

ビッグデータによるインフラマネジメント： アセットメトリクスにむけて

貝戸清之¹・小林潔司²

¹正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

²フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院 経営管理講座 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

アセットマネジメントは、そのプロセスごとに、専門技術者の経験や知識という暗黙知に基づいて実施されてきた。アセットメトリクスは、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転換することを目的とする。特に、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いる。また、アセットマネジメント分野においては新規データ取得のためのハードウェア技術よりも、既存データ分析のための知的技術の重要性を指摘するとともに、これはビッグデータ概念と整合的であることを言及する。さらに、アセットメトリクス研究の先端事例を通して、当該分野におけるモニタリング手法のあり方や、統合的リスクマネジメントの展望を述べる。

Key Words : *assetmetrics, infrastructure, big data, intellectual technology, deterioration prediction*

1. はじめに

インフラ施設の老朽化が団塊的に進展している。厳しい財政状況下において、国民や道路利用者に対して、インフラ施設に対する維持管理の重要性、それに伴う予算確保の必要性を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、構造物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の実践はこの一連の意思決定過程に他ならない。一方で、アセットメトリクスに課せられた役割は、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ある¹⁾。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、形式知の共有知化を通して、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(ナレッジマネジメントを実施すること)、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、アセットメトリクスは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はなく、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、アセットマネジメントを戦略的に高度化することが目的である。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、特に著者等は、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、インフラ施設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ベイズ統計学の発展がある。

以上の問題意識に基づいて、本研究では、特に著者等が力を入れてきた劣化予測技術を中心にその技術の変遷と先端事例を俯瞰しながら、マネジメント分野においてモニタリングが果たす役割とそれに伴う研究開発の方向性、さらにはアセットマネジメントを包括するような統合的リスクマネジメントの展望について見解を述べる。以下、2. で本研究の基本的立場を述べる。

3. ではアセットメトリクスの基幹技術である劣化予測モデルとその推計手法に関する先端事例を説明する。4. ではアセットマネジメントにおけるモニタリングの役割と、モニタリングデータの分析手法について言及する。最後に5. において、アセットマネジメントの全体的な方向性として統合リスクマネジメントの概念を説明する。

2. 本研究の基本的立場

(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（劣化予測手法）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たとしても不変的に劣化予測（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。

(2) ビッグデータとインフラマネジメント

ビッグデータの概念は、「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すべてのデータを扱う、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（これ以降、ビッグデータの第1、第2、第3概念と呼ぶ）。

筆者等が目指してきたアセットメトリクスでは、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ビッグデータの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、2.(1)で述べたように、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、ビッグデータの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。特にインフラマネジメントの現場においては4.(2)で述べるが、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。インフラ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」が必要である。マネジメントの実践においては、アクションの「きっかけ」を与えることが重要であり、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。アセットメトリクス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。

インフラマネジメント分野におけるビッグデータと一般的なビッグデータには相違点も存在する。最も大きな相違点はインフラの点検データはオープン情報ではないことである。インフラ施設の社会的な重要性を考えると、誰でも容易に点検データにアクセスできるわけではない。インフラ管理者の視点に立てば、同じ点検データを提供するのであれば、当然ながら高度な分析手法を有し、実務者のニーズに即したアウトプットが期待できる研究者や技術者を選定する。この点について、著者等が開発を行った隠れマルコフ劣化ハザ-

ードモデル⁵⁾を例にあげ、説明を加えたい。さまざまな種類のインフラ施設のアセットマネジメントが急速に発展している。中でも、2.(3)で詳述するように、ビッグデータを用いたアセットマネジメントという視点にたてば、舗装分野のマネジメントは実務的にも学術的にも進展している。とりわけ、路面性状調査車の開発により、膨大な量の点検データが取得可能になったことが要因である。しかしその一方で、路面性状調査車は通常走行状態でデータ観測を実施するために、観測誤差の影響が無視できない。ビッグデータの第1概念に従えば、基本的に全ての点検データを推計に使用することが重要である。マルコフ劣化ハザードモデル⁶⁾を推計する場合には、2回の点検データの情報サンプルが必要となる。補修が実施されない限り、2回の点検間において健全度が自然に回復することはない。しかし、路面性状調査車で観測したわだち掘れ量から劣化予測を実施した場合には、情報サンプルの約半数において健全度の回復が確認できた。これは路面性状調査車が2回の調査で必ずしも同一線上を走行するわけではないことに起因する。通常、このような情報サンプルは除外してモデル推計を実施するが、使用する情報サンプル（健全度が一定、低下しているサンプル）にも観測誤差が混入している可能性が否定できない。このような状況下で、健全度が回復しているサンプルのみを単純に除外すると、ある種の推計バイアス⁷⁾が生じる可能性がある。隠れマルコフ劣化ハザードモデル⁵⁾はこのような観測誤差の影響を考慮した劣化予測モデルであるが、使用する点検データは標準的なマルコフ劣化ハザードモデルと同じである。同一の点検データを用いたとしても、分析者の分析能力によりアウトプットは全く異なる。上述したように、インフラマネジメントにおけるビッグデータは今後、一部の研究者や技術者に限定的に集約されることになる。

(3) ビッグデータ領域における知的技術

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。アセットメトリクス（ビッグデータによるインフラマネジメント）を対象に今後の技術開発の方向性を整理したい。図-1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

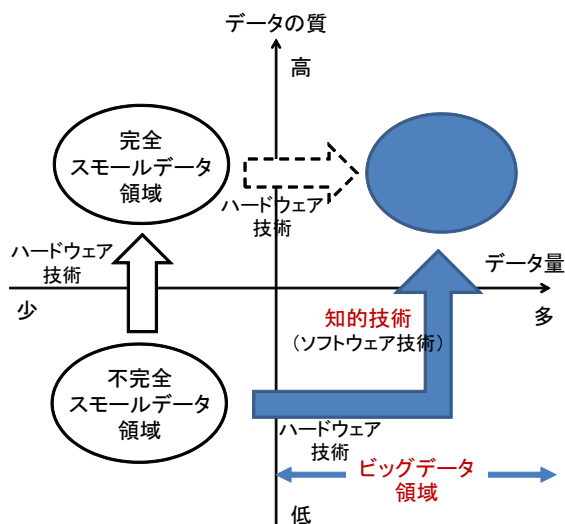


図-1 ビッグデータと知的技術の概念

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。ビッグデータ概念が浸透する以前は、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、精度が高くて因果関係がはっきりしている⁴⁾」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、インフラ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思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インフラ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、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^{8),9)}を中心とする近代統計学の発展である。

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、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。

3. 劣化予測モデルの高度化とベイズ推計

(1) 複合的劣化過程と推計手法

ハザードモデル¹⁰⁾およびマルコフ連鎖モデル¹¹⁾の導入が統計的劣化予測手法の躍進をもたらした。特定の事象に着目した劣化予測手法が数多く提案されているが、これらは青木¹²⁾、貝戸等¹³⁾に詳しい。それ以降の劣化予測手法は、ベンチマーク分析に代表される個々のインフラの劣化予測¹⁴⁾や、単独の劣化事象ではなく、劣

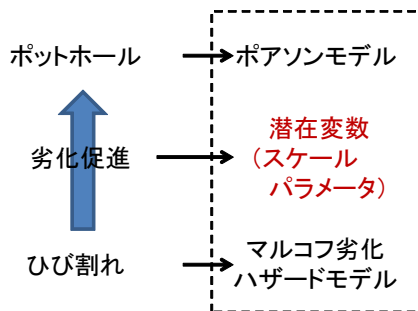


図-2 ポアソン隠れマルコフモデルの概念

化過程が互いに影響を及ぼしあうような競合的¹⁵⁾、階層的^{16),17)}、複合的関係性¹⁸⁾を記述した劣化予測モデルの開発が進んだ。具体的には、著者等は、ポットホールとひび割れの階層的関係¹⁷⁾、ひび割れと舗装耐荷力の複合的関係を表現した階層的隠れマルコフ劣化モデル¹⁶⁾、路上落下物と苦情の階層的関係を表現した隠れポアソンモデル¹⁹⁾の開発を行ってきた。図-2にはポアソン隠れマルコフモデルの概念を示している。舗装のポットホールとひび割れ率には、ひび割れ率が進展すると、ポットホールが多発するという階層的な関係性がある。特に密粒舗装を対象にすると、ひび割れが進展し、その最終形としてポットホールにつながるということが実務的経験から知られている。同図はその関係性を示したものである。ひび割れの進展により、ポットホールの発生率に影響を及ぼすスケールパラメータが大きくなる。スケールパラメータは潜在変数と呼ばれ、実際には観測されない変数である。このような潜在変数を含む複数の劣化過程を定式化した混合確率モデルに対しては、EM アルゴリズム²⁰⁾を用いた推計が一般的であったが、より複雑な確率モデルに対する推計はベイズ推定^{21),22)}の発展が飛躍的な進展をもたらした。

(2) ポアソン隠れマルコフモデル

図-3はポットホールとひび割れ率の階層的関係を考慮したポアソン隠れマルコフモデルを用いた劣化予測結果を示している。ポットホールの発生過程をポアソンモデルで、ひび割れ率の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで定式化した上で、ある特定道路区間で観測されたそれらの点検データを用いて分析したものである。もちろん、ポットホールに対する点検は日常点検（1日1回）、ひび割れ率の観測は定期点検（3～5年に1回の頻度）で実施される。このような観測頻度の相違や、点検実施日の非同期性²³⁾をモデル上で考慮している。さらに両者の階層的関係は潜在変数（ひび割れ率の健全度の段階的な低下がポットホール発生率に比例的に影響を及ぼすことを表現したスケールパラメータ）を用いて表現する。このような潜在変数を含

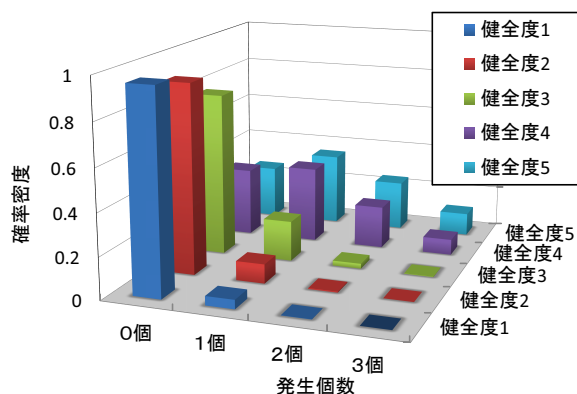


図-3 ポアソン隠れマルコフモデルの事例

む複雑な混合確率モデルに対して、ベイズ推計を実施して未知パラメータを得た。再び同図に着目する。例えば、ひび割れ率の健全度が1（ひび割れ率0%）のとき、ポットホールが1箇所以上発生する確率（任意の100m道路区間で1年間の発生確率）は5%以下である。ひび割れ率が健全度2,3と進展するにつれて、その発生確率は徐々に増加していく傾向にある。しかし健全度4（ひび割れ率10%）以降、その状況は劇的に変化していることが読み取れる。例えば、健全度5（ひび割れ率20%）のときにはその発生確率は80%以上となる。以上の階層的関係性は、定量的でないにせよ、日常点検を実施している技術者であれば経験的に把握している。アセットメトリクスの目的はこのような暗黙知を形式化していくことである。

このように形式化された知見の活用について、実務的な観点で追記する。一般的に舗装に対する補修（オーバーレイ）はひび割れ率を基準に決定される。点検マニュアル上はひび割れ率20%がその判断基準になることが多い。路面性状調査車を用いたひび割れ率の観測は3～5年に1回である。一方で現場の実務者は日々、ポットホールを対象に日常点検を実施している。ポットホールに対しては常温混合物を用いた応急補修が実施されるが、ポットホールが多発する道路区間では、道路利用者に対する安全性の観点から速やかにオーバーレイを実施することが望ましい。当然ながら、実務者はそのような道路区間を把握している。しかし極端な言い方をすると、ポットホールの発生数を基準に、オーバーレイ実施の意思決定を行うルールはない（マニュアルに記述はない）。その都度、オーバーレイの必要性を説明していくことになる。本研究の成果は、このような実務的な課題（日常点検データと意思決定の根拠となるデータの相違）に対して、ポットホールの発生過程とひび割れ率の進展過程の階層的関係を考慮した劣化予測を行っている。具体的にはポットホールが1年間に1個以上発生するような確率が70%以上の道路区

間はひび割れ率 10%以上に相当するということが理解できる。ポットホールの発生数を基準とする新たな指標を設定することや、新しい点検技術により新しい情報を取得することを実務に要求しているわけではない。従来の点検データと点検頻度に着目して、確率モデルと統計分析手法を高度化させることで、両者の階層的関係性という新たな知見を提示している。

(3) 階層的隠れマルコフモデル

同様の階層の関係は、ひび割れ率と舗装耐力の間においても確認することができる。舗装耐力は FWD 試験を通して評価されるが、FWD 試験は定期的を実施されるものではなく、必要性に応じて実施される。さらに FWD 試験の実施には一時的な通行止めを伴うために、道路管理者にとっても頻繁に実施できる試験ではない。その実施箇所を効率的に選定することが極めて重要な課題となっている。階層的隠れマルコフモデルは、ひび割れ率と舗装耐力の階層的关系（舗装耐力が低下すればひび割れ率の進展が速くなるという暗黙知）を明示したモデルである。図-4 は予測結果の 1 例である。ひび割れ率と舗装耐力に対して、それぞれの劣化過程を 5 段階のマルコフ劣化ハザードモデルで定式化している。図中の赤色の実線が舗装耐力に対する期待劣化パスであり、その期待寿命が約 50 年程度であることが読み取れる。一方で、ひび割れ率に対しては 4 本の期待劣化パスを例示している。黄色の実線は、舗装耐力の健全度が 1 の場合のひび割れ率の期待劣化パスである。これより、耐力の健全性が高い場合、ひび割れ率の期待寿命が約 30 年であることが理解できる。しかし、舗装耐力の健全度が 4 に低下した段階のひび割れ率の期待劣化パス（図中の青色実線）からは、その期待寿命が約 12 年であることがわかる。これより、ひび割れ率による表層の期待寿命は、舗装耐力の状態に応じて半減以下となることが読み取れる。したがって、複数回のオーバーレイの後、表層の寿命が道路建設当初の寿命よりも半減してきた場合には、FWD 試験の実施候補としてあげることができる²⁴⁾。

さらに、ひび割れ率と舗装耐力の関係性は、舗装耐力がひび割れ率に影響を及ぼすのみという一方の劣化事象ではなく、双方向の関係性であることも実務的には理解されている。現在、このような劣化過程の双方向の関係性を複合的劣化過程として表現可能なモデル開発を行っている¹⁸⁾。さらには、ポットホール、ひび割れ率、舗装耐力という多階層の複合的劣化過程のモデル化も可能である。また、国内の高速道路は開業後数十年が経過している区間も少なくなく、舗装構造全体の大規模補修が必要となってきた。この際には、オーバーレイのみにとどめるのか、大規模補

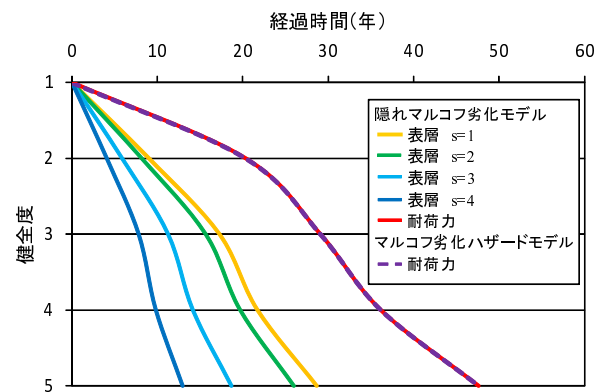


図-4 階層的隠れマルコフ劣化ハザードモデル

修を実施するのかを、それらの劣化過程を考慮したライフサイクル費用分析を通して意思決定する必要がある。これらの経済性分析モデルに関しても、モデル開発を実施している²⁵⁾。

4. モニタリングデータとマネジメント

(1) モニタリングの役割

目視点検データを中心とするアセットマネジメントを第 1 世代と呼ぶならば、モニタリングデータを中心とするアセットマネジメントは第 2 世代と呼ぶことができる。インフラ施設の損傷・劣化の検出、あるいは性能評価を目的として、各種センサーを用いた検査手法やモニタリング手法（以下、モニタリング）が提案されている。モニタリングは 1) 1 回の計測によって保有性能や損傷を絶対評価する手法と、2) 継続的な計測を通してそれらを相対評価する手法に大別することができる。これまでのモニタリング分野においては前者の手法が学術的に注目され、既存の研究成果も多い。しかし、このような手法を適用できるインフラ施設は象徴的なインフラ（重要性、損傷の進展性）に限定される。また、現在の点検は目視点検が主体であり、当面は目視点検を補間するようなモニタリングが必要となる。後者の継続的モニタリングの特徴は、保有性能の低下や損傷の発生・進展とともに変動すると考えられる特性値を継続的に計測することによって、それらの日常の変動範囲から逸脱する変化を捉えようとする点（時系列解析を援用した異常検知アルゴリズム）にある。このような振動特性の相対変化を捉えることで、専門技術者の初動体制の効率的な確保が可能となる。インフラマネジメントにおけるモニタリングの役割は、目視点検に置き換わるのではなく、専門技術者が目視点検を確実に実施できるように支援情報を提供することにある。また、ビッグデータの概念から考えても、今後のモニタリング技術の開発の方向性は後者となろう。

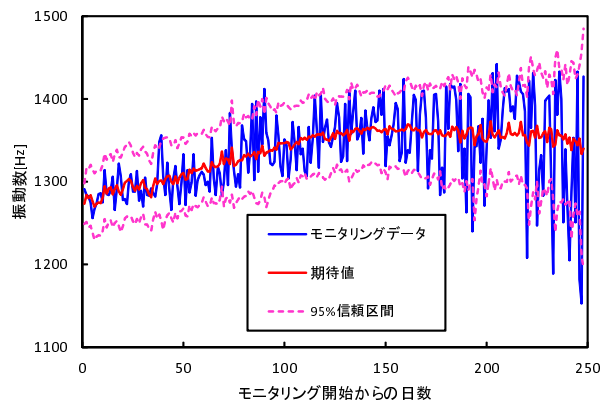


図-5 ARMAX-GARCH モデルとモニタリングデータ

(2) 分散変動を考慮した時系列モデル

ビッグデータがもたらす変化を1つに限定することはできない。とりわけ、土木計画学分野では、期待値の議論からの脱却がある。これはマネジメント分野における、時系列解析を援用した異常検知アルゴリズムにおいても同様である。インフラ施設の局所的な損傷を、施設全体を対象としたモニタリングデータ（特性値の時系列における期待値の変動）で検出することは困難である。局所的な損傷に対して、より感度が高いと考えられる（1次モーメントではなく）、2次モーメント以上の指標を用いてアルゴリズム開発に当たらなければならない。時系列解析においては、1990年以降、分散の時間的変動を定式化したGARCHモデルなどが開発され、金融工学分野を中心に発展してきた。

図-5は、橋梁のジョイントを対象に、その加速度を250日間継続して計測したときの各日のピーク周波数を時系列で示したものである。周波数の期待値と分散が経時的に変動していることが見て取れる。具体的にはこの劣化の進行過程を外生変数を考慮した自己回帰移動平均モデル（AutoRegressive Moving Average model with exogenous variables model、以下、ARMAXモデル）で表現するとともに、その誤差項の分散の変動を確定トレンド付きのGARCH（Generalized AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity model）過程で表現したARMAX-GARCHモデル²⁶⁾により定式化した。当然ながら、同モデルは多数の未知パラメータを含んでいるが、これらに対してはベイズ推計による同時推計を行った。推計結果より、期待値の変動のみならず、分散の変動も捉えていることがわかる。さらにインフラ施設というライフタイムの長い構造物の異常を検知するためには長期記憶性^{27), 28)}を考慮した時系列モデルを導入していくことが必要である。

また、図-6は、分散の時間トレンド項とジョイントのき劣進展量との関係性を示したものである。サンブ

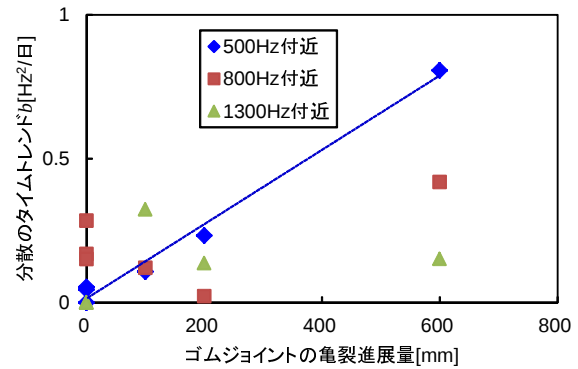


図-6 分散の時間トレンドとゴム製ジョイントのき裂進展

ル数も少なく偶発的な事象である可能性は否めない。現時点では、分散項とジョイントのき裂進展の因果関係に関する工学的知見はほとんど蓄積されていないが、同図を見る限り両者の間に相関関係が存在しており、何らかの因果関係が存在する可能性を示唆している。ビッグデータの概念からは、今後データを蓄積して相関に有意性が確認できれば、分散項を評価指標としてモニタリングを継続すればよい（ジョイントの損傷はき裂だけではないので、その点は留意する必要がある）。既述してきた通り、モニタリングデータを収集することがマネジメントではない。モニタリングデータは専門技術者の意思決定を支援する情報である。この場合においては、モニタリング情報は、専門技術者が現場で詳細な点検を実施するタイミングに関して貴重な情報を与えてくれるという点に意義がある。

5. 統合的リスクマネジメントに向けて

(1) 予防的異常検知システム

舗装の日常点検業務では、直近における積雪量、降雨量や継続降雨時間がある一定の閾値を越えた場合、ポットホールが発生率が増加することが確認されている。舗装を対象としたインフラマネジメントに関しては、舗装劣化に関する統計的予測手法が提案され、ポットホール等に対する日常巡回政策や補修政策の合理化政策を検討するための計画モデル^{29), 30)}や、舗装の劣化予測手法と連動したライフサイクル費用評価手法の高度化³¹⁾が試みられている。しかし、これら既往の舗装マネジメントに関する研究は、長期定常状態を想定して、舗装の平均的なパフォーマンス（期待寿命）を向上させることを目的としている。ポットホールの発生は、直ちに交通事故の発生に繋がる危険性を孕んでいるために、ポットホール管理においては気象状況に応じて通常管理モード（通常モードと呼ぶ）と高度な管理モード（異常モードと呼ぶ）を切り替えることができるような

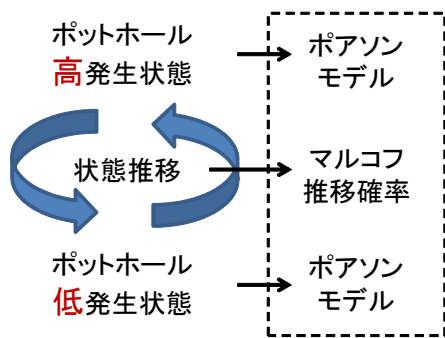


図-7 マルコフ・スイッチングモデルの概念

状況依存的な管理重点化方を導入することが効果的である。

このような課題に対して、著者等はマルコフ・スイッチングモデル³²⁾を用いた意思決定モデルを開発中である(図-7)。ポットホールは数日間の降雨が続く翌日に多発することが経験的に知られている。また、このような場合には、通常巡回(通常モード)から臨時巡回(異常モード)に切り替わる(スイッチする)。臨時巡回の具体例としては、1日に2回の道路巡回を実施することなどがあげられる。通常のポットホール発生過程を低頻度のポアソンモデルで、降雨後のポットホールの発生過程を高頻度のポアソンモデルで表現する。気象状況により、いずれか一方の巡回が実施され、2つの巡回へのスイッチング過程をマルコフ推移確率行列で定義する。マルコフ推移確率はマルコフ劣化ハザードモデルで定式化され、その説明変数に降雨継続時間や降雨量などを検討している。

気象状態に応じて通常モードと異常モードを切り替えることができるような状況依存的な管理重点化ルールを開発することができれば、より柔軟な巡回体制を構築することができる。さらに、このような考え方は他の同様のインフラ管理問題への適用が可能である。特に、従来の異常検知(モードの切替)では降雨量などの過去の蓄積量が閾値に到達するか否かを判断根拠としている。マルコフ・スイッチングモデルのような確率モデルを援用することで状態予測が可能となる。ある任意時点での降雨量の総量が同じであっても、各日あたりの降雨量の変動や、環境条件を勘案することにより、今後規制に値すべき状態に進展するか否かを予測した上で、より柔軟な異常検知とその意思決定が可能となる。

(2) クリティカルインフラと脆弱性評価

インフラ施設の日常的な事象を扱うアセットマネジメントと非日常的な事象を扱うリスクマネジメントを融合させることで、インフラ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統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インフラ施設群をネットワークシステムとして捉え、コアとなるインフラ施設(クリティカルインフラ)を抽出する必要がある。その上で、クリティカルインフラ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。インフラマネジメント分野においても、VaR³⁰⁾、リアルオプションアプローチ³³⁾に代表されるリスク計量化手法や、フォルト・ツリー分析^{34),35)}を用いたリスク評価手法が提案されている。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³⁶⁾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

国内の大学では、舗装工学と鉄道工学を専門にする研究室や講義が長らく縮小傾向にある。一方で、ビッグデータを用いたアセットマネジメントの実践が進展している、あるいはその可能性が大いにあるのも両分野(鉄道では軌道管理)であろう。これは舗装では路面性状調査車が、軌道では軌道検測車が実用化され、全ての舗装や軌道を対象に効率的に点検データを収集するシステムと、そのデータに基づく管理基準が整備されていることが要因である。特に道路構造物では、現有のモニタリング技術水準においても、直ちにビッグデータを用いた舗装マネジメントを実施することが可能である。これらのことは、アセットマネジメントが現場主義的な学術領域であり、現場データからいかに意思決定に有用な情報を抽出できるかが重要な視点であることを示唆している。アセットマネジメントの研究開発は現場情報を出発点として、現場の意思決定の流れに沿ったものでなければ単なる机上の空論となってしまう。その一方で、アセットマネジメントの研究を始めて10年以上経過するが、現場主義を徹底すれば、今なお研究テーマが尽きることはない。

アセットメトリクスの目的は、長年に亘って蓄積されたマネジメント(意思決定)に関する暗黙知を形式知化することを通じて、結果的にマネジメント体系そのものを戦略的に高度化する点にある。形式知化されたマネジメント論は国内に限定したものでなく、海外においても共有知として活用することができる。実際に、2013年度内にアセットマネジメントに関するISO5500Xが

施行される予定であり、アセットマネジメントの枠組みはデジュール標準化されることになる。しかし、ISO においては個別の要素技術までが規定されるわけではなく、この分野では ISO との整合性を意識しながら、デファクト標準化を目指す必要がある。とりわけ、海外を対象としたインフラマネジメントの開発にあたっては、固有の制約条件や点検データの多様性を勘案しながら、クライアントに応じて方法論をカスタマイズしていく姿勢が重要である。特に、我が国は点検・モニタリング情報に基づいてインフラ施設の維持・補修を実施していく実践的アセットマネジメントに関して世界的にも先進的な地位を獲得できるようになってきた。アセットメトリクスは、このような現場主義に基づくアセットマネジメントの高度化のための基本的な方法論として重要な役割を果たすと考える。

参考文献

- 小林潔司：土木工学における実践的研究：課題と方法，土木技術者実践論文集，No.1，pp.143-155，2010.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.493-512，2008.
- 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.
- 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.
- 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.
- 伊庭幸人，種村正美，大森裕浩，和合肇，佐藤整尚，高橋明彦：計算統計 II マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺，岩波書店，2005.
- Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 森村英典，高橋幸雄：マルコフ解析，日科技連，1979.
- 青木一也：土木施設の劣化リスクの計量化手法，土木計画学研究・論文集，Vol.25，No.1，pp.17-35，2008.
- 貝戸清之，青木一也，小林潔司：実践的アセットマネジメントと第二世代研究への展望，土木技術者実践論文集，Vol.1，pp.67-82，2010.
- 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.
- 林秀和，貝戸清之，熊田一彦，小林潔司：競合的劣化ハザードモデル：舗装ひび割れ過程への適用，土木学会論文集 D，Vol.65，No.2，pp.143-162，2009.
- 小林潔司，貝戸清之，江口利幸，大井明，起塚亮輔：舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル，土木学会論文集 D3，Vol.67，No.4，pp.422-440，2011.
- Le Thanh Nam，貝戸清之，小林潔司，起塚亮輔：ポアソン隠れマルコフ劣化モデルによる舗装劣化過程のモデル化，土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)，Vol.68，No.2，pp.62-79，2012.
- 松村泰典，小林潔司，貝戸清之，大井明，山口清人：デタ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計，第 46 回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.281，広島工業大学，2013.
- 小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，福田泰樹，板垣勝則：道路障害物に関する苦情発生分析，土木学会論文集 F4，Vol.69，No.1，pp.32-46，2013.
- Bishop, C. M. (元田浩他監訳)：パターン認識と機械学習 下 ベイズ理論による統計的予測，丸善出版，2012.
- 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定，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.336-355，2007.
- 貝戸清之，小林潔司，青木一也，松岡弘大：混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計，土木学会論文集 D3，Vol.68，No.4，pp.255-271，2012.
- 宮崎文平，小濱健吾，貝戸清之：時間不整合データを用いたポアソン隠れマルコフ劣化モデルの推定，第 46 回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.280，広島工業大学，2013.
- 森悠，藤原栄吾，貝戸清之，小林潔司，橋本拓己：相対評価モデルを用いた舗装構造の劣化診断，土木学会論文集 E1，Vol.67，No.2，pp.91-110，2011.
- 小林潔司，江口利幸，大井明，青木一也，貝戸清之，松村泰典：舗装構造の最適補修更新モデル，土木学会論文集 E1，Vol.68，No.2，pp.54-68，2012.
- 数実浩佑，貝戸清之，松岡弘大，小林潔司：道路橋継手モニタリングデータへの ARMA-GARCH 回帰モデルの適用，第 46 回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.286，広島工業大学，2013.
- 塚井誠人，小林潔司：長期記憶性を考慮した社会資本の生産性測定，土木学会論文集 D，Vol.63，No.3，pp.255-274，2007.
- 小林潔司，Jaafar, M. N. B.，尾形誠一郎，塚井誠人：越境ヘイズ災害のための危険予告情報：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.
- 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.
- 小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，加藤俊昌，生田紀子：道路障害リスクと道路巡回の合理化方策，建設マネジメント論文集，土木学会，Vol.14，pp.87-98，2007.
- 小林潔司，江口利幸，大井明，青木一也，貝戸清之：劣化過程の不確実性を考慮した路面性状調査の最適実施方策，土木学会論文集 E1，Vol.67，No.2，pp.75-90，2011.
- 水谷大二郎，貝戸清之，小林潔司：マルコフ・スイッチングモデルによるポットホール発生過程，第 46 回土木計画学研究・講演集，土木学会，埼玉大学，CD-ROM，No.16，2012.
- 小濱健吾，貝戸清之，青木一也，小林潔司，福田泰樹：劣化過程を考慮した最適廃棄・補修モデル，土木学会論文集 F4，Vol.68，No.3，pp.141-156，2012.
- 貝戸清之，金治英貞，小林寛，間嶋信博，大石秀雄，松岡弘大：目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法，土木学会論文集 F4，Vol.67，No.2，pp.74-91，2011.
- 貝戸清之，金治英貞，杉岡弘一，大石秀雄，松岡弘大：鋼材腐食ハイブリッド劣化予測とフォルト・ツリー分析を用いた長大橋の最適点検間隔評価，土木学会論文集 F4，Vol.69，No.2，pp.84-101，2013.
- 貝戸清之，松岡弘大，坂井康人，川上順子，荒川貴之，金川昌弘，小林潔司：アセットマネジメントへの適用を見据えた路車間無線通信モニタリング，応用力学論文集，

BIG-DATA BASED INFRASTRUCTURE MANAGEMENT: TOWARDS ASSETMETRICS

Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

The asset management for infrastructures has been conducted based on implicit knowledge, such as the experience and knowledge of professional engineers, for each process. Asset metrics is aimed at converting the decentralized decision making process based on implicit knowledge to the systematic decision making process based on formal knowledge. Especially, methodologies are developed based on the data that can be obtained through daily and regular inspections, under the thoroughgoing hands-on policy. In the field of asset management, the authors emphasize the importance of intellectual technologies for analyzing existing data rather than the hardware technologies for collecting new data, and indicate that this is consistent with the concept of big data analysis. In addition, the authors mention ideal monitoring methods in this field and the perspective for comprehensive risk management, by introducing the latest researches into asset metrics.