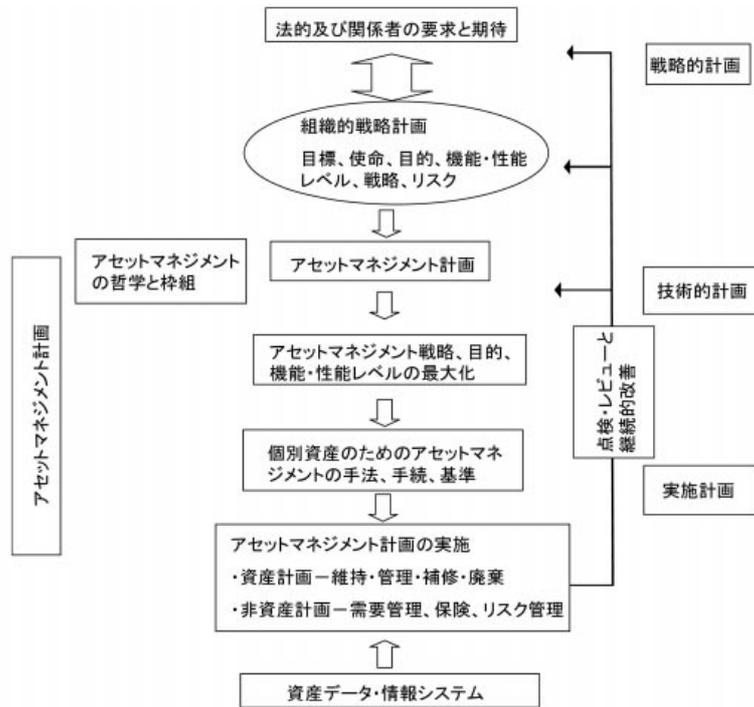
KITAMURA Koji, HONMA Shinya, IMAIZUMI Masayuki, and KATO Takashi

Summary

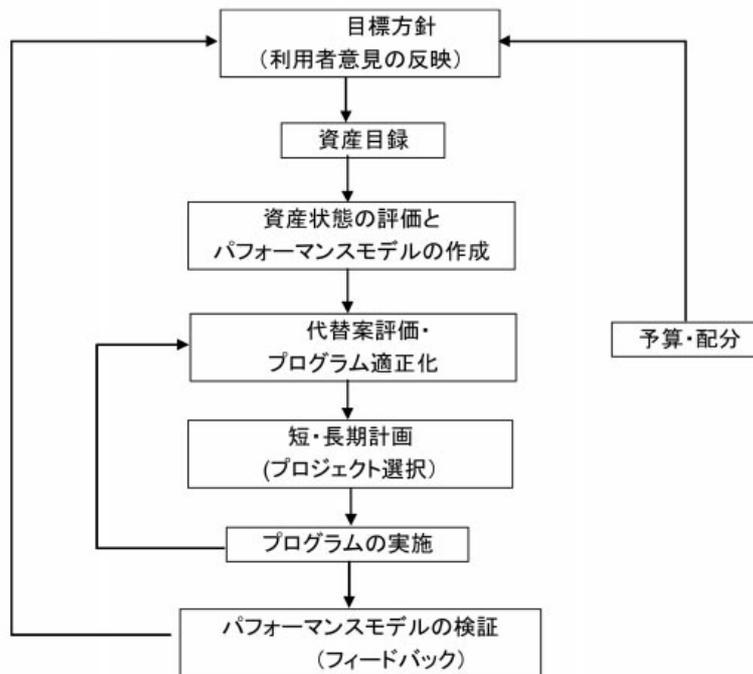
In this study, the studies on the asset management of the infrastructure such as bridges have been reviewed to acquire useful skills and knowledge about the asset management of the infrastructure for carrying out the study on the asset management of the agricultural irrigation infrastructure. The reason is why the study on the asset management of the agricultural irrigation infrastructure has just started although the studies on the asset management of the bridges has been taking the lead in the studies on the asset management of infrastructure. According to the acquired skills and knowledge about the asset management of the infrastructure by reviewing the studies of the asset management of the bridges, the usefulness of the application of the acquired skills and knowledge for the study on the asset management of the agricultural irrigation infrastructure has been reviewed, and the main issues of the studies on the asset management of the agricultural irrigation infrastructure have been identified.

Keywords : infrastructure asset, asset management, agricultural irrigation infrastructure, life-cycle cost

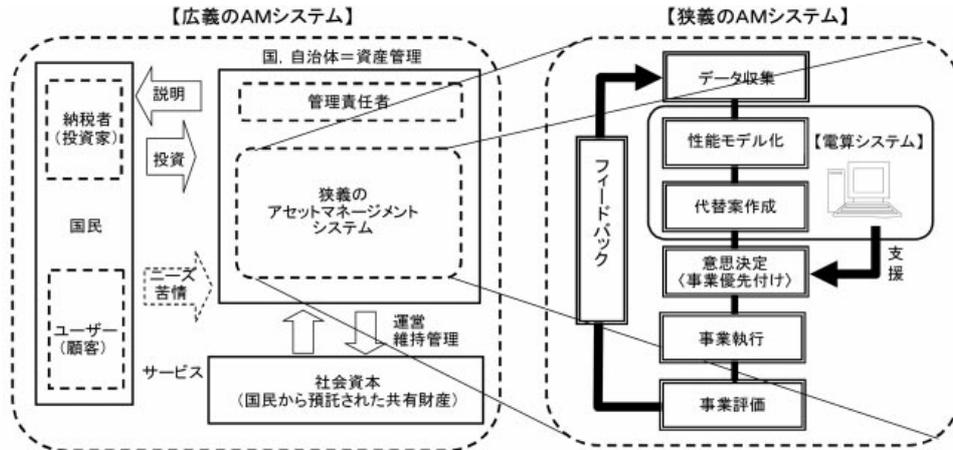
Appendix: インフラ資産のアセットマネジメントの概念図



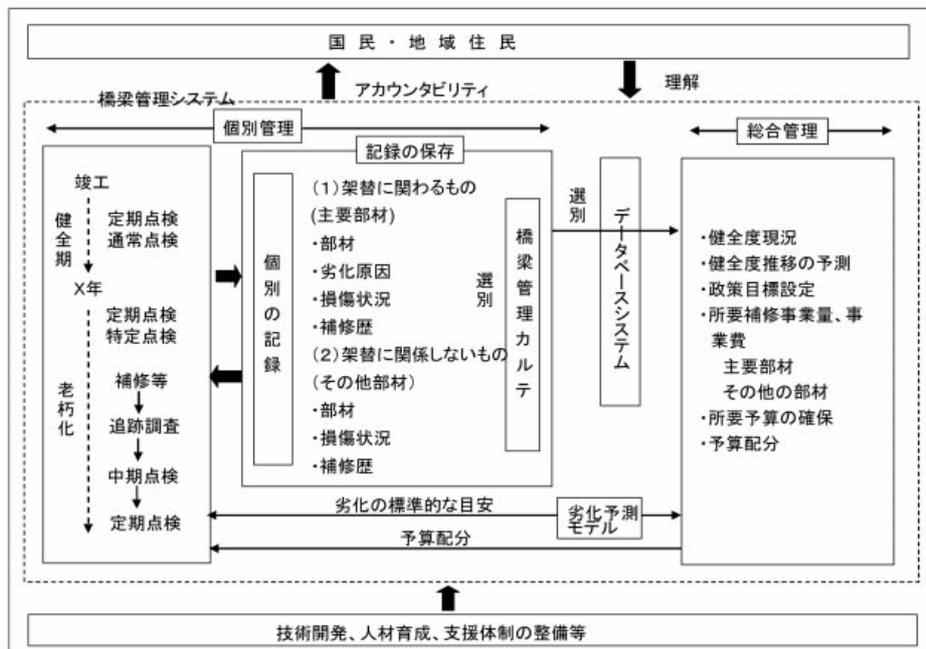
Ap-Fig.1 米国連邦高速道路庁のアセットマネジメントシステム
 (U.S. Department of Transportation, 1999)
 FHWA's Asset Management System



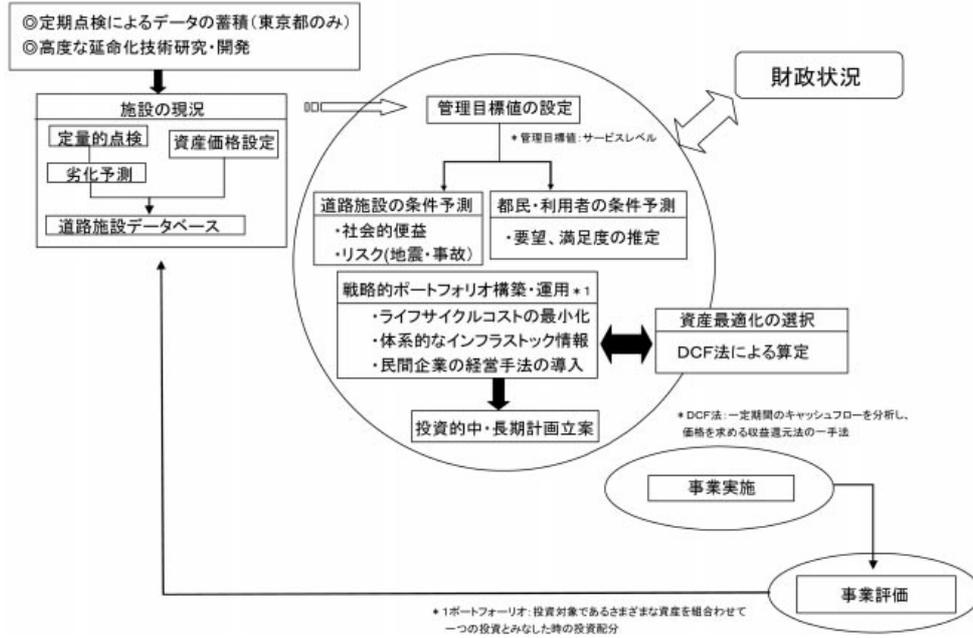
Ap-Fig.2 ニュージーランド国立アセットマネージメント・ステアリング・グループの包括的なアセットマネジメントプロセス (National Asset Management Steering Group, 2006)
 NAMS' Comprehensive Asset Management Process



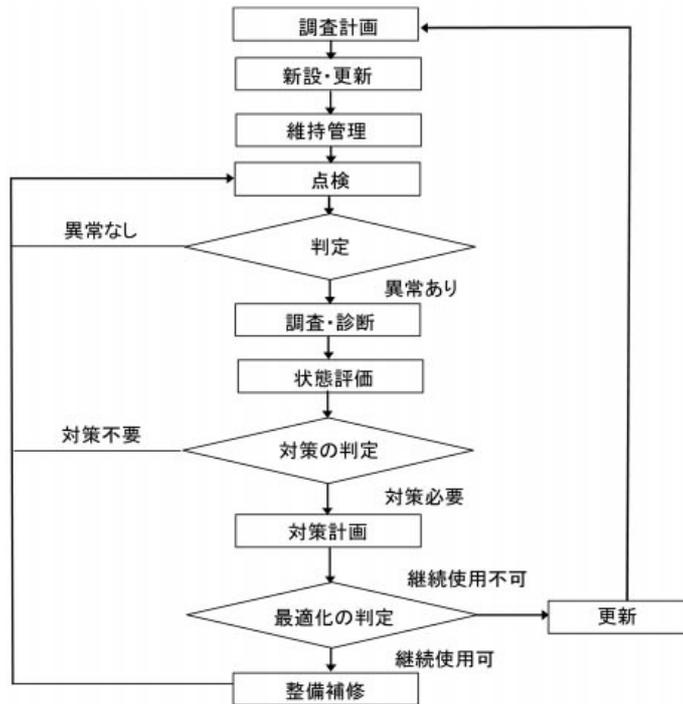
Ap-Fig.3 土木学会の広義と狭義のアセットマネジメントシステム (社団法人土木学会編, 2005)
 Japan Society of Civil Engineers' Broader and Narrow Asset Management System



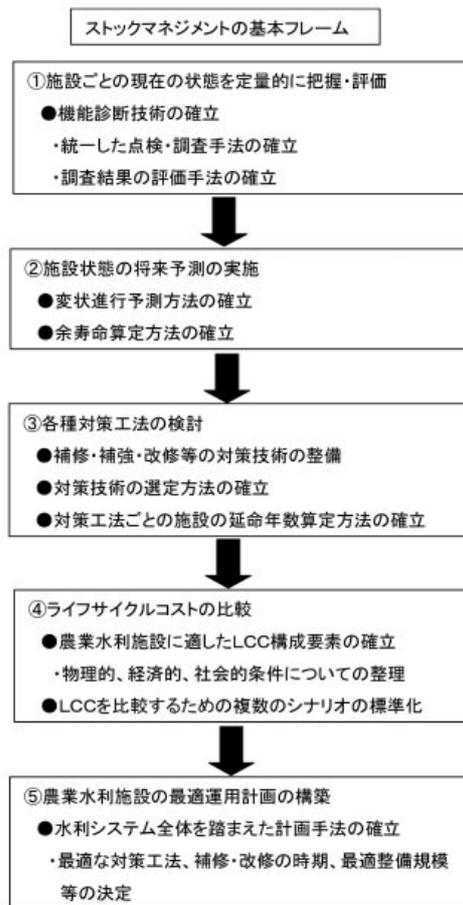
Ap-Fig.4 国土交通省道路局のアセットマネジメントシステムの基本フレーム (中谷, 2004)
 Basic Frame of Asset Management System of Road Bureau, Ministry of Land Infrastructure and Transport



Ap-Fig.5 東京都の道路アセットマネジメントの概要 (高木, 2004)
 Tokyo Metropolitan Government's Outline of Road Asset Management



Ap-Fig.6 農業水利施設の維持管理・更新フロー(案) (宮元, 2002)
 Draft Flow of Operation, Maintenance, and Rehabilitation of Irrigation Infrastructure



Ap-Fig.7 農業水利施設のストックマネジメントの基本フレーム (森, 2005)

Basic Frame of Stock Management of Agricultural Irrigation Infrastructure