

- 20 道路付帯施設アセットマネジメントシステム

Asset Management Systems for the Facilities on the Highways

山本浩司¹・青木一也²・小林潔司³

Kouji YAMAMOTO, Kazuya AOKI, Kiyoshi KOBAYASHI

抄録：本研究では高速道路上に数多く設置されている道路付帯施設の保全業務を合理的に実施するための道路付帯施設アセットマネジメントシステム (Fasys-AM) を提案する。Fasys-AM は施設緒元・点検履歴データベースと連動し、道路付帯施設のライフサイクル費用と故障リスクを最小にするような最適点検・補修・更新政策を導出することを目的とする。さらには、予算制約下において、道路付帯施設の中長期的な予算計画と管理水準を求めるための劣化・補修シミュレーションモデルを搭載している。複数の施設の状態を集計的マルコフモデルで表現し、さらには劣化過程が使用時間に依存するような非斉次マルコフ過程モデルとして記述する。適用事例として東北自動車道のトンネル照明灯具を対象とした Fasys-AM アプリケーションを試行的に運用し、その有用性を実証的に検証する。

Abstract: In this paper, an asset management system (Fasys-AM) is presented to optimize maintenance/repair activities for the facilities on the highways. The Fasys-AM is designed to find out the optimal inspection/repair/replacement policies to minimize the life-cycle cost and fail risks based upon the database of the inventories and inspection history. The system involves, as its core module, a simulation model to investigate the long-medium term budget plans and the service levels of the facilities given the budgetary constraints. The deterioration processes of the facility systems are modeled by the aggregated time-dependent Markov process model. The paper illustrates a case study carried out for the lighting systems on the Tohoku expressway to investigate the validity of the Fasys-AM applications.

キーワード：アセットマネジメント, ライフサイクル費用, 最適点検・補修・更新政策

Keywords : asset management, life cycle cost, optimal inspection/repair/replacement policy

1. はじめに

高速道路上に設置されている照明施設や非常用設備（消火栓）等の付帯施設は、道路の供用開始から時間の経過とともに劣化が進行し、維持管理費用の増大を招くとともに、補修・更新工事に伴う交通規制等により高速道路利用者へ与える負の影響が大きくなる。さらに、例えば高速道路上に設置された照明灯具が劣化し道路上に落下した場合、重大な事故の発生につながる可能性があり、そのような危険性を未然に防止するような保全業務が求められる。このため、既存の施設を効果的・効率的に運用し、適切に維持管理していくために、「道路付帯施設アセットマネジメントシステム」の開発が重要視されている。

本研究では、道路付帯施設の保全業務を合理的に執行するための道路付帯施設アセットマネジメントシステム (Road Facilities control System – Asset Management: 以下、Fasys-AM と略す) を提案する。さらに、本システムを道路付帯施設管理の実務において運用するため

に、施設管理者の操作により保全の意思決定に関する有用な情報を出力することを可能とするアプリケーション (以下、Fasys-AM アプリケーションと称す) を開発した。本研究で開発した Fasys-AM アプリケーションは、高速道路のトンネル内に設置されているトンネル照明等具を対象としている。トンネル照明灯具は、鋼板やステンレス製が幅広く利用されており、時間の経過とともに腐食が進行する。さらに、劣化が進行した場合には落下の危険性が高くなる。このため、照明灯具の供用状態を定期的に点検し、その結果をデータベースで管理することが必要である。本アプリケーションでは、定期点検データベースに基づいた劣化予測モデルの推計、最適点検・更新・補修政策の導出、さらには中長期的な劣化・補修のシミュレーションモデルを搭載しており、中・長期的な予算計画と管理水準 (劣化リスク水準) を決定するための情報を提供することが可能である。以下、2. で本研究の基本的な考え方を、3. において Fasys-AM 構築のための検討事項について述べる。4. において Fasys-AM アプリケ

1 : 正会員 中日本高速道路株式会社 横浜支社 保全・サービス事業部施設整備チーム

(〒222-8503 横浜市港北区新横浜 3-9-18, Tel : 045-475-9239, E-mail : k.yamamoto.af@c-nexco.co.jp)

2 : 正会員 博(工) 株式会社パスコ GIS 総合研究所応用技術開発課

(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-10, Tel : 03-3715-4011, E-mail : kazuya_aoki@pasco.co.jp)

3 : フェロー会員 工博 京都大学教授 経営管理大学院経営管理講座

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町, Tel : 075-753-5071, E-mail : kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)

ーションの設計に関して、5.において、本アプリケーションを用いてトンネル照明灯具を対象とした適用事例について述べる。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

アセットマネジメントシステムにおけるプロジェクトレベルを対象とした土木構造物の最適補修モデルや、さらにはそれらの手法を具体化した業務支援システムアプリケーションの開発に関する研究が蓄積されている。たとえば、橋梁のアセットマネジメントを対象として、米国における代表的なBMS (Bridge Management System) であるPONTISをはじめ、長期的なライフサイクル費用の削減を目指したBMSが数多く提案されている¹⁾。土木構造物の維持管理にあたっては、個々の構造物の補修計画を検討するプロジェクトレベルと、管理する構造物群全体の補修政策や予算計画を検討するネットワークレベルといった階層的に異なるマネジメントレベルを取り扱う必要がある。土木構造物単体を取り扱うプロジェクトレベルにおいては、マルコフ決定モデルを用いてライフサイクル費用評価を行うことによって最適補修政策を導出するモデルが提案されている²⁾⁶⁾。ライフサイクル費用評価において、将来時点に発生する費用を積み重ねる際に、異なった時間軸上での費用の取り扱いが重要となる。前述のPONTISでは、異なる時間軸上で発生する費用に対して割引率を用いて現在価値に換算する割引現在価値法を採用している。一方、割引率を用いたライフサイクル費用評価は、長寿命化の効果を積極的に評価できないという観点²⁾から、貝戸らは、将来時刻に発生するライフサイクル費用を年平均費用に置き換えて評価する平均費用法を用いた最適補修政策を決定する手法を提案している⁵⁾。さらに、青木らは、平均費用法による最適補修政策導出モデルを搭載したBMSを報告している⁷⁾。そこで提案されているBMSは、橋梁システム全体の維持管理を対象とした場合に、各会計年度における維持補修実績に基づいて橋梁システム全体の維持補修実績のパフォーマンスを評価するための橋梁資産評価と予算管理を目的とした管理会計システムを提案している。また、道路舗装を対象とした補修計画の最適化に関する研究⁸⁾¹¹⁾やアセットマネジメントシステム¹²⁾について、いくつかの研究成果が報告されている。しかし、本研究で対象としている道路付帯施設を取り扱うケースのように、施設の点検や補修のタイミングを同時に求め施設管理者の意思決定を支援するようなシステムは提案されていない。本研究で提案するFasys-AMは、数多くの施設が道路上に設置されているような道路付帯施設をモデルとして、その点検・補修

の最適補修政策を導出するシステムを提案する。さらに、施設全体を管理するうえでの予算計画機能を含めたFasys-AMアプリケーションを開発し、高速道路における実際の付帯施設の管理業務への適用について実証的に分析する。

(2) 道路付帯施設の保全業務

道路付帯施設は、照明設備(道路照明、トンネル照明)やトンネル非常用設備(消火栓等)、ジェットファンや道路情報盤といった、道路上に数多く設置された施設群で構成され、道路利用者の安全な交通を支える重要な施設である。道路付帯施設の故障が発生すると、道路利用者へ与える影響は大きく、直ちに対策を施さねばならない。これらの道路付帯施設は、その他のインフラ資産と同様に、施設の老朽化が進行し、機能維持のための費用が増大している。そのため、安全性や利用者の満足を確保するための維持、点検・補修・更新時期の最適化を通じて、ライフサイクル費用を低減する必要性が高まっている。

本研究では、道路上に数多く設置されている同種の施設群を対象としたアセットマネジメントシステムを開発することを目的とする。その中で、本研究の適用事例では道路照明施設を取り扱う。道路照明設備の目的は、道路の利用者に視覚情報を与え、これによって障害物の認知、線形の確認及び視線誘導等、道路の安全性に関する個々について十分に知覚させることにある。さらに、トンネル部における照明設備は、これらの目的の他、1)トンネル内部の特殊な周囲条件による交通機能の低下の軽減、2)トンネル内部又は外部への移動時における運転者の視覚の平衡状態の維持、3)トンネル内部における空気の汚濁による透過率低下をもたらす交通障害の防止、といった道路交通の安全性にとって重要な機能を有している。

道路付帯施設は大別すると機能的な部分と構造的な部分から構成されており、これらの劣化の定義を明確にしてその状態を把握することが施設設備の保全をマネジメントしていく上で必要となってくる。例えば、照明設備の場合、機能的な劣化としては、「不点」、「灯具表面の汚れ」、「ランプの照度低下」等である。一方、構造的な劣化として考えられる主な項目は「腐食」である。機能的劣化に対しては、部品の交換、構造的劣化に対しては、予防的補修による延命化対策や、劣化が進行した時点での更新といった対策が必要とされる。

(3) 道路付帯施設のアセットマネジメント

照明灯具やトンネル非常用設備(消火栓)等の道路付帯施設は、道路上に同種の施設が数多く設置されて

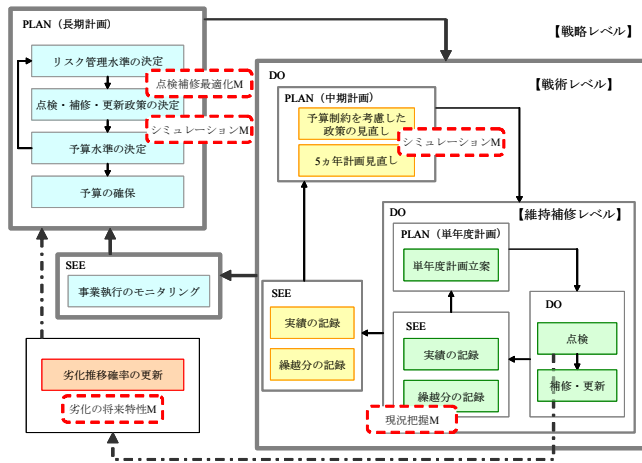


図-1 道路付帯施設マネジメントシステムの全体構成

おり、それらの施設の点検・補修・更新業務を同期化することにより、点検・補修・更新業務に付随する固定費用を低減することができる。ある一定の時間間隔において点検を行い、点検結果に応じた補修・更新を実施する。さらに、これらの施設の劣化は不確実性を含んでおり、点検時において施設の劣化に対するリスクを許容しなければならない。このことから、道路付帯施設の管理指標として、点検・補修・更新の政策とその政策を適用した際の施設の劣化リスク（リスク管理水準）及びライフサイクル費用の関係を示すこととなる。この劣化リスクとライフサイクル費用はトレードオフの関係にある。図-1に、道路付帯施設マネジメントシステムの全体構成を示す。

戦略レベル（長期計画）において、対象施設についての点検・補修・更新の政策の最適化及び予算推移について長期的に予測を行い、必要な予算を調達する。その際、あるリスク管理水準を所与として、管理水準を達成するために必要となる点検・補修・更新の定常政策を決定し、長期的な予算水準をシミュレーションによって求めることが重要な課題となる。また、年間の予算に制約がある場合に、制約予算が施設の劣化・補修過程に与える影響を分析することも必要となる。

戦術レベル（中期計画）においては、戦略レベルにて決定した各期予算にしたがって、管理対象となる各付帯施設群への予算の配分を検討する。配分された予算の範囲内で、管理水準の目標値と点検・補修・更新政策の見直しを行う。本研究では、おおむね5カ年の計画を立案することを目標とする。

維持補修レベル（単年度計画）では、単年度に点検・補修・更新を実施する対象施設を決定し、計画にしたがって点検・補修・更新を実施する。各期の予算の範囲内で、計画にしたがった点検・補修・更新をすべて実施できない場合は、当該年度の補修・更新の繰越量として記録され、次年度以降の計画に反映され、5カ

年計画の見直しが行われる。

アセットマネジメントにおいてライフサイクル費用評価を行うために、施設の将来の劣化特性を予測する必要がある。ライフサイクル費用評価の信頼性は、劣化予測モデルの精度に大きく依存する。本システムでは、点検によって蓄積された実測データからワイブル劣化ハザードモデル、多段階ワイブル劣化ハザードモデルを用いて、将来の劣化過程を予測する。

以下では、Fasys-AMの核となる機能を担う劣化予測モデルの推定方法、最適点検・補修・更新政策の導出モデル、劣化・補修・更新過程のシミュレーションの概要について説明する。

3. Fasys-AM 構築のための検討

(1) 最適点検・補修・更新政策の導出

筆者らは、同一種類の多数の施設で構成されるシステムの最適点検・補修政策の導出モデルを既に開発している¹³⁾。本研究の適用事例において対象としている照明灯具の場合、そのシステムの更新政策として、1) 定期点検時点において使用限に達した施設のみを、点検時点において逐次更新する政策（逐次更新ルール）、2) ある一定の期間ごとに、システムを構成するすべての施設を（健全度にかかわらず）一括して更新する政策（一斉更新ルール）という2種類の更新政策を考えることができる。一斉更新ルールの場合、ある一定の間隔ごとに、施設の健全度にかかわらずすべてを一斉に更新することから、劣化が進展していない施設も更新することとなり、更新費用が増加する。一方、一斉更新ルールは、更新作業のために発生する規制回数が減少するため、社会的費用の減少が期待できる。逆に、逐次更新ルールを採用した場合には、更新費用を最小限に抑えることが可能となる一方で、更新作業を実施する毎に社会的費用が発生する。逐次更新ルール、一斉更新ルールのいずれが望ましいかは、システムの劣化特性や補修・更新費用、さらには施設の利用状況に関係する社会的費用等の外部費用に依存する。本システムでは、点検や施設の補修・更新費用、規制費用の他、渋滞等による利用者の損失を含めた社会的費用を考慮したライフサイクル費用の比較によって、最適な更新政策を導出する機能を搭載する。

多数の施設を定期的に一斉点検・補修を実施するようなシステムの劣化・補修過程を、集計的な非斉次マルコフモデルとして定式化する。施設の劣化過程が時間に依存するようなワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現され、さらに個々の施設の補修履歴や補修の繰り返し回数が、次の補修の有無に与える影響を考慮することから、通常のマコフ過程モデルとは異なり、

劣化・補修過程における状態変数を、個々の施設の健全度に加えて、システム全体における補修履歴別、健全度別、点検回数別期待相対頻度を用いて定義される。その期待相対頻度は、各施設の健全度が定期点検間隔を d としたときに離散的な時刻 t_ϵ^d における各施設の状態であり、 $\pi_{klim}^\xi(t_\epsilon^d)$ で表現されるものとする。ただし、 ξ は、点検・補修のルールを示し、 k, l, i, m はそれぞれ、点検・補修後に定義される当該施設の直近の(回復健全度で定義される)補修履歴、その回復健全度へ補修により回復された回数、施設の健全度、直近の更新後の点検回数(使用時間)を示している。但し、施設の健全度は I 個の離散的なレーティング指標で表現するものとし、健全度 I は、施設の劣化がもっとも進んだ状態を表す。このとき、次式が成立する。

$$\sum_{k=1}^{I-2} \sum_{l=0}^L \sum_{i=k}^{I-1} \sum_{m=0}^{M-1} \pi_{klim}^\xi(t_\epsilon^d) = 1 \quad (1)$$

さらに、施設の劣化・補修過程をモデル化する際に、時点 t_ϵ^d の補修アクション実施後の状態 (k, l, i, m) から、時点 $t_{\epsilon+1}^d$ における補修アクション実施後の状態 (k'', l'', i'', m'') への推移状態を表す確率 $P_{klim}^{k''l''i''m''}(\xi)$ を定義することが必要となる。 $P_{klim}^{k''l''i''m''}(\xi)$ を、点検・補修政策 ξ の下における時刻 t_ϵ^d と時刻 $t_{\epsilon+1}^d$ の間における健全度推移確率を表現している。このとき、施設の劣化過程は、次の3種類の式で表すことができる。まず、時刻 $t_{\epsilon+1}^d$ において補修が実施されない場合は、

$$\pi_{k''l''i''m''}^\xi(t_{\epsilon+1}^d) = \sum_{i=1}^{i''} P_{k''l''i''m''}^{k''l''i''m''}(\xi) \pi_{k''l''i''m''}^\xi(t_\epsilon^d) \quad (2)$$

$$(k'' = 1, \dots, I-2; l'' = 0, \dots, L; i'' = k'', \dots, I-1; m'' = 0, \dots, M-1)$$

次に、定期点検時刻 $t_{\epsilon+1}^d$ に補修が実施される場合は、

$$\pi_{k''l''i''m''}^\xi(t_{\epsilon+1}^d) = \sum_{k=1}^{k''} \sum_{l=0}^L \sum_{i=k}^{I-1} \sum_{m=0}^{M-1} P_{klim}^{k''l''i''m''}(\xi) \pi_{klim}^\xi(t_\epsilon^d) \quad (3)$$

と表わされる。最後に、施設が更新された場合、補修履歴、繰返し回数、健全度、点検回数がすべて 0 に更新される。このとき、

$$\pi_{1010}^\xi(t_{\epsilon+1}^d) = \sum_{k=1}^{I-2} \sum_{l=0}^L \sum_{i=k}^{I-1} \sum_{m=0}^{M-1} P_{klim}^{1010}(\xi) \pi_{klim}^\xi(t_\epsilon^d) \quad (4)$$

が成立する。

以上の劣化・補修過程を行列表記の形で整理する。点検・補修政策 ξ の下における推移確率行列を $\mathbf{P}(\xi)$ で表わそう。この時、劣化・補修過程が長期間繰り返さ

れ、長期定常状態に到達したときの、補修履歴別、健全度別、点検回数別施設シェアに関する定常確率ベクトルは、

$$\bar{\boldsymbol{\pi}}^\xi = \bar{\boldsymbol{\pi}}^\xi \mathbf{P}(\xi) \quad (5)$$

を満足する $\bar{\boldsymbol{\pi}}^\xi$ として定義される。定常確率 $\bar{\boldsymbol{\pi}}^\xi$ は、式(5)から任意の式を1つ削除するとともに、定常確率の定義式(1)を加えた連立方程式を解くことにより求めることができる。

導出された定常確率ベクトルから、点検・補修政策 ξ の下におけるライフサイクル費用、及び健全度 I が観測される定常確率(故障リスク)を算出することができる。施設のリスク管理水準を \bar{U} と表し、さらに故障リスク $\Pi_I(d, \boldsymbol{\eta}^\xi)$ を、リスク管理水準 \bar{U} 以下に抑えることが可能な点検・更新政策の集合 $\Omega(\bar{U})$ を

$$\Omega(\bar{U}) = \{(d, \boldsymbol{\eta}^\xi) | \Pi_I(d, \boldsymbol{\eta}^\xi) \leq \bar{U}\} \quad (6)$$

と定義する。この時、リスク管理水準 \bar{U} を所与とした時に、ライフサイクル費用を最小にするような最適点検・補修政策 $\xi^*(\bar{U})$ を求める最適点検・補修モデルは

$$\begin{aligned} \min_{d, \boldsymbol{\eta}^\xi} \{C(d, \boldsymbol{\eta}^\xi)\} \\ \text{subject to } (d, \boldsymbol{\eta}^\xi) \in \Omega(\bar{U}) \end{aligned} \quad (7)$$

と定式化できる。

一方、一斉更新ルールを採用する場合、一斉更新を実施した時刻にすべての施設の健全度が1に更新されるため、定常確率を用いることができない。点検間隔 d として一斉更新時刻の時間間隔を Md とすると、リスク管理水準は M 回目の点検時刻(一斉更新時刻)における故障リスク $\tilde{\Pi}_I(M, d, \boldsymbol{\eta}^\xi)$ として定義される。このとき、故障リスク $\tilde{\Pi}_I(d, \boldsymbol{\eta}^\xi)$ を、リスク管理水準 \bar{U} 以下に抑えることが可能な点検・更新政策の集合 $\tilde{\Omega}(\bar{U})$ を

$$\tilde{\Omega}(\bar{U}) = \{(M, d, \boldsymbol{\eta}^\xi) | \tilde{\Pi}_I(M, d, \boldsymbol{\eta}^\xi) \leq \bar{U}\} \quad (8)$$

と定義しよう。この時、リスク管理水準 \bar{U} を所与とした時に、ライフサイクル費用を最小にするような最適点検・補修政策 $\xi^*(\bar{U})$ と最適一斉更新間隔を求める最適点検・補修モデルは

$$\begin{aligned} \min_{M, d, \boldsymbol{\eta}^\xi} \{\tilde{C}(M, d, \boldsymbol{\eta}^\xi)\} \\ \text{subject to } (M, d, \boldsymbol{\eta}^\xi) \in \tilde{\Omega}(\bar{U}) \end{aligned} \quad (9)$$

と定式化できる。

(2) 劣化予測モデルの推定

施設の最適点検・補修・更新政策の導出するために、その推移確率を、多段階ワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現する。筆者らは、施設の劣化過程が使用時間に依存するようなケースを対象とした劣化予測モデルを開発しており、この多段階ワイブル劣化ハザードモデルの基本的な考え方、モデルの推定方法については参考文献を参照してほしい¹⁴⁾。ここでは、多段階ワイブル劣化ハザードモデルを推定した結果を用いて、施設の最適補修政策を導出するモデルについて簡単に説明することとする。

点検時刻 t_{ϵ}^d において補修履歴 k 、健全度 i 、点検回数 m の施設が、点検時点 $t_{\epsilon+1}^d$ において補修履歴 k 、健全度 i' 、点検回数 $m+1$ の状態に推移する確率 $p_{klim}^{k|i'(m+1)}$ は、条件付確率

$$p_{klim}^{k|i'(m+1)} = \frac{\pi_{i'i}^k(md, (m+1)d)}{\rho_{ki}(m)} \quad (10)$$

により定義できる。式(10)における分母 $\rho_{ki}(m)$ は、時刻 $t_{\epsilon-m}^d$ に補修・更新により健全度 k に回復した施設が、使用時間 md を経過したのちに、健全度が i に推移する確率を示している。また、分子 $\pi_{i'i}^k(md, (m+1)d)$ は、補修により健全度が k に回復してから、使用時間 md が経過した点検時刻 t_{ϵ}^d で健全度 i が観測され、さらにそれより時間 d が経過した点検時刻 $t_{\epsilon+1}^d = t_{\epsilon-m}^d + (m+1)d$ において健全度 i' が観測される同時生起確率を表している。式(10)により定義される推移確率は、明示的に関数系を用いて表現することは不可能であり、数値計算により多重積分を解いて求めることとなる。のちに5. においては、東北支社管内のトンネル照明システムに関する点検データを用いて推定した推移確率を紹介していることを補足しておく。さらに、本システムには、劣化推移確率を補正するために、施設の期待寿命長を入力条件として簡易的に劣化推移確率を求める機能を搭載している。なお、新しい点検による実測データが取得された際にそのデータを用いてハザードモデルのパラメータをベイズ更新する方法論を開発し、システムの機能として搭載することが望ましい。このようなシステムの更新問題に関しては本研究の範囲を超えており、今後の研究課題とする。

(3) 点検・補修・更新過程のシミュレーション

a) シミュレーションの手順

シミュレーションモジュールの目的は、管理対象の

施設をグループ化し、グループ全体を管理するための必要予算の推移と健全度推移をシミュレーションによって予測することである。点検補修最適化モジュールにて算出された結果をもとに、当該トンネル内の施設の、点検・補修・更新に関して、外生的に与えたりリスク管理水準を達成する時の最適な定常政策をシミュレーション条件として入力する。この定常政策は、現場のメンテナンス業務に対するマクロ的な指針であり、点検・更新の間隔や補修の考え方（予防的補修や事後的補修の判断など）といった、ミクロマネジメントにおける有用な情報を与える。一方、現在供用されている施設群は、設置年や劣化過程、補修履歴など、様々な異なる条件を有する施設が集合しており、その状態は定常状態にあるとは限らない。将来の費用推移や健全度の推移は、現在の管理状況に大きく依存することとなる。さらに将来の劣化過程は、ワイブル劣化ハザードモデルにより推定した劣化確率に従って推移するものと仮定しているが、多大な不確実性を有しており、このことも将来の需要予測に影響する。本モジュールは、このような不確実性下において、施設の現在の管理状態を考慮した上で将来時点における費用及び健全度推移を、シミュレーションによって予測するものである。また、年間の制約予算による健全度推移の影響を予測することも可能としている。これらのアウトプットは、当該施設群を将来時点に亘って管理する際に必要な費用を調達するための説明資料として用いられる。

いま、管理対象とするシステムの施設の総数を N とする。また、それぞれの施設を $n(n=1, \dots, N)$ と表現する。ここで、時刻 t における施設 n の健全度を状態変数 $\omega_n(t)$ により表現する。このとき、システム全体における健全度を、状態ベクトル

$$\boldsymbol{\omega}(t) = (\omega_1(t), \dots, \omega_N(t)) \quad (11)$$

を用いて表現することができる。いま、時刻 t において施設の健全度が、 i と評価された施設の総数を $\eta^i(t)$ と表す。このとき、施設数ベクトルを、

$$\boldsymbol{\eta}(t) = (\eta^1(t), \dots, \eta^I(t))$$

但し

$$\eta^i(t) = \sum_{n=1}^N \delta_{in}(t) \quad (i=1, \dots, I) \quad (12)$$

$$\delta_{in}(t) = \begin{cases} 1 & \omega_n(t) = i \text{ の時} \\ 0 & \omega_n(t) \neq i \text{ の時} \end{cases}$$

と定義する。ここで、初期時点 $t=0$ を基準時刻と考え、システム全体の劣化過程をシミュレートする問題を考

える。現時刻において、将来時刻における健全度を確定的に予測することは不可能であるため、初期時刻から m 期経過した時刻 $t = m$ における施設 n の状態の確率分布を、

$$\kappa_n(m) = (\kappa_n^{1010}(m), \dots, \kappa_n^{(I-2)L(I-1)(M-1)}(N)) \quad (13)$$

と表す。但し、 $\kappa_n^{klim}(n)$ は、 $t = m$ において施設 n の補修履歴が k 、補修回数 l 、健全度 i 、点検回数（経過時間） m となる確率を示す。このとき、初期時刻における施設の状態が、 (k, l, i, m) であった施設 n の m 期後の状態分布は、

$$\kappa_n(m) = e_i (\mathbf{P}_n)^m \quad (14)$$

と表すことができる。ただし、 $e_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ は、第 i 番目の要素のみが値 1 をとり、それ以外の要素がすべて 0 をとる行ベクトルである。さらに、 $(\mathbf{P}_n)^m$

は推移確率行列 \mathbf{P}_n の m 乗を表している。また \mathbf{P}_n は、施設 n に対して定義される推移確率行列である。

次に、劣化した施設に対して点検・補修政策 ξ を適用した場合を考える。初期時刻の施設の状態が、 (k, l, i, m) であった施設 n の m 期後の状態分布は、

$$\kappa_n^\xi(m) = e_i (\mathbf{P}_n^\xi)^m \quad (15)$$

と表せる。ただし、 $\kappa_n^\xi(m)$ は施設 n の状態分布であり、 $\kappa_n^\xi(m) = (\kappa_n^{1010, \xi}(m), \dots, \kappa_n^{(I-2)L(I-1)(M-1), \xi}(m))$ と表現できる。このとき、点検・補修政策 ξ の下で実現するシステム全体の状態分布確率は、

$$\kappa^\xi(m) = \{\kappa_{1010}^\xi(m), \dots, \kappa_{(I-2)L(I-1)(M-1)}^\xi(m)\} \quad (16)$$

で表現される。マルコフ連鎖モデルを反復的に利用することにより、各期における健全度分布を求めることができる。時刻 m に各健全度が観測される期待施設数ベクトルを、

$$E\eta^\xi(m) = (E\eta_1^\xi(m), \dots, E\eta_I^\xi(m)) \quad (17)$$

と定義したとき、時刻 $t = m$ に健全度 i と判定される期待施設数 $E\eta_i^\xi$ は、

$$E\eta_i^\xi(m) = \sum_{n=1}^N \kappa_n^{i, \xi}(m) \quad (i = 1, \dots, I) \quad (18)$$

と定義できる。さらに、施設の劣化水準を i' から i'' へ修復するための補修費用を $c_{i'}^{i''}$ で表すと、時刻 $t = m$ の直前に発生する健全度 i である施設 n の補修費の期待値は、

$$E\zeta_n^\xi(m) = \sum_{k'=1}^{I-2} \sum_{k''=0}^{I-2} \sum_{l'=0}^L \sum_{l''=0}^L \sum_{i'=k''}^{I-1} \sum_{i''=k'}^I \sum_{m'=0}^{M-1} \sum_{m''=0}^{M-1} \kappa_n^{klim, \xi}(m-1) p_{klim}^{k'l'i'm'} q_{k'l'i'm'}^{k''l''i''m''}(\xi) c_{i'}^{i''} \quad (19)$$

$$(k = 1, \dots, I-2; i = k, \dots, I-1; l = 0, \dots, L; m = 0, \dots, M-1)$$

であり、各施設の期待補修費を加算して各期におけるシステム全体の年間補修費の期待値を、

$$E\zeta^\xi(m) = \sum_{n=1}^N E\zeta_n^\xi(m) \quad (20)$$

と表すことができる。シミュレーションを行う場合、施設の健全度、補修履歴、点検回数（使用時間）といった初期状態を与件として設定する。以上の手順によって、システムの劣化・補修過程をシミュレートすることができる。なお、本モジュールのシミュレーションでは、モンテカルロ法により擬似乱数を発生させ、各施設の劣化・補修過程を表現するサンプルパスを発生させている。サンプルパスの試行回数は任意に設定することが可能である。発生させたサンプルパス上で評価した LCC を多数のサンプルパスに対して平均化操作を行うことにより、各年時で発生する年間補修費用及び健全度別部材数の期待値を求めることができる。

b) 予算制約下におけるシミュレーション

各期の費用に制約がない場合には、ライフサイクル評価によって導出された最適政策に基づいた補修・更新が実施される。しかし、現実的には最適政策を遂行するための予算を毎年確保できるとは限らず、確保された予算枠の中で優先的に実施すべき施設を選定して補修・更新が実施される。補修・更新の優先順位は、施設の健全度によって決定するものとする。施設の健全度がもっとも劣化した状態である I が観測された場合には、更新が行われる。まず、予算枠の範囲内で、1) 更新が行われ、次に健全度が悪い状態を優先的に、補修する。すなわち、2) 健全度 $(I-1)$ の補修、3)

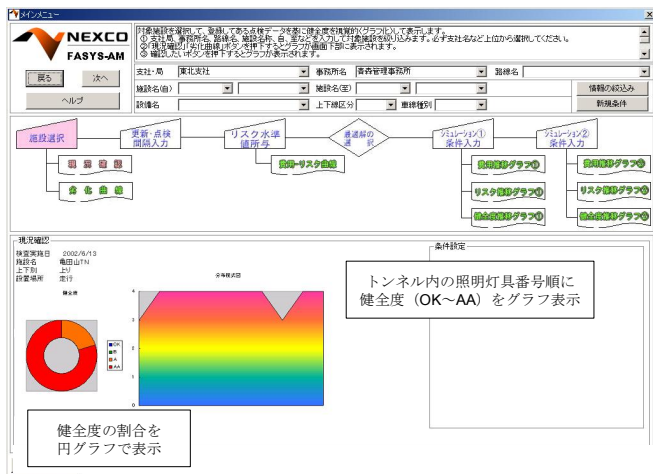


図-2 現状把握モジュール

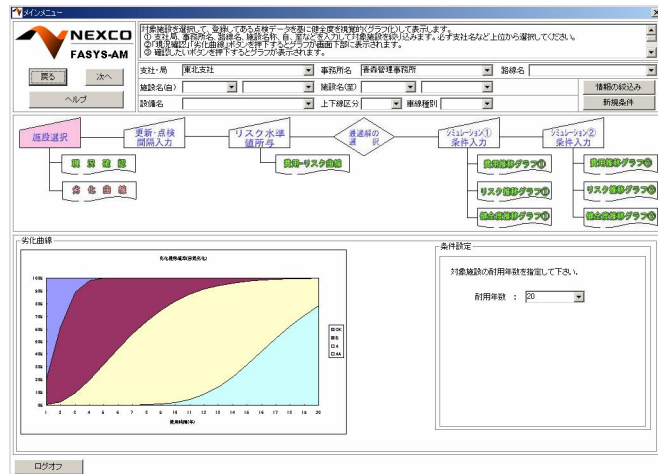


図-3 劣化特性モジュール

健全度(I-2)の補修, ..., 最後に健全度2の補修が実施されるような優先順位を想定している. 予算の不足によって当該年度に補修が実施されなかった施設については, その結果が記録され, 次年度以降に補修が繰越されることとなる.

ータについては, 関連する別のデータ管理システムとの属性の整合を図り, データベースから CSV 形式でインポートするインタフェースを構築した.

4. Fasys-AM アプリケーションの設計

(1) Fasys-AM アプリケーションの概要

本研究で提案した道路付帯施設アセットマネジメントシステムである Fasys-AM に基づき, 高速自動車道の道路付帯施設管理業務を対象としたアプリケーションを設計した. 今回, 設計したアプリケーションは, システムの GUI 部分には, Visual Basic6.0 を用いており, DBMS には, MSDE (SQL Server Engine) を採用している. GUI の設計に関しては, システムユーザの操作性を考慮し, その他の既存のシステムで作成された GUI を参考に本システムへの適用を検討した. 本システムの利用者の権限について確認するために, ユーザ ID 及びパスワードによる認証機能を備えている. 以下に, 本研究で設計したアプリケーションにおけるシステムユーザとインタフェースである各システム内の主要なモジュールについて説明する.

(3) 現状把握モジュール

本モジュールでは, 点検や補修が行われた結果をデータベースに反映し, 現在の施設の管理状況を視覚的に把握することを目的としている. システムユーザは, 分析の対象となる施設を, 管理事務所名, 路線名, 施設区分等から抽出する. 抽出された対象施設の現在の健全度分布状況を, グラフ表示することにより, 視覚的に健全度状態を把握することができる. さらに, 過去の時点における状態に関するデータを履歴情報として管理することで, 過去の時点における状況と比較分析することも可能としている (図-2).

(2) データベースシステム

管理下にある施設に関する諸元情報や点検データ, 基本となる補修工法に関する情報等を一括して管理している. 本システム内で使用するデータ群は, 1) 最適補修政策計算, 2) シミュレーション, 3) 履歴情報, 4) マスタ情報に大別される. 履歴情報として, システムユーザが行った処理結果を時系列に格納し, 任意に情報を閲覧・加工を可能とする. また, 本データベースを構築する際に, 施設の諸元データや点検デ

(4) 劣化特性モジュール

分析の対象とした施設の劣化特性として, 推定したワイブル劣化ハザードモデルを特定する. 劣化推移確率は, 図-3 に示すように, 供用初期時点からの経過時間と推移確率の関係を図示することで表現する. 本システムでは基本となるワイブル劣化ハザードモデルの推定結果を初期値として設定している. 劣化特性の異なる施設を対象とした分析を行う場合, ワイブル劣化ハザードモデルを補正しなければならない. しかし点検による実測データを用いた多段階ワイブル劣化ハザードモデルの推定には, 多くの時間を要するため, システムのモジュールとしては適切ではない. このため, 本システムでは, システムユーザが当該施設の期待寿命長から, ワイブル劣化ハザードモデルを補正する簡易機能を搭載している. 既往の研究や当該施設の性能規定等から推測される期待寿命長を外生的に与えることによって, ワイブル劣化ハザード関数のパラメータ値 θ_i を補正する. ワイブルハザード関数における故

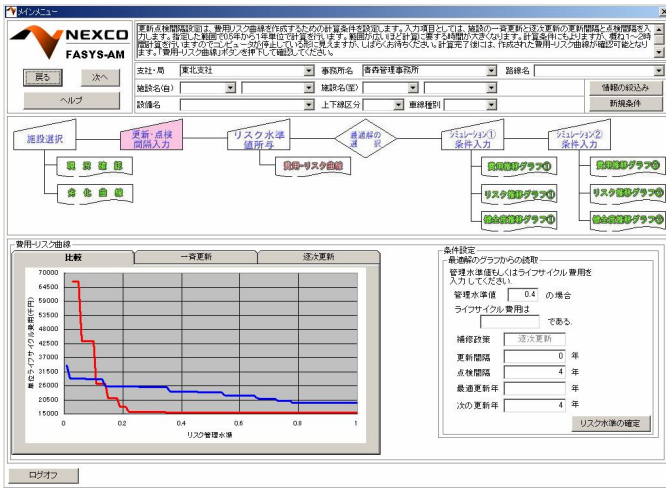


図-4 点検・補修・更新最適化モジュール

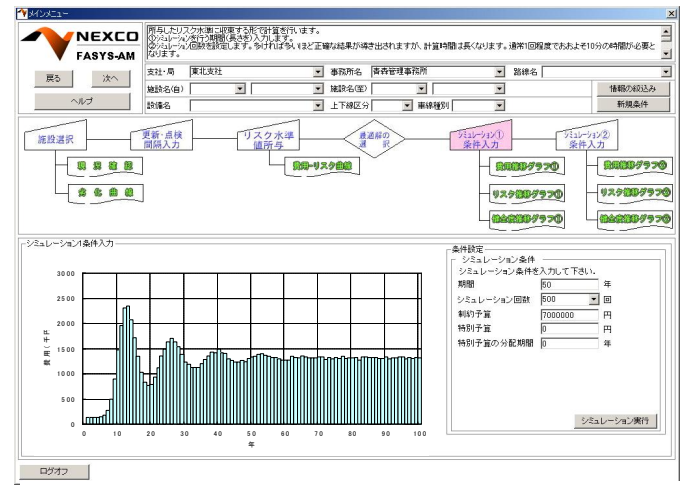


図-5 シミュレーションモジュール

障までの期待時間 $E(T)$ は、

$$E(T) = \theta_i^{-1} \alpha_i \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha_i} \right) \quad (21)$$

で与えられる。パラメータを補正するために主観的に与えた期待寿命長を、 $\bar{E}(T)$ とする。さらに事前情報として基準となるワイブル劣化関数のパラメータを、 θ_i, α_i 、このときの期待寿命長を $E(T)$ と表すと、主観的に与えた期待寿命長より補正するワイブル劣化関数のパラメータ $\bar{\theta}_i$ は、

$$\bar{\theta}_i = \theta_i \left(\frac{E(T)}{\bar{E}(T)} \right)^{\alpha_i} \quad (22)$$

により求めることができる。

(5) 点検・補修・更新政策導出モジュール

Fasys-AM では、最適な補修政策と点検・更新間隔を同時に求めることができる。さらには、更新ルールとして、一斉更新ルールと逐次更新ルールの2種類が考えられ、いずれのルールを採用した場合におけるライフサイクル評価を行うことが可能である。システムユーザは分析の対象となる施設を選択し、当該施設のワイブル劣化ハザードモデルの特定の他、入力条件として、補修工法に関する情報（工法、補修費用単価、補修の繰返し制限、回復水準）、社会的費用を計算するための諸原単位、点検間隔（一斉更新の場合は更新間隔）の最適化計算範囲等を入力する。入力条件に従って費用-リスク曲線が算出される。その費用-リスク曲線の結果から、所与のリスク管理基準値又はライフサイクル費用の制限を満足するような最適な点検・補修・更新ルールを1点選択する（図-4）。

(6) 点検・補修・更新過程のシミュレーション

a) シミュレーション条件の設定

費用-リスク曲線から最適な点検・補修・更新政策を抽出した結果と、ワイブル劣化ハザードモデルをもとに、施設の劣化・補修過程のシミュレーションを行い、各期の補修需要の予測、必要予算、予算制約による健全度への影響を分析する。シミュレーションの条件として、シミュレーション期間（年）、年間予算の制約条件、モンテカルロ法により擬似乱数を発生させる回数などを設定する（図-5）。

b) シミュレーションモジュールの出力

シミュレーションの結果は、経年的な1) 健全度の推移、2) 各期の費用推移、3) 補修直前の健全度推移、4) 各期の補修需要数量、5) 予算不足によって補修が繰越される数量について、グループ全体の合計の期待値とトンネル別の期待値を同時に出力する。1) 健全度の推移、2) 各期の費用推移、3) 補修直前の健全度推移については、計算結果の一覧表とグラフ表示によって表現し、4) 各期の補修需要数量、5) 予算不足については、一覧表によって表示する。

c) 単一トンネルを対象としたシミュレーションモデル

戦術レベルでは、単一トンネルについての点検・補修・更新政策を決定しリスク値を管理する必要がある。このとき、逐次更新ルールを採用した場合、トンネル内の施設の健全度分布や使用年数の分布によって、補修・更新需要がある一定時期に集中し、必ずしも常に費用-リスク曲線をもとに決定した定常政策におけるリスク管理基準値を満足するとは限らない。このため、補修・更新需要が集中する場合は、補修・更新を前倒しすることによって、費用とリスクの平滑化を図るような政策を導入することとした。

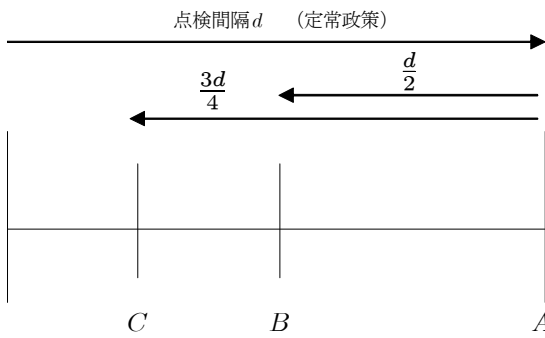


図-6 点検前倒し政策の考え方

補修・更新を前倒しするためには、本来の定期点検時点以外の時点において、追加的な点検を実施することが必要となる。本研究では、このような政策を点検の前倒し政策と称している。前倒し政策の基本的な考え方を以下に示す。

- ・ 定常政策で決定した管理基準値を超えないように、追加政策を設定する。
- ・ 追加政策については、補修政策は変更せず、点検間隔を狭めることによる前倒し補修・更新を実施する。
- ・ 点検間隔を定常政策よりも広くすることはしない。

さらに、点検のタイミングの前倒しを行う基本ルールは、以下のとおりとする（図-6を参照）。

- ・ 定常政策によって決定された点検間隔にしたがって、時点 A で点検を行った場合に、その時点でのリスク値の期待値を計算する。
- ・ 時点 A でのリスクが管理基準値を超える場合は、点検間隔を小さくして、時点 B で点検を行った場合のリスク値の期待値を計算する。
- ・ さらに同様に管理基準値を超える場合は、さらに、時点 C まで戻る。

以上のルールをもとに、戦術レベルにおける劣化・点検・補修・更新過程のシミュレーションを行う。シミュレーションにより、リスク管理水準がある一定値を超えた場合、追加的な点検を実施し、補修・更新の前倒し政策を採用する。

5. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案した道路付帯施設マネジメントシステムを、高速自動車道路における付帯施設管理業務に適用する。高速自動車道路における施設管理問題は、数多くの種類の施設で構成される。その中で、本稿ではトンネル照明灯

表-1 劣化ランク評価基準

点検結果	健全度	物理的な意味
OK	1	損傷なし
B	2	損傷はあるが、機能低下が見られないので損傷の進行状態を観察する
A	3	損傷があり機能低下が見られ補修が必要であるが緊急補修を要しない場合
AA	4	損傷が著しく機能的に緊急補修の必要のある場合
	5	更新が必要な場合

表-2 ハザードモデルの推定結果

健全度	α_i	β_{i0}	β_{i1}	$E[\theta_i]$
1	2.039	0.548	-0.323	0.367
(t 値)	(477.54)	(6.14)	(-3.49)	-
2	1.623	0.0812	-	0.0812
(t 値)	(469.92)	(32.90)	-	-
3	5.709	0.000011	-	0.000011
(t 値)	(1486.69)	(15.10)	-	-
初期尤度	-811,804.79			
尤度	-7,041.67			
尤度比	0.991			

表-3 補修工法と費用パラメータ

健全度	種類 (工法)	回復水準	繰返制限
B	錆除去・防錆剤	OK	1
A	錆除去・防錆剤	B	1
AA	落下防止対策	A	1
AA	更新	OK	-

具を対象としたマネジメント問題に着目しよう。適用事例で対象とするトンネル照明灯具は、その材質として鋼板とステンレス鋼板(SUS)の2種類が存在する。SUS を利用した照明灯具は、導入されてから日も浅く、十分な点検データが蓄積されていないことから、本実証分析では、鋼板を対象とした分析を行う。なお、SUS のように十分な点検データが蓄積されていないケースにおいても、式(21)により、期待健全度寿命長をインプットすることで、劣化予測モデルを特定し、分析を行うことも可能であることを断っておく。照明灯具の健全度は、表-1に示すように、OK, B, A, AA の4段階のレーティングによって評価されている。本研究の適用事例で用いる健全度との対応関係を、表-1のように設定する。また、多段階ワイブル劣化ハザードモデルの推定結果を、表-2に示している¹⁴⁾。本実証実験では、ワイブル劣化ハザードモデルのパラメータを平均化操作した値 $E(\theta_i)$ を用いることとする。また、適用した補修工法を表-3に示している。

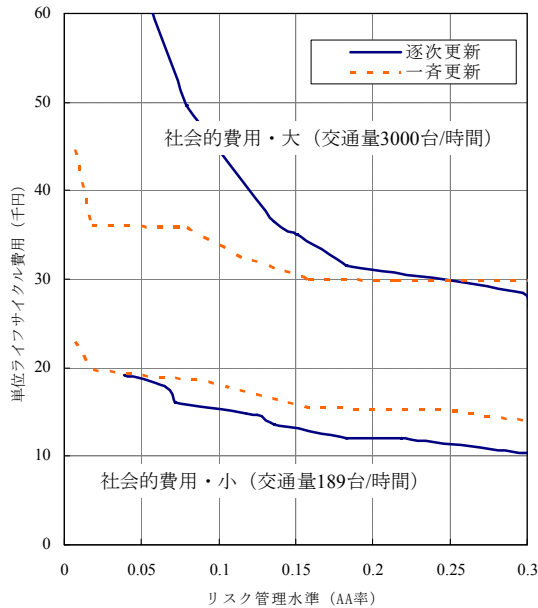


図-7 費用-リスク曲線

表-4 最適点検・補修・更新政策(リスク管理水準 0.08)

点検間隔		1年
補修政策	健全度B	錆除去・防錆剤
	健全度A	錆除去・防錆剤
	健全度AA	更新
更新政策		逐次更新

(2) 点検・補修・更新政策の導出

東北自動車道路の十和田事務所管内亀田山トンネル(上り線, 走行車線側)の照明灯具を適用事例として分析を行った。当該トンネル内の照明灯具数は 276 個, トンネル延長は約 3.0km である。さらに, ライフサイクル評価を行う際に, 点検・補修・更新時の規制による社会的費用を算出している。点検時の規制時間はトンネル延長により区分されるのに対して, 補修・更新時の規制時間は, それぞれ補修・更新の対象となる施設数によって決定される。また, 更新の際の規制時間は, 一斉更新と逐次更新では基準が異なっている。一斉更新の場合は, あらかじめ更新対象となる施設数を見積もることによって, 多くの作業人員によって一斉に更新作業を実施することで規制時間を短縮することが可能となる。社会的費用 s の算出にあたっては, 東北支社が採用している社会的費用算出モデル

$$s = \begin{cases} BT & \text{一方通行の場合} \\ BT + BR & \text{対面通行の場合} \end{cases} \quad (23)$$

$$BT = T \left(\sum_j Q_j L / V_s \gamma_j - \sum_j Q_j L / V \gamma_j \right) \quad (24)$$

$$BR = T \left(\sum_j Q_j L'' \psi_j - \sum_j Q_j L' \psi_j \right)$$

を用いた。ただし, Q_j は車種 j の交通量(台/時間), L はトンネル延長(規制区間延長)(km), L', L'' は, それぞれ当該トンネルを含むインターチェンジ間の距離及び規制時の一般部迂回路距離(km), V, V_s は, それぞれ通常時及び規制時の走行速度(km/時), γ_j は, 車種 j の時間価値原単位(円/分・台), ψ_j は, 車種 j の走行経費原単位(円/台・km)である。

亀田山トンネル内の影響交通量 189 台/時間を考慮して, 当該トンネル内の照明灯具に関する費用-リスク分析を行った結果を, 図-7 に示している。また同図には異なる交通量(3,000 台/時間)を有する路線において社会的費用の影響により更新政策が変化するケースを併記している。費用-リスク曲線はある管理水準を達成するときの補修政策の組み合わせすべてがプロットされ, その中から最適補修政策としてあるリスク管理水準値を所与としたときに, ライフサイクル費用を最小にする政策が1点選択される。図-7 には最適補修戦略の結果のみを記載している。本ケースにおいて, リスク管理水準 0.08 に設定した場合の, 最適点検・補修・更新政策を, 表-4 に示している。

(3) 点検・補修・更新過程のシミュレーション

次に, 亀田山トンネルの照明灯具について, 点検・補修・更新過程のシミュレーションを行い, 費用の推移と健全度分布の推移を分析する。亀田山トンネル内照明灯具 276 個は, 設置されてから 16 年が経過しており, そのほとんどが AA, または一度 AA が判定されて落下防止対策を施して A の状態に回復している照明灯具群で構成されている。現行の更新政策として一斉更新が採用されており, 前回の更新から供用年が経過し, 次回の更新時期が迫っている。このような状態から, 更新政策を変更する場合の判断にはライフサイクル費用評価だけではなく, 経営的な判断に委ねられる場合も多い。本研究のシミュレーション分析の条件として, 亀田山トンネル内の照明灯具が一斉更新されてすべての灯具の健全度が OK, 使用年数が 0 にリセットされた状態を初期条件として与えるものとする。一斉更新後は, 費用-リスク分析の結果をうけて, 照明灯具の更新政策として, 劣化した灯具を個別に更新するような, 逐次更新政策を採用するものとする。シミュレーション期間を 50 年, シミュレーション回数を 500 回と設定した。シミュレーション回数は任意に設定できるが, 試行の結果,

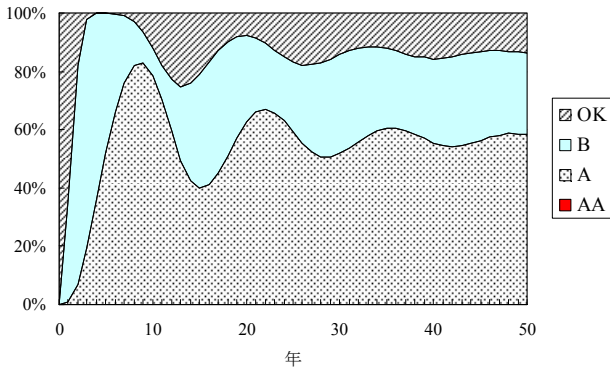


図-8 健全度推移(補修後の状態)

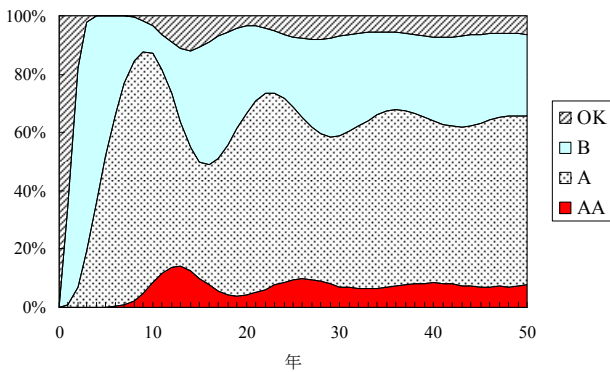


図-9 健全度推移(補修前の状態)

シミュレーション回数を 500 回程度で安定した結果が得られている。

図-8に経年的健全度分布の補修直後の状態を示している。健全度Aが占める割合が多くなっている。さらに、劣化確率が時間に依存するようなワイブル劣化ハザード関数を採用していることから、本ケースのようにシミュレーションの初期条件にすべての照明灯具の供用年数が同じ場合には、次の更新時期がある一定期間に集中する傾向があることが本図より読み取ることができる。

一方、図-9には、経年的健全度分布の補修直前の状態を示している。定常政策においては、リスク管理水準が8%と設定されている。しかし、図-9の結果に示されているように、経過年数10年から30年にかけて、リスク管理水準を一時的に上回る結果となっている。これは、逐次更新政策を適用した場合の更新需要が集中しているが原因となっている。施設を管理する現場業務においては、限られた予算内において、施設のリスク水準をある一定レベル以下に抑えることが要求される。このため、補修需要が集中する場合においては、追加的な点検を実施することにより、リスク管理水準を超えないような戦術に関する情報が必要となる。この場合、4.(5)c)で説明したように、点検前倒し政策を適用することにより、更新需要の平滑化を行うことができる。その結果、政策変更後のリスク値の推移

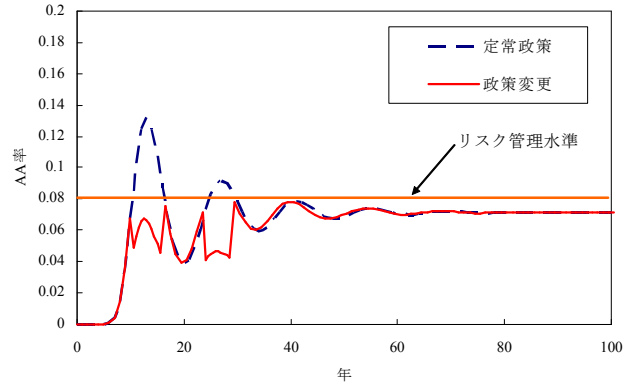


図-10 リスク値の推移比較

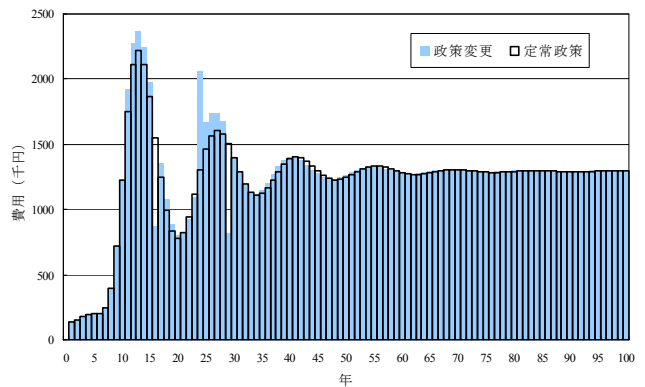


図-11 費用推移の比較

を比較したものを、図-10に示している。定常政策で決定されたリスク管理水準は0.08である。定常政策を採用した場合、供用開始から約15年付近及び25年付近で0.08を大きく上回っている。一方で、点検前倒し政策を適用した場合、リスク管理基準値0.08を上回ることはいない。また、政策を変更した場合の費用推移を、政策変更前の費用推移と比較した結果を、図-11に示す。実線で囲んだ部分は、定常政策に従った場合の費用推移を示す。一方、塗りつぶした部分が点検前倒し政策を適用した場合の費用推移を示している。政策を変更した場合に、費用が前倒しに計上されていることが読み取れる。

本ケースでは、表-4に示したように、最適点検間隔は1年である。しかし、点検前倒し政策を適用した場合には、経過年数10年から16年の間において、例外的に0.5年間隔の点検が必要となる。以上の分析により、施設を管理する現場業務において、更新需要が一時的に集中する場合にリスク管理水準を超越する可能性がある場合に、本システムを用いて追加的な点検の実施を判断するための情報を提供することができることが明らかとなった。

今回の実証分析での結果は、トンネル照明灯具システムの管理業務のうち、ある一部分に焦点を絞った結果を示しているが、実際には管理対象となる多くのトンネル内

の、様々な異なる条件を考慮したシミュレーション実験を行うことが必要となる。この場合においても、本システムでは予算制約や最適政策等を変更しシミュレーション実験を繰り返し実行することにより、政策変更の影響を分析することが可能である。

6. おわりに

本研究では、統計的劣化予測モデルを用いて、多くの施設を同時に管理する際の、ライフサイクル費用とリスク管理水準の関係を分析し、長期的な予算計画と補修計画を立案するような、アセットマネジメントシステムを提案した。さらに、道路付帯施設のトンネル照明灯具の管理業務を対象として、Fasys-AM アプリケーションを開発し、その有用性を実証的に分析した。実証分析の結果、本アプリケーションが現場の実務において道路付帯施設のマネジメントから上位の予算計画に至るまでに非常な有用なツールになり得ることが明らかとなった。

今後は、本システムの適用範囲を拡大するために、より実用的なアプリケーションを目指したシステム改良が必要である。そのためには、以下に示すようないくつかの研究課題が残されている。第1に、土木施設は数多くの要素によって構成されるような複雑な構造体を有しているものが多い。例えば消化施設等は複数の部品、構造系と機能系にそれぞれが分類されている。このような土木施設を取り扱う場合、個々の施設間や要素間の劣化・補修の関係を無視できないケースも少なくない。このように、複数の要素の補修のタイミングを互いに調整するようなマイクロ補修同期化政策を求める手法論の開発が必要である。第2に、本研究で提案した最適補修政策を求める手法は、ライフサイクル費用とリスク管理基準との関係を定量的に評価し、所与のリスク管理基準を達成するときにライフサイクル費用を最小にする政策を求める問題である。ここで定義しているリスク管理基準は、管理対象の施設全体に対する劣化確率を示しているものである。これらは補修政策に対してその結果を「アウトプット」として規定しているものである。管理者は最適リスク管理水準を決定するためには、アウトプットとしての劣化確率が、利用者に対する影響・成果を「アウトカム」として表現しなければならない。利用者に対する説明責任を果たすためには、アウトプットとアウトカムの関係を明らかにするようなロジックモデルの開発が必要である。第3に、本研究で提案したアプリケーションを実業務において運用する場合には、現状業務を分析し、システムからのアウトプット情報を評価する手法を確立する必要がある。予算計画や最適点検・補修・更新計画は将来時点における劣化予測をもとに算出しているものである。土木施設の劣化過程は不確実性を伴うものであり、マネジメントサイクルを継続することにより持続的にシステムを改良していくようなロジックが必要となる。例えば、あらたな点

検データが取得された場合に、ベイズ理論に基づいた劣化予測モデルの更新などの考え方を導入することが考えられる。さらには、予測結果と実際の差異についての評価手法と計画の見直し方法について確立する必要がある。

参考文献

- 1) 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明, 山本秀夫: 階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発, 土木学会論文集, No.644/IV-46, pp.67-86, 2000.
- 2) 西川和廣: 道路橋の寿命と維持管理, 土木学会論文集, Vol.501/I-29, pp.1-10, 1994.
- 3) 山口亮太, 伊藤裕一, 三木千壽, 市川篤司: 社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み, 構造工学論文集, Vol.47A, pp. 983-989, 2001.
- 4) 貝戸清之, 阿部允, 公門和樹, 藤野陽三: ストック効果を考慮したトータルコスト最小化に基づく橋梁マネジメント, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.991-998, 2001.
- 5) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 6) 保田敬一, 小林潔司: BMSにおける点検結果と状態推移確率がLCCに及ぼす影響, 建設マネジメント論文集, Vol.11, pp.111-122, 2004.
- 7) 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, 土木学会土木情報利用技術論文集, Vol. 14, pp199-210, 2005.
- 8) 原田隆郎, 呉智深, 吉田典史, 岩松幸雄: ニューラルネットワークによる道路舗装の補修計画最適化モデル, 土木学会論文集, No.700/VI-54, pp.145-157, 2003.
- 9) 斎藤雅道, 福田正: 予算制約のあいまいさを考慮したアスファルト舗装の修繕計画, 土木学会論文集, No.571/V-36, pp.159-167, 1997.
- 10) 大塚勝, 武山泰, 福田正: 路面状態量をネットワークとした舗装修繕計画の最適化, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.155-161, 1996.
- 11) 孔永健, 福田正: 年度予算の制約がある場合のネットワークレベル舗装修繕計画, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.167-171, 1996.
- 12) 慈道充, 江尻良, 織田澤利守, 小林潔司: 道路舗装管理会計システムアプリケーション, 土木学会土木情報利用技術論文集, Vol. 13, pp125-134, 2004.
- 13) 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・補修モデル, 土木学会論文集F, Vol. 62, No. 2, pp240-257, 2006.
- 14) 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.

(2006.5.19受付)