

画一的ルールによる 道路舗装ネットワークの補修意思決定

水谷 大二郎¹・中里 悠人²

¹個人正会員 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

²非会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-814)
E-mail: yuto.nakazato.s1@dc.tohoku.ac.jp

複数の連続した道路舗装区間の補修を検討する場合、近接する複数の舗装区間の補修同期化による効果を考慮することが望ましい。その際、個々の舗装区間の補修の有無を同時決定する必要がある。舗装の劣化を考慮し複数の時点で最適補修区間の厳密解を求めることは現実的でない。この問題に対し、本研究では、点検時にある健全度（管理水準）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）以内のある健全度（第二管理水準）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、という画一的ルールを考える。その上で、ライフサイクル費用に基づき、探索距離と第二管理水準を最適化することにより、効率的に次善補修施策を求める方法論を提案し、数値計算事例によりその有用性を検証する。

キーワード： 舗装アセットマネジメント、画一的ルール、舗装ネットワーク、最適化

1. はじめに

道路舗装のような社会基盤施設の公共性を考えると、その価値を最大化し維持管理を行うアセットマネジメントが必要となる。さらに、予算の縮減や人員制約に伴い、アセットマネジメントの重要性は益々増加している。道路舗装のアセットマネジメントを考えた場合、路線を構成する舗装を 100m や 10m 単位の舗装区間に分割し、個々の舗装区間で劣化状況（健全度）の把握や補修意思決定を行うのが一般的である。道路舗装の補修を行うには、当該舗装区間を規制する必要がある。近接する舗装区間を単一の規制において同時に補修することによって、規制費用と補修費用に同期化便益が生じる。このような同期化便益を考慮し、道路舗装の最適補修施策を求めるためには、それぞれの舗装区間における規制や補修の有無を同時決定する必要がある。膨大な個々の舗装区間の健全度の組合せのそれぞれに対して、規制と補修のパターンの厳密解を最適補修施策として求めることは現実的でない。

この問題に対して本研究では、“ある点検タイミングにおいて、ある健全度（第一管理水準）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）以内のある健全度（第二管理水準）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”という画一的ルールを考える。その上で、対象とする道路舗装における全ての補修区間を最小費用で規制するような規制区間を決定す

る。このような考え方でライフサイクル費用を算出することにより、将来のライフサイクル費用の推移をより現実的に予測するとともに、探索距離と第二管理水準を最適化することにより効率的に次善補修施策を求める方法論を提案する。

以下、2. で本研究の基本的な考え方、3. で道路舗装の劣化状況の設定、4. で補修施策、5. で数値計算例について説明する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 画一的ルールと補修同期化

社会基盤施設の将来の劣化過程に基づきライフサイクル費用を算出する際には、個々の社会基盤施設を独立に考えることも少なくない¹⁾。しかし、実際の道路舗装の補修業務においては、図-1のように、近接する複数の舗装区間を同時に補修することで別々に補修を行う場合より補修の固定費用を削減できることに着目し、単一舗装区間の最適補修戦略では補修が必要ないとされる区間でも、近隣の要補修区間と同時に補修を行う（補修の同期化）場合がある。

同期化便益を考慮した補修戦略が現場で行われている以上、実際の道路舗装のライフサイクル費用を、単一舗装区間のライフサイクル費用の区間数倍で評価するのは不十分であり、リスク水準も補修戦略の違いにより単一区間のものと異なる。道路舗装の特性をより正確に把握するためには、補修の同期化を考慮した道

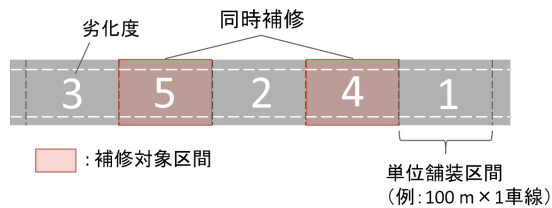


図-1 補修の同期化の例（劣化度 5 が管理水準と想定．劣化度 5 の舗装区間を補修する際に，劣化度 5 の舗装区間に近接した劣化度 4 の舗装区間も同一の規制において予防的に同時補修する可能性がある．）

路舗装全体のリスク水準やライフサイクル費用の評価が必要となる。

一方で，実務において，舗装補修の同期化が実施されているが，どの程度近接し，どの程度劣化の進展した舗装区間を予防的に補修すれば良いのかに関して明確な基準があるわけではない．この点を解決するにあたり，多数の舗装区間からなる道路舗装全体の最適補修戦略を見つけるのは現実的ではない．各舗装区間の劣化状態の組み合わせである道路舗装全体の劣化状態の数は膨大であり，現れうる全ての劣化状態の組み合わせ各々に対する最適補修戦略の計算は不可能に近い．これに対し本研究は，同期化便益の性質に着目し，点検時にある劣化度（管理水準）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）以内のある劣化度（第二管理水準）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，道路舗装全体の劣化状況から規制・補修戦略を提案する画一的ルールを提案する．その上で，与えられた外生パラメータ（e.g. 費用パラメータ，劣化パラメータ）をもとに，画一的ルールの割引総費用が最小となる目的変数（探索距離，第二管理基準）をシミュレーションで求め，以降補修戦略を画一的ルールで求める次善補修施策を提案し，その有用性を簡単な数値例で検証する．

(2) 既往研究

社会基盤施設のアセットマネジメントに関してはすでに多くの研究が行われており，劣化状態を離散的な状態変数で記述する，マルコフ決定モデル²⁾を用いた最適補修戦略に関する研究は多く存在する³⁾．しかし，前述したとおり複数の舗装区間からなる道路舗装に対する最適補修施策の計算は不可能に近いため，道路舗装のような同期化便益を持つ基盤施設の補修施策に関する研究は非常に少なく，そのほとんどは単一時刻に

おける補修費用が最小となる規制・補修戦略のみに着目した研究である．Lethanh et al.⁵⁾や保田等⁸⁾は，ともに補修時点での費用を最小化することを目的として，前者は予算制約，後者は危険コストをさらに考慮した研究であるが，両者ともに補修同期化による長期費用の減少を考慮していない．坂井等⁷⁾は，補修同期化を考慮した補修施策でシステム全体のライフサイクル費用を抑えることが可能であることを示したが，具体的にはどのような施策で規制・補修が行われるのかは議論していない．織田澤等⁶⁾は，複数の異なる設備からなるシステムの補修同期化便益に着目している．当該研究は最適補修戦略の候補を列举できるような（あるいは，現実性を考慮しその候補数を削減できるような）状況を想定しているが，システムの構成数が膨大となり同期化便益が要素の距離に依存するような本研究の対象には，当該研究での方法論を直接適用することは困難である．Burkhalter et al.⁴⁾は，補修の同期化ではなく，社会基盤施設のネットワーク特性を考慮した規制・補修による不便益の評価を提案しており，システムの構成数が少ない，利用者便益を評価対象としている，同期化便益がネットワーク性を持つなどの点で本研究と異なる．このように，本研究で提案するような，最適補修戦略の状態空間が膨大な要素を持つ状況において，画一的なルールに基づき次善的な補修施策を求めるための方法論は過去には提案されていない．

(3) 道路舗装の劣化と補修

本研究は補修の同期化に焦点を当てるため，通常の補修業務では発生する(1)点検費用(2)利用者へ与える影響(3)各舗装区間の劣化の異質性は考慮せず，同質の複数の舗装区間からなる道路舗装に対して，固定時間間隔で行われる補修工事（e.g. 切削オーバーレイ）の時間割引総費用を抑える補修施策の提案方法を対象とする．各舗装の劣化度は離散な指標で表し，舗装の劣化を離散マルコフ過程で記述し，舗装の劣化度が管理上設定された劣化度（第一管理基準）に達した場合は必ず補修を行う必要がある．

補修工法は切削オーバーレイなどを想定しているため，補修によって舗装の劣化度は完全に回復し新しいものと同じになるが，補修工事を行う区間に対しては当該区間に対して交通規制を行い，工事用の建設機材を用いて工事を行う必要がある．建設機材は連続した規制区間の間を自由に移動し，複数の舗装を同時に補修することができ，一台の建設機材で複数の近隣区間を同時に補修できる．建設機材の費用削減が道路舗装の補修における補修同期化便益となる．

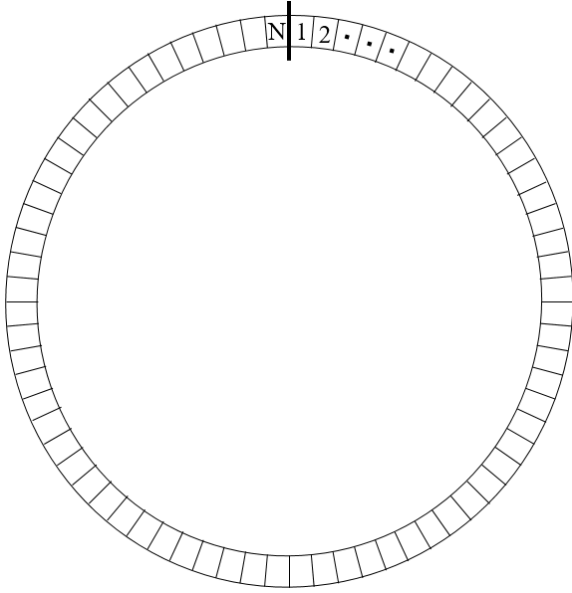


図-2 N 個の舗装区間からなる道路舗装

3. 複数道路舗装区間の劣化・補修過程

(1) 時間軸の設定

複数の連続した道路舗装区間からなる舗装システムの劣化・補修過程をモデル化する。舗装システムが建設されたカレンダー時刻 t_0 を起点とする離散的な時間軸を考える。舗装システムに対しては、 t_0 から同じ時間間隔 d で劣化度の点検を行い、その直後すぐに補修区間の決定及び補修が行われる。 $i(i \in \mathbb{Z}^+)$ 回目の点検補修時刻を t_i とし、点検補修時刻の集合

$$\mathcal{T} \equiv \{t_i | \forall i \in \mathbb{Z}^+\} \quad (1)$$

$$\text{where } t_i = t_0 + id \quad (2)$$

を定義する。

(2) システムの劣化度ベクトル

対象とする舗装システムは図-2 のような、 $N(N = 2, 3, 4, \dots)$ 個の連続かつ同質な舗装で構成されている円環状の道路舗装であり、各舗装区間は時計回りに 1 から N までの区間番号が振られている。舗装区間 $n(n \in \mathcal{N})$ の劣化度 s_n は、 M 個の離散的なレーティングを表す状態変数

$$s_n = m \quad (3)$$

$$\text{where } n \in \mathcal{N} \quad (4)$$

$$m \in \mathcal{M} \quad (5)$$

$$\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\} \quad (6)$$

$$\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\} \quad (7)$$

を用いて表現する。 $\mathcal{N}$ は舗装区間番号の集合、 $\mathcal{M}$ は劣化度の状態空間である。ここでは、 m が大きいほど劣化が進んでいる。以上より、システム全体の劣化度を、 n 番目の要素が s_n の劣化度ベクトル $\mathbf{s}$ で定義する：

$$\mathbf{s} \equiv [s_n] \quad (8)$$

劣化度ベクトルの状態空間は各区間の劣化度の直積で、 $\mathcal{S} = \mathcal{M}^N$ と表記できる。補修前と補修後の劣化度を区別するため、時刻 $t \in \mathcal{T}$ において点検後補修前の劣化度を $\mathbf{s}^-(t)$ 、補修直後の劣化度を $\mathbf{s}^+(t)$ とする。

(3) 劣化過程モデル

まず、単一の舗装区間の劣化過程をモデル化する。舗装の劣化は道路区間の交通量に関係せず、現在の劣化度のみに影響されるとし、劣化過程を斉時マルコフ連鎖を用いて記述する。補修を行った後から、次の点検までに劣化度が $a(a \in \mathcal{M})$ から $b(b \in \mathcal{M})$ に遷移する確率を p_{ab} とする：

$$p_{ab} = \text{Prob}[s_n^-(t_{i+1}) = b | s_n^+(t_i) = a] \quad (9)$$

$$\forall i \in \mathbb{Z}^+ \quad (10)$$

$$\forall a, b \in \mathcal{M} \quad (11)$$

自然劣化によって劣化度が小さくなる (=舗装の状態が良くなる) ことはあり得ないため、 $b > a$ の時、 $p_{ab} = 0$ が必ず成立する。 p_{ab} を用いて、 a 行 b 列が p_{ab} の単一舗装区間の劣化度のマルコフ推移行列 $\mathbf{P}_{sing}$ を定義する

$$\mathbf{P}_{sing} \equiv [p_{ab}] \quad (12)$$

$$\forall a, b \in \mathcal{M} \quad (13)$$

システム全体では、 i 回目の補修後の劣化度ベクトルが特定の $\mathbf{s}^* \in \mathcal{S}$ の時、 $i+1$ 回目の点検までに劣化度ベクトルが特定の $\mathbf{s}^{**} \in \mathcal{S}$ になる確率は、各要素の劣化確率で表すことができ、

$$\text{Prob}[\mathbf{s}^-(t_{i+1}) = \mathbf{s}^{**} | \mathbf{s}^+(t_i) = \mathbf{s}^*] \quad (14)$$

$$= \prod_{n \in \mathcal{N}} p_{s_n^* s_n^{**}} \quad (15)$$

となる。

(4) 劣化・補修過程モデル

劣化した舗装に対して補修工事を行うことで劣化度が減少する (=舗装状態が良くなる)。ここでは舗装に対する補修工法は、劣化度が最小の 1 になる取換工法のみを考慮する。時刻 $t \in \mathcal{T}$ において、各区間に対して補修を行うか否かを二値変数で表す補修ベクトル $\boldsymbol{\delta}(t)$ とすると、補修による劣化度の変化は以下のように表記できる。

$$\mathbf{s}^+(t) = \mathbf{s}^-(t) - [\mathbf{s}^-(t) - \mathbf{1}] \circ \boldsymbol{\delta}(t) \quad (16)$$

$$\text{where } \delta_n(t) \in \{0, 1\} \quad (17)$$

4. 規制・補修戦略

(1) 補修の前提条件

取換工事を行うためには、該当する舗装区間を通行止めにする必要となる。各区間に対して通行止めにするか否かを二値変数で表す規制ベクトル $\xi(t)$ とすると、

$$\delta_n(t) \leq \xi_n(t) \quad \forall n \in N \quad (18)$$

$$\text{where } \delta_n(t), \xi_n(t) \in \{0, 1\} \quad (19)$$

が成立する必要がある。また、点検で劣化度が最大の M であった舗装区間に対しては必ず取換工事を行う必要があり、次の点検時刻までの劣化度が M になる舗装区間の割合の期待値 $E(t)$ を、基準値 E^* 以下に抑える必要がある。以上の点を踏まえたうえで、管理側はライフサイクル費用が最小となるような補修ベクトルおよび通行止めベクトルを決める必要がある。補修で発生する費用は、補修区間の数に比例する材料と人件費 h 、規制区間の数に比例する規制費用 b 、建設機材の配置費用 k の三つとなる。建設機材は連続した規制区間の間を自由に移動し、一台で複数の補修区間を担当することができるが、機材の移動距離には制限があり、同時に補修できる範囲は最大で L とする。以降補修ベクトル $\delta(t)$ と規制ベクトル $\xi(t)$ を合わせて規制・補修戦略と呼び、規制・補修戦略を決める方法を管理施策と呼ぶ。

(2) 最適管理施策

管理側のライフサイクル費用を最小にする、最適管理施策は以下の最適化問題として定式化することができる

$$\min_{\Delta, \Xi} \sum_{t \in T} \frac{1}{(1 + \rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \delta_n(t) = 1 \quad \text{if } s_n^-(t) = M \quad (21)$$

$$\delta(t) \leq \xi(t) \quad (22)$$

$$E(t) \leq E^* \quad (23)$$

$$\text{where } s(0) = 1 \quad (24)$$

$$\Delta \equiv [\delta(t_1), \delta(t_2), \delta(t_3), \dots] \quad (25)$$

$$\Xi \equiv [\xi(t_1), \xi(t_2), \xi(t_3), \dots] \quad (26)$$

$$\text{Prob}[s_n^-(t+1) = j | s_n^+(t) = i] \quad (27)$$

$$= p_{ij}, \forall i, j \in M, n \in N \quad (28)$$

$$E(t) = \frac{1}{N} \sum_{n \in N} p_{s_n^+(t)M} \quad (29)$$

$$h(t) = \alpha \sum_{n \in N} \delta_n(t) \quad (30)$$

$$b(t) = \beta \sum_{n \in N} \xi_n(t) \quad (31)$$

$$k(t) = \gamma q(t) \quad (32)$$

目的関数はライフサイクル費用の最小化、制約条件はそれぞれ劣化度が最大だと補修が必要、補修には通行止めが必要、劣化度最大の期待値が基準値以下、に対応している。 $q(t)$ は時刻 t における建設機材の配置数、 α は補修区間あたりの材料・人件費の単価、 β は規制区間あたりの規制費用の単価、 γ は規制あたりの固定補修費用である。

目的関数 (20) については、舗装システムの劣化が確率的であるため、最適な Δ, Ξ は一意ではない。このような状態の推移が確率的なモデルの最適化問題はマルコフ決定問題 (MDP) であり、システムの起こりうる任意の状態 $s \in S$ に対する規制・補修戦略の集合 $\{\delta(s), \xi(s) | \forall s \in S\}$ が最適な管理施策となる。システムの劣化度の状態空間 S の要素数は M^N であるため、管理施策は M^N 個の規制・補修戦略の集合となる。

MDP の解法としては価値反復法があげられるが、その計算時間は状態空間の広さに比例して非常に大きくなる。実用レベルにおける本問題では、3 桁以上の舗装区間からなる舗装システムに対する補修をも考えるが、価値反復法では舗装区間の数が 1 桁でも莫大な計算時間がかかる。

(3) 画一的ルールに基づく次善管理施策

本研究で提案する「画一的ルール」は、任意の劣化度ベクトルから規制・補修戦略を提案する下記のアルゴリズムである。

Step1 区間番号が一番小さい「規制補修区間」でない「管理限界区間」を「規制補修区間」にし、一つの長さ 1 の「連続規制」とする。管理限界区間がすべて規制補修区間の場合、**Step 7** へ行く。

Step2 「探索距離」を 1 とする。

Step3 「探索距離」が「探索距離を超えた場合」「規制長」と「探索距離」の和が「最大同時補修範囲」より大きい場合、**Step 1** へ戻る。

Step4 「最前列」から「探索距離」個後にある舗装区間が、「規制補修区間」でない「管理限界区間」もしくは「候補区間」だった場合、その区間と既存の「連続規制」間の区間をすべて「規制区間」とし、「最前列」をその新しい「規制補修区間」とする。その後、**Step 2** へ戻る。

Step5 「最後尾」から「探索距離」個前にある舗装区間が、「規制補修区間」でない「管理限界区間」もしくは「候補区間」だった場合、その区間と既存の「連続規制」間の区間をすべて「規制区間」とし、「最後尾」をその新しい「規制補修区間」とする。その後、**Step 2** へ戻る。

Step6 「探索距離」を 1 増やし、**Step 3** へ戻る。

Step7 全舗装の期待劣化度が基準値を超えている場合、

区間番号が一番小さい「規制補修区間」でない「候補区間」を「規制補修区間」にし、一つの長さ1の「連続規制」とし、Step 2へ戻る。超えてない場合は終了する。

ここで、

- 管理限界区間:劣化度が最大値 S となる舗装区間の集合; $\mathcal{L} \equiv \{n \in \mathcal{N} | s_n = M\}$;
- 補修候補区間: $\mathcal{L}$ 以外で劣化度が「第二管理基準」 a 以上となる舗装区間の集合; $\mathcal{C} \equiv \{n \in \mathcal{N} | l \leq s_n < M\}$
- 安全区間:上記外の区間の集合; $\mathcal{A} \equiv \{n \in \mathcal{N} | s_n < l\}$
- 規制補修区間:規制と補修を行う区間の集合; $\mathcal{H} \equiv \{n \in \mathcal{N} | \delta_n = 1, \xi_n = 1\}$
- 規制区間:規制のみを行う区間の集合; $\mathcal{K} \equiv \{n \in \mathcal{N} | \delta_n = 0, \xi_n = 1\}$
- 連続規制:連続した L 以下の「規制補修区間」や「規制区間」を一つの「連続規制」とする。「連続規制」における区間の数を「規制長」と呼ぶ。直線型道路舗装の連続規制のうち、番号が一番大きいのを「最前列」、番号が一番小さいのを「最後尾」と呼ぶ。円形道路舗装の連続規制のうち、時計回りに見て一番最初に来るものを「最後尾」、一番最後に来るものを「最前列」と呼ぶ。

本アルゴリズムは、既存の「連続規制」からの距離が「探索距離」以下かつ規制長が L 以下なら同時に規制し、一つの機械に補修させるという簡単な判定方法を繰り返しており、直感にあった規制補修戦略の決定を行っている。提案する「画一的ルールによる次善補修施策」とは、外生パラメータのもとシミュレーションを通して、割引総費用をの期待値が最小となる最適な $\{l^*, a^*\}$ の組み合わせを見つけ、以降任意の劣化状態 $s \in \mathcal{S}$ に対して画一的ルール $\{l^*, a^*\}$ が提案する規制・補修戦略を採用する施策である。

5. 数値計算例

(1) 施策の比較

道路舗装に対する三種類の補修施策 (1) 従来施策:同時補修を考慮せず単一舗装区間への補修戦略を各々の舗装で行う (2) 最適施策:道路舗装の劣化度ベクトルの推移に対してマルコフ決定過程で最適な補修戦略をすべて求める (3) 提案施策:最適な画一的ルールのパラメータ $\{l^*, a^*\}$ を見つけ、画一的ルールが提案する施策に従うの比較を行う。

舗装区間の数 N を増やしていき、施策の計算時間と時刻 T までの割引総費用を比較する。実験におけるパ

表-1 最適施策と提案施策の計算時間

区間数 N	最適施策	提案施策
3	1.257sec	12.38sec
4	793.6sec	13.22sec
5	843.7sec	14.28sec
6	31260sec	15.30sec

表-2 T までの各施策の期待割引総費用

区間数 N	従来施策	最適施策	提案施策
3	96.26	89.19	89.65
4	129.8	119.1	120.0
5	161.2	147.8	149.3
6	193.6	177.6	179.0

表-3 提案施策の最適なパラメータ $\{l^*, a^*\}$

区間数 N	3	4	5	6
$\{l^*, a^*\}$	{1, 2}	{1, 2}	{1, 2}	{1, 2}

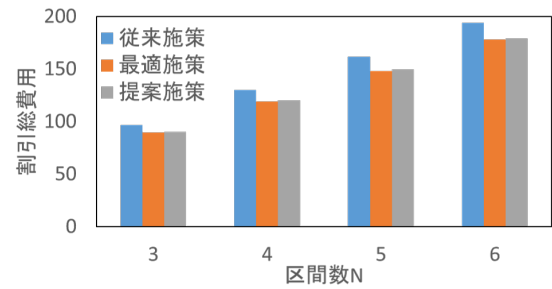


図-3 T までの各施策の期待割引総費用

ラメータは以下のようにする

$$\{\alpha, \beta, \gamma, M, E^*, T, L\} = \{1, 1, 10, 3, 0.3, 500, 2\} \quad (33)$$

$$P_{sing} = \begin{Bmatrix} 0.6922 & 0.2633 & 0.0445 \\ 0 & 0.7399 & 0.2601 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (34)$$

計算時間は表1、期待割引総費用は表2および図(1)、画一的ルールの最適なパラメータ $\{l^*, a^*\}$ は表3に記述されている。

区間数 N の増加に伴い、劣化度ベクトルの状態空間 $\mathcal{S}$ の要素数が急激に増えるため、最適施策の計算時間も同様に急激に増えている。本実験では $N = 6$ の時計算に 31260 秒、約 8 時間を要した。実際の道路舗装管理では、10m/100m 単位で舗装区間を区分している場合が多く、区間数 N が最低でも 3 桁になるため、実務における最適施策の計算は不可能に近い。

提案施策の最適なパラメータ $\{l^*, a^*\} = \{1, 2\}$ は、劣

化度3の隣にある劣化度2の舗装も同時に補修を行う施策を意味する。提案施策が最適施策に近い期待割引総費用であり、両者ともに従来施策より割引総費用を削減できていることから、本実験のパラメータでは予防補修の同期化便益が顕著に存在することがわかる。

区間数をこれ以上増やすと、最適施策の計算は不可能であったが、提案施策の計算は可能であり、区間数 $N = 100$ に増やしたところ、計算時間は87.34秒とかなり短く、提案施策であれば実務レベルの問題にも対応できることがわかる。

6. おわりに

本研究では、補修の同期化便益を考慮した道路舗装全体の補修施策問題に対して、同期化便益の性質に着目した補修戦略提案アルゴリズムを提案し、アルゴリズムを用いた次善補修施策を提案した。数値実験を通して、提案施策が有効であることと、実務レベルの大規模道路舗装の補修施策問題にも対応できることを示した。今後は、提案施策のパラメータ「探索距離」と「第二管理水準」が、道路舗装の区間数や補修費用の変化によってどのように変化することを考察することで、同期化便益のより正当な評価を可能にすることが求められる。

付録 I MDP の解が各時刻の状態のみに依存する証明

式 (20) において、時刻 t にける最適戦略が存在する場合、その時の状態 $s^-(t)$ にのみ依存することを証明する。

時刻 $t = t_1$ になった時点で、この時の戦略 $\delta^*(t_1), \xi^*(t_1)$ はすでに起きてしまった $t = 0$ から t_1 までの支出 $\sum_{t=t_1}^t \frac{1}{(1+\rho)^t} c(t)$ と現在の舗装の状態 $s(t_1)$ を変えることはできないため、この時の行動は以下の通り

$$\min_{\{\delta(t_1) \dots \delta(\infty), \xi(t_1) \dots \xi(\infty)\}} \sum_{t=t_1}^{\infty} \frac{1}{(1+\rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (\text{I.1})$$

$$\text{where } s^-(t_1) = s^* \quad (\text{I.2})$$

次に、時刻 $t_2 > t_1$ で、 $s^-(t_2) = s^-(t_1) = s^*$ が起きたとする。時刻に t_2 における最適な戦略は以下を満たす

$$\min_{\{\delta(t_2) \dots \delta(\infty), \xi(t_2) \dots \xi(\infty)\}} \sum_{t=t_2}^{\infty} \frac{1}{(1+\rho)^t} [h(t) + b(t) + k(t)] \quad (\text{I.3})$$

$$\text{where } s^-(t_2) = s^* \quad (\text{I.4})$$

となる。式 (I.3) は、式 (I.1) のの目的関数を $\frac{1}{(1+\rho)^{t_2-t_1}}$ 倍にし、同じ初期値と推移確率を持つ確率制御問題で

表-4 $N = 4$ の時の最適施策と提案施策の戦略比較

劣化ベクトル	最適施策の戦略	提案施策の戦略
$\{3, 3, 3, 3\}^T$	$\{2, 2, 2, 2\}^T$	$\{2, 2, 2, 2\}^T$
$\{3, 3, 3, 2\}^T$	$\{2, 2, 2, 2\}^T$	$\{2, 2, 2, 2\}^T$
$\{3, 3, 3, 1\}^T$	$\{2, 2, 2, 0\}^T$	$\{2, 2, 2, 0\}^T$
$\{3, 3, 2, 2\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$
$\{3, 3, 2, 1\}^T$	$\{2, 2, 2, 0\}^T$	$\{2, 2, 2, 0\}^T$
$\{3, 3, 1, 1\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$
$\{3, 2, 3, 2\}^T$	$\{2, 2, 2, 2\}^T$	$\{2, 2, 2, 2\}^T$
$\{3, 2, 3, 1\}^T$	$\{2, 2, 2, 0\}^T$	$\{2, 2, 2, 0\}^T$
$\{3, 2, 2, 2\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$
$\{3, 2, 1, 1\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$
$\{3, 2, 1, 2\}^T$	$\{2, 0, 0, 2\}^T$	$\{2, 0, 0, 2\}^T$
$\{3, 2, 2, 1\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$	$\{2, 2, 0, 0\}^T$
$\{3, 1, 3, 1\}^T$	$\{2, 0, 2, 0\}^T$	$\{2, 0, 2, 0\}^T$
$\{3, 1, 2, 1\}^T$	$\{2, 0, 0, 0\}^T$	$\{2, 0, 0, 0\}^T$
$\{3, 1, 1, 1\}^T$	$\{2, 0, 0, 0\}^T$	$\{2, 0, 0, 0\}^T$
$\{2, 2, 2, 2\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$
$\{2, 2, 2, 1\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$
$\{2, 2, 1, 1\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$
$\{2, 1, 2, 1\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$
$\{2, 1, 1, 1\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$
$\{1, 1, 1, 1\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$	$\{0, 0, 0, 0\}^T$

ある。そのため、 $\delta^*(t_1) = \delta^*(t_2), \xi^*(t_1) = \xi^*(t_2)$ が必ず成り立つ。よって、最適補修戦略は時間に依存せずその時の状態のみで決定する。

付録 II 施策の戦略列挙

参考として、数値計算で行った $N = 4$ の時の最適補修施策と提案施策の戦略を表付録 II で列挙する。パラメータ (再掲) は以下の通り

$$\{\alpha, \beta, \gamma, M, E^*, T, L, N\} = \{1, 1, 10, 3, 0.3, 500, 2, 4\} \quad (\text{II.1})$$

$$P_{\text{sing}} = \begin{Bmatrix} 0.6922 & 0.2633 & 0.0445 \\ 0 & 0.7399 & 0.2601 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

劣化度ベクトル s 、対称数 (回転 or 反転で同じベクトルになる数)、最適規制・補修戦略を表 7 にまとめる。最適規制・補修戦略については、2 が規制・補修、1 が規制のみ、0 が規制も補修もしないを意味する。提案施策では最適施策に近い補修戦略を提案するが、 $N = 4$ の

ような区間数が少ない時，提案施策が最適施策と全く同様な補修戦略を提案する場合もある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) D. J. White.: *Markov Decision Processes*, Wiley, 1922.
- 3) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.27, Issue 6, pp.425-438, 1993.
- 4) 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, 2018.
- 5) 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, 2018.
- 6) 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施策，土木学会論文集 F，Vol.64，No.2，pp.200-217，2008.
- 7) 坂井康人，井上裕司，小林潔司：都市高速道路の舗装修繕における同時施工の有効性検証，建設マネジメント研究論文集，Vol.15，pp.159-168，2008.
- 8) 保田敬一，川上順子，若槻晃右，兒玉崇，甲元克明：都市高速道路における大規模補修工事最適化支援システム，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.67，No.2，pp.I_29-I_43，2011.