

目視点検による実用的舗装修繕ルール

松島 格也¹・小林 潔司²・貝戸 清之³

¹京都大学准教授 大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:matsushima.kakuya.7u@kyoto-u.ac.jp

²フェロー会員 京都大学教授 経営管理研究部 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:kobayashi.kiyoshi@kyoto-u.ac.jp

³正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

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

長期的なライフサイクル費用の低減を目的とした舗装マネジメントの重要性が指摘されているが、現実には対症的な維持管理に留まっている場合が少なくない。本研究では国土交通省による平成28年度版の舗装点検要領に基づいて、効率的な舗装の維持修繕や打ち替え(更新)を実施できるような実用的な舗装修繕ルールを提案することを目的とする。具体的には、現場の技術者による目視点検結果に基づいて、維持修繕や打ち替えのタイミングや修繕方法を決定する簡便なルールを提案する。その際、修繕ルールの合理性や客観性を担保するために、これまでに蓄積された路面性状調査結果に基づいて作成したパフォーマンスカーブを活用する。最後に、本方法論に実在する一般国道の点検データを適用し、本研究の有用性について議論する。

Key Words : *lifecycle cost, pavement management, deterioration speed, inspection data*

1. はじめに

近年、社会基盤施設の老朽化、緊縮財政を背景に、ライフサイクル費用(以下、LCC)の低減を目的としたアセットマネジメントの重要性が高まってきている。そのため、国土交通省では舗装路盤、路床の保護を通じた舗装の長寿命化に取り組んでいる¹⁾。国土交通省では、適切な時期に適切な維持・修繕工法を意思決定するために、舗装表層の管理水準と、舗装表層の使用目標年数に基づき、舗装各層の維持・修繕を意思決定するための区分を4段階(区分I~区分IV)に設定している。しかしながら、舗装の劣化過程は構造条件、環境条件等の様々な因子により異なるため、使用目標年数の設定は道路管理者の判断に委ねられている。今後、LCCの低減を目的とした舗装マネジメントを目指すのであれば、使用目標年数から恣意性を排除し、かつLCCの最小化が見込めるような区分基準を活用することが望ましい。そのためには、維持・修繕の意思決定に必要なデータベースを活用し、使用目標年数を客観的な評価に基づき決定する必要がある。

本研究では、現場の技術者による目視点検の結果に基づいて、舗装の修繕タイミングや修繕方法を判定できるような実用的な舗装修繕ルールを提案する。舗装の修繕ルールは舗装の区分基準と使用目標年数で構成される¹⁾。目視点検の結果が十分蓄積されていれば、目視点検結果を用いて修繕ルールを設計できるが、現在のところ目視点検の結果は十分蓄積されておらず、また

その精度の検証も不十分である。したがって、本研究ではこれまでの定期点検により蓄積された路面性状データを活用してパフォーマンスカーブを推計し、区分基準と使用目標年数で構成される修繕ルールを決定するという方法論を採用する。具体的には、ある修繕ルールを採用したときに実現するLCC評価を行い、年平均費用を最小にするような修繕ルールを選択する。修繕ルールが作成できれば、目視点検の結果に基づいて、現場の技術者が容易に修繕タイミングや修繕の優先順位を決定することが可能になる。以下、2.で本研究の基本的な考え方を述べる。3.では、本研究で使用目標年数を決定手法について説明する。最後に、4.では、実在する一般国道の点検データを用いた実証分析を通じて、本研究の有用性を示す。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往研究の概要

社会基盤施設の劣化予測手法は、力学的手法と統計的手法に大別されるが、本研究では社会基盤施設のマネジメント戦略を検討するため、後者を採用する²⁾。統計的劣化予測手法に関して、多様な劣化予測モデルが提案されている²⁾⁻¹²⁾。その中でも、マルコフ推移確率の推計に複数の指数ハザードモデルを用いた多段階階数劣化ハザードモデル(マルコフ劣化ハザードモデル)²⁾の開発により、マルコフ推移確率の非集計的な推計が可能となり、推計に用いることのできる点検データ

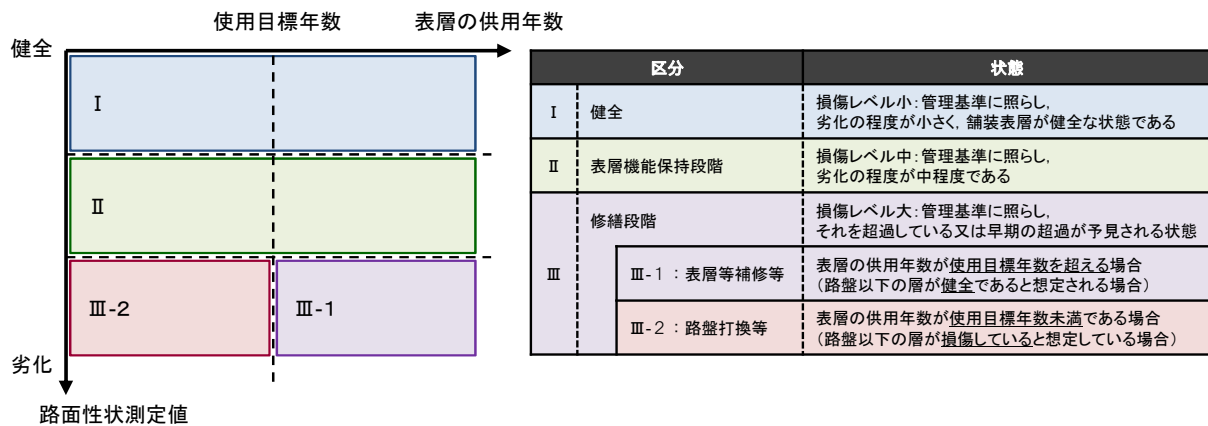


図-1 点検要領に基づく区分基準¹⁾

の数が増加し、パラメータの推計精度が飛躍的に向上した。そして、マルコフ劣化ハザードモデルでは、ハザード率に構造特性、使用・環境条件の相違を説明変数として内包することが可能となっている。

また、本研究では、舗装各層の適時修繕によるLCCの最小化を目的としている。これまでにも、表層の健全状態と路盤の健全状態の双方を考慮して、双方の劣化予測を行う手法は開発されている⁹⁾が、この手法の適用には、各層の劣化状態を評価したデータが必要となる。例えば、FWD調査では各層の耐荷力が測定されることから、既往研究⁹⁾では、この耐荷力が舗装の健全状態と関係すると考えて、方法論を開発している。しかしながら、実務において、FWD調査は路盤修繕の検討が必要な道路区間に対してのみ実施されていることが多い。その上、FWD調査は目視点検と比較して費用が膨大で、時間も要するため、財政逼迫の状況にある自治体においては、FWD調査により十分量のデータを蓄積することは現実的ではない。そこで、本研究では表層の劣化状態を評価した目視点検データのみを活用して、舗装の維持・修繕を意思決定できるような方法論を開発する。その際、既往研究⁹⁾において、路盤の耐荷力が低下していれば、表層の劣化も早いことが実証されているため、本研究においても、適用対象とする一般国道ではこの現象が成立すると仮定する。

(2) 現行の区分基準

国土交通省では、舗装の効率的な維持・修繕を目的とした区分を図-1のように設定している¹⁾。この区分を用いて表層や基層の適時修繕を実施し、路盤以下の層の保護等を通じた舗装の長寿命化を試みている。区分Iと区分IIは、路面性状測定値(ひび割れ率、わだち掘れ量)を管理基準として、それぞれ表層の劣化の程度に基づき判定されている。そして区分III-1(以下、区分III)と区分III-2(以下、区分IV)は管理基準と、表層の使用目標年数を用いて判定されている。使用目標

年数よりも長く供用して、かつ管理基準を超過している道路区間は、区分IIIと判定され、表層、あるいは基層までの舗装部分を対象とした修繕が検討される。一方で、使用目標年数以内に管理基準を超過した道路区間は、区分IVと判定され、路盤の修繕が検討される。しかしながら、道路舗装には環境条件、構造条件等の多様な要因が介在し、劣化過程にバラつきが生じることから、使用目標年数は各道路管理者の判断に基づき設定される。平成29年3月に公表された舗装点検要領¹⁾では、「管内の修繕実績や大型車交通量区分等に応じ、地方整備局等において使用目標年数を適切に設定する。」と定められている。舗装マネジメントを実施するには、区分基準から可能な限り恣意性を排除することが望ましい。本研究では、これまでに蓄積されてきた路面性状調査を用いて、可能な限り客観的に使用目標年数を決定する方法論を提案する。

(3) 目視点検と路面性状調査

国土交通省が管理する国道においては、ある一定頻度で日常巡回が行われその中で道路舗装の状態が目視点検で点検されている。目視点検の結果を用いて年度毎の補修の優先度を判断し、修繕すべき箇所を決定するというマネジメント手法が幅広く採用されている。ある自治体内の国管理直轄国道において、日常巡回時に確認された路面の変状と路面性状調査の結果を比較した図を図-2に示す。同図には、平成22年に行われた日常巡回記録のうち、路面性状に関係すると考えられる変状(路面クラック、ポットホールあり、など)の個数と、翌平成23年に行われた路面性状調査で計測されたひび割れ率のデータとを、20mピッチ毎に記録している。同図より、変状が発見された区間では概ねひび割れ率の値が大きくなっているものの、比較的大きなひび割れ率が計測された区間においても前年に変状が記録されていない区間がいくつか見られることがわかる。このように点検結果のばらつきが見られることは、目

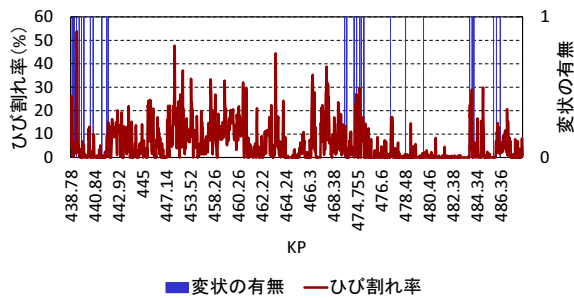


図-2 日常巡回時の点検結果と路面性状調査結果との比較

視点検技術がまだ成熟しておらず、今後点検結果を蓄積しその精度を検証し続けることが必要であることを示唆している。したがって、現在の段階では目視点検結果のみを用いて精度の良いパフォーマンスカーブを推計し舗装マネジメントを行うことは困難である。次章以降では、これまでに蓄積されたきた路面性状調査結果を用いて推計したパフォーマンスカーブに基づいてLCCを最小化する使用目標年数基準を設定する方法論を提案する。

3. 使用目標年数の決定手法

(1) 使用目標年数決定の手順

図-3に沿って、年平均費用が最小となる使用目標年数を決定する。また、本研究ではライフサイクルを「新設または路盤打ち換え後から、次回に路盤を打ち換えるまでの期間」と定義している。具体的な流れとして、1) 最新の修繕工法を説明変数とした舗装表層の劣化予測モデルを推計し、表層、基層を切削オーバーレイ後の期待寿命と、路盤打ち換え後の期待寿命を算出する。2) 1)の結果に基づき、新設または路盤打ち換え後に実施した切削オーバーレイの回数（以下、修繕回数）ごとに期待寿命を算出する。3) ライフサイクル期間中の修繕回数（以下、修繕総数）を政策変数として設定し、修繕回数が修繕総数に達したら2)の結果を活用してライフサイクル期間を算出する。4) 3)の結果と修繕費用データを活用してLCCを算出する。5) LCCをライフサイクル期間を用いて年平均費用を算出する。6) 修繕総数を変化させて3)~5)を繰り返す。7) 6)で得られた結果の中で、年平均費用が最小となる修繕総数を決定する。8) 7)で決定した修繕総数の回数の修繕を実施後の期待寿命を使用目標年数とする。

(2) モデル化の前提条件

カレンダー時刻 s_0 を初期時点とする離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考え、離散的時間軸上の点を時点とよび、カレンダー時刻と区別する。単位時間幅を1に基準化する。舗装路面の健全度を I 個のレーティング $i (i = 1, \dots, I)$ によって表現する。 i の値は大きくなるほ

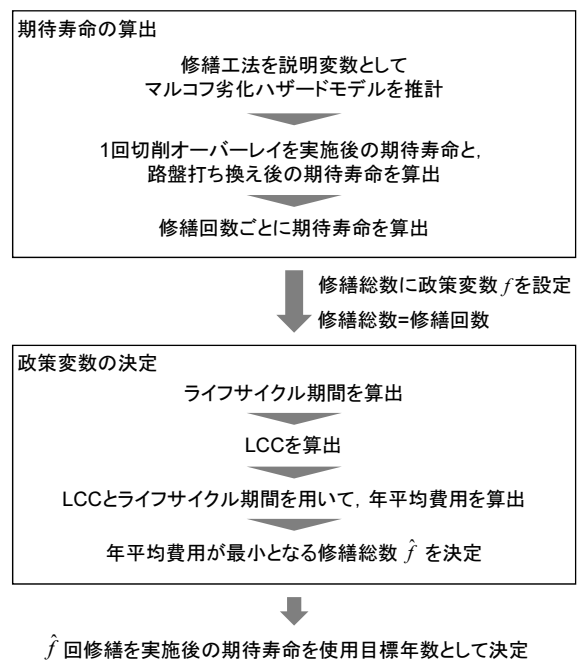


図-3 使用目標年数を決定するまでの流れ

ど、劣化が進展していることを示す。時点 t における路面の健全度を状態変数 $h(t) = i (i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots)$ を用いて表現する。ここで、 I は吸収状態である。路面の劣化過程がマルコフ連鎖に従うと仮定し、離散時間軸上の単位時間間隔における健全度間の推移確率をマルコフ推移確率を用いて表現する。マルコフ推移確率は、時点 t における定期点検において観測された健全度 $h(t) = i$ を与件とし、次の時点 $t+1$ における健全度 $h(t+1) = j (j \geq i)$ が生じする条件付き確率

$$\text{Prob}[h(t+1) = j | h(t) = i] = \pi_{ij} \quad (1)$$

を用いて定義される。このような推移確率を全ての健全度ペア (i, j) に対して定義することにより、マルコフ推移確率行列

$$\pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \cdots & \pi_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{II} \end{pmatrix} \quad (2)$$

を定義することができる。マルコフ推移確率 (1) は所与の2つの時点 $t, t+1$ の間において生じる健全度間の推移確率を示したものである。対象とする点検間隔が異なれば推移確率の値は異なる。補修がない限り常に劣化が進行するため、 $\pi_{ij} = 0 (i > j)$ が成立する。状態 I は、補修のない限りマルコフ連鎖における吸収状態であり、 $\pi_{II} = 1$ が成立すると考える。なお、マルコフ推移確率は過去の状態履歴には依存しない。マルコフ推移確率モデルでは、健全度が $i-1$ から i に推移した時点に関わらず、時点 t から時点 $t+1$ の間に推移する確率は時点 t における健全度のみ依存する性質（マルコフ性）を満足する。

(3) マルコフ劣化ハザードモデル

マルコフ推移確率は、マルコフ劣化ハザードモデルを用いて推計できる。本研究では、津田等²⁾が開発したマルコフ劣化ハザードモデルを用いるが、読者の便宜を図るためモデルの概要を説明しておく。いま、健全度 i ($i = 1, \dots, I-1$) の寿命を確率変数 ζ_i で表す。健全度 i の寿命が、確率密度関数 $f_i(\zeta_i)$ 、分布関数 $F_i(\zeta_i)$ に従うと仮定する。ここで、健全度が変化した時刻 τ_i ($i = 0, \dots, I-2$) を起点とする時間軸（以下、サンプル時間軸と呼ぶ）を考える。健全度 i のサンプル時間軸上で、カレンダー時刻 τ_{i-1} からの経過時間を y_i と表記する。定義より、時刻 τ_{i-1} では $y_i = 0$ となる。ここで、時刻 τ_{i-1} に健全度が i となり、そこから時間 y_i が経過した時刻において健全度が $i+1$ に変化する確率密度をハザード率 $\lambda_i(y_i)$ を用いて表現する⁴⁾。ハザード率は、健全度が i となった時刻から、時間 y_i が過ぎる間、健全度が i のまま継続する生存確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて、

$$\lambda_i(y_i)\Delta y_i = \frac{f_i(y_i)\Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \quad (3)$$

と表せる。すなわち、ハザード率 $\lambda_i(y_i)$ は、初期時刻 τ_{i-1} ($y_i = 0$) から時間 y_i が経過するまで健全度 i の状態が継続したという条件のもとで、期間 $[y_i, y_i + \Delta y_i)$ 中に健全度 $i+1$ に進展する条件付き確率である。ハザード率が経過時間 y_i に依存せず、常に一定値 $\lambda_i > 0$ ($i = 1, \dots, I-1$) をとる場合、指数ハザード率

$$\lambda_i(y_i) = \lambda_i \quad (4)$$

が成立する。指数ハザード率を用いることにより、劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現できる。さらに、指数ハザード率を用いれば、健全度 i の寿命が y_i 以上となる確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ は、

$$\tilde{F}_i(y_i) = \exp(-\lambda_i y_i) \quad (5)$$

と表現できる。

さらに、カレンダー時刻 τ_A の点検の結果、健全度が i が判断されたとする。そののち、時刻 τ_A から追加的に期間 z ($z \geq 0$) 以上に亘って健全度 i が継続する確率 $\tilde{F}_i(\tau_A + z | \zeta_i \geq \tau_A)$ は

$$\begin{aligned} \tilde{F}_i(\tau_A + z | \zeta_i \geq \tau_A) &= \text{Prob}\{\zeta_i \geq \tau_A + z | \zeta_i \geq \tau_A\} \\ &= \frac{\exp\{-\lambda_i(\tau_A + z)\}}{\exp(-\lambda_i\tau_A)} = \exp(-\lambda_i z) \end{aligned} \quad (6)$$

と表される。すなわち、点検時刻 τ_A において健全度が i と判定され、次の点検時刻 $\tau_B = \tau_A + z$ においても健全度が i と判定される確率は

$$\text{Prob}[h(\tau_B) = i | h(\tau_A) = i] = \exp(-\lambda_i z) \quad (7)$$

となる。ただし、 z は2つの点検時刻の間隔を表す。確率 $\text{Prob}[h(\tau_B) = i | h(\tau_A) = i]$ はマルコフ推移確率 $\pi_{ii}(z)$ にほかならない。指数ハザードを用いた場合、推移確率 $\pi_{ii}(z)$ はハザード関数 λ_i と点検間隔 z のみに依存し、

時刻 τ_A , τ_B に関する情報を用いることなく推移確率を推計することが可能となる。以上の議論を拡張し、指数ハザード関数を用いて、点検時刻 τ_A と $\tau_B = \tau_A + z$ の間で健全度が i から j ($j > i$) に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z)$ ($i = 1, \dots, I-1, j = 1, \dots, I$) は

$$\begin{aligned} \pi_{ij}(z) &= \text{Prob}[h(\tau_B) = j | h(\tau_A) = i] \\ &= \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_s} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_{m+1} - \lambda_s} \exp(-\lambda_s z) \end{aligned} \quad (8)$$

と表すことができる²⁾。また、 π_{iI} に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\pi_{iI} = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{ij}(z) \quad (9)$$

なお、マルコフ劣化ハザードモデルを用いれば、アセットマネジメントのためのリスク管理指標を導出できる。すなわち、当該健全度にはじめて到達した時点から、劣化が進展して次の健全度に進むまでの期待期間長（以下、期待寿命と呼ぶ）は、生存関数 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \tilde{F}_i(y_i) dy_i \quad (10)$$

と表される⁴⁾。ここで、指数ハザード関数を用いた生存関数 $\tilde{F}_i(y_i)$ が式 (5) で表されることに留意すれば、期待寿命は次式で表される。

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_i y_i) dy_i = \frac{1}{\lambda_i} \quad (11)$$

式 (11) に基づき、初期時点からの経過年数と舗装路面の平均的な健全度との対応関係を求めることができる。

(4) LCC 分析

LCC 分析に基づき、使用目標年数を決定する。本研究では、ライフサイクル期間に発生した修繕費用を、ライフサイクル期間で割った年平均費用が最小となる修繕総数を決定し、その修繕総数の最後に実施した修繕後の期待寿命を使用目標年数とする。

a) 年平均費用の算出

ライフサイクル期間を算出する際、路盤打ち換え後の期待寿命と切削オーバーレイ後の期待寿命を用いる。期待寿命を算出する際に、切削オーバーレイの回数ごとの期待寿命を算出することが望ましいが、適用したデータには切削オーバーレイを2回以上実施したデータが存在しなかった。ここで、切削オーバーレイを繰り返すごとに、表層、あるいは基層までの健全性は回復されるが、路盤の健全性を回復することができないため、舗装全体の耐荷力は低下し続けると一般的に考えられている。このことから、本研究では、路盤打ち換え後から、切削オーバーレイを重ねるごとに期待寿命は短くなると想定する。具体的には、切削オーバー

レイを2回以上実施した後の期待寿命は、

$$RMD_i^e = RMD_i^{e-1} \frac{RMD_i^1}{RMD_i^0} \quad (12)$$

に従い、漸近的に短くなると仮定する。ここで、 $i(i = 1, \dots, I - 1)$ は健全度、 $e(e = 2, 3, \dots)$ は修繕回数、 RMD_i^e は切削オーバーレイを e 回実施した後の期待寿命とする。また、 $e = 0$ は新設、あるいは路盤打ち換え後の期待寿命とする。その上で、年平均費用が最小となる修繕総数を考える。まず、ライフサイクル期間 LC は、式 (11) を用いて、

$$LC^f = \sum_{g=0}^f \sum_{i=1}^{I-1} RMD_i^g \quad (13)$$

と定式化する。 f は任意の切削オーバーレイ回数を表す。次に、切削オーバーレイを f 回実施したことにより発生するコスト LCC^f を、

$$LCC^f = c + df \quad (14)$$

と定式化する。 c は、路盤打ち換えにより発生する費用、 d は切削オーバーレイにより発生する費用を表している。式 (13) と式 (14) を用いて、切削オーバーレイを f 回実施した場合の、年平均費用 AAC^f は

$$AAC^f = \frac{LCC^f}{LC^f} \quad (15)$$

と定式化できる。

b) 使用目標年数の決定

3. (3) a) にて算出した年平均費用を用いて、使用目標年数を決定する。具体的に、年平均費用が最小となる修繕総数 \hat{f} を

$$\hat{f} = \arg \min_f (AAC^f) \quad (16)$$

に従い決定した上で、 \hat{f} 回修繕した後の期待寿命を使用目標年数とする。

4. 実証分析

(1) 適用データの概要

ある自治体内にある国道の点検データに本方法論を適用し、本研究の有用性を検討する。道路管理者は、「舗装点検要領¹⁾」に基づき、5年に1回程度以上の頻度を目安として、舗装に対して目視等の点検を実施している。その点検では、路面性状が測定されており、そのデータが蓄積されている。本研究では平成22年度から平成26年度を通して蓄積されたひび割れ率のデータを用いる。舗装は、ひび割れが発生した箇所からの雨水等の浸入や、車軸による荷重が原因となり加速度的に劣化が進展するため、舗装のひび割れ発生の有無によって、ひび割れの進展速度が大きく異なる。また、ひび割れ率に基づいた管理基準は、道路管理者が独自に設定している場合もあるが「舗装点検要領¹⁾」に参考

表-1 ひび割れ率：Cr(%)

健全度	閾値
1	Cr=0
2	0 < Cr ≤ 10
3	10 < Cr ≤ 20
4	20 < Cr ≤ 30
5	30 < Cr ≤ 40
6	40 < Cr

表-2 適用データ諸元

調査年度	平成22年度～平成26年度						
道路特性	地域特性、大型車交通量 最新の修繕工法						
舗装種別	密粒度舗装、排水性舗装						
密粒度舗装	事後健全度						
	1	2	3	4	5	6	
事前健全度	1	620	607	41	9	5	7
	2		785	278	77	21	33
	3			56	47	35	27
	4				11	12	20
	5					2	15
	6						21
排水性舗装	事後健全度						
	1	2	3	4	5	6	
事前健全度	1	914	637	105	31	15	14
	2		234	94	33	9	4
	3			13	10	4	0
	4				5	3	0
	5					2	0
	6						0

値が記述されている。このことから、本研究ではひび割れ率について、表-1のように離散的な健全度を設定した。

推計に使用する情報サンプルは同一道路区間に対する2回の点検データ（事前健全度、事後健全度）とその点検間隔を1情報サンプルとしてカウントした。本研究で適用した点検データには道路区間が修繕された時点、工法が記録されていたことから、修繕直後はひび割れが無い状態になると想定し、仮想的に事前健全度1を設定する。また、舗装台帳には、道路舗装の特性を表現する項目として、「地域特性（積雪地域か、非積雪地域）」、「大型車交通量（台/日）」、「最新の修繕工法」が記録されていた。「最新の修繕工法」には、調査時期の直近の修繕時期と修繕工法が記録されていた。その中でも、表層と基層では切削オーバーレイ、路盤では打ち換えが工法として多く採用されていた。切削オーバーレイを実施した場合、表層、基層の健全性は回復するが、路盤の健全性までは回復されない。そのため、路盤が打ち換えられたばかりの道路区間と、切削オーバーレイを実施した道路区間とでは、耐荷力に差異が生じ、舗装路面の劣化速度にも差異が生じる。以上のことから、これらの3つの特性を説明変数として採用する。また、舗装種別は、密粒度舗装と排水性舗装に大別され、それぞれ劣化形態が大きく異なることから、サンプルを分けて分析を行う。その結果、密粒度舗装は

表-3 未知パラメータの推計結果： $\hat{\theta}^f$

	健全度 $i \rightarrow i+1$	定数項 $\beta_{i,0}^f$	地域特性 $\beta_{i,1}^f$	修繕工法 $\beta_{i,2}^f$
密粒度	1	-1.66	0.61	0.33
	t 値	(-30.10)	(7.23)	(3.15)
	2	-2.34	0.27	-
	t 値	(-34.42)	(2.85)	(-)
	3	-1.52	0.48	-
t 値	(-14.67)	(3.55)	(-)	
排水性	4	-0.80	-	0.67
	t 値	(-7.87)	(-)	(2.68)
	5	-0.85	-0.79	-
	t 値	(-3.80)	(2.91)	(-)
	1	-2.09	0.40	0.47
t 値	(-19.59)	(5.27)	(4.39)	
排水性	2	-1.94	-	-
	t 値	(-33.03)	(-)	(-)
	3	-1.15	-	-
	t 値	(-11.55)	(-)	(-)
	4	-0.85	-	-
t 値	(-5.37)	(-)	(-)	
5	-1.13	1.85	-	
t 値	(-3.52)	(2.80)	(-)	

2,729 サンプル、排水性舗装は 2,127 サンプルを獲得した。以上の内容とデータを整理した結果を表-2 に示す。

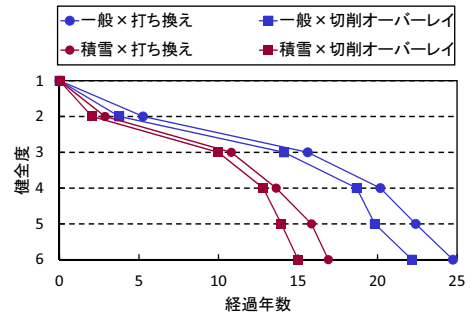
(2) モデル推計

3. にて記述したマルコフ劣化ハザードモデルを推計する。説明変数は、「地域特性」「大型車交通量」「修繕工法」を用いる。上記 2 項目のうち定性的な項目に対してはダミー変数を設定しており、「地域特性」は非積雪地域を 0、積雪地域を 1、「修繕工法」は、表層あるいは基層の切削オーバーレイを 1、路盤打ち換えを 0 と設定している。そして、「大型車交通量」は連続値として用いる（ただし、観測値の最大値を 1 として基準化して用いる）。また、3. にて記述した、ハザード率について、本研究では、

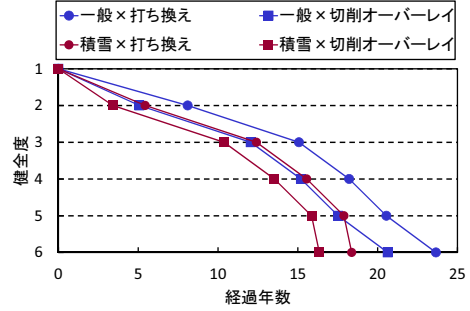
$$\lambda_i = \exp(\mathbf{x}\beta_i^f) \quad (17)$$

と表す。ただし、 $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_M)$ は説明変数ベクトル、 $\beta_i = (\beta_{i,0}, \beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,M})$ は未知パラメータベクトルとする。ここで、記号' は転置を、 M は説明変数の数を表す。説明変数のパラメータ選定にあたっては、 t 検定を実施し、 t 値の絶対値が 1.96 を上回っていれば説明変数が舗装路面の劣化過程に対して統計的に有意であると判断し、採用している。

ここで大型車交通量を説明変数として採用した場合、重交通になるほど劣化が遅くなるという結果が得られた。一般的には、舗装厚が等しければ重交通になるほど劣化が早くなると考えられている。しかし、重交通区間では予めアスファルト層厚を厚く設計しているため、重交通区間であるからといって必ずしも表層の劣化が早いとは言い切れない。このことから LCC 分析の



(a) 密粒度舗装



(b) 排水性舗装

図-4 期待劣化パス

表-4 LCC 分析に活用する値

舗装種別	地域	修繕回数				
		0	1	2	3	...
密粒度	非積雪	24.7	22.2	19.9	17.8	...
密粒度	積雪	16.9	15.0	13.3	11.8	...
排水性	非積雪	23.7	20.6	18.0	15.7	...
排水性	積雪	18.4	16.3	14.5	12.9	...
修繕工法		費用				
切削オーバーレイ		5,000 円/ m^2				
打ち換え工法		18,000 円/ m^2				

際には、大型車交通量を説明変数として採用しない。

以上の分析に基づき、LCC 分析に用いるマルコフ劣化ハザードモデルの推計結果を表-3 に示す。この結果から、それぞれの舗装で、積雪地域、打ち換え後に切削オーバーレイを実施した場合の劣化が早いことが分かる。3. (2) の式 (11)、表-3 の推計結果に基づき、道路特性が舗装路面の劣化速度に及ぼす影響を期待寿命として評価する。その結果を、舗装種別ごとに図-4 (a)、図-4 (b) に示す。本研究では、この期待寿命を活用して使用目標年数を決定する。

(3) 使用目標年数の決定

まず、LCC 分析のための前提条件について説明する。表-3 の推計結果から、一度でも切削オーバーレイを行うと、一度も切削オーバーレイを行っていない場合よりも期待寿命が短くなることがわかる。そして、区分 IV の道路区間は、区分 I~区分 III の道路区間よりも劣化が早い傾向にあると一般的に考えられている。このことから、路盤の打ち換え後からは、路面の切削オーバー

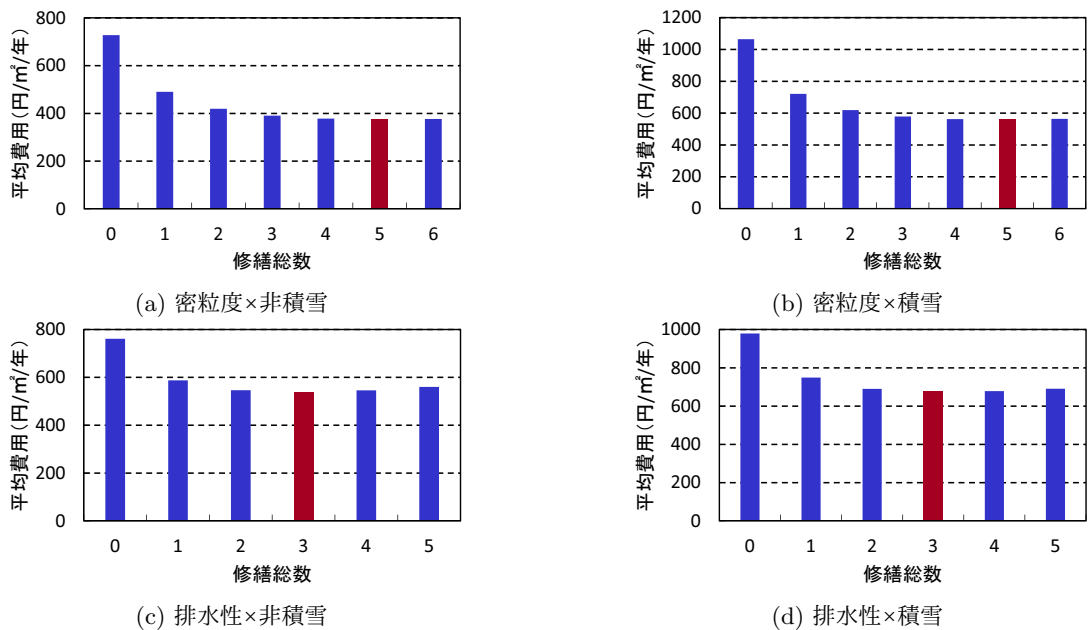


図-5 ライフサイクル期間の年平均費用 (円/m²/年)

レイを重ねるごとに、路面の劣化は徐々に早くなる、と想定する。しかし、今回適用したデータには、路盤打ち換え後に切削オーバーレイを2回以上実施した道路区間が存在しなかった。そのため、路盤打ち換え後から切削オーバーレイを1回実施したときの劣化速度の増加率を算出し、式(12)で提案した方法論に基づき、切削オーバーレイを2回以上実施した後の期待寿命を算出した。また、ライフサイクル期間の年平均費用を算出するにあたり考慮する修繕費用は、「舗装点検要領の制定について¹³⁾」に基づき設定する。以上の内容を表-4にまとめる。ここで、舗装種別や、対象とする層によって費用は変化するが、本分析においてはそれらのデータは得られなかったことに留意されたい。続いて、年平均費用を算出した結果を図-5に示す。この結果から、密粒度舗装においては、修繕総数が5回となる場合に、排水性舗装においては、修繕総数が3回となる場合に、年平均費用が最小となることが分かる。その中で、例えば密粒度舗装の非積雪地域について、切削オーバーレイを5回実施後の期待寿命は14.3年となるため、近似的に前回の修繕から14年以内に管理限界に到達する道路区間の路盤を打ち換えれば年平均費用が最小となる。つまり、年平均費用が最小になる使用目標年数は14年と決定できる。同様に、使用目標年数は、積雪地域の密粒度舗装では9年、一般地域の排水性舗装では15年、積雪地域の排水性舗装では12年となる。

以上のことから、本研究で提案する区分基準を図-6に示す。例えば、一般地域の密粒度舗装では、「前回修繕から14年以内にひび割れ率が40%を超過」した場合、区分IVと判定され、その道路区間に対しては路盤の打

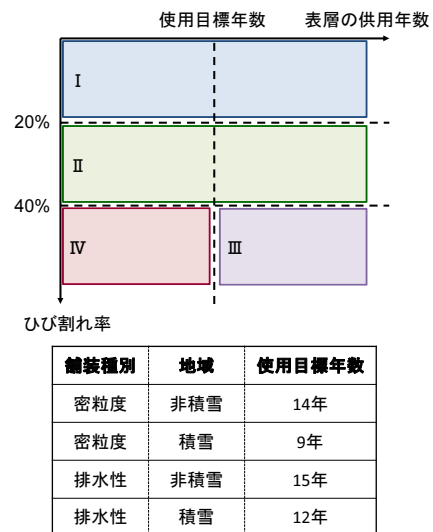


図-6 提案する区分基準

ち換えが検討される。一方で、「前回修繕から14年後以降にひび割れ率が40%を超過」した場合は、区分IIIと判定され、表層、あるいは基層に対して切削オーバーレイを検討する。このように、本方法論を援用することにより、路面性状、修繕時点、修繕工法のデータが獲得できれば、使用目標年数を決定することができる。

5. おわりに

本研究では、目視点検結果に基づいて、修繕タイミングや修繕方法を簡便に判断できるような実用的な舗装修繕ルールを決定する方法論を提案した。2.(3)で考察したように、現時点では目視点検結果の精度が十

分ではなくパフォーマンスカーブを推計することが困難である。そこで、これまで蓄積されてきた路面性状調査の結果を用いてパフォーマンスカーブを推計し、可能な限り客観的な方法で修繕ルールを設計する方法論を採用した。

一方、本研究に関連し、今後に残された課題を以下に列挙する。まず、目視点検結果を十分に蓄積し、その精度について検証することが必要不可欠である。それと並行して、路面性状調査をサンプル的に実施し、目視点検データの情報精度を検証することが不可欠である。また、部分的に路面性状調査を実施し、パフォーマンスカーブの推計と、修繕ルールの妥当性を継続的に事後評価することが重要である。次に、舗装マネジメントの高度化に活用できるデータベースの構築が挙げられる。道路区間が存在しなかった。データベースを拡充することにより、より精度の高い舗装マネジメント手法を提案することができる。また、本研究についての方法論の適用事例を増やす必要がある。

謝辞：本研究の遂行にあたって、新都市社会融合創造研究会プロジェクト「舗装アセットマネジメント高度化に関する研究」の参加メンバーから多大なご協力をいただいた。ここに厚く感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領 平成 29 年 3 月，2017.
- 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) 武山泰，嶋田洋一，福田正：マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム，土木学会論文集，No.420/V-13，pp.135-141，1990.
- 4) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 5) Madanat, S., Bulusu, S. and Mahmoud, A.: Esti-

- mation of infrastructure distress initiation and progression models, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, Vol.1, Issue 3, pp.146-150, 1995.
- 6) van Noortwijk, J. M. and Frangopol, D. M.: Deterioration and maintenance models for insuring safety of civil infrastructures at lowest life-cycle cost, *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures*, ASCE, pp.384-391, 2003.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 小林潔司，貝戸清之，江口利幸，大井明，起塚亮輔：舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル，土木学会論文集 D3，Vol.67，No.4，pp.422-440，2011.
- 10) 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，Vol.68，No.2，pp.62-79，2012.
- 11) 貝戸清之，小林潔司，青木一也，松岡弘大：混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計，土木学会論文集 D3，Vol.68，No.4，pp.255-271，2012.
- 12) 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，Vol.72，No.2，pp.191-210，2016.
- 13) 国土交通省 第 6 回道路技術小委員会：【資料 3-3】舗装点検要領の制定について，2016.

(2017. 6. 16 受付)

PRACTICAL PAVEMENT MANAGEMENT RULES WITH VISUAL INSPECTION

Kakuya MATSUSHIMA, Kiyoshi KOBAYASHI, and Kiyoyuki KAITO

It has been pointed out that pavement management strategies to reduce life cycle cost must be applied. However, most of managers are currently applying symptomatic strategies in reality. This paper proposes a practical pavement management rule in which simple rule to determine the timing and methodologies for pavement repair and renewal based upon the guideline for pavement inspection issued by Ministry of Land, Infrastructure and Transportation in 2017. In detail, a simple rule to determine the timing and the methodology to repair and renew pavement based on the visual inspection result by technicians. In order to provide rational and subjective repair rule, deterioration curve estimated with pavement inspection data by inspection cars is utilized. Effectiveness of the proposed methodology is discussed with inspection data of national highways.