

2017年度（第53回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 17-B-5

点検データを活用したアセットマネジメント

大阪大学 准教授

貝戸清之

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2017年8月

点検データを活用したアセットマネジメント

Infrastructure Asset Management based on Actual Inspection Data

貝戸清之

Kiyoyuki Kaito

1. はじめに

インフラの老朽化が団塊的に進展する中で、国内の主な高速道路会社はインフラに対する大規模補修・更新計画を公表した。残念ながら、現時点では大規模補修・更新に要する予算総額や対象路線が決まっているのみであるが、今後は具体的な補修・更新計画の提示に加え、厳しい財政状況下において、インフラの点検・維持管理の重要性、それに伴う予算確保の必要性を国民や利用者に対して説明していくことが重要である。もちろん、従来から管理者や維持管理業務に携わる専門技術者は、インフラの健全性を点検によって把握し、その結果に基づいて劣化予測を行い、経済状況を勘案しながら補修・補強に対する意思決定を行ってきた。アセットマネジメントはこの一連の意思決定過程に他ならない。一方で、このような暗黙知による経験的な意思決定過程を、形式知による体系的な意思決定過程へと視覚化していくことにアセットマネジメントの意義がある。暗黙知は専門技術者個々に蓄積される。形式知はそれに関わる組織内で集約されるだけでなく、修正や改善が可能であることから共有知となり得る。最終的には、形式知の共有化を通して、1) インフラ施設の維持管理に対する説明責任を果たすこと、2) インフラ管理者の組織内において知識の共有化を図り、技術を継承すること、が可能となる。

アセットマネジメントは実学であり、基本的にはこれまでの意思決定過程を踏襲した方法論でなければ実務に供されることはない。その一方で、暗黙知で形成された従来の意思決定過程を単純に形式知化するだけでなく、現場におけるデータ収集、分析過程の高度化、業務の効率化を通じて、補修・更新計画を戦略的に高度化することが重要である。現時点において、多くのインフラ管理者が目視点検や定期点検のデータに基づいて意思決定を行っている以上、これらの点検データを用いた方法論を構築することが不可欠である。この点に関して、特に著者は、日常・定期点検で獲得できるデータを中心に方法論を構築するという徹底した現場主義を研究開発の哲学としてきた。意思決定を実施するための情報は現場に蓄積されている。しかし、これらの情報は紙媒体でしか保存されていないことが少なくない上に、1つ1つが不完全情報であり、単純な統計分析では有意な情報をもたらさない。不完全情報が膨大に蓄積されたときに、そこから有意な情報を引き出すための分析技術、すなわち知的技術が必要である。このような考え方はビッグデータ概念と整合的であり、さらにこのような考え方のアセットマネジメントが実務に浸透してきた背景には、インフラに生じ得る複雑な事象（主に劣化事象）を説明するための確率モデルと、その推計手法としての統計学（近年では特にベイズ統計学）の発展がある。

2. アセットマネジメントの概要

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まさにビッグデータである。このビッグデータ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、アセットマネジメントの実践を念頭に置いた場合、インフラ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。アセットマネジメントであれば、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。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視覚化する、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、ヒトからヒトへ直接的に伝えられてきた経験や知識に対して、視覚化された方法論をヒトとヒトとの間に介在させることで、より広範に、より普遍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。

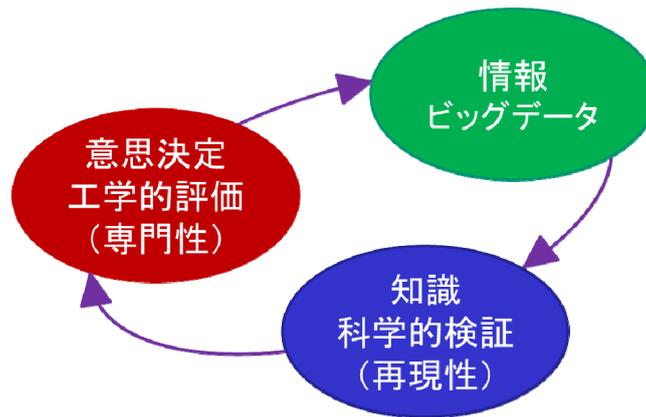


図-1. アセットマネジメントの概要

3. ビッグデータに基づくアセットマネジメント

(1) 意思決定のためのマネジメント曲線

アセットマネジメントの意義をもっとも狭義に解釈し、現有のインフラ施設の長寿命化を達成するためのマネジメントとして位置づけた場合、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ような最適補修戦略を決定することである²⁾³⁾。単純に述べると、ライフサイクル費用は、インフラ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（費用と投資タイミング）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、実際の損傷状態から、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インフラ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インフラ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、予測に必要な情報が通常の点検業務で獲得できないことが少なく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、全てのインフラ施設に日常・定期点検（一般的には目視点検）が義務付けられていること、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、対象となるインフラ施設や劣化・損傷の種別が異なっても普遍的に劣化予測（例えば、マルコフ連鎖モデルの適用）が可能であることから実務との整合性は高く、実践上有利である。

アセットマネジメントにおいて管理者がまず知るべきは、インフラ施設の設計上の構造性能（パフォーマンス）ではない。現実のインフラ施設で発生している劣化特性であり、補修・補強を実施するためのタイミングやそのために採用すべき工法に関する実践的な情報である。統計的劣化予測手法による劣化予測の結果は縦軸に健全度を取る。健全度は点検の結果として得られる、離散的な評価指標（点検データ）であり、構造物の損傷・劣化と関連しているが、健全度そのものはあくまでも目視点検等で視認できる表面上の損傷の程度であって、実際の構造性能をとらえているとは言い難い。しかし、重要なポイントは、点検マニュアルに記載された健全度の定義には、その工学的意味だけでなく、補修・補強に関わるマネジメント上の基本方針が明記されていることである。したがって、ある健全度に到達する年数を統計的手法で把握すれば、投資タイミングに関する重要なマネジメント情報が得られる。維持補修計画を立案するインフラ管理者にとって、投資タイミングを把握することが中心的なマネジメント課題になる。このような意味において、統計的手法で算出される予測結果は単なる劣化パフォーマンス曲線ではない。それは投資タイミングを決定するためのマネジメント曲線である。したがって、点検データを用いた劣化予測とはいえ、それは構造物の健全性や耐用年数を予測することが主要な目的ではなく、むしろ当該管理者における過去の維持補修、投資行動のパフォーマンスを事後評価し、今後のマネジメントの高度化に活用することを本来の目的としている。

筆者等が目指してきたアセットマネジメントでは、既存の学術分野においてこれまで着目されてこなかった点検データに対して精緻な統計分析を試みることを一義的な目的としている。インフラのアセットマネジメントにおいて、維持管理、補修や補強に関する意思決定は現場で観測されたデータに基づいてなされるべきである。インフラ施設において獲得される日常・定期点検データは他の点検データと比較して、情報量が膨大であり文字通りにはビッグデータといえよう。また、利用可能な点検データを駆使して、データの中から意味のあるマネジメント情報を獲得しようとする研究上のスタンスも後述するビッグデータ概念と整合的である。さらに、統計的手法において、劣化事象を確率モデルで定式化したのは、点検データには多くの不確実性が介在しているためであり、点検データの質の低さを精緻なモデル化とデータ量でカバーしている。さらに、劣化事象の因果関係を明確にした上で算出されるパフォーマンス曲線ではなく、マネジメント曲線を採用している点においても、ビッグデータ概念と整合的である。目視点検データは構造物の表面的な劣化状態を観測した情報に過ぎない。本来は、構造物の性能や健全性を直接計測・評価して、意思決定を行うことが理想的である。目視点検データのような周辺情報は、本来知りたい事象（投資タイミング）との相関関係が見られるだけであって、工学的な因果関係はほとんどの場合に存在しない。特にアセットマネジメントの現場においては、事象の因果関係ではなく、相関関係が意思決定において重要な意味を持つ。アセットマネジメントの実践においては、現実が発生するハザードやリスクに対して対応するための行動（現場に急行したり、意思決定を行う）を実施したり、現場の業務や活動の改善を試みるための「きっかけ」が必要で

あり、その点において事象の因果関係に関する情報が求められることは少ないといっても過言ではない。アセットマネジメントで導出される最終的なアウトプット（劣化予測結果や最適補修政策）は、管理者の意思決定を支援するための情報であり、意思決定そのものではない。

(2) ビッグデータの概要

ビッグデータのコナ念は、「小規模ではなしえないことを大きな規模で実行し、新たな知の抽出や価値の創出によって、市場、組織、さらには市民と政府の関係などを変えること。」⁴⁾と捉えられる。特にビッグデータを活用することにより、

- ・第1にビッグデータは限りなく全てのデータを扱う、
- ・第2に量さえあれば精度は重要ではない、
- ・第3に因果関係ではなく相関関係が重要になる、

というデータ解析上の変化が現れることが指摘されている。以下は参考文献4)に記載されている事例であるが、ビッグデータの概要を理解する上で極めて興味深い事例であるので簡単に紹介する。

2009年に米国内で新型インフルエンザ・ウイルス H1N1 が蔓延した際に、米国の疾病予防管理センター(公的機関)により感染情報が提供されていた。しかし、公表される情報は当該地域でインフルエンザが発症してから1~2週間遅れて公表されるのが通常であった。当時ワクチンも開発されていない、感染力の強い新型ウイルスに対して、2週間遅れの情報提供は致命的であったとのことである。公的機関が提供する情報が2週間遅れる中で、同じ情報をリアルタイムで提供した民間企業が存在した。ここまでの話であれば、あまり興味が湧かなかったのだが、その民間企業がグーグルであると知って非常に驚いたことを覚えている。当然ながら、グーグルは直接的な医療情報を持ち合わせていない。その一方で、グーグルには全世界で1日に30億件以上の検索結果がある。グーグルは合計4億5000万にも上る膨大な数式モデルを使って検索語を分析し、疾病予防管理センターが提供している2007年と2008年の実際のインフルエンザ症例とグーグルの予測結果を比較していった。その結果、特定の検索語45個と、ある数式モデルを組み合わせたときに、グーグルの予測と公式データとの間に高い相関関係が見られることを突き止めた。繰り返しになるが、グーグルには直接的な医療情報はないが、ビッグデータがある。グーグルと同様の検討を行った事例は過去にも存在したが、データ量、処理能力、統計処理のノウハウでグーグルが群を抜いていた。インフルエンザに関する直接的な医療情報をリアルタイムに収集することは困難である。しかし、(本来観測したい)直接的な医療情報に代わる、(1つ1つでは何ら役に立たない)周辺情報を効率的に収集し、それらの相関関係を意思決定に活用することがビッグデータを用いることで可能となる。

少し横道にそれるが、2013年5月のNHKの報道番組内においても、オバマ大統領の選挙運動とビッグデータについて特集が組まれていた。選挙運動チームの分析者は、フェイスブックなどのデータはもちろん、商品の購入履歴などの情報を消費者情報の会社などから収集し、有権者の政治的な傾向を割り出していくとのことであった。例えば、同じトヨタ系列でも、レクサスに乗っている人は共和党支持者が多く、プリウスなどハイブリッド車に乗っている人は民主党支持に分類され、どちらも投票する確率が高いということが分析結果として導き出された。この場合、保有車と支持政党の関係に何らかの因果関係があることが証明されたわけではなく、また証明する必要性もない。選挙に勝つための運動を展開することが重要であり、相関関係さえつかむことができれば具体的な行動を取るには十分である(投票を呼びかける電話を掛けるべき相手がわかればよい)のであり、極端な話として多少外れても問題はない。現実の意思決定においても、同様の場合は少なくない。高度なスモールデータよりも、ビッグデータを活用することが意思決定の質を高めることは十分にあり得る。これはアセットマネジメントにおいても同様であり、高度な点検技術よりも、ビッグデータを獲得できる点検技術を確立させた方がマネジメントの実践力が高まる。点検データが最も蓄積されている舗装分野でアセットマネジメントが最も進展していることから、土木分野においても例外ではない。

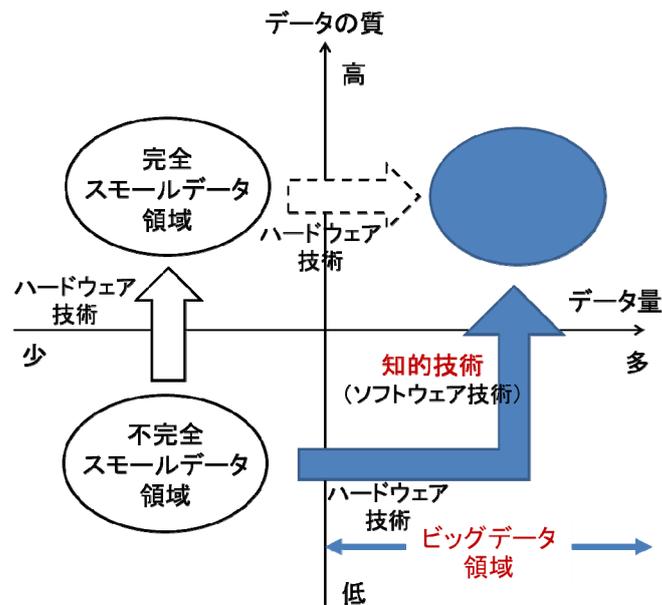


図-2. ビッグデータと知的技術の概念

(3) ビッグデータ時代における知的技術開発

技術にはハードウェア技術とソフトウェア技術の2種類がある。ビッグデータによるアセットマネジメントを対象に今後の技術開発の方向性を整理したい。図-2は、データの量と情報の質の観点から意思決定の領域を4分類した概念図である。縦軸に取った情報の質に関しては、インフラ管理者による最終的な意思決定を支援する情報の質を表す。情報の質は、構造物に対する点検技術を高度化させ、取得データそのものの質を高めることで実現可能であり、また従来通りの点検データであっても分析技術を高度化させることで高めることも可能である。同図において、当初はデータの質が低く、データ量も少ない不完全スモールデータ領域において意思決定を余儀なくされる。ビッグデータ以前の確率論や統計学は不完全スモールデータを対象として、そこから有益な情報（質の高い情報）を抽出することを目的に研究開発がなされてきた。このとき、不完全スモールデータ領域からの技術開発は2つの方向性がある。1つは完全スモールデータ領域、もう1つは不完全ビッグデータ領域を目指す方向性である。ビッグデータの影響が浸透する以前は、往々にしてスモールデータ領域でデータの質を上げる、すなわち完全スモールデータ領域を目指す技術開発が実施されてきた。土木工学に限らず、「意思決定に用いる情報は量こそ少ないが、精度が高く因果関係がはっきりしている」という方向性を指向する際には、新しいデータを取得する必要性が生じ、ソフトウェア技術よりもハードウェア技術の開発が優先される。実際に、アセットマネジメント分野では非破壊検査技術やモニタリング関連のセンサー技術が急速に進展してきた。これらは詳細点検技術という形で実用化され、損傷が著しいインフラに対する補修の要否、補修工法の選択という意味決定に有用な情報を提供している。しかし、詳細点検は費用や時間面での制約が大きく、適用は限定される。特定のインフラ施設に対する具体的な補修・補強を検討する維持管理工学の発展には寄与してきたが、全てのインフラ施設を対象に意思決定を行うアセットマネジメントに適用することは困難である。一方、不完全ビッグデータ領域に関しても、1) 既存のセンサー類の汎用化と低価格化が進んだこと、2) センサーネットワーク技術が進展したこと、が当該領域への移行を後押しした。いずれにせよ、領域間を移行するためには革新的なハードウェア技術の開発が不可欠である。

ビッグデータが対象とする不完全ビッグデータ領域は、データの量が増加しているのであって、情報の質

が高度化しているのではない点に留意が必要である。不完全スモールデータ領域では、情報量と統計分析手法の高度化はトレードオフの関係にあることは事実である。ビッグデータ領域ではスモールデータ領域で蓄積した知見や研究成果を踏まえて、統計分析手法を高度化させることにより、同じデータであっても、より高度な情報（実務に有益な情報）を抽出することが可能となる。したがって、ビッグデータ領域においても、スモールデータ領域で開発された統計分析手法が不要となるわけではない。不完全データを扱う限り、統計分析手法の高度化を進展させ、質の高い情報（実務においてより有益な情報）を抽出することが重要となる。実際に、複雑な確率モデルによる劣化事象のモデリング技術が進展している。もちろん、これらの定式化は従来でも十分可能であった。しかし、実際の点検データを用いた推計を可能としたのは、ビッグデータ概念の普及と、ベイズ推定を中心とする近代統計学の発展である⁴⁾。

ビッグデータに関する一般的な概念に基づけば、目視点検に基づいたインフラ施設の点検データは、データ量という意味において必ずしもビッグデータの範疇に属さないかもしれない。しかしながら、次節で述べるように、舗装では路面性状調査車、鉄道では軌道検測車による点検が実用化されている。両分野に共通している点は、新規データの取得ではなく、既存データの効率的な取得のための点検技術を開発したことである。さらに点在する構造物ごとにセンサーを設置し、モニタリングシステムを構築すると、個々のシステムの費用や管理の負担が大きくなってしまっただけでなく、データ回収のためのネットワークの規模も大きくなる。路面性状調査車および軌道検測車は点検システムを移動させ、点検とデータ回収を同時に実施している。このようなモニタリング技術を導入することにより、点検データ量が今後爆発的に増加していくことが予想される。アセットマネジメントにおける意思決定では、高品質な情報を取得するためのハードウェア技術は必要なく、現在蓄積されている膨大な点検情報（ビッグデータ）を分析するためのソフトウェア技術（知的技術）が必要なのである。

(4) アセットマネジメント進捗状況の俯瞰的考察

アセットマネジメントの研究面および実用化面の進捗状況をインフラの種別ごとに考察してみる。図-3は京都大学・大津宏康教授が2004年に示したものである⁵⁾。陸上のトラックを模擬した周回上に舗装、橋梁、地盤構造物が位置づけられている。舗装が先頭を走っており、その後に橋梁が続く。大津教授のご専門分野である地盤構造物はスタートしたばかりであるのご説明されていた記憶がある。図-3をもとに図-4には現時点における状況を提示してみた。舗装、橋梁、地盤構造物の相対的な位置関係は変化していないが、下水道が橋梁より前方に、上水道が橋梁よりも後方に位置している。

図-4はあくまでも主観的な考えを提示したに過ぎないが、その前提のもと、以下にインフラ施設ごとに生じたマネジメントの進捗状況の差異を考察してみる。舗装分野は、これまで述べてきたような点検データに基づくアセットマネジメントという観点においては理想的なモニタリングシステムが実用化されている。具体的には、舗装路面の損傷指標となるひび割れ、わだち掘れ、平坦性（IRI）という3指標を計測する路面性状調査車の開発が大きい。一般的なモニタリングシステムでは、ヒトでは計測することが難しい物理量の計測を目的とすることが多い。しかし、路面性状調査車はヒト（技術者）でも直接計測することが可能なひび割れ率、わだち掘れ量、IRIを計測しているに過ぎない。ただし、その計測を通常走行状態（高速道路では80km/時）で、かつ空間的に連続に実施している。このような効率的なモニタリングに加え、効率的なデータ集約も同時に行っている。つまり、多数のモニタリングシステムを分散的に配置するのではなく、1台の路面性状調査車が移動しながらデータも回収していく仕組みが構築されている。例えば1億円の予算があるときに、100万円のモニタリングシステムを100箇所配置するのではなく、1億円のモニタリングシステム1台を開発するという発想である。インフラ施設の寿命と比較して、モニタリングシステムは短命である。インフラ施設の管理のために導入したモニタリングシステムの管理の方に手間がかかるという類の話はよく聞く話である。その点、路面性状調査車の場合には、故障が発生したとしても、その1台を修理すればよい。また、センサー

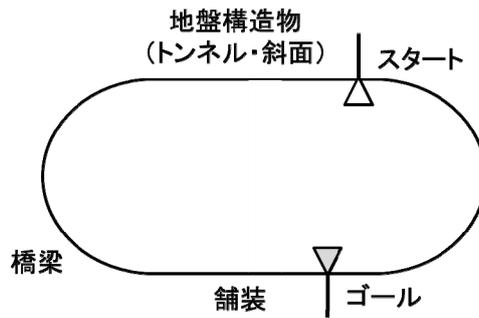


図-3. アセットマネジメントの現状 (2004年時点)
(京都大学・大津宏康教授作成)

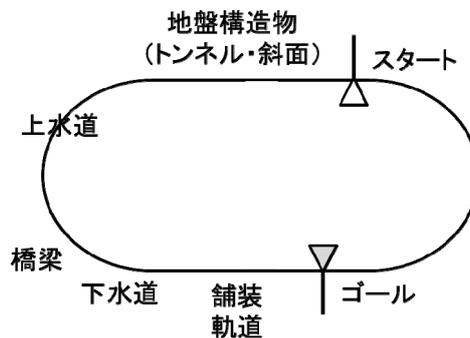


図-4. アセットマネジメントの現状 (図-3を修正)

等の性能が陳腐化したとしても、その1台のセンサーを交換すれば機能向上を図ることができる。実際に舗装では路面性状調査データが他のインフラ施設と比較して桁違いに多い。通常のアセットマネジメントでは多くとも数千の点検データが集まる程度であるが、舗装の場合には百万データを超えることもある。このような豊富な点検データが舗装のアセットマネジメントの実用化を大きく進める原動力となっていることは疑う余地がない。また、図-4では舗装と同じ位置に軌道を位置づけた。軌道管理においても、軌道検測車が路面性状調査車よりも以前に実用化され、軌道狂いや高低差が計測されている。したがって、本来であれば、軌道が舗装よりも先に、あるいは舗装と同程度に位置づけられても良いはずなのだが、現状では獲得したデータの分析が十分になされていないように見受けられる。図-4において、軌道を舗装と同程度に位置づけたのは、軌道においても、アセットマネジメント実践の基盤が整備されているはずだとの期待を込めた。また、近年ではトンネル覆工コンクリートのひび割れ計測が路面性状調査車と同一の方向性で自動化されている。数年後に改めて同じ図を描くときには舗装と同じトップ集団に加わっている可能性もある。

つぎに、舗装と橋梁の相違について述べる。上述の通り、舗装は路面性状調査車の開発により、全ての道路区間(状態が良い道路区間も悪い道路区間も)を対象にデータの蓄積が進んでいる。一方で、橋梁は損傷・劣化が進展している部材については記録がなされているが、全部材に対する点検結果が残されているわけではない。これは橋梁の目視点検を舗装のようにシステム化できていないことが要因である。もちろん、橋梁は舗装と異なり、多数の部材が複雑に組み合わさった構造物であり、アクセスが難しい部材も含めて、それらの多角的な評価が求められる。様々な制約がある中で、橋梁の目視点検の第一義的な目的は損傷・劣化を検出することにならざるを得ない。しかし、この目的だけでは、目視点検を実施すればするほど、損傷・劣化が検出され、補修や更新のための費用が増加していくだけである。すなわち、点検を実施することに何のインセンティブも働かない。一般的なメンテナンスとマネジメントの相違はこの点にある。目視点検の第一の

目的を踏まえつつも、点検はマネジメントの原動力となる情報を収集する行為であると位置づけ、可能な限り全ての部材（損傷・劣化がある部材はもちろんのこと、健全な部材も）に対する点検を実施し、データを蓄積する必要がある。十分な点検データが蓄積され、それにより劣化予測とライフサイクル費用分析が精緻化されれば、その結果として導き出される最適補修計画を実施することにより、場合によっては数億円単位の予算削減効果（点検を実施することによる支出を上回る予算削減効果）が期待できることになる。点検を損傷・劣化を検出するだけの手段と位置づけるか、マネジメントのための情報手段でもあると位置づけるか、でアセットマネジメントの進捗状況は大きく異なる。

上下水道のアセットマネジメントはISO55000シリーズ^{6),7)}が施行されたことに加え、インフラおよびインフラ技術の海外輸出を見据えた際にしばしば第一候補としてあがることから、研究や実用化が急速に進展している。また、独立採算方式を採用している企業体もあり、現状のアセットマネジメントでは検討が十分にされていない会計学的な観点（管理会計、インフラ会計など）を包括したようなマネジメントにまで踏み込んでいる事例⁸⁾も存在する。また、下水道は上水道に比べて、管径が大きいことから管路の点検データが蓄積されている。これらを総合的に勘案すると、下水道分野はすでに橋梁分野よりもアセットマネジメントが進展していると考えられる。一方で上水道の管路は供用を停止しての点検が難しいこともあり、下水道に遅れを取っている。上水道に限らず、インフラ施設によっては観測したい箇所が見えない、あるいはアクセスできない事例が少なくない。そのような場合には、それらと関連性のある事象を観測することも一案である。

4. 点検データを用いた統計的劣化予測

(1) マルコフ劣化ハザードモデル

インフラ施設に対する目視点検データを統計分析して、インフラ施設の劣化を予測する研究が蓄積されてきている。その中でも、マルコフ劣化ハザードモデルは汎用性の高い統計的劣化予測モデルである。詳細は参考文献9)に譲るが、多段階の指数ハザード関数（以下、ハザード率） $\theta_i (i=1, \dots, J-1)$ を用いて、点検間隔 z の間で健全度が i から $j (j \geq i)$ に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij} (i=1, \dots, J; j=i, \dots, J)$ を、

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

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

と定義する。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} = 1 & (m=i \text{の時}) \\ \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} = 1 & (m=j \text{の時}) \end{cases} \quad (2)$$

を与える。上式は複雑な式となっているが、ハザード率 $\theta_i (i=1, \dots, J-1)$ と点検間隔 z の2変数で構成されている。ハザード率は劣化の速さを表す変数であり、マルコフ劣化ハザードモデルでは健全度の段階ごとに劣化速度が設定されることになる。点検間隔 z は既知情報であるために、ハザード率を推定すれば、マルコフ推移確率を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）の推定の詳細も参考文献9)に譲るが、任意のサンプル k に関して、ハザード率の推定に必要な情報 Ξ^k は、総サンプル数を K としたときに、

$$\Xi^k = \{(i^k, j^k), z^k, \mathbf{x}^k\} = (\text{健全度ペア, 点検間隔, 特性変数}) \quad (3)$$

となる。ここで (i^k, j^k) はサンプル k に対する2回の目視点検データ（健全度ペア）であり、推定のためには同一の社会基盤施設に対して少なくとも2回の目視点検を実施する必要がある。また、健全度 (i^k, j^k) と点検間隔 z^k は目視点検を通して獲得することができる既知情報である。一方で特性変数 \mathbf{x}^k は、劣化過程に影響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、構造条件や環境条件が社会基盤施設の劣化過程に影響を及ぼすと考えられる場合には、これらの変動により劣化予測結果がど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、大型車交通量や気温等の定量的な変数だけでなく、構造形式や部材形式などの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の判断、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。特性変数の評価には、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別途点検を行う必要はない。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、実務データと極めて整合的であることが理解できる。

任意のサンプル k に関して獲得できる情報を改めて $\Xi^k = \{(i^k, j^k), z^k, \mathbf{x}^k\}$ と記述する。ただし、記号「-」は実測値であることを示す。ここで、式(1)より明らかなようにマルコフ推移確率は、各健全度におけるサンプル k のハザード率 θ_i^k と点検間隔 z^k に依存する。さらに、ハザード率は社会基盤施設の特性ベクトル \mathbf{x}_k によりサンプル個々に設定される。このことを明示的に表すために推移確率 π_{ij} を目視点検による実測データ (z^k, \mathbf{x}^k) と未知パラメータ $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_{J-1})$ の関数として $\pi_{ij}(z^k, \mathbf{x}^k; \theta)$ と表す。いま、 K 個の社会基盤施設の劣化過程が互いに独立であると仮定すれば、全点検サンプルの劣化推移の同時生起確率密度を表す対数尤度を

$$\ln[L(\theta)] = \sum_{i=1}^{J-1} \sum_{j=i}^J \sum_{k=1}^K \delta_{ij}^k \ln[\pi_{ij}(z^k, \mathbf{x}^k; \theta)] \quad (4)$$

と表すことができる⁹⁾。式中、 δ_{ij}^k はダミー変数であり、

$$\delta_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{1回目の健全度が}i, \text{2回目}j\text{の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (5)$$

を意味する。したがって、 δ_{ij}^k 、 z^k 、 \mathbf{x}^k は全て確定値であり、対数尤度関数は未知パラメータ θ の関数となっていることが理解できる。ここで、対数尤度関数を最大にするようなパラメータ θ の最尤推定値は、

$$\partial \ln[L(\hat{\theta})] / \partial \theta_i = 0 \quad (6)$$

を同時に満足するような $\hat{\theta}$ として与えられる。このとき最適化条件は連立非線形方程式となり、ニュートン法を基本とする逐次反復法を用いて解くことができる。

(2) RC床版の統計的劣化予測

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。米国ニューヨーク市（以下、NY市）の橋梁RC床版に対する目視点検の結果は、健全度1から7の整数値で評価される。NY市では約10年間に亘って、このような目視点検の結果（サンプル）が32,902個蓄積されている。また、条件による劣化の相違を表現するための特性変数として、交通量 x_2 と床版面積 x_3 を採用した。このとき、 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した値を用いた。なお、 x_2 、 x_3 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変数にとどめた。

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。例えば、ハザード率 θ_1 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 の影響を考慮した床版 k ($k=1, \dots, K$)の

表-1. マルコフ劣化ハザードモデルの推計結果

健全度	定数項 $\beta_{i,1}$	平均交通量 $\beta_{i,2}$	床版面積 $\beta_{i,3}$
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。

健全度 i ($i=1, \dots, 6$) におけるハザード率を具体的に記述すると、

$$\theta_i^k = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2^k + \beta_{i,3}x_3^k) \quad (i=1, \dots, 6, k=1, \dots, K) \quad (7)$$

と定義できる。ここで $\beta_{i,1}$ 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、特性変数が採用される。さらに、上式の構成から読み取れるように、 $\beta_{i,2}$ と $\beta_{i,3}$ 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⁹⁾を用いて、これらの未知パラメータを推計した結果を表-1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95%で棄却されている。検定統計量としては t -検定による t -値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によって、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-1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。

期待劣化パスを図-5に示す。図中の太線が全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

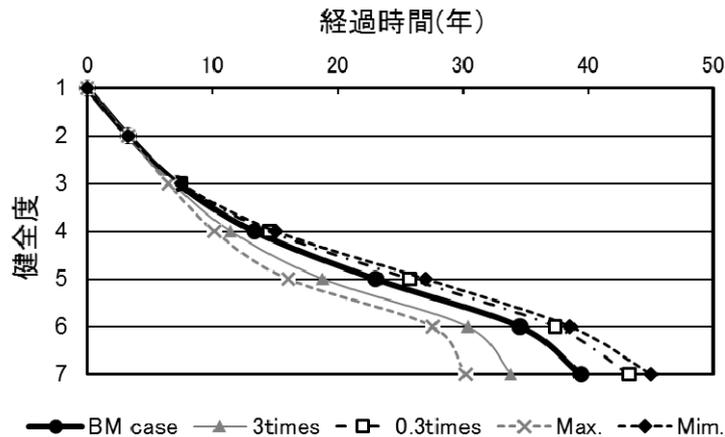


図-5. RC床版の期待劣化パス

*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。

約40.55年である。なお、当然ながら、ベンチマークの算出に当たり、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-5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-5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、インフラ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適用という過程を通して、目視点検が単にインフラ施設の劣化・損傷箇所を抽出するための行為だけでなく、アセットマネジメントを稼働させるための基礎情報の収集手段として位置付けられることの重要性を認識できる。

(3) 劣化の異質性の相対評価とベンチマーキング

インフラ施設資産の劣化過程は不確実であり、2, 3の特性変数では記述できないほどに多様に異なる。ここでは劣化過程に含まれる個々のインフラ施設の特性を異質性と定義する。異質性評価の実例として、再び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¹¹⁾は、

$$\theta_i^k = \tilde{\theta}_i^k \varepsilon^k \quad (8)$$

で与えることができる。ここで、 $\tilde{\theta}_i^k$ は4.(1)で定義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、インフラ施設個々、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11)に譲る。

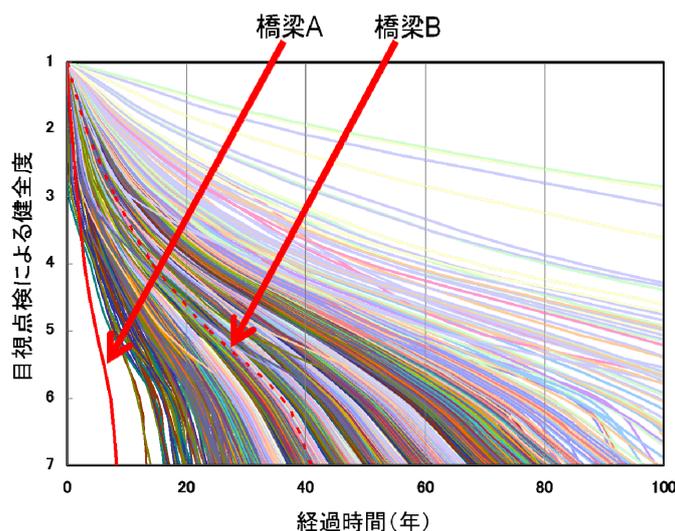
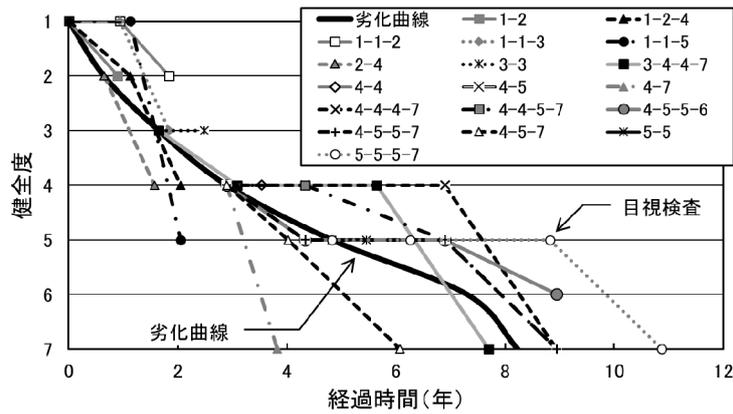


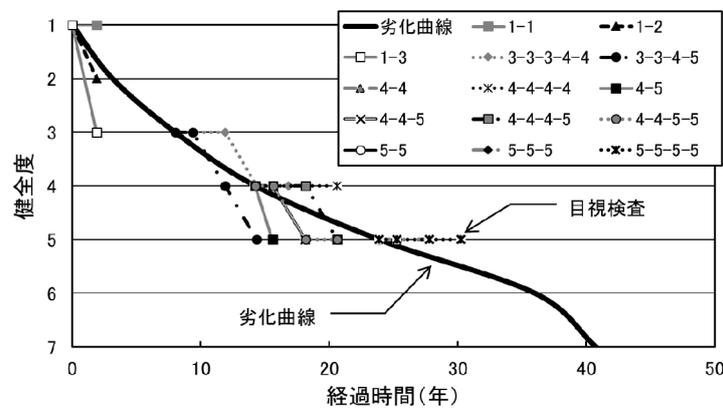
図-6. 橋梁別のRC床版の劣化曲線

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-6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-5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-6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インフラ施設群のマクロな劣化予測に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、現在では橋梁個々（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-6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-5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では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、図-5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。図-7のように、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実データとの整合性を確認することができる。太線は劣化曲線、その他の線は目視点検データを表す。

1,481橋個々に設定された劣化速度の相対評価を図-8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(7)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_{i1} 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-8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-6で劣化が最も早い曲線に対応している（橋梁A、期待寿命8年）。図-8中の実線と破線は劣化速度の95%と50%（平均的な劣化速度）のラインを示す。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



(a) 橋梁A



(b) 橋梁B

図-7. 目視点検データとの整合性

因を見出すことができれば、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が見える形にすることが可能となっている。

4. アセットマネジメント研究の方向性

(1) データ指向型劣化予測モデル

アセットマネジメントの第一の目的はライフサイクル費用最小化を達成するような補修・更新計画を立案することである。ライフサイクル費用を算出する上で、劣化予測の精度は極めて重要な項目となる。マルコフ劣化ハザードモデルでは膨大な調査／点検データを統計分析することにより劣化予測を実施している。本稿でも触れたが、舗装が他のインフラ施設よりもマネジメント分野で進展している理由は、他のインフラ

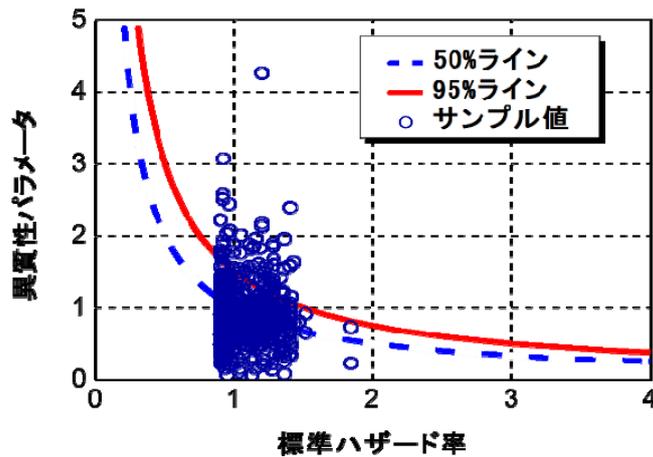


図-8. ハザード率の相対評価とベンチマーク

では調査／点検という行為が構造物や部材の損傷や劣化といった欠陥を検出するために実施されるのに対して、舗装では結果的に構造物や部材の健全度を評価、活用する（補修計画に活かす）ために実施されていることにあると考える。「結果的に」と述べたのは、そこまで予め意図していたのかどうか不明であるためである。例えば、橋梁では定期的に目視点検が実施されるが、点検記録を確認すると、損傷や劣化が検出された部材の記録は間違いなく残されている。ところが、何も記録されていない部材も相当数存在し、後からは点検したが損傷や劣化が存在しなかったから記録していないのか、点検そのものを実施していないかの判別ができない。これは欠陥検出のみを点検の目的にしていることに他ならない。一方、舗装では健全度の高い道路区間であっても、低い道路区間であっても路面性状調査のデータが全て揃っている。膨大な調査／点検データを用いた統計分析を行う際には、健全度が低い一部のデータだけではデータにバイアスが生じ、推計精度を低下させる要因となる。

第一の研究課題として、データ指向型劣化予測モデルをあげる。アセットマネジメントシステムが実務で稼働しない理由は、劣化予測モデルを動かすために要求されるインプットデータが実務では獲得できないデータであることが多いからである。劣化予測に必要なインプットデータと実務で獲得できる情報が整合的でない。いくら予測精度が高い予測モデルであったとしても、この点が解決できなければ、実務での使用は困難である。マルコフ劣化ハザードモデルは、データ指向型劣化予測モデルであることを強く意識している。舗装の場合であれば、路面性状調査で獲得できるひび割れ、わだち掘れ、平坦性に対して、それぞれの管理目標値を設定し、管理目標値までを5段階、あるいは6段階程度に分割し、離散的な健全度情報に変換して、劣化予測を実施する。予測に必要な情報は路面性状調査データとプラスアルファ（台帳データ）だけであるから、通常の路面性状調査業務を行うだけで劣化予測が可能となる。統計分析であるから、調査データが蓄積すればするほど、劣化予測の精度は高まる。調査・点検でどのようなデータを獲得することができて、それを出発点として予測モデルを開発するという姿勢が必要であると考えている。ちなみに、多段階の健全度で評価されるような点検データにはマルコフ劣化ハザードモデル、2値で評価されるような点検データにはワイブル劣化ハザードモデル、特定エリアに存在する損傷・劣化の個数に対してはポアソンモデルの開発を手掛けている。

(2) オブジェクト指向型意思決定モデル

インフラ管理者によって意思決定の目的（最終的なアウトプット）は多様に異なる。アセットマネジメントの初期の目的はライフサイクル費用最小化を達成するような維持補修計画を立案することであるが、そこから派生する形で、舗装であれば、ひび割れ率何%を管理目標値とするか、路面性状調査の周期を何年にするか等、現場レベルの意思決定を支援する（現状の調査や補修施策の評価と実務へのフィードバックを期待される）ようなアウトプットが求められることもある。一方で、舗装の維持補修に関する中長期的な計画、大規模老朽化対策の立案など、本社レベルの意思決定に必要なアウトプットが求められることもある。このようにアセットマネジメントにおいては、意思決定プロセスが階層的な構造となっていることに留意しなければならない。ただし、これらを網羅的にシステムに組み込んでおくことは不可能である。また、ボトムアップ方式で、今後必要となる予算計画を作成する際の武器としてマネジメントシステムを使用するのか、あるいはトップダウン方式で予算が決められた際の防衛手段として使用するのか、によっても計算過程が同じであっても、アウトプットの見せ方が異なる。このような多様なアウトプットを意識した意思決定モデルを構築する必要がある。管理者個々の実情に応じて、マネジメントシステムに組み入れる必要がある。したがって、オブジェクト指向型意思決定モデルには、カスタマイズ戦略が重要である。データ指向型劣化予測モデルでは、実務で獲得できるデータがどのようなものであるかを把握した上でモデル開発を実施する必要があるが、データが決まれば、劣化予測モデルは普遍的（再現的）に適用可能である。しかし、意思決定モデルにおいては専門性が問われる。管理者においては、マネジメントシステムに期待するアウトプットを明確に提示できるようにしなければならない。

(3) マネジメント指向型データベース

現状のデータベースは、実務の作業ごとに別々に構築され、データが蓄積されている。例えば、道路台帳データベース、点検／調査データベース、補修データベースなどである。マルコフ劣化ハザードモデルを用いるか、用いないかは別にせよ、マネジメントを行うためには、これらのデータベースから横断的に情報が必要となる。例えば、ある特定キロポストの道路区間の過去2回の路面性状調査データを調べたときに、ひび割れ率が改善していたとする。その際には、オーバーレイ等が実施されていた可能性が高いので、補修履歴を確認する必要がある。このときに補修履歴が整備されていないと、補修によるひび割れ率の回復であるのか、測定誤差による見かけ上の回復であるのかの判断がつかない。また、補修が実施された場合であっても、補修工法が明記されていなければ、表層のみの打ち換えなのか、全層打ち換えなのかの判断がつかない（これによりライフサイクル費用算出の精度が低下する）。さらに、補修前後の調査データの有無が予測精度を高める上で不可欠なことは、マネジメントを行った技術者であれば誰でも理解しているが、残念ながら補修の直前と直後に路面性状調査が実施されることは稀である。マネジメントの観点からどのような情報を取得し残すべきかを検討して、マネジメントの観点から望ましいデータベースのあり方（構成）を考える時機ではないかと思う。

5. おわりに

高速道路の大規模補修・更新計画の公表を受け、今後国道や県道、さらには様々なインフラに関しても、大規模補修や更新が検討されることになる。インフラの老朽化対策は管理対象となる全てのインフラを対象に計画を立案しなければならない。ひどく損傷した一部のインフラを公開するだけでは説明責任を果たしたことにはならない。少なくとも、現時点における全てのインフラの健全性を評価して、劣化を予測し、その結果に基づき、さらには予算制約や優先順位を勘案した上でライフサイクル費用が最小となるような補修・更新計画を立案していくことが重要である。このようなアセットマネジメントを通して、補修・更新計画の

妥当性を広く訴えかけることが説明責任を果たす第一歩となる。

アセットマネジメントを実践していく上で、個人的にはその原動力となるのは点検によって得られるビッグデータであると考えます。とりわけ多くの管理者ではインフラに対する膨大な点検データが蓄積されつつある。1つ1つの点検データは単独ではそれほど有用な情報をもたらさない。しかし、点検ビッグデータという過去の財産を丁寧に分析することによって、将来に対する知見（補修・更新計画）を獲得することができると考えます。また、点検ビッグデータから知見獲得に至るまでの意思決定プロセスを視覚化することが客観的かつ透明性のある説明責任を果たすことに直結する。インフラによっては点検自体が困難なものもあるために、どうしても新しい点検技術の開発に目が向きがちである。もちろん、それはそれで必要ではあるが、来年、再来年に実用化するものではない。むしろ、現時点においては、いま存在する点検データに基づくアセットマネジメントの方法論（知的技術）を開発することが急務である。

【参考文献】

- 1) Schonberger, V. M. and Cukier, K. (斎藤栄一郎訳) : ビッグデータの正体, 講談社, 2013.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 和合肇編 : 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, 2005.
- 5) 大津宏康 : アセットマネジメント概論 (2), Summer School 2004 建設マネジメントを考える, 建設マネジメント勉強会, pp.19-22, 2004.
- 6) 小林潔司, 田村敬一編 : 実践インフラ資産のアセットマネジメントの方法, 理工学図書, 2015.
- 7) 小林潔司, 田村敬一, 藤木修編 : 国際標準型アセットマネジメントの方法, 日刊工業新聞社, 2016.
- 8) 堀倫裕, 鶴田岳志, 貝戸清之, 小林潔司 : 下水処理施設の維持管理会計システム, 土木学会論文集 F4, Vol.67, No.1, pp.33-52, 2011.
- 9) 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定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.
- 10) 飯田恭敬, 岡田憲夫編 : 土木計画システム分析 現象分析編, 森北出版, 1992.
- 11) 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.