

I-19 劣化ハザード率を用いた学習機能を有する舗装マネジメントシステム

Pavement Management System Having Learning Ability by Deterioration Hazard Rates

小田宏一¹・児玉英二²・青木一也³・貝戸清之⁴・小林潔司⁵

Koichi ODA, Eiji KODAMA, Kazuya AOKI, Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

抄録：本研究では、道路舗装の劣化速度の相対評価を表現した劣化ハザード率や、舗装の維持管理業務で生成される履歴情報を統合し、それらの情報を有効活用することにより合理的な意思決定を支援するための舗装マネジメントシステムを提案する。道路舗装の維持管理では、路面の損傷状況に応じた管理水準を設定し、補修の有無を判断する必要がある。しかしながら、路面の損傷度に関する情報のみでは、舗装の長寿命化のための補修工法を適切に選定することは難しい。本研究では、舗装の劣化速度の相対評価を行い劣化速度が異常な舗装区間を抽出するとともに、過去の補修情報や調査結果、劣化ハザード率を用いて補修工法や補修の優先順位、追加的調査の必要性を検討するための情報を提供する舗装マネジメントシステムを提案する。適用事例では、本研究で開発した舗装マネジメントシステムを、京都市の幹線道路の舗装管理業務へ適用しシステムの有用性を考察する。

Abstract: This paper proposes a Pavement Management System to support an optimal decision making by integrating and using effectively the information generated for the comparative evaluation of the deterioration hazard rates and also for the archived data about pavement maintenance works. In the case of pavement maintenance, it is necessary to judge the optimal repair timing and pavement repair methods. However, by the limited information on road surface damage, it is difficult to decide the optimal repair methods contributing to the extension of pavement's lives. The study proposes the Pavement Management System to examine the repair methods, the repair priority and the necessity of additional investigation by extracting the pavement sections where the deterioration speeds are relatively quicker compared with the standard seeds of the pavement deterioration, and using the archived data such as inspection data and repair records. Finally, the practical availability was investigated by a case study dealing with the pavement management works of arterial road networks of the Kyoto City.

キーワード：舗装, アセットマネジメント, 劣化ハザード率, 学習機能, ナレッジデータ

Keywords : pavement, asset management, deterioration hazard rate, learning ability, knowledge data

1. はじめに

近年、土木施設の合理的な維持管理のためのアセットマネジメントの考え方が浸透し、数多くの研究成果や実務での適用事例が報告されている。また、維持管理業務での合理的な意思決定を行うための有用な情報を管理、提供するためのマネジメントシステムが開発されている。このように、アセットマネジメントへの取り組みが浸透した背景に、施設の劣化に関する点検データの蓄積が進んだことを要因として挙げることができよう。点検によって施設の損傷状態を把握することで、現在時点の損傷に対する補修需要を正確に見積

もることができる。また、蓄積されたデータを用いて劣化予測モデルを構築し、将来時点における補修需要を予測することも可能となる。さらには、施設の供用条件や重要性等に関する情報と劣化情報を統合し、補修の優先度を設定した補修計画を立案することで、計画的な補修実施に必要な情報を得ることが可能となる。このように、アセットマネジメントを実行するための初期段階における要素技術やそれらを統合したマネジメントシステムについては、充分、実用段階に達していると言える。

アセットマネジメントの考え方に従って日々の維持管理業務を実施することにより、点検や補修情報等の

-
- 1 : 正会員 工修 京都市建設局土木管理部調整管理課
(〒604-8571 京都市中京区寺町通御池上上本能寺前町 488, Tel:075-222-3568, E-mail:odacg020[at]city.kyoto.jp)
 - 2 : 非会員 京都市建設局土木管理部調整管理課 (〒604-8571 京都市中京区寺町通御池上上本能寺前町 488)
 - 3 : 正会員 博(工) 株式会社パスコ研究開発センター (〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-11)
 - 4 : 正会員 博(工) 大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
 - 5 : フェロー会員 工博 京都大学経営管理大学院 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

新たな履歴データを獲得することができる。土木施設の維持管理業務は、毎年実施される業務のサイクルによって構成される。次に実行する維持管理業務は、過去の維持管理業務の履歴とは無関係ではなく、蓄積された情報をもとに、日々の維持管理業務の品質を向上させる取り組みが重要となる。アセットマネジメントの本来の目的である土木施設の長寿命化とコスト縮減を確実に達成するためには、日常管理業務によって生成される情報をもとに、アセットマネジメント戦略を更新するような、学習機能を有するマネジメントシステムの開発が必要となる。

このような問題意識のもと、本研究では、道路舗装の維持管理業務に着目し、舗装の点検結果や補修情報等を統合管理し、道路舗装のアセットマネジメントにおける意思決定の各場面に有用な様々な情報を導出するための舗装マネジメントシステムを開発する。本システムは、舗装の調査データや補修情報を統合した維持管理データを用いて推計した劣化速度の相対評価指標である劣化ハザード率を用いて、劣化速度が著しい特異区間を抽出し、戦略的に対策を実施すべき舗装区間を明示的に示す。また、舗装の現在の劣化状態のみならず、将来時点における劣化リスクを示した劣化ハザード率、過去の補修履歴情報等を用いて、補修実施の際の最適な補修工法選定のための追加的調査の必要性を検討する情報を提供する。このように、本研究では、道路舗装の維持管理業務にて生成される各種情報を管理し、それらの情報を用いて過去の舗装劣化のパフォーマンスを評価するとともに、その結果を次の維持管理業務に活用するような、学習機能を有する舗装アセットマネジメントシステムを提案する。以下、**2.**にて本研究の基本的な考え方、**3.**にて、道路舗装の劣化予測モデルの概略を説明する。さらに、**4.**にて、本研究で提案する舗装マネジメントシステムの全体概要を示し、**5.**にて、京都市の幹線道路の舗装維持管理業務を対象として、本研究で開発した舗装マネジメントシステムの適用結果を示す。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要と本研究の視点

土木施設のアセットマネジメントシステムの開発は、橋梁や舗装の分野にて先進的に研究が実施されてきた。橋梁マネジメントシステムは、構造物の劣化状態の将来予測やライフサイクル費用分析等により、長期的な視野において維持管理の効率性、合理性を追求するためのシステムとして開発されている¹⁾⁻³⁾。宮本らは、橋梁部材の点検結果をもとにして、最適補修・補強時期、補修工法、ライフサイクルコスト等を導出するシ

ステムを開発している¹⁾。青森県では、県が管理する延長 15m 以上の橋梁を対象として、今後 50 年間における橋梁の維持補修費用を平準化させるとともに、橋梁個々のライフサイクル費用を最小化するための補修時期と補修工法を選定するシステムを開発している³⁾。また、米国にて 1991 年に開発された橋梁マネジメントシステム「PONTIS」⁴⁾⁻⁵⁾は、劣化予測モデルとして橋梁部材の劣化過程の不確実性を考慮したマルコフ推移確率行列を採用し、最適な維持・補修・更新戦略を策定するための情報を提供する。

一方、道路舗装を対象としたマネジメントシステム（PMS : Pavement Management System）についても研究が進められてきた。PMS の開発は、1970 年代より米国にて積極的に実施された⁶⁾。米国で開発された PMS は舗装に係わるすべての行為を、データバンクを軸として有機的に結合して体系づけるものとして構成されている。現在、舗装マネジメントシステムとして世界のユーザに広く公開されているものとして、世界銀行により開発された HDM（Highway Design and Maintenance Standards Model）が存在する⁷⁾。最新バージョンは、HDM-4 として、主に途上国における道路開発と維持管理計画の支援システムとして利用されている。一方、わが国においても PMS に関する研究が積極的に実施されてきた。例えば、慈道らは、自治体が管理する道路舗装を対象として、舗装の状態を長期的に維持するために必要な補修費用を算出するとともに、それらの維持管理情報と会計情報を有機的に結合した舗装管理会計システムを開発している⁸⁾。

本研究で提案する舗装マネジメントシステムは、道路舗装に関する過去の維持管理データを用いて推計した舗装区間の劣化ハザード率を用いた合理的な意思決定を支援することを目的としている。この劣化ハザード率の推計に関する研究についても一連の研究成果が報告されている⁹⁾⁻¹¹⁾。津田らは、橋梁部材の目視検査データを用いて、劣化過程をハザードモデルにより表現し、マルコフ推移確率行列を推計するための手法を開発した⁹⁾。また、小林らは、津田らの研究を応用し、道路舗装を対象として、補修の影響による点検サンプルの欠損によって発生する推計バイアスを除去し、道路舗装の劣化予測モデルをマルコフ推移確率行列で表現するための方法を開発した¹⁰⁾。これらの劣化予測モデルの推計に関する研究は、管理対象施設全体の平均的な劣化傾向を把握することを目的としている。小濱らは、これら劣化予測モデルの研究をうけ、施設個々の劣化速度を、平均的な劣化曲線からの乖離度として定義し、平均的な劣化速度を示すハザード率と、施設個々の劣化速度の異質性を示すパラメータを同時に推計する混合ハザードモデルを開発した¹¹⁾。これらの研究により、施設個々の劣化ハザード率を相対的に評価

することができ、施設の将来的な劣化リスクを考慮した戦略的な維持管理計画を立案することが可能となった。本研究では、これら劣化予測モデルに関する研究成果を活用し、道路舗装の平均的な劣化曲線と舗装区間個々の劣化ハザード率の推計結果を用いて、舗装区間の劣化リスクを考慮した舗装補修の意思決定を行うための情報を導出するシステムを提案する。

アセットマネジメントシステムに関する従来の研究では、最適補修戦略の導出やライフサイクル費用分析等の個々の要素技術を搭載したシステムは数多く発表されているが、施設の劣化過程の不確実性を劣化リスクと捉え、アセットマネジメントのPDCAサイクルにて劣化リスクを順次改善していくための意思決定を支援するようなマネジメントシステムに関する研究は見当たらない。本研究は、劣化予測モデルによって獲得できる情報が、将来時点における補修需要を予測することのほか、補修や調査の優先度を決定するために有用であることに着目する。すなわち、劣化ハザード率を用いて、舗装区間の劣化速度を表現する。劣化ハザード率の相対評価により、劣化速度が速い箇所に対して工学的な対処方法を試行する。その後も、劣化過程を継続的に観測することにより、劣化予測モデルを更新するとともに、劣化速度が改善された効果を確認する。効果が確認されれば、新しい対処方法を本格的に採用する。このように、劣化ハザード率を用いた維持管理業務の成果は、劣化予測モデルを再推計することにより「学習」され、次の意思決定に反映される。劣化予測モデルによって補修や調査の意思決定を行い、その結果をさらに劣化予測モデルにより検証するようなマネジメントシステム及び劣化予測モデルの情報利用の方法に本研究の新規性が存在する。

なお、施設の劣化過程の不確実性を考慮したマルコフ推移確率行列により表現した劣化予測モデルを用いて、最適補修モデルやライフサイクル費用評価を行うための方法論を開発した研究^{12)・13)}や、それらの機能を搭載したマネジメントシステムに関する研究も報告されている^{14)・15)}。本研究では、これら既存研究で開発されたマネジメントシステムの機能を踏襲しつつ、道路舗装の維持管理業務に着目し、劣化ハザード率を用いて継続的に学習する舗装マネジメントシステムの開発を試みた。

(2) 舗装維持管理業務の課題

道路舗装の維持管理業務では、路面の損傷状態を把握し、劣化が進行した舗装区間については切削オーバーレイや打換え等による補修を実施する。膨大な延長に及ぶ道路を管理する場合では、複数の補修候補箇所に対して優先順位を設け補修を実施する箇所を選定する必要がある。また、長期的に舗装の状態を維持する

ために必要な補修事業費を確保し、合理的な舗装維持管理業務を実行し、ライフサイクル費用の低減、舗装の長寿命化を実現させることが求められる。

舗装路面の損傷状況を把握するためには、定期的な調査が実施される。現在では、路面性状自動測定車を用いた調査が一般的であり、路面の損傷である、1) ひび割れ、2) わだち掘れ、3) 平坦性の各指標を定量的に把握することができる。しかし、路面の劣化状況のみでは最適な補修工法の選択は難しく、路面下の舗装構造の健全度を評価する必要がある。舗装構造の健全度を評価する手法として、例えば、FWD (Falling Weight Deflectometer) によるたわみ量測定調査等は、舗装の材料強度や構造的強度を評価する非破壊検査である。仮にすべての舗装の路面の損傷と構造の健全度を把握することができれば、高い精度での補修計画が立案できよう。しかし、膨大な舗装延長を同時に管理している維持管理の現場では、すべての舗装構造の健全度を調査することは現実的に不可能である。このため、舗装の劣化傾向や過去の補修データ等から、補修や調査の優先度を決定するための情報利用が必要となる。このような舗装維持管理業務の課題に対して、本研究では、舗装区間の劣化ハザード率の相対評価を用いて、補修及び調査の優先度決定のための有用な情報を導出するマネジメントシステムを提案する。

(3) 劣化ハザード率を用いたマネジメントシステム

アセットマネジメントにおいて、将来の補修需要を予測するためのインプット情報として劣化予測モデルの開発が重要視される。劣化予測モデルは、そのモデルの構築方法によっていくつかの種類に分類されるが、実際の維持管理の現場において観測される劣化には多くの不確実性が含まれていることから、点検データや補修履歴データ等から過去の劣化パフォーマンスを再現した統計的劣化予測モデルを用いるのが一般的である。点検データを用いた統計的劣化予測モデルの推計方法については、既に研究成果が報告されている^{9)・11)}。統計的劣化予測モデルは、実際の点検データや補修データをもとに劣化のパフォーマンスカーブを作成するものであり、その推計結果は、将来時点における劣化状態を予測するための情報のほか、過去の劣化状況を再現しているものに他ならない。言い換えれば、統計的劣化予測モデルは、当該道路に関する過去の維持管理業務の実績を定量的に評価した結果と捉えることができる。さらに、舗装区間個々の劣化速度の異質性を評価した劣化ハザード率¹¹⁾を用いることにより、劣化速度を相対的に比較することが可能であり、将来時点の劣化リスクについて舗装区間別に評価することができる。この劣化ハザード率を舗装マネジメントシステムで利用することにより、補修の優先順位や舗装構造

の健全度調査の実施箇所を合理的に決定するための有用な情報を提供することが可能となる。路面の損傷の調査結果から、現時点において同一の損傷度をもつ舗装区間であっても、劣化ハザード率が高い舗装区間の補修を優先することで、劣化リスクを抑えることが期待できる。また、劣化速度が著しい舗装区間を劣化ハザード率により抽出することで、路面だけでなく舗装構造の劣化を想定することができ、優先的に構造調査等の追加的調査を実施する区間を選定することができる。このように、本研究では、劣化ハザード率を用いて舗装維持管理業務における合理的な意思決定を支援するための舗装マネジメントシステムを開発する。次に3.において、本研究で提案する学習機能を有する舗装マネジメントシステムにおける舗装データ及び劣化ハザード率を推計するために必要なデータの管理方法と、劣化ハザード率の推計方法について説明する。

3. 道路舗装の劣化予測モデル

(1) 調査データの管理方法

劣化予測モデルを推計するためには、施設個々の劣化に関する時系列データの整理が必要である。道路舗装の場合、施設が連続したネットワークを形成しているため、あらかじめ評価単位を設定しておく必要がある。評価単位の設定方法にはいくつかの考え方が存在し、例えば、HDM-4等は、道路の幾何構造や舗装構造等の条件が同一な区間（homogeneous section）を評価単位としている⁷⁾。一方、わが国では、長年に亘り路面性状調査が実施され、その調査データが蓄積されている。路面性状調査は、その調査単位が100mとされており、100m毎の路面の損傷データが蓄積されている。過去の調査データの有効活用の観点から、わが国のPMSの評価単位も100mを基本とする場合が多い⁸⁾。

本研究で開発する舗装マネジメントシステムでは、舗装の基本評価単位を100mに設定する。ただし、交差点や橋梁、トンネル等の構造物が存在する地点で区間を再分割し、その場合の区間延長は100mより短くなる。このように、舗装マネジメントシステムで取り扱う道路ネットワーク全体を、過去の調査データの評価単位等を参照して、あらかじめ評価区間を固定する。固定した評価区間に従ってネットワークデータを作成し、GISデータ（Shape形式）に格納する。今後新たな調査が実施される際には、ここで設定した舗装区間に従って現地踏査を行い、その調査結果をGISデータへ格納する。また、補修履歴データも同様にGISデータにリンクしてその情報を格納する。このようにして舗装データベースを構築することで、舗装区間個々の正確な時系列データを管理することが可能となる。

(2) 劣化予測モデル及び劣化ハザード率の概要

舗装の劣化予測モデル及び劣化予測モデルの相対評価により得られる劣化ハザード率について簡単に説明する。なお、推計方法等の詳細については参考文献を参照していただきたい^{9)~11)}。

マルコフ推移確率は、マルコフ劣化モデルを用いて推定できる。まず、複数ある舗装の損傷の一つに着目し、その損傷度を離散的な健全度レーティングで定義する。いま、ある時刻において、レーティング $i(i=1, \dots, I-1)$ が観測された舗装区間について、その時点から時間 y_i が経過した時刻においてレーティングが $i+1$ に変化する確率密度関数を、ハザード関数 $\theta_i(y_i)$ を用いて表現する。ハザード関数が経過時間 y_i に依存せず、常に一定値 $\theta_i > 0(i=1, \dots, I-1)$ をとる場合、指数ハザード関数

$$\theta_i(y_i) = \theta_i \quad (1)$$

が成立する。指数ハザード関数を用いることにより、劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現できる。さらに、このハザード関数を用いてマルコフ推移確率を定義する。

指数ハザード関数を用いて、時間間隔 z の間でレーティングが i から $j(>i)$ に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z)$ ($i=1, \dots, I-1; j=i, \dots, I$)は、

$$\pi_{ij}(z) = \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} \exp(-\theta_m z) \quad (2)$$

($i=1, \dots, I-1; j=i+1, \dots, I$)

と表すことができる。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\theta_s}{\theta_s - \theta_m} = 1 & (m=i \text{ の時}) \\ \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\theta_s}{\theta_{s+1} - \theta_m} = 1 & (m=j \text{ の時}) \end{cases}$$

が成立している。指数ハザードモデルの未知パラメータ θ_i は、観測可能な説明変数と未知パラメータの組み合わせにより、

$$\theta_i = \mathbf{x}\beta'_i \quad (3)$$

として表現される。ここに、 $\mathbf{x}$ を説明変数による特性ベクトル、 $\beta_i = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,M})$ は未知パラメータ $\beta_{i,m}$ ($m=1, \dots, M$)による行ベクトルである。これにより、レーティング別に劣化速度の違いを表現することが可能である。

次に、劣化速度の相対評価のための舗装区間個々の劣化ハザード率を表現する、混合マルコフ劣化モデルの推計によって導出される劣化速度の相対評価である劣化ハザード率について説明する。分析対象とする舗装区間を K 個のグループに分割する。さらに、グループ k ($k = 1, \dots, K$) には、合計 L_k 個の舗装区間が存在すると仮定する。グループ k ($k = 1, \dots, K$) に固有なハザード率の変動特性を表すパラメータ（以下、異質性パラメータと呼ぶ） ϵ^k を導入する。この時、グループ k の要素 l_k ($l_k = 1, \dots, L_k$) のレーティング i ($i = 1, \dots, I-1$) のハザード率を、混合指数ハザード関数

$$\theta_i^{l_k} = \tilde{\theta}_i^{l_k} \epsilon^k \quad (4)$$

を用いて表す。ここに、 $\tilde{\theta}_i^{l_k}$ はグループ k の要素 l_k が有するレーティング i の平均的ハザード率（以下、標準ハザード率と呼ぶ）である。異質性パラメータ ϵ^k は、グループ k の標準ハザード率 $\tilde{\theta}_i^{l_k}$ からの乖離の程度を表す確率変数であり、 $\epsilon^k \geq 0$ が成立すると仮定する。異質性パラメータ ϵ^k の値が大きくなるほど、当該グループ k に含まれるすべての施設の劣化速度が、標準ハザード率に対して速いことを表す。

ハザード関数 θ_i によって、交通量や道路特性等の観測可能な劣化要因別の平均的な劣化速度を表現することが可能である。一方、舗装の劣化過程は観測不可能な要因による不確実性を多く含んでいる。そのような劣化過程の異質性については、混合マルコフ劣化モデルによって導出されるパラメータ ϵ^k によって表現することが可能である。

4. 舗装マネジメントシステムの構築

(1) アプリケーション概要

図-1 に本研究で提案する舗装マネジメントシステムの全体構成を示している。本システムは、幹線道路モードと生活道路モードに大きく分割される。本論文では幹線道路の維持管理業務を対象としており、生活道路モードの機能については別の機会に発表したい。幹線道路モードは、さらに、①舗装データ管理機能、②マネジメント機能、③マスタ管理機能に区分される。また、舗装管理に係わる各種情報は、舗装データベースに格納している。

なお、本システムのユーザインターフェースは GIS を基本としており、GIS アプリケーションには、ArcGIS Ver. 9.3 (©ESRI)、開発環境として、Visual Studio .NET 2005 (©Microsoft) を用いている。

(2) システム機能

次に、幹線道路モードにおける主要な機能について

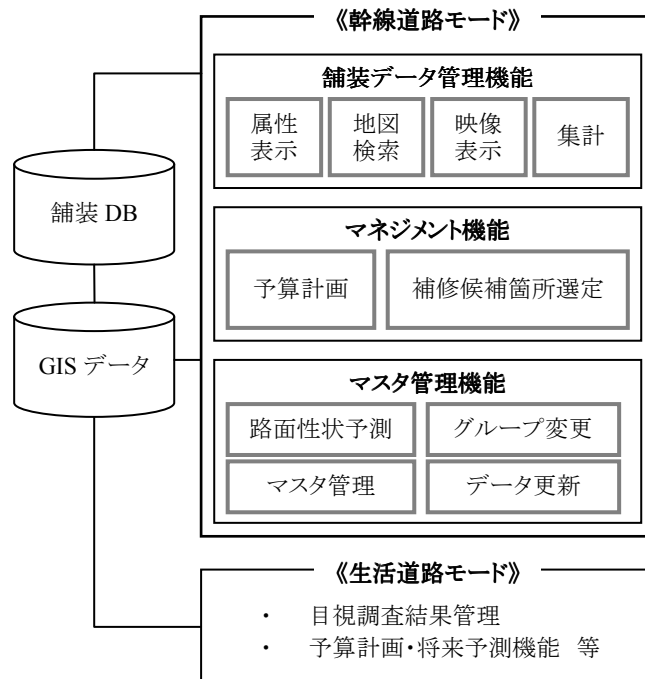


図-1 アプリケーション全体構成

属性情報				
路線名： 京都環状線				
距離標： 4.0332 ～ 4.0427 上り				
住所： 北区紫野西御所田町				
詳細				
項目	現況	最新	2回前	3回前
路面性状				
100m評価	年月日	2010/03/31	2007/03/01	
舗装現況	路面種類	アスファルト舗装	アスファルト舗装	
20m評価	縦状ひび割れ率			
	面状ひび割れ率			
補修履歴	クラック率	33.1 %	27.7 %	
2004年12月	パッチング率	0.5 %	0.5 %	
1994年2月	縦状シール率			
道路諸元	面状シール率			
道路諸元	シール率			
グループ	ひび割れ率	33.6 %	28.2 %	
評価点	わだかまり量	8 mm	7 mm	
道路交通センサス	平坦性	2.76 mm	2.76 mm	
劣化指数	MCI	3.6	3.9	
FWD調査結果	MCI試No	3	3	

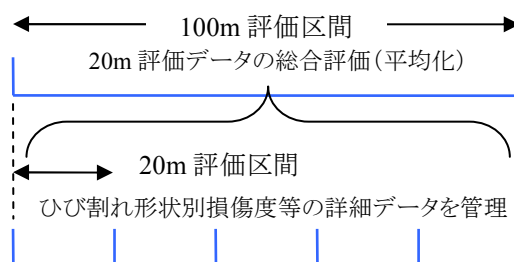
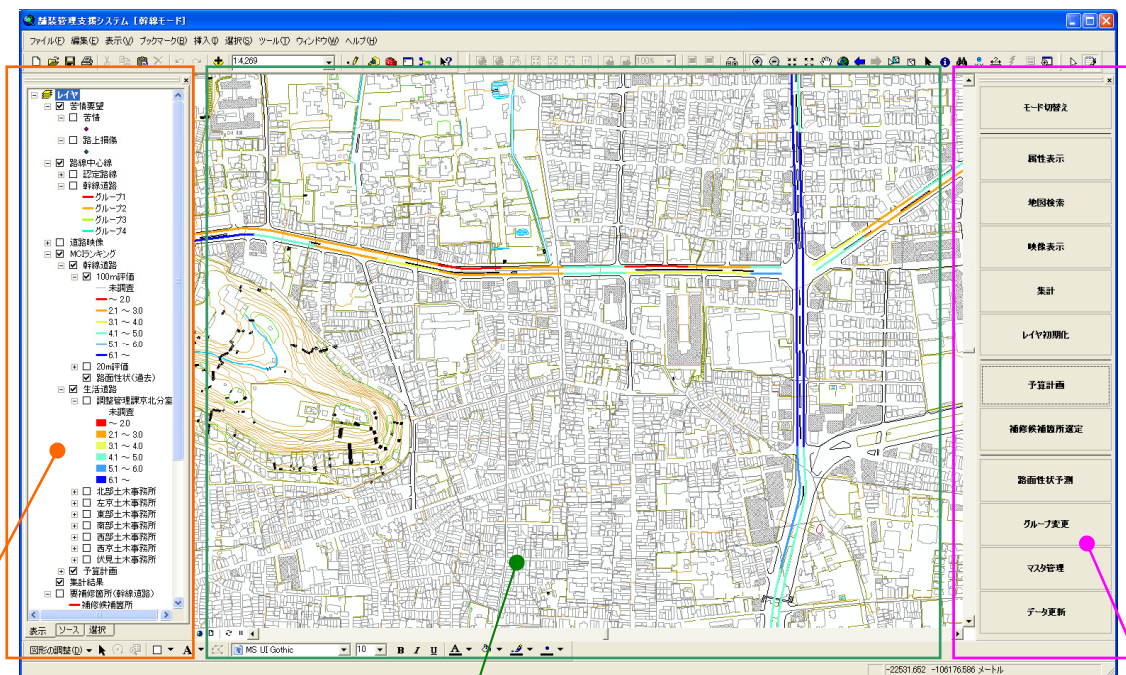


図-2 属性表示画面と舗装データ構造

概要を説明する。なお、システム機能のうち、補修候補箇所選定機能については、本システムの重要機能であるため、4.(3)にて詳しく説明する。

a) 属性表示（舗装データ管理機能）

属性表示機能では、舗装区間別のすべての情報を表示する（図-2）。100m を基本とした評価単位別の、①



(a) 地図凡例表示部

(b) 地図・属性表示部

(c) 操作メニューツールバー

図-3 アプリケーション基本画面

舗装現況（損傷状態），②路面性状調査の履歴，③補修情報の履歴，④道路諸元（交通量，グループ区分等），⑤劣化ハザード率の推計結果等の情報を閲覧することができる．路面性状調査や補修情報は，履歴情報を時系列に整列し，舗装区間別の劣化の経緯を把握することができる．

また，舗装のラインデータは，100m の評価単位区間内の詳細の調査データを把握することを目的として，20m 毎に分割したデータを内装したハイブリッド構造としている．20m データには，路面性状調査時に取得するひび割れ，わだち掘れ，平坦性の各 20m 評価結果の他，特にひび割れについて，ひび割れ発生形状別（面状ひび割れ，線状ひび割れ）の値を格納できる構造となっている．

b) 地図検索・映像表示（舗装データ管理機能）

地図検索機能は，管理事務所，住所，路線別の位置を GIS 上で検索する機能である．また，映像表示機能は，路面性状調査時に取得した路面とその周辺の映像データを路線の位置とリンクして表示させる機能である．

c) 集計（舗装データ管理機能）

集計機能は，路面性状値や要補修箇所の分析結果等を，管理事務所や路線，道路のグループ別に集計し，GIS 上にランキングマップを表示する機能である．

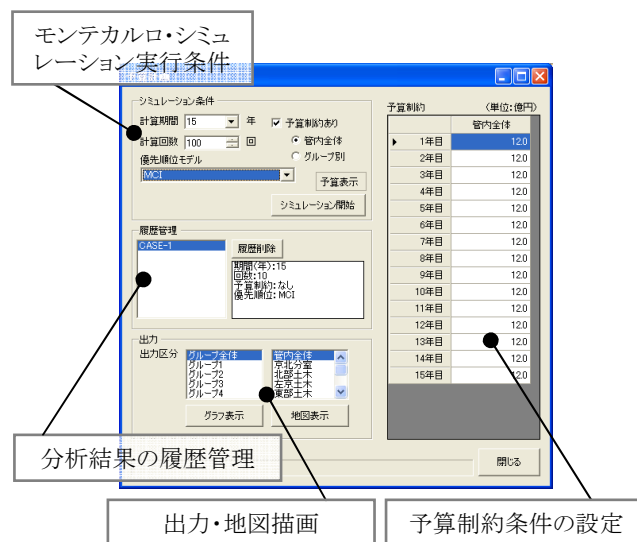


図-4 予算計画シミュレーション条件設定

d) 予算計画（マネジメント機能）

予算計画機能は，舗装現況（損傷度）と交通区分別の劣化予測モデルにより，劣化／補修過程のシミュレーションを実行し，将来時点における補修事業費の予測や予算制約下における舗装の管理水準へ与える影響を分析する．劣化予測モデルは，3.(2) にて説明した交通区分別の劣化ハザード率により算出したマルコフ推移確率行列を用いており，舗装区間別の劣化／補修過程は，モンテカルロ・シミュレーションにより複数のサンプルパスを発生させ，その平均値を出力する．

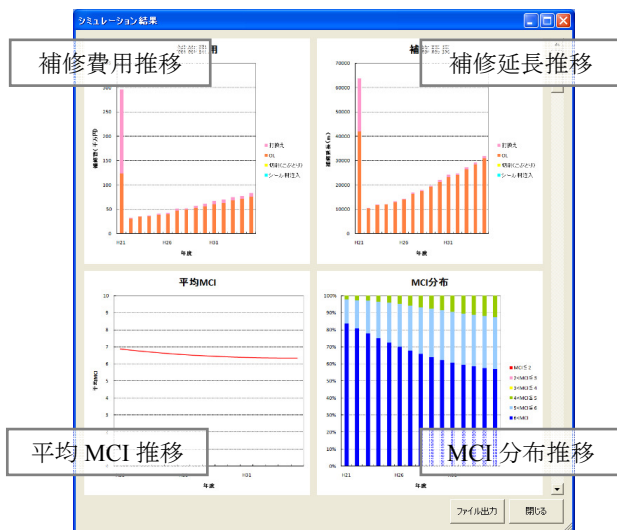


図-5 予算計画機能の出力サンプル

図-4 に予算計画機能の条件設定画面を示している。シミュレーションの計算期間、計算回数（モンテカルロ・シミュレーションの試行回数）を任意に設定する。また、予算制約の有無を選択し、予算制約を考慮する場合は、年度別又は年度別・グループ別に割り当てる予算額を入力する。予算制約下における補修の優先順位設定ルールは、予め設定した複数のルールから選択できる。シミュレーションの結果は、①補修費用推移、②補修延長推移、③平均 MCI 推移、④MCI 及び損傷別（ひび割れ、わだち掘れ）分布の推移を作成し、数値データとグラフデータを Microsoft Excel ファイルに出力する（図-5）。

e) マスタ管理（マスタ管理機能）

マスタ管理（図-6）では、すべての機能で共通に利用する情報の管理を行い、①補修工法、②補修政策、③排水性舗装の適用設定、④劣化予測モデルの修正等の機能を有している。①補修工法では、通常の補修工法と予防的補修工法に分類し、それぞれ補修単価、回復水準等を設定する。また、新工法等の適用を検討する場合には、新たな工法を追加入力することができ、その際、長寿命舗装等の新工法適用後の劣化速度を修正する場合は、任意のパラメータを設定し、劣化予測モデルを修正する。②補修政策及び③排水性舗装の適用設定では、道路のグループ別に補修のタイミングと排水性舗装の適用箇所を設定する。④劣化予測モデルの修正では、3.(2) により予め推計したハザードパラメータの値を任意に修正し、予算計画で用いるマルコフ推移確率を修正する。

f) その他（マスタ管理機能）

マスタ管理機能として、その他、①路面性状予測、

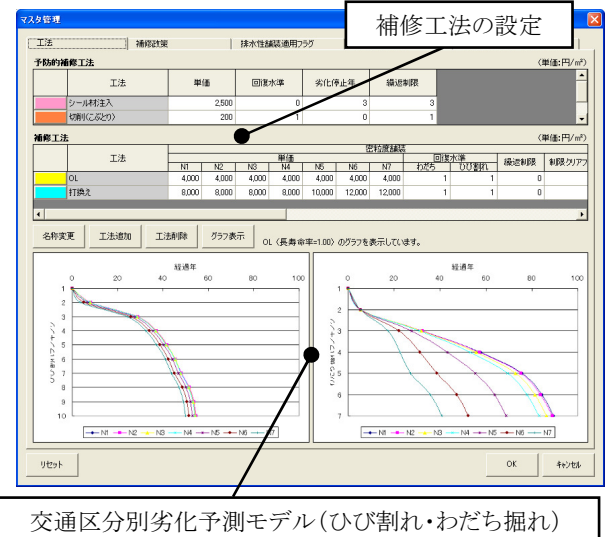


図-6 マスタ管理機能（補修工法と劣化予測モデル）

②グループ変更、③データ更新機能を有している。①路面性状予測は、システムを運用する時点における最新の舗装状態を評価するために、舗装区間に最新の調査結果から現在時点まで経過した時間に対して劣化予測モデルにより路面の損傷の増加分を計算し、現在時点の舗装の損傷度に修正する。②グループ変更機能は、予め設定した道路のグルーピングの設定方法を変更する。GIS 上で任意の道路区間を抽出し、新たなグループを設定することも可能である。③データ更新では、新たに取得した路面性状調査データや映像データをシステム上に自動的に取り込む機能である。データ更新の方法については、4.(4) で触れる。

(3) 劣化ハザード率を用いた補修候補箇所選定機能

道路舗装の補修箇所は、所与の管理水準を下回った舗装箇所を抽出するのが一般的である。舗装の管理水準は、道路の重要度等に応じて設定されたグループ別に、予算制約の影響を考慮して、長期的に舗装の状態を維持することが可能なレベルとして設定され、4.(2) で述べた予算計画機能により導出することができる。補修箇所を抽出した後は、補修の優先順位を設定し、損傷度や劣化特性に応じた補修工法を選択する。図-7 に、補修戦略検討フローを示す。本研究では、舗装区間の劣化ハザード率を用いた補修戦略を立案する方法を提案する。劣化ハザード率やその他のナレッジデータを用いることで、①補修候補箇所抽出、②補修の優先順位、③劣化速度の特異箇所抽出、④構造調査区間選定、⑤補修工法選定、⑥同期補修の判断、を検討する。

舗装区間別の劣化ハザード率は、当該舗装区間の劣化リスクを評価する。つまり劣化ハザード率が高い舗装区間は、現在の舗装の損傷状態に依らず、将来時

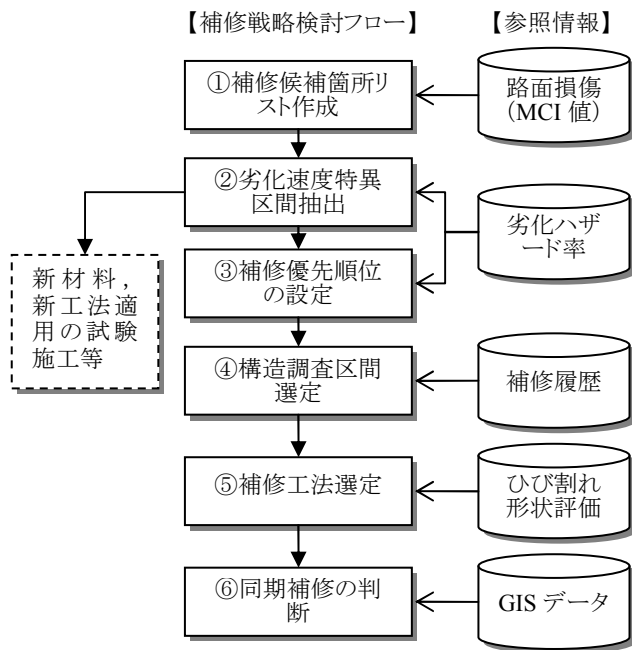


図-7 劣化ハザード率を用いた補修戦略検討フロー

点において劣化する可能性が高いと判断することができる。よって、劣化リスクが高い舗装区間の補修を優先的に実施することで、劣化リスクを抑えることが期待できる。また、平均的な劣化速度と比較して劣化が早い区間は「劣化速度特異区間」として抽出し、新材料や新工法適用等を検討し、積極的な舗装の長寿命化の対策を検討する。

次に、補修が必要と判断された舗装区間について、舗装構造の健全度を調査する区間を選定する。すべての舗装区間の構造調査を行うことは不可能であり、構造調査を実施する区間の優先順位が必要となる。ここでは劣化ハザード率に加え、過去の補修履歴情報を参照し、同一舗装区間の補修の頻度が高い区間は構造的劣化が進行していると想定し、優先的に構造調査を実施する。

次に、構造調査が適用されない舗装区間については、20m ピッチのひび割れ形状評価結果を用いて、構造劣化の判断を行い、打換え等の補修工法を選定する。補修履歴データと補修を実施した時点におけるひび割れ形状評価データに関するナレッジデータが蓄積されることにより、過去の評価結果を参照した補修工法の判断を行うことができる。ただし、本機能を適用するためには、ある程度の補修履歴とひび割れ形状調査データの蓄積が必要となる。

最後に、補修区間の GIS データをもとに、補修区間が連続または隣接している区間について、同期補修により工事の効率化と渋滞等の外部不経済を抑えることを検討する。

このように、劣化ハザード率を中心としたナレッジ

データを補修戦略立案に積極的に用いることにより、合理的な舗装補修業務を支援する。本システムでは、図-7 のフローに従い、補修候補リストを作成する機能を有しており、様々な条件を考慮することで補修戦略を立案することができる。

(4) データの更新方法

舗装マネジメントシステムは日常の維持管理業務にて生成された膨大なデータを統合管理し様々な分析を実行する。それら新たな維持管理データを確実にシステムへ取り込むことがシステムの学習機能を高めるために必要不可欠である。

幹線道路の路面性状調査は、調査対象路線を決定し自動測定車を用いて一斉に実施される。よって調査データはその際に一斉に整備されることとなる。本システムにおける調査データの管理方法については、3.(1)にて述べたように、予め舗装の評価区間を固定しており、その区間に応じて調査を実施し調査データを作成することによって、新規調査データのシステムへの取り込みを自動的に実行することができるとともに、舗装区間別の劣化の過程を時系列に把握することができる。

一方、劣化ハザード率の更新についても、調査データの更新と同時に一斉に更新する。劣化ハザード率を新たに推計するタイミングは、新たな調査データを獲得した時点に限定される。新規の調査データを整備する際に、平均的な劣化予測モデル（マルコフ推移確率）と舗装区間毎の劣化ハザード率（異質性パラメータ）を推計し、その結果を調査データとともにシステムに取り込むこととしている。

なお、調査データ以外に重要となる補修情報や生活道路管理に必要な目視検査結果及び路上損傷履歴に関するデータの入力については、本研究で取り上げる京都市では別途入力するツールを有しているため、新たに本システムにて入力機能を整備せず、入力済みのデータを GIS の位置情報をキーに自動リンクさせ本システムへ取り込む機能を設けている。

5. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で開発した舗装マネジメントシステムを、京都市が管理する幹線道路の維持管理業務へ適用する。京都市では、約 3,100km の舗装道路を管理しており、そのうち幹線道路は、約 680km を有している。平成 18 年度より計画的な路面性状調査を実施し幹線道路の路面の損傷度を把握するとともに、生活道路を中心に目視調査を実施し、その結果をデータベースとして

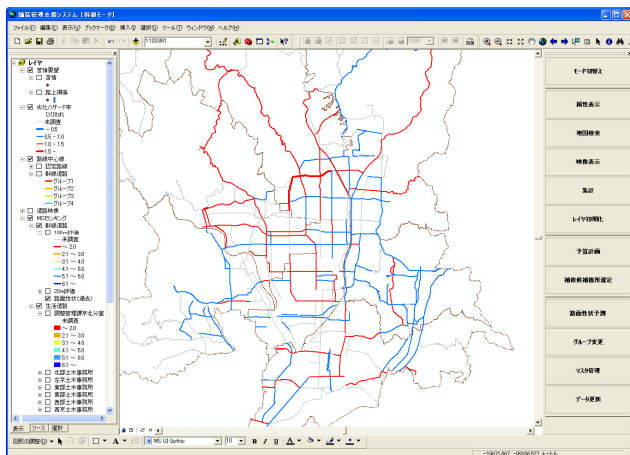


図-8 劣化ハザード率（ひび割れ）の推計結果

注)劣化ハザード率(異質性パラメータ)が1.0以上を示す区間は、平均的な劣化速度よりも速いことを示す。図中の赤のラインで示した舗装区間が、ひび割れの劣化速度が早い区間であることを示しており、なかでも太いラインで示した区間の劣化速度が著しいことを示している。

整備している。それらのデータを用いて、舗装管理の合理化を目的としたアセットマネジメントの取り組みを行っており、本研究はそのなかで幹線道路を対象としたマネジメントの合理化のための各種分析と意思決定に有用な情報を提供するためのシステムを構築したものである。

過去に実施した路面性状調査及び蓄積された補修履歴データを用いて、幹線道路の劣化予測モデルを構築した(図-6を参照)。さらに、路線別の劣化速度の異質性を評価した劣化ハザード率を推計した。劣化ハザード率の推計結果をシステム上に表現したものを、図-8に示している。このように、本システム上で、劣化速度の相対評価を視覚的に確認し、劣化速度が著しい箇所を抽出することができる。

本適用事例では、システム上に格納されている舗装の調査データや、劣化ハザード率を用いて、グループ別に設定した所与の管理基準値を用いて、要補修箇所と診断される舗装区間を抽出するとともに、劣化ハザード率を用いて構造調査を実施する舗装区間の抽出を試みる。なお、劣化ハザード率は、ひび割れ、わだち掘れのそれぞれについて算出し、構造調査区間は、それぞれの劣化ハザード率を用いて抽出した。

(2) 結果と考察

図-8に、劣化ハザード率の推計結果のランギングマップ(ひび割れ)を示している。また、図-9に、劣化ハザード率の相対評価指標と舗装現況のひび割れ率(100m評価)を用いて、補修候補箇所と構造調査区間を選定した結果を図示している。補修候補箇所は、

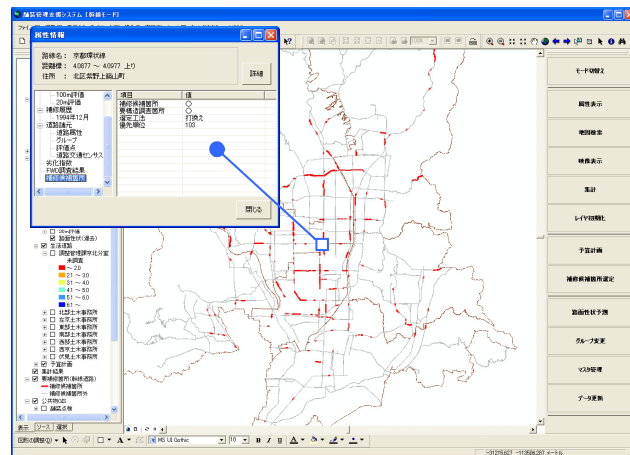


図-9 補修候補箇所抽出結果と属性表示

グループ別に設定した管理水準を下回る舗装区間を抽出し、構造調査区間は、ひび割れ率40%以上かつ、ひび割れとわだち掘れの劣化ハザード率(異質性パラメータ)が高いほうからそれぞれ5%区間に該当する舗装区間を抽出した。

図-9に示すように、補修候補箇所はGIS上に位置を示すとともに、当該舗装区間の属性を表示することができる。属性情報には、構造調査の必要性の有無、補修工法、補修の優先順位等を表示する。また、これらのデータは、一覧表としてダウンロードして任意に加工することが可能である。

本適用事例では、舗装現況データと劣化ハザード率の推計結果を用いて、要補修箇所と構造調査区間の抽出を行った。分析結果はシステム上でその位置と属性情報を視覚的に把握するとともに、一覧表として出力し管理することができる。劣化リスクが高い舗装区間を優先的に補修あるいは構造調査を実施することにより、全体的な劣化リスクの低減に向けた戦略をとることが可能となり、今後の更なるナレッジデータの蓄積によってその効果を検証することが可能となる。

6. おわりに

本研究では、道路舗装の維持管理業務に着目し、舗装の点検結果や補修情報等を統合した舗装ナレッジデータを用いて補修戦略の立案に有用な様々な情報を導出するための舗装アセットマネジメントシステムを開発した。具体的には蓄積されたデータベースを用いて舗装区間の劣化ハザード率を推計し、劣化リスクに応じた補修戦略を立案するための情報管理機能を搭載したシステムを開発した。また、それらのデータの継続的な蓄積によって、管理対象全体の舗装の長寿命化に

つながるような学習機能を有する舗装マネジメントシステムを提案した。本システムは、GISを用いたユーザインターフェースを構築しており、膨大な量に及ぶ舗装データをGISデータとリンクすることで、ユーザが行う操作の効率性を追及している。また、適用事例では、京都市が管理する幹線道路を対象として、劣化ハザード率を用いた補修箇所選定と構造調査区間の抽出を試みた。現在システム上で管理されているナレッジデータを用いて、客観的な補修戦略を立案するための情報を導出可能であることを確認した。

一方、本研究で開発したシステムを利用したマネジメントシステムの更なる機能向上のためには、いくつかの課題が残されている。

本研究では、膨大な舗装ナレッジデータを活用することで、様々な補修戦略を立案することができるシステムを提案した。しかしながら、それらの機能を利用するためには、段階的な舗装ナレッジデータの蓄積が必要となる。データの蓄積初期段階では、システム利用による効果を実証することが困難な場合も想定されるが、日常の維持管理業務で生成される膨大なデータを確実にナレッジデータとして整備することが必要である。そのためには、日常管理におけるデータ入力・データ更新の効率化を検討する必要がある。

また、舗装の長寿命化の効果を計測するためには、劣化ハザード率を用いた補修戦略の結果をモニタリングし、劣化予測モデルを更新するとともに、履歴データとの比較を行うための機能拡張が必要となる。定期的実施される路面性状調査結果を用いて劣化予測モデルと舗装区間別の劣化ハザード率を更新し、過去の推計結果との比較を視覚的に表現するような機能を追加することで、舗装の長寿命化を視覚的に表現することができよう。さらには、舗装の長寿命化を定期的に検証する体制づくりが重要となり、舗装管理業務を体系的に整理したロジックモデルを構築し、ロジックモデルと一体となった舗装マネジメントシステムの運用方法を検討する必要がある。

最後に、本研究で提案した劣化ハザード率を用いた学習機能を有するマネジメントシステムは、舗装に限らず、その他の土木施設のアセットマネジメントに広く応用することが可能であり、今後更なる適用範囲を拡張することが課題である。

参考文献

- 1) 宮本文穂, 串田守可, 足立達郎, 松本正人: Bridge Management System (BMS) の開発, 土木学会論文集, No.560/VI-34, pp. 91-106, 1997.
- 2) 古田均, 茅野牧夫, 渡邊英一: 橋梁の維持管理とブリッジマネジメントシステムの現状と将来展望, 土木学会論文集F, Vol.63, No.3, pp.287-294, 2007.
- 3) 青森県県土整備部道路課: 青森県橋梁アセットマネジメント基本計画, 2004.
- 4) Cambridge Systematics, Inc.: *Pontis release 4.4 Technical Manual*, 2005.
- 5) Cambridge Systematics, Inc.: *Pontis release 4.4 User's Manual*, 2005.
- 6) 笠原篤: 舗装マネジメントシステムからアセットマネジメントシステムへ, 土木学会舗装工学論文集, 第10巻, pp.K1-K4, 2005.
- 7) PIRAC: Overview of HDM-4, *Highway Development and Management Series*, 2006.
- 8) 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, pp.125-134, 2004.
- 9) 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.69-82, 2005.
- 10) 小林潔司, 熊田一彦, 佐藤正和, 岩崎洋一郎, 青木一也: サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル, 土木学会論文集F, Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.
- 11) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
- 12) 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.
- 13) 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響, 土木計画学・研究論文集, 土木学会, Vol.23, No.1, pp.39-50, 2006.
- 14) 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, pp.199-210, 2005.
- 15) 山本浩司, 青木一也, 小林潔司: 道路付帯施設アセットマネジメントシステム, 土木学会土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.173-184, 2006.