

アセットマネジメント研究の最先端： 統計的劣化予測と維持管理施策最適化

水谷 大二郎¹

¹正会員 東北大学助教 災害科学国際研究所（〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1）
E-mail: mizutani@irides.tohoku.ac.jp

社会基盤施設の公共性を考えると、管理者はその価値を最大化するようなアセットマネジメントを行うことが求められる。老朽化の進行した社会基盤施設の増加や維持管理のための予算の縮減、人材不足も相まって、2000年代以降、社会基盤施設のアセットマネジメントに関する研究が盛んに行われてきた。本稿では、それらの研究の中で、点検データを用いた統計的劣化予測と劣化予測結果に基づく維持管理施策の最適化に関する先端的な研究をその数理的手法に着目して整理するとともに、今後の研究課題と展望を述べる。

Key Words : *asset management, statistical deterioration forecasting, Markov chain Monte Carlo, management policy, optimization*

1. はじめに

橋梁、舗装、上下水道、高速道路設備などの社会基盤施設（以下、施設）のほとんどは、経年や繰返しの使用により劣化する。劣化した施設に対しては、利用者の安全性や利便性を保持するために補修や更新、廃棄などが必要となり、そのための点検も必要となる。施設の公共性を考えると、施設は国民の共通の資産（アセット）であり、その価値を最大化する（施設を半永久的に管理する際には維持管理費用を最小化する）ように、管理者は劣化の進展する施設に対して適切にマネジメントを行う必要がある。このような考え方に基づき、近年、施設に対するアセットマネジメントの必要性が議論されるようになり、膨大な施設の老朽化や維持管理予算の縮減、人材不足も相まって、アセットマネジメントの重要性は日に日に増加している。

施設のアセットマネジメントは、多様なプロセスにより構成され、それぞれの専門的知識を融合的に駆使しながら実施される。本稿では、それらのプロセスの中で、劣化予測と維持管理施策の最適化を対象として、学術研究の最先端を取りまとめるとともに、今後の研究課題と展望を述べる。具体的には、実在の施設の劣化に関する点検データを用いた統計的劣化予測手法、推定された劣化過程を表す確率モデルに基づく維持管理施策（点検・補修間隔、補修工法など）の最適化手法、に焦点を絞り、最先端の研究成果を取りまとめる。なお、これらの研究成果を取りまとめた文献^{1)–5)}が過去にも存在するため適宜参照されたい。本稿では、これらの文献の発表時点から現在までに発展してきた最新のアセットマネジメント研究を重点的に紹介する。

2. 統計的劣化予測の基幹技術

(1) 統計的劣化予測

時間的に変動してゆく施設の劣化状態をモデル化し、将来予測を行うことは、維持管理費用や劣化リスクの将来予測、後述の維持管理施策の最適化のために極めて重要となる。劣化予測を行うための手法として、力学的手法^{6)–8)}や実施施設の点検データを用いた統計的手法が提案されている。本稿では、供用状況下の施設の劣化過程に介在する多様な不確実性を考慮可能な統計的劣化予測手法⁹⁾に焦点を当てる。統計的劣化予測では、劣化過程が確率モデルで表現され、確率モデルのパラメータを実データを用いて統計的に推定する。あるモデルを開発した場合に、多岐に亘る種類の施設に対して、個々の施設に対するパラメータ推定や施設の特性を考慮したモデルの比較的軽微な修正は必要となるが、モデル自体は多様な施設に対して汎用的に利用可能である点も統計的劣化予測の特色である。換言すれば、多様な施設において、維持管理上の問題が共通している場合も少なくなく、統計的劣化予測手法を用いることにより、それらの問題に対して統一的な解決法を提示できる。以下で、統計的劣化予測手法の基幹技術として、生存時間解析に基づく劣化過程のモデル化手法、モデル推定のためのマルコフ連鎖モンテカルロ（以下、MCMC）法を概説し、追って、近年開発された統計的劣化予測手法を紹介する。

(2) 生存時間解析

生存時間解析^{10),11)}では、施設や機器の生存時間に関して、寿命を確率変数として、劣化あるいは故障過程

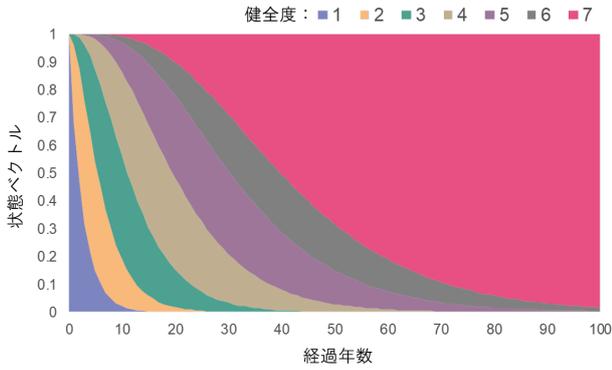


図-1 マルコフ劣化ハザードモデルのアウトプット：状態ベクトルの推移

を定量化する。ある施設の供用が開始される時刻 $t = 0$ を初期時刻とする連続的時間軸を考える。当該施設の寿命を $\zeta \in [0, \infty]$ とし、その確率密度関数、分布関数をそれぞれ $f(\zeta)$, $F(\zeta)$ とする。また、生存関数を $\tilde{F}(\zeta) = 1 - F(\zeta)$ と定義する。施設が時刻 $t \in [0, \infty]$ まで生存し、期間 $[t, t + \Delta t]$ 内で故障する確率は、

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta}{\tilde{F}(t)} \quad (1)$$

と表現できる。 $\lambda(t)$ は、施設が時刻 t まで生存し、かつ、当該時刻で故障する確率密度であり、ハザード関数（あるいは、ハザード率）¹ と呼ばれる。ハザード関数を定義することにより、寿命の確率密度 $f(t)$ 、分布関数 $F(t)$ 、生存関数 $\tilde{F}(t)$ が下記の関係により一意に定まる。

$$\tilde{F}(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(u)du\right\} \quad (2)$$

$$\frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -f(t) \quad (3)$$

ハザード関数に様々な関数を仮定することにより、多様な劣化過程を表現できる。以下でアセットマネジメントにおける劣化過程の推定を行うにあたり代表的なモデルを紹介する²。なお、これらの統計的劣化予測モデルの適用事例は、橋梁、舗装、高速道路施設と多岐に亘り、統計的劣化予測手法の適用範囲の広さが確認できる。また、経年ではなく、使用による劣化・故障が卓越するような施設に対しては、上記の寿命を使用回数などで代替したハザードモデルが利用可能である¹⁸⁾。

a) 指数ハザードモデル

時間的に一定のハザード関数 $\lambda(t) = \theta$ を用いれば、指数ハザードモデルを定義することができる。多段階

¹ 直感的な理解として、ハザード関数は劣化速度を意味すると考えても良い。

² 生存時間分析を用いて劣化予測を行った事例として他にもノンパラメトリックなハザードモデルを用いた事例^{12),13)}、セミパラメトリックなハザードモデル（比例ハザードモデル¹⁴⁾）を用いた事例¹⁵⁾⁻¹⁷⁾もあるが、ここでは、パラメトリックなハザードモデルを対象を絞る。

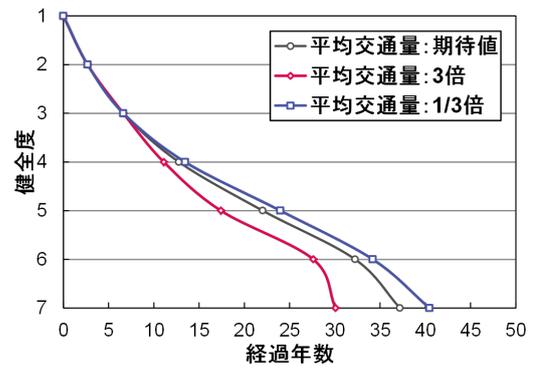


図-2 マルコフ劣化ハザードモデルのアウトプット：期待劣化パス

の離散的な健全度 i ($i = 1, \dots, I$)³により施設の劣化が記述される場合には、隣接健全度間の $I - 1$ 個の指数ハザードモデルを用いることにより、任意の健全度ペア i, j 間の任意の時間間隔 $z \in (0, \infty]$ での推移確率を、マルコフ推移確率 $\pi_{i,j}(z)$ とし⁴、

$$\pi_{i,i}(z) = \exp(-\theta_i z) \quad (i = 1, \dots, I - 1) \quad (4)$$

$$\pi_{i,j}(z) = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k z) \quad (i = 1, \dots, I - 2; j = i + 1, \dots, I - 1) \quad (5)$$

$$\pi_{i,I}(z) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{i,j}(z) \quad (i = 1, \dots, I - 1) \quad (6)$$

と解析的に導出することができる¹⁹⁾（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⁵⁾。 θ_i は健全度 i から $i + 1$ への推移過程を表すハザード関数である。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} = 1 & (k = i) \\ \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} = 1 & (k = j) \end{cases}$$

が成り立つとする。交通量や構造条件などの特性変数 $\mathbf{x} = (1, x_1, \dots, x_M)$ の影響を考慮するために、 $\theta_i = \exp(\beta_i \mathbf{x}')$ とすると、パラメータ $\beta_i = (\beta_0, \dots, \beta_M)$ により特性変数のハザード関数に対する影響を定量化できる。なお、記号「 $'$ 」は転置操作を表す。マルコフ劣化ハザードモデルの具体的なアウトプットは図-1、

³ 劣化指標。 $i = 1$ が新設あるいはそれと同程度、 i が大きくなるにつれて劣化が進展していることを表す。

⁴ マルコフ過程モデルは数学的な取り扱いも簡便で、経過時間に依存せず将来の劣化状態を予測できるため、実務においても数多くの適用事例がある。アセットマネジメントにおける統計的劣化予測モデルの開発研究において、多様なモデルの高度化とともに、統計数理を専門としない実務者にとっての取り扱い易さなども勘案して方法論を開発すべき点に、困難さとともに研究対象としての意義があると考えられる。

⁵ 下記で具体的に紹介する研究以外にも、マルコフ劣化ハザードモデルに基づき開発された統計的劣化予測モデルが数多く存在する²⁰⁾⁻²⁶⁾。また、マルコフ劣化ハザードモデル開発以前の推移確率の推定に関する研究として、Madanat et al.²⁷⁾、Mishalani and Madanat²⁸⁾がある。

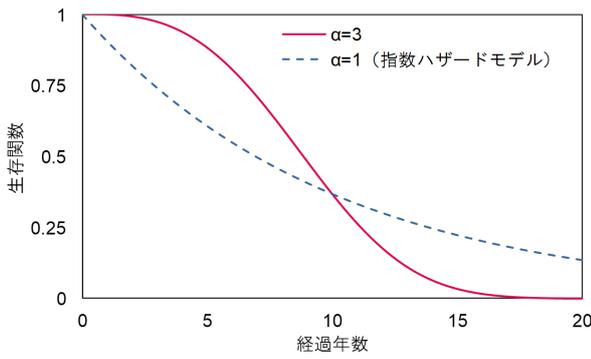


図-3 ワイブルハザードモデルのアウトプット：生存関数

図-2を参照されたい⁶。同様の考え方にに基づき、Multi-destination 型の指数ハザードモデルを用いて健全度推移の不連続性を考慮したマルコフ推移確率も解析的に導出できることが知られている²⁹⁾。

b) ワイブルハザードモデル

ハザード関数をワイブルハザード関数

$$\lambda(t) = \exp(\beta_i x') \alpha t^{\alpha-1} \quad (7)$$

とすると、ワイブルハザードモデル^{30),31)}を定義できる。ワイブルハザードモデルでは、ハザード関数が時間依存的に変化し、パラメータ α に関して、

- $\alpha < 1$ のときハザード関数が時間に対して単調減少：初期不良が卓越
- $\alpha = 1$ のときハザード関数が時間に対して一定（指数ハザードモデルと一致）：偶発的故障が卓越
- $\alpha > 1$ のときハザード関数が時間に対して単調増加：摩耗的故障が卓越

となり、 α により故障や劣化の特性を柔軟に表現できる。ワイブルハザードモデルの具体的なアウトプットは図-3を参照されたい。多段階の離散的健全度間の推移を複数のワイブルハザードモデルで表現したモデル（多段階ワイブルハザードモデル）³²⁾も存在する⁷。

c) 連続量を用いたハザードモデル

劣化状態が連続値の指標 $y \in [0, \infty]$ ⁸⁾で表現されるような施設に対しても、劣化指標 y を所与としてハザードモデルを定義することができる³⁴⁾。具体的には、劣化進展過程を $y = \exp(-\sigma\omega)f(t, \beta)$ とし⁹⁾、 ω が確率密度関数 $g(\omega) = \exp\{-\omega - \exp(-\omega)\}$ を持つ標準ガンベ

⁶ 期待劣化パス：健全度間の期待寿命のパス。指数ハザードモデルを用いた場合には、ハザード関数の逆数が期待寿命となる。

⁷ この場合、推移確率を解析的に導出することができないため、数値積分が必要となり計算負荷が増加する。それに対して、準乱数を用いた計算負荷軽減の取り組みが存在する³³⁾。また、別のアイデアとしては、推移確率の不可観測な経過年数を潜在変数として MCMC 法の枠組みでパラメータと同時サンプリングすることも考え得るが今後の検討課題である。

⁸ $y = 0$ が新設あるいはそれと同程度、 y が大きくなるにつれて劣化が進展していることを表す。

⁹ 参考文献³⁴⁾では、 $\exp(-\sigma\omega)$ にも特性変数項が含まれるが、ここでは簡略化のため省略する。

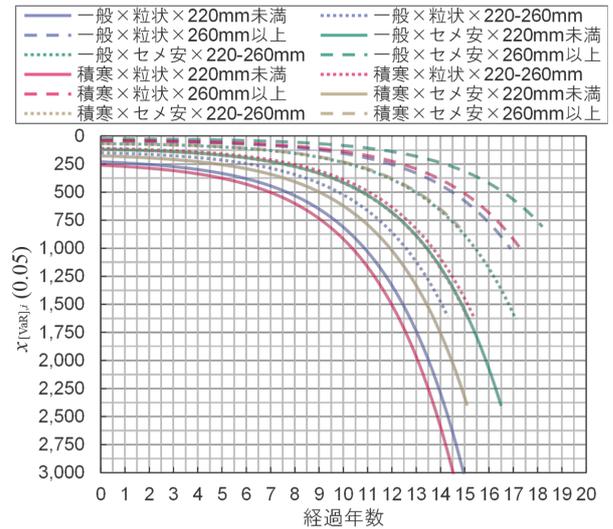


図-4 連続量を用いたハザードモデルのアウトプット：リスク管理水準 5%での舗装耐力指標

ル分布に従うとする。なお、 $f(t, \beta)$ は劣化過程を特徴づけるベースライン関数であり、力学的モデルを採用することにより、力学的モデルと統計的モデルのハイブリッド型モデルを定義することもできる。 σ はパラメータである。 β もパラメータであり、統計的に推定しても、力学的モデルのパラメータとして与件としても良い。任意の y を所与として、 y に到達するまでの寿命を表すハザードモデルにおける、寿命 t の確率密度関数を、

$$\begin{aligned} \tau(t|y) &= \frac{f_d(t, \beta)}{\sigma f(t, \beta)} \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{\ln f(t, \beta) - \ln y}{\sigma} \right) - \frac{\ln f(t, \beta) - \ln y}{\sigma} \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

と定義できる。ここに、 $f_d(t, \beta) = df(t, \beta)/dt$ である。さらに、生存関数も、

$$S(t|y) = 1 - \exp \left\{ - \exp \left(- \frac{\ln f(t, \beta) - \ln y}{\sigma} \right) \right\} \quad (9)$$

と定式化できる。このように、任意のベースライン関数に対して、ある経過時間における劣化指標に介在する誤差（あるいは、異質性）に起因した劣化過程の不確実性を、確率変数の変数変換によりハザードモデルの枠組みで定式化できる。これにより、期待寿命、余寿命指標、劣化リスク指標などのアセットマネジメントのための指標を容易に導出することができる（具体例は、図-4 参照）。

(3) モデル推定

2.(2)で定式化された劣化予測モデルのパラメータを、点検により観測されたデータに基づき統計的に推定す

ることを考える。パラメータ集合を $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_N)$ 、観測データ集合を $\Xi = (\Xi_1, \dots, \Xi_T)$ とする。記号「 \lceil 」は観測値を表す。ハザードモデルにおける寿命の確率密度関数、生存関数、分布関数を用いることにより、完全モニタリング状況下に加えて、定期あるいは不完全モニタリング状況³¹⁾においても、観測データの生起確率（密度）をパラメータの関数として捉えて尤度関数が定式化でき、さらに、観測データに切断データや打ち切りデータ¹¹⁾が含まれている場合にも尤度関数を定式化することができる。また、多段階指数ハザードモデルや多段階ワイブルハザードモデルを用いることにより、点検間隔にばらつきのある点検データに対しても、全てのデータを用いてモデル推定を行うことができる。個々の劣化予測モデルによる尤度関数の定式化はそれぞれの参考文献を参照されたいが、ここでは、尤度関数を統一的に $\mathcal{L}(\theta|\Xi)$ と表す。

a) 最尤推定

最尤推定法に基づくと、パラメータの最尤推定値 $\hat{\theta}$ は、

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta \in \Theta} \mathcal{L}(\theta|\Xi) \quad (10)$$

と表される。 Θ はパラメータ空間である。具体的には、対数尤度関数に対して、

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\hat{\theta}|\Xi)}{\partial \theta_n} = 0 \quad (n = 1, \dots, N) \quad (11)$$

を同時に満足する $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_N)$ を Newton 法などにより求めれば良い。さらに、Fisher 情報行列の逆行列として、パラメータの漸近的な共分散行列も推定される。パラメータの推定結果に基づき、赤池情報量基準 (AIC)³⁵⁾ などの情報量基準を用いて、異なるモデル間の相対評価が可能となる。

b) MCMC 法によるベイズ推定

近年のベイズ統計学の発展により、MCMC 法³⁶⁾ を用いて統計的劣化予測モデルを推定する研究^{37),38)} が増加している。具体的には、ベイズの定理に基づき、パラメータの事後確率密度関数 $p(\theta|\Xi)$ を、

$$p(\theta|\Xi) = \frac{\mathcal{L}(\theta|\Xi)r(\theta)}{\int_{\Theta} \mathcal{L}(\theta|\Xi)r(\theta)d\theta} \propto \mathcal{L}(\theta|\Xi)r(\theta) \quad (12)$$

と表現し、事後確率密度関数の基準化定数が解析的に求められないため、MCMC 法（例えば、Metropolis-Hastings 法³⁹⁾ と Gibbs sampling 法⁴⁰⁾ を組み合わせた方法が利用可能）により、事後確率密度関数からのサンプリングを行う。 $r(\theta)$ は事前確率密度関数である。事後確率密度関数からのサンプルを用いて、パラメータの推定値（例えば、期待値）やベイズ信用域、収束判定のための統計量⁴¹⁾ などが算出できる。

3. で紹介する先端的な統計的劣化予測モデルは、混合確率モデルや構造を持った確率モデルとして定式化され

ており、統計的に正則でない場合が多いと考えられる。そうしたモデルのデータに対する当てはまり具合の相対評価を行うにあたり、MCMC 法でのサンプルを用いて Widely applicable information criterion (WAIC)⁴²⁾ が容易に算出できる。WAIC は、統計モデルが正則でない場合にも、漸近的に汎化損失と等しい期待値と分散を持つため、複雑な構造を持つモデルの評価指標に適している。この点が、複雑な統計的劣化予測モデルの推定に MCMC 法が適していることの本質的理由である。WAIC は経験損失 S と汎関数分散 V を用いて、

$$\text{WAIC} = S + \frac{V}{T} \quad (13)$$

と表される。ただし、 T はサンプルサイズであり、 S 、 V はそれぞれ、

$$S = -\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \log E_{\theta} [p(\Xi_t|\theta)] \quad (14)$$

$$V = \sum_{t=1}^T \left\{ E_{\theta} [(\log p(\Xi_t|\theta))^2] - E_{\theta} [\log p(\Xi_t|\theta)]^2 \right\} \quad (15)$$

である。また、 $p(\Xi_t|\theta)$ はパラメータ θ が与えられたときに観測データ Ξ_t を得る確率密度関数であり、モデルを利用して計算することができる。 $E_{\theta}[\cdot]$ は事後分布による期待値であり、例えば、 $E_{\theta}[p(\Xi_t|\theta)]$ は、MCMC 法によって得られたパラメータの標本 (MCMC 法のループ) ごとに $p(\Xi_t|\theta)$ を算出し、それらの期待値を取ることにより計算することができる。

また、施設の点検データを取り扱うにあたり極めて頻繁に遭遇する不完全データに対しても、完備化尤度関数を定義することにより、不可観測（あるいは、欠損、欠測）データを潜在変数（確率変数）として、MCMC 法の枠組みでパラメータと潜在変数の同時サンプリングすることができる。このように不可観測データの補完が可能となる点も MCMC 法による統計的劣化予測の実用上の利点である⁴³⁾。その際、モデルが複雑化すると、尤度関数が高度な非線形性を有し、Newton 法などの適用が困難となる。それに対して、MCMC 法により、数値的に事後分布からのサンプルを獲得することにより、モデル推定における実用性が向上する。一方で、MCMC 法は繰り返し計算を要し、モデル推定の計算時間が増加する。それに対して、準乱数を用いた MCMC 法⁴⁴⁾ や効率的な変数選択手法⁴⁵⁾ が提案されており、それらの手法を組み合わせることで計算負荷の低減を図ることが望ましい。

3. 統計的劣化予測の最先端

ここでは、近年開発された先進的な統計的劣化予測モデルを紹介する。

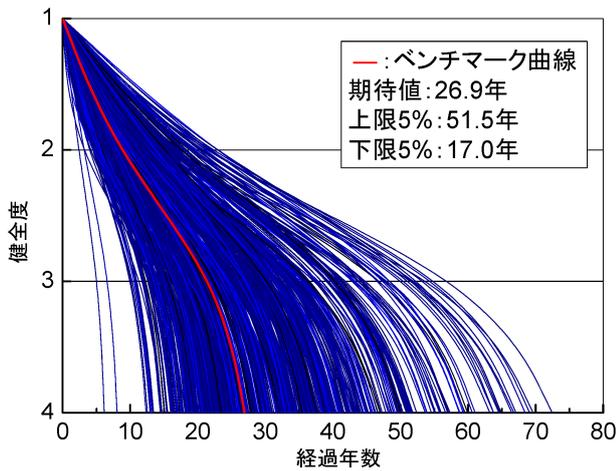


図-5 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定結果の一例

(1) ハザード関数の異質性評価

2. で紹介したハザードモデルは、個々の施設が（特性変数に応じては変化するが）共通のハザード関数を持つと仮定して定式化されている。しかしながら、供用状況下の施設の劣化過程には、特性変数として定量化が困難な要因による不確実性が多分に介在する。そのような不可観測要因に起因した劣化過程の変動を異質性として捉えモデル化するための方法論が、混合マルコフ劣化ハザードモデル、ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルなどとして提案されている^{46)–48)}10。これらの既往研究では、対象施設群を K 個のグループ k ($k = 1, \dots, K$)（管理単位などを想定）に分割し、グループ k のハザード関数を、

$$\lambda_k(t) = \varepsilon_k \tilde{\lambda}(t) \quad (16)$$

と定義する。ここに、 ε_k はグループ k の異質性パラメータ、 $\tilde{\lambda}(t)$ は対象施設全体の平均的な劣化過程を表す標準ハザード関数である。異質性パラメータ ε_k をパネルデータモデル⁵¹⁾における固定効果として取り扱えば、特性変数の影響は全てのデータから推定しつつ、個々のグループでの劣化過程をハザード関数として推定できる。また、異質性パラメータ ε_k を確率変数として取り扱い、パネルデータモデルのランダム効果として取り扱うことにより、 ε_k の従う確率密度関数（具体的には、期待値を 1 に基準化したガンマ分布の分散パラメータ）が推定可能となる¹¹。このようなハザード関数の異質性評価により個々のグループの劣化過程を図-5 のように求めることができ、重点監視施設の抽出、ベンチマーキングが可能となる。異質性評価を舗装構造の劣化診断

に用いた研究⁵²⁾、膨大な路面性状調査データに適用した研究⁵³⁾、施設の補修効果の事後評価に利用した研究⁵⁴⁾などが存在する。ハザード関数における異質性の取り扱い方法に工夫を加えることにより、実務におけるアセットマネジメントに関する要請に応えるようなモデルの高度化が可能となる。以下では、その例として、多元的劣化過程モデルと確率的劣化フロンティアモデルを紹介する。それ以外にも、ネスト構造を持つ多段階の異質性グループの個々のグループの異質性を推定するための多階層混合マルコフハザードモデル⁵⁵⁾、多元的劣化過程モデルの考え方をワイブルハザードモデルの劣化速度と劣化加速度を表す 2 種類のパラメータに適用した研究⁵⁶⁾も存在する。

a) 多元的劣化過程モデル

ここでは、参考文献⁵⁷⁾での方法論を概説する。ある単一の施設に対して、複数種類の劣化事象が存在し、それらの進展状態の組合せにより、補修の有無や補修工法の意思決定を行う状況が実施設においては珍しくない¹²。それに対して、多元的劣化過程モデルでは、まず、個々の劣化事象 d ($d = 1, \dots, D$) の劣化過程を、健全度 i_d 、グループ k に関するハザード関数を

$$\theta_{k,d,i_d} = \varepsilon_{k,d} \tilde{\theta}_{k,d,i_d} \quad (17)$$

とする混合マルコフ劣化ハザードモデル^{46),47)}で表現する（ハザード関数は時間に対して一定の指数ハザード関数を仮定）。個々の劣化事象の異質性パラメータ $\varepsilon_{k,d}$ の周辺確率密度関数 $g_d(\varepsilon_{k,d})$ として期待値を 1 に基準化したガンマ分布

$$g_d(\varepsilon_{k,d}) = \frac{(\phi_d)^{\phi_d}}{\Gamma(\phi_d)} (\varepsilon_{k,d})^{\phi_d-1} \exp(-\phi_d \varepsilon_{k,d}) \quad (18)$$

を仮定する。 ϕ_d はパラメータであり、階層ベイズモデルのハイパーパラメータとして推定される。ここで、あるグループ k の異質性パラメータ $\varepsilon_k = (\varepsilon_{k,1}, \dots, \varepsilon_{k,D})$ の同時確率密度 $l(\varepsilon_k)$ を、コンピュータの確率密度関数 $c(G_1(\varepsilon_{k,1}), \dots, G_D(\varepsilon_{k,D}))$ を用いて、

$$l(\varepsilon_k) = c(G_1(\varepsilon_{k,1}), \dots, G_D(\varepsilon_{k,D})) \prod_{d=1}^D g_d(\varepsilon_{k,d}) \quad (19)$$

と定義する¹³。 $G_d(\varepsilon_{k,d})$ は $\varepsilon_{k,d}$ の分布関数である。これにより、個々の劣化事象の異質性パラメータの周辺分布の期待値が 1 に基準化される（パラメータの識別性条件が満足される）という性質を保持したまま、異質性パラメータの同時確率密度が定義できる。それにより、個々のグループで異なる劣化事象のハザード関数の相関関係を異質性の相関関係として定量化できる。

¹⁰ ハザードモデルに限らない場合には、既往研究として Madanat et al.⁴⁹⁾ や Bardaka et al.⁵⁰⁾ などがある。

¹¹ この場合も、 ε_k の値を、段階的最尤推定により事後的に推定、あるいは、階層ベイズ推定により潜在変数として同時推定することができる。異質性に関してどのようなモデル化を行うかは分析の目的により異なる。

¹² 複数の劣化事象を考慮して維持管理施策の最適化を図る研究⁵⁸⁾は過去にもなされているが、劣化事象間の相関関係は考慮されていない。

¹³ 参考文献²⁰⁾では、部分的観測性条件が考慮される形で定式化されている。

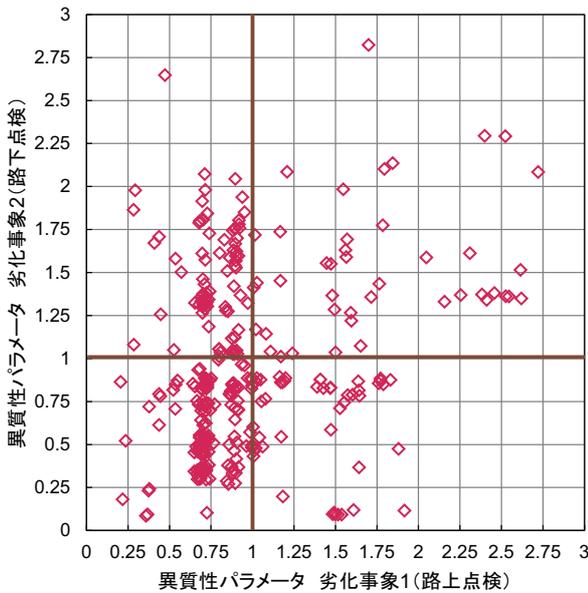


図-6 推定された異質性パラメータ

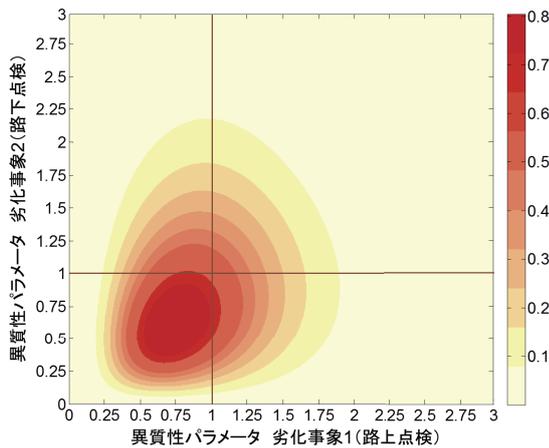


図-7 異質性パラメータの同時確率密度関数

図-6、図-7には、実在の高速道路のゴム製伸縮装置を対象に、路上からの点検で観測される劣化事象を劣化事象1、路下からの点検で観測される劣化事象を劣化事象2として推定した異質性パラメータの値、同時確率密度をそれぞれ示す。異質性評価のグループの単位を伸縮装置単位とし、図-6の個々のプロットは個々の伸縮装置を表す。実際の維持管理において、

- 劣化事象1のみの劣化：上面のゴムの取替
- 劣化事象2のみの劣化：下面の排水機構の更新
- 劣化事象1、2の同時劣化：伸縮装置全体の大規模な補修・更新

のように、補修・更新の意思決定がされており、複数の劣化事象を考慮することが重要となる。多元的劣化過程モデルでは、複数の劣化事象の劣化速度の異質性

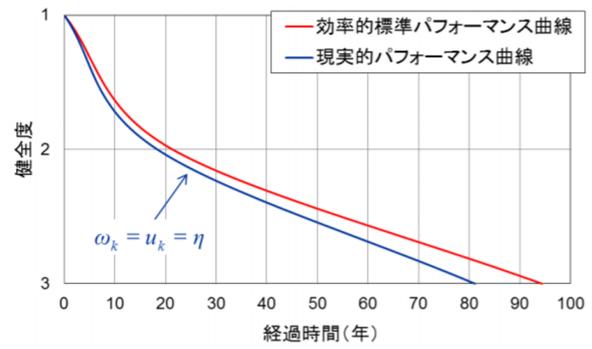


図-8 効率的劣化過程と現実的劣化過程

を相関関係も考慮し定量化しているため、図-6により、個々の伸縮装置に対して上記3種類のどの補修・更新が将来必要となるのか、図-7により、ある将来時点において管理する伸縮装置全体で3種類の補修・更新がどの程度の割合ずつ必要となるのか、といった具体的な維持管理計画立案のために重要な情報が獲得できる。

b) 確率的劣化フロンティアモデル

ここでは、参考文献⁵⁹⁾での方法論を概説する。施設の劣化過程や寿命は、健全度を直接的に回復させるような補修や更新のみならず、日常的な維持管理業務（例えば、清掃業務）や施工条件に応じて多様に異なる。アセットマネジメントの継続的改善のためには、日常的に十分な維持管理が実施されているような施設の劣化過程を効率的劣化過程として定量化し、施工条件のような維持管理上は制御不可能な要因の影響を排除したのちに、他の施設の劣化過程と相対比較してゆくことが求められる。それに対して、確率的劣化フロンティアモデルでは、混合マルコフ劣化ハザードモデルの異質性パラメータ ε_k を管理効率性と技術的異質性に分離評価する。具体的には、グループ k のハザード関数を、

$$\theta_{k,i} = \exp(v_k + u_k) \tilde{\theta}_{k,i} \quad (20)$$

と定義する。 $u_k \in [0, \infty]$ は管理効率性パラメータ、 $v_k \in [-\infty, \infty]$ は技術的異質性パラメータであり、それぞれ指数分布、平均0の正規分布に従うと仮定し、その確率密度関数を、

$$\zeta(u_k) = \frac{1}{\eta} \exp\left(-\frac{u_k}{\eta}\right) \quad (21)$$

$$\kappa(v_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(v_k)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (22)$$

と与える。 η, σ はパラメータであり、データから推定される。

図-8には、実在の下水道管渠を対象に、確率的劣化フロンティアモデルを推定した際の、効率的劣化過程と現実の劣化過程を期待劣化パスとして示す。同図の赤線は、 $u_k = 0, v_k = 0$ が成立する場合の管渠全体の

平均的な劣化過程，青線は，推定された u_k の期待値 η を用いて描いた現実の劣化過程である．両者を比較することにより，今後の維持管理の改善により期待できる長寿命化年数を定量的に評価することができる．また，MCMC 法によりサンプリングされた u_k ， v_k を用いることにより，個々のグループ k において，効率的劣化過程と現実的劣化過程を定量化することができる．

c) 隠れマルコフモデル

ここでは，参考文献^{60),61)}での方法論を概説する．橋梁や道路舗装のように，複数の施設により複合的に形成される構造物においては，隣接する施設の劣化状態に応じてハザード関数（劣化速度）が変化するような場合も少なくない．このようなハザード関数の時間的変化をモデル化することにより，現実の劣化過程をより詳細に記述できる．そのため，階層的隠れマルコフハザードモデルでは，離散的時間軸 $\tau = 0, 1, \dots$ を定義し，ある施設のハザード関数を，

$$\theta_{i,\tau} = \xi_{s_\tau} \theta_i \quad (23)$$

と表現する¹⁴⁾．ここに， $s_\tau \in \{1, 2, \dots, S\}$ は，着目する施設に隣接している（あるいは，当該施設の劣化速度に影響を与えると考え得る）施設の時点 τ での健全度であり， ξ_{s_τ} は個々の s_τ における劣化速度の異質性を表すパラメータである．このように，階層的隠れマルコフハザードモデルでは，着目する施設の健全度 i のハザード関数は健全度 s_τ に依存し， s_τ の時間的変化がマルコフ過程により表現されるため，隣接施設の健全度の時間的変化に起因したハザード関数の時間的変化を記述できる．さらに，上記の劣化速度の健全度に対する依存関係を双方向に拡張すると複合的隠れマルコフハザードモデルを定式化できる．これらのモデルでは，集計的なマルコフ過程モデルではなく，ハザードモデルで非集計的にマルコフ過程を表現しているため，点検間隔の不均一性を許容でき，特性変数の影響を考慮できるというマルコフ劣化ハザードモデルの利点を活かして定式化が可能となる．

図-9には，実在の高速道路舗装を対象に，階層的隠れマルコフハザードモデルを推定した結果を示している．同図では，路面のひび割れ率（表層）のハザード関数に対して，FWD 調査で観測される耐荷力（基層）が影響を与えるととして，その影響を定量化している．これにより，耐荷力の低下が進展する程，ひび割れの劣化速度が大きくなる様子を実データより推定可能となる．ここでは高速道路舗装を例として，隣接施設の健全度がハザード関数に与える影響を考慮するための隠れマルコフモデルを紹介した．この考え方は，橋梁 RC 床

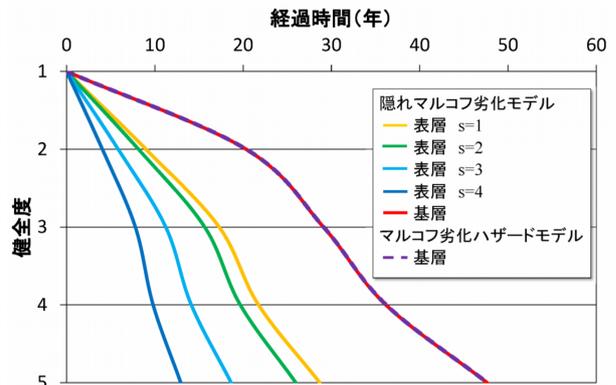


図-9 耐荷力ごとの路面ひび割れ率の劣化過程

版の隣接パネルの劣化に起因したハザード関数の増加の定量化にも利用可能である⁶²⁾．また，隠れマルコフモデルを用いた他の統計的劣化予測モデルとして，測定誤差を考慮したモデル⁶³⁾，判定基準の変更を考慮したモデル⁶⁴⁾などが提案されている．

(2) その他の統計的劣化予測モデル

生存時間解析以外の統計的モデルにより，施設の劣化・故障がモデル化された研究も存在する¹⁵⁾．例えば，路上障害物の発生個数を混合ポワソン過程によりモデル化した研究⁶⁶⁾があり，ポワソン過程モデルにレジームスイッチングモデルや隠れマルコフモデルを導入し，降雨量がポットホール発生過程に与える影響や，路面健全度がポットホール発生過程に与える影響を定量化した研究も存在する^{67),68)}．さらに，土木施設以外の統計的劣化予測モデルにも着目すると，劣化・故障データに対して，累積損傷（cumulative damage）モデル⁶⁹⁾，Wiener 過程⁷⁰⁾，ガンマ過程⁷¹⁾，多変量確率過程⁷²⁾といった多様な確率過程で劣化をモデル化し統計的推定を行った研究が存在する．これらのモデルの土木施設に対する適用可能性に関して，モデルの統計的な当てはまり度合いはもちろんのこと，施設の特性，劣化・故障発生メカニズム，データの獲得困難性，汎用性や取扱い易さといった多様な観点から継続的に検討を行ってゆくことが望ましい．

ここで，先端的な統計的劣化予測手法の一例として，モニタリングデータに対する時系列モデルの適用事例を紹介しよう．このアプローチは，これまで紹介してきた劣化・故障指標の時間推移を直接モデル化するのではなく，劣化・故障に関連があるであろう指標に対して常時モニタリングを行い，点検の省力化や点検実施の意思決定に資するアウトプットを獲得することを目的としている．小林等⁷³⁾は，高速道路高架橋の伸縮装置の時系列モニ

¹⁴⁾ 3.(1) のような劣化速度の相関関係ではなく，一方の健全度に応じて他方の劣化速度が変化する過程をモデル化している点に留意されたい．

¹⁵⁾ 本稿での詳細な言及は避けるが，過去の維持管理費用データから直接的に将来の維持管理費用を予測する研究も存在する⁶⁵⁾．

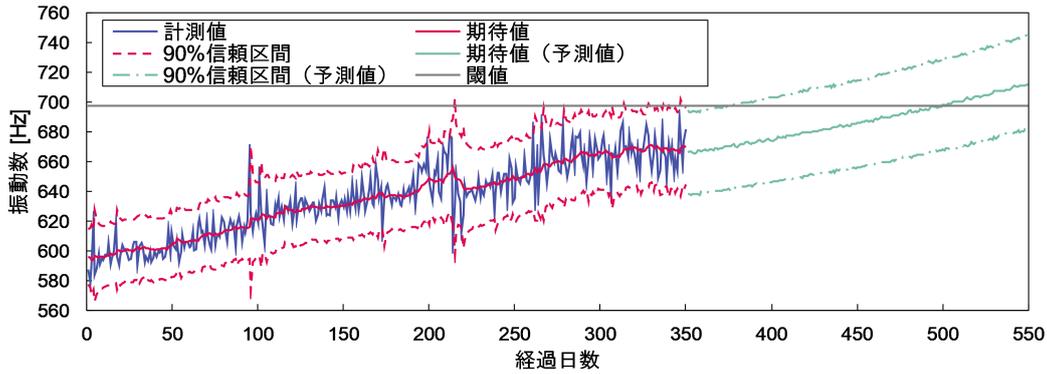


図-10 ARFIMAX-FIGARCH モデルにおける予測

タリングデータに対して ARIMAX-GARCH (AutoRegressive Integrated Moving Average model with eXogenous variables-Generalized AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity) モデルを適用し、モニタリングデータによる劣化過程のモデル化の可能性を示唆している。Chen and Durango-Cohen⁷⁴⁾ は、橋梁ヘルスマニタリングデータに対する多変量分析を行うためのフレームワーク構築の際に、ARIMA-GARCH モデルによる分析を行っている。これらの既往研究を進展させ、初期不良や外的劣化因子の作用から発現までのタイムラグを、長期記憶性として考慮した ARFIMAX-FIGARCH (AutoRegressive Fractional Integrated Moving Average model with eXogenous variables-Fractional Integrated Generalized AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity) モデルにより、モニタリングデータを分析する方法論が提案されている⁷⁵⁾。図-10 には、実在の高速道路の伸縮装置直下に加速度センサーを設置し、固有振動数の常時モニタリングにより獲得されたデータに、ARFIMAX-FIGARCH モデルを適用した結果を示している。推定された ARFIMAX-FIGARCH モデルに基づき、点検時点に関する将来予測が可能となる。さらに、当該研究では、推定された実数差分パラメータと伸縮装置の劣化事象（ひび割れ、浮きなど）との相関関係が指摘されている。このような相関関係を用いることにより、単にモニタリングデータを観測しある閾値に到達すると点検を実施するというアセットマネジメント体制に留まらず、観測されたモニタリングデータに時系列モデルを適用して初めて獲得できるような施設の劣化状態に関する情報を用いたアセットマネジメントの実現可能性が示唆できる。

4. 維持管理施策最適化の基幹技術

(1) 維持管理施策最適化

施設の管理者は、定期的な点検により施設の劣化状態を観測し、観測結果に基づき、補修や更新の必要の有

無や優先順位付けに関する意思決定を行う。点検データから推定された統計的劣化予測モデルを用いることにより、任意の維持管理施策（一般的には、点検・補修間隔や健全度ごとの補修工法の組合せ）に対して、施設が経時的に劣化し、点検・補修を通じてその健全度が回復するという劣化・補修過程をモデル化することができる。これにより、それぞれの維持管理施策を採用した場合におけるライフサイクル費用や劣化リスクの将来予測が可能となり、それらを評価基準として最適維持管理施策が導出できる。このような一連の分析により、実際の施設の管理者の意思決定を支援するような情報を提供できる。

(2) マルコフ決定過程

ここでは、多段階の離散的な健全度で劣化状態が記述される状況を想定する。離散的な時間軸 $t = 0, 1, \dots$ を考え、その単位時間間隔 $z \in \mathbf{Z}$ における劣化による健全度推移を表すマルコフ推移確率行列

$$\mathbf{\Pi}(z) = \begin{bmatrix} \pi_{1,1}(z) & \cdots & \pi_{1,I}(z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{I,I}(z) \end{bmatrix} \quad (24)$$

を所与として、マルコフ決定過程により最適維持管理施策を求めることを考える。管理者は間隔 z で点検を行いその点検結果に基づき補修アクションを決定とする。なお、 \mathbf{Z} は最適点検間隔の候補集合である。最適維持管理施策の候補集合を \mathbf{D} とする。ある施策 $d \in \mathbf{D}$ において、管理者はある健全度に対してとるべき補修工法が規定されており、補修による健全度推移が確定的に定められている状態を考える。施策 d における健全度 i に対する補修実施後の健全度を $\phi_d(i)$ と表し、補修アクションベクトルを $\phi_d = (\phi_d(1), \dots, \phi_d(I))$ と定義する。ただし、 $\phi_d(I) = 1$ が全ての d に対して成り立つとする。補修アクションベクトルが定まれば、補修行列 \mathbf{Q}_d の $i \times j$ 要素 $q_{i,j}^d$ が、

$$q_{i,j}^d = \begin{cases} 1 & \phi_d(i) = j \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

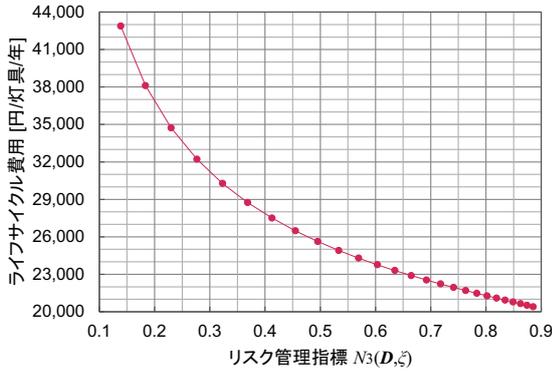


図-11 ライフサイクル費用評価：高速道路照明灯具の例

と一意に定まる。また、補修アクション $\phi_d(i)$ ごとにその補修費用を $e_d(i)$ と設定し、補修費用ベクトルを $e_d = (e_d(1), \dots, e_d(I))$ と定義する。なお、施策 d で健全度 i に対して補修を行わない場合には、 $\phi_d(i) = i$, $e_d(i) = 0$ となる。時点 t における補修前後の状態ベクトル¹⁶をそれぞれ $\nu_{t,d,z}^- = (\nu_{t,d,z,1}^-, \dots, \nu_{t,d,z,I}^-)$, $\nu_{t,d,z}^+ = (\nu_{t,d,z,1}^+, \dots, \nu_{t,d,z,I}^+)$ とすると、施設の劣化・補修過程は健全度の時間的推移として、

$$\nu_{t,d,z}^- = \nu_{t-1,d,z}^+ \Pi(z) \quad (26)$$

$$\nu_{t,d,z}^+ = \nu_{t,d,z}^- Q_d \quad (27)$$

と表現できる。このとき、ライフサイクル費用の期待値 $LCC_{d,z}$ は、

$$LCC_{d,z} = \sum_{t=0}^{\infty} \rho_z^t (\nu_{t,d,z}^- e_d') \quad (28)$$

と定義できる。 ρ_z は割引因子である¹⁷。ここで、施設の劣化に対するリスク管理水準を U と設定する。このとき、最適点検間隔 z^* と最適維持管理施策 d^* は、

$$(z^*, d^*) = \arg \min_{z \in \mathbf{Z}, d \in \mathbf{D}} LCC_{d,z} \quad (29)$$

$$\text{s.t. } \nu_{d,z,I}^- \leq U$$

として求まる。なお、 $\nu_{d,z,I}^-$ はマルコフ過程の定常状態での $\nu_{t,d,z,I}^-$ である¹⁸。上記のような定式化では、 \mathbf{Z} , \mathbf{D} の個々の要素の組合せに対して $LCC_{d,z}$ を算出してゆくことにより、最適点検間隔、最適維持管理施策に関する厳密解を求めることができる¹⁹。図-11には、実在の高速道路照明灯具を対象としたライフサイクル費用評価の結果を示している。個々のプロットはそれぞれの点検間隔 z を表し、任意のリスク管理水準のもと

¹⁶ 時点 t におけるそれぞれの健全度の生起確率。

¹⁷ 複数施設を非同期レジームで維持管理する場合には、割引因子を考慮せず平均費用法⁷⁶での意思決定が望ましいことが知られている⁷⁷。

¹⁸ ここでは、健全度 I となる確率にリスク管理水準を設定したが、他にも Value at Risk を用いる方法⁷⁸などが存在する。

¹⁹ なお、ワイブルハザードモデルを用いた場合には、経過時間を状態変数としたマルコフ決定過程により最適維持管理施策が求まる⁷⁸。

での最適点検間隔 z^* 、その際のライフサイクル費用の期待値を求めることが可能となる。

5. 維持管理施策最適化の最先端

ここでは、近年開発された先進的な維持管理最適化手法を紹介する。

(1) 近接施設の補修意思決定との相互依存関係

a) 組合せ爆発による計算困難性

4.(2)で紹介した手法は、基本的には、単一施設に対する維持管理施策の最適化に対して有効となる。このような単一施設に対する維持管理施策最適化に関してはこれまで膨大な研究が行われてきた^{76),79)-88)}。しかしながら、現実の施設の維持管理問題を考えた場合、近接施設との同時補修により補修費用や規制費用の低減を図る、個別の施設ではなく施設群に対して予算制約がある、複数施設が存在して初めてインフラとしての機能を発揮する、といったように、ある施設に対する維持管理の意思決定が他の施設への意思決定に影響を及ぼす場合も少なくない。このような状況では、複数施設に対する補修・更新の有無を同時決定する必要がある。

例えば、同質で連続した円環状の N 個の道路舗装区間の維持管理問題を考える。個々の舗装区間 n ($n = 1, \dots, N$) はそれぞれ独立にマルコフ過程モデルに従い劣化するとする。対象とする維持管理問題を、離散的な時間軸 $t = 0, 1, \dots$ 上のそれぞれの時点において²⁰、個々の舗装区間 n に対して、i) 補修と規制を行う $\eta_{n,d} = 2$, ii) 規制のみを行う $\eta_{n,d} = 1$, iii) 何も行わない $\eta_{n,d} = 0$, の3種類のアクションを選択する問題と考える。 $d \in \mathbf{D}$ は補修戦略の候補集合である。簡単のため、 $i = I$ となった舗装区間に対しては、必ず補修・規制を行う必要があると考える。このとき最適維持管理施策は、ライフサイクル費用最小化問題の解として、

$$d^* = \arg \min_{d \in \mathbf{D}} LCC_d \quad (30)$$

と得られる。 LCC_d は個々の時点 t での、i) 補修される舗装区間数に比例した補修費用（補修材料費を想定）、ii) 連続する1つの規制あたりの固定補修費用（建設機材の費用を想定）、iii) 連続する1つの規制を行う固定規制費用、の3種類の費用の和で表現されるとし、個々の舗装区間の補修・規制費用を単純に足し合わせるのみでは算出できない。 \mathbf{D} の要素数が 3^N となり N の増加に伴い指数関数的に増加してゆくため、現実的な規模の問題において最適維持管理施策 d^* の厳密解を求めることが困難となる。

²⁰ ここでは、点検間隔は固定とし、最適化の対象としない。

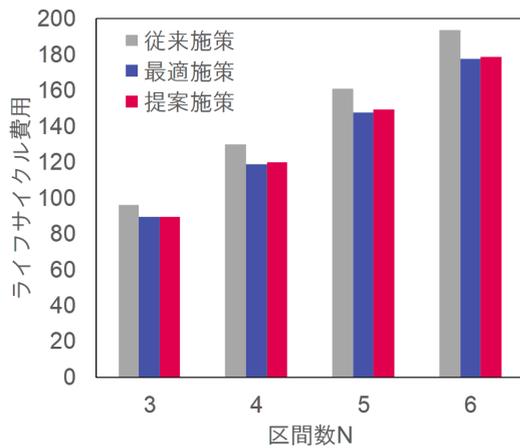


図-12 現実的ルールと厳密解，従来施策の比較

このような、補修の同期化による経済性や、複数施設にまたがる共通の予算制約、といった複数施設間の相互依存関係を考慮するための研究が近年数多く提案されるようになった²¹。それらは、小・中規模な問題を対象とし最適維持管理施策の厳密解を求めるアプローチ^{91)–96)}、大規模な問題に対して問題を簡略化するあるいは近似解やヒューリスティックな手法による解を求めるアプローチ^{97)–109)}などに分類できる²²。

b) 現実的ルールによる維持管理施策

5.(1)a)で紹介した問題²³に対して、著者等は、個々の時点での $\eta_{n,d}$ の決定問題を現実的ルールにより簡略化するようなアプローチを提案している⁸⁹⁾。これにより、複数施設の健全度パターンに対する膨大かつ複雑な最適維持管理施策を少数の変数により簡便に近似できる。例えば、

“ある点検タイミングにおいて、ある健全度（第一管理水準²⁴）以上となる舗装区間を要補修区間とするとともに、要補修区間からある区間数（探索距離 l ）以内のある健全度（第二管理水準 ξ ）以上となる舗装区間を予防的補修区間として、両補修区間を同時に補修する”という補修対象の舗装区間の選定ルールを設定し、 l と ξ を操作変数とした最適化問題を考える。なお、補修対象の舗装区間が定まれば、規制区間は一意に定まると考える。 N 個の円環状の連続した舗装区間に対して、

²¹ このような研究が行われる契機となった研究として Golabi et al.⁹⁰⁾ がある。

²² なお、近年、多目的最適化（例えば、維持管理費用と温室効果ガス排出量）に関する研究も盛んに行われている^{110)–115)}が、本稿では対象としないこととする。この点に関しては、レビュー論文^{116),117)}に詳述されている。また、複数施設におけるロバスト最適化に関する研究も行われている^{118),119)}。

²³ 当該問題をマルコフ決定過程として取扱い、健全度の最大値 $I=3$ の状況で価値反復法により最適解を導出した際の計算時間は、1.26 秒 ($N=3$)、793.6 秒 ($N=4$)、843.7 秒 ($N=5$)、31,260 秒 ($N=6$) であり、 $N=7$ 以上の場合には計算不可能であった⁸⁹⁾。

²⁴ 以下の例では、簡単のため、 I を第一管理水準とし、操作変数としては取り扱わない。

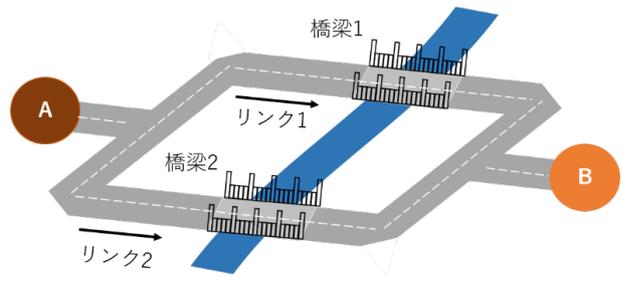


図-13 代替性を持つ 2 橋梁

個々の舗装区間が同一のマルコフ推移確率に従い劣化すると仮定し、3 段階の健全度 ($I=3$) のもとで、提案手法により最適探索距離 l^* 、最適第二管理水準 ξ^* を求めた結果を図-12 に示す。同図には、個々の舗装区間に対して独立に補修意思決定を行った施策（従来施策：ここでは、一律に健全度 $i=3$ であれば補修・規制を行うと設定）、上述の価値反復法により求めた最適維持管理施策（最適施策）、現実的ルールにより求めた l^* 、 ξ^* により決定される維持管理施策（提案施策：今回の場合は、全ての N において $(l^*, \xi^*) = (1, 2)$)²⁵、の 3 種類の維持管理施策でのライフサイクル費用を比較している。同図より、i) 従来施策ではライフサイクル費用を過大評価してしまう点、ii) (現段階では N が小さい場合のみで確認できることであるが) 提案手法により、最適施策に近い維持管理施策を大規模な計算を行わずとも導出可能である点、が確認できる。さらに、現実の維持管理に目を向けると、補修が必ず必要となるある施設のための一度の規制で近接のある程度劣化の進展した施設へ予防的保全を行うべきか否かは実務者を悩ます問題の 1 つである。それに対しても、最適探索距離 l^* 、最適第二管理水準 ξ^* を求めることにより基準を設けることが可能となる。このように、複数の施設に対する維持管理施策の複雑性を低減させ、現実的な維持管理施策を導出するようなアプローチの中で特徴的な研究として、小林等の研究¹²⁰⁾があげられ、当該研究では、混合マルコフ劣化ハザードモデルにより求められた個々の橋梁に対する維持管理施策の厳密な最適解との差異のある許容範囲内に収めるような標準的維持管理施策を求めるための方法論が提案されている。

(2) 社会便益を考慮した維持管理施策

これまで紹介した研究は、基本的には、あるリスク管理水準のもとでのライフサイクル費用の最小化を達成するように、最適維持管理施策を決定していた。一

²⁵ 計算時間は、12.4 秒 ($N=3$)、13.2 秒 ($N=4$)、14.3 秒 ($N=5$)、15.3 秒 ($N=6$) であり、 $N=100$ 程度の場合や $I=4$ の場合でも現実的な計算時間で l^* 、 ξ^* を求めることができることを確認している。

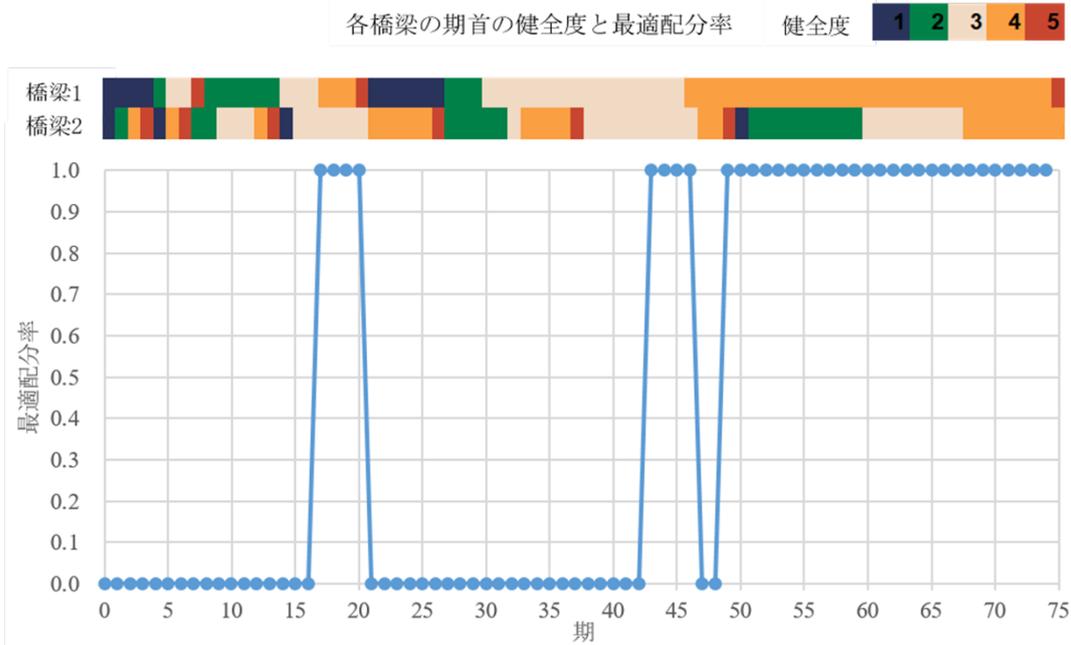


図-14 最適需要制御施策の例

方で、施設の特性や社会情勢の変化により、i) 施設の持つインフラとしての価値を考慮し、それからライフサイクル費用を差し引いた社会的総余剰を最大化するようなアプローチ、ii) 施設の故障時の社会便益の損失が定量化されていない（明確なリスク管理水準が設定されていない）状況に対して、施設の故障時の社会便益の損失を定量化したのちに、維持管理費用と社会的費用の双方を考慮して最適維持管理施策を決定するようなアプローチ、などが必要となる場合がある。このような状況に対して社会的総余剰を最大化するようなアプローチ^{122)–124)}が必要となる。ここでは、i) の例として、複数施設の廃棄問題、ii) の例として、ETC施設の維持管理問題、をそれぞれ取り上げ、具体例を交えた説明を行う。

a) 複数施設の廃棄問題と需要制御施策

図-13に示すような2橋梁が存在する状況を考える。ノードA、B間の確定的な需要が経年的に減少し、あるタイミングで一方の橋梁を廃棄する必要があるとする。ノード間の需要は固定需要であるとし、橋梁の更新や廃棄に伴い一方の橋梁のみが利用可能な場合には、一方の橋梁のみを利用し、双方の橋梁が利用可能な場合には、総需要の半数の交通量がそれぞれの橋梁を利用すると仮定する²⁶⁾。多くの統計的劣化予測モデルで実データから推定されているように、ここでは、劣化過程が交通量に依存して変化すると考え、具体的には、

マルコフ劣化ハザードモデルにより交通量の変化に伴いマルコフ推移確率が変化する状況を考える。利用者のノード間のトリップによる便益から維持管理費用を差し引いた社会的総余剰の最大化問題として、橋梁の最適廃棄施策を導出する。既往研究¹²²⁾において、動的計画法に基づくアルゴリズムにより、最適廃棄施策を求めめるための方法論が提案されている。それに加えて、著者等の提案する方法論¹²⁵⁾では、リンク間の総需要は固定とした中での、リンク間の動的な需要制御により、社会的総余剰を増加させることを試みている。具体的には、需要の経年的減少による一方の橋梁の理想的な廃棄タイミングにおいて、当該橋梁の劣化が進展した状態になるように、動的な需要制御を通じて劣化過程を制御し、社会的総余剰を増加させようという試みである²⁷⁾。

図-14には、実橋梁を想定した適用事例の分析結果の一例を示している。提案方法論では、各期に観測される健全度に基づき、当該期で、i) 維持、更新、廃棄のいずれを選択するか、ii) 各橋梁の最適需要量（交通量）、が決定できる。同図では、各期に図に示すような健全度が観測されたと仮定した場合の、橋梁1への最適需要配分率²⁸⁾を示している。なお、75期目が橋梁1の最適廃棄時点である。本適用事例では、動的な需要制御を行うことにより、社会的総余剰が0.14～0.58%増加し、

²⁷⁾ 静的な枠組みで需要制御により社会的総余剰の増加を図った研究として、瀬木等¹²³⁾が補修費用を内部化した次善高速道路料金の設定方法を提案している。

²⁸⁾ ここでは、具体的な需要を特定していないが、現実では、大型車の通行規制を行い一般車両や歩行者は通行可、あるいは、車両の通行規制を行い歩行者などは通行可、などを想定。

²⁶⁾ アセットマネジメント上の需要制御効果を確認するために、ここでは、社会的最適状態と交通均衡状態が等しい場合を対象としている。

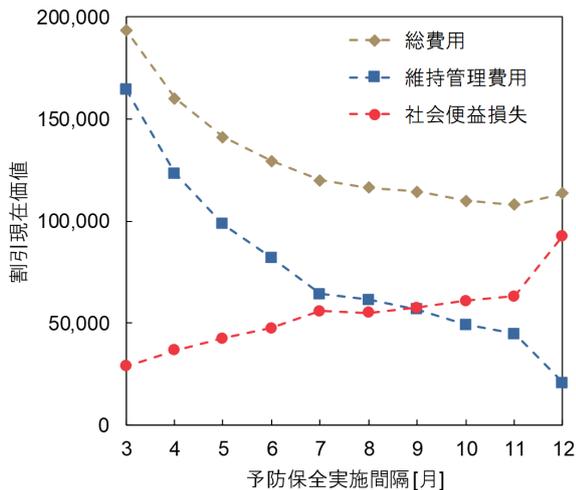


図-15 社会便益を考慮した維持管理施策の決定

維持管理費用も 2.15~18.17%減少することを確認している。このような分析を通じて、理想的な廃棄タイミングに劣化が進展しているような状態となるような劣化制御を動的な需要制御を通じて行うことにより、特に、管理者費用である維持管理費用の低減が達成できる可能性が示唆できる²⁹。

b) 高速道路施設に対する維持管理施策

橋梁のように、劣化の進展に起因したハザードが極めて大きい場合（例えば、落橋）には、管理者は、厳しいリスク管理水準や健全度の定義を行い（安全側の評価を行い）、リスク管理水準を満足するように、ライフサイクル費用の最小化を図るのが一般的である。一方で、ここで対象とする高速道路 ETC 設備のような施設のマネジメントは、i) 施設の故障時の社会的便益の損失が定量化されていない、ii) 故障を完全に防ぐことは不可能であり、少数ではあるがある程度の件数の故障を許容する必要がある、という特性を持つ。このような施設に対する最適維持管理施策も、基本的には上述のマルコフ決定過程などの方法論で導出可能であり、研究事例^{78),126)}も蓄積されている。しかしながら、これらの既往研究では、施設の劣化・故障に対するリスク管理水準を所与として分析を行っていた。ここでは、近年、その維持管理の重要性が増加している ETC 設備に対して、施設の故障時の社会便益の損失を定量化した上で、故障過程の定量化を行い、最適維持管理施策を導出した事例を紹介する。

具体的には、ETC 設備の車両発進制御機（車両通過時に開閉するバー）を対象とする。車両発進制御機に関して、故障が発生した際の、i) ETC のレーン閉鎖の有無、ii) レーン閉鎖が発生した場合のレーン閉鎖時間、

が記録されている。また、交通量データから、任意の時間レーン閉鎖が継続した際の総遅れ時間（ETC レーン通過のために通常時より余分に必要となる時間）が算出できる。これらの実データに基づき、車両発進制御機故障時の期待総遅れ時間が推定でき、それを社会便益の損失として取り扱う³⁰。また、施設の台帳データと故障データからワイプルハザードモデルを推定し、故障過程を定量化する。その結果、加速度パラメータ α が 1 以上となり、故障確率が経年的に増加してゆく故障過程が推定された。維持管理体制として、管理者は、一定の時間間隔で点検・調整を予防保全として行い、それにより、車両発進制御機の供用からの経過時間が 0 にリセットされると仮定する。予防保全の時間間隔が施策変数となる。また、時間価値や予防保全費用などは現実の値を参照して設定している。このような条件のもとで、実データから推定された社会便益の損失（利用者の時間損失）と故障過程に基づいて、図-15 に示すように予防保全間隔ごとの計画期間内³¹の社会便益の損失と維持管理費用を定量化できる。例えば、両者の和を総費用と定義し、それを最小化する場合には、今回の場合では点検間隔を 11ヶ月とすれば良い³²。

ここで分析対象とした ETC 設備のように、これまでアセットマネジメントの適用がなされていなかった施設に対して新たにアセットマネジメントを導入する際には、このような施設の劣化・故障時の影響の定量化が必要不可欠となる。その 1 つの手段として、交通工学的見地から社会便益の損失を定量化し、維持管理施策へと結びつける道筋を示している。当然のことながら、ETC 設備の故障時には、事故リスクの増加や補修のための人員確保といった、ここでは考慮しきれていない事柄も生じ得るため、これらを総合的に考慮できるような枠組みの確立が今後の検討課題である。

6. 研究課題と展望

(1) 統計的劣化予測

統計的劣化予測手法に関する研究が行われるようになってから、20 年程度が経過し、新たなモデル開発と

³⁰ 施設の劣化・故障の交通流への影響を考慮した研究として、構造物の劣化に起因した通行止めがネットワークの他のリンクの交通流に与える影響を考慮した研究¹²⁷⁾がある。

³¹ ここでは、例として計画期間を 10 年としている。高速道路施設のように、技術的陳腐化の時間サイクルが短い施設に対しては、それを明示的に考慮した研究¹²⁸⁾も過去には存在する。

³² 維持管理費用は管理者費用であり、社会便益の損失は社会的費用であるため、両者の和を総費用としたときに、総費用のみで維持管理施策の優位性を議論すると、管理者費用あるいは社会的費用があまりにも非現実的であるような結果が最適解として導出される可能性もある。図-15 に示すように、総費用のみならず、維持管理費用と社会便益の損失も同時に確認しながら現実的な最適維持管理施策を決定してゆくことが求められる。また、このような分析では、5.(1)a) で言及した多目的最適化によりパレートフロンティアを求めることも考え得るがここでは今後の検討課題とする。

²⁹ 利用者にとっては次善状態となるため、利用者便益の損失の程度には留意する必要がある。

いった統計的劣化予測モデルの高度化に関する研究はある程度成熟してきている³³。それにより、今後の研究としては、既存の統計的劣化予測モデルをどのように活用するのか、アプリケーションにおける価値をどのように見出すのか、に主眼が置かれる可能性がある。例えば、著者等は、階層的隠れマルコフハザードモデルを用いて、橋梁の鋼桁端部と直上の伸縮装置の複合的劣化過程を推定し、伸縮装置の漏水が桁端部の劣化を促進するという結果を導出している¹²⁹。これにより、伸縮装置の予防保全によって、橋梁主部材である桁端部の延命効果が発揮できることが示唆される。一方で、階層的隠れマルコフハザードモデルを舗装構造に適用した場合³⁴には、基層の耐力回復のためには舗装の全層打ち替えが必要となるために、耐力の予防保全施策の実施が困難となる。このような施設に対しては、予防保全施策の有用性ではなく、表層の劣化速度から耐力の低下を検知するような施策を重点的に議論すべきであろう。このように、施設の種類に応じて、点検のし易さ、補修工法、それらの費用などは多様に異なるため、たとえ異なる種類の施設の劣化過程に対して同一構造のモデルを適用可能であっても、維持管理施策や体制におけるインプリケーションが最終的に異なる可能性が十分にある。

また、本稿で紹介した劣化速度の異質性評価に関しては、個々の施設（群）のベンチマーキングを行うという観点のみならず、東日本大震災や5年に一度の近接目視点検の実施^{131),132)}といった、大規模災害や政策変更の前後での施設群の状態の変化を定量化することに利用可能となる可能性がある。施設のアセットマネジメントを行う上で、施設の資産としての価値をいかに評価するかが1つの重要なポイントとなり、そのためには劣化状態やパフォーマンスの定量化が必須となる。このような観点から、施設群の現状把握、政策の事後評価などを行うことが望ましい。

これまで紹介してきたように、現在までに、多様な統計的劣化予測モデルが提案されている。それらのモデルが開発されてから年数が経過し、統計的劣化予測手法が確立され徐々に時系列的な点検データが整備されてきた昨今、既往のモデルの事後評価も必要となろう。具体的には、モデル開発当時の予測結果と現在の劣化状況との比較、マルコフ性の仮定の妥当性検証などにより、モデルを継続的に改善してゆくことが求められる。近年、AIや機械学習などのソフトコンピュー

ティング技術により劣化予測を行う研究^{133),134)}も増加している。統計的劣化予測モデルとこれらの技術を、モデルのデータへの当てはまりの精度のみならず、外挿的な予測精度、推定結果の解釈可能性、劣化メカニズムの考慮のし易さといった多角的な観点から比較し、状況に応じて最良の手法を選択するような努力が必要となる。

しかしながら、一方で、実務におけるアセットマネジメントに目を向けると、統計的劣化予測モデル推定のための台帳データ、点検データ、漏れの無い補修履歴データの整備が十分でない場合も散見される。このようなデータ整備を、一歩ずつ着実に推し進めてゆくことも重要となる。

(2) 維持管理施策最適化

既に述べたように、大規模なネットワークを形成する施設群において、施設間の相互依存関係が存在する場合の最適維持管理施策を求めめるための方法論の開発が進められている。問題を多目的最適化に拡張したり、施設間に異質性が存在する状況を対象としたりする場合には、モデルの数学的取り扱いがより複雑となる。そのような問題に対して、様々な工夫により、厳密解やそれに近い解を求めめるための研究が今後も必要となる。一方で、それにより求められた最適維持管理施策も複雑である、あるいは、状況に応じて多様に变化する可能性がある。実装を考えた場合、施設や状況ごとに施策が多様に变化することは望ましくない。それに対して、本稿では、現実的なルールによりある程度画一化された施策により維持管理を改善してゆくための方法論を紹介した³⁵。その際、重要となるのが、厳密な最適解と現実的な施策における費用やリスクの差異を定量化し、把握しておくことであろう。この点は、維持管理施策最適化のみならず、統計的劣化予測モデルの選定においても同様であると考えられる。

本稿で紹介した維持管理施策最適化手法の中で、動的需要制御施策に関しては、需要が経年的に減少してゆく中での施設の廃棄問題のみならず、半永久的に供用を想定した施設群での予算の平準化にも有用性を発揮できる可能性がある。また、施設の劣化状態に応じて地震などの災害時の被害が異なる状況¹³⁵⁾においては、施設ネットワークのリダンダンシー確保のために有効となる可能性がある。

今後、橋梁や道路、上下水道以外にも、多様な施設に対してアセットマネジメントが必要となる可能性がある。施設に応じて、維持管理の体制や劣化・故障時の影響が多様に異なる。これらの多様な施設、状況に

³³ 当然のことながら、既存のモデルでは表現しきれないような劣化現象は多数存在し、それに対して統計的劣化予測モデルの高度化を今後も継続的に行わなければならないことは論を俟たない。

³⁴ 3.(1)c) で述べたように基層の耐力力が表層の劣化速度に影響を与えるとする。実際の維持管理施策最適化結果（耐力力には事後保全施策が望ましい）は既往研究¹³⁰⁾を参照されたい。

³⁵ 施策変更コストを導入すれば現実的なルールが最適解として導出できる可能性もあるが、政策変更コストの定量化に課題が残る。

対して、適切なアセットマネジメントを行うための研究を今後も継続的に蓄積してゆく必要がある。

7. おわりに

本稿では、社会基盤施設に対するアセットマネジメントに関する研究の中で、統計的劣化予測と維持管理施策の最適化に着目し、基幹的手法とそれを発展させた先端的手法を紹介した。具体的には、統計的劣化予測に関して、ハザードモデルを用いた生存時間解析とMCMC法を基幹技術として、ハザード関数の異質性評価の観点から、多元的劣化過程モデル、確率的劣化フロンティアモデル、隠れマルコフハザードモデルを概説し、モニタリングデータに基づくアセットマネジメントの可能性に言及した。また、維持管理施策最適化に関しては、マルコフ決定過程を基幹技術として、複数施設への維持管理施策最適化を図る際の問題点と現実的ルールによる施策の導出、複数施設の廃棄問題と動的な需要制御、ETC 設備に対する維持管理問題をそれぞれ説明した。その上で、将来必要となるであろう研究課題と今後の展望を最後に述べた。1. で述べたように、アセットマネジメントは多様な専門的分野により融合的に実施されてゆく。これらの分野間が有機的に連動し、継続的にマネジメントサイクルを改善しながら適切なアセットマネジメントを実施するための体制を構築してゆくことが必要となる。

謝辞

招待論文の執筆という光栄かつ貴重な機会を頂戴致しました土木計画学研究委員会に心よりお礼申し上げます。

京都大学小林潔司名誉教授、大阪大学貝戸清之准教授、京都大学青木一也客員准教授、大阪大学小濱健吾特任准教授には、アセットマネジメント全般に関して、日頃より貴重なお指導、ご意見を賜っております。本稿で紹介した研究内容には、先生方のこれまで研究成果が多分に含まれており、今後のアセットマネジメント研究の益々の発展に貢献する所存です。また、著者の所属する研究室の東北大学奥村誠教授をはじめ、東北大学の先生方には、日頃より著者の研究内容について鋭いご指摘を頂戴しております。本稿で紹介した研究内容の一部は、東北大学の計画系の先生方との議論を通じて着想に至ったものです。アセットマネジメント研究を行うにあたり、実務者の方々のご支援、ご協力は必要不可欠です。これまで共同研究や学会での議論など、様々な場でお世話になった方々に感謝申し上げます。

なお、本研究はJSPS 科研費 JP18K13844、および、JP19H00777 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Kobayashi, K.: Asset Management, *Matsuoka, Y. and Yoshida, M. (eds), Challenges for Human Security Engineering*, pp.173-196, Springer, 2014.
- 4) 貝戸清之, 小林潔司, 水谷大二郎: インフラ管理の最適化: アセットメトリクスに向けて, 第 26 回 RAMP シンポジウム論文集, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp.1-11, 法政大学, 2014.
- 5) 貝戸清之, 小林潔司: 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, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5 (土木計画学研究・論文集第 31 巻), pp.I.21-I.30, 2014.
- 6) 堤知明, 白井伸一, 安田登, 松島学: 塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量評価, 土木学会論文集, No.544/V-32, pp.33-41, 1996.
- 7) 大野俊夫, 魚本健人: コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.662/V-49, pp.29-44, 2000.
- 8) 小林孝一, 宮川豊章: 分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.173-186, 2001.
- 9) 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.
- 10) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 11) Klein, J. P. and Moeschberger, M. L.: *Survival Analysis: Techniques for Censored and Truncated Data*, Springer-Verlag New York, 2003.
- 12) DeStefano, P. D. and Grivas, D. A.: Method for estimating transition probability in bridge deterioration models, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.4, Issue 2, pp.56-62, 1998.
- 13) 山崎崇央, 石田哲也: 生存時間解析を用いた東北地方における橋梁コンクリート部材の劣化定量分析, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.4, I.11-I.22, 2015.
- 14) Cox, D. R.: Regression models and life-tables, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Vol.34, Issue 2, pp.187-202, 1972.
- 15) Sinha, D. and Dey, D.: Semiparametric Bayesian Analysis of Survival Data, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 92, pp. 1195-1212, 1997.
- 16) Mauch, M. and Madanat, S.: Semiparametric hazard rate models of reinforced concrete bridge deck deterioration, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.7, Issue 2, pp.49-57, 2001.
- 17) Sun, Y., Ma, L., Mathew, J., Wang, W. and Zhang, S.: Mechanical systems hazard estimation using condition monitoring, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.20, Issue 5, pp.1189-1201, 2006.
- 18) 二宮陽平, 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司: 鋼床版疲労亀裂の発生・進展に着目した高速道路橋大規模修繕箇所選定の選定, 第 56 回土木計画学研究・講演集, 土木学会, CD-ROM, No.242, 岩手大学, 2017.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 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
 - 22) 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.
 - 23) 貝戸清之，福田泰樹，起塚亮輔，橋爪謙治，出口宗浩，横山和昭：遊離石灰法に基づく RC 床版の劣化予測および補修優先順位の決定，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.68, No.3, pp.123-140, 2012.
 - 24) 佐藤正和，貝戸清之，小林潔司，小濱健吾，宮崎文平： T_A 法と舗装劣化寿命誤差，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71, No.1, pp.1-18, 2015.
 - 25) 水谷大二郎，小濱健吾，貝戸清之，田中晶大：集計的劣化過程モデルによる高速道路橋 RC 床版の劣化総合評価，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.73, No.3, pp.50-69, 2017.
 - 26) 水谷大二郎，洲崎尚樹，安村圭亮，小濱健吾，貝戸清之，山田洋太：局所的損傷に着目した排水性舗装の劣化評価，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.74, No.1, pp.1-15, 2018.
 - 27) Madanat, S., Mishalani, R. and Ibrahim, W. H. W.: Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.1, Issue 2, pp.120-125, 1995.
 - 28) Mishalani, R. G. and Madanat, S. M.: Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.8, Issue 4, pp.139-148, 2002.
 - 29) 水谷大二郎：健全度推移の不連続性を考慮したマルコフ推移確率の非集計的推定方法，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.74, No.2, pp.125-139, 2018.
 - 30) Shin, H. C., and Madanat, S. M. : Development of stochastic model of pavement distress initiation, *Journal of Infrastructure Planning and Management*, No.744/IV-61, pp.61-67, 2003.
 - 31) 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.
 - 32) 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.
 - 33) 水谷大二郎，坂口創，貝戸清之，小林潔司：準モンテカルロ法を用いた多段階ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推定，土木学会論文集 F4（建設マネジメント）特集号，Vol.71, No.4, pp.1_23-I_34, 2015.
 - 34) 水谷大二郎，小林潔司，風戸崇之，貝戸清之，松島格也：連続量を用いた劣化ハザードモデル：舗装耐荷力への適用，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.72, No.2, pp.191-210, 2016.
 - 35) Akaike, H. : A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 19, Issue 6, pp. 716-723, 1974.
 - 36) 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.
 - 37) 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.
 - 38) 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.
 - 39) Hastings, W. K.: Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications, *Biometrika*, Vol.57, Issue 1, pp.97-109, 1970.
 - 40) Geman, S. and Geman, D.: Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.6, Issue 6, pp.721-741, 1984.
 - 41) Geweke, J.: Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments, in Bernardo, J. M., Berger, J. M., Dawid, A. P. and Smith, A. F. M. (eds.), *Bayesian Statistics 4*, pp.169-193, Oxford University Press, 1996.
 - 42) Watanabe, S.: Asymptotic equivalence of Bayes cross validation and widely applicable information criterion in singular learning theory, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.11, pp.3571-3594, 2010.
 - 43) 水谷大二郎：アセットマネジメントにおけるデータ欠損補完と多元的劣化評価に関する研究，博士学位論文，大阪大学，2016.
 - 44) Chen, S., Dick, J. and Owen, A. B.: Consistency of Markov chain quasi-Monte Carlo on continuous state spaces, *The Annals of Statistics*, Vol.39, No.2, pp.673-701, 2011.
 - 45) George, E. I. and McCulloch, R. E.: Variable Selection via Gibbs sampling, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.88, Issue 423, pp.881-889, 1993.
 - 46) 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.
 - 47) 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（土木計画学），Vol.68, No.4, pp.255-271, 2012.
 - 48) 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.
 - 49) Madanat, S. M., Karlaftis, M. G. and McCarthy, P. S.: Probabilistic infrastructure deterioration models with panel data, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.3, Issue 1, pp.4-9, 1997.
 - 50) Bardaka, E., Labi, S. and Haddock, J. E. : Using enhanced econometric techniques to verify the service life of asset interventions: A case study for Indiana, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2431, pp. 16-23, 2014.
 - 51) Baltagi, B. H.: *Econometric Analysis of Panel Data*, John Wiley & Sons, 2008.
 - 52) 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（舗装工学），Vol.67, No.2, pp.91-110, 2011.
 - 53) 宮崎文平，加藤寛之，小濱健吾，貝戸清之，風戸崇之，田中克則：膨大な路面性状調査データに基づく舗装補修施策の評価法の提案，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.
 - 54) 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（建設マネジメント），Vol.69, No.2, pp.204-211, 2013.
 - 55) 貝戸清之，坂井康人，塚本成昭，水谷大二郎，小林潔司：多階層混合マルコフ劣化ハザードモデル：ジョイント劣化評価への適用，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71, No.1, pp.1-18, 2015.

- 56) 小林潔司, 水谷大二郎, 松島格也, 山本浩司, 貝戸清之, 坂口創: 2次元混合ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.72, No.2, pp.47-62, 2016.
- 57) 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 社会基盤施設の多元的劣化過程モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.1, pp.34-51, 2016.
- 58) Selih, J., Kne, A., Srđić, A. and Zura, M.: Multiple-criteria decision support system in highway infrastructure management, *Transport*, Vol.23, Issue 4, pp.299-305, 2008.
- 59) 小林潔司, 貝戸清之, 小濱健吾, 早矢仕廉太郎, 深谷渉: 事業効率性評価のための確率的劣化フロンティア分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016.
- 60) 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 (土木計画学), Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 61) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Thao, N. D., 北浦直樹: デー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, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.2, pp.63-80, 2015.
- 62) 田中晶大, 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之: 空間的異質性と空間的連鎖性を考慮したマルコフ劣化ハザードモデル, 第 57 回土木計画学研究・講演集, 土木学会, 東京工業大学, 2018.
- 63) 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.
- 64) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 秀島栄三, 山田洋太, 平川恵士: 判定基準変更を考慮した隠れマルコフ劣化ハザードモデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.2, pp.70-89, 2015.
- 65) Volovski, M., Murillo-Hoyos, J., Saeed, T. U. and Labi, S.: Estimation of routine maintenance expenditures for highway pavement segments: accounting for heterogeneity using random-effects models, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, Vol.143, Issue 5, 04017006, 2017.
- 66) 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.
- 67) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 平川恵士: 気象状況を考慮したポットホール管理重点化ルール, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.70, No.3, pp.63-80, 2014.
- 68) Nam, L. T., 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.
- 69) Fatemi, A. and Yang, L.: Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials, *International Journal of Fatigue*, Vol.20, Issue 1, pp.9-34, 1998.
- 70) Doksum, K. A. and Hbyland, A.: Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener processes and the inverse Gaussian distribution, *Technometrics*, No.34, Issue 1, pp.74-82, 1992.
- 71) van Noortwijk, J. M.: A survey of the application of gamma processes in maintenance, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.94, Issue 1, pp.2-21, 2009.
- 72) Shemehsavar, S.: A bivariate Gamma model for a latent degradation process, *Communications in Statistics-Theory and Methods*, Vol.43, Issue 9, pp.1924-1938, 2014.
- 73) 小林潔司, 貝戸清之, 松岡弘大, 坂井康人: 時系列モニタリングデータ活用のための長期劣化進行モデリング, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.70, No.3, pp.91-108, 2014.
- 74) Chen, Y. and Durango-Cohen, P. L.: Development and field application of a multivariate statistical process control framework for health-monitoring of transportation infrastructure, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.81, Part 1, pp.78-102, 2015.
- 75) 小林潔司, 貝戸清之, 水谷大二郎, 坂井康人: 長期記憶性を考慮した時系列データによる構造物劣化過程のモデル化, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) (登載決定)
- 76) 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.
- 77) 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用と集計的効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, pp.59-71, 2005.
- 78) 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.
- 79) Friesz, T. L. and Fernandez, J. E.: A model of optimal transport maintenance with demand responsiveness, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.13, Issue 4, pp.317-339, 1979.
- 80) Madanat, S.: Optimal infrastructure management decisions under uncertainty, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.1, Issue 1, pp.77-88, 1993.
- 81) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, Issue 1, pp.55-62, 1994.
- 82) 栗野盛光, 小林潔司, 渡辺晴彦: 不確実性下における最適補修投資ルール, 土木学会論文集, No.667/IV-50, pp.1-14, 2001.
- 83) Li, Y. and Madanat, S.: A steady-state solution for the optimal pavement resurfacing problem, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.36, Issue 6, pp.525-535, 2002.
- 84) 慈道充, 小林潔司: 不確実性下における最適点検・修繕ルール, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.
- 85) Brühwiler, E. and Adey, B.: Improving the consideration of life-cycle costs in bridge decision-making in Switzerland, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.1, Issue 2, pp.145-157, 2005.
- 86) Ouyang, Y. and Madanat, S.: An analytical solution for the finite-horizon pavement resurfacing planning problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.40, Issue 9, pp.767-778, 2006.
- 87) 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 (建設マネジメント), Vol.67, No.1, pp.33-52, 2011.
- 88) 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 (舗装工学), Vol.67, No.2, pp.75-90, 2011.
- 89) 中里悠人, 水谷大二郎: 画一的ルールによる道路舗装の次善補修施策, 第 60 回土木計画学研究・講演集, 土木学会, 富山大学, 2019.
- 90) Golabi, K., Kulkarni, R. B. and Way, G. B.: A statewide pavement management system, *Interfaces*,

- Vol.12, Issue 6, pp.5-21, 1982.
- 91) Ouyang, Y. and Madanat, S.: Optimal scheduling of rehabilitation activities for multiple pavement facilities: exact and approximate solutions, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.38, Issue 5, pp.347-365, 2004.
 - 92) Durango-Cohen, P. L. and Sarutipand, P.: Capturing interdependencies and heterogeneity in the management of multifacility transportation infrastructure systems, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.13, Issue 2, pp.115-123, 2007.
 - 93) 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.
 - 94) Mishalani, R. G. and Gong, L.: Optimal infrastructure condition sampling over space and time for maintenance decision-making under uncertainty, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.43, Issue 3, pp.311-324, 2009.
 - 95) 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 (建設マネジメント), Vol.67, No.2, pp.74-91, 2011.
 - 96) Burkhalter, M., Martani, C. and Adey, B. T.: Determination of risk-reducing intervention programs for railway lines and the significance of simplifications, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.24, Issue 1, 04017038, 2017.
 - 97) Chan, W. T., Fwa, T. F. and Tan, C. Y.: Road-maintenance planning using genetic algorithms. I: Formulation, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.120, Issue 5, pp.693-709, 1994.
 - 98) Fwa, T. F., Tan, C. Y. and Chan, W. T.: Road-maintenance planning using genetic algorithms. II: Analysis, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.120, Issue 5, 710-722, 1994.
 - 99) Lee, J. and Madanat, S.: A joint bottom-up solution methodology for system-level pavement rehabilitation and reconstruction, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.78, pp.106-122, 2015.
 - 100) 平川恵士, 水谷大二郎, 小濱健吾, 貝戸清之: 非定常な点検間隔を考慮した高速道路トンネル照明設備の最適点検・更新施策, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.
 - 101) Lee, J., Madanat, S. and Reger, D.: Pavement systems reconstruction and resurfacing policies for minimization of life-cycle costs under greenhouse gas emissions constraints, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.93, pp.618-630, 2016.
 - 102) Mizutani, D., Burkhalter, M., Adey, B. T., Martani, C. and Ramdas, V.: Initial investigations into the use of three heuristic algorithms to determine optimal intervention programs for multiple railway objects, *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, Vol.6, No.3, pp.1-20, 2017.
 - 103) Kielhauser, C., Adey, B. T. and Lethanh, N.: Investigation of a static and a dynamic neighbourhood methodology to develop work programs for multiple close municipal infrastructure networks, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, Issue 3, pp.361-389, 2017.
 - 104) Lethanh, N., Adey, B. T. and Burkhalter, M.: Determining an optimal set of work zones on large infrastructure networks in a GIS framework, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.24, Issue 1, 04017048, 2017.
 - 105) Zhang, L., Fu, L., Gu, W., Ouyang, Y. and Hu, Y.: A general iterative approach for the system-level joint optimization of pavement maintenance, rehabilitation, and reconstruction planning, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.105, pp.378-400, 2017.
 - 106) Su, Z., Jamshidi, A., Núñez, A., Baldi, S. and De Schutter, B.: Multi-level condition-based maintenance planning for railway infrastructures - a scenario-based chance-constrained approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.84, pp.92-123, 2017.
 - 107) Lee, J. and Madanat, S.: Optimal policies for greenhouse gas emission minimization under multiple agency budget constraints in pavement management, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.55, pp.39-50, 2017.
 - 108) Chu, J. C. and Huang, K. H.: Mathematical programming framework for modeling and comparing network-level pavement maintenance strategies, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.109, pp.1-25, 2018.
 - 109) Andriotis, C. P. and Papakonstantinou, K. G.: Managing engineering systems with large state and action spaces through deep reinforcement learning, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.191, 106483, 2019.
 - 110) Furuta, H., Kameda, T., Nakahara, K., Takahashi, Y. and Frangopol, D. M.: Optimal bridge maintenance planning using improved multi-objective genetic algorithm, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.2, Issue 1, pp.33-41, 2006.
 - 111) Ng, M., Lin, D. Y. and Waller, S. T.: Optimal long-term infrastructure maintenance planning accounting for traffic dynamics, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.24, Issue 7, pp.459-469, 2009.
 - 112) Bai, Q., Labi, S. and Sinha, K. C.: Trade-off analysis for multiobjective optimization in transportation asset management by generating Pareto frontiers using extreme points nondominated sorting genetic algorithm II, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.138, Issue 6, pp.798-808, 2011.
 - 113) Marzouk, M. and Omar, M.: Multiobjective optimisation algorithm for sewer network rehabilitation, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.9, Issue 11, pp.1094-1102, 2013.
 - 114) Lethanh, N., Adey, B. T. and Fernando, D. N.: Optimal intervention strategies for multiple objects affected by manifest and latent deterioration processes, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.11, Issue 3, pp.389-401, 2015.
 - 115) Torres-Machi, C., Pellicer, E., Yepes, V. and Chamorro, A.: Towards a sustainable optimization of pavement maintenance programs under budgetary restrictions, *Journal of Cleaner Production*, Vol.148, pp.90-102, 2017.
 - 116) Kabir, G., Sadiq, R. and Tesfamariam, S.: A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.10, Issue 9, pp.1176-1210, 2014.
 - 117) Chen, L. and Bai, Q.: Optimization in decision mak-

- ing in infrastructure asset management: A review, *Applied Sciences*, Vol.9, Issue 7, 1380, 2019.
- 118) Kuhn, K. D. and Madanat, S. M. :Model uncertainty and the management of a system of infrastructure facilities, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.13, Issue 5-6, pp.391-404, 2005.
- 119) Robelin, C. A. and Madanat, S. M. :Reliability-based system-level optimization of bridge maintenance and replacement decisions. *Transportation Science*, Vol.42, No.4, pp.508-513, 2008.
- 120) 小林潔司, 中谷晶一, 大迫湧歩, 小林潔司, 安部倉完 : 橋梁の劣化速度の異質性を考慮した補修戦略プロファイリング, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.4, pp.201-218, 2017.
- 121) 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.
- 122) 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 (建設マネジメント), Vol.68, No.3, pp.141-156, 2012.
- 123) 瀬木俊輔, 小林潔司, 田上貴士 : 維持補修費用を考慮した次善高速道路料金, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.3, pp.145-160, 2014.
- 124) Qiao, Y., Saeed, T. U., Chen, S., Nateghi, R., Labi, S.: Acquiring insights into infrastructure repair policy using discrete choice models, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.113, pp.491-508, 2018.
- 125) 上野渉, 水谷大二郎, 奥村誠 : 社会基盤ネットワークの最適更新・廃棄方策における需要制御効果, 第 58 回土木計画学研究・講演集, 土木学会, 大分大学, 2018.
- 126) 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.
- 127) Hu, X., Daganzo, C. and Madanat, S.: A reliability-based optimization scheme for maintenance management in largescale bridge networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.55, pp.166-178, 2015.
- 128) 山本浩司, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, 菱田憲輔 : 技術的陳腐化を考慮した大規模情報システムの最適更新戦略, 土木学会論文集 F, Vol.65, No.2, pp.264-283, 2009.
- 129) Mizutani, D., Kaito, K., Kobayashi, K. and Ninomiya, Y.: Effect of preventive maintenance for bridge expansion joints against corrosion at steel girder ends, *The 3rd International Symposium on Infrastructure Asset Management (SIAM 2019)*, Abu Dhabi, 2019.
- 130) 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 (舗装工学), Vol.68, No.2, pp.54-68, 2012.
- 131) 国土交通省 : 橋梁定期点検要領, 2014.
- 132) 国土交通省 : 道路橋定期点検要領, 2014.
- 133) Flintsch, G. W., and Chen, C.: Soft computing applications in infrastructure management, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.10, Issue 4, pp.157-166, 2004.
- 134) Li, X., Ding, Q. and Sun, J. Q.: Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.172, pp.1-11, 2018.
- 135) Mizutani, D.: Variability in an optimal infrastructure management policy by internalization of seismic risk, *Journal of Disaster Research*, Vol.13, No.6, pp.1062-1071, 2018.

(2019. 10. 24 受付)

Daijiro MIZUTANI

Managers of infrastructure should conduct appropriate asset management to maximise the value of infrastructure. After 2000s, numerous studies have been proposed in terms of infrastructure asset management combined with increase of deteriorated infrastructure, budget cuts and a lack of human resource. In this paper, the asset management research is arranged focusing on advanced methodologies of i) statistical deterioration forecasting with actual inspection data, and ii) optimisation of management policies based on estimated deterioration processes.