

# 道路舗装のハザード率とライフサイクル費用のベンチマーキング評価\*

## Bench-Marking Evaluation of Hazard Rate and Life Cycle Cost for Pavement Management\*

青木一也\*\*・熊田一彦\*\*\*・江口利幸\*\*\*・貝戸清之\*\*\*\*・小林潔司\*\*\*\*\*

By Kazuya AOKI\*\*・Kazuhiko KUMADA\*\*\*・Masayuki EGUCHI\*\*\*・

Kiyoyuki KAITO\*\*\*\* and Kiyoshi KOBAYASHI\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

企業の経営管理手法の一つにベンチマーキングという手法がある。そのプロセスは、①自社の現行の業務を定量的に評価する、②経営や業務プロセスが優れている他社の業務（ベスト・プラクティス）を探求し、同様に評価する、③自社との乖離を把握するとともに、その乖離を埋めるために業務内容を継続的に改善する、というものである。ベンチマーキングは、単なる業務成果の比較を行うことではなく、それを定量的な指標で示し、業務の目標を明確化するとともに、ベスト・プラクティスを継続的かつ体系的に探求し導入を試みることを目的としている。このベンチマーキングにおけるベスト・プラクティスの考え方そのものは新しいものではないが、1990年代以降、急速に企業のパラダイムシフトへの対応策として取り入れられた。

一方、インフラ資産の合理的な維持管理のための新たな手法として、アセットマネジメントの考え方が浸透しつつある。まず、インフラ資産の状態を長期的に維持し、サービスの提供を継続するために必要な事業費を算出し、その事業費を調達することが当面の課題となる。特に道路舗装の場合は、路面の劣化状態を定量的に把握するための点検技術が早くに確立されており、他施設に比べて、アセットマネジメントの分析に必要な豊富なデータが利用しやすい環境にある。それに加え、劣化予測モデルやライフサイクル費用分析、最適補修モデル等が開発され、それらが実用化の域に達している。

インフラ資産のアセットマネジメントでは、点検や補修のタイミングを合理化することで、トータルコスト

を低減できる可能性がある。たとえば、橋梁の例では、事後的補修に比べ予防的補修によるライフサイクル費用の低減効果が実証的に示されている。しかしながら、このような点検や補修のタイミングを合理化することにより縮減されるコストの幅には限界がある。将来時点の補修費用は、対象とする施設の劣化速度に依存する。また、道路舗装の場合、その劣化速度は交通量や舗装構造などの観測可能な要因だけでなく、施工条件や気象条件などのような観測が容易でない要因に大きく影響を受ける。このため、舗装区間個々によって劣化速度のばらつきが極めて大きい。

道路舗装の維持管理業務において、その目標を舗装の長寿命化とした場合、過去の点検データを用いた統計的劣化予測モデルが、舗装の維持管理業務を定量的に計測する対象となる。舗装区間個々に対して推計した劣化予測モデルの結果を相対比較することで、劣化速度が遅い舗装区間の維持管理業務をベストプラクティスとし、一方で劣化速度が著しく速い箇所をベンチマーキングの評価対象区間として、その舗装区間の維持管理業務の体系を見直し、劣化速度を改善するための方法を追求する。その結果、当該区間の劣化速度を改善させることにより、是全体の劣化パフォーマンスが改善され、トータルコストの縮減が達成される。これらの継続的な実践こそ、アセットマネジメントにおけるベンチマーキング評価であり、アセットマネジメントの次世代において取り組むべき大きな課題のひとつと言えよう。

このような問題意識のもと、本研究は道路舗装の劣化予測モデルを用いたハザード率とライフサイクル費用のベンチマーキング評価の方法を提案する。道路舗装の劣化過程は多様な不確実性を含んでおり、交通量等の観測可能な要因の他、施工条件といった不可観測要因による影響を受ける。さらには、舗装路面の損傷形態別にこれらの要因の影響度が異なる。本研究では、観測可能な劣化要因を特定化し平均的な劣化曲線を推計するとともに、道路個々の劣化の異質性を含んだハザード率を算出し、劣化特性の相対評価を行い、道路舗装の維持管理を実施しているセクション別の平均的な劣化のパフォーマンスカーブを推計する。さらに、道路舗装の費用効率性

\*キーワード：維持管理、道路舗装、ベンチマーキング

\*\* 正員 博（工） 株式会社パスコ研究開発センター  
（東京都目黒区東山2-8-11, TEL 03-3715-4011）

\*\*\* 正員 株式会社高速道路総合技術研究所道路研究部

\*\*\*\* 正員 博（工） 大阪大学大学院工学研究科 グローバル  
若手研究者フロンティア研究拠点

\*\*\*\*\* フェロー 工博 京都大学経営管理大学院経営管理講座

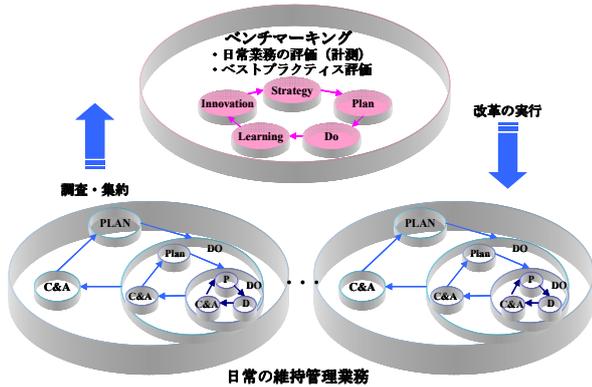


図-1 ベンチマーキングの全体概念図

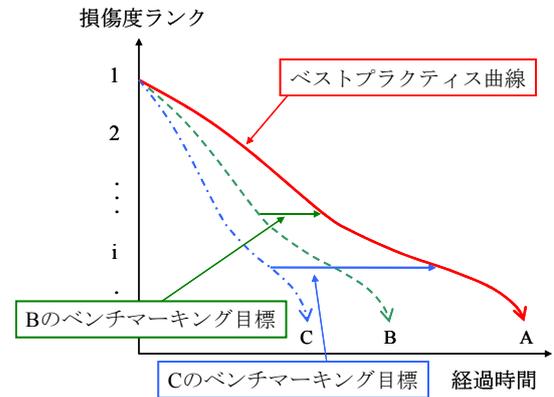


図-2 劣化速度とベンチマーキング

を評価するために、セクション別の道路舗装に投資した実績データをもとに、劣化速度の固体誤差を考慮したライフサイクル費用分析を実施し、所与のサービスレベルを満足するためのライフサイクル費用を平均費用として算出し、セクション間の相対評価を行う。適用事例では、全国的高速道路を対象とした提案手法による分析を試みる。以下、2. では本研究の基本的な考え方、3. にて劣化パフォーマンスカーブの推計方法、4. にてライフサイクル費用のベンチマーク評価方法、5. では本研究で提案した手法の適用範囲拡大の可能性について論じる。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 従来研究概要

インフラ資産のアセットマネジメントに関する研究及び実務での適用事例が数多く報告されている。ライフサイクル評価を行うためには、将来時点における施設の補修需要を正確に把握することが求められることから、維持管理データを用いた統計的劣化予測モデルを推計する技術が開発された。さらに、劣化予測モデルを用いてライフサイクル費用評価や最適補修モデル等が開発され、長期的な予算計画を客観的な手法により立案することが可能となった。これら一連の流れをアセットマネジメントの第一世代と称することができる。第一世代では、計画を立案する際に推計した劣化予測モデルを条件として、将来時点にてその劣化予測モデルに従って施設が劣化するものと仮定することで、将来の維持管理業務のプロセスを改善する計画を立案する。その後は、計画立案に用いた劣化予測モデルが正しかったかどうかの検証に着目しがちである。無論、劣化予測モデルの精度は、アセットマネジメントの各アウトプットに大きく影響を及ぼすものであるから、その推計精度を逐次見直し、精度向上を図る必要性を無視することはできない。しかし、日々の業務プロセスの改善によって施設の長寿命化を達成することがアセットマネジメントの目的と考えたとき、過

去の劣化パフォーマンスは業務プロセスに依存して変化するものであり、そのパフォーマンスカーブを維持管理業務のアウトプットとしてみることもできる。この場合、常に劣化予測モデルの推計精度を追及することよりも、劣化パフォーマンスカーブによって施設の長寿命化の達成状況を定量的に評価することによって、コスト縮減に寄与する影響が大きいことに着目すべきである。

### (2) アセットマネジメントとベンチマーキング

施設全体の劣化パフォーマンスカーブを長寿命化へシフトさせるためには、維持管理業務の実施単位によって対象施設の範囲を細分化し、個々のセクションに属する施設の劣化速度の異質性を評価する。そのうえで、劣化速度の相対評価によって、劣化速度が著しく速く、業務プロセスを改善する対象となるセクションを抽出するとともに、供用条件等の同一環境下におけるベスト・プラクティスを探求する。ベンチマーキングによる改善対象セクションは、維持管理の新たな手法を取り入れることにより、劣化速度をベスト・プラクティスに近づけ、または超越するようなパフォーマンスを達成することを目標とする。次に新たな手法を導入した業務の結果を計測するためのモニタリング調査を行い、新たな維持管理に関するデータを取得し、劣化パフォーマンスを推計し、劣化速度の異質性を評価する。劣化パフォーマンスカーブの相対評価により、新たに業務改善の対象となるセクションが抽出され、それに対してベンチマーキングを適用する。このように、継続して維持管理業務の成果をモニタリングし、逐次、ベンチマーキングを実行することで、施設全体の長寿命化という目標を目指すこととなる。これらの一連の取り組みをアセットマネジメントにおけるベンチマーキングと称し、第一世代後の、次世代のアセットマネジメントにおける新たな研究課題として取り上げる。以下、ベンチマーキングを実行するために、維持管理業務の成果を計測するための、劣化パフォーマンスの推計方法について説明する。

### 3. 劣化パフォーマンスカーブの推計

#### (1) 劣化ハザード率の推計

道路舗装の維持管理データを用いて推計される、劣化パフォーマンスカーブを劣化ハザード率によって表現する方法を簡単に説明する。

道路舗装の劣化速度に影響を及ぼす観測可能な指標として、1) 舗装種別、2) 道路構造、3) 交通量の3種類の説明変数を取り上げる。同一舗装区間に対して、過去に複数回の点検が実施されたときの損傷度と点検の時間間隔、及び説明変数の組み合わせを1サンプルとしたデータベースを作成し、多段階指数ハザードモデルを推計する(推計方法の詳細は、参考文献1)を参照)。このとき、指数ハザードモデルの未知パラメータ $\theta_i$ は、観測可能な説明変数と未知パラメータの組み合わせにより、

$$\theta_i = \mathbf{x}\beta'_i \quad (1)$$

として表現する。ここに、 $\mathbf{x}$ を説明変数による特性ベクトル、 $\beta_i = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,M})$ は未知パラメータ $\beta_{i,m}$  ( $m = 1, \dots, M$ )による行ベクトルである。これにより、健全度別に劣化速度の違いを評価することが可能である。

しかし、指数ハザードモデルのハザードパラメータに説明変数として与える方法では、説明変数の組み合わせが多くなり、組み合わせ間にてサンプル数に大きな偏りが生じることによって推計精度が悪化することがこれまでの実証事例で判明している。推計データベースの一次分析等をもとに、採用可能な説明変数の組み合わせを決定し、それに対応した未知パラメータを、多段階指数ハザードモデルにより求める。一方、説明変数の組み合わせとして採用されない、サンプルデータが少ないセクションに関する劣化ハザード率は、平均的な劣化曲線からの乖離度を示す異質性パラメータ $\varepsilon$ を用いて、

$$\theta_i = \tilde{\theta}_i \varepsilon \quad (2)$$

と、混合指数ハザードモデルとして表すことができる。ここに、 $\tilde{\theta}_i$ は、全サンプルデータをプールしたデータベースを対象に推計した平均的な劣化曲線のハザード率である。この異質性パラメータ $\varepsilon$ の大小によって、劣化速度を評価することができる。この混合指数ハザードモデルの詳細と推計方法については、参考文献2)を参照してほしい。

なお、高速道路のように道路舗装の管理基準値が高く、補修の頻度が高い場合には、補修によって推計サンプルが欠損することにより、劣化速度の推計結果にバイアスが生じる場合がある。この場合、サンプルの欠損率

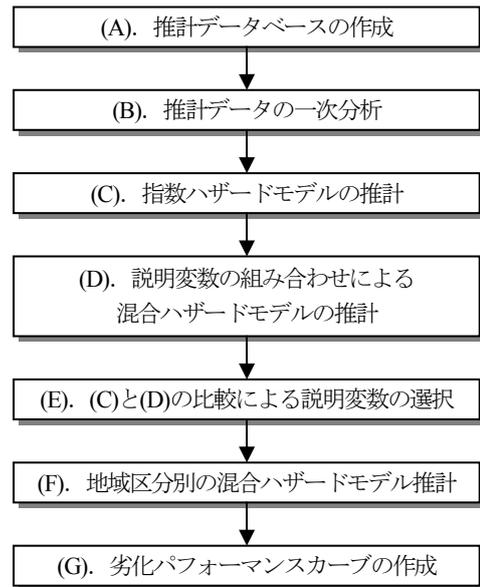


図-3 劣化パフォーマンスの推計手順

によってハザード率を修正することが必要である。このサンプル欠損を考慮した劣化予測モデルの推計方法については、参考文献3)に詳しく解説している。

#### (2) 劣化パフォーマンスカーブの推計手順

以上のような劣化ハザード率を推計する方法を組み合わせることにより、劣化パフォーマンスカーブを推計する。推計手順を図-3に示す。

まず、多段階指数ハザードの説明変数に採用する特性ベクトルの組み合わせを決定する。基本的には、観測可能な要因は説明変数として組み込む。この際、説明変数の増加による推計精度の低下を防ぐために、推計サンプルの一次分析や、説明変数間の相関分析等により、最適な組み合わせを決定する。あるいは、平均的な劣化曲線から著しく劣化速度が乖離しているセクションを示す説明変数は対象から除外する。例えば、高速道路の舗装では、コンクリート舗装とトンネル内舗装は相関が強く、さらに劣化速度が著しく遅いほうにかけ離れている。このようなあらかじめ明らかな知識を用いて説明変数の組み合わせを決定する。このように、劣化パフォーマンスカーブの推計には、土木技術者の経験や知識等のヒューリスティクスを時折考慮する必要がある。

次に、説明変数によって考慮できなかった要因や、その他の不可観測要因による劣化速度の異質性パラメータを、混合指数ハザードモデルにより推計する。この際、推計対象の全舗装区間を、異質性パラメータ $\varepsilon$ の評価単位のセクションに分割する。混合指数ハザードモデルの推計により、セクション間における劣化速度の分散度合いについても評価することが可能である。

#### 4. ライフサイクル費用のベンチマーキング評価

劣化パフォーマンスカーブの相対比較によって、ベンチマーキング評価が可能となる。しかし、あるサービスレベルを維持するために過去に投資した補修事業費に差が生じている場合、その差が劣化速度に影響を及ぼしている可能性を否定できない。そこで、劣化パフォーマンスカーブと補修単価をもとに、所与のサービスレベルを維持するために必要なライフサイクル費用を算出し、ライフサイクル費用の相対評価によるベンチマーキングを実施する。

道路舗装のサービス水準は、路面の損傷度合いによって評価され、その指標は、1) ひびわれ、2) わだち掘れ、3) IRIの3つの指標が独立に定義される。劣化予測モデルについては、これらの指標毎に3つのモデルを推計する。道路舗装のライフサイクル費用は平均費用法により算出可能である。しかし、3つの損傷を用いて複雑なサービス水準を設定する場合、解析的なライフサイクル費用評価が煩雑になるケースも考えられる。その場合は、モンテカルロ・シミュレーションにより劣化パスを複数発生させ、その期待値によりライフサイクル費用として算出することができる。これらのライフサイクル費用評価の方法については、参考文献4)-5)を参照してほしい。

#### 5. 適用範囲の拡張

本来のベンチマーキングの目的を達成するためには、長寿命化を達成しているベスト・プラクティスを探索し、その業務プロセスの適用の評価を加える必要がある。例えば、道路舗装の場合は、従来用いていた補修工法や材料から、新工法・新材料を用いた試験施工に変更し、その後のパフォーマンスをモニタリングし、劣化速度が改善された新工法・新材料の適用範囲を拡大する。このように、維持管理業務における新たな技術が日々開発される場合には、既存の業務プロセスの他、試験施工を通じて評価された新工法・新材料等の適用といったベスト・プラクティスが採用される場合がある。

アセットマネジメントのベンチマーキングは、維持管理業務におけるベスト・プラクティスを探求することである。毎年実施される維持管理業務のなかから、最高のパフォーマンスを提供する業務に関する情報を必要とする。そのためには数多くの維持管理業務に関する情報が必要となる。例えば、道路舗装のアセットマネジメントの場合、路面の補修工事とその後の劣化パフォーマンスに関する「ナレッジ」が必要となる。しかしながら、舗装の耐久性を20年と考えた場合、当該箇所に対して補修が行われるのは、平均で20年に一度である。また、前

述したように舗装の劣化過程には多様な不確実性を含んでおり、その供用環境は様々である。同一の環境下にある状況のベスト・プラクティスを探求するためには、その探求範囲を拡大し、たくさんのプラクティスに関するナレッジを獲得しなければならない。そのためには、ある事務所内といった限られた範囲でのベンチマーキング（インターナル・ベンチマーキング）とするのではなく、事務所外の情報を幅広く集約したベンチマーキング（エクスターナル・ベンチマーキング）を行うことが望ましい。とりわけ、自治体等が管理する道路舗装のアセットマネジメントでは、舗装の管理延長が膨大な量に及ぶ自治体であっても、路面の補修を実施する年間件数は極めて少ない。この場合、自治体内のみの情報をもとにしたベンチマーキングでは、ベスト・プラクティスの追及に莫大な時間がかかることとなり、現実的ではない。アセットマネジメントの自治体間を越えた維持管理に関するナレッジを蓄積し、ベンチマーキングの実行が可能となるような仕組みづくりが今後の課題となる。

#### 6. おわりに

本研究は、次世代のアセットマネジメントの課題の一つとして、維持管理業務のベンチマーキングを取り上げ、ベンチマーキング評価のための維持管理業務の計測方法と今後の課題について述べた。また、具体的には高速道路の舗装管理業務を取り上げ、維持管理データを用いた劣化ハザード率及び劣化パフォーマンスカーブの推計方法について述べ、さらにはライフサイクル費用分析により費用効率性の観点からベンチマーキング評価を行う方法について述べた。なお、高速道路の維持管理データを用いた適用事例については、発表時に報告させていただきたい。

#### 参考文献

- 1) 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.80 1/I-73, pp.69-82, 2005
- 2) 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, 2008.11
- 3) 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, pp1-15, 2007.
- 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.80 1/I-73, pp.83-96, 2005.10
- 5) 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, 2006.9