

# 非定常な点検間隔を考慮した 高速道路トンネル照明設備の最適点検・更新施策

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

<sup>1</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>2</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>3</sup>正会員 大阪大学特任准教授 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、照明器具の3種類の部品で構成されるトンネル照明設備の点検・更新施策について議論する。照明ランプと安定器の劣化過程をワイブル劣化ハザードモデル、照明器具の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルにより求め、その劣化予測結果を用いて点検・更新過程をマルコフ連鎖モデルで表現する。政策変数として、照明ランプの非定常な点検・更新間隔の流利、照明器具の補修施策、安定器と照明設備の一括更新間隔を設定する。その際、点検間隔の非定常性に起因し、点検・更新施策の候補数は膨大となるが、遺伝的アルゴリズムを用いた方法論を提案し、所与のリスク管理水準の下でライフサイクル費用を最小化する最適点検・更新施策を決定する。最後に、実在の高速道路トンネルを対象に方法論の有用性を検証する。

**Key Words :** *asset management, optimal inspection/replacement policy, non-stationary inspection intervals, genetic algorithm, expressway tunnel lighting system*

## 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。道路管理者は付帯施設に対して定期的に点検を実施し、劣化状態に応じて補修・更新を行う。本研究では、高速道路付帯施設の中でもトンネル照明設備（以下、照明設備）に着目する。照明設備は、複数のトンネル照明灯具（以下、灯具）により構成され、トンネル単位で適切な明るさとなるように調光制御して運用される。また、個々の灯具は、照明ランプ、安定器、照明器具の部品で構成される。各部品の劣化の進展により、交通事故や車両破損事故の発生に関する潜在的リスクが増加する。具体的に、照明ランプや安定器の故障による照明ランプの不点は、トンネル内の照度低下を招き、交通事故の発生可能性を増大させる。照明器具の腐食等による劣化進展は、灯具の脱落・落下の可能性を増大させる。道路管理者は定期的な点検・更新を通して、これら潜在的リスクの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ために、ある一定のリスク管理水準を満たしつつ、点検などの諸費用を最小化するような点検・更新施策を実施することが求められている。本研究では、トンネル内における事故発生のリスクの1つとして、トンネル照

明設備を取り上げる。同設備の潜在的リスクとして照明ランプの不点リスク、灯具の落下リスクを取り上げ、点検データを用いた統計的劣化予測結果に基づき潜在的リスクを定量化する。さらに、ライフサイクル費用分析の考え方にに基づき、点検・更新費用を定量化する。その上で、所与のリスク管理水準の下で点検・更新費用を最小化する最適点検・更新モデルを定式化する。

トンネル照明設備の点検・更新施策を考える場合、照明ランプ・照明器具の点検更新間隔、照明器具の補修施策、照明設備の一括更新時期などが政策やマニュアル等で与えられる変数（以下、政策変数）となり得る。一般的に、橋梁等の社会基盤施設の点検・更新間隔の設定に際しては、定常的な点検・更新間隔を考え、費用を算出することが多い。しかし、照明設備は10年～20年程度の短い期間で一括更新され、供用開始時点と同様の新設状態に戻る。そのため、新設時の点検・更新間隔を劣化進展時の点検・更新間隔と同様に設定する定常的な施策では非効率となる可能性がある。したがって、一括更新直後（あるいは供用開始直後）は点検・更新間隔を長く、その後、段階的に点検間隔を短くしていくといったような点検・更新間隔の非定常性（以下、非定常な点検間隔）を設定することが望ましい。点検・更新施策の候補の数は、非定常な点検・更新間隔の組

合せの総数が大きく影響し、膨大な数となるために点検・更新施策の候補から系統的に最適・点検更新施策を選定するための方法論の開発が必要不可欠となる。

以上の問題意識のもと、本研究では、非定常な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、照明灯具を構成する部品（照明ランプ、安定器、照明器具）ごと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で表現し、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・更新施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た最適点検・更新施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.では部品の劣化・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基づいたモデルの解法を詳述する。最後に、6.において提案した方法論を実際のトンネル照明設備に適用し、その有用性を示す。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 既往研究の概要

ライフサイクル費用最小化に基づいて最適維持管理施策を決定するための方法論に関する研究が蓄積されている<sup>1)-4)</sup>。さらに、マルコフ決定モデル<sup>5)</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便であり、数多くの実用モデル<sup>6)-9)</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時マルコフ劣化モデルで表現され、定常的な最適点検・更新施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>10),11)</sup>が開発されたことにより、特性変数を考慮した非集計的な推移確率の推定法が確立され、実用化が急速に進められた<sup>12),13)</sup>。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施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確率行列を多段階指数ハザードモデル（マルコフ劣化ハザードモデル）を用いて推定する方法を提案し、貝戸等<sup>17)</sup>は平均費用を最小にするような橋梁補修施策を求めるマルコフ決定モデルを提案している。さらに、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。

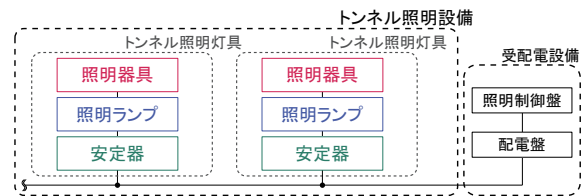


図-1 トンネル照明システム

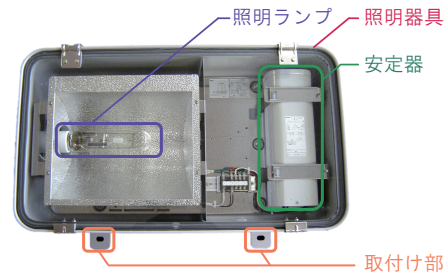


図-2 トンネル照明灯具

しかし、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、定常的であることを前提としている。これらの方法論を非定常な点検間隔を有する点検・更新施策評価に直接的に適用することは不可能である。さらに、既往研究では、定常的な点検間隔の候補に対し、感度分析により最適点検間隔を求めている。このような方法論の範疇で、非定常な最適点検間隔を設定することを考えた場合、計算負荷が膨大になる、あるいは非定常な点検間隔の最適化プロセスの一部に恣意性を残す、といった問題が生じる。これに対して本研究では、1) 非定常な点検間隔を持つ点検・更新施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・更新施策の最適化、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・更新施策を系統的に求めるための方法論は、著者らの知る限り存在しない。

### (2) 照明設備の構成と点検・更新スキーム

道路管理者があるトンネルの照明設備を管理する問題を考える。高速道路トンネル照明設備は複数の照明灯具により構成される。図-1は、照明設備の構成を示す模式図である。照明設備はトンネル照明システムの一部であり、照明ランプ、安定器、それらを固定する照明器具により構成される。本研究では、点検により点検データが獲得されている照明ランプ、安定器、照明器具を灯具と定義し、以下での議論を進める。さらに、図-2には、本研究で対象とする高速道路のトンネル照明灯具の写真を示しているのを併せて参照されたい。N個の灯具で照明設備が構成される。なお、本研究では、灯具をトンネルに固定するための取付け部や取付け金

具の劣化も照明器具の劣化とみなす。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する。 $l=1$ のとき照明ランプを、 $l=2$ のとき安定器を、 $l=3$ のとき照明器具を表す。 $n$  ( $n=1, \dots, N$ ) は、灯具を示す番号であり、照明ランプ、安定器、照明器具は、各灯具に1つずつ含まれている。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灯具を本稿では照明設備と呼ぶ。いま、照明設備に対する点検がトンネル単位で行われ、その点検データが個々の部品単位で蓄積されていると考える。本研究で対象とした実在の照明設備に対しても、定期的に照度測定と定期点検がトンネル単位で実施される。照度測定の実施間隔は、過去の実績に応じて設定される。定期点検は、照明器具の落下などの可能性を判断するために実施され、道路法施行規則により5年に1度以上の点検が義務づけられている<sup>19)</sup>。西日本高速道路株式会社では3年に1度の間隔で定期点検を実施しているが、個々の灯具の劣化状況などが考慮されずに点検間隔は全ての灯具に対して一意に定められている。また、定期点検では、部品単位で点検データが獲得されている。以下、本研究での点検は定期点検を示すこととする。定期点検を通して、トンネル内の全ての灯具の安全性が確認され、その過程で照明ランプの故障が発見された場合や、照明器具の劣化に起因した灯具落下の危険性が確認された場合には、直ちに適切な処置がなされる(通常、照明ランプの不点に関しては日常巡回で視認・記録後、定期点検時に更新される)。したがって、更新に関しては具体的な更新年数が定められておらず、劣化の進展した箇所を逐次選定し、更新がなされている。このような点検・更新スキームは、後述するようなバインド線による照明器具の落下防止措置も含めて、本研究で対象とした西日本高速道路株式会社のみならず、東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社でも慣習的に採用されている。本研究の目的は、照度測定、清掃や定期点検といった業務内容の検討にまで踏み込むのではなく、定期点検を中心とする業務の頻度を点検データに基づいて実情に則した形で設定するための方法論を構築することにある。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部品の点検・更新スキームを説明する。

図-3に、本研究で想定するような灯具を構成する3種類の部品の点検・更新スキームを示す。非定期的な時間間隔でトンネル単位で実施される点検により、照明ランプの故障状態、照明器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故障の有無による2値状態で表され、照明器具の劣化状態は離散的

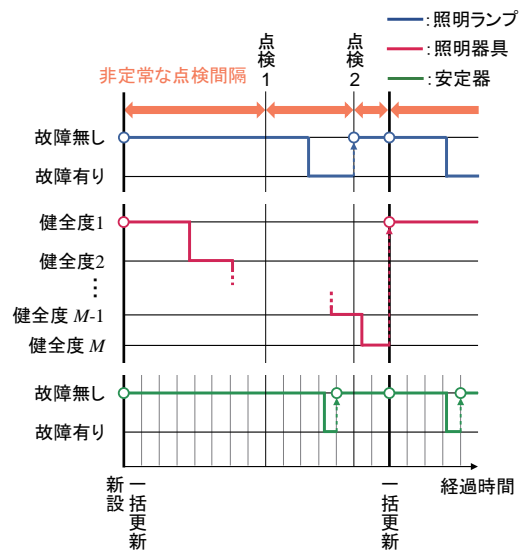


図-3 各部品の故障、劣化に対する点検・更新スキーム

な状態変数である健全度を用いて表される。点検により、故障している照明ランプは直ちに更新され、また、照明器具に関しては、健全度に応じて適切な補修や更新が実施される。一方、任意の1つの安定器の故障に起因した照明ランプの不点は、1) 受配電設備のショートを引き起こし、トンネル内に複数存在する電気回路のうち、故障した安定器が接続された回路の全ての照明ランプが不点となる場合(以下、大量不点)、2) 当該安定器の灯具内の照明ランプのみが不点となる場合、の2種類に分類できる。大量不点に対しては、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が疑われれば、緊急出動によって直ちに故障している安定器の更新が実施される。さらに、安定器の故障に起因した個々の照明ランプの不点リスクを低減するために、定期的に安定器の一括更新を実施する場合もある。灯具を構成する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(例えば、照明器具内の端子台など)の劣化や技術的陳腐化による部品調達にかかるコストの増加を考慮し、トンネル内の全ての灯具に対して、定期的に一括更新が実施され、照明ランプ、安定器、照明器具が同時に更新されている。

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、照明器具の点検・更新過程を個別に定義し、照明ランプおよび照明器具の点検間隔、安定器の一括更新タイミング、照明器具の補修施策、灯具の一括更新間隔を考慮した最適な点検・更新施策をモデル化する。

### (3) 照明設備の維持管理特性と非定期的な点検間隔

トンネル照明設備の更新に関する維持管理施策は、逐次更新施策と一括更新施策に大別することができる。逐

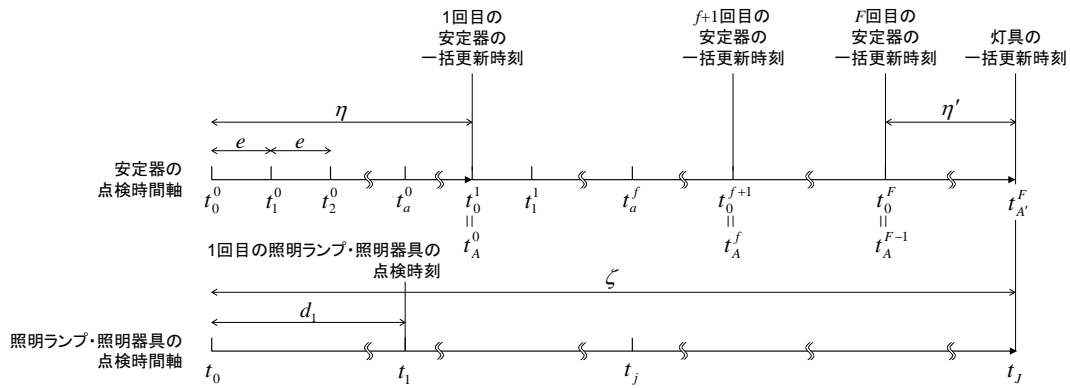


図-4 離散的時間軸

次更新施策は、定期点検時点において故障している照明設備を逐次更新する施策である。一方、一括更新施策は、技術的陳腐化による部品の調達コストの増加などを考慮して、供用開始、あるいは前回の一括更新時点から一定の時間が経過すると設備の故障の有無にかかわらず管理対象となる全ての設備を一括更新するような施策である。なお、本研究の実証分析で対象とした西日本高速道路株式会社のトンネル照明設備では、照明ランプや安定器では逐次更新施策が、照明器具では一括更新施策が主に採用されている。このような施策の下での設備の健全性の推移をマルコフ連鎖モデルに基づき考えた場合、供用開始、あるいは一括更新直後と、その後ある程度の期間が経過した時点では、部品の健全性を表す状態分布（健全度そのものの分布、あるいは使用時間分布）が大きく異なる。供用開始直後においては、最も健全な状態のみで構成されるが、時間の経過により補修（あるいは更新）が繰り返されることにより、補修直後で最も健全な状態の設備や、劣化が大きく進展している設備、あるいは使用時間の大きい設備などが混在することとなる。したがって、供用開始直後の点検間隔を、その後ある程度の期間が経過した時点における点検間隔と同様に設定すると、健全な状態であるにもかかわらず点検を実施することとなり、結果としてライフサイクル費用が増加してしまうと考えられる。橋梁などの一般的に半永久的な供用が予定され、供用期間内に一括更新が行われずに逐次更新施策のみが実施されるような社会基盤施設においては、供用開始直後などの施設の劣化状態が極端に偏っている期間の占める割合が供用期間に対して小さく、非定常な点検間隔を考慮したとしても、ライフサイクル費用に与える影響は小さいと考えられる。しかし、一括更新施策が採用されることが多い照明設備のような機器類を含む社会基盤施設においては、一括更新直後の設備の状態が供用開始直後の状態と同様と考えられるために、一括更新の回数の増加に伴って劣化状態が極端に偏っている期間の占める割合も大きくなる。特に、

供用開始からの経過時間が大きくなるにつれ、設備の故障確率も増加するような摩耗故障系機器においては、その傾向がより顕著になると考えられる。そのような場合、非定常な点検間隔を考慮することによって、より効率的な点検施策を実施し、ライフサイクル費用を低減することができると考えられる。

### 3. 部品の劣化・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、照明設備の劣化・更新過程を表現するために、図-4のような2種類の離散的時間軸を用いる。まず、照明ランプと照明器具の劣化・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、

$$t_j = t_{j-1} + d_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (1)$$

を導入する。添え字  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) は照明ランプと照明器具の点検回数を表し、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灯具の一括更新が行われる。一括更新間隔  $\zeta = t_J - t_0$  は政策変数となる。一方、先述したように、灯具を構成する部品の1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更新する、さらに、トンネル照明設備の一括更新とは別個に安定器独自の一括更新を考慮する。そのため、安定器の劣化・更新過程を記述するために、時刻  $t_0^0 (= t_0)$  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  $a$  ( $a = 1, 2, \dots, A$ ) は道路巡回間隔  $e$  を単位時間間隔とした場合における安定器

故障の有無を確認するための道路巡回回数であり、時刻  $t_a^f$  は  $a$  回目の巡回時刻を表す。  $A$  回目の巡回時にトンネル内の全ての灯具に対して、安定器の一括更新が実施される。安定器の一括更新間隔を  $\eta = Ae$  と表す。さらに、添え字  $f$  は、前回の照明設備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更新回数であり、灯具の一括更新時刻までに  $F$  回の安定器の一括更新が実施される。また、灯具の一括更新において安定器の更新も同時に実施されることから、  $F+1$  回目の安定器の一括更新間隔を  $\eta' = A'e$  として、

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

が満たされる。ここで、照明設備の一括更新間隔  $\zeta$  と安定器の一括更新間隔  $\eta$  を所与とすると、安定器の一括更新回数  $F$  は一意に定まることに留意されたい。

### b) 状態変数ベクトルの設定

対象とするトンネルは、  $N$  個の灯具で構成されている。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  $t_j$  における設備の劣化状態を表現するために、ダミー変数

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

( $i = 1, 2$ )

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>10)</sup>で表現する。このとき、各部品の使用時間を状態空間とするマルコフ連鎖を構築することにより、照明ランプと安定器の劣化状態を表すため、各部品の使用時間を記録する必要がある。まず、照明ランプに関して、時刻  $t_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) において、個々の照明ランプの使用時間として考え得る全ての時間を要素とする使用時間分布ベクトルを  $\mathbf{S}_j$  とする。使用時間分布ベクトル  $\mathbf{S}_j$  を具体的に書き表すと、

$$\mathbf{S}_j = (S_j^1, \dots, S_j^j) \\ = (0, d_j, d_j + d_{j-1}, \dots, d_j + d_{j-1} + \dots + d_1) \quad (5)$$

となる。  $j+1$  個の要素からなる使用時間分布ベクトル  $\mathbf{S}_j$  が、照明ランプの劣化・更新過程を表現するマルコフ連鎖の時刻  $t_j$  における状態集合となり、その状態数は点検間隔の非定常性に起因し、時刻ごとに変化する。時刻  $t_{j-1}$  ( $j = 1, \dots, J-1$ ) から時刻  $t_j$  への照明ランプの使用時間の推移に着目すると、時刻  $t_{j-1}$  において使用時間が  $S_{j-1}^p$  ( $p = 1, \dots, j-1$ ) の照明ランプが時刻  $t_j$  においても故障していない場合、その使用時間は  $S_{j-1}^p + d_j$  となる。一方、時刻  $t_{j-1}$  において使用時間が  $S_{j-1}^p$  ( $p = 1, \dots, j-1$ ) の照明ランプが期間  $(t_{j-1}, t_j]$  内に故障した場合、時刻  $t_j$  において照明ランプは更新され、その使用時間は0となる。すなわち、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ベクトルの各要素に点検間隔  $d_j$  をそれぞれ加えたベクトル、および故障によって更新された場合である使用時間0によって構成される。このことを再帰的に表現すると、時刻  $t_j$  における  $j+1$  次の使用時間分布ベクトル  $\mathbf{S}_j$  の要素  $S_j^p$  は、

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

$$S_j^{p+1} = S_{j-1}^p + d_j \quad (6b)$$

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

と表現できる。なお、供用開始時点における使用時間分布を  $S_0^1 = 0$  と表す。ここで、時刻  $t_j$  における使用時間分布ベクトルの要素  $S_j^p$  に対応する使用時間別部品数を  $n_{1,p}(t_j)$  と設定する。  $n_{1,p}(t_j)$  ( $p = 1, \dots, j+1$ ) 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  $t_j$  における使用時間別部品数は、  $j+1$  次の状態変数ベクトル

$$\mathbf{n}_1(t_j) = (n_{1,1}(t_j), \dots, n_{1,j+1}(t_j)) \quad (7)$$

で表すことができる。ただし、  $n_{1,1}(t_j)$  は時刻  $t_j$  に点検によって更新された照明ランプ数を表す。次に、トンネル内の灯具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(7)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、

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

と表す。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、照明器具の健全度は、  $M$  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  $t_j$  における照明器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  $m$  である照明器具の個数である. 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  $\nu_3(t_j)$  を,

$$\nu_3(t_j) = (\nu_{3,1}(t_j), \dots, \nu_{3,M}(t_j)) \quad (15)$$

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

照明ランプの故障に対して, 点検間隔  $\mathbf{D} = (d_1, \dots, d_J)$  で定期的な点検が実施される. ある照明ランプが時刻  $t_{j-1}$  の点検において故障せずに使用されており, 次の点検時刻  $t_j$  においても故障し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. このとき, 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  $t_j$  においても故障せずに使用されている場合の使用時間  $\mathbf{S}_{j-1} + d_j$ , および故障によって更新さ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,

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

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  $t_{j+1}$  においても故障せずに使用時間  $S_j^y$  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・更新過程を, 相対頻度ベクトル (9), 推移確率行列 (16) を用いて,

$$\nu_1(t_j) = \bar{\nu}_1(t_{j-1}) \mathbf{P}_j^1(d_j) \quad (j=1, \dots, J) \quad (17)$$

と表す. ただし,  $\bar{\nu}_1(t_{j-1}) = (\nu_{1,1}(t_{j-1}), \nu_{1,2}(t_{j-1}), \dots, \nu_{1,j}(t_{j-1}), 0) (j=1, \dots, J)$  である. 照明ランプの劣化・更新過程は, 1) 相対頻度ベクトル  $\nu_1(t_{j-1})$  を用いて  $\bar{\nu}_1(t_{j-1})$  を定義する, 2)  $\bar{\nu}_1(t_{j-1})$  に推移確率行列  $\mathbf{P}_j^1(d_j)$  を乗じて相対頻度ベクトル  $\nu_1(t_j)$  を計算する, という 2 種類の手順を交互に繰り返すことに

より表現することができる. 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. ワイブル劣化ハザードモデルの詳細は, 付録 I, 付録 II を参照されたい.

### b) 安定器の劣化・更新過程

ある安定器が時刻  $t_0^f$  に一括更新され, 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, 次の巡回時刻  $t_a^f = t_0^f + ae$  においても故障していない確率を,

$$\text{Prob}[\delta_2(t_a^f) = 0 | \delta_2(t_{a-1}^f) = 0] = p_{a-1,a}^2(e) \quad (18)$$

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,

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

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  $t_A^f$  に安定器が一括更新されるため, 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,

$$\mathbf{P}^2(e) = \begin{pmatrix} 1 - p_{0,1}^2 & p_{0,1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 - p_{1,2}^2 & 0 & p_{1,2}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - p_{A-1,A}^2 & 0 & 0 & \cdots & p_{A-1,A}^2 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

と表現される. 式 (20) 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 (20) を用いて,

$$\nu_2(t_a^f) = \nu_2(t_{a-1}^f) \mathbf{P}^2(e) \quad (21)$$

と表現され, さらに, 時刻  $t_0^f$  における相対頻度が与件のとき, 任意の時刻  $t_a^f$  における期待相対頻度  $\nu_2(t_a^f)$  は,

$$\nu_2(t_a^f) = \nu_2(t_0^f) \{\mathbf{P}^2(e)\}^a \quad (22)$$

と表現することができる.

### c) 照明器具の劣化・更新過程

照明ランプ, 安定器とは異なり, 照明器具の劣化状態は, 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, 照明器具の劣化・更新過程を状態空間  $\mathbf{M} = \{1, 2, \dots, M\}$  で定義される斉時的な (推移確率が時間的に変化しない) マルコフ連鎖モデルで表現する. いま, ある照明器具が時刻  $t_0$  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,

$$\text{Prob}[\delta_3(t_j) = m_2 | \delta_3(t_{j-1}) = m_1] = \pi_{m_1, m_2}(d_j) \quad (23)$$

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

とする。本研究では、照明器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。マルコフ劣化ハザードモデルの詳細は、付録 I, 付録 III を参照されたい。

次に、補修施策  $\xi$  で、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。補修ルール  $\phi^\xi(y)$  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する。たとえば、補修ルール  $\phi^\xi(y) = y'$  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、補修ルールは  $\phi^\xi(y) = y$  と表される。補修施策  $\xi$  を適用することにより、補修前後の照明器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  $y$  行  $y'$  列目の要素  $q_{y, y'}^\xi$  は、

$$q_{y, y'}^\xi = \begin{cases} 1 & \phi^\xi(y) = y' \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (24)$$

と表すことができる。

補修施策の中には、劣化の進展した照明器具へのバインド線設置などによる落下防止措置を実施する施策が実務で採用されている。落下防止措置は、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、落下防止措置が施された照明器具は、灯具の一括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。そこで、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 (23) を拡張し、健全度  $M+1$  に落下防止措置がなされた状態を追加する。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、

$$\pi_{x, M+1}(d_j) = \pi_{M+1, x}(d_j) = \begin{cases} 1 & x = M+1 \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (25)$$

となる。したがって、照明器具の劣化過程を表現する  $(M+1) \times (M+1)$  推移確率行列  $\mathbf{\Pi}(d_j)$  は、

$$\mathbf{\Pi}(d_j) = \begin{pmatrix} \pi_{1,1} & \pi_{1,2} & \cdots & \pi_{1,M} & 0 \\ 0 & \pi_{2,2} & \cdots & \pi_{2,M} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \pi_{M-1,M} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

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  $\bar{Q}^\xi$  を考えることによ

り、照明器具の劣化・更新過程を記述する。具体的には、 $\phi^\xi(M) = M+1$  と設定し、健全度  $M$  に到達した照明器具に落下防止措置を施す、という行為は、推移確率行列 (26) ではなく、補修行列で表現する。式 (15) で示される相対頻度ベクトル  $\nu_3(t_j)$  に落下防止措置状態を表す状態  $M+1$  を追加した相対頻度ベクトル  $\bar{\nu}_3^\xi(t_j) = (\nu_{3,1}^\xi(t_j), \dots, \nu_{3, M+1}^\xi(t_j))$  を用いて、

$$\bar{\nu}_3^\xi(t_j) = \bar{\nu}_3^\xi(t_{j-1}) \mathbf{\Pi}(d_j) \bar{Q}^\xi = \bar{\nu}'_3^\xi(t_j) \bar{Q}^\xi \quad (27)$$

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

と表現できる。ここに、 $\bar{\nu}'_3^\xi(t_j) = (\bar{\nu}'_{3,1}^\xi(t_j), \dots, \bar{\nu}'_{3, M+1}^\xi(t_j))$  は、時刻  $t_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) における補修前の健全度の相対頻度ベクトルである。なお、照明器具の劣化・更新過程を考えたとき、時刻  $t_j$  での健全度の相対頻度ベクトルは、補修施策  $\xi$  によって変化する。そのことを明示的に表現するため、相対頻度ベクトル  $\bar{\nu}_3^\xi(t_j)$ 、 $\bar{\nu}'_3^\xi(t_j)$  に添え字  $\xi$  を付与している。

このように、本研究では、照明ランプと安定器に対しては設備の供用開始からの経過時間の集合を状態空間とするマルコフ連鎖モデルを、照明器具に対しては劣化状態を表す健全度を状態空間とするマルコフ連鎖モデルを構築する。照明ランプと安定器のように劣化の状態が 2 値で評価される部品については、ワイブル劣化ハザードモデルを用いたシミュレーションにより時間依存的な劣化・更新過程を記述する方法も考えられる。しかし、その場合には、大量の劣化・更新サンプルパスを発生させることによる計算負荷と、シミュレーションに起因する誤差が問題となる。本研究では、膨大な数の更新施策の候補に対する最適化問題を遺伝的アルゴリズムを用いて解決することを試みるが、その際にシミュレーションによる計算負荷は無視できない問題となる。そのため、本研究では、対象とする全ての部品の劣化・更新過程をマルコフ連鎖モデルにより記述する。

## 4. 最適点検・更新モデルの定式化

### (1) ライフサイクル費用

いま、道路管理者が単一のトンネルに設置された多数の灯具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、最適点検・更新施策を決定する。最適点検・更新施策をモデル化するために、照明設備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 にまとめる。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。はじめに、各部品の補修・更新費用に着目する。時刻  $t_j$  における劣化状態に対して実施される更新に応じて、照明ランプ 1 つあたりに対して時刻  $t_j$  に発生する期待更新費用

表-1 各費用の定義

記号	定義
$c_1$	照明ランプ1つの更新費用
$c_2$	安定器1つの更新費用
$c_3$	照明器具1つの更新費用
$c_B$	照明器具1つの落下防止対策費用
$e_0$	照明器具1つの点検費用
$e_1$	照明ランプ1つの点検費用
$e_2$	安定器1つの点検費用
$h$	点検・更新時に発生する交通規制費用

$ec_1(t_j)$  は、現在時刻を  $t_0$  とすると、

$$ec_1(t_j) = \frac{1}{(1+\rho)^{t_j-t_0}} \nu_{1,1}(t_j) c_1 \quad (28)$$

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更新費用  $EC_1$  は、

$$EC_1 = \sum_{j=1}^{J-1} ec_1(t_j) \quad (29)$$

となる。

次に、安定器の更新費用を定式化する。時刻  $t_a^f$  に発生する期待更新費用  $ec_2(t_a^f)$  は、

$$ec_2(t_a^f) = \frac{1}{(1+\rho)^{fAe+ae}} \nu_{2,1}(t_a^f) c_2 \quad (30)$$

となる。さらに、時刻  $t_0^f$  から  $t_A^f$  までの期間  $\eta$  に発生する安定器の更新費用  $ec_2'(f)$  は、

$$ec_2'(f) = \sum_{a=1}^{A-1} ec_2(t_a^f) + \frac{1}{(1+\rho)^{(f+1)Ae}} c_2 \quad (31)$$

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

となる。一方、 $F$  回目の安定器の一括更新の後、灯具の一括更新時刻  $t_A^F$  までの期間  $\eta'$  に発生する安定器の更新費用  $ec_2''$  は、

$$ec_2'' = \sum_{a=1}^{A'-1} ec_2(t_a^F) \quad (32)$$

となる。以上より、時刻  $t_0$  から  $t_A^F$  までの期間  $\zeta = F \times \eta + \eta'$  の間に発生する安定器の更新費用  $EC_2$  は、

$$EC_2 = \sum_{f=0}^{F-1} ec_2'(f) + ec_2'' \quad (33)$$

と表現することができる。

次に、照明器具の補修・更新費用を定式化する。時刻  $t_j$  に発生する照明器具の補修・更新費用  $ec_3^\xi(t_j)$  は、現在時刻を  $t_0$  とすると、

$$ec_3^\xi(t_j) = \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} \{ (1-\kappa) \bar{\nu}'_{3,M}(t_j) c_3 + \bar{\nu}'_{3,M+1}(t_j) c_B \} \quad (34)$$

と表現できる。ただし、落下防止措置がなされた照明器具に対しては、毎回の点検において、 $c_B$  の費用が必

要であるとする。また、 $\kappa$  は、

$$\kappa = \begin{cases} 1 & \phi^\xi(M) = M + 1 \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad (35)$$

を満たすダミー変数である。時刻  $t_0$  から  $t_j$  までの期間  $\zeta$  の間に発生する照明器具の補修・更新費用  $EC_3^\xi$  は、

$$EC_3^\xi = \sum_{j=1}^{J-1} ec_3^\xi(t_j) \quad (36)$$

と表すことができる。

したがって、時刻  $t_0$  から  $t_j$  までの期間  $\zeta$  の間に発生する灯具1つの補修・更新費用  $EC^\xi$  は、時刻  $t_j$  における灯具の更新費用も含め、

$$EC^\xi = EC_1 + EC_2 + EC_3^\xi + \frac{1}{(1+\rho)^{t_j}} \left( \sum_{i=1}^3 c_i \right) \quad (37)$$

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。照明ランプと照明器具の点検・更新の際には、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、更新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、

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

と表すことができる。

さらに、灯具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、

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

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灯具における、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・更新施策を  $\Xi = (D, \eta, \zeta, \xi)$  として、

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

と表すことができる。 $LCC'(\Xi)$  を  $\zeta = \sum_{j=1}^J d_j$  で基準化することにより、単位時間当たりの、トンネル内の



全ての灯具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。また、単位時間当たりの1つの灯具のライフサイクル費用  $lcc(\Xi)$  は,

$$lcc(\Xi) = \frac{LCC(\Xi)}{N} \quad (42)$$

と表現することができる。

## (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照明器具の劣化による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・更新施策を最適点検・更新モデルとする。そのために、灯具の各部品に関わるリスクを定量化することを考える。

照明ランプでは照明ランプの故障に起因した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故障した照明ランプの相対頻度  $\nu_{1,1}(t_j)$  の最大値とする。一般的に、照明ランプの不点原因としては、照明ランプそのものの故障と安定器の故障が考えられる。安定器に関して、照明ランプの大量不点を引き起こす故障に対しては、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、即座に緊急更新が実施される。このとき、安定器の故障に起因した照明ランプの不点確率は、照明ランプそのものの故障に起因した不点確率と比較し、微小となる。さらに、故障した安定器に対する照明ランプのみが不点となるような安定器の故障に関しても、照明ランプの故障による不点と比べ、その数は極めて少ないことが経験的に知られている。そのため、本研究では、リスク事象として照明ランプの故障のみに起因した不点確率

$$N_1(\mathbf{D}) = \max \{ \nu_{1,1}(t_j), j = 1, 2, \dots, J \} \quad (43)$$

をリスク管理指標として設定し、本研究の実証分析では、安定器の故障に起因した不点発生リスクは考慮しない。その理由として、1) 当該リスクは本研究で設定した非定常な点検間隔とは無関係に決定する点、2) 安定器の故障による不点ランプ数は、ランプ自体の故障による不点ランプ数と比較し少ないことが経験的に知られている点、があげられる。ただし、安定器の故障に伴う緊急更新に必要な規制費用は分析の対象とする。本研究では上記のような仮定を設けたが、道路管理者は、安定器の故障による大量不点のわずかな可能性を考慮し、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、安定器の故障がその種別などに

より顕在化した場合には、安定器の故障に起因した不点発生リスクを明示的に考慮した方法論を用いなければならないことは言うまでもない。照明器具に関しては、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、落下防止措置を施している照明器具がある場合、落下防止措置が行われた照明器具と劣化の最も進展した照明器具の相対頻度の合計を用いる。リスク管理指標  $N_3(\mathbf{D}, \xi)$  を

$$N_3(\mathbf{D}, \xi) = \max \left\{ \nu'_{3,M}(t_j) + \nu'_{3,M+1}(t_j), \right. \\ \left. j = 1, 2, \dots, J \right\} \quad (44)$$

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照明器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不点確率  $N_1(\mathbf{D})$  をリスク管理水準  $\underline{U}_1$  以下に抑える」ことをリスク管理目標とする。同様に、照明器具に関しても、「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  $\underline{U}_3$  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・更新施策の集合  $\Omega(\underline{U})$  を、

$$\Omega(\underline{U}) = \{ \Xi | N_i(\mathbf{D}, \xi) \leq \underline{U}_i \ (i = 1, 3) \} \quad (45)$$

と定義する。ここに、 $\underline{U} = (\underline{U}_1, \underline{U}_3)$  はリスク管理水準ベクトルである。リスク管理水準  $\underline{U}$  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・更新施策  $\Xi(\underline{U})$  を最適点検・更新施策とする。すなわち、最適点検・更新モデルは、

$$C^*(\underline{U}) = \min \{ LCC(\Xi) \} \quad (46a)$$

$$\text{subject to } \Xi \in \Omega(\underline{U}) \quad (46b)$$

と定式化することができる。

式(46)に示される最適点検・更新モデルは、照明ランプ・照明器具の点検間隔の流列  $\mathbf{D}$ 、安定器の一括更新間隔  $\eta$  および灯具の一括更新間隔  $\zeta$ 、照明器具の補修施策  $\xi$  を変化させることにより、所与のリスク管理水準  $\underline{U}$  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  $\zeta$  に関しては、一般的に灯具の一括更新間隔が10年~20年であるため、 $\eta$  および  $\zeta$  の組合せは現実的に計算可能な数となる。また、補修施策  $\xi$  に関しても、施策の候補として膨大な数を考慮することはない。したがって、 $\eta$ 、 $\zeta$ 、 $\xi$  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・照明器具の点検間隔の流列  $\mathbf{D}$  に関しては、考え得る組合せ数は膨大となり、それらそれぞれに対し、ライフサイクル費用を計算し、相対比較により最適点検・更新施策を決定することは現実的ではない。そこで、本研究では、 $\eta$ 、 $\zeta$ 、 $\xi$  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  $D$  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

4. で説明した時間依存的な点検間隔を有する最適点検・更新施策を実際に計算するために、遺伝的アルゴリズム<sup>20),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、最適解を理論的に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まとめられた事例<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・更新施策では定常的に設定されていた点検間隔を設備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  $D$  を設定した。このとき、流列  $D$  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、対象とする設備の種類や点検・更新施策の実現可能性に応じて最適点検・更新施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

$$s_z = s_0 + \varepsilon z \quad (z = 1, \dots, Z) \quad (47)$$

を導入する。さらに、時刻  $s_z$  において照明器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、

$$g(s_z) = \begin{cases} 1 & \text{点検を実施するとき} \\ 0 & \text{点検を実施しないとき} \end{cases} \quad (48)$$

$(z = 0, \dots, Z)$

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  $D$  の要素  $d_j$  ( $j = 1, \dots, J$ )、灯具の一括更新間隔  $\zeta$ 、安定器の一括更新間隔  $\eta$  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、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  $D$  の要素  $d_j$  に関しては、 $\zeta$  と  $\eta$  を所与とし、遺伝的アルゴリズムにより決定する。いま、灯具の一括更新間隔  $\zeta$  を  $\bar{\zeta}$  に、安定器の一括更新間隔  $\eta$  を  $\bar{\eta}$  に固定する。

以下と図-5 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。

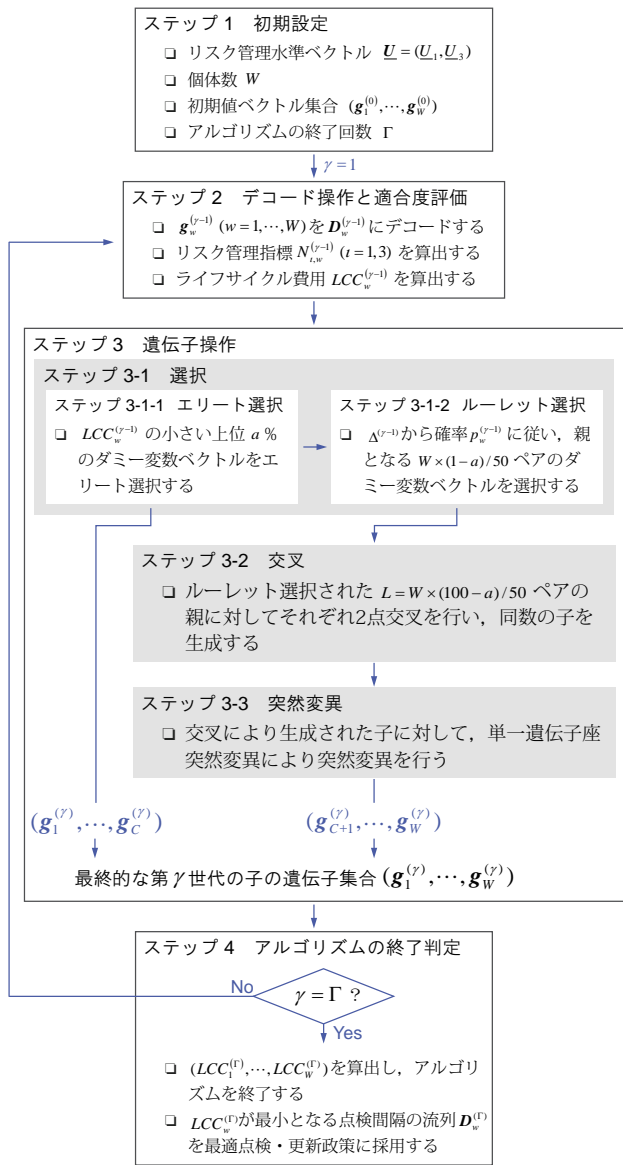


図-5 計算フロー

### ステップ1 初期設定

リスク管理水準ベクトル  $\underline{U} = (U_1, U_3)$  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  $g_w^{(0)} = (g_w^{(0)}(s_0), \dots, g_w^{(0)}(s_Z)) (w = 1, \dots, W)$  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基づき、ダミー変数ベクトル  $g_w^{(\gamma-1)}$  を非定常点検間隔の流列  $D_w^{(\gamma-1)} = (d_{w,1}^{(\gamma-1)}, \dots, d_{w,j}^{(\gamma-1)}, \dots, d_{w,J}^{(\gamma-1)})$  にデコードする。デコードされた非定常点検間隔の流列  $D_w^{(\gamma-1)}$  に対し、リスク管理指標  $N_{l,w}^{(\gamma-1)} (l = 1,3; w = 1, \dots, W)$  とライフサイクル費用  $LCC_w^{(\gamma-1)}$  を算出する。ただし、 $\exists l \in (1,3) (N_{l,w}^{(\gamma-1)} > U_l)$  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  $\chi_w^{(\gamma-1)} = 1/LCC_w^{(\gamma-1)}$  に基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

$W$  個のダミー変数ベクトルのうち、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  $(g_1^{(\gamma)}, \dots, g_C^{(\gamma)})$  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  $W \times (100-a)/100$  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、

$$p_w^{(\gamma-1)} = \frac{\chi_w^{(\gamma-1)}}{\sum_{g \in \Delta^{(\gamma-1)}} \chi_g^{(\gamma-1)}} (w \in \Delta^{(\gamma-1)}) \quad (49)$$

と定義する。なお、 $\exists l \in (1,3) (N_{l,w}^{(\gamma-1)} > U_l)$  のとき、 $\chi_w^{(\gamma-1)} = 0$  とする。確率(49)に従い、交叉のための親(2個のダミー変数ベクトル)を  $W \times (100-a)/200$  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)を生産する。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、 $L = W \times (100-a)/200$  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  $l (l = 1, \dots, L)$  番目の親のペア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

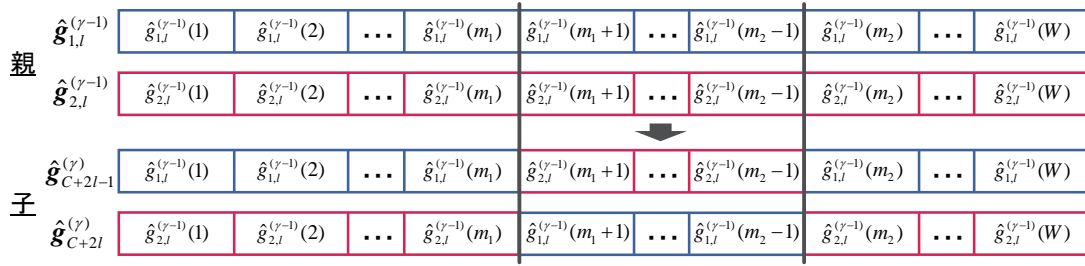


図-6 2点交叉

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-6に示しているので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  $g_w^{(\gamma)}$  ( $w = C+1, \dots, W$ )) 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、 $W-C$ 個の連続一様分布  $U(0, 1)$  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  $g_w^{(\gamma)}$  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  $g_w^{(\gamma)}$  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  $(g_{C+1}^{(\gamma)}, \dots, g_W^{(\gamma)})$  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  $g_w^{(\gamma)}$  ( $w = C+1, \dots, W$ )) として採用する。ダミー変数ベクトル  $g_w^{(\gamma)}$  ( $w = C+1, \dots, W$ ) 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  $(g_1^{(\gamma)}, \dots, g_C^{(\gamma)})$  を加えることにより、第 $\gamma$ 世代のダミー変数ベクトルの集合  $(g_1^{(\gamma)}, \dots, g_W^{(\gamma)})$  を定義できる。

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。 $LCC_w^{(\Gamma)}$  ( $w = 1, \dots, W$ ) が最小となる非正常点検間隔

表-2 照明器具の健全度判定基準<sup>24)</sup>

判定区分(健全度)	判定内容
OK(1)	損傷などが無い場合。
B(2)	損傷などが広範囲に認められるが、機能面の低下がみられず、損傷の進行状態を継続的に観察する必要がある場合。
A(3)	損傷などがあり、機能低下がみられ補修が必要であるが、緊急補修を要しない場合。
AA(3)	損傷が著しく、機能面からみた緊急補修が必要である場合。

表-3 照明器具の点検データ諸元

トンネル数 供用開始年 サンプル総数	19 1990-1991年 15,722				
	事後健全度				
サンプル 内訳	事前 健全度	1	2	3	
		1	31	5,044	4,825
		2	-	262	3,211
	3	-	-	2,349	

の流列  $D_w^{(\Gamma)}$  を最適点検・更新施策の非正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. 実証分析

(1) 実証分析の概要と劣化予測結果

提案した方法論を実在する高速道路のトンネル照明設備に対する最適点検・更新施策の決定問題に適用する。はじめに、照明ランプ、安定器、照明器具の3種類の部品の劣化予測を行う。照明ランプ、安定器は故障しているか否かの2値状態、照明器具は表-2に示す判定基準に従い、多段階の健全度により劣化状態が記録されている。そのため、本研究では、照明ランプ、安定器にワイブル劣化ハザードモデル、照明器具にマルコフ劣化ハザードモデルを適用し劣化予測を行う。これらの劣化予測モデルの詳細は参考文献<sup>10),16)</sup>と付録を参照されたい。

照明ランプに関しては、ワイブル劣化ハザードモデ

表-4 未知パラメータ推定結果 (照明ランプ)

未知パラメータ	期待値	90%信用域		Geweke 検定統計量
		下限値	上限値	
加速度 $\alpha$	3.318	3.200	3.440	0.0366
定数項 $\beta_0$	-6.257	-6.609	-6.223	-0.0424
ランプ種別 $\beta_1$	1.849	1.703	1.942	-0.0828
点灯時間 1 $\beta_2$	1.621	1.450	1.743	0.0147
点灯時間 2 $\beta_3$	0.875	0.695	1.023	0.0910

表-5 未知パラメータ推定結果 (安定器)

未知パラメータ	期待値	90%信用域		Geweke 検定統計量
		下限値	上限値	
加速度 $\alpha$	4.820	3.848	5.650	-0.571
定数項 $\beta_0$	-10.802	-12.729	-8.565	0.568

表-6 未知パラメータ推定結果 (照明器具)

未知パラメータ	期待値	90%信用域		Geweke 検定統計量
		下限値	上限値	
定数項 $\beta_0^1$	-1.723	-1.751	-1.695	0.0995
勾配 $\beta_1^1$	0.418	0.352	0.481	-0.0677
距離 $\beta_2^1$	-	-	-	-
定数項 $\beta_0^2$	-2.195	-2.219	-2.169	-0.0413
勾配 $\beta_1^2$	-	-	-	-
距離 $\beta_2^2$	-0.515	-0.612	-0.421	0.0290

ルの適用において、部品の寿命が観測された完全データが1,429個、点検時点において故障が観測されなかった不完全データ<sup>10)</sup>が3,626個獲得され、それらの使用時間の期待値は2.77年であった。安定器に関しては、65個の完全データのみが獲得され、それらの使用時間の期待値は8.59年であった。照明器具に関しては、使用した点検データの概要を表-3に示す。1990~1991年に供用が開始された19個のトンネルに設置された10,584個の照明器具の点検データが利用でき、それらを整理して、最終的に15,722個の健全度ペアサンプルが獲得できた。また、表-3には、事前健全度と事後健全度に着目したサンプルの内訳も記載している。なお、照明器具のデータベースには、鋼製およびステンレス製(SUS)の2種類の材質の照明器具が存在した。SUSに関しては、近年導入が開始されたばかりであり、推定に際して十分な点検データが蓄積されていないことから、今回の分析においては、鋼製の照明器具のみを分析対象とした。判定AAは緊急補修を要する状態であるが、判定Aに関しても補修を要する段階であるため、マネジメントの観点からは判定AとAAは等価であると判断した。現行の維持管理体制においては、点検後の健全度がAA(3)と判定された照明器具に対しては、応急的な落下防止を行った上で更新まで継続的な状態監視がなされている。

上述の点検データを用いて各部品の劣化予測を行った。表-4、表-5、表-6には、それぞれの部品の劣化予

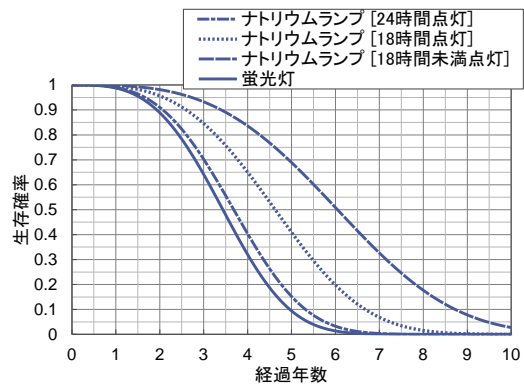


図-7 照明ランプの生存関数

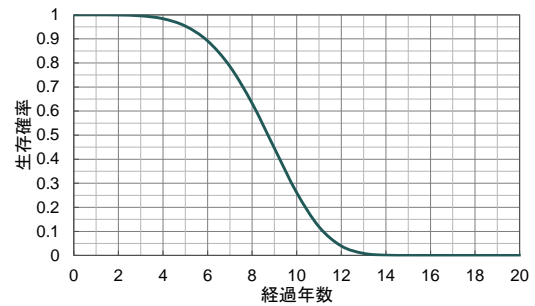


図-8 安定器の生存関数

測モデルの未知パラメータ推定結果を示した。なお、特性変数の候補として、照明ランプは、1) ランプ種別、2) 点灯時間、照明器具は、1) 凍結防止剤散布回数、2) 入口からの距離、3) 車線種別、4) 上下区分、5) トンネル勾配、6) トンネルの連続性の有無、7) 損傷区分がそれぞれ利用可能であった。なお、安定器に関しては、特性変数の候補となるようなデータは利用不可能であった。各モデルの推定にはベイズ推定を用い、事後分布の期待値、90%信用域の上限値、下限値、Geweke検定統計量<sup>25)</sup>を表-4、表-5、表-6の各表には示している。各部品に関して、劣化ハザードモデルの未知パラメータの事後分布の期待値を用いて算出したAIC<sup>26)</sup>が最小となるような特性変数の候補の組み合わせを最終的な特性変数として採用した。

図-7には、照明ランプに関してワイブル劣化ハザードモデルで推定された未知パラメータの事後分布の期待値を用いて算出した生存関数を示している。照明ランプでは、ランプ種別(蛍光灯を1、ナトリウムランプを0とするダミー変数)とナトリウムランプにおける点灯時間(点灯時間1は1日24時間点灯を1、それ以外を0とするダミー変数、点灯時間2は1日18時間点灯を1、それ以外を0とするダミー変数)の全てが特性変数として採用された。照明ランプの劣化に対しては、蛍光灯の寿命が最も短く、次いで24時間点灯のナトリ

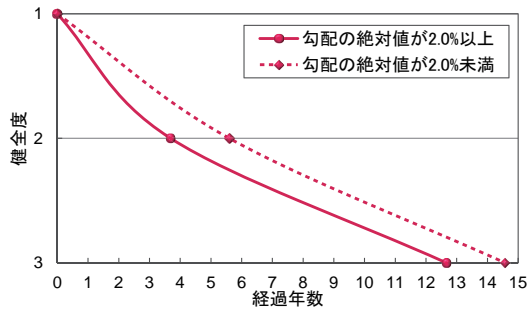


図-9 照明器具の期待劣化パス

ウムランプ, 18時間点灯のナトリウムランプ, そして点灯時間が18時間未満のナトリウムランプが最も寿命が長いと推定された. 次に, 安定器に関して, 図-8に生存関数を示した. 安定器では, 特性変数は採用されず, 安定器の供用開始から約8.7年で生存確率が50%になる結果となった. さらに, 照明器具に関しては, 推定された未知パラメータを用いて期待寿命を求め, 図-9に期待劣化パスとして描いた. 照明器具の劣化に関して, 勾配とトンネル入口からの距離が特性変数として採用された. 健全度1で入口からの距離が, 健全度2で勾配が特性変数のパラメータとして削除されているのは, ベイズ推定における90%信用域に0を含んでいたためである. なお, 参考文献<sup>27)</sup>に従い, 勾配に関しては, その絶対値が2%以上の場合に1, それ以外の場合に0を取るダミー変数として考慮した. さらに, 入口からの距離に関しては, トンネル入口から300m以内に設置された照明器具は入口部の灯具として一般的な劣化特性を持ち, 300m以降では入口からの距離に応じて劣化速度が変化すると考え, トンネル入口部を0, それ以外は(入口からの距離)-300mを取る変数を特性変数として採用した. なお, モデルの推定時には, 特性変数は最大値で基準化している. また, 参考文献<sup>27)</sup>の「灯具」は, 本稿の「照明器具」に該当する. 図-9では, 入口からの距離をサンプルの期待値366.5mに固定した場合の勾配の変化による期待寿命の変動を示している.

(2) 費用データと点検・更新施策

劣化予測結果に基づき, マルコフ連鎖モデルを構築し, リスク管理指標とライフサイクル費用を算出する. 表-7には, 対象とするトンネル照明システムの維持管理費用に関して, 過去の実績に基づき設定した本適用事例での費用データを示している. なお, 「照明ランプ1つの点検費用」と「安定器1つの点検費用」に関しては, 他の費用と比較し相対的に微小であるため, 本適用事例では0円としている.

劣化予測結果と実費用データにより, マルコフ連鎖

表-7 維持管理に関する実費用データ

記号	円	定義
$c_1$	13,880	照明ランプ1つの更新費用
$c_2$	110,046	安定器1つの更新費用
$c_3$	73,630	照明器具1つの更新費用
$c_B$	362	照明器具1つの落下防止対策費用
$e_0$	3,000	照明器具1つの点検費用
$e_1$	0	照明ランプ1つの点検費用
$e_2$	0	安定器1つの点検費用
$h$	72,704	点検・更新時に発生する交通規制費用

モデルを用いて, 所与の点検・更新施策に対するリスク管理指標とライフサイクル費用を求めることができる. 照明器具の補修施策  $\xi$  の候補に関して, 点検時点で健全度3に達している照明器具に対し, 照明器具本体を更新する(このとき, 照明ランプと安定器は更新されない)ような施策を  $\xi = 0$ , 照明器具本体は更新せずに落下防止措置を行う施策を  $\xi = 1$  とする. すなわち, 補修施策  $\xi = 0$  に関して,

$$\phi^0(y) = \begin{cases} 1 & y = 3 \\ y & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad (50)$$

が成立する. また, 補修施策  $\xi = 1$  に関して,

$$\phi^1(y) = \begin{cases} y+1 & y = 3 \\ y & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad (51)$$

となる. 灯具の一括更新間隔  $\zeta$  の候補として, 5年から30年を1年間隔でそれぞれ考慮する. 安定器の一括更新間隔  $\eta$  は5年から  $\zeta$  年までのそれぞれの年数を考慮する. 政策変数  $\xi, \zeta, \eta$  を変化させた場合,  $2 \sum_{b=1}^{26} b = 702$  パターンの施策が考えられる. 一方で, 照明ランプ・照明器具の点検間隔の流列  $D$  に関して, 本適用事例では, 実際の維持管理体制における採用可能性を考慮し, 最小点検間隔  $\varepsilon$  を0.5年と設定する. そのため, ダミー変数ベクトル  $g$  の要素数は  $Z = 2\zeta + 1$  となる.  $z = 0, Z$  のとき  $g(s_z) = 1$  となるため, 流列  $D$  の候補に対応するダミー変数ベクトルとして,  $2^{2\zeta-1}$  通りの候補が考えられる. このことを考慮すると,  $2 \sum_{b=5}^{30} \{2^{(2b-1)}(b-4)\} = 3.95 \times 10^{19}$  通りの施策が最適点検・更新施策の候補として考えられる. このような膨大な数の候補の中から最適な点検・更新施策を決定するための方法論として, 本研究では, 4. で述べた遺伝的アルゴリズムによる解法を構築した. なお, 社会的割引率は4% ( $\rho = 0.04$ ) とし, 以降の議論では, 1トンネルに100個の灯具が設置されている場合を想定する. さらに, 以下では, 劣化過程モデルの特性変数として, 照明ランプは「ナトリウムランプ [24時間点灯]」を, 照明器具は「勾配の絶対値が2%未満」, 入口からの距離を「サンプル全体の期待値366.5m」とした場合の結果を示している.

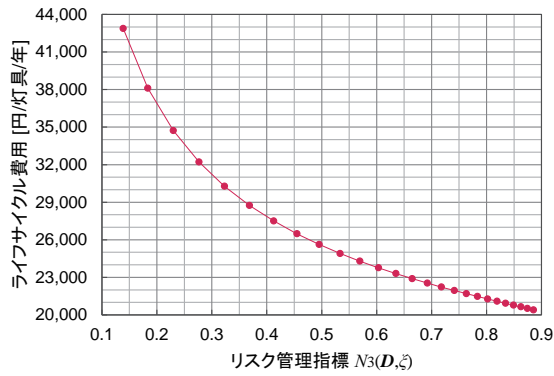


図-10 照明器具のリスク管理指標とライフサイクル費用

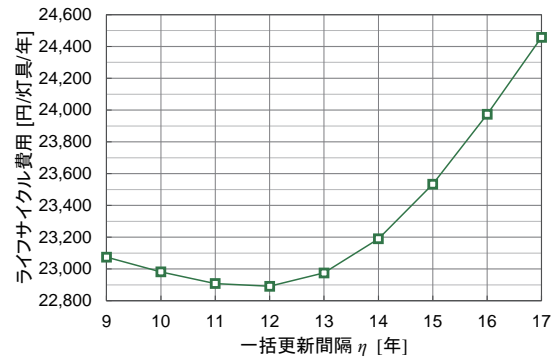


図-11 安定器の一括更新間隔とライフサイクル費用

(3) 非定常な点検間隔を考慮した最適点検・更新施策

最適点検・更新施策を決定するために、はじめに、リスク管理水準を設定する。本研究で提案する最適点検・更新モデルでは、照明ランプと照明器具の劣化に対する2種類の要素からなるリスク管理指標ベクトル  $\mathbf{N} = (N_1(\mathbf{D}), N_3(\mathbf{D}, \xi))$  を設定している。これらに対して、それぞれリスク管理水準  $(U_1, U_3) = \mathbf{U}$  を設定する。リスク管理水準の設定に際し、本節では、非定常な点検間隔を有する施策の有効性を示すため、照明ランプに対して半年間隔の定常的な点検間隔を有する施策でのリスク管理指標 0.320 をリスク管理水準  $U_1$  として採用する。また、照明器具のリスク管理水準に関しては、過去の実績や現場管理者の意見を参考に、 $U_3 = 0.65$  と設定した。

図-10には、照明器具のリスク管理指標とライフサイクル費用の関係（費用-リスク曲線<sup>15)</sup>）を示している。本節では、現行の管理体制である、照明器具の落下防止措置を施す施策 ( $\xi = 1$  の場合) に対して最適施策を求める。このとき、政策変数  $\mathbf{D}$ ,  $\eta$  を所与とすると、図-10に示すような照明器具の費用-リスク曲線は一意に定まり、単調減少する。なお、同図のライフサイクル費用に関しては、後述の  $\hat{\mathbf{D}}$ ,  $\hat{\eta}$  を用いて算出している。図-10の赤丸は照明設備の一括更新間隔5年から30年に左からそれぞれ対応し、一括更新間隔が長くなるにつれリスク管理指標が増加する。さらに、照明器具のリスク管理指標  $N_3(\mathbf{D}, \xi)$  は、 $\xi = 1$  の場合、 $\zeta$  のみ依存する。そのため、本章では、リスク管理水準  $U_3 = 0.65$  を満たす一括更新間隔集合の中でライフサイクル費用を最小とする17年を最適一括更新間隔  $\hat{\zeta}$  として採用した。

さらに、本研究では、安定器の一括更新施策を灯具の一括更新とは別に設定する。図-11には、灯具の一括更新間隔を17年とした上での、安定器の一括更新間隔  $\eta$  とライフサイクル費用の関係を示した。図中の横軸が一括更新間隔を表し、17年の場合は安定器個別の一括更新を行わず、照明設備全体の一括更新時点で初

めて安定器も一括更新が行われるような施策を意味する。同図より、安定器を別個に一括更新しない施策より、供用開始から12年経過した時点で安定器のみを一括更新する施策の方がライフサイクル費用を低減できることが見て取れる。

以下では、照明設備の最適一括更新間隔  $\hat{\zeta}$  を17年、安定器の最適一括更新間隔  $\hat{\eta}$  を12年に固定し議論を進める。その上で、遺伝的アルゴリズムを用いて照明ランプと照明器具の最適点検間隔の流列  $\hat{\mathbf{D}}$  を求めた結果を示す。なお、遺伝的アルゴリズムにおいて、個体数を  $W = 300$ , アルゴリズムの終了回数を  $\Gamma = 5,000$ , エリート選択割合を  $a = 2/3(\%)$ , 突然変異の発生確率を  $b = 2(\%)$  とした。このとき、エリート選択個数は  $C = 2$ , 交叉における親のペア数は  $L = 149$  となる。個体数  $W$ , 終了回数  $\Gamma$ , エリート選択割合  $a$ , 突然変異確率  $b$  に関して、個体数  $W$  を増やすと収束が速くなり終了回数  $\Gamma$  は少なくて済むが、アルゴリズムの1ループの計算負荷が増大する。また、エリート選択割合  $a$  を増やすと収束が速くなるが局所解へと収束する可能性が高まり、突然変異確率  $b$  を増やすと局所解へ収束する可能性は低くなるが、アルゴリズム自体の収束が遅くなる。本適用事例では、様々な  $(W, \Gamma, a, b)$  の組み合わせの中から実際の収束状況を考慮し、上記の値を決定した。

まず、図-12には、照明ランプと照明器具に対し、従来のように定常的な点検間隔を設定し、1年ごとに点検を実施した場合の照明ランプのリスク管理指標の時間的推移を示している。このときのライフサイクル費用は23,004 (円/灯具/年) であった。ここで、照明ランプに関するリスクを表す指標として残存率を導入する。残存率は、当該トンネルに設置された全ての照明ランプの内、不点でない照明ランプの割合を示している。図-12では、点検が実施された各時点での残存率  $R(t_j) = 1 - N_1(\mathbf{D})$  を四角印で示している。点検時点にて故障と観測された照明ランプに対しては、直ちに更新がなされ、点検直後では残存率は  $R(t_j) = 0$  とな

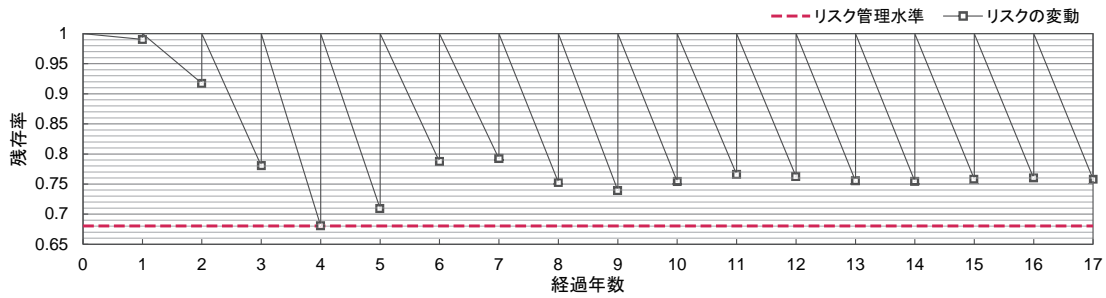


図-12 残存率  $R(t_j)$  ( $= 1 - N_1(D)$ ) の推移 (非定常な点検間隔を考慮せず)

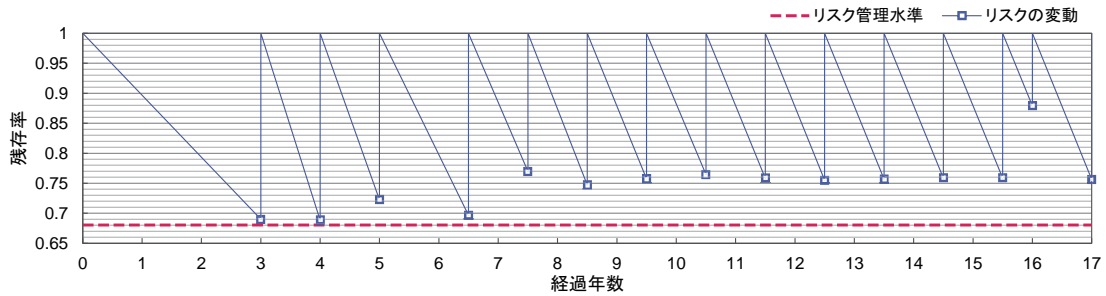


図-13 残存率  $R(t_j)$  ( $= 1 - N_1(D)$ ) の推移 (非定常な点検間隔を考慮)

る。図-13では、図-12における最大のリスク管理指標0.320をリスク管理水準  $U_1$  と設定し、それを満たすような最適な点検間隔の流列  $\hat{D}$  を遺伝的アルゴリズムにより求めた場合の残存率の時間的変動を示している。同図では、図-12と同様に、四角印の時点で点検が実施されており、合計15回の点検・更新時点が存在する。同図での点検間隔の流列  $\hat{D}$  を具体的に書き表すと、

$$\hat{D} = \{3, 1, 1, 1.5, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.5, 1\} \quad (52)$$

となる。このとき、ライフサイクル費用は22,885(円/灯具/年)となり、図-12と比べて点検回数を減少させることにより、ライフサイクル費用低減が可能となる。このように、本研究で提案する非定常な点検間隔を考慮した点検・更新モデルと、遺伝的アルゴリズムを用いたその最適化手法により、定常的な点検間隔のみを考慮した施策と比べ、ライフサイクル費用を低減することができ、さらに、トンネル照明システムの供用開始直後の点検間隔を本実証分析では3年と明示的に指定することが可能となった。

#### (4) 照明ランプのリスク管理指標と最適点検間隔

前節では、照明ランプのリスク管理水準を0.320に固定して最適な点検間隔の流列を求めた結果を示した。しかし、実際の照明設備の維持管理体制において、照明ランプのリスク管理水準は、トンネルの立地条件、交通量、照明ランプの個数などを総合的に考慮して決定されるために、多様に異なる。そこで、照明ランプのリスク管理水準を変化させ、それぞれのリスク管理水

準に対して求められた最適な点検間隔の流列を示す。

表-8には、照明ランプのリスク管理水準  $U_1$  を0.200から0.550まで0.050刻みで変化させたときの最適な点検間隔の流列、ライフサイクル費用、期間内で最大となるリスク管理指標を示した。同表の経過年数の項目には、供用開始時点からの経過年数とその時点での点検の有無を示しており、丸印のある時点で点検を行い、無印の時点では点検は実施しない。リスク管理水準を緩和するにつれ、点検回数も少なくなり、ライフサイクル費用も減少する。その関係を図-14に改めて示した。同図の横軸には、リスク管理指標を示している。さらに、同図には、従来のように定常的な点検間隔を採用した場合の費用-リスク曲線も併記している。黒色のプロットは、左から順に、点検間隔が0.5年、1年、1.5年の3通りの施策を採用した場合のそれぞれの費用とリスクの関係を示しており、表-8の下3行のそれぞれの場合に相当する。非定常な点検間隔を有する点検・更新施策を採用した方が、定常的な点検間隔を持つ点検・更新施策よりも、ライフサイクル費用を低減できることがわかる。

なお、社会基盤施設の中には、点検・更新間隔が法令により定められているものもある。トンネル照明設備に関して、照明ランプと安定器は点検間隔と更新間隔ともに法令では定められていない。一方、照明器具に関しては、道路法施行規則により法定点検間隔が5年と設定されている<sup>19)</sup>。本適用事例では、それぞれのリスク管理水準のもとで決定された点検間隔はいずれも



表-8 リスク管理水準  $U_1$  の変化による点検間隔とライフサイクル費用の変動

リスク管理水準 $U_1$	リスク管理指標 $N_1(D)$	$lcc(\Xi)$ [円/灯具/年]	経過年数															
			0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7		
0.200	0.184	23,541					○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.250	0.250	23,169				○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0.300	0.287	22,961					○		○	○		○		○		○		○
0.350	0.341	22,848						○		○		○		○		○		○
0.400	0.359	22,691						○		○		○		○		○		○
0.450	0.450	22,623						○		○		○		○		○		○
0.500	0.462	22,492							○		○		○		○		○	○
0.550	0.530	22,417			○				○		○		○		○		○	○
-	0.168	23,719	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-	0.320	23,004		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-	0.470	22,776			○			○		○		○		○		○		○

経過年数																			
7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5	17
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
○	○	○	○		○		○		○		○		○		○		○		○
	○	○	○		○		○		○		○		○		○		○		○
○		○		○		○		○		○		○		○		○		○	○
	○		○		○		○		○		○		○		○		○		○
○			○	○		○		○		○		○		○		○		○	○
	○			○		○		○		○		○		○		○		○	○
○				○		○		○		○		○		○		○		○	○
	○				○		○		○		○		○		○		○		○
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	○		○		○		○		○		○		○		○		○		○
○			○		○		○		○		○		○		○		○		○

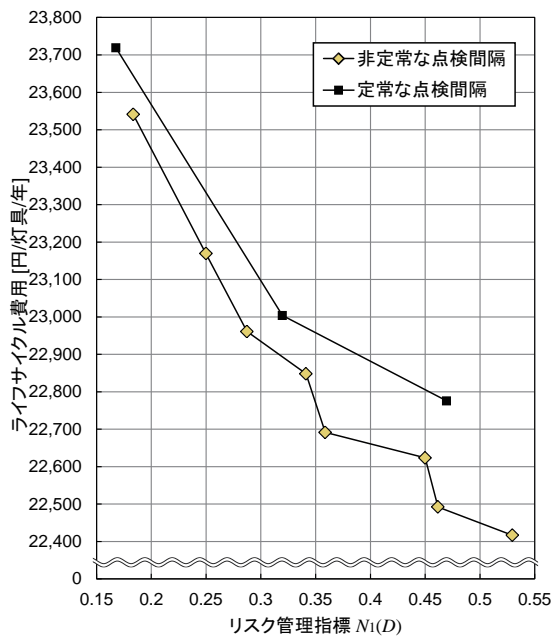


図-14 照明ランプのリスク管理指標とライフサイクル費用

法定点検間隔を満足する。さらに、本研究で得られた知見を利用することにより、法定点検間隔の改定や財政緊迫時の点検箇所の優先順位付けに対して将来的に言及することができると思う。

(5) 照明器具と安定器の逐次更新施策

以上の議論では、現行の照明設備への点検・更新体制をもとに、照明設備もしくは安定器に対して、一括

更新を行うような施策に関する議論を行ってきた。一方、灯具の部品に対して、逐次更新施策を採用する場合も考えられる。本節では、逐次更新施策と一括更新施策それぞれを採用したときのライフサイクル費用を比較し、点検・更新施策を議論する。

本研究で定式化した点検・更新モデルで照明器具、安定器の逐次更新施策を表現するには、政策変数  $\xi$  を  $\xi = 0$ 、灯具の一括更新間隔を  $\zeta = \infty$ 、安定器の一括更新間隔を  $\eta = \infty$  とすれば良い。ただし、想定する点検・更新施策において、照明器具に対して落下防止措置を施す施策  $\xi = 1$  を逐次更新施策で採用すると、照明器具の供用開始以降永久に更新されることがなくなるために、現実的ではない。また、照明器具のリスク管理指標  $N_3(D, \xi)$ 、あるいはリスク管理水準  $U_3$  は、逐次更新施策  $\xi = 0$  と一括更新施策  $\xi = 1$  の場合でその意味が異なる。そのため、照明器具に関して、同一のリスク管理水準のもとで、あるいは同一のリスク管理指標を用いて、逐次更新施策  $\xi = 0$  と一括更新施策  $\xi = 1$  のライフサイクル費用を比較することは、厳密には不可能である。さらに、照明ランプの非常な点検間隔  $d_j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) に関しても、 $\zeta = \infty$  とした場合には、遺伝的アルゴリズムの計算負荷が極めて大きくなる。そこで、本節では照明ランプと灯具の点検間隔  $d_j$  を1年に固定する。このとき、照明器具の落下のリスクに対して、1年ごとに落下防止措置、または照明器具の更新が行われることとなり、一括更新施策、逐次更新施策ともに同等のリスク管理水準を満たすと考える。

表-9 施策とライフサイクル費用

	$\xi$	$\zeta$ [年]	$\eta$ [年]	$lcc(\Xi)$ [円/灯具/年]
施策 1	0	100	100	40,616
施策 2	0	100	13	40,606
施策 3	1	17	12	36,738

ここで、「照明器具、安定器ともに逐次更新（施策 1）」、「照明器具は逐次更新、安定器は逐次更新と一括更新の併用（施策 2）」、「照明器具は一括更新、安定器は逐次更新と一括更新の併用（施策 3, 6.(3) で述べた最適点検・更新施策）」の 3 種類の点検・更新施策を考える。これらの施策の政策変数に関して、施策 1 は ( $\xi = 0, \zeta = \infty, \eta = \infty$ )、施策 2 は ( $\xi = 0, \zeta = \infty$ )、施策 3 は ( $\xi = 1$ ) と事前に決定することができる。ただし、計算の都合上  $\zeta, \eta$  が  $\infty$  の場合は、極めて大きい値を取るとし、具体的には、100 年と設定した。また、社会的割引率  $\rho$  は、本節に限り 0.00% とした。このことにより、照明器具、安定器の逐次更新施策に対しても、式 (42) を用いて、ライフサイクル費用を計算することができる。これらの条件のもとで算出した、3 種類の施策に対するライフサイクル費用を表-9 に示す。なお、施策 2 の  $\eta = 13$ [年] は、 $\eta$  を 5 年から 30 年まで変化させ、ライフサイクル費用が最小となる年数を選択、施策 3 の  $\zeta$  と  $\eta$  に関しては、6.(3) の結果を用いた。同表より、照明器具は一括更新、安定器は逐次更新と一括更新を併用する施策 3 (6.(3) で述べた最適点検・更新施策) が相対的に最もライフサイクル費用を低減できることがわかる。同表のライフサイクル費用  $lcc(\Xi)$  は、社会的割引率を 0.00% として算出しているため、6.(3) の結果と単純に比較できないことに留意されたい。なお、照明設備の一括更新施策のもとで、照明器具に対して逐次更新施策  $\xi = 0$  を設定した場合、6.(3) で述べた最適点検・更新施策と比較して、リスク管理指標  $N_3(D, \xi)$  は単純には比較できないが、照明器具の落下防止措置の費用  $c_B$  が、照明器具の更新費用  $c_3$  を下回っているため、6.(3) で述べた最適点検・更新施策の方がライフサイクル費用を低減できる。以上のことより、本研究の実証分析においては、6.(3) で述べた点検・更新施策を最終的な最適点検・更新施策として決定した。

## 7. 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設備の最適点検・更新施策を求めめるための方法論を提案した。本研究の特徴は、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・更新施策を考慮

し最適点検・更新施策を求めめるための方法論を提案した点にある。さらに、実際の高速道路トンネル照明設備を想定した適用事例において、提案した非定常な点検間隔を有する点検・更新施策が、従来の定常的な点検間隔を持つ点検・更新施策と比較して、ライフサイクル費用を低減できることを明らかにした。

一方で、今後に残された課題を以下で整理する。第 1 に、提案した方法論の適用事例の拡大があげられる。本研究で獲得された知見は実証分析対象において有用となり、他の道路区間ではその地域で獲得された点検データを用いた劣化予測結果を用いる必要がある。また、本研究でも取り上げた道路付帯施設などのように一括更新施策が採用される可能性がある施設に対して提案した方法論は有用であると考えられ、多様な適用対象に対し、点検・更新施策の最適化を行う必要もある。第 2 に、本研究で得られた知見を設計段階へフィードバックできる可能性がある。本研究では、各部品の劣化過程を点検データを用いた劣化予測結果により所与として議論を進め、ライフサイクル費用を最小化する施策を選定した。一方で、各部品の寿命を設計段階で変化させることにより、ライフサイクル費用の更なる低減の可能性が存在する。本研究で提案した方法論により獲得できる劣化予測結果や最適点検・補修施策の知見を設計段階にフィードバックし、ライフサイクル費用低減などの視点を設計段階に組み込み、社会基盤施設のマネジメントサイクルの継続的発展を果たす必要がある。第 3 に、点検・更新施策の最適化手法の逐次改善があげられる。本研究では、遺伝的アルゴリズムを最適化手法として採用したが、他の最適化手法との比較、あるいは、局所探索法などと組み合わせることにより方法論を逐次改善していくことが必要となる。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費助成事業「特別研究員奨励費」により実施された。ここに記して感謝の意を表する。

## 付録 I ハザードモデル

ハザードモデルの詳細は、参考文献<sup>28)</sup>に詳しいが、読者の便宜を図るため、本研究で用いたハザードモデルの概要を以下で説明し、各部品の劣化特性に応じて、ハザード関数を付録 II、付録 III で特定化する。

ハザードモデルでは、部品の寿命を、確率密度関数  $f(x)$ 、分布関数  $F(x)$  に従う確率変数  $\chi$  と仮定する。寿命  $\chi$  の定義域は、 $[0, \infty)$  であり、 $F(0) = f(0) = 0$  とする。このとき、当該部品が、供用開始時点から任意の時点  $t \in [0, \infty)$  まで故障せず生存する確率  $\tilde{F}(t)$  は、

$$\tilde{F}(t) = 1 - F(t) \quad (付 1)$$

と表現できる。ここで、ハザード関数を  $\lambda(t)$  とすると、当該部品が時点  $t$  まで生存し、かつ、期間  $[t, t + \Delta t]$  内にはじめて故障する確率は、

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{\tilde{F}(t)} \quad (\text{付 2})$$

と表現できる。さらに、式(付1)の両辺を  $t$  に関して微分することにより、

$$\frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -f(t) \quad (\text{付 3})$$

を得る。このとき、式(付2)は、

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\tilde{F}(t)} = -\frac{d\tilde{F}(t)}{\tilde{F}(t)} = \frac{d}{dt} \left\{ -\log \tilde{F}(t) \right\} \quad (\text{付 4})$$

と変形できる。同式を積分することにより、

$$\int_0^t \lambda(u)du = [-\log \tilde{F}(u)]_0^t = -\log \tilde{F}(t) \quad (\text{付 5})$$

を得る。したがって、ハザード関数  $\lambda(u)$  を用いて、当該部品が時点  $t$  まで生存する確率(生存確率)  $\tilde{F}(t)$  を、

$$\tilde{F}(t) = \exp \left\{ -\int_0^t \lambda(u)du \right\} \quad (\text{付 6})$$

と表現することができる。

## 付録 II ワイブル劣化ハザードモデル

ハザード関数に具体的な関数形を与えることにより、各部品の劣化過程を表現するためのハザードモデルを特定化する。本研究では、各部品  $\iota$  ( $\iota = 1, 2, 3$ ) のハザード関数は、可観測な  $M_\iota + 1$  個の要素からなる特性ベクトル  $\mathbf{x}_\iota = (x_{\iota,0}, x_{\iota,1}, x_{\iota,2}, \dots, x_{\iota,M_\iota})$  に依存し変化すると考える。まず、照明ランプと安定器の劣化事象に対して、ワイブルハザード関数を用いる。ワイブルハザード関数は、

$$\lambda(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\theta}_\iota, t) = \exp(\mathbf{x}_\iota \boldsymbol{\beta}'_\iota) \alpha t^{\alpha-1} \quad (\iota = 1, 2) \quad (\text{付 7})$$

と表現することができる。ここに、 $\boldsymbol{\theta}_\iota = (\alpha_\iota, \boldsymbol{\beta}_\iota) = (\alpha_\iota, \beta_{\iota,0}, \beta_{\iota,1}, \dots, \beta_{\iota,M_\iota})$  はパラメータベクトルであり、ワイブルハザード関数を用いた場合、部品  $\iota$  の寿命分布の確率密度関数  $f(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\theta}_\iota, t)$  は、

$$f(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\theta}_\iota, t) = \exp(\mathbf{x}_\iota \boldsymbol{\beta}'_\iota) \alpha_\iota t^{\alpha_\iota-1} \exp\{-\exp(\mathbf{x}_\iota \boldsymbol{\beta}'_\iota) t^{\alpha_\iota}\} \quad (\text{付 8})$$

と、生存確率  $\tilde{F}(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\theta}_\iota, t)$  は、

$$\tilde{F}(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\theta}_\iota, t) = \exp\{-\exp(\mathbf{x}_\iota \boldsymbol{\beta}'_\iota) t^{\alpha_\iota}\} \quad (\text{付 9})$$

とそれぞれ表現することができる。これらより、照明ランプに関して、式(16)内の推移確率  $p_{v,v+1}^1(d_j)$  ( $v = 1, \dots, j$ ) は、

$$p_{v,v+1}^1(d_j) = \exp \left[ -\exp(\mathbf{x}_1 \boldsymbol{\beta}'_1) \left\{ \left( \sum_{k=j-v+1}^{j+1} d_k \right)^{\alpha_1} - \left( \sum_{k=j-v+1}^j d_k \right)^{\alpha_1} \right\} \right] \quad (\text{付 10})$$

と表現することができる。同様に、安定器に関しても、式(20)内の推移確率  $p_{a,a+1}^2(e)$  ( $a = 0, \dots, A-1$ ) は、

$$p_{a,a+1}^2(e) = \exp[-\exp(\mathbf{x}_2 \boldsymbol{\beta}'_2) \{(a+1)^{\alpha_2} - a^{\alpha_2}\} e^{\alpha_2}] \quad (\text{付 11})$$

と表すことができる。

## 付録 III マルコフ劣化ハザードモデル

一方、照明器具に関して、本研究では、指数ハザードモデルを用いて劣化過程を表現する。照明器具の劣化状態は、 $M$  段階の健全度で判定されている。マルコフ劣化ハザードモデルでは、 $M$  を除く  $M-1$  個の健全度それぞれに対し、 $M-1$  個の指数ハザード関数を定義し、非集計的にマルコフ推移確率を求める。健全度  $m$  ( $m = 1, \dots, M-1$ ) に対する指数ハザード関数  $\lambda_m(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\beta}_{3,m}, t)$  は、使用時間  $t$  に依存せず、

$$\lambda_m(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\beta}_{3,m}) = \exp(\mathbf{x}_3 \boldsymbol{\beta}'_{3,m}) \quad (\text{付 12})$$

と表現される。指数ハザード関数は、ワイブルハザード関数(付7)の加速度パラメータ  $\alpha_\iota$  を1とした場合の特殊形である。式(26)内のマルコフ推移確率は、指数ハザード関数を用いて、

$$\begin{aligned} & \pi_{ij}(d_j) \\ &= \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_{m+1} - \lambda_k} \exp(-\lambda_k d_j) \\ & \quad (i = 1, \dots, M-1; j = i+1, \dots, M) \quad (\text{付 13}) \end{aligned}$$

と表すことができる<sup>16)</sup>。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_k} = 1 & (k = i \text{ のとき}) \\ \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_{m+1} - \lambda_k} = 1 & (k = j \text{ のとき}) \end{cases}$$

が成立すると考える。さらに、式(付13)では、表記の簡略化のため、 $\lambda_m(\mathbf{x}_\iota, \boldsymbol{\beta}_{3,m}) = \lambda_m$  としている。

なお、これらの劣化予測モデルの推定方法は参考文献<sup>10),16),29),30)</sup>に詳しい。本研究においても、実データを用いて、ハザードモデルのパラメータをベイズ推定した結果から最適点検・更新施策を求めている。

## 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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, pp.125-138, 2005.

- 5) 例えば, White, D. J.: *Markov Decision Process*, Wiley, pp.130-146, 1993.
- 6) Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, *Transportation Research, Part B*, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
- 7) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- 8) Durango-Cohen, P. L. 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 青木一也, 若林伸幸, 大和田慶, 小林潔司: 橋梁マネジメントシステムアプリケーション, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.199-210, 2011.
- 13) 中林正司, 西岡敬治, 小林潔司: 阪神高速道路の維持管理の現状と課題, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.4, pp.494-505, 2007.
- 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) 国土交通省: 道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について(道路法施行規則の一部改正等), 2014.
- 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, pp.505-518, 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化, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.656-668, 2006.
- 24) 西日本高速道路株式会社: 道路付属物点検(施設)の手引き, 2008.
- 25) Geweke, J.: Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments, in Bernardo, J. M., Berger, J. M., Dawid, A. P. and Smith, A. F. M. (eds.): *Bayesian Statistics 4*, pp.169-193, Oxford University Press, 1996.
- 26) 小西貞則, 北川源四郎: 予測と発見の科学 情報量基準, 朝倉書店, 2006.
- 27) 平川恵土, 水谷大二郎, 貝戸清之: 異質性を考慮したトンネル照明灯具の劣化予測, 照明学会誌, Vol.97, No.11, pp.706-714, 2013.
- 28) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 29) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, pp.473-491, 2006.
- 30) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.

(2014. 10. 24 受付)

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

Satoshi HIRAKAWA, Daijiro MIZUTANI, Kengo OBAMA and Kiyoyuki KAITO

In this paper, the authors argue an optimal inspection/replacement policy for a tunnel lighting system which consists of lamps, ballasts and luminaires on an expressway. Deterioration processes of lamps and ballasts can be estimated by Weibull deterioration hazard models, and deterioration process of luminaires can be estimated by a Markov deterioration hazard model. By utilizing the deterioration forecasting result, the inspection/replacement process of the tunnel lighting system can be expressed as a Markov process model. As policy variables, the authors establish a) a flow of non-stationary inspection/replacement intervals of lamps, b) a repair policy of luminaires, c) an interval of simultaneous replacement of ballasts, and d) an interval of simultaneous replacement of the tunnel lighting system. At that time, the number of candidates of the optimal inspection/replacement policy is enormous due to the non-stationarity of inspection intervals. Therefore, the authors develop the method employing genetic algorithm in order to determine the optimal inspection/replacement policy which satisfies given risk control levels and minimizes the life cycle cost. Finally the effectiveness of the proposed method can be discussed through the empirical study of an actual expressway tunnel lighting system.