

# 非定常な点検間隔を考慮した トンネル照明システムの最適点検・更新政策

水谷大二郎<sup>1</sup>・平川恵士<sup>2</sup>・小濱健吾<sup>3</sup>・貝戸清之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻・日本学術振興会特別研究員 DC (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)  
E-mail:d-mizutani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 建設事業本部 建設事業部 施設建設課 (〒 530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20)  
E-mail:s.hirakawa.ab@w-nexco.co.jp

<sup>3</sup>正会員 大阪大学特任助教 大学院工学研究科 NEXCO 西日本 高速道路学共同研究講座 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-8)  
E-mail:k-obama@civil.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>4</sup>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

本研究では、照明ランプ、安定器、灯具の3種類の施設により構成されるシステムを、トンネル照明システムとして捉え、最適点検・更新政策について議論する。照明ランプ、安定器の劣化過程をワイブル劣化ハザードモデル、灯具の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで記述し、点検・更新過程をマルコフ決定モデルで表現する。その際、政策変数として、照明ランプの非定常な点検・更新間隔の流列、灯具の補修政策、安定器の一括取替タイミングを取り上げる。その上で、所与のリスク管理水準を満たし、ライフサイクル費用を最小化する最適点検・更新政策をモデル化し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適な政策変数を算出するための方法論を提案する。最後に、実在の高速道路トンネルを対象に提案した方法論の有用性を検証する。

**Key Words :** *assetmetrics, optimal inspection/replacement policy, non-stationary inspection interval, genetic algorithm, tunnel lighting*

## 1. はじめに

高速道路には様々な付帯施設が設置されている。それらの劣化に対し、管理者によって定期的に点検が実施されており、劣化状態に応じた補修・更新がなされている。本研究では、高速道路付帯施設の中でも高速道路トンネル内の照明システムに着目する。高速道路トンネル照明システムは複数の照明ランプ、安定器、照明灯具（以下、灯具）で構成される。各施設の劣化の進展により、交通事故や車両破損事故発生の潜在的なリスクが増加する。具体的には、照明ランプ、安定器の故障は、ランプの不点に起因したトンネル内の照度低下を招き、灯具の劣化進展は灯具本体の脱落・落下の可能性を増大させる。道路管理者は、定期的な点検により、これらのリスク増大を予防しているが、一方で、過剰な点検は点検費用の増加と交通規制による社会的損失を招く。そのため、ある一定のリスク管理水準を満たしつつ、点検などの費用を最小化するような点検・更新政策を実施することが望ましい。本研究では、照明ランプの不点リスクと灯具落下リスクを、点検データを用いた統計的劣化予測結果に基づき計量化する。さらに、費用に関して、ライフサイクル費用分析の考え

方に基づき、点検・更新費用を定量化する。その上で、所与のリスク管理目標を満たすような、最適点検・更新モデルを定式化する。

従来、ライフサイクル費用とリスクを考慮し、点検・更新政策を最適化するための手法は数多く開発されてきた。先行研究に関しては、改めて **2.(1)** で詳述するが、それらの既往の研究においては、社会基盤施設の点検・更新間隔は、供用開始時点、あるいは、直近の補修・更新時点からの経過時間に依存せず、1つの点検・更新政策に対して1つの点検・更新間隔というように、定常的に設定されていた。しかし、実際の社会基盤施設の維持管理政策を考えた場合、例えば、供用開始直後は点検間隔を長く、供用開始からある程度の年数が経過したのちには、点検間隔を短くする、といった非定常な点検・更新間隔が設定される場合が往々にしてある。本研究で採用するマルコフ連鎖モデルを用いた場合、非定常な点検・更新間隔を持つ劣化・更新過程を表現することは、過去に事例はほとんどないが、比較的簡便であると考えられる。一方で、時間依存的な点検・更新間隔を考慮し、点検・更新政策を最適化することを考えた場合、点検・更新間隔の非定常性に起因し、点検・更新間隔の候補が膨大な数となり、従来の感度分

析のような手法のみで最適点検・更新間隔を求めることは現実的ではない。

以上の問題意識から、本研究では、非定常点検間隔を考慮した、最適点検・更新モデルを提案する。具体的には、照明ランプ、安定器、灯具で構成されるトンネル照明ユニットの劣化過程をハザードモデルに基づく統計的劣化予測モデルに表現し、その劣化・更新過程をマルコフ連鎖モデルにより表現する。さらに、点検・更新政策の最適化問題に対して、遺伝的アルゴリズムを用いた方法論を開発することにより、非定常な点検間隔を考慮し、最適点検・更新政策を求めるための方法論を提案する。以下、2. では、本研究の基本的な考え方を述べる。3. では、施設の劣化・更新過程をモデル化する。4. では、最適点検・更新モデルを定式化する。5. では、遺伝的アルゴリズムにもとづいたモデルの解法を詳述する。最後に、6. において、実際のトンネル照明システムに提案した方法論を適用し、その有用性を示す。

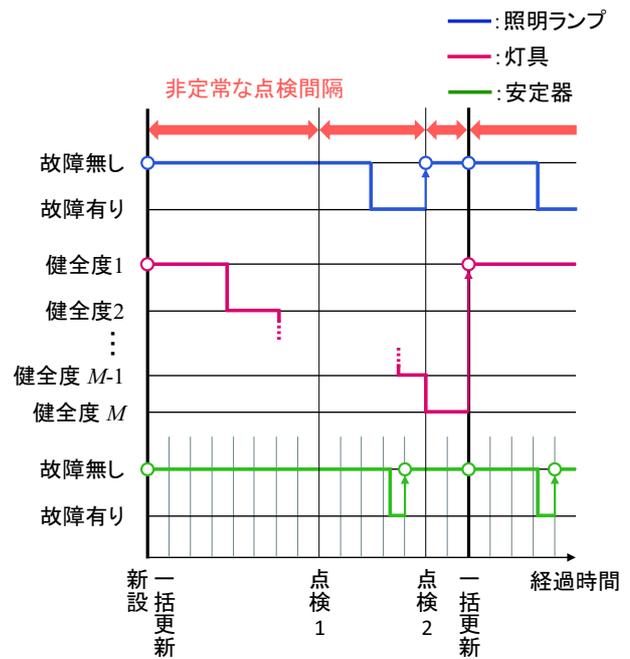


図-1 各施設の劣化に対する点検・更新スキーム

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 既往研究の概要

1990年代より、ライフサイクル費用を用いた最適維持管理政策決定のための方法論に関する研究が蓄積されてきており<sup>1),2)</sup>、RC構造物、沿岸構造物など多様な社会基盤施設への適用事例が蓄積されている<sup>3),4)</sup>。さらには、地震や台風といったイベント的に発生する事象を確率的に表現し、耐震、耐風補強を考慮したライフサイクル費用の算定方法も提案されている<sup>5),6)</sup>。さらに、マルコフ決定モデル<sup>7)</sup>を用いることにより、ライフサイクル費用の分析手法は飛躍的な発展を遂げた。健全度を離散的な状態変数で記述するマルコフ決定モデルは、劣化過程の記述が簡単であり、数多くの実用モデル<sup>8)-11)</sup>が提案されている。伝統的なマルコフ決定モデルは、システムの劣化過程を表現するマルコフ推移確率が、初期時点からの経過時間に依存しないような斉次マルコフ劣化モデルで表現し、定常的な最適補修政策を求めることを目的としている。このようなマルコフ決定過程モデルに関する研究は、ハザードモデルを用いて劣化過程を表現する方法<sup>12),13)</sup>が開発されたことにより、実用化が急速に進展した。例えば、青木等は照明ランプで構成されるシステムを対象として、システム全体の点検・補修タイミングに関する補修政策を求める方法論を提案している<sup>14),15)</sup>。さらに、津田等<sup>16)</sup>は橋梁部材の劣化過程を表すマルコフ推移行列を多段階指数ハザードモデルを用いて推計する方法を提案し、貝戸等<sup>17)</sup>は平均費用を最小にするような橋梁補修政策を求めるマルコフ決定モデルを提案している。さ

らに、複数種類の構造物を対象とした分析も行われている。織田澤等<sup>18)</sup>は、機能部と構造部で構成される複合的道路付帯施設に対し、最適補修同期化モデルを提案している。

以上の方法論はいずれも施設に対する点検間隔が時間に依存せず、定常であることを前提としている。それに対し、本研究では、1) 非定常な点検間隔を持つ点検・更新政策を導入することによるライフサイクル費用の低減効果の定量化、2) 非定常な点検間隔を考慮した点検・更新政策の最適化、を目標とする。このように、非定常な点検間隔を考慮し、最適点検・更新政策を求めた事例やそのためのモデルは、著者らの知る限り過去には存在しない。

### (2) 照明システムの構成と点検・更新スキーム

道路管理者があるトンネルの照明システムを管理する問題を考える。高速道路トンネル照明システムは複数の照明ユニットにより構成される。対象とする照明ユニットは、 $N$ 個ずつの照明ランプ、安定器、灯具で構成される。3種類の部品を識別するために、部品番号 $l$ を導入する。部品番号は主に3.以降で使用され、状態変数ベクトルやライフサイクル費用などを示す記号の添え字として使用し、 $l=1$ のとき照明ランプを、 $l=2$ のとき安定器を、 $l=3$ のとき灯具を表す。 $n$  ( $n=1, \dots, N$ )は、照明ユニットを示す番号であり、照明ランプ、安定器、灯具の3種類の部品によりトンネル照明ユニット $n$ が構成される。さらに、管理対象となる1つのトンネル内に設置された全ての照明ユニットを本稿ではトン

ネル照明システムと呼ぶ。いま、照明システムに対する点検が部品（照明ランプと灯具、安定器）単位で行われていると考える。点検により、トンネル内の全ての照明ユニットの安全性を確認し、照明ランプの故障（以下、不点）を発見をした場合や、照明灯具の落下の危険性を確認した場合には直ちに適切な処置がなされる。以下では、現状の高速道路トンネル照明システムの管理体制を踏まえ、本研究で想定する各施設の点検・更新スキームを説明する。

図-1に、照明ユニットを構成する3種類の部品の本研究で想定する点検・更新スキームを示す。非定常な時間間隔で実施される点検により、照明ランプの不点状態、灯具の劣化状態に関する情報を獲得することができる。照明ランプの状態は不点の有無による2値状態で表され、灯具の劣化状態は離散的な状態変数である健全度を用いて表される。点検により、不点である照明ランプは直ちに交換され、また、灯具に関しては、健全度に応じて適切な補修や交換が実施される。一方、安定器の故障は、照明ランプの大量不点を引き起こすため、日々実施される日常道路巡回やドライバーの通報により、回路ごとの連続不点による安定器の故障を疑うと、緊急出動により直ちに故障している安定器の取替が実施される。さらに、照明ランプの大量の不点によるリスクを低減するために、定期的に安定器の一括取替を実施している。照明ユニットを構成する3種類の部品では、管理体制が大きく異なっているが、3種類の部品以外の劣化や、陳腐化による部品調達にかかるコスト増を考慮し、トンネル内の全ての照明ユニットに対して、定期的に一斉更新が実施され、照明ランプ、安定器、灯具が同時に取り替えられている。

以上の点検・更新スキームを踏まえ、3.において、照明ランプ、安定器、灯具の点検・更新過程を個別に定義し、照明ランプおよび灯具の点検間隔、安定器の一括取替タイミング、灯具の補修政策、照明ユニットの一斉更新間隔を考慮した最適な点検・更新政策をモデル化する。

### (3) 各施設の劣化特性と非定常点検間隔

社会基盤施設の更新に関する維持管理政策は、逐次更新政策と一括更新政策に大別することができる。多数の社会基盤施設を供用開始から管理する問題をマルコフ連鎖モデルに基づき考えた場合、供用開始後、ある程度の期間が経過すると、劣化・更新過程を表すマルコフ連鎖は定常状態に到達する。マルコフ連鎖が定常状態に達したとき、リスク、費用、点検間隔の関係は一意に定まり、マルコフ連鎖の定常状態では非定常な点検間隔を採用することの効果はほとんどない。一方で、供用開始直後のマルコフ連鎖が定常状態に達していな

い場合には、リスク、費用、点検間隔の関係は一意に定まらず、非定常な点検間隔を導入できる可能性がある。

橋梁など半永久的な供用が予定される社会基盤施設で採用されることが多い逐次更新政策の場合、当該施設の耐用年数に対する定常状態の期間の割合が多く、非定常な点検間隔を採用する意味はあまりない。一方で、高速道路付帯施設などでは一括更新政策、あるいは、一括更新・逐次更新併用政策が採用される場合も多い。実際に、本研究で対象とする高速道路トンネル照明システムでも一括更新政策が採用されている。一括更新政策が採用された場合、施設の供用期間に対するマルコフ連鎖の定常状態の期間の割合が少なく、非定常な点検間隔を導入することにより、リスク管理水準を満たしつつ、ライフサイクル費用を低減できる可能性がある。

## 3. 施設の劣化・更新過程のモデル化

### (1) モデル化の前提条件

#### a) 離散的時間軸の設定

本研究では、高速道路トンネル照明システムの劣化・更新過程を表現するために、図-2のような2種類の離散的時間軸を用いる。まず、照明ランプと灯具の劣化・点検・更新過程を記述するために、カレンダー時刻（以下、時刻） $t_0$ を起点とする離散的時間軸、

$$t_j = t_{j-1} + d_j \quad (1)$$

$$(j = 1, 2, \dots, J)$$

を導入しよう。添え字  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) は点検回数を表し、時刻  $t_j$  は  $j$  回目の点検時刻を表す。また、 $d_j$  は  $j-1$  回目の点検と  $j$  回目の点検の点検間隔を表す。さらに、 $J$  回目の点検時刻  $t_J$  にトンネル内の全ての照明ユニットの一斉更新が行われる。一斉更新間隔  $\zeta = t_J - t_0$  は政策変数となる。一方、先述したように、照明ユニットを構成する部品の一つである安定器は、日々の道路巡回業務において、安定器の故障に起因した照明ランプの大量不点を確認されると、直ちに当該安定器を交換する、という管理体制が敷かれている。そのため、安定器の劣化・更新過程を記述するために、時刻  $t_0^f (= t_0)$  を起点とする再帰的な離散的時間軸、

$$t_a^f = t_0^f + ae \quad (2a)$$

$$t_A^f = t_0^{f+1} \quad (2b)$$

$$(a = 1, \dots, A; f = 0, 1, \dots, F)$$

を導入する。ただし、添え字  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, A$ ) は単位時間間隔  $e$  における安定器故障の有無のチェック回数であり、時刻  $t_a^f$  は  $a$  回目のチェック時刻を表す。 $A$  回目のチェック時にトンネル内の全ての照明ユニットに対して、安定器の一括取替が実施される。安定器の一括取替間隔を  $\eta = Ae$  と表す。さらに、添え字  $f$  は、前

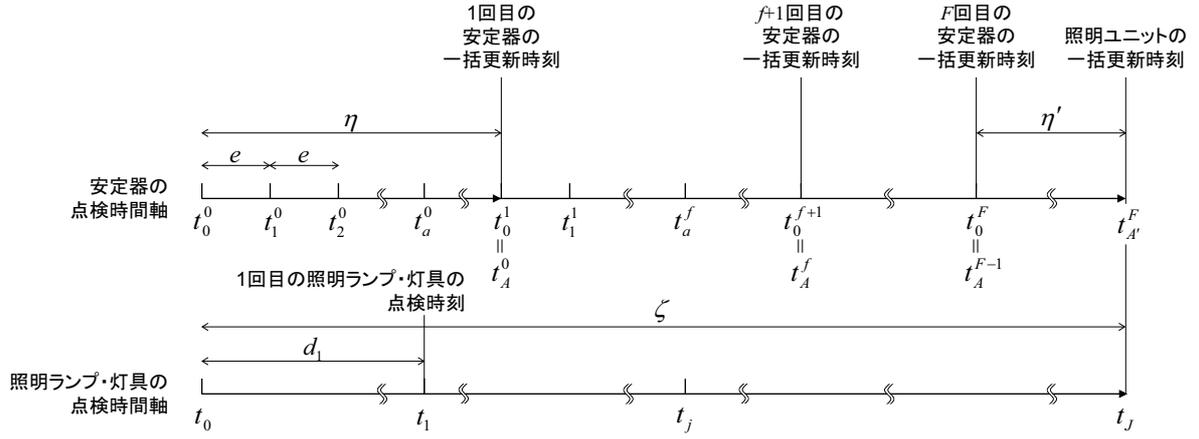


図-2 離散的時間軸

回の安定器の一括更新時刻から時刻  $t_a^f$  までに実施された安定器の一括取替回数であり、照明ユニットの一斉更新時刻までに  $F$  回の安定器の一括取替が実施される。また、照明ユニットの一斉更新において安定器の取替も同時に実施されることから、 $F+1$  回目の安定器の一括取替間隔を  $\eta' = A'e$  として、

$$\zeta = F \times Ae + A'e \quad (3)$$

が満たされる。

#### b) 状態変数ベクトルの設定

対象とするトンネルは、 $N$  個の照明ユニットで構成されている。照明ランプと安定器は、故障しているか否かの 2 値状態でその健全性が評価される。時刻  $t_j$  における施設の劣化状態を表現するために、ダミー変数

$$\delta_l(t_j) = \begin{cases} 1: \text{部品}l\text{が故障している場合} \\ 0: \text{部品}l\text{が故障していない場合} \end{cases} \quad (4)$$

$(l = 1, 2)$

を設定する。ただし、部品 1 は照明ランプ、部品 2 は安定器を表す。本研究では、照明ランプ、安定器の劣化過程を時間依存型のハザード関数を持つワイブル劣化ハザードモデル<sup>12)</sup>で表現するため、各部品の使用時間を記録する必要がある。照明ランプに関して、時刻  $t_j$  における使用時間別部品数を、1 行  $j+1$  列の状態変数ベクトル

$$\mathbf{n}_1(t_j) = (n_{1,1}(t_j), \dots, n_{1,j+1}(t_j)) \quad (5)$$

で表す。  $n_{1,p}(t_j) (p = 1, \dots, j+1)$  は、時刻  $t_j$  に使用時間が  $S_j^p$  となる照明ランプ数である。時刻  $t_j$  における照明ランプの使用時間分布は、時刻  $t_{j-1}$  における照明ランプの使用時間分布に点検間隔  $d_j$  を加えた分布（期間  $[t_{j-1}, t_j]$  において不点とならない場合）、および不点によって取り替えられた場合である使用時間 0 によって構成されているため、時刻  $t_j$  における 1 行  $j+1$  列

の使用時間分布ベクトル  $\mathbf{S}_j$  の要素  $S_j^p$  は、

$$S_j^1 = 0 \quad (6)$$

$$S_j^{p+1} = S_j^p + d_j \quad (7)$$

$$(p = 1, \dots, j)$$

を満たし、状態変数ベクトル  $\mathbf{n}_1(t_j)$  の要素  $n_{1,p}(t_j)$  と対応している。すなわち、 $n_{1,1}(t_j)$  は時刻  $t_j$  に点検によって取り替えられた照明ランプ数を表す。また、 $j=0$  時点において供用が開始されるため、 $S_0 = 0$  である。次に、トンネル内の照明ユニット全体の平均的な劣化・更新過程を記述することを考える。照明ランプの使用状態は、状態変数ベクトル (5) を用いて表される。この状態変数ベクトルを用いて、各状態が生起する相対頻度ベクトルを設定する。いま、各使用時間状態の相対頻度を、

$$\nu_{1,p}(t_j) = \frac{n_{1,p}(t_j)}{N} \quad (8)$$

と表そう。さらに、相対頻度  $\nu_{1,p}(t_j)$  を要素とする 1 行  $j+1$  列ベクトル  $\boldsymbol{\nu}_1(t_j)$  を、

$$\boldsymbol{\nu}_1(t_j) = (\nu_{1,1}(t_j), \dots, \nu_{1,j+1}(t_j)) \quad (9)$$

と表す。

安定器に関しては、時刻  $t_a^f$  における使用時間別部品数を、状態変数ベクトル

$$\mathbf{n}_2(t_a^f) = (n_{2,1}(t_a^f), \dots, n_{2,A}(t_a^f)) \quad (10)$$

で表現する。  $n_{2,q}(t_a^f) (q = 1, \dots, A)$  は、時刻  $t_a^f$  に使用時間が  $(q-1)e$  となる安定器の数である。したがって、各使用時間状態の相対頻度を、

$$\nu_{2,q}(t_a^f) = \frac{n_{2,q}(t_a^f)}{N} \quad (11)$$

と表すことができる。また、相対頻度  $\nu_{2,q}(t_a^f)$  を要素とする行ベクトル  $\boldsymbol{\nu}_2(t_a^f)$  を、

$$\boldsymbol{\nu}_2(t_a^f) = (\nu_{2,1}(t_a^f), \dots, \nu_{2,A}(t_a^f)) \quad (12)$$

と表す。

最後に、灯具の健全度は、 $M$  個の離散的な劣化状態を表すダミー変数

$$\delta_3(t_j) = m \quad (m = 1, \dots, M) \quad (13)$$

を用いて表現する。時刻  $t_j$  における灯具の状態ベクトルを、

$$\mathbf{n}_3(t_j) = (n_{3,1}(t_j), \dots, n_{3,M}(t_j)) \quad (14)$$

と表す。ただし、 $n_{3,m}(t_j)$  は、時刻  $t_j$  に状態  $m$  である灯具の個数である。照明ランプ、安定器と同様に、相対頻度  $\nu_{3,m}(t_j)$  を要素とする行ベクトル  $\boldsymbol{\nu}_3(t_j)$  を、

$$\boldsymbol{\nu}_3(t_j) = (\nu_{3,1}(t_j), \dots, \nu_{3,M}(t_j)) \quad (15)$$

と表す。

## (2) 各部品の劣化・更新過程

### a) 照明ランプの劣化・更新過程

照明ランプの不点に対して、点検間隔  $\mathbf{D} = (d_1, \dots, d_j)$  で定期的な点検が実施されている。ある照明ランプが時刻  $t_{j-1}$  の点検において不点とならずに使用されており、次の点検時刻  $t_j$  においても不点となっていない確率を考える。時刻  $t_{j-1}$  におけるトンネル内全体の照明ランプの使用時間分布は、前節で定義したように、 $\mathbf{S}_{j-1} = (S_{j-1}^1, \dots, S_{j-1}^j)$  によって表される。この時、点検時刻  $t_j$  における照明ランプの使用時間分布ベクトル  $\mathbf{S}_j$  の要素は、時刻  $t_j$  においても不点とならずに使用されている場合の使用時間  $\mathbf{S}_{j-1} + d_j$ 、および、不点によって取り替えられた場合の使用時間  $0$  によって構成されている。したがって、期間  $[t_{j-1}, t_j]$  における照明ランプの使用時間分布の推移確率行列  $\mathbf{P}_j^1(d_j)$  は、

$$\begin{aligned} & \mathbf{P}_j^1(d_j) \\ &= \begin{pmatrix} 1 - p_{1,2}^1 & p_{1,2}^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 - p_{2,3}^1 & 0 & p_{2,3}^1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - p_{j,j+1}^1 & 0 & 0 & \cdots & p_{j,j+1}^1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

のように、 $j+1$  行  $j+1$  列の行列として表現できる。ただし、行列の要素  $p_{x,y}^1(d_j) (x = 1, \dots, j; y = 2, \dots, j+1)$  は、時刻  $t_{j-1}$  において使用時間  $S_{j-1}^x$  の照明ランプが、時刻  $t_{j+1}$  においても不点とならずに使用時間  $S_{j-1}^y$  となる確率である。また、推移確率行列 (16) における状態変数は、使用時間別照明ランプ数に対して定義されていることに留意されたい。

このとき、照明ランプの劣化・更新過程は、相対頻

度ベクトル (9)、推移確率行列 (16) を用いて、

$$\boldsymbol{\nu}_1(t_j) = \bar{\boldsymbol{\nu}}_1(t_{j-1}) \mathbf{P}_j^1(d_j) \quad (17)$$

$$\bar{\boldsymbol{\nu}}_1(t_{j-1}) = [\boldsymbol{\nu}_1(t_{j-1}), 0] \quad (18)$$

$$(j = 1, \dots, J)$$

と表現できる。本研究では、照明ランプの劣化状態の推移確率をワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現する。

### b) 安定器の劣化・更新過程

ある安定器が時刻  $t_0^f$  に一括取替され、以降、時刻  $t_{a-1}^f = t_0^f + (a-1)e$  まで故障せずに使用された場合を考える。このとき、次のチェック時刻  $t_a^f = t_0^f + ae$  においても故障していない確率を、

$$\text{Prob}[\delta_2(t_a^f) = 0 | \delta_2(t_{a-1}^f) = 0] = p_{a-1,a}^2(e) \quad (19)$$

と定義する。このとき、時刻  $t_a^f = t_0^f + ae$  において当該安定器の故障が観測される確率は、

$$\text{Prob}[\delta_2(t_a^f) = 1 | \delta_2(t_{a-1}^f) = 0] = 1 - p_{a-1,a}^2(e) \quad (20)$$

と表現することができる。本研究では、安定器の劣化状態の推移確率  $p_{a-1,a}^2(e)$  をワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現する。時刻  $t_A^f$  に安定器が一括取替されるため、安定器の使用時間が  $Ae$  を超えることはない。したがって、安定器の劣化・更新過程に関する推移確率行列  $\mathbf{P}^2(e)$  は、

$$\begin{aligned} & \mathbf{P}^2(e) = \\ & \begin{pmatrix} 1 - p_{0,1}^2 & p_{0,1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 - p_{1,2}^2 & 0 & p_{1,2}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - p_{A-1,A}^2 & 0 & 0 & \cdots & p_{A-1,A}^2 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

と表現される。式 (21) の  $x$  行  $y$  列目の要素は、使用時間  $(x-1)e$  の安定器が、時間  $e$  経過後に使用時間  $(y-1)e$  へと推移する確率を表現している。なお、表記の簡略化のため、 $p_{a-1,a}^2(e) = p_{a-1,a}^2$  と表記している。このとき、安定器の劣化・更新過程は、相対頻度ベクトル (9)、推移確率 (21) を用いて、

$$\boldsymbol{\nu}_2(t_a^f) = \boldsymbol{\nu}_2(t_{a-1}^f) \mathbf{P}^2(e) \quad (22)$$

と表現され、さらに、時刻  $t_0^f$  における相対頻度を与件とすると、任意の時刻  $t_a^f$  における期待相対頻度  $\boldsymbol{\nu}_2(t_a^f)$  は、

$$\boldsymbol{\nu}_2(t_a^f) = \boldsymbol{\nu}_2(t_0^f) \{\mathbf{P}^2(e)\}^a \quad (23)$$

と表現することができる。

### c) 灯具の劣化・更新過程

上述の照明ランプ、安定器とは異なり、灯具の劣化状態は、多段階の離散的な健全度  $m (m = 1, \dots, M)$  により表現される。さらに、本研究では、灯具の劣化・更新過

程を状態空間  $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$  で定義される斉次的なマルコフ連鎖モデルで表現する。いま、ある灯具が時刻  $t_0$  に設置され、時刻  $t_{j-1}$  に健全度  $\delta_3(t_{j-1}) = m_1$  であったとする。このとき、次の点検時刻  $t_j = t_{j-1} + d_j$  に健全度が  $\delta_3(t_j) = m_2$  となる確率を、

$$\text{Prob}[\delta_3(t_j) = m_2 | \delta_3(t_{j-1}) = m_1] = \pi_{m_1, m_2}(d_j) \quad (24)$$

$$(j = 1, \dots, J)$$

とする。本研究では、灯具の劣化状態の推移確率  $\pi_{m_1, m_2}(d_j)$  をマルコフ劣化ハザードモデル<sup>16)</sup>を用いて表現する。

次に、補修政策  $\xi$  において、各健全度  $y (y = 1, \dots, M)$  においてその時点で実施するアクションルールを定義する。補修アクション  $\phi^\xi(y)$  は、健全度  $y$  に対して補修を実施し、健全度が  $\phi^\xi(y)$  に推移することを意味している。たとえば、補修アクション  $\phi^\xi(y) = y'$  は、健全度が  $y$  の時に補修を実施し、健全度が  $y'$  に回復することを意味する。健全度が  $y$  の時に補修をしないというアクションが選択される場合には、 $\phi^\xi(y) = y$  と表される。補修政策  $\xi$  を適用することにより、補修前後の灯具の劣化状態は変化する。このような劣化状態の推移関係は、補修行列  $Q^\xi$  によって表現することが可能であり、補修行列  $Q^\xi$  の要素  $q_{y, y'}^\xi$  は、

$$q_{y, y'}^\xi = \begin{cases} 1 & \phi^\xi(y) = y' \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (25)$$

と表すことができる。

補修政策の中には、劣化の進展した灯具へのバインド線設置による落下防止措置を実施する政策がある。バインド線設置措置は、通常点検によって判定される健全度では表現できず、また、バインド線が設置された灯具は、照明ユニットの一斉更新時期までバインド線の巻き直し等の処置が定期的になされる。したがって、マルコフ劣化ハザードモデルを用いて表現できる健全度の推移確率 (24) を拡張し、健全度  $M+1$  にバインド線設置状態を追加する。このとき、推移確率  $\pi_{x, M+1}(d_j) (x = 1, \dots, M+1)$ 、および  $\pi_{M+1, x}(d_j) (x = 1, \dots, M+1)$  は、

$$\pi_{x, M+1}(d_j) = \pi_{M+1, x}(d_j) = \begin{cases} 1 & x = M+1 \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (26)$$

となる。したがって、灯具の劣化過程を表現する ( $M+$

表-1 各費用の定義

記号	定義
$c_1$	照明ランプ 1 つの取替費用
$c_2$	安定器 1 つの取替費用
$c_3$	灯具 1 つの取替費用
$c_B$	灯具 1 つの落下防止対策費用
$e_0$	トンネル内全ての灯具の点検費用
$e_1$	トンネル内全ての照明ランプの点検費用
$e_2$	トンネル内全ての安定器の点検費用
$h$	点検・取替時に発生する交通規制費用

1)  $\times (M+1)$  推移確率行列  $\Pi(d_j)$  は、

$$\Pi(d_j) = \begin{pmatrix} \pi_{1,1} & \pi_{1,2} & \cdots & \pi_{1,M} & 0 \\ 0 & \pi_{2,2} & \cdots & \pi_{2,M} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \pi_{M-1,M} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

と表される。さらに、補修行列  $Q^\xi$  に関しても、健全度  $M+1$  を追加した補修行列  $\bar{Q}^\xi$  を考えることで、灯具の劣化・更新過程を記述する。式 (15) で示される相対頻度ベクトル  $\nu_3(t_j)$  にバインド線設置状態を表す状態  $M+1$  を追加した相対頻度ベクトル  $\bar{\nu}_3(t_j) = (\nu_{3,1}(t_j), \dots, \nu_{3, M+1}(t_j))$  を用いて、

$$\bar{\nu}_3(t_j) = \bar{\nu}_3(t_{j-1}^d) \Pi(d_j) \bar{Q}^\xi \quad (28)$$

$$(j = 1, \dots, J)$$

と表現できる。

#### 4. 最適点検・更新モデルの定式化

いま、道路管理者が単一のトンネルに設置された多数の照明ユニットを管理する問題を考える。本研究では、最終的にはトンネル単位で、ライフサイクル費用の算定を行い、最適な点検・更新政策を決定する。

##### (1) ライフサイクル費用

最適点検・更新政策をモデル化するために、高速道路トンネル照明システムのライフサイクル費用を定義する。ライフサイクル費用を定義するために必要な費用を表-1 に纏める。これらの費用情報を用いてライフサイクル費用を定義する。まず、各部品の補修・取替費用に着目する。時刻  $t_j$  における劣化状態に対して実施される取替に応じて、照明ランプ 1 つあたりに対して時刻  $t_j$  に発生する期待取替費用  $ec_1(t_j)$  は、現在時刻を  $t_0$  とすると、

$$ec_1(t_j) = \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} \nu_{1,1}(t_j) c_1 \quad (29)$$

となる。ただし、 $\rho$  は割引率である。さらに、時刻  $t_0$  (現在時刻) から  $t_J$  までの期間  $\zeta$  の間に発生する照明ランプの取替費用  $EC_1$  は、

$$\begin{aligned} EC_1^\zeta &= \sum_{j=1}^{J-1} ec_1(t_j) \\ &= \sum_{j=1}^{J-1} \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} \nu_{1,1}(t_j) c_1 \end{aligned} \quad (30)$$

となる。

次に、安定器の取替費用を定式化する。時刻  $t_a^f$  に発生する期待取替費用  $ec_2(t_a^f)$  は、

$$ec_2(t_a^f) = \frac{1}{(1+\rho)^{fAe+ae}} \nu_{2,1}(t_a^f) c_2 \quad (31)$$

となる。さらに、時刻  $t_0^f$  から  $t_A^f$  までの期間  $\eta$  に発生する照明ランプの取替費用  $ec_2'(f)$  は、

$$\begin{aligned} ec_2'(f) &= \sum_{a=1}^{A-1} ec_2(t_a^f) + \frac{1}{(1+\rho)^{(f+1)Ae}} c_2 \\ &= \sum_{a=1}^{A-1} \frac{1}{(1+\rho)^{fAe+ae}} \nu_{2,1}(t_a^f) c_2 \\ &\quad + \frac{1}{(1+\rho)^{(f+1)Ae}} c_2 \end{aligned} \quad (32)$$

$(f = 0, \dots, F-1)$

となる。一方、 $F$  回目の安定器の一括取替の後、照明ユニットの一斉更新時刻  $t_A^F$  までの期間  $\eta'$  に発生する安定器の取替費用  $ec_2''$  は、

$$\begin{aligned} ec_2'' &= \sum_{a=1}^{A'-1} ec_2(t_a^F) \\ &= \sum_{a=1}^{A'-1} \frac{1}{(1+\rho)^{FAe+ae}} \nu_{2,1}(t_a^F) c_2 \end{aligned} \quad (33)$$

となる。以上より、時刻  $t_0$  (現在時刻) から  $t_A^F$  までの期間  $\zeta = F \times \eta + \eta'$  の間に発生する照明ランプの取替費用  $EC_2$  は、

$$\begin{aligned} EC_2 &= \sum_{f=0}^{F-1} ec_2'(f) + ec_2'' \\ &= \sum_{f=0}^{F-1} \left\{ \sum_{a=1}^A \frac{1}{(1+\rho)^{fAe+ae}} \nu_{2,1}(t_a^f) c_2 \right\} \\ &\quad + \sum_{a=1}^{A'} \frac{1}{(1+\rho)^{FAe+ae}} \nu_{2,1}(t_a^F) c_2 \end{aligned} \quad (34)$$

と表現することができる。

次に、灯具の補修・取替費用を定式化する。時刻  $t_j$  に発生する灯具の補修・取替費用  $ec_3(t_j)$  は、現在時刻を  $t_0$  とすると、

$$ec_3(t_j) = \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} (\bar{\nu}_{3,1}(t_j) c_3 + \bar{\nu}_{3,M+1}(t_j) c_B) \quad (35)$$

と表現できる。ただし、落下防止措置がなされた灯具に対しては、毎回の点検において、 $c_B$  の費用が必要であるとする。時刻  $t_0$  (現在時刻) から  $t_J$  までの期間  $\zeta$  の間に発生する灯具の補修・取替費用  $EC_3$  は、

$$\begin{aligned} EC_3 &= \sum_{j=1}^{J-1} ec_3(t_j) \\ &= \sum_{j=1}^{J-1} \left\{ \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} (\bar{\nu}_{3,1}(t_j) c_3 + \bar{\nu}_{3,M+1}(t_j) c_B) \right\} \end{aligned} \quad (36)$$

と表すことができる。

したがって、時刻  $t_0$  (現在時刻) から  $t_J$  までの期間  $\zeta$  の間に発生する照明ユニット1つの補修・取替費用  $EC$  は、時刻  $t_J$  における照明ユニットの更新費用も含め、

$$EC = \sum_{l=1}^3 EC_l + \frac{1}{(1+\rho)^{t_J}} \left( \sum_{l=1}^3 c_l \right) \quad (37)$$

となる。

次に、各部品の点検・更新に伴う交通規制費用を定式化する。照明ランプと灯具の点検・交換の際には、交通規制が必要となる。一方、安定器の点検には交通規制は必要なく、交換時にのみ交通規制費用が必要となる。このことを考慮すると、現在時刻  $t_0$  から時刻  $t_J = t_A^F$  までに必要となる交通規制費用  $RC$  は、

$$\begin{aligned} RC &= \sum_{j=1}^J \left\{ \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} h \right\} \\ &\quad + \sum_{f=0}^F \left\{ \sum_{a=1}^A \frac{1}{(1+\rho)^{fAe+ae}} \nu_{2,1}^\xi(t_a^f) h \right\} \\ &\quad + \sum_{a=1}^{A'} \frac{1}{(1+\rho)^{FAe+ae}} h \end{aligned} \quad (38)$$

と表すことができる。

さらに、照明ユニットの点検費用を定式化する。現在時刻  $t_0$  から時刻  $t_J = t_A^F$  までに必要となる点検費用  $IC$  は、

$$\begin{aligned} IC &= \sum_{j=1}^J \left\{ \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} (e_0 + e_1) \right\} \\ &\quad + \sum_{f=0}^F \left\{ \sum_{a=1}^A \frac{1}{(1+\rho)^{fAe+ae}} e_2 \right\} \\ &\quad + \sum_{a=1}^{A'} \frac{1}{(1+\rho)^{FAe+ae}} e_2 \end{aligned} \quad (39)$$

と表現することができる。

以上の定式化のもと、対象とするトンネル内の全ての照明ユニットにおける、時刻  $t_0$  から時刻  $t_J = t_A^F$  ま

での期間  $\zeta$  当たりのライフサイクル費用の割引現在価値  $LCC'(\Xi)$  は、点検・更新政策を  $\Xi = (\mathbf{D}, \eta, F, \xi)$  として、

$$LCC'(\Xi) = N \times EC + RC + IC \quad (40)$$

と表すことができる。  $LCC'(\Xi)$  を  $\zeta = \sum_{j=1}^J d_j$  で標準化することにより、単位時間当たりの、トンネル内の全ての照明ユニットのライフサイクル費用  $LCC(\Xi)$  は、

$$LCC(\Xi) = \frac{LCC'(\Xi)}{\sum_{j=1}^J d_j} \quad (41)$$

と表すことができる。

## (2) 最適点検・更新モデル

単にライフサイクル費用を最小化するのであれば、政策変数である点検間隔を大きくすればよい。しかし、点検間隔の増加は、照明ランプの不点や灯具の落下の可能性を高める。そこで、リスク管理水準を設定し、リスク管理水準を満たしつつライフサイクル費用を最小化するような点検・更新政策を最適点検・更新モデルとする。そのために、照明ユニットの各部品に関わるリスクを計量化することを考える。

照明ランプでは不点をリスク事象として捉える。具体的には、 $t_0$  から  $t_j^d$  までのそれぞれの時刻において算出できる不点である照明ランプの相対頻度  $\nu_{1,1}(t_j)$  の最大値とする。すなわち、不点確率

$$N_1(\mathbf{D}) = \max \{ \nu_{1,1}(t_j), j = 1, 2, \dots, J \} \quad (42)$$

をリスク管理指標として設定する。一方、安定器に関しては、1日に複数回実施される道路巡回により故障が発見され、即座に緊急取替が実施される。安定器の故障は、照明ランプの大量不点に直結するが、頻繁に実施される道路巡回と逐次取替により、故障した安定器は1日以内に発見され取替えられる。そのため、本研究の分析では安定器の故障に起因した不点発生リスクを考慮しない。ただし、安定器の故障に伴う緊急取替に必要な規制費用は分析の対象とする。また、道路管理者は、安定器の故障による大量不点の可能性を考慮し、照明ランプの不点に関して余裕を持ったリスク管理目標を設定しなければならないのは言うまでもない。灯具に関しては、劣化の最も進展した健全度の相対頻度を用いてリスク管理指標を定義する。ただし、バインド線による落下防止措置を施している灯具が存在する場合、落下防止措置が行われた灯具と劣化の最も進展した灯具の相対頻度の合計を用いる。具体的に、リスク管理指標  $N_3(\mathbf{D}, \xi)$  を定義すると、

$$N_3(\mathbf{D}, \xi) = \max \left\{ \bar{\nu}_{3,1}(t_j) + \bar{\nu}_{3,M+1}(t_j), j = 1, 2, \dots, J \right\} \quad (43)$$

と表す。ここで、高速道路トンネル照明システムのリスク管理目標を照明ランプと灯具に関して設定する。まず、照明ランプに関しては、「トンネル内の全ての時刻で故障確率  $N_1(\mathbf{D})$  をリスク管理水準  $U_1$  以下に抑える」ことをリスク管理目標とする。同様に、灯具に関しても、「トンネル内の全ての時刻でリスク管理指標  $N_3(\mathbf{D}, \xi)$  をリスク管理水準  $U_3$  以下に抑える」とリスク管理目標を定める。このとき、上記のリスク管理目標を全て達成することができる点検・更新政策の集合  $\Omega(\mathbf{U})$  を、

$$\Omega(\mathbf{U}) = \{ \Xi | N_i(\mathbf{D}, \xi) \leq U_i \ (i = 1, 3) \} \quad (44)$$

と定義する。ここに、 $\mathbf{U} = (U_1, U_3)$  はリスク管理水準ベクトルである。リスク管理水準  $\mathbf{U}$  を所与としたときに、ライフサイクル費用を最小化するような点検・更新政策  $\Xi(\mathbf{U})$  を最適点検・更新政策とする。すなわち、最適点検・更新モデルは、

$$C^*(\mathbf{U}) = \min \{ LCC(\Xi) \} \quad (45a)$$

$$\text{subject to } \Xi \in \Omega(\mathbf{U}) \quad (45b)$$

と定式化することができる。

式(45b)に示される最適点検・更新モデルは、照明ランプ・灯具の点検間隔の流列  $\mathbf{D}$ 、安定器の一斉取替間隔  $\eta$  および一斉取替の回数  $F$ 、灯具の補修政策  $\xi$  を変化させることで、所与のリスク管理水準  $\mathbf{U}$  の下でのライフサイクル費用の最小値を求めるモデルである。これら4つの政策変数のうち、 $\eta$  および  $F$  に関しては、一般的に照明ユニットの一斉取替間隔が20年～30年であるため、 $\eta$  および  $F$  の組合せは現実的に計算可能な数となる。また、補修政策  $\xi$  に関しても、政策の候補として莫大な数を考慮することはない。したがって、 $\eta$ 、 $F$ 、 $\xi$  の全ての組合せを考慮し、ライフサイクル費用を計算し、ライフサイクル費用の最小値を求めることができる。しかし、照明ランプ・灯具の点検間隔の流列  $\mathbf{D}$  に関しては、全ての組合せを考慮することが現実的でなく、計算不可能だといえる。したがって、本研究では、 $\eta$ 、 $F$ 、 $\xi$  の組合せに対して、所与のリスク管理水準の下でのライフサイクル費用が最小となるような点検間隔の流列  $\mathbf{D}$  を、遺伝的アルゴリズムを用いて算出する。

## 5. 計算方法

### (1) 遺伝的アルゴリズム

3.で説明した時間依存的な点検間隔を有する最適点検・更新政策を実際に計算するために、遺伝的アルゴリズム<sup>19)–21)</sup>を採用する。遺伝的アルゴリズムは、本研究における点検間隔の流列の要素の組み合わせのように、最適解を探索することが現実的でない場合、言い換えれば、求めた解の最適性を証明できない場合に、解

の候補間の相対的な比較により、近似解を求めるヒューリスティックな手法である。遺伝的アルゴリズムは分野を問わず組合せ最適化問題などに適用されており、社会基盤工学の分野においても、遺伝的アルゴリズムの適用可能性自体が論文として纏められた事例<sup>22)</sup>や複数の橋梁部材の補修時期と補修工法の同時決定問題に適用された事例<sup>23)</sup>も存在する。

本研究の特徴としては、従来の点検・更新政策では定常的に設定されていた点検間隔を施設の供用開始時刻からの経過時間に応じて変化させる点があげられる。このことを表現するために、**3.**において、点検間隔の流列  $\mathbf{D}$  を設定した。このとき、流列  $\mathbf{D}$  の要素  $d_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) には、 $\sum_{j=1}^J d_j = \zeta$  を満たす無数の組み合わせが考えられる。しかし、実際の点検・更新業務を考えた場合、それらの組み合わせの大半が現実的ではなく、リスク管理水準を所与とした場合に費用面でも不利になる組み合わせであると考えられる。本研究では、これらの非現実的な点検間隔の組み合わせを系統的に排除し、より現実的かつライフサイクル費用を相対的に最小化する点検間隔の流列を決定するために、遺伝的アルゴリズムを用いることとする。ただし、本研究で得られた最適非定常点検間隔の流列は、必ずしも厳密解となるとは限らないことに留意して欲しい。しかし、ライフサイクル費用を最小化するという本研究の目的に対しては、このようなヒューリスティックな方法であっても有効となると考える。

遺伝的アルゴリズムでは、その遺伝子操作（オペレータ）の対象となる基礎的な情報の集合である遺伝子型（遺伝子コード, genotype, 以下, GTYPE と呼ぶ）と、GTYPE に従い対象とする事象が実際に表現される表現型（発現型, phenotype, 以下, PTYPE と呼ぶ）の2層構造からなるデータを取り扱う。本研究では、実際の点検間隔の流列を PTYPE とみなし、その流列は **5.(2)** で詳述する 0 か 1 を取るダミー変数のベクトルを GTYPE として発現すると考える。具体的には、GTYPE であるダミー変数ベクトルが遺伝的アルゴリズムのオペレータの対象となり、リスク管理水準を所与としたときに、PTYPE である点検間隔の流列に従いライフサイクル費用が計算され、そのライフサイクル費用を適合度と捉えて当該 PTYPE に対応する GTYPE の最適性を評価することができる。**5.(2)** では、本研究での、PTYPE を GTYPE に変換する具体的な方法を説明する。

## (2) PTYPE と GTYPE の対応関係

いま、想定し得る最小の点検間隔を  $\varepsilon$  と設定する。最小点検間隔  $\varepsilon$  は、対象とする施設の種類や点検・更新政策の実現可能性に応じて最適点検・更新政策を求めるための前提条件として設定すべき変数である。こ

で、時刻  $s_0 (= t_0)$  を起点とする新たな離散的時間軸

$$s_z = s_0 + \varepsilon z \quad (z = 1, \dots, Z) \quad (46)$$

を導入する。さらに、時刻  $s_z$  において灯具とランプに対して点検を実施するか否かを表すダミー変数ベクトル  $\mathbf{g} = (g(s_0), \dots, g(s_Z))$  の要素  $g(s_z)$  を、

$$g(s_z) = \begin{cases} 1 & \text{点検を実施するとき} \\ 0 & \text{点検を実施しないとき} \end{cases} \quad (47)$$

$(s_z = 0, \dots, s_Z)$

と設定する。ただし、 $g(s_0) = g(s_Z) = 1$  が必ず成立し、 $\sum_{z=0}^Z g(s_z) = J + 1$  である。ここで、点検が実施され  $g(s_z) = 1$  となる  $J + 1$  個の時刻  $s_z$  で構成される点検時刻ベクトルを  $\mathbf{s}' = (s'_0, \dots, s'_j, \dots, s'_J)$  と定義する。このとき、**3.** で説明した非定常な点検間隔  $d_j$  は、 $d_j = s'_j - s'_{j-1}$  と表現することができる。ここで、ダミー変数ベクトル  $\mathbf{g}$  が GTYPE に、点検時刻ベクトル  $\mathbf{s}'$  が PTYPE に相当する。

所与のリスク管理水準を満足し、ライフサイクル費用を可能な限り最小化するようなダミー変数ベクトル  $\hat{\mathbf{g}} = (\hat{g}(s_0), \dots, \hat{g}(s_Z))$  を遺伝的アルゴリズムにより求める。

## (3) 計算手順

本研究で提案する点検・更新モデルでは、流列  $\mathbf{D}$  の要素  $d_j$  ( $j = 1, \dots, J$ )、照明ユニットの一括取替間隔  $\zeta$ 、安定器の一括取替間隔  $\eta$  が、時間間隔を表す政策変数である。これらのうち、 $\zeta$  と  $\eta$  に関しては、それらの値を逐次変化させ、リスク管理指標とライフサイクル費用の関係を計算する感度分析により、最適値を算出する。一方で、流列  $\mathbf{D}$  の要素  $d_j$  に関しては、 $\zeta$  と  $\eta$  を所与としたうえで、遺伝的アルゴリズムにより決定する。いま、照明ユニットの一括取替間隔  $\zeta$  を  $\bar{\zeta}$  に、安定器の一括取替間隔  $\eta$  を  $\bar{\eta}$  に固定する。

以下で、本研究での遺伝的アルゴリズムの具体的な操作手順を説明する。

### ステップ1 初期設定

リスク管理水準ベクトル  $\mathbf{U} = (U_1, U_3)$  を設定する。遺伝子操作の対象とする個体数  $W$  を設定する。 $W$  種類のダミー変数ベクトルの初期値を  $\mathbf{g}_w^{(0)} = (g_w^{(0)}(s_0), \dots, g_w^{(0)}(s_Z))$  ( $w = 1, \dots, W$ ) に設定する。アルゴリズムのループ回数（世代数）を  $\gamma = 1$  とする。アルゴリズムの終了回数  $\Gamma$  を設定する。

### ステップ2 デコード (decode) 操作と適合度評価

**5.(2)** で述べた対応関係にもとづき、ダミー変数ベクトル  $\mathbf{g}_w^{(\gamma-1)}$  を非定常点検間隔の流列  $\mathbf{D}_w^{(\gamma-1)} = (d_{w,1}^{(\gamma-1)}, \dots, d_{w,j}^{(\gamma-1)}, \dots, d_{w,J}^{(\gamma-1)})$  にデコードする。デコードされた非定常点検間隔の流列  $\mathbf{D}_w^{(\gamma-1)}$  に対し、リスク管理指標  $N_{\iota,w}^{(\gamma-1)}$  ( $\iota = 1, 3; w = 1, \dots, W$ ) と

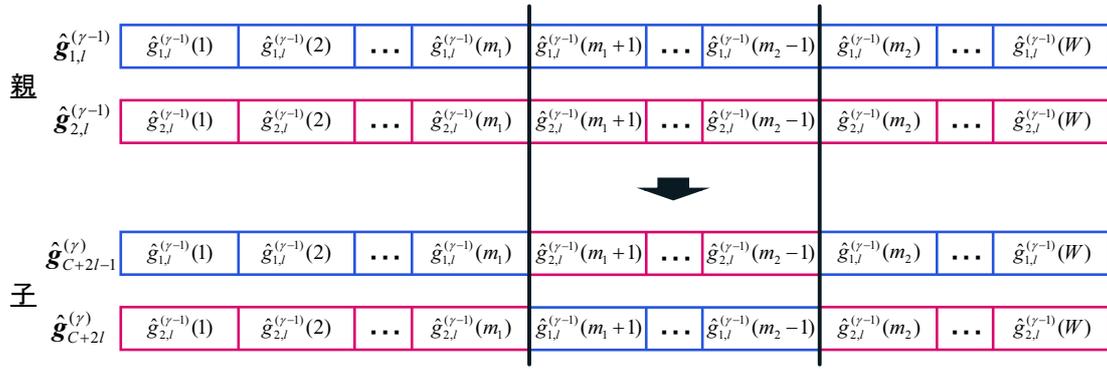


図-3 2点交叉

ライフサイクル費用  $LCC_w^{(\gamma-1)}$  を算出する. ただし,  $\exists l \in (1, 3) (N_{l,w}^{(\gamma-1)} > \underline{U}_l)$  のとき,  $LCC_w^{(\gamma-1)}$  は極めて大きい値を取ると考える.

### ステップ3 遺伝子操作

#### ステップ3-1 選択

遺伝的操作における選択の方法として, ルーレット選択, ランキング選択, トーナメント選択, エリート選択などがあげられる<sup>20),21)</sup>. 本研究では, エリート選択とライフサイクル費用の逆数  $\chi_w^{(\gamma-1)} = 1/LCC_w^{(\gamma-1)}$  にもとづいたルーレット選択を併用し次世代 (第  $\gamma$  世代) の遺伝子 (ダミー変数ベクトル) の選択を行う.

##### ステップ3-1-1 エリート選択

エリート選択に関しては,  $W$  個のダミー変数ベクトルの内, ライフサイクル費用の小さい上位  $a\%$  の  $W \times a/100$  [個] のダミー変数ベクトルがエリート選択される. エリート選択された  $W \times a/100$  [個] のダミー変数ベクトルは, 交叉, 突然変異プロセスを経ず, 直接的に, 次世代 (第  $\gamma$  世代) のダミー変数ベクトル集合  $(g_1^{(\gamma)}, \dots, g_W^{(\gamma)})$  の一部  $(g_1^{(\gamma)}, \dots, g_C^{(\gamma)})$  となる. ただし,  $C = W \times a/100$  であり,  $C$  が整数になるように,  $W$  と  $a$  の値を設定する.

##### ステップ3-1-2 ルーレット選択

エリート選択で選択されなかった  $W \times (1 - a)/100$  個のダミー変数ベクトル集合を  $\Delta^{(\gamma-1)}$  とする. ダミー変数ベクトル集合  $\Delta^{(\gamma-1)}$  からルーレット選択により, 交叉, 突然変異の対象となるダミー変数ベクトル (親) を選択する. このとき, ダミー変数ベクトル  $g_w^{(\gamma-1)}$  が選択される確率  $p_w^{(\gamma-1)}$  を,

$$p_w^{(\gamma-1)} = \frac{\chi_w^{(\gamma-1)}}{\sum_{g \in \Delta^{(\gamma-1)}} \chi_g^{(\gamma-1)}} \quad (w \in \Delta^{(\gamma-1)}) \quad (48)$$

と定義する. なお,  $\exists l \in (1, 3) (N_{l,w}^{(\gamma-1)} > \underline{U}_l)$  のとき,  $\chi_w^{(\gamma-1)} = 0$  とする. 確率 (48) に従い, 交叉のための親 (2 個のダミー変数ベクトル) を  $W \times (1 - a)/50$  ペア選択する.

#### ステップ3-2 交叉

ルーレット選択において選択された親 (ダミー変数ベクトルのペア) に対し, 交叉を行い, 子 (次世代 (第  $\gamma$  世代) のダミー変数ベクトルのペア) を生成する. 交叉に関しても, 1点交叉, 2点交叉, 多点交叉, 一様交叉など様々な種類がある<sup>20),21)</sup>. 本研究では, 2点交叉を用いてルーレット選択された親に対し交叉を行う. ルーレット選択された親に対して, 番号  $l$  ( $l = 1, \dots, L$ ) を付与する. ただし,  $L = W \times (1 - a)/200$  であり,  $L$  が整数となるように,  $W$  と  $a$  の値は予め設定しておく.

いま, 第  $l$  ( $l = 1, \dots, L$ ) 番目の親をダミー変数ベクトル  $\hat{g}_{r,l}^{(\gamma-1)} = (\hat{g}_{r,l}^{(\gamma-1)}(1), \dots, \hat{g}_{r,l}^{(\gamma-1)}(W))$  ( $r = 1, 2$ ) を用いて表す. なお, ダミー変数ベクトル  $\hat{g}_{r,l}^{(\gamma-1)}$  には, ダミー変数ベクトル集合  $\Delta^{(\gamma-1)}$  のいずれかの要素がそれぞれ該当する. ダミー変数ベクトルペア  $(\hat{g}_{1,l}^{(\gamma-1)}, \hat{g}_{2,l}^{(\gamma-1)})$  を用いて1世代に対し  $L$  回の交叉を行うこととなる. 以下では, 第  $\gamma - 1$  世代の親 (ダミー変数ベクトルペア  $(\hat{g}_{1,l}^{(\gamma-1)}, \hat{g}_{2,l}^{(\gamma-1)})$ ) から子を交叉により生成する過程を説明する. まず,  $(1, 2, 3, \dots, Z - 1)$  を確率変数の定義域とする離散一様分布から2個の乱数  $m_1, m_2$  ( $m_1, m_2 \in (1, 2, 3, \dots, Z - 1); m_1 < m_2$ ) を生成する. ダミー変数ベクトル  $\hat{g}_{1,l}^{(\gamma-1)}$  の  $m_1 + 1$  番目の要素から  $m_2$  番目の要素までを, ダミー変数ベクトル  $\hat{g}_{2,l}^{(\gamma-1)}$  の  $m_1 + 1$  番目の要素から  $m_2$  番目の要素までと入れ替える. この操作が2点交叉である. このようにして生成された2種類のダミー変数ベクトルを次世代 (第  $\gamma$  世代) のダミー変数ベクトル集合  $(g_1^{(\gamma)}, \dots, g_W^{(\gamma)})$  の一部  $(g_{C+2l-1}^{(\gamma)}, g_{C+2l}^{(\gamma)})$  とする. なお, 2点交叉の概要は, 図-3 に示している. 併せて参照されたい.

#### ステップ3-3 突然変異

交叉を行った後の第  $\gamma$  世代の子の遺伝子 (ダミー変数ベクトル  $g_w^{(\gamma)}$  ( $t = C + 1, \dots, W$ )) それぞれに対して, 突然変異を行う. 本研究では, 突然変異の方法として, 単一遺伝子座突然変異<sup>20),21)</sup>を採用する. いま,  $b\%$  の確率で突然変異が発生すると考える. まず,  $W - C$  個の連

統一様分布  $U(0, 1)$  に従う乱数  $(u_{C+1}^{(\gamma)}, \dots, u_W^{(\gamma)})$  を発生させる。  $u_w^{(\gamma)} \leq b/100$  ( $w = C+1, \dots, W$ ) の場合、ダミー変数ベクトル  $\mathbf{g}_w^{(\gamma)}$  に突然変異が生じるとする。突然変異の方法としては、  $u_w^{(\gamma)} \leq b/100$  ( $w = C+1, \dots, W$ ) の場合、  $(1, 2, 3, \dots, Z)$  を確率変数の定義域とする離散一様分布に従う乱数  $du_w^{(\gamma)}$  を 1 つ発生させ、ダミー変数ベクトル  $\mathbf{g}_w^{(\gamma)}$  の第  $du_w^{(\gamma)}$  要素が 0 の場合 1 に、1 の場合 0 に変異させる。以上の操作を  $(\mathbf{g}_{C+1}^{(\gamma)}, \dots, \mathbf{g}_W^{(\gamma)})$  のそれぞれに対して行った後のダミー変数ベクトルを最終的な第  $\gamma$  世代の子の遺伝子の一部 (ダミー変数ベクトル  $\mathbf{g}_w^{(\gamma)}$  ( $t = C+1, \dots, W$ )) として採用する。ダミー変数ベクトル  $\mathbf{g}_w^{(\gamma)}$  ( $t = C+1, \dots, W$ ) に、ステップ 3-1-1 でエリート選択されたダミー変数ベクトル集合  $(\mathbf{g}_1^{(\gamma)}, \dots, \mathbf{g}_C^{(\gamma)})$  を加えることで、第  $\gamma$  世代のダミー変数ベクトルの集合  $(\mathbf{g}_1^{(\gamma)}, \dots, \mathbf{g}_W^{(\gamma)})$  を定義することができる。

#### ステップ 4 アルゴリズムの終了判定

ループ回数 (世代数) が  $\gamma = \Gamma$  のとき、ステップ 2 と同様の操作によりライフサイクル費用  $LCC_w^{(\Gamma)}$  ( $w = 1, \dots, W$ ) を算出したのち、アルゴリズムを終了する。  $LCC_w^{(\Gamma)}$  ( $w = 1, \dots, W$ ) が最小となる非定常点検間隔の流列  $\mathbf{D}_w^{(\Gamma)}$  を最適点検・更新政策の非定常な点検間隔として採用する。  $\gamma < \Gamma$  のときは、  $\gamma = \gamma + 1$  として、ステップ 2 に戻る。

## 6. おわりに

本研究では、非定常な点検間隔を考慮して、高速道路トンネル照明システムの最適点検・更新政策を求めめるための方法論を提案した。具体的には、トンネル照明システムを構成する各部品の劣化過程をワイブル劣化ハザードモデル、マルコフ劣化ハザードモデルを用いて表現するとともに、それらの劣化・更新過程をマルコフ過程モデルを用いて表現した。本研究の特徴は、マルコフ過程モデルにおいて非定常な点検間隔を考慮しライフサイクル費用とリスク管理指標を定量化した点、さらには、遺伝的アルゴリズムを用いて非定常な点検間隔を有する点検・更新政策を考慮し最適点検・更新政策を求めめるための方法論を提案した点にある。なお、研究発表会当日には、実際の高速道路トンネル照明システムの点検データと実在するトンネルの諸元を用いた実証分析により、本研究で提案した方法論の具体的な有用性を示す予定である。

#### 参考文献

1) Frangopol, D. M., Lin, K. Y. and Estes, A. C.: Life-cycle cost design of deteriorating structure, *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, Issue 10, pp.1390-1401, 1997.

2) Matsushima, M., Seki, H. and Matsui, K.: A reliability approach to landing pier optimum repair level, *ACI Materials Journal*, Vol.95, Issue 3, pp.218-225, 1998.

3) 伊庭孝充, 松島学, 関博, 川田秀夫: 塩害を受ける RC 構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究, *土木学会論文集*, No.704/ 55, pp.1-11, 2002.

4) 高山知司, 安田誠宏, 辻尾大樹, 井上純一: ライフサイクルコストの最小化による沿岸構造物被覆材の最適設計, *土木学会論文集 B*, Vol.65, No.1, pp.15-30, 2009.

5) 伊藤義人, 和田光永: イベントを考慮した交通基盤施設のライフサイクル評価手法に関する研究, *土木学会論文集*, No.745/I-65, pp.131-142, 2003.

6) 佐藤忠信, 吉田郁政, 増本みどり, 金治英貞: ライフサイクルコストを考慮した道路橋の補強戦略, *土木学会論文集*, No.784/VI-66, 2005.

7) 例えば, White, D.J.: *Markov Decision Process*, Wiley, pp.130-146, 1993.

8) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research, Part B*, Vol.27B, pp.425-438, 1993.

9) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.

10) Durango-Cohen, P. and Madanat, S.: Optimal maintenance and repair policies for infrastructure facilities under uncertain deterioration rates: An adaptive control approach, *Transportation Research, Part A*, Vol.36, pp.763-778, 2002.

11) 慈道充, 小林潔司: 不確実性下における最適点検補修ルール, *土木学会論文集*, No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.

12) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, *土木学会論文集*, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.

13) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブル劣化ハザードモデル, *土木学会論文集*, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.

14) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, *土木学会論文集*, No.805/VI-67, pp.105-116, 2005.

15) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修政策, *土木学会論文集 F*, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.

16) 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.

17) 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の最適補修戦略, *土木学会論文集*, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.

18) 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政策, *土木学会論文集 F*, Vol.64, No.2, pp.200-217, 2008.

19) Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence (Complex Adaptive Systems)*, A Bradford Book, 1992.

20) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎 GA の謎を解く, オーム社, 1994.

21) 伊庭斉志: 金融工学のための遺伝的アルゴリズム, オーム社, 2011.

22) 有村幹治, 田村亨, 井田直人: 土木計画分野における遺伝的アルゴリズム: 最適化と適応学習, *土木学会論文集 D*, Vol.62, No.4, 2006.

23) 古田均, 亀田学広, 中原耕一郎: 改良型遺伝的アルゴリズムによる複数橋梁の維持管理計画策定システムの実用

AN OPTIMAL INSPECTION/REPLACEMENT POLICY OF TUNNEL  
LIGHTING SYSTEMS IN CONSIDERATION OF NON-STATIONARY  
INSPECTION INTERVALS

Daijiro MIZUTANI, Satoshi HIRAKAWA, Kengo OBAMA and Kiyoyuki KAITO