

予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルール*

THE REPAIRING RULES FOR PAVEMENTS UNDER BUDGET CONSTRAINTS^{*}

田村謙介**・慈道充***・小林潔司****

by Kensuke TAMURA**, Mitsuru JIDOU*** and Kiyoshi KOBAYASHI****

1. はじめに

道路舗装の修繕投資は、利用者費用を含むライフサイクル費用が最小になるタイミングで行われることが望ましい。近年導入されてきている舗装管理システム(Pavement Management System:PMS)ではライフサイクル費用を最小にするように舗装の設計、維持修繕を行うことを理想としている¹⁾。このような視点から、筆者らは単一の道路区間を対象として道路舗装の劣化過程の不確実性を考慮した最適修繕ルールを求める方法論を提案した²⁾。しかし、この方法論は修繕予算を自由に調達できるという条件の下で開発されたものである。

現実には、道路管理者は限られた予算の中で、極めて多くの道路区間の舗装を管理している。多くの舗装管理システムでは、各年度の予算制約の中で優先順位の高い区間から修繕を行うという方法が取られており、必ずしもライフサイクル費用の最小化が達成されているわけではない。道路舗装の劣化過程には多大な不確実性が含まれている。したがって、道路網全体における道路舗装の劣化過程を観察しながら、ライフサイクル費用の低減化に資するように各年度の道路舗装の修繕順序を決定するような実用的なルールを策定することが必要となる。

財政基盤の縮小や道路ストックの増大を背景として、新規道路事業や道路舗装の修繕予算が大幅に増加することは期待できない。しかし、必要な道路舗装の修繕予算が確保できないと、利用者費用を含むライフサイクル費用は増大する。ライフサイクル費用を最小にするためにはどれだけの修繕予算が必要であるか、あるいは必要な修繕予算が確保できなかった場合にどれだけのライフサイクル費用の損失が生じるかを合理的な方法で定量化する必要があると考えられる。

本研究は、舗装管理システムの設計を念頭におきながら、道路舗装の合理的な修繕順位を決定する実用的な

ルールを開発することを目的とする。そのため、まず修繕予算が十分にある場合を想定し、ライフサイクル費用を最小にするような道路舗装の最適修繕タイミングを決定するモデルを提案する。その上で、修繕予算制約の中で、ライフサイクル費用を可能な限り小さくしうるような修繕順位を決定する実用的な方法を提案する。以下、2. では本研究の基本的な考え方を説明する。3. では、単一道路区間ににおける舗装の期待ライフサイクル費用を最小にするような最適修繕ルールの決定方法を述べる。4. では、予算制約下における道路網の実用的な修繕ルールを提案する。5. で三重県を対象とした舗装修繕管理システムを構築する。6. で舗装修繕管理システムを用いた政策実験の結果を示す。

2. 本研究の考え方

(1) 従来の研究概要

1970年代以降、道路舗装のライフサイクル費用の低減化をめざした舗装管理システム(PMS)に関する研究が蓄積された¹⁾⁻⁴⁾。PMSには道路舗装の維持修繕マネジメントを対象とした維持修繕管理システム(MMS)が含まれるが、それはネットワークレベル、プロジェクトレベルの修繕管理システムで構成される。前者は修繕の必要な候補区間を抽出し、修繕の実施の優先順位を付け、限られた修繕予算の制約の中で効率的に修繕個所の選択を行うことを目的としている。後者は個々の工区の修繕方法を求める目的としている⁵⁾⁻⁹⁾。MMSの最終的な目的は道路舗装の劣化過程の予測に基づき利用者費用を含めたライフサイクル費用を最小にするような修繕戦略を求めることがある。しかし、実用化された多くのMMSでは道路舗装の劣化過程に介在する不確実性が考慮されておらず、定期的な修繕間隔(確定的修繕戦略)を求めるにとどまっている。また、ライフサイクル費用の低減化も明示的には図られていない。

道路舗装の修繕モデルに関しては、いくつかの研究事例がある。たとえば、機能水準を確定的に扱い修繕費用の平準化をめざした修繕計画モデル¹⁰⁾や施設需要との関連性を定式化した最適修繕モデル^{11),12)}が提案されている。しかし、そこでは施設需要は確定的に取り扱われ

*キーワード：土木施設維持管理、公共事業評価法

**正会員 工修 日本ユニシス(株) 金融システム開発部
(〒135-0061 東京都江東区豊洲1-1-1 TEL 03-5546-5412)

***正会員 理修 中央復建コンサルタント(株) 計画系グループ
(〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10 TEL 06-6160-4140
· FAX 06-6160-12302)

****フェロー会員 工博 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL · FAX 075-753-5071)

ている。現実の舗装の劣化過程には多大な不確実性が存在し、あらかじめ将来の修繕時期を確定的に予測することは不可能である。むしろ、その時々の道路舗装の劣化水準を観測しながら修繕を実施すべきかどうかを決定する状況依存的な修繕ルールを設計することが望ましい。このような観点から、マルコフ決定過程を用いて道路舗装の劣化過程の不確実性を考慮した最適修繕モデルが提案されている^{13),14)}。マルコフ過程を用いて実用的な最適修繕モデルを作成しようとすれば推移行列が膨大となり操作上問題が生じる。これに対して、栗野等はファイナンス工学的手法を用いて修繕ルールを提案する方法を提案している¹⁵⁾。さらに、著者らは道路舗装の修繕問題を対象として、モンテカルロシミュレーションにより最適修繕ルールを導出する方法を提案している²⁾。しかし、そこではある単一の道路区間における舗装の修繕問題をとりあげており、道路管理者が管理する道路網全体の修繕問題をとりあげているわけではない。現実の舗装修繕マネジメントを設計するためには、予算制約の下で、道路網全体の舗装に関するライフサイクル費用を可能な限り低減させるような修繕ルールを設計することが必要となる。さらに、長期的な視点から道路舗装の品質水準を適切な水準に維持するために必要となる予算水準を求めることが重要な課題となる。以上の問題意識のもとに、本研究ではライフサイクル費用の低減化が達成できるような予算水準や道路舗装の修繕ルールを求めるための方針を提案する。

(2) 舗装修繕管理システム

本研究では舗装管理システムの中核的な部分を構成するMMS(舗装修繕管理システム)を提案する。本研究の対象とするMMSの全体構成を図-1に示している。MMSは、1) 対象道路網における各区間の道路舗装の状況を記録するデータベースシステム、2) 道路舗装の劣化プロセスを推定する劣化推定システム、3) 劣化水準の予測値に基づいて修繕区間の優先順位を決定する修繕箇所選定システムにより構成される。データベースシステムは道路舗装の管理台帳をデータベース化したものである¹⁶⁾。データベースは各道路区間の舗装に関する技術的状況、過去の修繕実績、修繕費用、当該年度の舗装水準(ひび割れ率、轍ぼれ量、平坦性等)、交通量等を記録する。さらに、劣化水準の予測、舗装の実地点検による観測値、修繕工事による機能回復という新しい追加情報に基づいて各道路区間の舗装水準データは逐次更新されることになる。道路舗装の機能劣化は不確実なプロセスであり、将来時点の劣化水準を確定的に予測することは不可能である。実地点検による観測値が得られれば、その時点の機能水準を把握することができる。しかし、舗装の実地点検はあらかじめ決められた時間間隔で実施

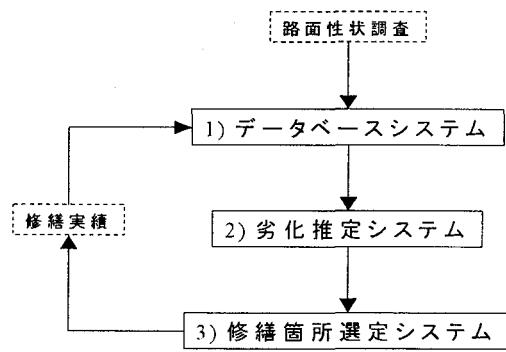


図-1 舗装修繕管理システムの全体構成

される場合が多く、機能水準の観測値が常に得られているわけではない。したがって、過去の観測値の結果に基づいて現時点における機能水準を推計する必要がある。本研究ではこのような機能水準の推計を劣化プロセスの期待値パスを用いて行う方法を提案する。修繕箇所選定システムは、各年度における道路舗装の機能水準の推計結果に基づいて、年度内に修繕が必要となる道路区間をリストアップするとともに修繕区間の優先順位を設定するシステムである。当該年度の予算制約の範囲の中で当該年度において実施可能な修繕対象箇所が選定される。修繕工事の実績はデータベースに記述される。

(3) 舗装機能水準の長期的維持可能性

本研究で提案する舗装修繕管理システムを運用するにあたり、道路舗装の修繕予算が重要な政策パラメータとなる。特に、道路網全体の舗装機能水準を長期的に維持しつつ、期待ライフサイクル費用を可能な限り低減化するような予算水準を求めることが重要な課題である。いま、道路舗装の修繕プロセスが長期的に繰り返され、道路網全体の劣化プロセスが定常的な状態に到達した状況を想定しよう。その間、新規道路整備が行われないとしよう。さらに、道路網の修繕予算は各年度を通じてある一定額に固定されるとする。この場合、以下の2つのケースが生じうる。修繕予算が極端に少ない場合、修繕工事が翌年度以降に持ち越される箇所が累積的に増加する。この場合、道路網全体の機能水準を長期にわたって維持することはできない。逆に、ある水準以上の予算が確保されれば、道路網全体の舗装の機能水準をある一定の水準に長期的に維持することができる。本研究では、長期にわたって道路網の機能水準をある一定のレベルに維持できるような予算を「維持可能予算」と呼ぶこととする。さらに、維持可能予算の中で長期的なライフサイクル費用を可能な限り小さくするような予算水準を最適維持可能予算と呼ぶこととする。本研究で提案する舗装修繕管理システムの1つの目的は、舗装修繕予算、

期待ライフサイクル費用、及び道路舗装の長期的な維持機能水準の関係を分析することにある。

3. 最適修繕モデル

(1) モデル化の前提

本研究で用いるモデルは基本的には筆者らによる単一道路区間を対象とした最適舗装修繕モデルを道路区間全体に拡張したものである。モデルの前提条件や定式化の詳細は参考文献²⁾に譲るが、読者の便宜を図るために最適舗装修繕モデルを簡単に紹介しておこう。道路管理者は初期時点から無限に続く時間軸上で n 個の管理区間の舗装の機能水準と交通需要を観測しながら、舗装の機能水準を回復するために修繕を行う。舗装の劣化が進展すれば、燃費の増加、車体の劣化損傷等、利用者費用が増加する。道路舗装の機能水準の低下は交通需要に影響を及ぼさないと仮定しよう。交通需要は外生的に与えられる不確実性のため、定常的な確率過程に従って変動すると仮定する。また、道路舗装の機能水準は交通需要や自然的劣化により時間を通じて低下する。道路舗装の劣化過程は累積交通量、自然的劣化という2種類の不確実性に直面する。道路管理者は不確実な劣化過程を考慮しながら利用者費用と修繕費用で構成される期待ライフサイクル費用を最小にするような舗装の修繕戦略を求める。

(2) 劣化過程のモデル化

各道路区間 i ($i = 1, 2, \dots, n$) の初期時点から時刻 t までの累積交通需要を $s_i(t)$ と表す。累積需要は伊藤過程

$$ds_i(t) = \beta_i dt + \sigma_{i1} dW_{i1}(t) + \dots + \sigma_{in} dW_{in}(t) \quad (1)$$

に従うと考える。ここで $W_{i1}(t), \dots, W_{in}(t)$ は互いに独立なウィナー過程である¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。複数のウィナー項により各道路区間の交通需要の確率的相関を表現する。微小期間 $[t, t + dt]$ における交通需要は $ds_i(t)$ と表される。

次に、道路区間 i の舗装の機能水準の修繕過程をモデル化しよう。道路舗装の機能水準を一次元的に表すパラメータ z_i が、区間 $[0, Z]$ で定義されているとする。道路舗装の修繕投資が時刻 $0 \leq \theta_{i1} < \theta_{i2} < \dots < \theta_{ij} < \dots$ において実施され、機能水準が所与の値 \bar{Z}_i ($\leq Z$) に改善されると考える。修繕投資直前の機能水準を $z_i(\theta_{ij})$ と表す。以上のような修繕投資が行われる場合、道路区間 i の舗装の機能水準は確率過程

$$\begin{aligned} dz_i(t) &= -\rho_i ds_i(t) - \delta_i dt - \eta_i dq_i(t) \\ &+ \sum_{j \geq 1}^{\infty} \{\bar{Z}_i - z_i(\theta_{ij})\} \iota(t - \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$dq_i(t) = \begin{cases} u_i & (\text{確率 } \lambda_i dt) \\ 0 & (\text{確率 } 1 - \lambda_i dt) \end{cases} \quad (2b)$$

に従うと仮定できる。 $\iota(\cdot)$ はディラックの測度 (Dirac measure) であり、 $t = \theta_{ij}$ の時にのみ確率測度 1 を、そ

れ以外の時は確率測度 0 を与える。右辺第1項は交通需要による劣化、第2項は自然的劣化のトレンド、第3項は自然的劣化による不確実性を表している。第3項は強度が λ_i 、ジャンプの大きさが $\eta_i u_i$ のポアソン過程を示す。 $\ln u_i$ は正規分布 $N[\mu, \sigma^2]$ に従う確率変数である。最終項は修繕による舗装機能水準の回復効果を表す。なお、時刻 $t = 0$ における確率過程 (1)、(2a) の初期値を次式で定義する。

$$s_i(0) = s_{i,0}, \quad z_i(0) = z_{i,0} \quad (3)$$

(3) 最適修繕問題

修繕予算が十分にある場合、各道路区間の修繕ルールは他の道路区間の修繕ルールに影響を及ぼさない。したがって、道路管理者は期待ライフサイクル費用が最小になるように各道路区間の修繕を行うことにより、管理道路全体のライフサイクル費用を最小化できる。各区間のライフサイクル費用は利用者費用と修繕費用で構成される。区間 i の機能水準が z_i の時の利用者 1 台により生じる当該区間ににおける利用者費用を $c_i(z_i)$ と表す。よって、期間 $[t, t + dt]$ における区間 i の利用者費用は $c_i(z_i(t))ds_i(t)$ と表される。一方、時刻 θ_{ij} において機能水準が $z_i(\theta_{ij})$ である道路に対して修繕投資により機能水準を \bar{Z}_i まで改善する場合を考えよう。オーバーレイ、切削オーバーレイ、打ち換え等の修繕工法のうち、修繕直前の機能水準 $z_i(\theta_{ij})$ により修繕工法が決定されるとする。さらに、1つの工法については z_i の値いかんに問わらず修繕費用が一定であると仮定する。したがって、修繕費用 $F_i(z_i(\theta_{ij}))$ は、修繕工法の数に対応したいくつかの値のみをとる。いま、管理主体は全道路区間の現在価値に割り引いた期待ライフサイクル費用の合計の最小化を試みると考える。管理主体が最小化を試みる汎関数は、

$$J(\mathbf{V}) = \sum_{i=1}^n E_{\mathbf{V}_i} \left[\int_0^\infty c_i(z_i(t)) \exp(-\alpha t) ds_i(t) + \sum_{j \geq 1}^\infty F_i(z_i(\theta_{ij})) \exp(-\alpha \theta_{ij}) \right] = \sum_{i=1}^n J_i(\mathbf{V}_i) \quad (4)$$

と定義される。ただし、 α は瞬間的割引率、 $\mathbf{V}_i = \{\theta_{ij} | j \geq 1\}$ はサンプルパスの集合上で定義される確率インパルス制御変数であり、 $\mathbf{V} = \{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_n\}$ である。予算制約がない場合には、管理主体は各道路区間の期待ライフサイクル費用 $J_i(\mathbf{V}_i)$ を最小化するように各道路区間の舗装を修繕することにより、全体の期待ライフサイクル費用 $J(\mathbf{V})$ の最小化を達成できる。管理主体が最小化を試みる汎関数は

$$J_i(\mathbf{V}_i) = E_{\mathbf{V}_i} \left[\int_0^\infty c_i(z_i(t)) \exp(-\alpha t) ds_i(t) + \sum_{j \geq 1}^\infty F_i(z_i(\theta_{ij})) \exp(-\alpha \theta_{ij}) \right] \quad (5)$$

と定義される。道路管理者が解くべき問題は

$$\left. \begin{array}{l} \min_{V_i} \{J_i(V_i)\} \\ \text{subject to} \\ \text{eqs.(1), (2a), (2b), and (3)} \end{array} \right\} \quad (6)$$

と表される。以上の問題は、システムの状態が離散的な瞬間的時刻におけるジャンプ（インパルス）で制御される最適確率インパルス制御問題となっている。本研究で定式化した問題では、インパルス時刻（「いつ修繕投資を実施するか」）が制御変数となる。時刻 t の機能水準を $z_i(t) = z_i$ と表そう。区間 i の最適値関数 $\Phi_i(z_i)$ を時刻 t から最適インパルス制御を行使することで達成可能な区間 i の最小期待ライフサイクル費用により定義しよう。時刻 t の現在価値で評価した最適値関数は

$$\Phi_i(z_i) = \min_{V_i} E \left[\int_t^{\infty} c_i(z_i(u)) \exp\{-\alpha(u-t)\} ds_i(u) + \sum_{j \geq j_t+1}^{\infty} F_i(z_i(\theta_{ij})) \exp\{-\alpha(\theta_{ij}-t)\} \right] \quad (7)$$

と定式化できる。ただし、 $u \geq t$ は時刻、 j_t は時刻 t までに実施した修繕投資回数を表す。任意の $j \geq j_t+1$ に対して $\theta_{ij} \geq t$ が成立する。最適値関数は期待ライフサイクル費用の最小値を表していることより、一般的に

$$\Phi_i(z_i) - \{F_i(z_i) + \Phi_i(\bar{z}_i)\} \leq 0 \quad (8)$$

が成立する。修繕投資は期待ライフサイクル費用が最小となる時に実施され、その時、式(8)は等号で成立する。その時の機能水準 z_i^* を最適臨界機能水準と呼ぶと、機能水準 $z_i(t)$ が z_i^* を上回っている間は修繕を見送り、最適臨界機能水準 z_i^* まで低下したら修繕を行うことで最適修繕が実現される。すなわち、式(6)に示される最適インパルス制御問題は最適臨界機能水準 z_i^* を求める問題に帰着する。

(4) モンテカルロシミュレーション

式(6)で表現された最適修繕問題を解析的に解くことはできないので、モンテカルロシミュレーションにより解を導出する。単位期間を Δt とし、各期 $t = t_k$ における各道路区間の累積需要、機能水準を

$$s_{i,k} = s_i(t_k), z_{i,k} = z_i(t_k), t_k = k\Delta t; k = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

と表す。式(1), (2a)を期間 $[\theta_{ij}, \theta_{i(j+1)}]$ で離散近似すると

$$s_{i,k+1} = s_{i,k} + \beta_i \Delta t + \sigma_{i1} \epsilon_{i1}(t_k) + \dots + \sigma_{in} \epsilon_{in}(t_k) \quad (10)$$

$$z_{i,k+1} - z_{i,k} = -\rho_i \{s_{i,k+1} - s_{i,k}\} - \delta_i \Delta t - \eta_i \Delta q_i(t_k) \quad (11)$$

$$\Delta q_i(t_k) = \begin{cases} u_i & (\text{確率 } \lambda_i \Delta t) \\ 0 & (\text{確率 } 1 - \lambda_i \Delta t) \end{cases} \quad (12)$$

と表される。 $\epsilon_{i1}(t_k), \dots, \epsilon_{in}(t_k)$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) は正規分布 $N(0, \Delta t)$ に従う確率変数で、互いに独立である。前節の議論より区間 i の最適修繕ルールは機能水準が最適

臨界機能水準 z_i^* 以下にならただちに修繕を行うという形で表現できる。ある時点の初期機能水準 $z_{i,0}$ の下で、舗装の機能水準が z_i^* まで小さくなったら直ちに修繕するというルールを用いた時に生じる期待ライフサイクル費用（汎関数値）を $J_i(z_{i,0}; z_i^*)$ と表すと、汎関数の再帰的な性質より次式が成立する。

$$J_i(z_{i,0}; z_i^*) = E_0 \left[\sum_{k=0}^{\frac{\theta_{i1}(z_i^*)}{\Delta t} - 1} c_i(z_{i,k}) (s_{i,k+1} - s_{i,k}) \times \frac{1}{(1+\alpha)^{t_k}} + \frac{F_i(z_i^*)}{(1+\alpha)^{\theta_{i1}(z_i^*)}} + \frac{J_i(\bar{Z}_i; z_i^*)}{(1+\alpha)^{\theta_{i1}(z_i^*)}} \right] \quad (13)$$

ただし、 $\theta_{i1}(z_i^*)$ は機能水準が最初に z_i^* となる時刻を表す。右辺 $E_0[\cdot]$ 内の第1項は時刻 $t = 0$ から時刻 $t = \theta_{i1}(z_i^*)$ までの利用者費用の現在価値を表しており、第2項は時刻 $t = \theta_{i1}(z_i^*)$ に要する修繕費用の現在価値を表し、第3項は時刻 $t = \theta_{i1}(z_i^*)$ 以降に生じるライフサイクル費用の現在価値を表している。上式が $z_{i,0} = \bar{Z}_i$ に関しても成立することに留意しよう。この時、上式を項 $J_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ に関して整理することにより、

$$J_i(\bar{Z}_i; z_i^*) = \left\{ 1 - E_0 \left[\frac{1}{(1+\alpha)^{\theta_{i1}(z_i^*)}} \right] \right\}^{-1} \times \left\{ E_0 \left[\sum_{k=0}^{\frac{\theta_{i1}(z_i^*)}{\Delta t} - 1} c_i(z_{i,k}) (s_{i,k+1} - s_{i,k}) \frac{1}{(1+\alpha)^{t_k}} \right] + E_0 \left[\frac{F_i(z_i^*)}{(1+\alpha)^{\theta_{i1}(z_i^*)}} \right] \right\} \quad (14)$$

を得る。いま、モンテカルロシミュレーションによって累積需要、機能水準のサンプルパスを1つ発生させることにより、確率変数 $s_{i,k}, z_{i,k}, \theta_{i1}(z_i^*)$ は1つの実現値をもつ。上式の右辺は、パスの発生回数 M を十分大きくすれば、パスの発生によって得られる各項の実現値の平均値によって求められる。したがって、十分多くのパスを発生させることにより $J_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ 、 $J_i(z_{i,0}; z_i^*)$ の値が求められることになる。様々な値の z_i^* に対して、この方法を繰り返し適用し、1次元探索法により $J_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ が最小となる最適修繕ルール $z_i^* = z_i^*$ を求めることができる。前節の議論より $J_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ を最小にする最適修繕ルール $z_i^* = z_i^*$ は、任意の初期機能水準 $z_{i,0}$ に関して $J_i(z_{i,0}; z_i^*)$ を最小にする。

(5) 期待値パス

以上の方針で十分な精度で解を求めるためにはパスの発生回数 M を十分大きくする必要があり、大きなネットワーク上の各区間の最適修繕ルールを求める場合には、膨大な計算を要する。そこで、累積交通需要及び機能水準の期待値パスを用いてより簡単に最適修繕ルールを求める方法を提案する。累積交通需要と機能水準のそれぞれの各期の期待値を連ねたパスを期待値パスと呼ぶ。劣化過程が式(2a)で表現される時、初期時点から修繕が実

施されるまでの機能水準の期待値パスは

$$\frac{dE[z_i(t)]}{dt} = -\rho_i \beta_i - \delta_i - \lambda_i \eta_i \bar{u}_i \quad (15)$$

と表される。ここに $\bar{u}_i = E[u_i] = \exp(\mu + \hat{\sigma}^2/2)$ である。いま、累積交通需要と機能水準がこれらの期待値パスに従って推移すると仮定した場合に生じるライフサイクル費用を最小化する問題を考える。この問題で最小化すべき汎関数 J'_i は次式で表される。

$$J'_i(z_{i,0}; z_i^0) = \sum_{k=0}^{\theta'_{i1}(z_i^0)-1} c_i(E[z_{i,k}]) E[s_{i,k+1} - s_{i,k}]$$

$$\times \frac{1}{(1+\alpha)^{t_k}} + \frac{F_i(z_i^0)}{(1+\alpha)^{\theta'_{i1}(z_i^0)}} + \frac{J'_i(\bar{Z}_i; z_i^0)}{(1+\alpha)^{\theta'_{i1}(z_i^0)}} \quad (16)$$

ただし、 $\theta'_{i1}(z_i^0)$ は機能水準の期待値パスにおける第1回目の修繕時刻である。 $E[z_{i,k}]$, $E[s_{i,k+1} - s_{i,k}]$ は解析的に計算できるため、容易に最適臨界機能水準 z_i^{*} を求めることができる。この期待値パスによる最適臨界機能水準 z_i^{*} と厳密解 z_i^* と常に一致する保証はないが、筆者らはさまざまなパラメータに対してこれら2つの方法で求めた最適臨界機能水準と期待ライフサイクル費用が高い精度で一致することを確かめている。

4. 予算制約下での修繕ルール

(1) 予算制約下での最適修繕問題

道路管理者に各期の予算制約がある場合、3. で求めた最適修繕ルールに従って管理道路の道路舗装を修繕できない可能性がある。ここでは、予算制約の中でライフサイクル費用を可能な限り小さくしうるようなヒューリスティックな修繕ルールを提案する。道路管理者の各期 k ($t_k \leq t < t_{k+1}$) の予算制約は

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \int_{t_k}^{t_{k+1}} \hat{\delta}(t - \theta_{ij}) F_i(z_i(\theta_{ij})) dt \right\} \leq Y_k \quad (17)$$

と表される。 Y_k は k 期の予算であり、 $\hat{\delta}$ は $t = \theta_{ij}$ の時に $1/dt$ 、そうでない時に0となるδ関数である。予算制約 (17) は任意のサンプルパス上で成立しなければならない。したがって、道路管理者が解くべき問題は

$$\begin{aligned} \min_V \{ J(V) \} \\ \text{subject to} \\ eqs. (1), (2a), (2b), (3) \text{ and } (17) \end{aligned} \quad (18)$$

と表される。この問題の最適値関数は、各道路区間の初期機能水準 $z_0 = \{z_{1,0}, z_{2,0}, \dots, z_{n,0}\}$ と現時点からの各年度の予算制約 $\mathbf{Y} = \{Y_0, Y_1, \dots\}$ に依存する。したがって、問題 (18) は極めて高度な組み合わせ計画問題となつており、この問題の最適解を解析的な方法で求めることは不可能である。

(2) 予算制約下での次善修繕ルール

予算制約下における修繕順序を費用便益ルールにより決定しよう。計算を簡単にするために3.(5)で説明し

た期待値パスによる方法を用いる。式(10), (11)に示した離散近似した累積交通需要の変動過程、舗装の劣化過程を用いる。いま、着目する時刻における各区間の機能水準を $z_0 = \{z_{1,0}, \dots, z_{n,0}\}$ と表そう。修繕工事の便益を、その時刻に直ちに修繕を行ったのちに得られる期待ライフサイクル費用と当該時点での修繕をせずに一定の期間（例えば k 期）放置し、その後に修繕を行った場合の期待ライフサイクル費用の差として定義しよう。いま、区間 i の舗装を k 期間放置した場合の期待ライフサイクル費用を $\tilde{J}_i(z_{i,0}, k)$ 、直ちに修繕したのちの期待ライフサイクル費用を $J'_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ と表記すれば、当該区間における修繕工事の便益は $\tilde{J}_i(z_{i,0}, k) - J'_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ と表すことができる。ただし、期待ライフサイクル費用は対象とする修繕を行った以降（第2期以降）の修繕を期待ライフサイクル費用を最小にするタイミングで実施すると仮定して求める。この時、 k 期間放置した場合に対して定義される現時点の修繕工事の費用便益比 $(B/C)_{i,k}$ は

$$(B/C)_{i,k} = \frac{\tilde{J}_i(z_{i,0}, k) - J'_i(\bar{Z}_i; z_i^*)}{F_i(z_{i,0})} \quad (19)$$

$$\tilde{J}_i(z_{i,0}, k) = \sum_{j=0}^{k-1} \frac{c_i(E[z_{i,j}]) E[s_{i,j+1} - s_{i,j}]}{(1+\alpha)^{t_j}}$$

$$+ \frac{F_i(E[z_{i,k}])}{(1+\alpha)^{t_k}} + \frac{J'_i(\bar{Z}_i; z_i^*)}{(1+\alpha)^{t_k}}$$

$$J'_i(\bar{Z}_i; z_i^*) = \left\{ 1 - \left[\frac{1}{(1+\alpha)^{\theta'_{i1}(z_i^*)}} \right] \right\}^{-1}$$

$$\times \left\{ \sum_{j=0}^{\theta'_{i1}(z_i^*)-1} c_i(E[z_{i,j}]) \frac{E[s_{i,j+1} - s_{i,j}]}{(1+\alpha)^{t_j}} \right.$$

$$\left. + \frac{F_i(z_i^*)}{(1+\alpha)^{\theta'_{i1}(z_i^*)}} \right\}$$

と表せる。ただし、 $\theta'_{i1}(z_i^*)$ は区間 i の現在時刻と最適修繕時刻の間の時間間隔、 t_k は現在時刻と k 期後の時刻の間の時間間隔を表す。当該期において修繕を行う場合修繕直前のライフサイクル費用が $\tilde{J}_i(z_{i,0}, 0) = F_i(z_{i,0}) + J'_i(\bar{Z}_i; z_i^*)$ と表されることに留意しよう。したがって、任意の区間 i に対して $(B/C)_{i,0} = 1$ が成立する。いま、修繕が遅延した場合に生じる期待ライフサイクル費用を用いて、当該期における修繕の費用便益比 $(B/C)_{i,k}$ を定義する。ただちに修繕を行うことが望ましい場合には、修繕が遅延することにより期待ライフサイクル費用は増加するため、任意の k に対して $(B/C)_{i,k} > 1$ が成立する。一方、修繕を見送ることが望ましい場合、最適修繕タイミングまでの間は修繕を見送ることで期待ライフサイクル費用が低減される。現在時刻から k' 期後が最適修繕タイミングであるとすると、任意の $k < k'$ に対して $(B/C)_{i,k} < 1$ が成立する。したがって、修繕予算が非常に多い場合を除いて、機能水準が最適臨界機能水準まで低下していない区間が修繕区間として選択されることはない。以上で定式化した費用便益比を用いれば、予算

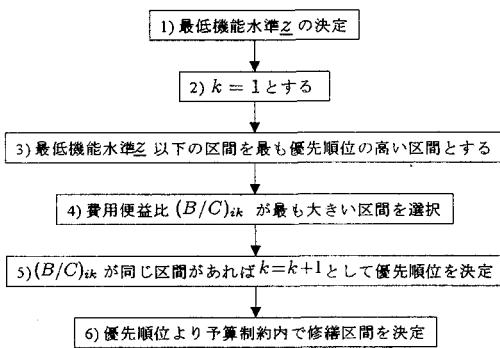


図-2 修繕順位決定プロセス

制約の下で修繕順序を求める実用的な手順を図-2に示すようにまとめることができる。すなわち、

- 1) 修繕を行うべき最低機能水準 z を設定する。
- 2) $k = 1$ とする。
- 3) z に到達している区間を最も優先順位の高い区間として抽出する。
- 4) 全ての道路区間 i に対して費用便益比 $(B/C)_{i,k}$ を算定し、費用便益比 $(B/C)_{i,k} > 1$ となる区間の中で $(B/C)_{i,k}$ が最も大きい区間を選択する。
- 5) 費用便益比が同じ値を示す区間が複数個あれば、 $k = k + 1$ とし $(B/C)_{i,k}$ を比較し優先順位を決定する。このプロセスを優先順位が確定するまで続ける。
- 6) 以上より決定した優先順位に基づいて、予算制約の範囲内で修繕を行う区間を決定する。

以上の方法で、予算制約がある場合における舗装の望ましい修繕順序を近似的に求めることができる。

5. 舗装修繕管理システムの構築

(1) システム構築の目的

本研究では、以上で提案した修繕ルールの有効性を検証するために、三重県が所轄する道路（県道及び指定区間外の国道）全区間を対象とした舗装修繕管理システムを構築した。図-1に示したように、舗装修繕管理システムは、1) データベースシステム、2) 劣化推定システム、3) 修繕箇所選定システムにより構成される。このうち、本研究で提案した修繕ルールは修繕箇所選定システムにおける決定ルールとして用いることができる。本研究で構築した舗装修繕管理システムは、各年度において実施する舗装修繕箇所を選定するための支援情報を作成するという実際的な役割を持っている。それと同時に、本システムを用いることにより、いくつかの政策実験を行うことができる。6. では、以上の舗装修繕管理システムを用いて、1) 年度ごとの舗装修繕予算と期待ライフサイクル費用、道路網の長期的な機能水準の関係、2) 予算水準と今後の新規道路整備の進捗量の関係

に関するシミュレーション実験を行った結果を説明する。

(2) データベースシステム

三重県では総延長3,372.66kmにわたる道路施設を1区間100メートルを基本区間とする総数35,540区間に分割するとともに、各区間の道路舗装に関する情報を舗装台帳として整備している。さらに、定期的に路面性状調査を実施し、個々の単位区間におけるMCI指標を計測している。現時点（平成13年末）において利用可能な最新のMCI管理報告書^{20),21)}には、平成10年度から平成12年度にわたって実施された路面性状調査結果と、それに基づいて推定された平成13年3月時点における各区間のMCI値に関するデータが整備されている。本研究では舗装台帳と平成13年3月時点における各区間のMCI推定値を基本とするデータベースを作成した。さらに、同県では道路整備10箇年戦略を策定しており、総延長583.6kmに及ぶ新規道路整備を構想している。限られた道路整備予算の中で新規道路整備と道路舗装の修繕を効果的に達成することが求められている。そこで、新規道路整備が将来の舗装修繕需要に及ぼす影響を分析することを目的として、新規整備道路を100メートルを基本区間とする総数5,836区間に分割し、これらの計画道路に關しても仮想的な舗装台帳を作成し、上述のデータベースに付加したような拡大データベースを作成した。

(3) 劣化推定システム

道路舗装の機能水準は、轍、ひび割れ、舗装材料、凹凸、騒音、道路の勾配等で規定される。しかし、実際には轍、ひび割れ、凹凸のみによって舗装の機能水準（劣化水準）が評価されているのが実状である。代表的な道路舗装の機能水準として（旧）建設省によりMCI指標が提案されている²²⁾⁻²⁶⁾。利用可能なデータと対応して

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2}$$

$$MCI_0 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7}$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3}$$

$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7}$$

というMCI値が適宜用いられる。ただし、 C はひび割れ率（%）、 D は轍ぼれ量（mm）、 σ は縦断凹凸量（mm）である。完全な舗装が実現すればMCIは10となるが、現実にはそのような理想的な舗装を実現することは不可能である。三重県土整備部におけるヒアリング調査の結果に基づいて、修繕直後のMCIの値及び新規整備を行って供用を開始する時点のMCI値を9.0と設定する。

本研究では劣化過程は式(2a)で表されるような確率過程に従うと仮定した。筆者らは式(2a)で表される劣化過程の変動パラメータは、現実の舗装修繕のタイミングや修繕間隔の変動に影響を及ぼすものの、最適臨界機能水準や期待ライフサイクル費用にはほとんど影響を及

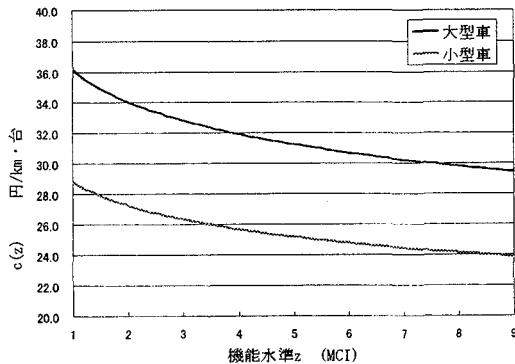


図-3 利用者費用関数

ぼさないことを明らかにしている。この性質を利用すれば、シミュレーションによる直接解法より簡単な方法で修繕ルールを求める方法を利用できることを示している。すなわち、現時点のMCI水準を初期値とする期待値パスを定義し、期待値パス上における最適臨界機能水準を求めることができる。式(2a)に従うサンプル経路は無限に定義できるが、各時点における期待値により表現される期待値パスは、初期MCI水準より時間の経過とともに機能水準が単調に減少する直線により定義できる。現時点において、劣化過程に関するデータは極めて乏しいことを考えれば、現時点で複雑な劣化過程モデルを推計することは極めて困難であるといわざるを得ない。三重県国土整備部によれば、三重県が管理する道路舗装の年間MCI低下量は、平均0.2程度であることが報告されている。本適用事例においては、過去の修繕間隔と修繕時点におけるMCI水準に関する経験情報に基づいて、期待値パスの勾配を想定した。単位期間 Δt を1ヶ月とし、式(10)の β_i を道路交通センサスデータから得られる月間交通量、 $\sigma_{i1} = 0.5\beta_i$, $\sigma_{i2} = \sigma_{i3} = \dots = 0$ とし、式(11)では $\rho_i = 8.33 \times 10^{-3}/\beta_i$, $\delta_i = 0$, $\eta_i = 1.0$, $\lambda_i = 1/24$, $\log\{10\sqrt{\epsilon u_i}\} \sim N(0, 1)$ とした。現時点では、全道路区間を対象とした路面性状調査が行われ始めてから日が浅く以上のパラメータに関するデータが蓄積されていない。今後、舗装修繕管理システムのデータベースシステムを継続的に更新していくば、MCI予測式の推計が可能となる。

(4) 修繕箇所選定システム

(a) ライフサイクル費用の算定

舗装マネジメントの対象期間は無限期間とする。道路管理者は無限期間にわたる全道路区間の総期待ライフサイクル費用の低減化を目的として道路舗装マネジメントを実施する。ライフサイクル費用を、舗装の状態に依存して変化する利用者費用と舗装の修繕費用の合計の現在

価値により定義する。割引率は年率4%とする。利用者費用には、燃費、車両の劣化損傷による費用、走行速度低下による時間損失費用、乗り心地悪化による費用、騒音・振動による費用等がある。しかし、走行速度低下による時間損失、乗り心地悪化、騒音・振動による費用等は定量化が困難であり、現在のところ路面性状値の関数として定量化した研究事例は見あたらない。一方、路面性状と燃費、車両の劣化損傷による費用（車両の維持修繕費用・減価償却費用）の関連に関しては、旧建設省土木研究所による研究事例²⁷⁾がある。本調査では、走行実験により、燃料消費量、車両の維持補修費用、減価償却費用を加えた車両走行費用とMCIの関係を分析している。所得移転である税を差し引いた費用を利用者費用と考える。以上のデータより、利用者費用関数をスライン補完法により図-3に示すように求めた。

道路舗装の修繕費用を算定する場合、道路舗装の状態や道路の機能水準等の技術的条件により修繕工法が異なることに配慮する必要がある。実証分析にあたっては、三重県版舗装管理・支援システムに基づき表-1に示す修繕工法判定区分を用いる。修繕工法としては、オーバーレイ、切削オーバーレイ、打ち換えをとりあげる。パッチング、表面処理等の応急処置的な補修やMCIを大幅に回復させない補修は維持補修と考える。現行の修繕工法判定基準が最適である保証はなく、舗装技術の発展を通じて判定基準の高度化を達成する必要がある。本研究では、道路舗装マネジメントのための修繕ルールの開発に重点をおいており、現行基準を修繕工法判定の基準として用いる。維持補修は必要に応じて常に適切にされ、その費用は時間を通じて一定と仮定する。修繕単価（表-2参照）に基づいて修繕費用を算定した。その際、平成11年度交通センサス（道路現況）に記載の幅員を用いて舗装面積を算定した。幅員のデータがない道路区間は、幅員を道路統計年報に記載の県管理道路の車道部総面積を総延長で除した値（全道路区間の平均幅員）5.45mとした。修繕工事は5日で完了すると仮定し、工事対象区間を最短の距離で迂回するために必要な走行費用の増加を修繕に伴う追加費用として算出する。迂回経路は国道・県道で構成される道路ネットワーク上における最短経路探索により求めた。

(b) 最適臨界機能水準の決定

既存の35,540区間にそれぞれに対して、期待ライフサイクル費用を最小にするような最適臨界機能水準（MCI値）を求めた。最適臨界機能水準は参考文献²⁾に示すように、迂回費用、交通量等に応じて極めて多様に変化する。計算にあたっては、各道路区間の交通量は平成11年の道路交通センサスのデータ（昼間12時間全交通量、昼間大型車交通量、昼夜率）を用いた。交通量の増減に関するトレンドは存在せず、交通量の期待値は時間を通じ

表-1 修繕工法判定区分

分類	MCI 区分	工法判定
1-1	$3.5 < MCI$	オーバーレイ
	$2.0 < MCI \leq 3.5$	切削オーバーレイ
	$MCI \leq 2.0$	打ち換え
1-2	$3.5 < MCI$	オーバーレイ
	$3.0 < MCI \leq 3.5$	切削オーバーレイ
	$MCI \leq 3.0$	打ち換え
2-1	$3.0 < MCI$	オーバーレイ
	$2.0 < MCI \leq 4.0$	切削オーバーレイ
	$MCI \leq 2.0$	打ち換え
2-2	$3.5 < MCI$	オーバーレイ
	$3.0 < MCI \leq 3.5$	切削オーバーレイ
	$MCI \leq 3.0$	打ち換え

三重県では各道路区間を交通量、道路環境に応じて道路区間に4つのタイプに分類している。なお、同県は上記の工法判定区分に対して以下の例外規定を設けている。オーバーレイ工法に該当する区間が、条件1) 交通量区分B, C, D、かつ、わだちはれ量30mm以上の場合、条件2) 嵩上げ付加区分に該当する場合には切削オーバーレイを行う。一方、打ち換え工法に該当する区間が交通量区分がL, Aかつ幅員5.5m未満の場合には再簡易舗装を行う。

表-2 修繕単価

工法	交通量区分	単価(円/m ²)
オーバーレイ	L	3,300
	A	3,300
	B	3,300
	C	3,750
	D	3,750
切削オーバーレイ	L	4,500
	A	4,500
	B	4,500
	C	4,950
	D	4,950
打ち換え	L	8,700
	A	11,250
	B	15,300
	C	19,800
	D	19,800
打ち換え (再簡易)	L	6,900
	A	9,000

て一定と仮定する。計算事例の一部として、交通量の異なる2つの道路区間(1) ケース1: 津地方県民局久居建設部一般国道165号線距離標45.0~45.1区間、区間長100m、高級アスファルト舗装、車道部幅員17m、平成11年交通センサス全交通量22,070台/12h、大型車交通量2,232台/12h、昼夜率1.29、(2) ケース2: 伊賀県民局建設部県道133号伊賀甲南線、距離標7.7~7.8、区間長100m、高級アスファルト舗装、車道部幅員9m、平成11年交通センサス全交通量520台/12h、大型車交通量18台/12h、昼夜率1.28における臨界機能水準と期待ライフサイクル費用の関係をそれぞれ図-4、図-5に例示している。同図では、ライフサイクル費用が不連続に変化しているが、このことはMCI水準により修繕工法が異なることを反映している。交通量が比較的多いケース1の区間では、最適臨界機能水準は4.1であり、

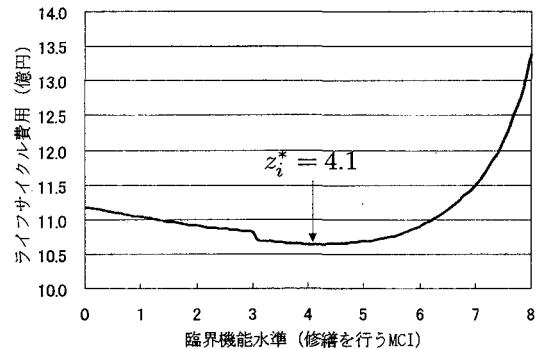


図-4 最適臨界機能水準 (ケース1)

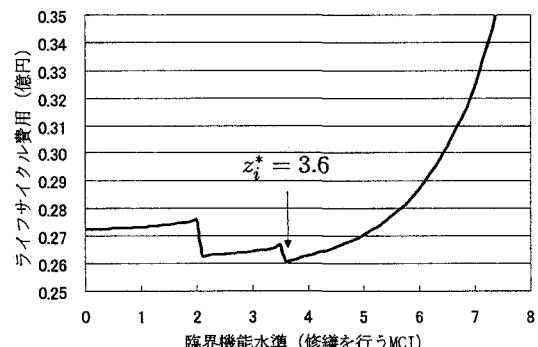


図-5 最適臨界機能水準 (ケース2)

期待ライフサイクル費用の最小値は10億6477万円である。一方、交通量の少ないケース2の区間では、最適臨界機能水準は3.6で、最小ライフサイクル費用は2610万円である。予算を自由に調達できる場合には、各道路区間のMCIが最適臨界機能水準まで低下した時点で修繕することにより、期待ライフサイクル費用は最小化される。なお、最適臨界機能水準を求めるにあたって、モンテカルロシミュレーションと期待パスによる方法の2つの方法を採用し、最適臨界機能水準、期待ライフサイクル費用の計算結果を比較した。その結果、すべての道路区間ににおいて2つの方法による最適臨界水準、期待ライフサイクル費用の計算結果は絶対値にして1%以下に収まることが判明した。モンテカルロシミュレーションの精度を考えれば、期待値パスによる方法により十分な精度で期待ライフサイクル費用を算出できると考える。なお、このことは舗装修繕を確定的な計画期間を設けて定期的に行うことの意味していない。現実に発生する舗装の劣化過程は不確実であり、実際に修繕が実施されることのタイミングは確率的に変動することになる。

図-6は三重県が所轄する各道路管理区間にに対する求めた最適臨界機能水準について、同県が所轄する全

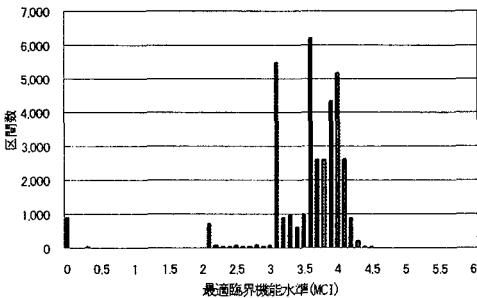


図-6 最適臨界機能水準の分布

35,540区間にわたってその分布状況を整理したものである。表-1に示した修繕工法判定区分においてMCIが3.0、あるいは3.5まで低下した場合、より大がかりな修繕工法が必要となる。修繕工法により表-2に示すように修繕費用が大きく異なる。舗装の劣化がかなり進展した段階で舗装の打ち換えを行うよりも、予防的に早い段階で舗装をオーバーレイにより修繕した方が期待ライフサイクル費用の低減を図れる区間が数多く存在する。そのため、最適臨界機能水準が3.1、及び3.6となるような道路区間の数が突出して多くなるという結果となっている。修繕箇所選定システムは、以上のように求めた各道路区間の最適臨界機能水準と各時点におけるMCIの推定値（あるいは観測値）に基づいて図-2の手順により修繕箇所の優先順位を求めるシステムとなっている。

6. シミュレーション実験

(1) シミュレーション実験の概要

5. で提案した舗装修繕管理システムを用いて、三重県が管理する道路網における舗装の修繕過程をシミュレートする。シミュレーション実験の1つの目的は、1) 現状の道路網を予算制約のない状態の下で最適に修繕を行った場合に要する期待ライフサイクル費用と、2) 予算制約が存在する場合に要する期待ライフサイクル費用を求めることにより、予算水準と期待ライフサイクル費用や道路舗装の定常的な平均機能水準の関係を求めることがある。さらに、シミュレーション実験の枠組みを拡張し、道路予算の中で新規道路事業と道路舗装の修繕を同時に実施するという政策ケースをとりあげる。その上で、新規投資と補修修繕に対する予算配分パターンが、事業の進捗度や道路舗装の機能水準に及ぼす影響を分析する。シミュレーション実験では、現実の道路網全体の劣化プロセスが期待値パスに従って推移するというサンプルケースを考える。さらに、サンプルパス上で以下に示すルールで逐次道路網の修繕を実施する。シミュレーション実験は期待値パスという特殊なサンプルパスに対

して道路網の修繕履歴を求めたものにすぎない。しかし、期待値パスに対してシミュレーションを行って求めた期待ライフサイクル費用は3.(4)に示したモンテカルロシミュレーションで求めた期待ライフサイクル費用とほとんど一致する。35,540区間という膨大な数の道路区間で構成される三重県道路網を対象としたシミュレーション実験では、期待値パスを用いる方法が実用的であると考える。シミュレーション実験では、平成13年4月を初期時点に設定するとともに、1ヶ月を基本単位期間として100年間にわたり道路網の修繕過程を再現する。

予算制約が存在しない場合のシミュレーションは以下の手順で実施する。1) 各道路区間の最適臨界機能水準を求める。2) 平成13年4月の時点のMCI値を各道路区間の初期MCI値として設定する。3) 初期時点のMCI値が最適臨界機能水準より下回っている道路区間は直ちに舗装を修繕する。4) 時点を1ヶ月更新する。5) 期待値パスに従って各道路区間のMCI値を更新する。6) 更新されたMCI値が最適臨界機能水準より小さくなつた道路区間では、直ちに舗装を修繕する。7) 供用が開始される新規整備区間を対象に加えステップ4)に戻る。8) 以上のプロセスを100年間継続する。予算制約がある場合に対しても、予算制約がない場合と同様の方法でシミュレーションを実施することができる。すなわち、1) 平成13年4月の時点のMCI値を各道路区間の初期MCI値として設定する。3) 初期時点におけるMCI値に基づいて図-2に示す手順に従って修繕の優先順位を決定する。4) 年間予算の制約の中で優先順位に従って舗装の修繕を実施する。予算の残額を求める。5) 時点を1ヶ月更新する。6) 当該期に供用が開始される新規整備区間を計算に加える。7) 劣化プロセスに従って各道路区間のMCI値を更新する。8) 更新されたMCI値に基づいて修繕が必要な区間と修繕の優先順位を決定する。9) 年間予算が残つていれば優先順位に従って修繕を実施する。年間予算の残額がない場合、修繕を見送る。10) 1年間が経過すれば予算を更新する。ステップ4)へ戻る。以上のプロセスを100年間繰り返す。

(2) 年間予算水準と長期的修繕パターン

予算制約が存在しない場合、各道路区間の舗装を最適なタイミングで修繕することができる。いま、各区間の舗装がすべて期待値パスに従って劣化するというシナリオを考えよう。この場合、期待ライフサイクル費用を最小にするために必要となる各年度の修繕費用は図-7のように発生する。同図に示すように、初年度に必要となる修繕費が極端に大きくなっている。このことは期待ライフサイクル費用の最小化を達成するために、現時点でただちに修繕を行るべきである区間が数多く存在すると

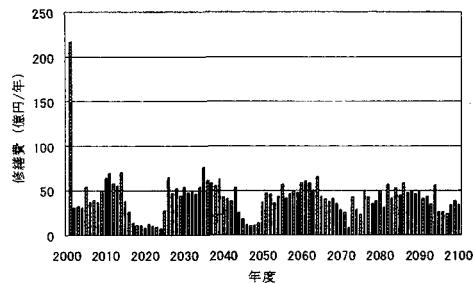


図-7 期待値パス上で発生する修繕費用

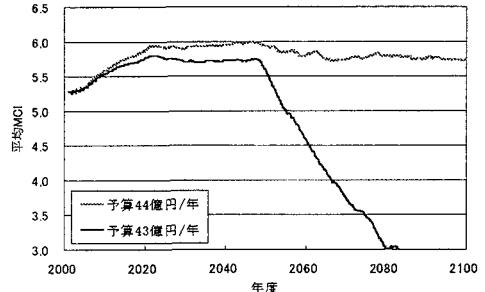


図-9 平均 MCI の推移

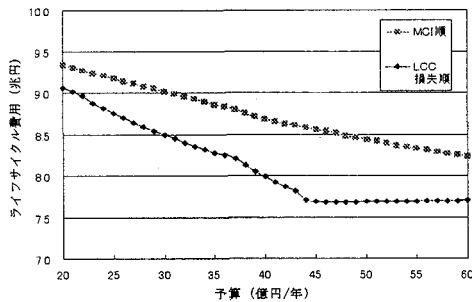


図-8 年間予算と期待ライフサイクル費用

いう現状を反映している。次年度以降は年度により修繕費用の多寡はあるものの、必要修繕費用は42億円/年を期待値として定常的に変動している。換言すれば、最適なタイミングで修繕を実施する場合は年平均42億円/年程度の修繕費用が発生することになる。道路網全体の最適期待ライフサイクル費用は7兆6700億円となる。

年間修繕予算が存在する場合、最適タイミングで舗装を修繕できない。当然のことながら、年間修繕予算が存在すれば期待ライフサイクル費用は増加する。図-8は、年度を通じて一定額の舗装修繕費用が確保されるという前提の下で、年間修繕予算と期待ライフサイクル費用の関係を分析した結果を示している。年間修繕予算が47億円の場合に期待ライフサイクル費用が最小となる。すなわち、各年度の予算が一定という前提の下での最適維持可能予算は47億円である。しかし、この場合でも、期待ライフサイクル費用は修繕予算を自由に調達できるという前提の下で最適タイミングで修繕を実施した場合より約200億円だけ増加する。同図にはMCI水準が小さい順に舗装修繕を実施した場合の年間修繕予算と期待ライフサイクル費用の関係も併記している。修繕予算が47億円の場合、期待ライフサイクル費用は8兆4800億円であり、費用便益ルールを用いた場合よりも約8000億円増加する。これは、最適タイミングで修繕を実施す

る場合と費用便益ルールを用いた場合の期待ライフサイクル費用の差（約200億円）よりもはるかに大きく、費用便益ルールが最適修繕に非常に近い修繕ルールであることが確かめられる。図-9は年間修繕予算額を44億円と43億円に設定した場合、道路網全体のMCI平均値が経年的に変化するかを示したものである。年間修繕予算を43億円に設定した場合、修繕が最適年度以降に積み残される道路区間が時間とともに増加していく。道路網全体として修繕必要箇所が増加すれば、年間修繕予算が一定である限り、より費用のかかる修繕工法が必要となる補修箇所が長期的に増加する。その結果、予算制約の中で実施できる修繕箇所が減少しはじめ、2045年頃以降に急速に道路網全体の平均MCIが低下していく結果となっている。この図より、道路網全体の機能水準をある一定以上のMCI水準に維持するためには少なくとも44億円以上が必要であることが理解できる。すなわち維持可能予算は44億円以上である。44億円未満の場合、道路網全体の舗装機能水準の長期的劣化を抑止できない。

(3) 年間予算水準と新規・修繕投資

新規道路の整備事業の進展が将来の修繕費用の増加に及ぼす影響を分析するために以下のシミュレーション実験を行う。すなわち、道路関連予算の中から、期待ライフサイクル費用を最小にするような舗装修繕費用を先取りし、各年度予算の残額を新規道路投資に充當する。その上で、年間予算の水準と新規道路事業の進捗状況に関する1つの知見を得たいと考える。前節で分析したように、期待ライフサイクル費用を最小にするように弾力的に舗装修繕費用を先取りすることにより、固定的な修繕予算の中で費用便益ルールを用いて修繕を実施するよりも結果的に計画期間にわたる総修繕費用を節約することが可能となる。これにより計画期間内に道路投資に充當できる総事業費を増加させることができる。シミュレーション実験では三重県が構想している総延長

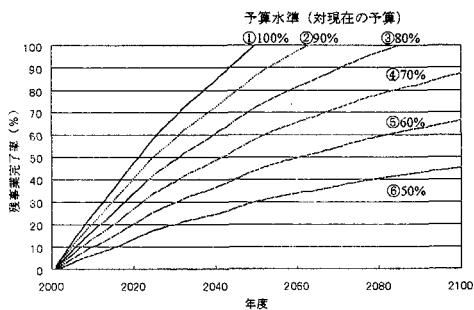


図-10 年間予算と残事業量

583.6kmに及ぶ道路整備事業について、費用便益比が高い区間より順に投資予算を用いて逐次事業を進めることとし、さらに既存の道路区間については道路改良率が100%になるまで道路改良を進めることとした。区間が完成した時点から、当該区間の道路舗装の劣化が進展するとの観点から、年間予算と道路整備の残事業量の関係を示している。同県における現在の道路関係予算は645億円/年である。年間予算を将来時点にわたって一定額に据え置くと、新規道路整備の進捗により修繕需要が増加するため、道路投資に充当できる予算は次第に減少する。年間予算を現在の水準の74%に削減させた場合、技術革新によるコスト削減がない限り残事業が完了するのが2100年となる。さらに、65%まで削減すれば残事業は永久に終了しない。

(4) 感度分析

以上のシミュレーション実験は、平成13年4月における各道路区間のMCIを初期値として、初期時点以降の道路舗装がすべて期待パスという1つのサンプルパスに従う場合を想定したものである。しかし、現実の舗装の劣化過程が期待値パスに従って変化するという保証はない。初期時点における各道路区間におけるMCIの状態分布が異なれば、必要となる年間予算水準が異なる可能性がある。そこで、初期時点におけるMCI水準の分布の差異が年間予算水準に及ぼす影響に関して感度分析を実施した。各道路区間の舗装状態が平成13年4月における初期値から10年間確率微分方程式(2a)に従って変化すると想定する。具体的には、式(11)に基づいてモンテカルロシミュレーションを実施し、すべての各区間の劣化過程のサンプルパスを発生させる。それに対して、本研究で提案した舗装修繕管理システムに基づいて年間修繕予算47億円の下で10年間にわたって舗装を管理し、10年後における全道路区間のMCIの分布状態を求めた。劣化過程に関するサンプルパスが異なればMCIの分布も異なる。このようにして得られた10年後のMCIの分布

のそれぞれに対して、6.(1)で示したシミュレーションの方法により期待ライフサイクル費用を最小にするような最適維持可能予算を求めた。その結果、最適維持可能予算は98%のサンプルパスに対して46億円となった。すなわち、各道路区間のMCIが平成13年4月における初期値から10年間確率微分方程式(2a)に従って変化する場合、10年経過後の個々の区間のMCIはサンプルパスにより大きく異なるが、10年経過後に生じるMCIの分布状態に対して生じる最適維持可能予算はサンプルパスに依らずほぼ一定である。10年経過後のMCI分布に対する最適維持可能予算が初期時点のMCI分布に対する最適維持可能予算より約1億円小さくなっているが、これは図-7に示したように、現時点(2000年時点)で最適MCIを下回っている道路区間が多く存在するためである。年間予算47億円を10年間確保し続けることにより、初期時点のMCI分布状態が改善され、その結果それ以降の年間予算を低減することが可能となる。しかし、10年後における初期MCI値の分布が最適修繕年間予算に及ぼす影響は極めて小さいことが判明した。

7. おわりに

本研究では予算制約下において道路網全体における道路舗装の期待ライフサイクル費用を可能な限り低減するようなヒューリスティックな道路舗装の修繕順位決定ルールを提案した。さらに、提案したヒューリスティック・ルールを用いた舗装修繕マネジメントシステムを提案した。もちろん、本研究で提案した修繕順位決定ルールは最適な舗装修繕順序を保証するものではないが、ルールの導入を通じてより望ましい修繕を実施することが可能となる。さらに、提案した舗装修繕マネジメントシステムを三重県が所轄する道路舗装のマネジメント問題に適用し、開発したシステムの有効性を検証した。

本研究で提案したシステムの実用性は極めて高いと考えるが、今後にいくつかの課題が残されている。まず、本研究で用いたシステムの有効性は各道路区間の舗装劣化メカニズムの精度に依存している。現時点において、舗装劣化メカニズムに関するデータの蓄積が十分ではなく、期待ライフサイクル費用の推計精度に関しては改善の余地が残されている。道路舗装の長期的な維持管理を行う上で、望ましい維持可能予算を確保することが重要である。そのためには、本研究で開発したデータベースに基づいて舗装ストック価値を計上するような会計情報を管理できるシステムの開発が望まれる。そのためには、道路舗装の長期的なマネジメントと整合がとれるような道路舗装の耐用年数、減価償却法の設定が不可欠である。なお、本研究の遂行においては、データ整備を

はじめとして三重県県土整備部の全面的なご支援を賜つた。ここに感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) Hass, R., Hudson, W. R., and Zaniowski, J. P.: *Modern Pavement Management*, Krieger Publishing Company, 1994.
- 2) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 18(1), pp. 97-107, 2001.
- 3) 阿部頼政: 舗装管理システムに関する研究の動向, 土木学会論文集, No.372, pp.17-27, 1986.
- 4) Hudson, W. R., Haas, R. and Uddin, W.: *Infrastructure Management: Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation, and Renovation*, McGraw-Hill, 1997, 池田拓哉他訳: 社会資本マネジメント, 森北出版, 2001.
- 5) 東嶋奈緒子: 舗装の計画的管理手法に関する調査研究, 第51回建設省技術研究会報告, pp.17.1-17.20, 1997.
- 6) 内田弘・召田紀雄: 地方道における長期補修計画の立案, 土木学会論文集, No.597, pp.21-31, 1998.
- 7) 小松原昭則: JH日本道路公团における舗装マネジメントシステム, アスファルト, 第41巻 198号, 1999.
- 8) 富永博夫: 首都高速道路の舗装維持管理, アスファルト, 第41巻 198号, 1999.
- 9) 峰岸順一: 東京都における道路維持補修計画支援システム, アスファルト, 第41巻 198号, 1999.
- 10) 堀昌文, 櫻木武: 道路の維持管理に関する計画学的考察, 土木計画学研究講演集, No.18(2), pp.405-408, 1995.
- 11) 深井俊英: 道路施設の補修と取替の判定に関するシステム論的考察, 土木計画学研究・講演集, No.5, pp.27-32, 1982.
- 12) 黒田勝彦, 内田敬: 土木構造物の補修・更新モデル, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.117-124, 1988.
- 13) Carnahan, J. V., Davis, W. J., Shahin, M. Y., Keane, P. L., and Wu, M. I.: Optimal maintenance decisions for pavement management, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 113, pp. 554-572, 1987.
- 14) Madanat S.: Predicting Pavement Deterioration, *ITS Review*, Vol. 20, Institute of Transportation Studies, University of California, 1997.
- 15) 栗野盛光, 小林潔司, 渡辺晴彦: 不確実性下における補修投資ルール, 土木学会論文集, No.667/IV-50, pp.1-14, 2001.
- 16) 落合文雄: 建設省の舗装データバンクシステム, アスファルト, 第41巻 198号, 1999.
- 17) たとえば, Baxter, M. and Rennie, A.: *Financial Calculus: An Introduction to Derivative Pricing*, Cambridge University Press, 1996.
- 18) Øksendal, B.: *Stochastic Differential Equations: An Introduction with Applications*, 5th ed., Springer-Verlag, 1998, 谷口説男訳, 確率微分方程式, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1999.
- 19) 例えば, Heyman, D.P. and Sobel, M.J.(eds.): *Stochastic Models, Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 2, North-Holland, 1990.
- 20) 三重県県土整備部: 平成12年度一般国道42号外6線県単道路路面性状調査(国道)業務委託報告書, 2000.
- 21) 三重県県土整備部: 平成12年度主要地方道桑名大安線外111線県単道路路面性状調査(県道)業務委託報告書, 2000.
- 22) 藤井治嘉: 道路舗装の維持管理, 土木学会論文集, No.366, pp.13-26, 1986.
- 23) 建設省道路局国道第一課, 建設省土木研究所: 舗装の維持修繕の計画に関する調査研究, 第33回建設省技術研究会報告, pp.215-238, 1979; 第34回同報告, pp.323-362, 1980; 第35回同報告, pp.301-323, 1981;
- 24) 建設省道路局国道第一課, 建設省土木研究所: 舗装の管理水平と維持修繕工法に関する総合的研究, 第41回建設省技術研究会報告, pp.362-381, 1987.
- 25) 安崎裕, 片倉弘美, 伊佐真秋: 舗装の供用性と車両走行費用に関する検討, 第18回日本道路会議一般論文集, pp.710-711, 1989.
- 26) 飯島尚, 今井博, 猪股和義: MCIによる舗装の供用性の評価, 土木技術資料, Vol.23, pp.577-582, 1981.
- 27) 建設省土木研究所: 舗装の供用性と車両走行費用に関する検討, 土木技術資料, Vol. 23, pp. 577-582, 1981.

予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルール*

田村謙介**, 慈道充***, 小林潔司****

本研究は、道路舗装の不確実な劣化過程を念頭におきながら、予算制約の下で道路舗装の合理的な修繕順位を決定する舗装修繕システムを開発する。そのために、各道路区間にに対して利用者費用と修繕費用で構成される期待ライフサイクル費用を最小するような状況依存的修繕ルール提案する。その上で、各年度の修繕予算の中で、費用便益ルールにより期待ライフサイクル費用を可能な限り小さくするような修繕順位を決定する方法を提案する。さらに、三重県を対象とした実証分析事例を通じて本研究で提案した方法論の有効性を検証する。

THE REPAIRING RULES FOR PAVEMENTS UNDER BUDGET CONSTRAINTS*

By Kensuke TAMURA**, Mitsuru JIDOU*** and Kiyoshi KOBAYASHI****

In this paper, a system methodology is presented to manage road pavement under budget constraints considering uncertainty around pavement deterioration. In doing so, the optimal repairing rules for individual road segments are formulated to minimize life cycle costs comprising user and repairing costs. And, the cost-benefit rules to find out the repairing orders, which can reduce the life cycle costs as much as possible, are presented. The applicability of the methodology presented in the paper is investigated by a case study conducted for Mie prefecture.