

# 予算平準化を考慮した社会基盤施設の維持管理施策

福山 峻一<sup>1</sup>・水谷 大二郎<sup>2</sup>・奥村 誠<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 非会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)  
Email: shunichi.fukuyama.s5@dc.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)  
Email: daijiro.mizutani.a5@tohoku.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)  
Email: mokmr@tohoku.ac.jp

社会基盤施設を長期的に維持管理するにあたり、ライフサイクル費用を最小化するような維持管理施策が有効とされている。一方で、有限個の社会基盤施設を対象とする場合、このライフサイクル費用最小化施策を採用すると、劣化過程の不確実性に起因して、各期（各年度など）の維持管理費用の変動が生じる可能性がある。例として道路施設を考えた場合、路線や道路事務所、出張所単位の規模での施設群の維持管理費用が各期で変動し、その変動が過度に大きいと予算や人員の確保が難しく、実行が困難になるという問題が発生する危険性がある。そこで本研究では、数百程度の規模の施設群に対して、確率過程により個々の施設の劣化過程をモデル化し、維持管理施策に応じた i) ライフサイクル費用、ii) 維持管理費用の変動、の双方を定量化する。その上で、維持管理費用の変動を許容範囲内に抑えつつ、ライフサイクル費用を低減するための維持管理施策に関する提案を行う。

**Key Words** : *Cost-leveling, Life cycle cost, Optimization, Asset management*

## 1. はじめに

今日の我が国では、高度経済成長期に建設された多くの社会基盤施設が供用開始から 50 年以上経過し、老朽化に対する補修が急務となっている。また、それに伴い社会基盤施設の維持管理にかかる費用は今後増加していくと考えられ、適切かつ効率的な維持管理施策の設定が求められている。これまで、インフラマネジメントの研究分野において、確率的な劣化過程を設定し、数理最適化手法やシミュレーションによる探索によって、施設の期待ライフサイクル費用を最小にするような維持管理施策を求めめるための方法論が蓄積されてきた。

一方、現実有限個の施設を維持管理することを考えた場合、各期の期待維持管理費用は経年的に変化しなくとも、劣化過程の不確実性に起因して、個々の施設に必要な補修タイミングにばらつきが生じ、各期（個々の補修意思決定タイミング）における実際の維持管理費用に変動が生じることとなる。各期の維持管理費用の過度な変動は、予算や人員の確保に支障をきたすとともに、施設の劣化リスクの増加にも間接的に影響を与える可能性がある。そのため、実在の有限個の施設の維持管理計画を考える場合、期待ライフサイクル費用の最小化に加えて、各期の維持管理費用の変動も考慮することが望ましい。

以上の問題意識のもとで、本研究では、有限個（数百程度）の規模の施設群に対して、確率的な劣化過程を仮定し、期待ライフサイクル費用と各期の維持管理費用の分散の双方を定量化する。その上で、維持管理費用の分散の抑制に有用となる補修施策を提案し、期待ライフサイクル費用と維持管理費用の分散とのトレードオフ関係を分析する。

以下、2.で、本研究の基本的な考え方を述べる。3.で、期待ライフサイクル費用および各期の維持管理費用の分散の定量化手法を示し、維持管理費用の分散を低減するための補修施策を提案する。4.で、提案手法を適用した数値計算事例を示す。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 維持管理費用の分散と予算平準化

施設の維持管理を行う事業主体においては単年度ごとの予算がある程度決まっており、そのもとで維持補修を行っている。例として道路施設を考えた場合、路線や道路事務所、出張所それぞれの単位で予算が定められていることが考えられる。実供用状況下の施設においては、劣化過程に不確実性が介在するため、期待ライフサイクル費用最小化の観点から望ましい補修施策を採用した場合の維持管理費用と予算には相違が生じる。このような維持管理費用と

予算に過度な相違が生じた場合、確保された予算が非効率的に使用される、次期の予算が過小に見積もられる、必要な補修が予算内で実行できず劣化に起因したリスクが増加するといった問題が生じる可能性がある。そのため、ライフサイクル費用を最小化することに加えて、各期での維持管理費用のばらつきも考慮して維持管理計画を策定することが望ましい。

劣化過程に不確実性があり、各期での維持管理費用が変動する可能性がある状況で、ある期で必要となる維持管理費用が予算を下回った場合、当該期で必ずしも補修が必要とはなっていない施設に対しても予防的に補修を行うような施策が考えられる。このような補修施策により、当該期の維持管理費用が予算と近い値になることが期待できる。また、それに加えて、劣化のある程度進展した施設に対して予防的に補修を行っておくことにより、将来のある期において、必要となる維持管理費用が予算を過度に超過することを抑制できる可能性がある。上記のような予防的な補修施策を採用した場合、期待ライフサイクル費用は増加するものの、各期の維持管理費用の分散が抑制され、予算の平準化が達成される可能性がある。本研究では、予防的な補修の実施程度を表す変数を設定し、当該変数に応じた期待ライフサイクル費用および各期の維持管理費用の分散を算出することにより、それらのトレードオフ関係を定量化することを目的とする。

## (2) 既往研究

確率的な劣化過程を想定し、施設あるいは施設群の期待ライフサイクル費用を最小化するような最適維持管理施策を求めるための数的手法はこれまで数多く提案されている。予算の変動に着目した予算平準化に関する研究も、数は少ないものの過去には存在する。近田等<sup>1)</sup>は階段状に設定した健全度レベルの下で、遺伝的アルゴリズムによって補修アクションの適応タイミングをずらすことで平準化を行うモデルを提案している。Yoon et al.<sup>2),3)</sup>はプロジェクトスケジューリングにおける資源平準化問題を応用し、最小モーメント法を用いて、計画期間内の補修アクションを前後させることによって道路舗装の維持管理費用を平準化するモデルを提案した。しかし、

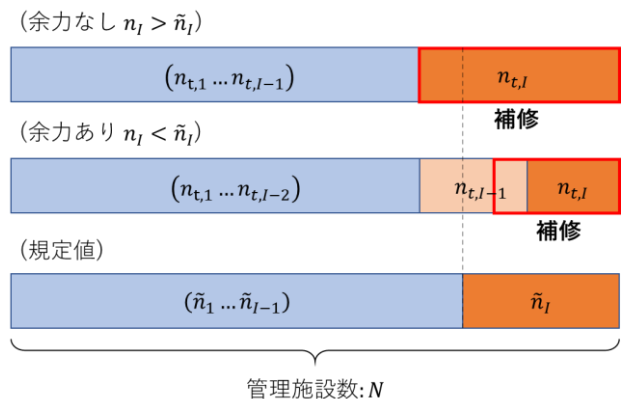


図-1 補修対象選択の概念

これらの既往研究のモデルでは補修アクションの介入時間を変化させた場合に、先行・後続の補修アクションに与える影響を無視しており、長期的な補修施策の有用性を議論できるものではない。さらに、既往研究においては、経年的な社会基盤施設の劣化状態の変化を確定的なものとして与えているため、実在の施設で生じ得る劣化過程の不確実性を考慮することは難しい。

## 3. モデルの定式化

### (1) モデル化の前提条件

無限時間まで続く時間間隔が一律の離散時間軸  $t = 0, 1, \dots$  を定義する。離散的時間軸上の点を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する。また、この離散軸上の期間  $[t, t + 1)$  を  $t$  期と呼ぶ。施設の劣化状態は離散的な  $I$  個の健全度  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) で表現し、健全度の増加に伴って施設の劣化が進展しているものとする。次に、対象の  $N$  個の施設に対して、ある時点  $t$  において各健全度をとる施設数を状態ベクトル  $\mathbf{n}_t = (n_{t,1}, \dots, n_{t,I})$  で表す。また、各健全度をとる施設数の割合を相対頻度ベクトル  $\mathbf{v}_t = (v_{t,1}, \dots, v_{t,I}) = (n_{t,1}/N, \dots, n_{t,I}/N)$  で表す。この時、 $\sum_i n_{t,i} = N, \sum_i v_{t,i} = 1$  である。

ある時点  $t$  の期首に点検により施設群の状態ベクトルが観測され、その情報に基づいて施設群に対する維持補修アクションが決定されると考える。健全度  $i = I$  が観測された施設に対しては、施設が使用限界に達しているとみなし、確定的に補修を行うものとする。なお、補修以前の健全度にかかわらず、補修直後に健全度が 1 に回復するものとする。ここで、健全度  $I$  の存在数に対する規定値  $\tilde{n}_I$  を事前に設定する。 $\tilde{n}_I$  は、次節で設定するマルコフ推移確率に従い劣化が進展する条件のもとで、各期で健全度  $I$  の施設を全て補修し、それ以外の施設は補修しないとした場合の定常状態として定義する。ある  $t$  期において観測された健全度  $I$  の施設数  $n_{t,I}$  が規定値  $\tilde{n}_I$  を下回る、すなわち補修施設数に余力がある場合、追加で健全度  $I - 1$  の施設もある程度補修するものとする。

具体的には、図 1 で余力あり ( $n_{t,I} < \tilde{n}_I$ ) と判断されるようなある  $t$  期の状態ベクトルにおいて、余力分の施設数  $\Delta \tilde{n}_I = \tilde{n}_I - n_{t,I}$  に対して、外生的な操作変数  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) をかけた  $\theta \Delta \tilde{n}_I$  を求め、その値に対応した整数個の健全度  $I - 1$  の施設も追加で補修を行う。健全度  $I$  の施設数に対する規定値  $\tilde{n}_I$  は、次節で紹介する確率推移の定常状態における相対頻度ベクトルでの健全度  $I$  の期待施設数を通常用いるものとする。

### (2) 劣化・補修過程

社会基盤施設の劣化過程はマルコフ連鎖に従うと仮定し、離散軸上の単位時間間隔、時点  $t, t + 1$  間における健全度の推移をマルコフ推移確率で表現する。

$t$ 期での健全度を $h(t)$ と表し、マルコフ推移確率 $\pi_{ij}$ の定義を次の式で示す。

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

全ての $(i, j)$ の組み合わせについてマルコフ推移確率 $\pi_{ij}$ を求めるとマルコフ推移行列 $\Pi$ が定義できる。

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

マルコフ推移確率に関して、補修を行わなければ健全度が回復することはないため式(3)、健全度は $I$ 個のいずれかの値をとることより式(4)、(5)、健全度 $I$ は補修がない限りマルコフ連鎖の吸収状態であるため式(6)が成り立つ。

$$\pi_{ij} = 0 \quad (i > j) \quad (3)$$

$$\pi_{ij} \geq 0 \quad (i, j = 1, 2, \dots, I) \quad (4)$$

$$\sum_{j=i}^I \pi_{ij} = 1 \quad (5)$$

$$\pi_{II} = 1 \quad (6)$$

次に、最適維持管理施策の候補集合を $\mathbf{D}$ とする。ある施策 $d \in \mathbf{D}$ において、管理者は健全度 $i$ に対してとるべき補修工法を指定し、その補修による健全度推移が確定的に定められている状況を考える。補修アクション $\phi^d(i) \in \Theta(i)$ は施策 $d$ において健全度 $i$ に対する補修実施後の健全度を表し、補修アクションベクトルを $\boldsymbol{\phi}^d = (\phi^d(1), \dots, \phi^d(I))$ と定義する。この際、 $\phi^d(I) = 1$ が全ての $d$ に対して成り立つとする。補修アクション $\phi^d(i)$ によって生じる施設の健全度の変化を以下のように定義する。

$$q_{i,j}^d = \begin{cases} 1 & \phi^d(i) = j \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

すべての組み合わせ $(i, j)$ について $q_{ij}^d$ を求めて整理すると以下の推移確率が定義できる。

$$\mathbf{Q}^d = \begin{pmatrix} q_{11}^d & \cdots & q_{1I}^d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{I1}^d & \cdots & q_{II}^d \end{pmatrix} \quad (8)$$

ただし、健全度 $I$ が観測された場合、その施設は直ちに補修されるため以下ようになる。

$$q_{I1}^d = 1, q_{Ij}^d = 0 \quad (j = 2, \dots, K) \quad (9)$$

時点 $t$ における補修前後の相対頻度ベクトルをそれぞれ $\mathbf{v}_{t,d}^- = (v_{t,d,1}^-, \dots, v_{t,d,I}^-)$ 、 $\mathbf{v}_{t,d}^+ = (v_{t,d,1}^+, \dots, v_{t,d,I}^+)$ とすると、施設の劣化・補修過程は健全度の時間的推移として、

$$\mathbf{v}_{t,d}^- = \mathbf{v}_{t-1,d}^+ \Pi \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_{t,d}^+ = \mathbf{v}_{t,d}^- \mathbf{Q}_d \quad (11)$$

と表現される。式(10)、式(11)を組み合わせると、

$$\mathbf{v}_{t,d}^- = \mathbf{v}_{t-1,d}^- \mathbf{Q}_d \Pi \quad (12)$$

となり、式(12)を用いて施策 $d$ を採用する際の定常状態における相対頻度ベクトル $\tilde{\mathbf{v}} = (\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_I)$ が求まる。

### (3) 補修ルール

定常状態における相対頻度ベクトル $\tilde{\mathbf{v}}$ が与えられた場合、同様に定常状態における状態ベクトルの期待値も $\tilde{\mathbf{n}} = (\tilde{n}_1, \dots, \tilde{n}_I) = (\tilde{v}_1 N, \dots, \tilde{v}_I N)$ として与えられる。補修に関するルールを設定するにあたり、まず、健全度 $I$ の更新のみ行うような補修施策 $d$ を採用した際の定常状態の状態ベクトルの期待値を発生さ

せ、その時の健全度 $I$ の期待施設数 $\tilde{n}_I$ を規定値として設定する。次にこの値と実際に観測された健全度 $I$ の施設数 $n_{t,I}$ との差 $\Delta\tilde{n}_I = \tilde{n}_I - n_{t,I}$ を用いて補修アクションを決定する。健全度 $I$ の施設は直ちに更新を行うが、 $\Delta\tilde{n}_I$ の値に応じて健全度 $I-1$ の施設についても追加の予防補修を行う。追加予防補修を行う施設数の上限値は以下の式から算出される。

$$n'_{I-1}{}^{max} = \begin{cases} \lceil \theta \Delta\tilde{n}_I \rceil & (\theta \Delta\tilde{n}_I > 0) \\ 0 & (\theta \Delta\tilde{n}_I \leq 0) \end{cases} \quad (13)$$

ここで $\lceil \alpha \rceil$ は、実数 $\alpha$ に対して $\alpha$ 以上の最小の整数を返す関数、 $\theta$ は外生的な操作変数 ( $0 \leq \theta \leq 1$ )である。最後に、 $n'_{I-1}{}^{max}$ と観測された $n_{t,I-1}$ を比較し、実際に追加補修を行う施設数を以下のように決定する。

$$n'_{t,I-1} = \begin{cases} n'_{I-1}{}^{max} & (n'_{I-1}{}^{max} \leq n_{t,I-1}) \\ n_{t,I-1} & (n'_{I-1}{}^{max} > n_{t,I-1}) \end{cases} \quad (14)$$

### (4) 施設数状態ベクトルの推移確率

$N$ 個の施設において劣化・補修が繰り返される際に発生しうる状態ベクトル $\mathbf{n}_t = (n_{t,1}, \dots, n_{t,I})$ のすべてのパターンを収納するベクトルを $\mathbf{n}$ と表現する。集合 $\mathbf{n}$ の個々の要素を $\mathbf{n}_s (s = 1, \dots, S)$ と表すこととする。 $s$ を要素番号と呼ぶ。健全度の推移がマルコフ推移確率で表現されているため、状態ベクトルの推移もマルコフ推移確率で表すことができる。時点 $t$ の補修後の状態 $\mathbf{n}_s$ から時点 $t+1$ の補修前の状態 $\mathbf{n}_r$ へのマルコフ推移確率を $p_{sr}$ と表す。ベクトル $\mathbf{n}_s$ の $i$ 番目の要素を、 $n_s^i$ と表すこととする。ここで、

$$\sum_{j=1}^I x_{i,j} = n_r^i \quad \forall i \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{i,j} = n_s^j \quad \forall j \quad (16)$$

$$x_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (17)$$

$\mathbf{x} = \{x_{1,1}, \dots, x_{I,I}\}$ の集合族を $\Omega_{sr}$ とすると、 $p_{sr}$ は、

$$p_{sr} = \sum_{\{x_{1,1}, \dots, x_{I,I}\} \in \Omega_{sr}} p_{\{x_{1,1}, \dots, x_{I,I}\}} \quad (18)$$

$$p_{\{x_{1,1}, \dots, x_{I,I}\}} = \prod_i \frac{n_s^i!}{x_{i,1}! x_{i,2}! \dots x_{i,I}!} \pi_{i1}^{x_{i,1}} \pi_{i2}^{x_{i,2}} \dots \pi_{iI}^{x_{i,I}} \quad (19)$$

と求まる。全ての $(s, r)$ の組み合わせについてマルコフ推移確率 $p_{sr}$ を求めるとマルコフ推移行列 $\mathbf{P}$ が定義できる。

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{S1} & \cdots & p_{SS} \end{pmatrix} \quad (20)$$

次に、提案するルールの下で補修アクションを選択した際に生じる状態ベクトルの変化を、新しい補修アクションベクトル $\boldsymbol{\eta} = (\eta(1), \dots, \eta(S))$ によって定義する。 $\eta(s)$ は要素番号 $s$ の状態への補修実施後の状態の要素番号を表す。 $\theta$ の値を決定すると、 $\boldsymbol{\eta}$ が一意に定まる。また、補修アクション $\boldsymbol{\eta}(s)$ によって生じる施設群の状態の推移を以下のように定義する。

$$\tilde{q}_{rs} = \begin{cases} 1 & \eta(s) = r \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

すべての組み合わせ $(s, r)$ について $\tilde{q}_{sr}$ を求めて整理すると以下の推移確率が定義できる。

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{pmatrix} \tilde{q}_{11} & \cdots & \tilde{q}_{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{q}_{1S} & \cdots & \tilde{q}_{SS} \end{pmatrix} \quad (22)$$

式(12)と同様に、時点 $t$ における補修前の各状態ベクトルの生起確率を $\mu_t$ とすると、

$$\mu_t = \mu_{t-1} \tilde{Q}P \quad (23)$$

と表すことができるため、定常状態における各状態ベクトルの生起確率 $\bar{\mu}$ が求まる。

(5) ライフサイクル費用、維持管理費用の変動

補修施策 $\theta$ を平均費用法により評価する。なお、今回の条件設定では、平均費用法を用いても割引現在価値法を用いても補修施策間のライフサイクル費用の大小関係は変わらない。状態ベクトル $n_s$ を補修する際に発生する補修費用を $c_s$ とする。各状態ベクトルの定常状態の生起確率 $\bar{\mu}$ を用いて単年度の維持管理費用の期待値と分散は以下のように求められる。

$$E(C) = \sum_s c_s \cdot \bar{\mu}_s \quad (25)$$

$$V(C) = \sum_s (c_s - E(C))^2 \cdot \bar{\mu}_s \quad (26)$$

4. 数値計算例

(1) 数値例の概要

本研究で提案した補修ルールを用いた計算の例を示す。想定した施設群は 50 個の施設からなるものとし、健全度は 3 つの離散的な状態変数で表すものとする。計算は 2 パターンで行った。1 つ目は、計算期間を 10,000 年とし、初期の相対頻度ベクトルを供用開始時の状態 $v_0 = (1,0,0)$ に設定した状態で、劣化状態の確率的推移をシミュレーションによって計算したもの、2 つ目は、計画期間を半永久的な無限時間と想定し、定常的な状態における厳密解を算出したものである。補修アクションは時点開始時に健全度 3 の施設が観測された際、その施設を直ちに健全度 1 へと更新するもの、また、補修施策 $\theta$ によって追加予防補修が発生する場合、健全度 2 の施設の一部を健全度 1 の状態へと回復させる補修を実施する。補修による健全度の変化とその際の補修単価は表-1 に示している。また、施設の劣化過程はマルコフ連鎖に従うと仮定し、計算に用いたマルコフ推移確率行列 $\Pi$ を表-2 に示す。この推移確率は単位期間での推移確率を表現している。

表-1 健全度回復水準と補修単価

| 健全度 | 回復水準 | 補修単価 |
|-----|------|------|
| 1   |      |      |
| 2   | 2→1  | 1    |
| 3   | 3→1  | 1    |

表-2 推移確率行列

| 健全度 | 1    | 2    | 3    |
|-----|------|------|------|
| 1   | 0.90 | 0.05 | 0.05 |
| 2   | 0    | 0.85 | 0.15 |
| 3   | 0    | 0    | 1    |

(2) 分析結果の考察

4.(1)に示した条件の下で、補修施策 $\theta = 0.5$ に基づいて劣化・補修が進んでいくシミュレーションを行い、計画期間終了までの各期において発生した維持管理費用のヒストグラムを図-2 に示す。比較対象として $\theta = 0$ の場合の結果も図-3 に示す。シミュレーション計算における追加予防補修実行の基準となる規定値は、補修ルールなしの下で計画期間供用を行った際の最終期の相対頻度ベクトルを用いて設定した。それぞれの図を比較すると、補修ルールの適応により単年度の費用のばらつきを抑えることができ、規定値の下での期待費用周辺に補修費用が集中していることが確認できる。追加予防補修は、健全度 3 の施設数が規定値よりも少なく観測されたことで、その期間に生じる単年度費用が小さいと判断される場合に発生する。したがって、ルールの適応によって、単年度費用の下限値が設定されるため、供用開始時を想定した初年度以外では必ず補修費用が発生する。このことは、図-2,3 の比較から見て取れる。さらに、追加補修によって健全度 2 の施設の一部が健全度 1 に回復することは、次時点において健全度 3 の施設が発生する確率を小さくするため、結果として計画期間を通して更新が必要になる施設数が規定値を上回ることを抑え、単年度費用の増大も抑制しているといえる。

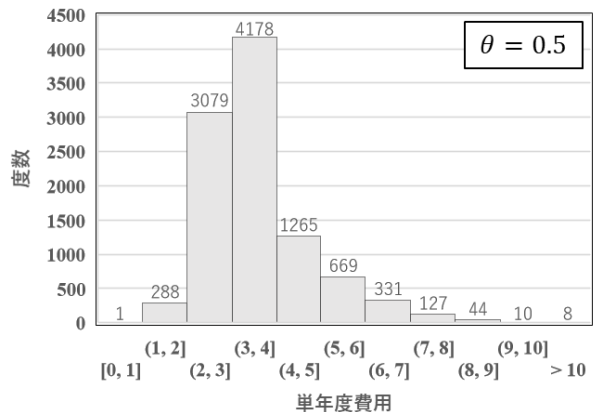


図-2 シミュレーションより発生した各期の維持管理費用の累積分布( $\theta = 0.5$ )

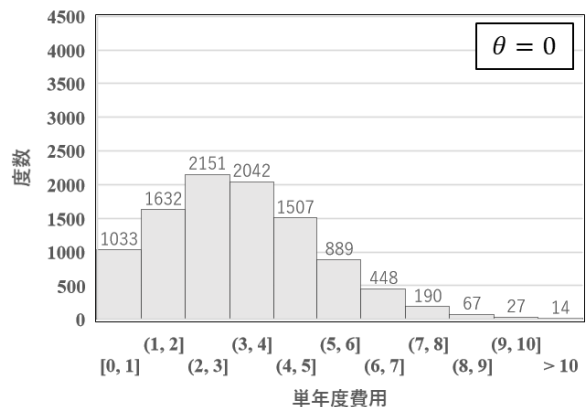


図-3 シミュレーションより発生した各期の維持管理費用の累積分布( $\theta = 0$ )

次に、定常状態における操作変数ごとの単年度期待費用と、単年度費用分散の値を図-4 に示す。補修アクションによる健全度変化も含め、推移確率行列は完全エルゴード性を満たすため、単年度期待費用と単年度費用分散は初期の施設群の状態ベクトルに依存しない値として一意に定まる。

補修ルールあり ( $\theta > 0$ ) の場合と、なし ( $\theta = 0$ ) の場合の値の変化を比較する。 $\theta$  の増加に伴い、単年度費用の期待値が増加することが見てとれる。これは、追加の予防補修によって新たに費用が発生するためであり、 $\theta$  の増加によって追加補修の件数が増加すると、それにとまって単年度期待費用も増加していくと言える。次に、単年度費用の分散は、ルールの適用により大きく減少していることが見て取れる。これは、本ルールが目的とするように、期首において健全度 3 の観測数が少ない場合でも、追加予防補修によって、補修される施設数が規定値に近づくように費用を発生させているため単年度費用に下限値が設定されるためである。また、上述した追加補修による健全度 3 の生起確率の減少も要因である。次にグラフの特徴として、 $\theta$  の増加に伴って単年度期待費用、単年度費用分散が階段状に変化していくことが見て取れる。これは式(13)において追加補修を行う施設数を整数の非連続な値に変換しているためである。

補修ルールの適応は、操作変数の値に応じて単年度期待費用と単年度費用分散に変化を与えることが説明できた。次は、単年度期待費用、単年度費用分散間の関係に注目する。縦軸に単年度費用分散、横軸に単年度期待費用をとるような散布図を $\theta$  の値ごとに図-5 に示す。単年度期待費用と単年度費用分散は階段状に変動していくと先述したのと同様に、散布図のプロットも、 $\theta$  の値の変化に応じて、不連続に変化していることが確認できる。単年度期待費用と単年度費用分散は、 $\theta$  の値の増加に伴った負の相関を示しており、補修ルールの適用によって単年度費用の分散を抑える場合、それに伴って単年度期待費用は増加してしまうトレードオフの関係になっている。

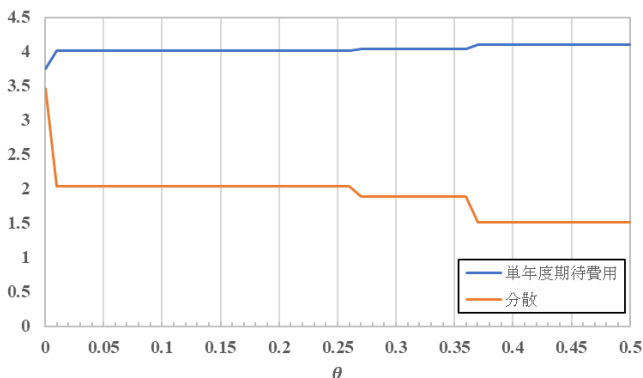


図-4  $\theta$  と各期の期待費用、費用分散の関係

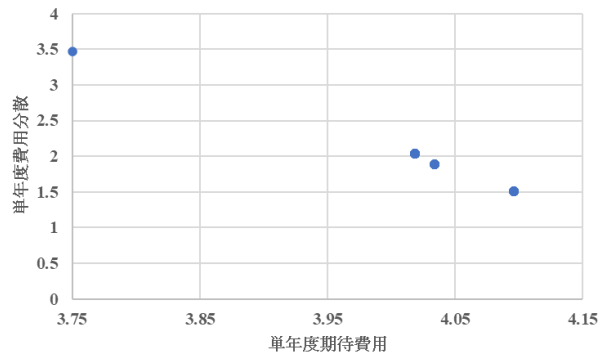


図-5 単年度の期待費用と分散の散布図

## 5. おわりに

本研究では、ライフサイクル費用最小化を目的とした維持管理施策を決定する際の、劣化過程の不確実性と施設の個数の有限性による各期での維持管理費用の変動に着目し、ある期で必要となる維持管理費用が予算を下回った場合、予防的な補修の実施程度を表す変数を導入することで、当該期で必ずしも補修が必要とはなっていない施設に対しても予防的に補修を行うような施策を提案した。このような補修施策により、各期の維持管理費用の変動が抑えられることに加えて、予防補修によって、将来のある期において必要となる維持管理費用が予算を過度に超過することも抑制できることを示した。

本研究の今後の課題として、期待費用とその分散の双方のトレードオフ関係をより明確に記述することがあげられる。また、それぞれを目的関数とした多目的最適化によって、パレート最適となる補修施策を探索することも課題である。

## 参考文献

- 1) 近田康夫, 阿曾克司, 佐々木貴惟, 城戸隆良: 年次費用均等化を考慮した既存橋梁群の補修計画支援, 構造工学論文集 A, Vol. 54A, pp.134-p141, 2008.
- 2) Yoon, Y., Shah, H., Hastak, M. and Lee, J.: Leveling process of annual budgetary requirements for pavement preservation, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.20, Issue 1, 04013004, 2014.
- 3) Yoon, Y., Hastak, M. and Cho, K.: Method for generating multiple MRR solutions for application in cost-leveling models, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.23, Issue 3, 04016045, 2017.

(?)