

インフラ管理の最適化：アセットメトリクスに向けて

Optimization of Infrastructure Management: Toward Asset-metrics

貝戸 清之^{1*}, 小林 潔司^{2†}, 水谷 大二郎^{1‡}

Kiyoyuki Kaito, Kiyoshi Kobayashi, and Daijiro Mizutani

概要 橋梁や道路などのインフラ施設に対する維持管理（アセットマネジメント）では、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意思決定がなされてきた。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。インフラ管理の最適化を図るためには、ライフサイクル費用最小化を達成するような補修計画を立案する必要があるが、そのためにはインフラ施設の劣化予測が不可欠となる。著者等は、インフラの劣化過程を離散的な状態の推移を表すマルコフ劣化ハザードモデルを用いて表現するとともに、インフラ施設に対する日常・定期点検を通して獲得できるデータを用いてモデル推定を行うという統計的アプローチによりこの課題解決を図ってきた。本稿ではアセットメトリクス構築に向けた研究開発を俯瞰的にレビューするとともに、今後の研究動向についても言及する。

キーワード インフラ施設, アセットメトリクス, 点検データ, マルコフ劣化ハザードモデル

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転換（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

1 大阪大学大学院工学研究科, 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1

Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

2 京都大学経営管理大学院, 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

Graduate School of Management, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan

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

† E-mail address: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

‡ E-mail address: d-mizutani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

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 [2] の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、その推定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を俯瞰的にレビューするとともに、先端事例を交えながら今後の研究動向についても言及する。以下、**2.**でマルコフ劣化ハザードモデルの変遷を通して本研究の基本的な考え方を述べる。**3.**ではアセットメトリクスの基幹技術である混合マルコフ劣化ハザードモデルとその適用事例を説明する。**4.**では劣化予測結果を用いたライフサイクル費用評価モデルについて言及する。

2. マルコフ劣化ハザードモデルの変遷

2.1. 劣化予測モデルの変遷

近年、インフラ施設の劣化予測手法として統計的劣化予測モデルを用いる手法が急速な発展を遂げている。統計的劣化予測においては、劣化の進展を離散的な健全度で評価した点検データ（多段階レーティングデータ）が多く用いられる。このような統計的劣化予測手法の中でも、複数の指数ハザードモデルの多重化によりマルコフ推移確率を表現した多段階指数ハザードモデル（マルコフ劣化ハザードモデル） [3] の開発を契機として、非集計的なマルコフ推移確率の推定法が確立され、健全度評価に基づいた劣化予測の精度が大幅に向上した。統計的手法による劣化予測結果を用いて、ライフサイクル費用評価や点検・補修・更新戦略の策定の合理化 [4] が可能になった。図 1 に、マルコフ劣化ハザードモデルをベースとした統計的劣化予測モデルとその劣化予測結果を用いた分析手法を整理している。2005 年のマルコフ劣化ハザード

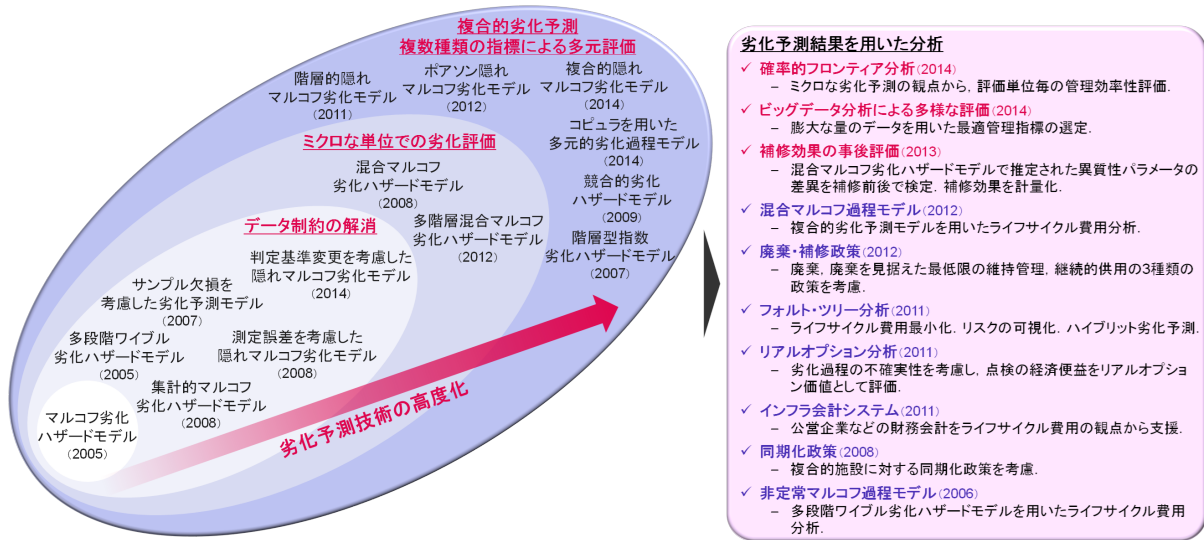


図1 マルコフ劣化ハザードモデルの変遷

ドモデルの開発以降、同モデルに基づく先端的な統計的劣化予測モデルが開発されている。これらのモデル開発の変遷を、本稿では3種類のフェーズ（「データ制約の解消」、「マイクロな単位での劣化評価」、「複合的劣化予測・複数種類の指標による多元評価」）に着目し整理する。なお、インフラ施設に対する点検データは、上述した多段階レーティングデータのほかに、健全度を2値評価する場合や、損傷や不具合の発生個数を評価する場合があります、それぞれワイブル劣化ハザードモデル [5] やポワソン発生モデル [6] で表現される。

2.1.1. 「データ制約の解消」

第1フェーズとして「データ制約の解消」を目的としたモデルの発展があげられる。これは点検の役割として、インフラ施設の損傷・劣化の検出が重視され、アセットマネジメントを稼働されるための情報収集手段という認識が希薄であることが要因である。以下、モデル開発の事例を時系列的に提示する。小林等 [7] は、補修による点検データのサンプル欠損問題に対して、マルコフ劣化ハザードモデルの尤度関数に補正係数を乗ずることにより、理論的な健全度分布と実測サンプル数の乖離を修正し、マルコフ劣化ハザードモデルを推定する方法論を開発している。堀等 [8] は、インフラ施設の健全度が相対頻度としてのみ獲得されているような場合に、点検データサンプル内の点検間隔の不均一性を許容できるというマルコフ劣化ハザードモデルの利点を保持しつつマルコフ推移確率を推定するための集計的マルコフ劣化ハザードモデルを定式化している。青木等 [9] は、高速道路付帯施設のような比較的寿命の短い施設では劣化過程のマルコフ性が成立しない可能性を指摘し、複数のワイブル劣化ハザードモデルを用いて、劣化過程の時間依存性を考慮できる多段階ワイブル劣化ハザードモデルを定式化した。小林等 [10] は、獲得された健全度に測定誤差が介在する場合に、真の健全度と実際に観測された健全度間の誤差を確率モデルで表現し、真の健全度における劣化過程を表現するマルコフ劣化ハザードモデルを推定するための隠れマルコフ劣化モデルを提案している。さらに、点検

データの獲得期間内に、健全度の判定基準が改正され、異なる基準で判定された健全度が混在するようなデータベースに対して、改正前の基準での健全度と改正後の基準での健全度間の対応関係を確率モデルで表現し、最新の基準の健全度におけるマルコフ劣化ハザードモデルを推定するための隠れマルコフ劣化モデルも提案されている [11]。これらの劣化予測モデルの推定手法に関しても、マルコフ劣化ハザードモデル開発当時の最尤推定法に加え、ベイズ推定法（特に、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法）[12]による推定手法も開発されている [13]。ベイズ推定法の主な利点として、1) 経験的な情報を事前分布としてモデルの推定に利用することができる点、2) 未知パラメータを事後分布として推定できるため推定結果の信頼性評価が可能となる点、があげられる。さらに、隠れマルコフ劣化モデルは、尤度関数が高次の非線形多項式となり、1階の最適化条件が非常に多くの解を有しているため、最尤推定法を用いて解くのは現実的ではない。このような問題を回避するために、尤度関数の完備化操作を内包したベイズ推定法が開発されており、ベイズ推定法の開発が統計的劣化予測モデルの発展を支えていることも特筆すべき点である。

2.1.2. 「ミクロな単位での劣化評価」

マルコフ劣化ハザードモデルでは、劣化速度を規定するハザード率に劣化に影響を及ぼす要因（特性変数）を内包させることで条件の相違に応じた劣化予測を行うことが可能である。しかし、同モデルでは、管理対象となるインフラ施設グループの平均的（マクロ）な劣化予測を行っているに過ぎない。一方、混合マルコフ劣化ハザードモデル [14] の開発により、個々のインフラ施設間に潜在する劣化過程の異質性を考慮した、「ミクロな単位での劣化評価」が可能となった。本稿では、これを統計的劣化予測モデルの発展過程の第2フェーズと位置づける。インフラ施設の劣化過程は、たとえ同一の特性変数（交通量や構造条件など）を有する場合でも、定量的に観測できない要因、あるいは、そもそも不可観測である要因により、多様に異なる。これらの要因に起因した劣化過程の差異を第2フェーズ以降では異質性と呼ぶ。混合マルコフ劣化ハザードモデルでは、実際の維持管理体制に合わせた評価単位（例えば、路線単位、管理事務所単位、施設単位など）で異質性を評価するための異質性パラメータが推定される。つまり、実際の評価単位ごとにマルコフ推移確率や期待寿命を推定することができる。これらの結果を用いて、重点監視部材の抽出や、各評価単位での点検・補修政策の最適化を行うことが可能となっている。なお、混合マルコフ劣化ハザードモデルの概要は **3.** を併せて参照されたい。また、混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定手法に関しても、モデル開発当時の段階的最尤推定法に加え、階層ベイズ推定法も開発されている [15]。階層ベイズ推定においては、異質性パラメータの分布を特定化することなくモデルを推定することができる。さらに異質性パラメータの事前分布の分散を規定するパラメータをハイパーパラメータとして設定して全ての未知パラメータを同時推定することで、異質性の過分散問題を緩和することが可能となり、異質性パラメータの推定精度を向上させることが可能となった。また、階層ベイズ推定を用いて、劣化予測モデル内の全ての未知パラメータを同時推定することにより、膨大な未知パ

ラメータを含む劣化予測モデルの開発，推定も可能となった．例えば，異質性パラメータを階層的に設定した，多階層混合マルコフ劣化ハザードモデルが開発され，階層的な評価単位（例えば，路線単位と個々の施設単位の組み合わせ）における劣化過程の異質性を単一のモデルで同時に推定することも可能となった [16]．

2.1.3. 「複合的劣化予測・複数種類の指標による多元評価」

上述の劣化予測モデルでは，全て単一種類の劣化指標のみを対象として劣化予測を行うことを想定していた．しかし，インフラ施設の劣化過程は，現実には多元的な指標を用いて評価されることも少なくない．ここでは，このようにインフラ施設の劣化過程を多元的に評価するためのモデルや，以下で説明する複合的な劣化過程を表現するためのモデルを，統計的劣化予測モデルの発展過程の第3フェーズ「複合的劣化予測・複数種類の指標による多元評価」と位置づける．例えば，道路舗装に対しては，ひび割れ率，わだち掘れ量，ポットホール発生個数，IRI（International Roughness Index：国際ラフネス指数）などを，橋梁に対しては，ひび割れ，剥離・剥落数，遊離石灰，漏水などを用いて劣化が総合的に評価され，点検・補修の計画が立案される．さらには，単一種類の劣化指標がさらに細分化される場合もあり，例えば，道路舗装のひび割れは，縦ひび割れ，横ひび割れ，面ひび割れの3種類に大別される．貝戸等 [17] は，このような舗装ひび割れの劣化過程を詳述するために，各ひび割れの健全度推移を表現するマルコフ劣化ハザードモデルに，ひび割れの種類間の推移過程を表現する指数ハザードモデルを内包した，階層型指数劣化ハザードモデルを開発している．林等 [18] は，最も劣化の進展したひび割れの種類とその健全度のみが各点検時点において観測されているような点検データベースを用いて，3種類のひび割れそれぞれの劣化過程を表す3種類のマルコフ劣化ハザードモデルを推定するための，競合的劣化ハザードモデルを開発している．一方で，実際のインフラ施設の劣化過程に着目すると，複数の劣化指標，あるいは劣化事象が互いに作用し合い，複合的に劣化が進展する場合も少なくない．このような複合的な劣化過程に対しては，異なる劣化事象間の関係性を考慮したような劣化予測モデルも開発されている．小林等 [19] は，高速道路の舗装構造において，基層以下の耐荷力の低下に伴い，路面の性能も低下していくような複合的劣化過程を，非定常マルコフ過程を有する階層的隠れマルコフ劣化モデルとしてモデル化している．さらに，基層以下の耐荷力の低下過程と路面の性能の低下過程が相互に影響を及ぼし合うような，複合的隠れマルコフ劣化モデルも開発されている [20]．また，Nam 等 [21] は，舗装の路面の性能低下に伴い，ポットホールの発生個数が増加していくような複合的劣化過程を，ポアソン隠れマルコフ劣化モデルとしてモデル化している．これらの隠れマルコフ劣化モデルにおける複合的劣化過程では，対象とする複数の劣化事象の劣化速度の変化に比較的明らかな相関関係が存在するような場合を想定していた．しかし，数ある劣化事象の中には，劣化事象そのものの間ではなく，第3の要因に起因して，同一のインフラ施設において複数の劣化事象の劣化速度が増加，あるいは減少し，結果的に劣化事象間に相関関係が存在するような場合も考えられる．このような複合的劣化過程に対しては，それらの第3の要因を異質

性とみなした混合マルコフ劣化ハザードモデルを各劣化事象に対して定義し、さらに、各劣化事象の異質性間の相関関係をコンピュータを用いて同時分布として表現した、多元的劣化過程モデルも開発されている [22].

このように、マルコフ劣化ハザードモデルの開発以降、様々な先端的な劣化予測モデルが開発されている。本稿では、マルコフ劣化ハザードモデルをもとにしたモデルの発展を3種類のフェーズに分け整理した。図1で表現したように、「複合的劣化予測・複数種類の指標による多元評価」フェーズには「ミクロな単位での劣化評価」と「データ制約の解消」の考え方が含まれ、「ミクロな単位での劣化評価」フェーズには「データ制約の解消」の考え方が内包されている点が統計的劣化予測モデルの発展過程の1つの特徴である。なお、図1では、多段階レーティングデータを対象とした手法のみを取り上げているが、時系列データを用いてインフラ施設の劣化予測を行うための統計的方法論 [23] も、近年、数多く開発されている。

2.2. 劣化予測結果を用いた分析

上述のマルコフ劣化ハザードモデルを基軸とした多様な劣化予測モデルを用いることにより、インフラ施設の劣化過程を表現するマルコフ推移確率を推定することができる。推定されたマルコフ推移確率をマルコフ決定モデルに適用することにより、所与の点検・更新政策に対するライフサイクル費用やリスク管理指標（例えば、健全度が I になる確率など）を計量化することができる。なお、点検・更新政策は、点検間隔や更新間隔、予防保全政策か事後保全政策かなどの組み合わせにより構成される。点検・更新政策を変化させる感度分析により、リスク管理水準を与件としたときに、ライフサイクル費用を最小化するような最適点検・更新政策を求めることが可能となる [4]。なお、インフラ施設のライフサイクル費用評価に基づいた、維持管理政策の具体的な最適化手順や最新の最適化手法に関しては、4. で改めて説明する。

図1の右部には、劣化予測結果を用いて行われる分析を列挙している。これらの分析は、マルコフ決定モデルに基づく分析（図1右部に青色で示した項目）とそれ以外の分析（図1右部に赤色で示した項目）に区分することができる。まず、マルコフ決定モデルに基づく分析に関しては、劣化予測モデルの高度化に応じて、用いるマルコフ決定モデルも変化し、多段階ワイルド劣化ハザードモデルの時間依存的なマルコフ推移確率を用いた、非定常マルコフ過程モデル [24] や、階層的隠れマルコフ劣化モデルの複数の非定常マルコフ推移確率を用いた混合マルコフ過程モデル [25] などが開発されている。さらに、複数の種類の施設で構成された複合的施設に対して、それらの点検・更新タイミングの同期化政策を考慮した、最適同期化政策も開発されている [26]。また、単にライフサイクル費用とリスク管理指標を求めることに留まらず、マルコフ決定モデルをインフラ会計システムやフォルト・ツリー分析に組み込んだ方法論 [27, 28] や、リアルオプション分析と併用し、点検行為の経済分析を定量化したモデル [29] や、インフラ施設の廃棄政策を考慮した、最適廃棄・補修モデル [30] も開発されている。一方で、近年の統計的劣化予測モデルの高度化やアセットマネジメントの考え方の浸透に伴い、マルコフ推移確率以外の劣化予測結果を用いた分析手法も提案されるようになってきている。例

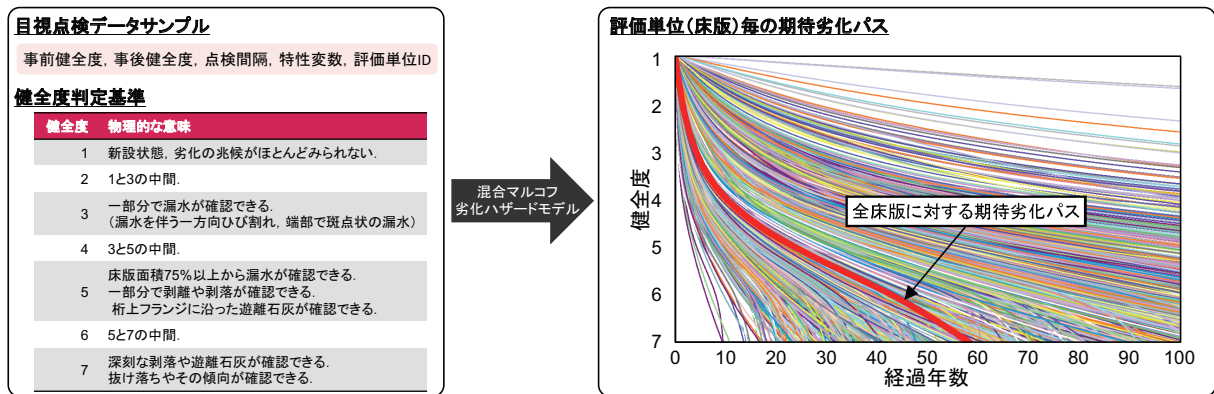


図2 評価単位ごとのマイクロな劣化予測

例えば、混合マルコフ劣化ハザードモデルの異質性パラメータを補修前後で別個に設定し、階層ベイズ推定におけるそれらの事後分布の差異を仮説検定することにより、補修効果を定量的に事後評価するための方法論 [31] や、管理事業体ごとの施設の劣化過程の差異を管理効率性とみなし、定量的に評価するための確率的フロンティア分析 [32] が提案されている。さらには、近年、インフラ施設の点検データはビッグデータと称されはじめ、膨大なデータを用いることにより道路舗装の最適な管理指標を決定した事例も存在する [33]。このように、従来のマルコフ決定モデルを用いた分析に加え、劣化予測モデルの高度化に付随し、それらの劣化予測結果を用いた分析手法の多様化が顕著となっている。

3. 混合マルコフ劣化ハザードモデル

マルコフ劣化ハザードモデルに基づく先端的な統計的劣化予測モデルの一例として、本稿では、混合マルコフ劣化ハザードモデルを取り上げる。マルコフ劣化ハザードモデルの開発により、観測期間長が異なる点検データを用いてマルコフ推移確率を非集計的に推定することが可能になった。さらに、劣化速度を表すハザード率に内包される特性変数では表現しきれない要因（不可観測要因）の影響を確率変数で表現したような混合マルコフ劣化ハザードモデルが提案された。図2には、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いた劣化予測事例を示した。ハザードモデルを用いてマルコフ推移確率を推定する際には、図2に示すように、ある点検時点での施設の健全度（事前健全度）、次の点検時点での健全度（事後健全度）、それらの点検間隔の3種類の情報が健全度ペアサンプルとして最低限必要な情報となる。施設の健全度は、同図に示すような離散的なレーティングにより評価される。また、交通量や構造条件を特性変数として考慮することが可能となる。さらに、混合マルコフ劣化ハザードモデルでは、劣化速度を表す混合ハザード率が異質性パラメータと健全度別標準ハザード率を用いて、

$$\text{混合ハザード率} = \text{異質性パラメータ} \times \text{健全度別標準ハザード率} \quad (1)$$

と表現される。混合マルコフ劣化ハザードモデルでは、現実の施設の維持管理体制に応じた任

意の評価単位において施設の劣化過程を推定することができる。図2には、橋梁の床版の劣化予測を床版単位で行った結果を期待劣化パスとして示している。同図から、各々の床版の期待寿命は、最短で10年程度、最長で100年以上と、多様に異なることが見て取れる。このように、実際の評価単位に合わせた劣化予測を行うことで、各評価単位で維持管理政策を最適化することが可能となり、結果として、ライフサイクル費用の低減、あるいはリスクの低下が実現される。さらに、これらの評価単位は、劣化予測を行う管理者の立場によって臨機応変に変化されるべきであり、例えば、図2に示した個々の床版単位のような比較的細かい単位の場合には、個々の床版のライフサイクル費用を算出することと比べ、比較的劣化速度の大きい重点監視床版を抽出するといった、短期的政策に主眼が置かれている。一方で、管理事務所単位や路線単位といった、比較的大きな評価単位を採用した場合には、各評価単位での予算計画といった中・長期的戦略に対して、劣化予測結果は有用な情報を提供することができる。

4. ライフサイクル費用評価モデル

統計的劣化予測結果を用いて最適な維持管理政策を決定するための方法論の1つを紹介する。維持管理政策（点検間隔、補修間隔、予防保全か事後保全かなど）と点検・補修や交通規制に関する費用情報を与件としてライフサイクル費用やリスクを算出する場合、マルコフ連鎖モデル[34]が有用となる。その理由として、インフラ施設に対する点検・更新タイミングが離散的時間軸により表現可能である点、あるいはインフラ施設の劣化状態が離散的な健全度を用いて表現される点があげられる。前者に対しては、施設の供用開始からの経過時間の集合を状態空間とするマルコフ連鎖モデル[35]を、後者に対しては、劣化状態を表す健全度を状態空間とするマルコフ連鎖モデル[4]を構築する。また、両者を組み合わせた時間依存的な多次元マルコフ連鎖モデルを用いることも可能である[24]。最終的に最適な維持管理政策を求めるためには、与件とする政策を変化させ、管理者の設定するリスク管理指標を満たす政策集合から、ライフサイクル費用を最小化する政策を選定すれば良い。ただし、代表的なライフサイクル費用評価法には、割引現在価値法と平均費用法が存在し、対象とするインフラ施設の種類に応じてどの評価法を用いるかが議論の対象となる[36, 37]。

維持管理政策最適化の具体例を図3に示した。同図は、実在する高速道路のトンネル照明ランプの点検データにワイブル劣化ハザードモデル[5]を適用し、マルコフ連鎖モデルと最適化アルゴリズムに基づき最適点検政策とそのときのライフサイクル費用を求めた結果である。ワイブル劣化ハザードモデルでは、図3左部に示すように、施設が故障しているか否かを表す生存確率を求めることができる。この劣化予測結果と費用情報を用いて、マルコフ連鎖モデルにより、所与の点検・補修政策に対するリスク管理指標とライフサイクル費用を求めることができる。図3では、照明ランプは供用開始から18年で一括更新され、また、数年ごとに照明ランプに対する点検が実施されて、点検時に故障している照明ランプはただちに交換されることを想定している。同図の事例では、点検を実施する時点の集合を点検政策と設定し、遺伝的

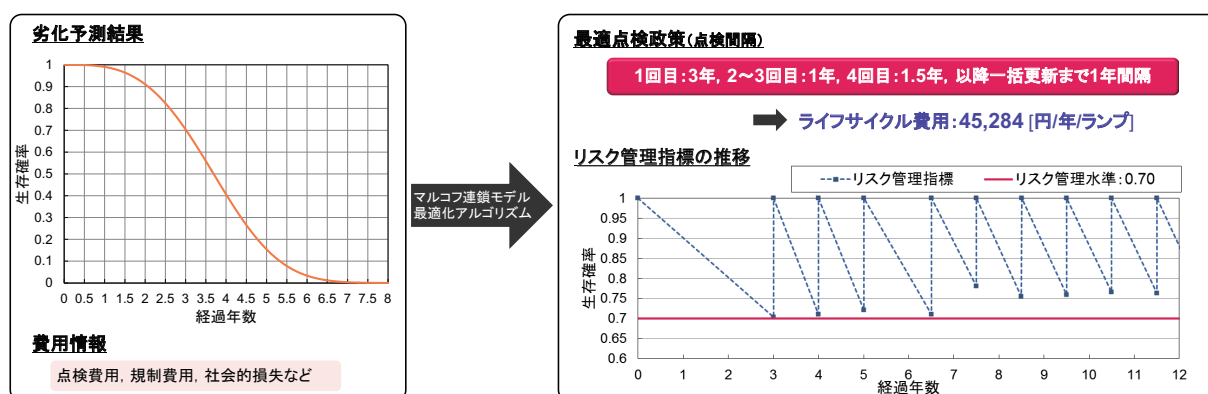


図3 膨大な候補の中からの点検・更新政策の最適化

アルゴリズム [38] により，最適な点検政策を求めている．なお，リスク管理水準は，リスク管理指標である生存確率がいずれの時点においても 0.70 を下回らないこと，と仮定している．最適点検政策を求める際，最も簡単な方法として，供用期間内で一定の値を取るような点検間隔を半年，1 年，1.5 年，2 年，… と変化させ，リスク管理水準を満たす点検間隔の中からライフサイクル費用を最小化する点検間隔で点検を実施するという政策を最適点検政策にする，という感度分析が考えられる．しかし，実際の照明ランプの維持管理体制においては，供用開始年からしばらくは点検間隔を長く，一括更新が近づくにつれて点検間隔を短くしていく，といったように，点検間隔が供用期間を通して一定でない場合もある．このような非定常な点検間隔を考慮した場合，点検政策（点検間隔の集合）の候補数は膨大となるために，個々の候補に対してライフサイクル費用を算出して，比較するのは現実的ではない．そこで，図3では，個々の点検政策を遺伝子として扱うような遺伝的アルゴリズムにより，ライフサイクル費用を適合度として，膨大な点検政策の候補から最適点検政策を選定している．同図の例では，「供用開始から3年，4年，5年，6.5年後にそれぞれ1回目から4回目の点検を行い，以降，一括更新まで1年間隔で点検を実施する（点検間隔は，3年，1年，1年，1.5年，1年，…）」という非定常な点検間隔を含む点検政策が最適な点検政策として採用されている．また，そのときのライフサイクル費用も，45,284[円/年/ランプ]と定量化されている．このように，統計的劣化予測結果とマルコフ連鎖モデルを連動させることにより，ライフサイクル費用を定量化し，最適な維持管理政策を立案することが可能となる．

5. おわりに

インフラ施設のアセットマネジメント（アセットメトリクス）は，劣化予測という工学的側面と，ライフサイクル費用評価という経済学的側面を数理モデルを用いて多角的に検討していく必要がある．近年の当該分野の発展は，従来，学術的には全く着目されてこなかった点検データを用いた体系的な枠組みの中で，これらの問題解決を試みたことにある．また，点検データという実務で獲得できるデータを用いて方法論を構築しているために，実用化に際し

でも大きな障害はなく、すでに複数の管理者において試行的な導入事例も存在する。さらに、点検データは不完全情報であり、その不完全さも管理者やインフラ施設ごとに異なるために、個々の事例に応じたモデル開発が求められることになる。本稿において紹介した統計的劣化予測モデルおよびライフサイクル費用評価モデルに関しても、その大半は管理者との議論を通して得た知見をもとに開発を行ったものである。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.68-82，2005.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 堀倫裕，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：下水道処理施設の最適点検・補修モデル，土木計画学研究・論文集，Vol.25，No.1，pp.213-224，2008.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 山田洋太，水谷大二郎，貝戸清之，小林潔司：判定基準変更を考慮した隠れマルコフ劣化モデル，第49回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，No.237，東北工業大学，2014.
- [12] 例えば，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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 水谷大二郎，金川昌弘，坂井康人，貝戸清之，小林潔司：ベンチマーク分析と重点監視部材の抽出，第45回土木計画学研究・講演集，土木学会，京都大学，CD-ROM，No.353，2012.
- [17] 貝戸清之，熊田一彦，林秀和，小林潔司：階層型指数劣化ハザードモデルによる舗装ひび割れ過程のモデル化，土木学会論文集 F，Vol.63，No.3，pp.386-402，2007.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 松村泰典，小林潔司，貝戸清之，大井明，山口清人：データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化

The Twenty-Sixth RAMP Symposium

- モデルの推計, 第 47 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.
- [21] L. T. 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, Vol.68, No.2, pp.62-79, 2012.
- [22] D. Mizutani, K. Kaito and K. Kobayashi: Multidimensional Deterioration Process by Copula Modeling, *10th Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management (AISIM10)*, CD-ROM, No.8, Virginia, 2014.
- [23] 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 47 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司: 階層ベイズ法による補修効果の事後評価, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.3, pp.204-221, 2013.
- [32] 早矢仕廉太郎, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 効率性評価のための劣化ハザードフロンティア分析, 第 50 回土木計画学研究・講演集, 土木学会, CD-ROM, 鳥取大学, 2014. (登載決定)
- [33] 宮崎文平, 小濱健吾, 風戸崇之, 加藤寛之, 貝戸清之: 統計的劣化予測に基づく高速道路路面評価手法の構築, 第 49 回土木計画学研究・講演集, 土木学会, CD-ROM, No.236, 東北工業大学, 2014.
- [34] 例えば, J. R. Norris: *Markov Chains (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics)*, Cambridge University Press, 1998.
- [35] 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-69, pp.105-116, 2005.
- [36] 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.
- [37] 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響, 土木計画学・研究論文集, 土木学会, Vol.23, No.1, pp.39-50, 2006.
- [38] 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎 GA の謎を解く, オーム社, 1994.