

実践的アセットマネジメントと第2世代研究への展望

貝戸清之¹・青木一也²・小林潔司³

¹正会員 大阪大学特任講師 大学院工学研究科フロンティア研究センター (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 株式会社パスコ研究開発センター (〒153-0043 目黒区東山2-8-11)

E-mail: kiakzo6013@pasco.co.jp

³フェロー 京都大学教授 経営管理大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

アセットマネジメントを実践していく上で、その研究全体を俯瞰的視点から捉えると、要素技術と要素技術を繋ぐ総合化技術が重要である。とりわけ、実務を通して獲得できる情報、具体的には目視点検データをアセットマネジメントの中で有効的に活用可能な枠組みを構築することが不可欠である。本研究では、この重要性を指摘するとともに、問題解決のために、目視点検データに基づく統計的劣化予測モデル、具体的にはマルコフ劣化ハザードモデルを中心とするアセットマネジメント手法について概要を述べる。さらに、マルコフ劣化ハザードモデルに実務的要請に基づく改善を加えた最先端モデルに関して、実際の土木施設に対する目視点検データを用いて有効性を実証的に分析する。最後に、現状のアセットマネジメントを踏まえて、研究開発・実践の第2世代に向けた展望について著者らの見解を整理する。

Key Words : *asset management, statistical deterioration prediction, visual inspection, bench-marking*

1. はじめに

団塊的に老朽・劣化が進行する土木施設を、予算制約の下で効率的に維持管理していくための手段として、アセットマネジメントが着目されている¹⁾³⁾。すでに膨大な学術研究が蓄積されているだけでなく、それらを維持管理の実務へ実践していくための検討もなされている。本研究では、アセットマネジメント研究の現状と実践上の課題を述べ、それらを踏まえた上で第2世代のアセットマネジメント研究の方向性について考察する。

土木施設のアセットマネジメントは、既存の土木工学の範疇に留まらず、経済学、経営学や会計学など、文理を融合した広範な学術領域を形成している。したがって、1人の研究者がアセットマネジメント全般を網羅的に把握することは難しい。しかし、広範な学術領域に跨ることは、その一方で門戸が広いことを意味する。土木工学を専門とする研究者であれば何らかの形でアセットマネジメントに関与しているといえる。アセットマネジメントに携わろうと考える研究者や技術者は、これまでの自らの専門分野をベースにアセットマネジメントの要素技術の開発を試みる。実際に、要素技術個々の深度化は急速に進展している。ところが、要素技術の深度化と比較

して、アセットマネジメントの実践は近年まで進んでいなかった。これは実用化を図る上で重要な視点が欠落していたためであったと著者らは考えている。

2で詳述するように、アセットマネジメントでは要素技術以上に、「総合化技術」が不可欠である。単に要素技術と要素技術を繋げただけではアセットマネジメントは機能しない。先述したとおり、文理融合の学術領域であるアセットマネジメントを網羅的に理解することは難しい。しかし、俯瞰的な観点でアセットマネジメントの全体像を構想して、その枠組みの中で要素技術を取捨選択し、改良し、場合によっては新規に開発し、最終目的に向かってシステムとして体系化することにより初めてアセットマネジメントの実践が可能となる。本研究では、このような行動全体を「総合化技術」と定義する。

例えば、総合化技術の重要性を示す代表的な問題として、情報の乖離問題がある。これは、実務で獲得された情報と、研究者が分析のために必要とする情報に乖離が存在することに起因している。情報の乖離問題は、土木施設からの情報獲得技術と解析技術という2つの要素技術間の情報伝達が機能していないという観点において、「総合化技術」の未整備と等価である。実際に現在、多数の管理者においてデータベースが整備されている。し

かし、筆者らの知る限り、データベースが機能し、アセットマネジメントに直接的に貢献しているという事例は見当たらない。詳細かつ膨大な情報を蓄積できるデータベースを構築しておけば、アセットマネジメントにも必然的に利用できるという視点が誤りであることの証左である。近年、著者らの研究成果をはじめとしてアセットマネジメントの実践が飛躍的に進展した理由は、現時点で現場で獲得できる情報（具体的には目視点検データ）に着目して、アセットマネジメントの方法論を構築したことによる。

このような問題意識の下、本研究では、目視点検データを用いた統計的劣化予測手法を中心に、実践的なアセットマネジメントについて概要を述べるとともに、第2世代とも呼ぶべきアセットマネジメント研究の展望について整理する。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を述べる。**3.**で目視点検データに基づく統計的劣化予測手法について、**4.**で先端的な統計的劣化予測手法について、それぞれ述べる。最後に、**5.**で第2世代のアセットマネジメント研究の方向性と課題について言及する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) アセットマネジメントの本質的意味

マネジメントの概念を単純化すると、**図-1**のように「情報」「知識」「意思決定」という3つのプロセスが循環する構造となる。マネジメントとは、最終的に何らかの意思決定を行う行為であると考えられる。当然ながら、「意思決定」には「知識」が必要となり、「知識」を獲得するためには「情報」が不可欠である。ただし、単に情報と言っても、高度知識社会と呼ばれる今日において、我々が手にすることができる情報は膨大な量に及ぶ。この膨大な量の情報から真に有益かつ高度な情報を抽出することがマネジメントの第一歩となるだけでなく、意思決定の質を大きく左右する。しかし残念ながら、土木施設のアセットマネジメントの実践を念頭に置いた場合、土木施設から収集可能な情報は未だに限定的であり、まずは実務を通してどのような情報を獲得することができるのかを把握する必要がある。

また、最終意思決定に至るまでには、通常何らかの制約が課せられる。土木施設であれば、管理する構造物の数量、経年、種類、状態などが、さらに管理者の人員、技術力、予算などの組織体制も制約となる。また、管理者の所属する組織の体質、文化や歴史、その時々々の社会情勢も制約になる。このような制約条件は、管理者個々により多かれ少なかれ異なる。管理者は、個々に課せられた制約の下で試行錯誤的に意思決定を下し、長年に亘る意思決定過程の中で経験（ノウハウ）を獲得していく。

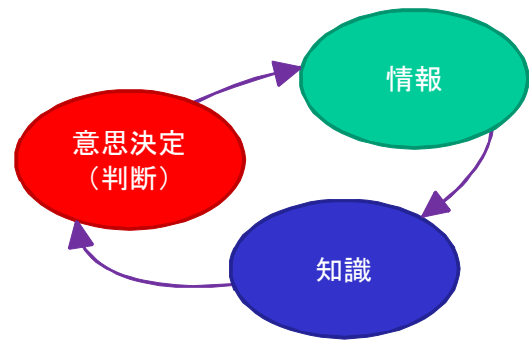


図-1. マネジメントの概念

一般的に、アセットマネジメントや維持管理が経験に依存するという所以はこのような事情によると考えられる。したがって、アセットマネジメントの本質は、ある意味において土木技術者の経験を「見える形」に表現する、すなわち経験に基づく知識という暗黙知をモデル化することにあるといえる。従来、人から人へ直接的に伝えられてきた経験や知識に対して、見える形にされた方法論を人と人との間に介在させることで、より広範に、より不変的に技術継承を行うことができる。理想的なアセットマネジメント手法は、新しい技術継承の在り方を提供し、その持続可能性に貢献するような方法論でもある。

さらに付け加えるならば、上述したようにアセットマネジメントの方法論は管理者個々に異なる。したがって、アセットマネジメントの骨格となる共通部分を管理者間で共有化することは可能であるが、レディメイドシステムをアセットマネジメントの実務で使用することには、限界があると考えられる。また、安易なシステム化やシステム依存傾向は、「意思決定」に対する誤解を生じさせる。すなわち、**図-1**の「意思決定」は管理者自身が行わなければならないということに留意されたい。**3.**以降で詳述する、劣化予測やライフサイクル費用評価は「知識」に相当する部分である。これらのアウトプット（解析結果）は、管理者の意思決定をサポートするための道具であり、「意思決定」そのものではない。

(2) アセットマネジメントの必要性

土木施設のアセットマネジメントの目的は、説明責任（アカウンタビリティ）を果たすことにある。土木施設が急速に整備された高度経済成長期には、土木施設が量的に不足していたことに加え、整備に対する世論の後押しもあった。また、経済成長率が高い水準で推移する状況下では、土木施設のスクラップ&ビルド方式が経済的には有利な政策となるために、あえて維持管理に注意を払う必要性はなかった。しかしながら、現在のわが国では、土木施設が質的・量的に十分に整備されている。さらに社会情勢に代表されるように土木施設を取り巻く環

境が大きく変化し、大半の土木施設に対しては、適切な維持管理のもとで長寿命化を図ることが基本的な維持管理政策となっている。また、一般の国民は、土木施設は永久構造物であるという認識を持っている。土木施設の管理者は、国民（納税者）から土木施設を健全な状態に保つ（サービスを継続的に提供可能な状態に保つ）業務を委託されている。したがって、維持管理の必要性や意思決定の妥当性に関して、ステイクホルダーである国民に対して説明責任を果たす義務を負っている。また、このような観点から考えると、アセットマネジメントの最終アウトプットは説明責任に耐え得るものでなければならない。なお、民営化された鉄道会社や道路会社であっても、影響範囲が広範囲に及ぶ土木施設の場合には、その所有権が公共であるか、民間であるかを問わず、社会資本（公共構造物）であると考えべきである。したがって、何らかの説明責任を継続的に果たす必要がある。さらに、株主、あるいは利用者というステイクホルダーに対しては、依然として直接的な責任を負う。

土木施設の維持管理に対する説明責任は、通常の公共機関が行う説明責任よりも明確に、かつ定量的に行う必要がある。これは土木施設が市場で取引されるような財ではなく、地方（準）公共財としての性格を持っているためである。一般の国民には、ある土木施設の補修工法の適正価格を知ることは困難である。補修を実施するタイミング（投資時期）についても何ら情報を持たない。土木施設は最低限のサービスを提供できれば良いのであって、過剰な品質は必要とされない。適用した補修工法が最高水準の技術である必要はなく、経済的・技術的に妥当な補修工法であることを説明しなければならない。「これがよい」というよりも「これでよい」ということを国民が理解できる言葉で説明しなければならない。

(3) 実践的アセットマネジメント

土木施設のアセットマネジメントは、既存の施設の維持管理に必要な費用の削減、あるいは施設の寿命長を延伸させるような補修の方法を検討することで目標を達成できるような単純なものではない。図-2に、アセットマネジメントの全体構造を表す階層的マネジメントサイクルを示す。アセットマネジメントは、意思決定の時間的視野の違いにより、3つの階層に分類される。土木施設の寿命は長く、その劣化はゆっくりと進行する。そのために、まず施設の劣化過程を長期的にモニタリングするための戦略レベルにおけるマネジメントサイクルの構築が必要となる。戦略レベルでは、ライフサイクル費用分析等の経済分析を用いた長期シナリオの設定と目標達成のために必要な予算の把握および合理的な配分方法を設定する。このような予算計画や補修戦略を立案するため

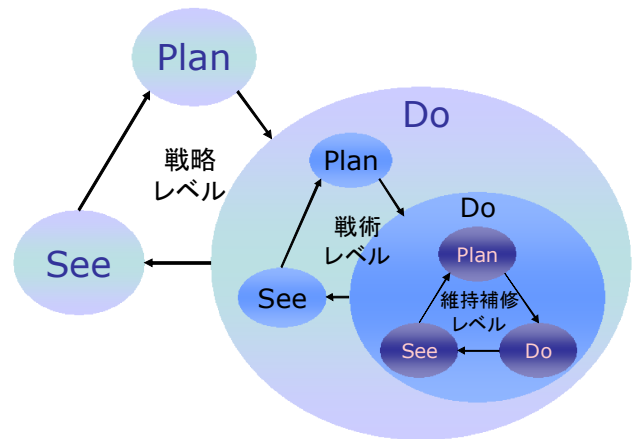


図-2 階層的マネジメントフロー

には、将来時点における補修需要を推計するための劣化予測モデルが必要となる。多くの土木施設を同時に管理する維持管理の現場では、土木施設の維持管理に関する大量の時系列データが生成され、それらを用いた高度な情報分析技術が要求される。統計的劣化予測モデルは、図-2の維持補修レベルにて日常的に生成された情報を用いて、戦略レベルや戦術レベルのインプット情報として構築されるものであり、現場の技術者と意思決定者間の合意形成のための情報としてその信頼性が確保されなければならない。また、長期的シナリオでは、既存施設の継続的な補修と寿命を迎えた施設の更新のタイミングを同時に考慮する必要があり、シナリオと連動した会計システム⁴⁾の構築が必要となる。

一方、戦術レベルや維持補修レベルを担当する技術者は、戦略レベルにおいて設定されたアセットマネジメントの基本方針に従い、住民要望等の緊急を要する対応とのバランスを図りながら日常的な業務の合理化を目指す。補修による長寿命化の効果等、個々のプロジェクトで得られた知見は、ナレッジデータとして蓄積され、他プロジェクトでの適用が検討される。このように、PDCAサイクルによるスパイラルアップにより、順次、システム全体が改善されるような学習機能を有するマネジメントシステムが機能しなければならない。

以上に述べたように、アセットマネジメントの実践のためには、土木技術に留まらず、文理融合した広範囲な要素技術が必要とされ、さらにはそれらの要素技術が有機的に連動することではじめて実用的なマネジメントサイクルが構築され運用される。1990年度以降、アセットマネジメントの必要性が認識され、各方面でアセットマネジメントの導入に向けた検討が行われた。その際、劣化予測モデルやライフサイクル費用分析といったアセットマネジメントにおける代表的な要素技術に関する研究からスタートする必要があった。しかしながら、維持管

理を担う現場の担当者には、学術的研究が体系的に整理されることを待つまでの時間的猶予はなく、施設の老朽化が急激に進む一方で維持管理費の確保が困難となったことにより、直ちにアセットマネジメントの計画作りに取り組む必要があった。土木施設の維持管理の現場の厳しい実態が明かとなったことにより、アセットマネジメントの取り組みが急速に進んだと言えよう。このように、アセットマネジメントは、要素技術に関する研究とそれを繋ぐ実践的取り組みとを同時に実施するために、研究者と施設の管理者、サービスを提供するコンサルタント等の実務者のそれぞれが従来の役割の垣根を越えて、アセットマネジメントの課題に取り組む必要があった。

本研究における「実践」の定義は、アセットマネジメントという新しい学術領域による研究成果としての要素技術を“総合化する”ことにより、現場の維持管理業務で実現可能なアセットマネジメントシステムを構築したことに関する実践と、多様な学術領域により形成されるアセットマネジメントを、様々な関係者間の協働によってつくりあげた取り組みそのものに関する実践の2つの意味を含んでいる。

現在まで、要素技術個々とそれらを用いたマネジメントシステムに関する技術の標準化は図られていない。そのなかで、研究者や実務者により開発された新たな技術は、学会等の公の場で議論することによりその妥当性が評価され改善されなければならない。本研究は、以上の視点にたち、筆者らがこれまで取り組んできた実践的アセットマネジメントを構築するにあたっての考え方について具体的な事例をもとに述べるものであり、目視点検データを用いた研究開発が現場の維持管理業務を踏襲したマネジメントシステムを合理的に構築する考え方に独創性・新規性が存在するとともに、その構築過程に関する有用な情報を読者へ提供する。

(4) アセットマネジメントの難しさ

アセットマネジメントの難しさとして、①土木施設個々の異質性、②情報の乖離、をあげることができる。①については、土木施設一つ一つが受注生産物であることに起因する。もちろん、定められた仕様に基づいて設計・施工されるが、細部構造や材料特性は異質なことが多い。さらに、供用中の使用条件や環境条件は完全に異質である。特に劣化過程に介在する異質性は、マクロな意思決定では問題になることは少ないが、ミクロな意思決定では重要な問題となる。この点に関しては、4.で具体的な事例を述べる。

一方で、②がアセットマネジメントの実践で大きな弊害となっている。つまり、実務で点検などを通して取得される情報と、学術的な検討から必要とされる情報が大

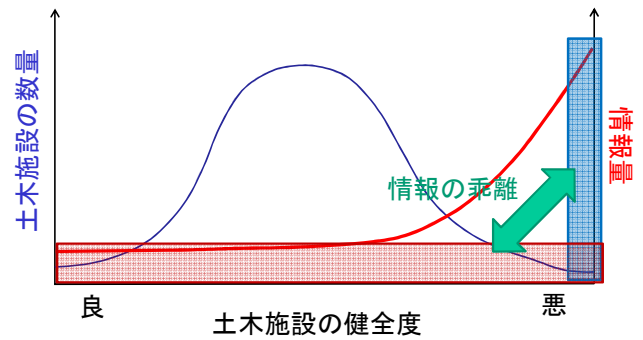


図-3. 土木施設と情報量

きくかけ離れている。これを模式的に図示する。図-3は、ある管理者が管理する土木施設群の健全度に関する分布を仮想的に表現している。大半の構造物の健全度は「中」程度であり、「良」と「悪」が同程度に存在している。さらに、これらの土木施設を維持管理していく上で必要となる情報量についても同図中に示している。情報量は土木施設の健全度が悪くなるにつれ、急激に増加することが読み取れる。これまでの維持管理工学が対象とする範囲は健全度の悪い土木施設、すなわち青色の領域であった。当然ながら悪い土木施設を具体的にどのように維持管理していくかが主たる維持管理の目的であったため、高度な検査を行い、その状態把握に務めてきた。一方で、アセットマネジメントが対象とする範囲は一部の悪い状態の施設だけではなく、全ての土木施設である。土木施設に関する情報が豊富にある青色の領域を全土木施設に拡大することができれば、これまで維持管理工学で培った知見や方法論をそのままアセットマネジメントに適用することができる。しかしながら、実務で獲得する情報を変えることは、維持管理業務そのものを変えることである。点検マニュアル等の見直しは言うまでもなく、報酬体系の変更も伴うことになり、その実現可能性は短期的には低い。したがって、現実的には、現状の点検業務の下で、土木施設から抽出された限りのある情報を活用し得るようなマネジメント手法を構築していかなければならない(図中の赤色の領域)。この青色と赤色の領域が本研究で指摘する情報の乖離問題であり、研究者が現場を出発点として研究をスタートしていないことに起因する。現象のメカニズムを精緻に解明することは、工学的に重要な課題である。しかし、現場では目視点検という定められた必要な点検行為を実施しており、その行為を超えて必要以上に情報を集めることにインセンティブは働かない。アセットマネジメントを稼働させるためには、現時点で獲得されるデータをもとにして方法論を組み上げていく必要がある。

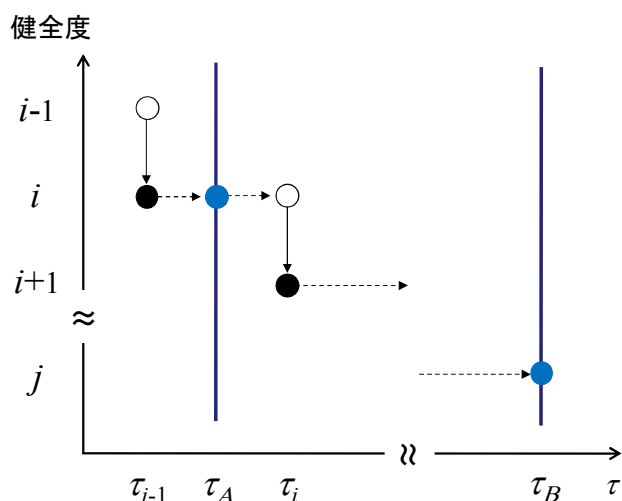


図4. 土木施設の劣化過程

(5) 目視点検データの不確実性

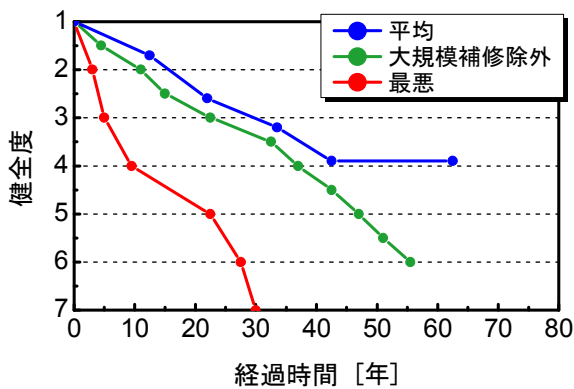
前節では、情報の乖離問題がアセットマネジメントを實踐していく上で大きな弊害となっていることを指摘した。図3の赤色の領域が全ての土木施設から獲得することのできる情報であると述べた。全ての管理者において全土木施設に対して一律に実施しなければならない点検は目視点検のみである。したがって、赤色の領域は、具体的には目視点検で獲得できる情報となる。しかし、実務で獲得される目視点検データはアセットマネジメントに用いることはできないという認識が強い。残念ながら、未だに目視点検は、土木施設の損傷・劣化を検出する行為のみに止まっている。目視点検はアセットマネジメントを實踐する上で不可欠な劣化過程に関する情報を獲得するための手段でもある。実際に、目視点検データを出発点とする劣化予測によりアセットマネジメントを稼働させることで、ライフサイクル費用評価において数億円、数十億円の費用削減に貢献することもあり得る。目視点検に対する意識を変えることの重要性をまずは指摘しておきたい。

土木施設の目視点検結果は通常、多段階の離散的な評点（健全度）として与えられる。いま、目視点検結果が J 段階の健全度で評価されたと考える。健全度1が新設状態であり、健全度 J は最も劣化が進行した使用限界状態である。このとき、ある土木施設の劣化過程が図4のように与えられたと仮定する。同図において、土木施設は時点 τ_{i-1} で健全度 $i-1$ から i へ、時点 τ_i で健全度 i から $i+1$ へ進展している。当該土木施設がセンサー等により常時モニタリングされている場合には、このような劣化過程に関する完全な情報を得ることができる。一方で、 τ_A と τ_B は目視点検を実施した時点をそれぞれ表している。容易に理解できるように、目視点検を通して劣化過程に関して獲得できる情報は、1回目の目視点検の時点 τ_A で健全度

が i であること、2回目の目視点検の時点 τ_B で健全度が j であること、のみである。すなわち、目視点検は点検時点での健全度を記録しているに過ぎず、任意の健全度から次の健全度に推移する時点を正確に捉えることはできない。したがって、目視点検データを用いて劣化予測を行う場合には、このような不確実性の存在に留意することが重要である。また、実際の健全度の推移に基づいて劣化予測を行う場合には、2回の目視点検の点検間隔が重要となる。すなわち、健全度が同じ i から j に推移するような場合であっても、点検間隔が異なると劣化過程も異なるからである。点検間隔はマニュアルなどで定められてはいるものの、厳密には一律ではない。点検間隔 Z も変数であり、不確実性を含む。目視点検では劣化過程に関する限定的な情報しか獲得できないばかりか、獲得可能な情報には不確実性が存在する。しかしながら、限定的かつ不確実性を有する情報のみであっても確率モデルにより劣化過程を定式化し、点検データで統計的に推計することで土木施設の劣化予測を行うことが可能である。

(6) 目視点検データを主体としたアセットマネジメント

目視点検データを用いて劣化予測を行う検討は、これまでにも数多く実施されてきた。中でも、わが国の橋梁分野のアセットマネジメントに対して、1990年後半に多大な影響を与えた米国ニューヨーク市（以下、NY市と略記）・ヤネフの研究は実務的な評価が高い。ヤネフはNY市の橋梁維持管理の責任者（Director）であり、自らの目視点検データを用いて維持管理計画を立案し、議会で予算要求を行う立場にある。目視点検データに基づく橋梁の劣化予測は維持管理計画を大きく左右するだけに、極めて重要な要素技術である。図5は、ヤネフが1994年の目視点検データを用いて橋梁の劣化予測を実施した事例である⁵⁾。橋梁の経年を横軸に取り、対象橋梁の経過年に対する目視点検データ（NY市の場合、7段階の健全度評価を採用）をプロットし、ある一定の年数でグルーピングした後でグループごとに平均健全度を算出している。NY市の場合、平均すると毎年800橋程度の橋梁を維持管理していることになる。図中の青色が平均的な劣化曲線であり、赤字が最悪のケースを示している。青色の平均劣化曲線は40年を経過した段階から健全度が低下しなくなることがわかる。これは40年を経過した橋梁に対しては何かの補修や補強といった対策が講じられるためである。このような方法は最も簡便であるが、実際の劣化現象と比較して劣化を緩やかに評価してしまうことが報告⁶⁾されており、維持管理計画の立案やアセットマネジメントの劣化曲線に使用することができないといった問題点があった。この問題を解決するために、ヤネフはNY市の橋梁の過去の大規模補修に関する履歴を全て調



*実際のNY市の健全度は、7が新設で、1が使用限界である。

図-5. 目視点検データを用いたNY市の橋梁劣化予測⁹⁾

査し、補修・補強が実施されていないことが明らかな橋梁のみを抽出した。場合によっては、大規模補修の実施が確認されないような橋梁であっても、過去の通行止めが確認された際には解析対象から除外した。以上のような操作を行って、再度劣化曲線を算出した事例が同図の緑色の劣化曲線（大規模補修除外）である。大規模補修除外後の劣化曲線では、橋梁が健全度7に到達する平均的な年数は約60年であることが読み取れる。実務者が自らの目視点検データと過去の補修履歴を丹念に調べ上げ、劣化曲線を算出した事例は橋梁分野においては皆無であった。ただし、当該研究においては、大規模補修が実施された橋梁（あるいは実施された可能性を否定できない橋梁）を除外した結果、劣化曲線（緑色）の算出に使用した橋梁数は40橋程度であった。したがって、800橋分のデータがあるにも拘わらず、40橋分のデータしか使用できないこと、さらには大規模補修された橋梁は劣化が早い等の理由があるはずであり、そのような橋梁を除外することによりバイアスが発生する可能性があること、が問題となる。これに対して、貝戸ら⁷⁾は、2回の目視点検データを用いて相対的な劣化速度を算出し、その劣化速度に基づいて劣化曲線を算出する方法を提案し、NY市のデータへの適用を試みている。その結果、図-5と同様の精度を得ることに成功している。しかしながら、上記の2つの手法のいずれにおいても、2. (5) で述べた目視点検データの不確実性の影響を考慮していないこと、劣化要因の分析や劣化要因に応じた劣化曲線の算出ができないことが問題であり、また確定的な劣化予測に止まっている。

一方で、目視点検データのような離散的な状態変数間の推移を確率的に表現するモデルとしてマルコフ連鎖モデル⁸⁾がある。マルコフ連鎖モデルでは、ある状態から任意の状態へ推移する確率をマルコフ推移確率で表現し、その劣化過程をマルコフ推移確率行列に基づいて算出す

る。土木施設の健全度間の推移をマルコフ推移確率で表現すると考えれば、目視点検データを用いて土木施設の劣化過程を記述することが可能である。さらに、マルコフ連鎖モデルの概念は単純であり、モデルの汎用性と柔軟性に優れている。実際に米国の代表的な橋梁マネジメントシステムであるPONTIS⁹⁾にも劣化予測モデルとして搭載されている。しかし、マルコフ連鎖モデルを目視点検データに基づいて推計する際には、上述した不確実性に関する課題を解決する必要がある、現実には高い精度での推計は極めて困難であった。実際にPONTISでもマルコフ推移確率は技術者の主観的判断で直接入力されるのが実情である。

以上のように、ヤネフに代表される目視点検データに基づく劣化予測手法には推計精度やアセットマネジメントへの適用可能性に課題が残る。一方、PONTISに代表されるマルコフ連鎖モデルは実務データ（目視点検データ）を用いてモデル推計ができないという点において、実務との整合が取れていない。したがって、当該分野では、実務で獲得できる情報と劣化予測技術を理論的な枠組みの中で整合的に繋ぎ合わせるという総合化技術が求められていた。

わが国のアセットマネジメント研究は、著者らが開発した、目視点検データに基づきマルコフ連鎖モデルを推計するマルコフ劣化ハザードモデル¹⁰⁾ (3.および4.で詳述)の開発により、飛躍的な実用化が図られた経緯がある。当該モデルは、学術的な新規性やモデルの精緻化に加え、現体制の中で現場で獲得できる情報を出発点としてモデル構築が図られた点に実務的優位性を見出すことができる。さらに、マルコフ連鎖モデルは、マルコフ決定モデル¹¹⁾へと拡張することで期待ライフサイクル費用の最小化を達成する最適補修政策を導出することが可能である。マルコフ連鎖モデルとマルコフ決定モデルを援用することで、現場での情報獲得手段である目視点検を出発点とするアセットマネジメントを要素技術間の有機的連動性を考慮した枠組みの中で構築することが可能となる。さらにマルコフ劣化ハザードモデルは、実務を担当する施設管理者との議論により、3.の基本モデルから4.で述べる先端的モデルへとカスタマイズされ、実務における意思決定やアセットマネジメントシステムへ反映されていった。したがって、3.、4.では方法論を中心に概要説明を行うが、これは、構造物管理者との議論を通して問題点を抽出して研究開発を手掛けた産官学の共同研究（明確な区分けはできないが、産がシステム開発、官がニーズの組み上げ、学が要素技術と総合化技術の開発を担当）の成果である。なお、著者らが関与したアセットマネジメントシステム開発のうち、代表的なものを例示すると、国土交通省近畿地方整備局¹²⁾、中日本高速

道路株式会社¹³⁾, 阪神高速道路株式会社^{14), 15)}, 大成建設(日本下水道事業団)¹⁶⁾, 京都市¹⁷⁾, 三重県, 青森県などがある。

3. 統計的劣化予測モデル

(1) マネジメント曲線

アセットマネジメントを実践する第1の目的は、ライフサイクル費用の最小化を達成する最適補修戦略を決定することである。単純に述べると、ライフサイクル費用は、土木施設を維持管理していく上で必要となる費用を見積り、その投資タイミングを決定するだけであり、ライフサイクル費用の最小化問題は概念的には受け入れ易い。ところが、ライフサイクル費用評価に対して、懐疑的な見解が多いことも事実である。ライフサイクル費用を構成する2つの要素のうち、費用に関しては、過去の実績や補修データベースをもとに信頼性の高い数値を算出することが可能である。また仮に費用に関する情報が存在しなくとも、補修工法に対して、ある程度精緻な積算を行うことができる。したがって、ライフサイクル費用評価に対する懐疑的な見解は、もう一方の要素である投資タイミング、すなわち劣化過程のモデル化(劣化予測)に関する信頼性の低さに集約される。

劣化予測手法には大別すると、力学的手法と統計的手法がある。力学的手法は、模型実験などを通して、劣化・損傷のメカニズムを解明した上で理論的検討、あるいは経験則に基づいて予測式を導出する手法である。一方、統計的手法は膨大な量の目視点検データの背後に存在する統計的規則性を記述する手法である。したがって、力学的手法は特定の土木施設や部材を対象とするミクロな視点での劣化予測には有利であり、統計的手法はその反対に土木施設全体を対象とするマクロな劣化予測に有利であると言われている。力学的手法と統計的手法のいずれをアセットマネジメントの劣化予測手法として採用するかは、当然ながらその最終目的に大きく依存する。しかしながら、力学的手法は対象とする劣化・損傷ごとに必要となる情報や予測式が異なること、必要となる情報の取得が通常の点検業務に組み入れられていないことから実践上不利であることは否めない。これとは対照的に、統計的手法は、全ての土木施設に目視点検が義務付けられていること、目視点検結果が離散的な健全度として評価されているならば、対象となる土木施設や劣化・損傷が変化しても劣化予測手法(例えば、マルコフ連鎖モデル)が不変であることから実務との整合性は高い。したがって、本研究では統計的手法を採用し、アセットマネジメントへの適用を試みる。

目視点検データに基づく統計的手法に関しては、1点

だけ事前に留意しておくべき事項がある。それは、**図4**からも理解できるように、縦軸が目視点検結果(健全度)であることである。目視点検は点検者の経験的、主観的判断により、土木施設の表面状態から土木施設の健全度を評価するものである。したがって、力学的手法のように、耐荷力や耐久性などの物理的性能を把握できるわけではない。力学的手法のアウトプットをパフォーマンス曲線と呼ぶとしても、統計的手法のアウトプットは決してパフォーマンスを表現しているわけではない。ここで大事な点は、目視点検は土木施設の物理的性能を表現していないが、目視点検結果と補修工法・タイミングが連動していることが多く、補修工法やタイミングを決定するための情報を直接提供していることである(そもそも目視点検の健全度は補修時期を見定めるために設定されている)。したがって、アセットマネジメントにおける劣化予測の目的がライフサイクル費用評価における投資タイミングの決定にあるならば、目視点検結果を評価軸に劣化予測を行う統計的手法の方が実務とは整合的である。パフォーマンス曲線と比較して述べるならば、統計的手法のアウトプットは、「マネジメントの対象となる劣化過程に関する平均値的情報」を与えるマネジメント曲線とでも言うべき性質を備えている。さらに、**4**で具体的な事例をあげるが、近年の統計的手法の急速な進展により、土木施設全体を対象としたマクロな劣化予測だけでなく、土木施設個々を対象としたミクロな劣化予測も可能となっている。実務との整合性や、技術面を勘案すると、統計的手法の方が実践的なアセットマネジメントに適しているといえる。

(2) マルコフ劣化ハザードモデル¹⁰⁾

2. (5), (6) で述べたように、目視点検の結果として与えられる多段階の健全度を用いて、土木施設の劣化予測を行う際には、マルコフ連鎖モデルが理論面、実務情報との整合性、モデルの柔軟性や汎用性など、様々な点で優れている。しかしながら、マルコフ連鎖モデルの核となるマルコフ推移確率を目視点検データに基づいて推計することは容易ではない。

例えば、単純にサンプルを数え上げることでマルコフ推移確率を推計するような手法(以下、単純数え上げ法と略記)も見受けられるが厳密な手法ではない。いま、1が新設、3が使用限界で表されるような3段階の健全度で評価される土木施設を考える。同一の土木施設に対する目視点検結果2回を1サンプルとして、初回の点検結果が1であるサンプルが100個蓄積されているとする。これらのうち、2回目の点検結果が1であるサンプルが60、2であるサンプルが30、3であるサンプルが10であるときに、単純数え上げ法では、1から1へ推移するマルコフ推

移確率は0.6, 1から2は0.3, 1から3は0.1となる。しかし、この場合には、図-4に示したように、ある状態からある状態に劣化状態が変化するタイミングを捉えられないという目視点検の不確実性を考慮することはできない。さらに、マルコフ推移確率は時間間隔が変化すると変動する。例えば、健全度1から2へ推移する確率であっても、推移する間隔を1年間とするのか、10年間とするのかでは確率が異なる。点検間隔はサンプル個々で異なることが多く、異なる点検間隔を有するサンプルを単純に数え上げることはできない。さらに、実務面から述べると、目視点検の間隔は構造物の状態と相関があると考えられる。したがって、特定の点検間隔のサンプルだけを用いてマルコフ推移確率を推計することは、非効率な情報利用方法となるだけでなく、推計結果にバイアスが発生することにもつながりかねない。

著者らが開発したマルコフ劣化ハザードモデルは上述の課題を克服した極めて汎用性の高い劣化予測モデルである。詳細は参考文献 10) 18) 19) に譲るが、多段階の指数ハザード関数を用いて、時間間隔 z の間でレーティングが i から j ($> i$)に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z)$ ($i = 1, \dots, I-1; j = i, \dots, I$)を、

$$\pi_{ij}(z) = \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} \exp(-\theta_m z) \quad (1)$$

($i = 1, \dots, I-1; j = i+1, \dots, I$)

と定義する。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} = 1 & (m = i \text{ の時}) \\ \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} = 1 & (m = j \text{ の時}) \end{cases}$$

を与える。上式は複雑な式となっているが、ハザード率 θ と点検間隔 z の2変数で構成されていることがわかる。点検間隔は既知情報であるために、マルコフ推移確率は、ハザード率を推計すれば、完全に算出することができる。目視点検データを用いたハザード率（未知パラメータ）の推計の詳細も参考文献10) に譲るが、ハザード率を推計するために必要となる情報は、総サンプルを K としたときに、任意のサンプル k に対して、

$$\Xi^k = \{(i^k, j^k), z^k, \mathbf{x}^k\}$$

= (健全度, 点検間隔, 特性変数) (2)

となる。健全度 (i, j) と点検間隔 z は目視点検を通して獲得することができる。一方で特性変数 $\mathbf{x}$ は、劣化過程に変動を及ぼす要因を考慮するために導入されるパラメータであり、要因が複数存在する場合にはベクトルとなる。例えば、交通量や気温等が劣化過程に影響を及ぼすと考えられる場合に、これらの変動により劣化予測結果がど

表-1. RC床版の健全度評価基準²⁰⁾

健全度	物理的意味
1	新設状態, 劣化の兆候がほとんどみられない。
2	1と3の中間。
3	一部分で漏水が確認できる。(漏水を伴う一方向ひび割れ, 端部で斑点状の漏水)
4	3と5の中間。
5	床版面積75%以上から漏水が確認できる。一部分で剥離や剥落が確認できる。
6	5と7の中間。
7	深刻な剥落や遊離石灰が確認できる。抜け落ちやその傾向が確認できる。

*実際のNY市の健全度は、7が新設で、1が使用限界である。

の程度変動するかを分析することが可能である。特性変数には、交通量や気温等の定量的な変数だけでなく、構造形式や材料など定性的な変数も考慮することができる。さらに、考慮した変数の中で、いずれの変数が劣化過程に真に影響を及ぼすか、あるいは採用された要因の影響力に関する順位についても、各種の検定統計量により評価することができる。特性変数は、台帳等に記載されている情報を活用することが可能であり、特性変数を獲得するために必ずしも別途調査を行う必要はない。したがって、劣化予測を行うために要求されるデータは目視点検データと台帳データのみであり、実務と整合的であることを具体的に確認することができる。

(3) マルコフ劣化ハザードモデルの適用事例

具体的な適用事例を通して、マルコフ劣化ハザードモデルの有効性を実証的に検証する。表-1は、米国NY市の橋梁RC床版に対する目視点検の評価基準である²⁰⁾。目視点検の結果は、健全度1から7の整数値で評価される。NY市では約10年に亘って、式(2)で与えられるサンプルが32,902個蓄積されている。また、特性変数としては、交通量 x_2 と床版面積 x_3 を採用した。もちろん、これら以外の情報を特性変数として追加することは容易ではあるが、NY市のデータベースの制約上の問題と、未知パラメータの増加に伴う推計精度の低下を考慮して、最終的に交通量と床版面積の2変数に止めた。

7段階の健全度評価であるので、ハザード率は6つ設定されることになる。すなわちハザード率 θ は健全度1から2へ推移する際のハザード率を表している。交通量 x_2 と床版面積 x_3 の影響を考慮したハザード率を具体的に記述すると、

$$\theta_i^k = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2^k + \beta_{i,3}x_3^k) \quad (3)$$

($i = 1, \dots, 6, k = 1, \dots, K$)

と定義できる。ここで $\beta_{i,j}$ は定数項であり、定数項には劣化過程の共通要因が集約されていると考えてよい。共

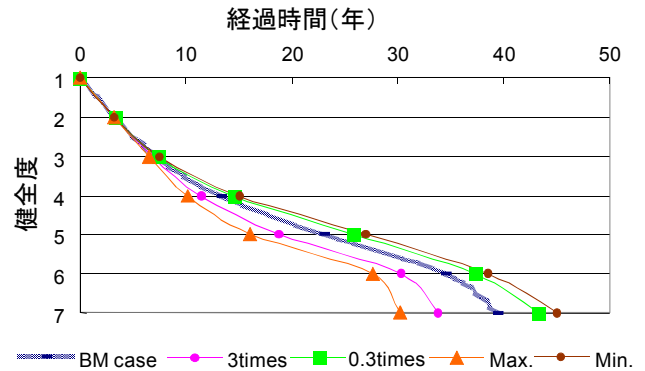
表-2. マルコフ劣化ハザードモデルの推計結果

レーティング	定数項 β_1	平均交通量 β_2	床版面積 β_3
1	-1.1007	—	2.8977 (7.6)
2	-1.5071	—	3.2029 (70.1)
3	-1.9730	0.6969 (63.2)	—
4	-2.4399	0.8451 (44.2)	0.5129 (13.4)
5	-2.3233	—	—
6	-1.9510	1.5439 (15.8)	—
対数尤度	-20,062		

*括弧内は尤度比検定統計量であり、その値が絶対値で1.96を下回る特性変数を棄却した。

通要因では説明できない劣化の不確実性を表現するために、説明変数が採用される。本研究では x_2 が交通量、 x_3 が床版面積であり、 x_2 、 x_3 ともに32,902サンプル中の最大値が1となるようにそれぞれ基準化された値が入る。さらに、上式の構成から読み取れるように、 β_2 と β_3 は、交通量 x_2 と床版面積 x_3 が劣化速度（ハザード率）に及ぼす影響の強さを表すパラメータとなっている。

最尤法を用いて、これらの未知パラメータを推計した結果を表-2に示す。表中の数値が未知パラメータの最尤推計量や対数尤度であり、括弧内の数値はそれぞれの未知パラメータに対する尤度比検定統計量である。未知パラメータによっては、推計値が存在しないケース（—で表示しているケース）もあるが、これは当該特性変数がRC床版の劣化過程に及ぼす影響は有意ではないと判断されたことを意味している。その判断根拠を示すものが尤度比検定統計量であり、今回の解析では尤度比検定統計量が絶対値で1.96を下回る特性変数は信頼度90%で棄却されている。このような検定統計量としては t -値（ t -検定統計量）なども一般的である。したがって、このような検定統計量を判断指標とすることで、例えばNY市の場合では、交通量や床版面積以外を特性変数として採用しても、その特性変数が劣化過程に及ぼす影響が有意であるか否かを定量的に判断することができる。記述が前後するが、実際に今回の解析で交通量と床版面積という2変数に絞り込む過程においては他の特性変数も含めてこのような検定を実施した。表-2から具体的に読み取れる事項として、劣化の初期段階においては、床版面積が大きい床版ほど劣化の進展が早い反面、交通量は劣化過程に影響を及ぼさない。しかし、劣化の中期以降（健全度3以降）では交通量の影響が床版面積と比較して大きくなる。



*床版面積を平均値で固定したときの交通量の多寡による期待劣化パスの変動を示す。BMはベンチマークで交通量は平均値を採用している。3timesと0.3timesは交通量の平均値に対する値である。BMの期待寿命は40.55年で、交通量による不確実性により寿命が15年程度変動する。

図-6. RC床版の期待劣化パス

期待劣化パスを図-6に示す。図中の青線が全32,902サンプル中の平均値を示しており、特にベンチマークと呼ぶ。ベンチマークで確認すると、NY市のRC床版の期待寿命（健全度1から健全度7に到達する期間）は約40.55年である。なお、当然ながら、ベンチマークの算出にあたり、交通量 x_2 と床版面積 x_3 には、それぞれの平均値0.2266、0.0431を用いている（いずれも最大値が1となるように基準化）。次に床版面積を0.0431に固定したままで、交通量のみを最小値、平均値の0.3倍、平均値の3倍、最大値に変動させることで、交通量の多寡による期待劣化パスの変動を定量的に評価することができる。その解析結果を図-6に併記している。同図より、NY市のRC床版の寿命は交通量により30年から45年まで変動することが読み取れる。

以上は、目視点検データに基づいて劣化曲線を算出した一事例である。図-6に示した期待劣化パスはNY市固有の期待劣化パスであり、別の都市においては、期待劣化パスや期待寿命が変動する可能性や、採用する特性変数が変化する可能性もある。統計的手法により、劣化メカニズムの解明や、普遍的な劣化予測式の構築を行うことはできないが、管理者独自の期待劣化パスや、劣化要因に関する統計分析を行うことができる。アセットマネジメントへの実践という過程を通して、目視点検が単に土木施設の劣化・損傷箇所を抽出する行為だけでなく、アセットマネジメントを稼働させる基礎情報の収集手段として位置づけることの重要性を認識できよう。

4. 先端的な統計的劣化予測

(1) 統計的劣化予測手法の先端事例

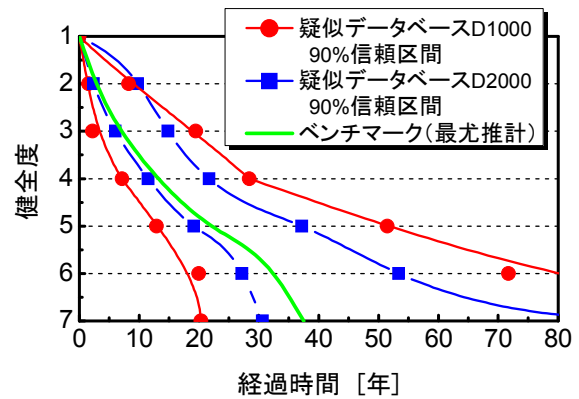
3.において、目視点検データに基づく統計的劣化予測手法としてマルコフ劣化ハザードモデルとその適用事例を示した。しかし、前述したように、目視点検、目視点検データおよびそれらの記録の不備、実務的ニーズの高度化により、マルコフ劣化ハザードモデルの改善が余儀なくされている。以下では、先端的な統計的手法の概要を述べる。

a) 劣化過程の異質性問題^{21), 22)}

3.で確認したように、マルコフ劣化ハザードモデルは、膨大な劣化情報を集計し、施設固有の構造特性や環境条件を説明変数として採用できるために、個々の施設の劣化予測を行うことが可能である。しかし、土木施設の劣化過程は、同一の構造・材料特性、かつ使用条件の下であっても、土木施設が置かれている環境条件、施工時の品質等により、多様に異なることが一般的である。土木施設の劣化過程の異質性を特性変数で表現しようとするれば、必然的に特性変数の数が増加し、個々の特性変数の説明力が低下する。また、劣化過程の異質性の中には観測不可能な要因に支配されるものもある。したがって、劣化過程の異質性を特性変数のみを用いて表現する方法には必ずと限界があり、土木施設個々を対象としたマイクロレベルの意思決定に対する統計的劣化予測手法の適用の弊害となっている。そこで、土木施設の標準的な劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで表現するとともに、ハザード率の異質性を確率分布で表現した混合マルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。目視点検データを用いた未知パラメータの推計には2段階推計方法を採用し、第1段階で標準的なマルコフ劣化ハザードモデルを、第2段階で異質性パラメータをそれぞれ推計する。劣化過程の異質性問題の具体的な事例を次節4. (2) で述べる。

b) 目視点検データの量的不足問題^{23), 24)}

マルコフ劣化ハザードモデルを中心とする劣化予測手法は、統計的手法であるために、その推計精度は目視点検データの蓄積量に依存する。これまでの著者らの検討において、目視点検データが2,000サンプル程度が利用可能であれば、推計精度は確保されることが実証されている¹⁰⁾。しかし、小規模な管理者など、場合によっては十分なサンプルが蓄積されていない事例も少なくない。そこで、初期段階においては、ベテラン技術者の主観的判断により劣化過程を記述し、目視点検データの蓄積とともに劣化予測結果を逐次更新していくことができれば、劣化予測を効率的に実施することが可能である。このために、ハザードモデルのベイズ推計手法^{25), 26)}や、ベイズ更新手法が提案されている。図-7は3.と同じNY市のRC床版に対するマルコフ劣化ハザードモデルをベイズ推計した結果である。ベンチマークは3.と同様の期待劣化パスであり、サンプル数は32,902である。この総サンプル



*ベンチマークの期待寿命は40.55年、D1000は41.86年、D2000は40.22年であった。そのため、期待劣化パスはほぼ同一であり判別が困難であったので、ベンチマークの期待劣化パスを代表して記載している。

図-7. RC床版のベイズ推計

から無作為抽出を行い、サンプル数が1,000と2,000の疑似データベース (D1000, D2000) を作成した。期待劣化パスの先験情報として、多次元正規分布に従う期待寿命を与えた。ベンチマークの期待寿命は40.55年、ベイズ推計後のD1000の期待寿命は41.86年、D2000は40.22年であった。また、90%信頼区間の幅もサンプルの蓄積に伴って減少していく傾向を確認できる。したがって、正しい先験情報を与えた場合には、1,000程度のサンプルであっても、期待寿命での比較では、原サンプルと同程度の推計精度を確保できている。小規模の自治体のように1,000程度のサンプルしか保有していないケースであっても、専門技術者の主観的判断や、十分なサンプルを保有する自治体で推計された結果を初期情報として与えることで、マルコフ劣化ハザードモデルを推計することは可能である。さらに、初期情報として、技術者の主観的判断ではなく、力学的劣化予測モデルを利用するような、力学モデルと統計モデルを融合したハイブリッド型劣化予測モデルも提案されている²⁷⁾。

ベテラン技術者による主観情報、力学的モデルによる予測結果のいずれにおいても、正しい予測結果を与えることができれば、通常よりも少ないサンプル (例えば数百程度) であっても高精度の推計が達成できる。また、サンプルの蓄積に応じて初期情報の影響は次第に薄れていき、最終的には目視点検データにのみ基づいた予測結果を得ることが可能となる。

c) サンプル欠損問題²⁸⁾

土木施設を維持管理していく上で、劣化の進展が著しい施設に対しては適宜補修が実施されることになる。補修が実施された土木施設の健全度は当然ながら回復する

ことになり、補修が実施された時点以降の本来の劣化過程（補修が実施されなかったと想定した場合の劣化過程）を観測することが不可能となる。このことは逆に、ある程度劣化が進展した段階で目視点検データが得られるサンプルは、比較的健全な状態の土木施設であることを意味している。このように、劣化の進展が早いサンプルが欠損し、結果的に健全な土木施設の目視点検データのみを用いて劣化予測を行うと、劣化予測結果が安全側（長寿命側）に評価されるバイアスが発生する。このようなサンプルの偏った選択によって生じるサンプル欠損バイアスを除去するために、選択肢別サンプリング法に基づく劣化予測モデルが提案されている。補修頻度の高い舗装など、耐用年数が比較的短い土木施設や部材などでは有効な手法である。

d) 観測誤差問題²⁹⁾

土木施設に対する目視点検データには、点検員の判断ミスに起因する誤差が含まれる。また、モニタリングデータであったとしても、センサー等の観測機器に観測誤差が生じる場合がある。マルコフ劣化ハザードモデルは、観測誤差を含まない「真の健全度」間のマルコフ推移確率を用いて定義される。しかし、劣化状態に対する観測結果に誤差が存在する場合、観測結果によって得られる情報は「見かけの健全度」であり、「真の健全度」に関する情報を獲得することはできない。見かけの健全度を用いて推計したマルコフ推移確率が、真の推移確率に一致する保証はない。現実には観測された「見かけの健全度」と観測されない「真の健全度」の関係を混合分布モデルで表現するとともに、「真の健全度」を用いて定義されるマルコフ推移確率と、システム誤差を介在して観測される「見かけの健全度」の関係を隠れマルコフ劣化モデルを用いて表現する。隠れマルコフ劣化ハザードモデルを用いて土木施設の劣化予測を実施することにより、観測誤差の影響を排除した高精度の劣化予測を行うことができる。さらに、隠れマルコフ劣化モデルを用いて、いずれの健全度に観測誤差が多く含まれているのかを評価することが可能である。目視点検において観測誤差が多く含まれる健全度には、判定が困難な何らかの理由が存在するものと考えられるために、判定が容易な検査システムを開発する、あるいは目視点検の評価（健全度の判定基準）を見直すなど、実務へのフィードバック効果も期待できる。

(2) 異質性の相対評価とベンチマーキング

土木施設の劣化過程の異質性評価の実例として、NY市の橋梁 RC 床版を対象とした劣化予測を行う。異質性を考慮した混合ハザード率は、

$$\theta_i^k = \tilde{\theta}_i^k \varepsilon^k \quad (4)$$

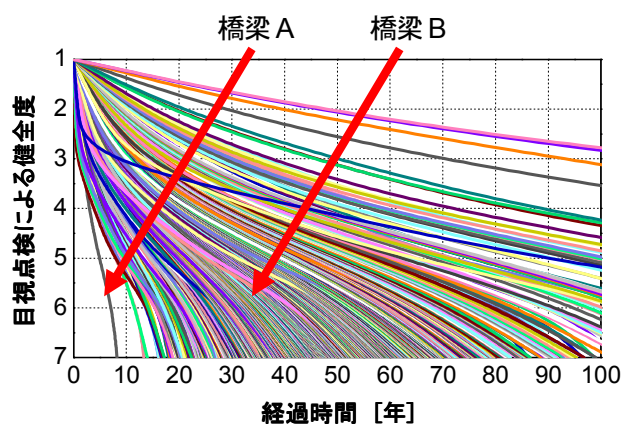


図-8. 橋梁別のRC床版の劣化曲線

で与えることができる。ここで、 $\tilde{\theta}_i^k$ は3.で推計したハザード率であり、混合ハザード率と区別するために標準ハザード率と呼ぶこととする。一方、 ε^k は異質性パラメータであり、土木施設個々、あるいは評価単位とするグループ個々に設定される変数である。混合ハザードモデルやその推計方法の詳細は参考文献22) に譲る。

実際に NY 市の目視点検データを用いて統計的に推計された RC 床版の劣化過程を図-8 に示す。今回の解析では同一橋梁の RC 床版の異質性は同一であると仮定したために、異質性パラメータは橋梁数と同数の 1,481 個となった。同図は 1,481 橋分の RC 床版の 1,481 本の期待劣化パスを示している。図-6 に示したマルコフ劣化ハザードモデルによる RC 床版の劣化予測においては、交通量の変動による期待寿命の不確実性は約 15 年であった。一方、図-8 の異質性を考慮した際の変動は、100 年以上となっている。したがって、混合マルコフ劣化ハザードモデルによる劣化予測結果がより実際の目視点検データを反映した予測結果を与え得ることが理解できる。さらに、これまで、統計的劣化予測手法は管理対象となる土木施設群のマクロな劣化予測には適していると言われてきたが、同図から理解できるとおり、現状では橋梁個々（全 1,481 橋）のミクロな劣化過程を推計することが可能となっている。例えば、図-8 に示した橋梁 A と B に着目されたい。橋梁 A は全橋梁中で最も劣化の進行が早い橋梁であり、一方の橋梁 B は図-6 のベンチマークとほぼ同じ期待寿命（40.55 年）を有する。ただし、橋梁 A と B とともに交通量と床版面積はほぼ同じである。説明変数の値が同じ場合には、3.のマルコフ劣化ハザードモデルでは同じ劣化過程を取らざるを得ない。しかし、混合マルコフ劣化ハザードモデルでは橋梁個々のミクロな異質性を表現することが可能である。実際に橋梁 A と B の劣化曲線を取り出して、それぞれの目視点検データと比較すると、混合マルコフ劣化ハザードモデルの

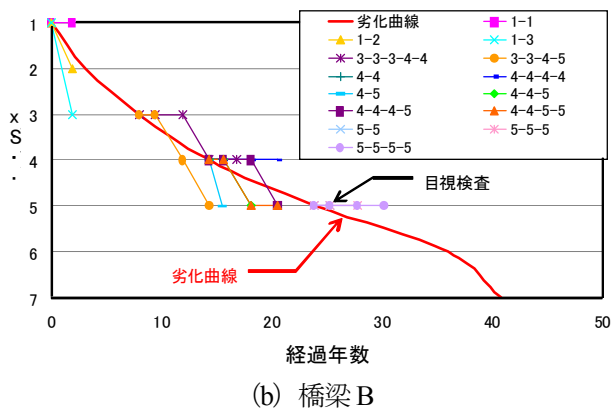
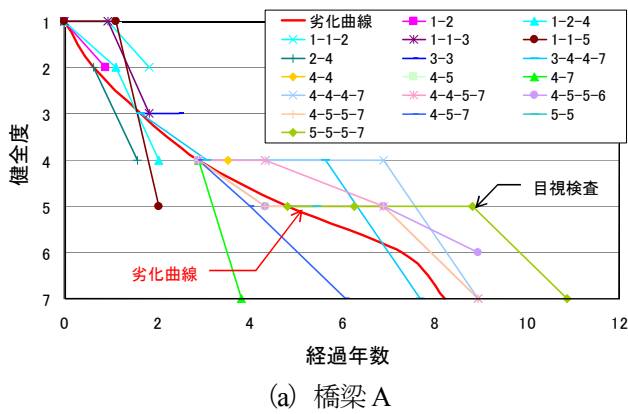


図-9. 目視点検データとの整合性

実データとの整合性を確認することができる (図-9)。

1,481橋個々に設定された劣化速度の相対評価を図-10に示す。横軸は標準ハザード率、縦軸は異質性パラメータを表す。ここで、標準ハザード率は構造諸元、使用・環境条件に応じた劣化速度である。また、標準ハザード率に関しては、式(3)に基づいて算出するが、交通量 x_2 と床版面積 x_3 が極めて小さい値を取る場合であっても、定数項 β_1 が残るために下限値 (今回の場合は約0.85) が存在することがわかる。異質性パラメータは標準ハザード率で考慮される特性変数を勘案してもなお存在する個々の構造物に特有の劣化を表現する変数であり、非負の値を取る。単純化して述べれば、図-8のRC床版の健全度が3から4に移行するときの劣化速度が、標準ハザード率と異質性パラメータの積で定義され、積の値が大きいことは劣化が速いことを意味する。例えば、図中で異質性パラメータの値が突出して大きいRC床版 (約4.2) が存在するが、このRC床版の劣化速度 (標準ハザード率と異質性パラメータの積) は全RC床版の中で最大値を示し、図-8で劣化が最も早い曲線に対応している (橋梁A, 寿命8年)。図中の青線と赤線は劣化速度の50% (平均的な劣化速度) と95%のラインを示す。このとき、95%ラインより上に位置するRC床版 (劣化が早い上位5%) を特定して、共通要因を見出すことができれば、

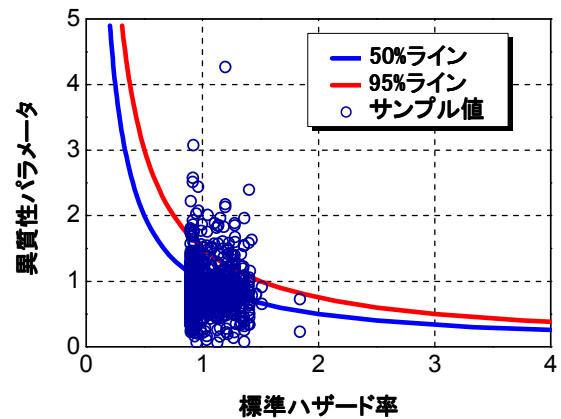


図-10. ハザード率の相対評価とベンチマーク

その解決策が新たな長寿命化技術につながる可能性がある。また、50%ラインより上に位置するRC床版は少なくとも平均的な劣化よりも劣化が速いと言えるので、長寿命化の検討候補となる。一方で、ある工法で補修したRC床版が50%ラインより下に位置するか否かを検証することで、長寿命化の効果を図ることもできる。仮に、同図の最も左下に位置するような補修後のRC床版が存在すれば、その補修工法が長寿命化のベストプラクティスとなり、それ以降の長寿命化技術の目標となる。以上は、先端的な劣化予測モデルを利用した劣化速度の相対評価であるが、補修効果や長寿命化効果の検証など、従来は評価が困難であったものを見える形にすることが可能となっている。

5. 第2世代への展開 (実践上の課題)

(1) 劣化予測手法と獲得情報の高度化

著者らはこれまで、自らの経験、実務者との議論や共同研究を通して、アセットマネジメントにおける目視点検データの重要性を見出し、目視点検データに基づく統計的劣化予測 (マルコフ劣化ハザードモデル) を主体とした方法論を構築してきた。さらに、実務で実践していく過程において、実務的要請に応える形で方法論に改善を施してきた。研究開発のプロセスは、学術的視点から基本となる方法論を開発し、実践化の段階で基本的な方法論に改善を加えるというものであった。したがって、目視点検データに基づくアセットマネジメントの実践が一段落した現時点において、次世代のアセットマネジメント研究に求められる要素を、学術的な視点から本節に取りまとめることとする。ただし、以下に述べる課題のいくつかに関しては実務者との議論を通して、獲得した知見も当然含まれている。

図-1ではマネジメントの概念を述べた。マネジメントの第1プロセスは「情報」である。IT革命によりインターネットが普及・定着したことにより、我々の日常生活は膨大な情報にあふれている。しかしながら、土木施設に対しては、未だ効率的に情報を収集することは困難である。実際に現段階のアセットマネジメントは目視点検データを主体として方法論が構築されており、ライフサイクル費用最小化を実現する最適補修政策を決定することも可能となっている。図-1のサイクルが1周し、再び「情報」プロセスに戻ってきた現段階で、2周目のアセットマネジメントにおいて出発点となる情報をどのような手段で獲得するかを議論する必要がある。1つは、現状の目視点検データを継続して活用する選択である。本研究でも概要を述べたような先端的な確率論や数理統計学を援用することによって統計的劣化予測手法を高度化させる努力が必要である。いま1つは、モニタリングなどによって定量的なデータを継続的に獲得する選択である。このときに要点となるのは、簡易な情報であっても日常的に継続して取得できるモニタリングシステムの構築、取得された時系列データに対して異常を検出するための統計的意思決定³⁰⁾手法の開発、である。モニタリングシステムといっても千差万別であるが、点検員が現場に行くきっかけとなる情報を提供するシステムが実践上は有効である。いずれにしても、情報を効率的に収集するシステム開発が不可欠である。土木施設の中で、舗装分野のアセットマネジメントが最も進展している理由の1つには、走行しながらひび割れ、わだち掘れ、平坦性という路面性状を観測することができる検査車の開発が大きいと考える。また、本研究では目視点検が可能な土木施設を想定しているが、埋設構造物など、そもそも目視点検の実施が困難な土木施設に対してアセットマネジメントを行う場合にはモニタリング技術の導入が避けられない。

(2) 経済性評価の高度化

本研究では割愛したが、ライフサイクル費用評価に関してもマルコフ決定モデルに基づく、割引現在価値最小化法³¹⁾と平均費用最小化法³²⁾がすでに提案されている。これによりライフサイクル費用最小化を達成する最適補修政策や最適点検間隔³³⁻³⁵⁾を決定することが可能となっている。このような成果を踏まえて、さらに実践という視点でライフサイクル費用評価および意思決定の高度化を見据えると、複数部材に対する補修タイミングの垂直的同期化問題³⁶⁾がある。特に橋梁のような複数部材で構成されている土木構造物では、部材の相互関係を考慮したような補修戦略の立案がライフサイクル費用の低減のためには必要となる。また、実務における補修では大規

模補修にタイミングを合わせて、小規模補修も実施することが一般的である。また、ライフサイクル費用評価に基づき立案した最適補修政策の予算の費消状況や予算執行状況のモニタリングを実施するためのインフラ会計⁴⁾の確立が急務である。すでに道路舗装においてはインフラ会計機能を搭載したアセットマネジメントのプロトタイプ³⁷⁾が試作されているが、その他の土木施設への拡張が期待されるとともに、方法論のデファクトスタンダード化が重要な課題である。さらに、近年では一部の土木施設に対する廃棄問題を考える必要がある。例えば、1) 施設を直ちに廃棄する、2) 必要最低限の維持管理のみを実施する、3) 施設の補修を継続的に実施する、という3つの廃棄・補修政策（オプション）を設定する。その上で、施設需要や劣化状態を考慮し、廃棄・補修政策を最適に転換するようなアセットマネジメント政策を求める最適廃棄・補修モデルを開発しなければならない。

(3) 総合リスクマネジメントへの展開

土木施設の利用に際しては、安全・安心の提供が前提となる。土木施設の劣化・損傷など、日常的な維持管理の効率化やライフサイクル費用の最小化を目的としたアセットマネジメント技術に関しては、「アセットメトリクス」として学術的体系化が図られつつあることに加え、今後も継続的に研究開発が実施される。一方で、近年の異常気象に起因する自然災害や、テロ等の人為的破壊活動に代表される非日常的大規模リスク（突発的事象）に対するリスクマネジメント^{38), 39)}に関する研究は端緒にすぎない。土木施設の日常的事象を扱うアセットマネジメントと非日常的事象を扱うリスクマネジメントを融合させることで、土木施設に係わる大半の意思決定（公共政策に対する合意形成）を論理的に実施できるような総合リスクマネジメントを確立できる。そのためには、高度に相互依存した土木施設群をネットワークシステムとして捉え、コアとなる土木施設を抽出する必要がある。その上で、コアの土木施設の機能性停止がドミノ現象を引き起こし、ネットワークシステム全体が機能不全に陥るリスクを計量化することが重要である。さらに、大規模リスクに対する被害抑制、あるいはリスク発生後の現状確認という視点からも、先述した継続的かつ効率的なモニタリングシステムが不可欠である。特に、大規模リスク発生後は、有線によるセンサーネットワークが機能しないことも想定されるので、無線モニタリングシステムを並行して開発するなどの対策が必要である。

6. おわりに

本研究では、現状のアセットマネジメントについて

「実践」という視点から俯瞰的に概要を述べるとともに、要素技術と要素技術をつなぐ「総合化技術」が必要であることを指摘した。さらにその代表的な事例として、情報の乖離問題をあげ、さらに具体的な課題として土木施設の劣化予測に着目した。現状の実務で獲得できる目視点検データを土木施設の劣化予測に活用するために、劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルおよびマルコフ連鎖モデルで表現するとともに、目視点検データに基づいてそのモデルを統計的に推計する手法を紹介した。さらに、現実の目視点検データを用いた実証分析を通して、提案手法の有効性を検証するとともに、具体的なアウトプットを提示した。また、マルコフ劣化ハザードモデルに対して、①劣化過程の異質性問題、②目視点検データの不足問題、③サンプル欠損問題、④観測誤差問題という実務的要請に基づいて改善を加えた先端的な統計的手法の概要を述べるとともに、①の課題に対して、具体的な解析結果を示した。最後に、第2世代のアセットマネジメントに向けた方向性と課題を論じた。

本研究において、目視点検データはアセットマネジメントの初歩的な情報であると述べた。確かに、目視点検の結果は土木施設の物理性能（パフォーマンス）を表しているわけではない。しかし、目視点検結果は補修行為（補修工法とタイミング）と直接連動していることが多い。したがって、むやみに補修が必要となる判定を下してしまうと、予算的に非現実的な補修計画が出来上がってしまう。ベテラン技術者ともなれば、年度予算を勘案しながら、補修行為が可能な健全度の数量を見積もっている。つまり、最終的な目視点検データは、点検マニュアルそのままに判定されているのではなく、すでに何らかの判断を加味した意思決定の結果が健全度として集約されたものになっている。一見すると、初歩的に見える過去の貴重な情報（目視点検データ）から、アセットマネジメントに有用な情報をどれくらい引き出せるかが、その実践においては非常に重要であると考えられる。また、土木施設に対する清掃やパトロールといった日常業務により、土木施設の安全性が保たれている。補修や補強などのように土木施設の直接的な長寿命化にまでは貢献しないまでも、土木施設の「長持ち」には大きく貢献しているように思う。このような目に見えにくい業務の重要性を計量化していく学術的な研究も必要である。

謝辞：本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。

参考文献

1) 小林潔司：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.11-13，2003.

- 2) 小林潔司，上田孝行：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.15-27，2003.
- 3) 小林潔司：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.59-71，2005.
- 4) 江尻良，西口志浩，小林潔司：インフラストラクチャー会計の課題と展望，土木学会論文集，No.770/VI-64，pp.15-32，2004.
- 5) Yanev, B.: Life-Cycle Performance of Bridge Components in New York City, Proceedings of Recent Advances in Bridge Engineering, Advanced Rehabilitation, Durable Materials, Nondestructive Evaluation and Management, pp.385-392, 1997.
- 6) O'Connor, D. S. and Hyman, W. A.: Bridge Management Systems, Report FHWA-DP-71-01R, FHWA, U. S. Department of Transportation, 1989.
- 7) 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：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.29-38，2003.
- 8) 森村英典，高橋幸雄：マルコフ解析，日科技連，1979.
- 9) Golabi, K., Thompson, K. and Hyman, W. A.: *Pontis Technical Manual*, Optima, Cambridge Systematics, Cambridge, 1992.
- 10) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推計，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005.
- 11) Puterman, M. L.: *Markov Decision Processes*, Discrete Stochastic Dynamic Programming, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- 12) 青木一也，若林伸幸，大和田慶，小林潔司：橋梁マネジメントシステムアプリケーション，土木情報利用技術論文集，Vol.14，pp.199-210，2005.
- 13) 山本浩司，青木一也，小林潔司：道路付帯施設アセットマネジメントシステム，土木情報利用技術論文集，Vol.15，pp.173-184，2006.
- 14) 坂井康人，荒川貴之，井上裕司，小林潔司：阪神高速道路橋梁マネジメントシステムの開発，土木学会情報利用技術シンポジウム論文集，Vol.17，pp.63-70，2008.
- 15) 坂井康人，慈道充，貝戸清之，小林潔司：都市高速道路のアセットマネジメントリスク評価と財務分析，建設マネジメント論文集，Vol.16，pp.71-82，2009.

- 16) 堀倫裕, 貝戸清之, 小林潔司: 下水道処理施設のアセットマネジメントシステム, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.18, pp.153-164, 2009.
- 17) 小田宏一, 児玉英二, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率を用いた学習機能を有する舗装マネジメントシステム, 土木情報利用技術論文集, Vol.18, pp.165-174, 2009.
- 18) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 19) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 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, 2005.
- 20) State of New York, Department of Transportation: *Bridge Inspection Manual* 1997, 1997.
- 21) 貝戸清之, 山本浩司, 小濱健吾, 岡田貢一, 小林潔司: ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル: 大規模情報システムへの適用, 土木学会論文集F, Vol.64, No.2, pp.115-129, 2008.
- 22) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008
- 23) 津田 尚胤, 貝戸 清之, 山本 浩司, 小林 潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法, 土木学会論文集F, Vol.62, No.3, pp.473-491, 2006.
- 24) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推計, 土木学会論文集A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.
- 25) 和合肇: ベイズ計量経済分析, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその応用, 東洋経済新報社, 2005.
- 26) Ibrahim, J. G., Ming-Hui, C. and Sinha, D.: *Bayesian Survival Analysis*, Springer Series in Statics, 2001.
- 27) 下村泰造, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 空港舗装アセットマネジメントのためのハイブリッド型地盤沈下モデル, 土木学会論文集F, Vol.64, No.4, pp.463-482, 2008.
- 28) 小林潔司, 熊田一彦, 佐藤正和, 岩崎洋一郎, 青木一也: サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル, 土木学会論文集F, Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.
- 29) 小林 潔司, 貝戸 清之, 林 秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集D, Vol.64, No.3, pp.493-512, 2009.
- 30) 小林潔司, M.N.B. JAAFAR, 尾形誠一郎, 塚井誠人: 越境ヘイズ災害のための危険予測情報: レジーム変化と長期記憶性, 土木学会論文集 D, Vol.63, No.4, pp.478-497, 2007.
- 31) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 32) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 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, 2005.
- 33) 慈道充, 小林潔司: 不確実性下における最適点検補修ルール, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.
- 34) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-67, pp.105-116, 2005.
- 35) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル, 土木学会論文集F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 36) 織田澤利守, 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設の最適補修同期化政策, 土木学会論文集F, Vol.64, No.2, pp.200-217, 2008.
- 37) Kobayashi, K., Ejiri, R., and Do, M: Pavement Management Accounting System, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol.14, No.2, pp.159-168, 2008.
- 38) 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.16-34, 2007.
- 39) 山本浩司, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化現象を考慮した大規模交通管制システムの動的故障解析, 土木学会論文集F, Vol.64, No.3, pp.295-310, 2008.

(2009. 10. 28 受付)

PRACTICAL ASSET MANAGEMENT AND ITS PERSPECTIVE TOWARD THE SECOND GENERATION R&D

Kiyoyuki KAITO, Kazuya AOKI and Kiyoshi KOBAYASHI

When conducting asset management, the technique to combine elemental technologies is important from the viewpoint of seeing the entire research. Especially, it is indispensable to develop a framework to effectively utilize available information in actual work, that is, visual inspection data, in asset management. This paper points out its importance, and outlines deterioration prediction methods, mainly the Markov deterioration hazard model, which is one of the statistical deterioration prediction models based on visual inspection data. In addition, the authors empirically analyze the effectiveness of the frontier model, which was developed by improving the Markov deterioration hazard model based on practical demands, by using the visual inspection data of actual civil infrastructures. Lastly, the authors summarize their opinions on the perspective for the second-generation research, development, and practice, based on the current situation of asset management.