

# ベンチマーキングと舗装の補修計画の立案\*

## Benchmarking and Optimal Planning of Pavement Repairing\*

森悠\*\*・藤原栄吾\*\*\*・貝戸清之\*\*\*\*・小林潔司\*\*\*\*\*

By Hisashi MORI \*\*・Eigo FUJIWARA\*\*\*・Kiyoyuki KAITO \*\*\*\*・Kiyoshi KOBAYASHI \*\*\*\*\*

### 1. はじめに

道路管理者は、道路利用者に一定レベルのサービスを提供するため、道路の維持管理が重要な課題となっている。しかし、戦後より増え続け、膨大となった道路ストックの増大・老朽化に加え、税収の減少によって予算制約、さらには予算減少されているが、さらなる道路利用者のニーズの高度化など、さまざまな制約条件がある中で、道路構造物は効果的な利用によりユーザーニーズに応えることが求められるとともに、効率的な維持管理が必要となっている。

道路舗装は、安全で快適な走行を行うために必要な表面的な路面性状などの機能と、長期にわたってサービスを提供するための構造的な耐久性が必要とされる。路面の損傷については、路面性状調査の際に観察される指標として、わだちぼれやひび割れ、平坦性などがある。これらの観測された路面の損傷は、わだちぼれや平坦性の低下を観測した場合は表面的な路面の劣化として、またひび割れを観測した場合は路面以下の舗装構造の健全性低下として認識されることが多い<sup>1)</sup>。これらの情報より、技術者により劣化箇所が判断され補修が行われる。こと表層以下の舗装構造の健全度の評価には、破壊試

験であるコア採取や開削試験、もしくは非破壊試験であるFWD試験などで試験を行った後、補修すべき層とそれにあった補修工法が選定され、補修計画が策定される。

一方、舗装の維持管理について、予算の縮減に伴い、これまでの対症療法的な修繕（切削オーバーレイ、打換えなど）ではなく、計画的な予防的維持（シーラー材注入工法など）や耐久性の高い舗装構造に対する必要性が高まっている。ここで挙げる対症療法的な修繕や予防的維持は、舗装表面の劣化や損傷に対し補修材を用いて表層路面の機能を回復させるのみの、いわば一時的な補修であり、構造的な健全度の向上を助長するものではない。この修繕や維持にて一時的に回復した舗装表面の路面性状は、表層以下の層にて発生した劣化によって、劣化サイクルが速くなる。つまり路面の性能は、表層面へのダメージのみならず、基層以下の痛み具合に劣化速度が依存すると言える。

このような背景のもと、本研究では、効率的な維持管理を目指し、補修計画の立案について議論することとする。この中で、既存技術であるベンチマーキングが舗装群の劣化速度の相対評価を行えること、また路面健全度の低下は舗装の構造の健全度低下にも起因することに着目し、ベンチマーク技術を用いて路面以下の層の健全性の評価を行う手法について可能性を述べる。

\*キーワード：アセットマネジメント、ベンチマーキング、異質性、補修工法の選択

\*\*正員、京都大学大学院経営管理教育部  
(京都府 京都市西京区京都大学桂 Cクラスター332  
TEL: 075-383-3224, E-mail: h.mori@hs7.ecs.kyoto-u.ac.jp)

\*\*\*正員、工修、大林道路株式会社 技術研究所  
(東京都清瀬市下清戸4-640 TEL: 042-495-6800,  
E-mail: eigo-fujiwara@obayashi-road.co.jp)

\*\*\*\*正員、博(工)、大阪大学特任講師 大学院工学研究科  
(吹田市山田丘2-1, TEL: 06-6879-7598,  
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp)

\*\*\*\*\*フェロー会員、工博、京都大学大学院経営管理教育部  
(京都府 京都市西京区京都大学桂 Cクラスター332  
TEL: 075-383-3224, E-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)

### 2. 本研究の基本的立場

土木施設の統計的劣化予測モデルとしてマルコフ推移確率モデルが提案されている。特に、マルコフ劣化ハザードモデル<sup>2)</sup>（以下、マルコフ劣化モデルと略記）の開発により、マルコフ推移確率の推定精度や実データへの適用性が飛躍的に向上した。

マルコフ推移確率の推定方法として、1) 集計的推定方法と、2) 非集計的推定方法が存在する。前者の方法は、ある一定の観測期間の中で生じたレーティング間の推移状態に関するデータに基づいて、マルコフ推移確率を直接推定することを目的とする。もっとも単純な算定方法は、レーティング間の推移状態に関する実データの数え上げにより、推移確率

を直接定義する方法<sup>3)</sup>である。これに対して、最尤法により、推移確率を推定する方法<sup>4)</sup>も提案されている。マルコフ推移確率は、推移確率を定義する期間間隔に依存する。現実には、観測されるレーティングデータには、観測期間長が異なる多様なデータが混在している場合が多い。この場合、実データが観測された期間間隔の差異がもたらす影響を補正することが必要となる。杉崎等は、異なる観測期間長を有する目視検査データを用いて、マルコフ推移確率を集計的に推定する方法を提案している<sup>5)</sup>。しかし、このような集計的劣化予測方法では、個々の施設が置かれている使用環境や、施設が有する構造的、機能的特性と推移確率との関係をモデル化できないという限界がある。

これに対して、非集計的推定方法は、個々の土木施設の劣化過程に関する情報に基づいて、その背後にある劣化過程の統計的規則性を推定する方法である。このような非集計的推定方法として、貝戸等<sup>6)</sup>は、ニューヨーク市における橋梁の目視検査データを用いて、橋梁の劣化速度に着目した平均劣化曲線の算出方法を検討している。また、劣化速度を確率変数と捉えて、過去の検査履歴を反映したマルコフ推移確率の推定方法を提案した。その後、非集計的推定方法は、ハザードモデル<sup>7),8)</sup>の適用により、飛躍的な発展を遂げている。その中で、Michalani and Madanat<sup>9)</sup>は、2つの隣接するレーティングのみを対象として、マルコフ推移確率を指数ハザードモデルを用いて表現する方法を提案した。これとは独立に、津田等<sup>2)</sup>は、2つ以上の任意のレーティング間における推移状態を表現する多段階指数ハザードモデルを提案し、マルコフ推移確率を推定する一般的なマルコフ劣化モデルを提案した。その後、マルコフ推移確率が過去の記憶を有する非斉次マルコフ推移確率を推定するための多段階ワイブル劣化ハザードモデル<sup>10)</sup>、異なる劣化パターン間の推移過程を表現する階層型指数劣化ハザードモデル<sup>11)</sup>が提案されている。また、マルコフ推移確率の推定方法に関しては、検査データが非常に少ない段階で、技術者の経験情報と検査結果を結合してマルコフ推移確率を推定するベイズ推定法<sup>12),13)</sup>、予防補修により検査データが欠損することにより発生する欠損バイアスを補正する方法<sup>14)</sup>が提案されている。しかし、これらのハザードモデルは、いずれも確定的なハザード関数を用いており、個別施設に特有なハザード率の異質性を考慮できないという限界がある。このような観点から、貝戸等<sup>15)</sup>はハザード率の異質性を考慮した混合ワイブル劣化ハザードモデルを提案し、交通管制システムのマネジメントに適用している。しかし、そこで

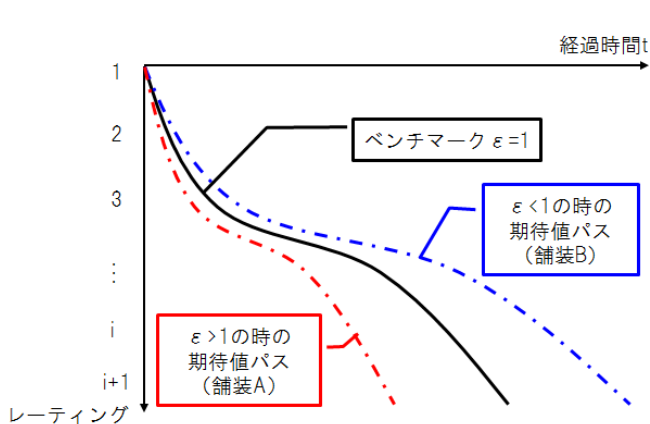
は故障の有無を表す2値変数を用いて、システムの劣化状態を表現しており、複数のレーティングを用いて表現できる劣化速度の異質性を評価できる枠組になっていない。そこで、小濱ら<sup>16)</sup>は、土木施設のベンチマーキング劣化曲線の設定や、劣化速度の相対評価・診断という点に着目し、多段階指数ハザードモデルにおけるハザード率の異質性を考慮した混合マルコフ劣化モデルを定式化するとともに、ベンチマーキング劣化曲線と劣化速度の相対評価指標を作成するための方法論を提案した。このことより、本研究では、既存のベンチマーキングを用いて、補修計画に資する方法論を検討する。

### 3. ベンチマーキングと補修工法の選択

#### (1) ベンチマーキングと相対評価

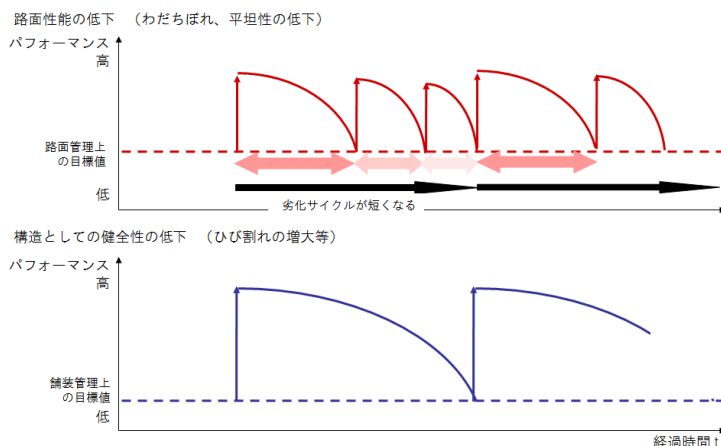
ベンチマーキングにおけるモデルの詳細に関しては、小濱ら<sup>16)</sup>が議論した論文に詳しいが、ここではベンチマーキングによる相対評価について基本的なコンセプトを述べることにする。

いま、土木施設システムを構成する施設・要素群をK個のグループに分類し、各グループの劣化速度を相対評価する問題を考えよう。本研究の実証分析では、舗装群の劣化速度の相対評価問題をとりあげる。その際、個別舗装群単位を1グループと考え、ある1つの舗装群を構成する舗装種別を、同一グループに含まれる要素と位置づける。この場合、舗装種別の劣化速度を各舗装群間で比較する問題は、グループ間の劣化速度を相対評価する問題として定式化できる。このような劣化速度を相対比較する問題は、舗装群以外にも数多くの土木施設に共通して見出すことが可能である。例えば、橋梁における劣化速度を比較する問題も、同様に劣化速度の相対評価問題として定式化できる。このような劣化速度の相対比較を実施する場合、混合マルコフ劣化モデルでは、異質性パラメータの推定値により、劣化速度の相対評価を行うことが可能である。ここでは異質性パラメータ $\epsilon$ を劣化速度の違いを表す確率変数とする。このとき、異なる舗装群の舗装種別の平均的劣化曲線が、時間の関数として図-1に示すように表現できたと考える。比較の対象とする舗装群は、すべて同一の構造・材料特性、使用条件を有していると考えられる。同図において実線で描かれた平均的劣化曲線は、対象とする舗装群の平均的な劣化曲線を表している。この平均的な劣化曲線より下方に位置する舗装群Aは、平均的劣化曲線より劣化速度が速い



注) 実線は $\epsilon = 1$ の場合と対応しており、ベンチマーキング劣化曲線を表す。これより下方に位置する劣化曲線は平均より劣化進行が早く、上方の場合は劣化進行が遅いことを意味する。

図-1 ベンチマーキングと相対評価



注) 路面性能は舗装構造の健全性低下より劣化サイクルが早く、その都度補修することでその機能を回復する。また、舗装の構造の健全性低下に伴い、路面性能の劣化サイクルは速くなる。

図-2 舗装の劣化パターン

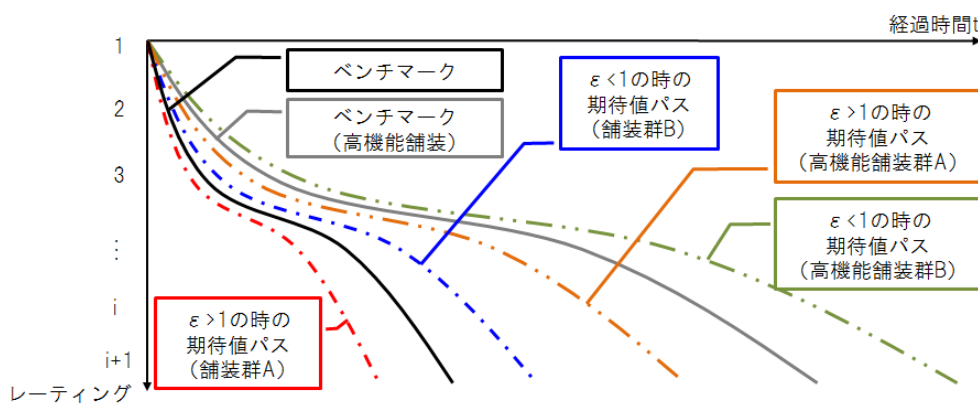


図-3 舗装機能の違いによるベンチマークと各異質性パラメータの期待値パス

は、異質性パラメータが $\epsilon = 1$ となる。また、 $\epsilon > 1$ の場合、ベンチマーク劣化曲線より劣化速度が速く、 $\epsilon < 1$ の場合は、劣化速度が遅いと評価することができる。同図の舗装群Aでは、劣化曲線がベンチマーク劣化曲線より下方に位置しており、劣化速度が相対的に早いと判断できる。このように他の同じような舗装群よりも、劣化速度が相当程度大きいことが判明した場合、劣化の進行が早い理由に関して究明することが必要となる。一方、舗装群Bは、劣化曲線がベンチマーク劣化曲線より上方に位置している。このように、混合マルコフ劣化モデルを用いて、個々の舗装群の劣化速度を相対評価することにより、道路ネットワークにおける舗装のアセットマネジメントの高度化のための有用な情報を提供することが可能となる。なお、以上では、同一の道路種別・特性性を持つ舗装を対象とした劣化速度の相対評価問題と評価できる。逆に、上方に位置する舗装群Bは、劣化速度が遅いと評価できよう。平均的な劣化曲線は、舗装群の劣化速度の大小関係を評価するための基準

となる劣化曲線であり、本研究ではベンチマーク劣化曲線と呼ぶこととする。混合マルコフ劣化モデルを用いれば、同一特性を有する舗装群の劣化速度の違いを、異質パラメータを用いて表現することができる。このうち、ベンチマーク劣化曲線では、異質をとりあげた。しかし、異質性パラメータを導入した混合マルコフ劣化モデルを用いることにより、道路種別・特性や、使用条件が異なる異質な舗装群の劣化速度を比較することも可能になるという利点がある。したがって、本モデルを用いることにより、異なるタイプの舗装で構成される舗装群に対して、個々のタイプの舗装の劣化過程に関するベンチマーク劣化曲線を設定し、劣化速度を相対的に検討するための相対評価モデルを開発することが可能となる。

## (2) 相対評価と舗装構造の関連性

舗装は建設後、供用され交通荷重などにより性能が低下していく。舗装の性能指標には、様々なものが考えられるが、ひび割れ率等の舗装の構造としての健全性を評

価する指標、わだち掘れ量や平坦性等の状態（または、その性能により影響を受ける道路利用者の安全性・快適性等）を評価する指標が代表的なものであり、このほか、排水性舗装等における透水性を評価する浸透水量などがある。

舗装の性能が一定レベルまで低下した時、建設当時の性能を回復する、あるいは低下した性能を改善するため、補修・再構築などを実施することになる。この補修・再構築が必要となる舗装の性能のレベルのことを管理水準上の目標として表記している（図-2）。舗装の劣化過程を、1) 路面性状の低下、2) 舗装の構造としての健全性の低下、に大別して考えると、路面性能は舗装の構造の健全性低下より劣化サイクルが早く、その都度補修することでその機能を回復する。また、舗装の構造の健全性低下に伴い、路面性能の劣化サイクルは速くなる。一方、前述の通りベンチマーキングによる舗装の劣化相対評価は、各舗装群の相対評価を行うことを目的としてモデル化されており、表層における路面の機能が同じであった場合、路面性能の低下の速度は舗装の構造の健全性の低下に依存していることが考えられる。これは高機能（高規格）にて設計した舗装においても同じであると考えられる（図-3）。

#### 4. おわりに

本研究では、ベンチマーキングが舗装群の劣化速度の相対評価を行えること、および路面健全度の低下は、舗装の構造の健全度低下に由来することに着目し、ベンチマーク技術を用いて舗装構造の健全性の評価を行う手法について可能性を示した。このことを証明するために、舗装構造の健全度を評価するため、一般的に使用されているFWD試験等の試験方法を用い、現地にて社会実験を行う必要がある。

また、今後補修計画を立案するため、最適な補修工法の選択について考える必要があるが、管理上の目標値の設定の仕方についてはさまざまな方法が考えられる。代表的な例としては、舗装の構造としての健全度の観点から設定する方法、路面の状態の観点から設定する方法、ライフサイクルコストの最小化の観点より設定する方法などである。これらの方法から、最適な構造試験の選定と補修工法の選択について補修工法の選択について問題点を精査し、一括した方法論として提唱する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 舗装設計便覧，社団法人日本道路協会，2006.
- 2) 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.

- 3) 保田敬，小林潔司：BMS における点検結果と状態推移確率が LCC に及ぼす影響，建設マネジメント論文集，Vol.11，pp.111-122，2004..
- 4) Lee, T.C., Judge, G.G. and Zellner, A.: Estimating the Parameters of the Markov Probability Model from Aggregate Time Series Data, Amsterdam, North-Holland, 1970.
- 5) 杉崎光一，貝戸清之，小林潔司：目視検査周期の不均一性を考慮した統計的劣化予測手法の構築，構造工学論文集，Vol.52A，pp.781-790，2006.
- 6) 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..
- 7) Lancaster, T.: The Econometric Analysis of Transition Data, Cambridge University Press, 1990.
- 8) Gourieroux, C.: Econometrics of Qualitative Dependent Variables, Cambridge University Press, 2000.
- 9) Mishalani, R. and Madanat S.: Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models, *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, Vol.8, No.4, 2002.
- 10) 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.
- 11) 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，pp.386-402，2007.
- 12) 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定法，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2006.
- 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法，土木学会論文集 A，Vol.63，No.2，pp.336-355，2007.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.