

# ミャンマーにおける空間マッピングを用いた 舗装マネジメント

貝戸清之<sup>1</sup>・松本圭史<sup>2</sup>・青木一也<sup>3</sup>・小林潔司<sup>4</sup>

<sup>1</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

<sup>2</sup>学生員 大阪大学大学院 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: k.matsumoto@civil.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 パスコ株式会社 経営戦略本部公共資産マネジメント政策室 (〒 153-0043 目黒区東山 1-1-2)

E-mail: kiakzo6013@pasco.co.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 京都大学 経営管理大学院特任教授 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.jp

開発途上国では、道路網全体を対象とした悉皆点検が困難な場合が少なくない。一方、点検が困難であっても、構造条件、使用条件、環境条件などの劣化要因となりうる属性情報が利用可能である場合は多い。本研究では、一部の道路区間における路面性状の点検結果に基づいて混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計し、異質性パラメータ値と属性情報の関係を表す統計的マッピングモデルを利用して、対象地域全体における劣化速度分布を評価する空間マッピングの方法論を提案する。空間マッピングを用いて、対象地域全体における道路舗装の寿命評価が可能となり、マネジメント上の様々な意思決定を支援できる。最後に、提案した空間マッピング手法をミャンマーにおける簡易舗装の劣化速度評価に導入しその有用性を分析する。

キーワード： 空間マッピング, 混合マルコフ劣化ハザードモデル, 舗装マネジメント, ミャンマー

## 1. はじめに

目視点検データに基づく統計的劣化予測モデル<sup>1)</sup>の開発によって社会基盤施設の劣化予測や寿命評価が定着してきた。これを受け、アセットマネジメントの実践的研究や実務への試行的導入が進んでいる<sup>2)</sup>。その一方で、社会基盤施設によっては点検自体が困難である場合や、点検が可能であっても管理者の人的/財政的リソースの制約によって点検データが蓄積していない場合も少なくない。とりわけ、開発途上国では、地域格差、多様な援助国との関係、民族問題等の理由により、対象とする地域全体の社会基盤施設に対して、網羅的に点検情報を得ることが困難である場合が少なくない。

社会基盤施設に対する点検データを獲得・蓄積することが難しい場合であっても、劣化に影響を及ぼすと考えられる要因(構造条件、使用条件、環境条件)に関する属性情報が社会基盤施設のネットワーク全体、あるいは対象地域全体で利用可能であることは多い。例えば、降水量や交通量等の情報は、維持管理や劣化予測を目的として観測されているわけではないが、これらの情報が獲得できれば舗装の劣化速度の評価に利用することができる。このように、社会基盤施設の直接的な点検が不可能であっても、劣化に影響を及ぼす属性情報などの代替情報によって管理対象となる社会基

盤施設全体の劣化速度を間接的に評価できれば、開発途上国におけるアセットマネジメントを実行する上で有用な情報となる。

本研究では、混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>3)</sup>を用いて舗装路面の劣化速度の異質性に関するベンチマーク分析を行い、各道路区間の異質性パラメータ値を推計する。しかし、このように分析した舗装劣化速度の評価結果は、対象とした道路区間のみを対象としたものであり、その結果を道路網全体に適用することはできない。一方で、道路舗装の劣化要因として考えられる気温分布、交通量分布、標高分布などの属性情報に関しては、衛星情報や航空測量、その他のデジタル情報源から入手可能である。異質性パラメータの推計値と、劣化要因となりうる属性情報との間に統計的関係が存在すれば、属性情報の空間的分布状態を用いて劣化速度の空間的異質性を評価することができる。本研究では、対象地域の一部の地域で獲得した評価結果(異質性パラメータ値)と対象地域全体で計測可能な属性情報の統計的関係を利用して、対象地域全体における評価値の空間分布を構成する手法を「空間マッピング」と呼ぶこととする。

以上の問題意識のもとで、本研究では実際の限られた地域で観測された路面点検データおよび地域全体で観測された属性情報を用いて、対象地域全体における

舗装劣化速度を可視化する空間マッピングの方法論を提案し、ミャンマー連邦共和国（以下、ミャンマーと呼ぶ）における舗装アセットマネジメントへ適用する。以下、2. で本研究の基本的な考え方を述べる。3. で空間マッピングの方法論を提案する。最後に4. でミャンマーにおける実践例を通じて空間マッピングの方法論の有効性を分析する。

## 2. 本研究の基本的な考え方

### (1) 既往研究の概要と本研究の目的

アセットマネジメントにおいて蓄積された目視点検データから劣化過程をモデル化する統計的劣化予測モデルが発展している<sup>1),3)-4)</sup>。津田等はマルコフ劣化ハザードモデルを開発し、マルコフ推移確率を推計する一般的な方法論を提案した<sup>1)</sup>。さらに、小濱等は管理対象となる橋梁群に固有な劣化速度の異質性を表現する混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>3)</sup>を提案した。混合マルコフ劣化ハザードモデルは、さまざまなデータベースに対して適用可能な汎用性の高い統計的劣化予測モデルであり、目視点検が1回しか実施されていないような開発途上国においても導入することが可能である。また、小林等は情報が一部欠損しているような不完全データベースを用いて、混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計する方法論を提案し、ベトナムを対象とする実証分析を実施している<sup>5),6)</sup>。

多くの開発途上国では、社会基盤施設に対する点検データのみならず、図面や台帳などの基礎情報や、交通量などの関連情報も整備されていないことも少なくない。さらに、多くの援助国が開発途上国の社会基盤施設整備に参画しており、援助国ごとに社会基盤施設の設計基準が異なっていたり、ともすれば援助対象となる個別施設のみに焦点をおいた計画策定にとどまっている場合もある。加えて、本研究の対象とするミャンマーでは、少数民族等による地域問題を抱えている。このような状況の下では、国土全体を対象とした社会基盤施設のデータベースを整備することは不可能である。しかし、社会基盤施設はネットワーク全体として機能するものである。現時点において、包括的なデータベース整備が不可能であっても、利用可能なデータに基づいて社会基盤施設マネジメントに関わる総合的な国土政策を検討することが重要である。

本研究では、国際協力機構（JICA）の円借款事業として、ミャンマー建設省道路局のもとで実施されたミャンマーにおける貧困削減プロジェクトを対象としている。プロジェクトでは、州・地域間の貧困格差の是正と均衡のとれた国家開発を達成することを目指し、ミャンマー全土に14路線が建設された。地域間の格差是正

を目的とした道路であることから、より安価な建設費用で可能な限り地域間のアクセス性を確保するために、全14路線のうち12路線で簡易舗装が採用されている。その一方で、大型車交通量や降水量の多い、簡易舗装が採用された一部路線において局部的な損傷が著しく発生しており、道路建設時における舗装構造の検討が重大な課題となっている。ミャンマーの貧困削減プロジェクトは、ある特定地域のみを対象として限定的に検討されるべきものではなく、ミャンマーの国土全体に関わる政策課題である。借款プロジェクトの対象となった道路はミャンマーにおける生活道路網全体からみれば、局所的・限定的な路線に過ぎないが、そこで得られた道路建設時における舗装構造に関する議論は、空間マッピング手法による可視化により、他の地域も含めた政策議論に敷衍できる可能性がある。

このような可視化情報の提供により、1) 道路整備担当組織や部局の構成員による道路政策課題の視覚的認識が容易になる、2) 限られた路線を対象として得られた舗装劣化速度の評価結果を空間マッピングによりミャンマー全土で可視化することによって、生活道路の新規建設時における簡易舗装の妥当性に関して、道路局内における共通認識の醸成に資することができる。3) 劣化情報の可視化は、維持管理のための人的資源の空間的・組織的配分など、今後の維持管理の効率化のために有用である。さらに、4) 将来時点における道路整備プロジェクトの案件形成での簡易舗装政策の適用可能性に関する有用な情報となりうる。筆者らの知る限り、空間マッピングによる政策情報の可視化に関する研究は、本研究以外に見当たらない。

### (2) 空間マッピングの概要

本研究では、開発途上国におけるアセットマネジメントの支援方策の一環として、限られた地域における道路の舗装路面に関する部分的な劣化情報に基づいて、国土全体を対象とした舗装アセットマネジメント戦略の検討を支援するための情報を作成する空間マッピングの方法論を提案する。道路網全体を対象とした路面性状点検が難しい場合であっても、劣化に影響を及ぼすと考えられる要因となる属性情報（構造条件、使用条件、環境条件）に関しては道路網全体で比較的収集が容易な場合が少なくない。空間マッピングは、一部の地域の舗装路面の劣化情報をもとに、劣化に影響を及ぼす地域特性などの代替情報によって管理対象となる道路網全体の劣化情報を再構成する方法論である。

本研究で提案する空間マッピングの考え方を以下に述べる。対象とする国土・地域の中で、限定された路線を対象として、例えば路面性状調査等を通じて舗装路面の劣化状態に関する点検情報が入手可能であるとす

る。これらの路線に関しては、点検情報を用いて混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計し、個別路線の劣化速度の違いを表現する異質性パラメータを得る。一方で、対象とする国土・地域には、点検情報が入手可能でない路線が存在する。路面舗装の劣化速度に及ぼす属性情報（影響要因）に関しては、例えば衛星情報や航空写真を用いて入手可能である。そこで、異質性パラメータ値と属性情報との間のマッピング関係を記述する統計モデル（以下、統計的マッピングモデル）を作成する。統計モデルの推計精度が不十分であれば、異質性パラメータの設定方法等を修正する。さらに、点検結果や異質性パラメータ値、さらに劣化の影響要因に関する情報は、位置情報を用いて対象地域全体を表すマップ上に記述できる。

いま、対象とする地域全体を、いくつかのポリゴン（領域）に分割する。ポリゴン分割は、劣化要因に関する属性情報の入手可能性や路線の空間的配置等を勘案して決定される。そのうえで、各ポリゴンにおける異質性パラメータ値と属性情報（影響要因）の関係を表す統計的マッピングモデルを用いて、各ポリゴンの舗装劣化速度を推計することが可能となる。このような過程を経て、対象地域全体における舗装劣化速度の空間分布を評価することができる。評価結果が不十分であれば、ポリゴン分割の方法を修正する必要がある。以下、3.で空間マッピングの作成方法を提案する。

### 3. 空間マッピング

#### (1) 空間マッピングの手順

2.(2)で言及したように、空間マッピングは、一部の地域の舗装路面の劣化情報をもとに、属性情報などの代替情報によって管理対象となる道路網全体の劣化情報を再構成する方法論である。空間マッピングは図-1に示すように4つのステップで構成される。

##### a) 領域分割 (ステップ 1)

対象とする道路網の管理対象地域をいくつかのポリゴン（領域）に分割する。対象地域全体が1つの空間的2次元マップで表現される。さらに、対象地域を $Q$ 個の互いに排他的な領域 $k$  ( $k = 1, \dots, Q$ )に分割する。領域の集合 $\Omega$ は対象地域全体を網羅する。路面性状点検を行う道路区間は、1つもしくは複数の領域内に含まれ、各領域に対して1つの異質性パラメータが対応する。1つの領域内には、十分な数の道路区間において路面性状点検が実施される。 $K$ 個の領域 $k$  ( $k = 1, \dots, K$ )において路面性状点検が実施される。残りの領域 $k$  ( $k = K+1, \dots, Q$ )では、路面性状点検に関する情報が存在しない。

##### b) 混合マルコフ劣化モデルの推計 (ステップ 2)

混合マルコフ劣化ハザードモデルの詳細については、参考文献3)に譲るが、読者の便宜を図るために、モデルについて簡単に説明する。

分析対象とする道路を $K$ 路線に分割する。 $K$ 個の路線のそれぞれは、2.(2)で言及したポリゴン（領域）に対応する。路線 $k$  ( $k = 1, \dots, K$ )は、合計 $L_k$ の道路区間で構成され、各道路区間単位で路面性状に関する目視点検が実施される。路線 $k$ に固有なハザード率の異質性を表すパラメータ $\varepsilon^k$ を導入する。このとき、路線 $k$ の道路区間 $l_k$  ( $l_k = 1, \dots, L_k$ )の健全度 $i$  ( $i = 1, \dots, I-1$ )のハザード率を、個別ハザード率

$$\lambda_i^{l_k} = \tilde{\lambda}_i^{l_k} \varepsilon^k \quad (1)$$

$$(i = 1, \dots, I-1; k = 1, \dots, K; l_k = 1, \dots, L_k)$$

を用いて表す。ここに、 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ は、路線 $k$ の道路区間 $l_k$ が有する健全度 $i$ の平均的なハザード率（以下、標準ハザード率）である。異質性パラメータ $\varepsilon^k$ は、路線 $k$ の標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ からの乖離の程度を表す確率変数であり、 $\varepsilon^k \geq 0$ が成立すると仮定する。異質性パラメータ $\varepsilon^k > 1$ であり、かつ $\varepsilon^k$ の値が大きくなるほど、当該路線 $k$ に含まれる全ての道路区間の劣化速度が、標準ハザード率に対して大きいことを表す。

路線 $k$ の道路区間 $l_k$ の第1回目の点検時刻 $\tau_A^{l_k}$ において健全度が $i$ と判定され、次の点検時刻 $\tau_B^{l_k} = \tau_A^{l_k} + z^{l_k}$ においても健全度が $i$ と判定される確率 $\pi_{ii}(z^{l_k}|\varepsilon^k)$ は、

$$\pi_{ii}(z^{l_k}|\varepsilon^k) = \exp(-\tilde{\lambda}_i^{l_k} \varepsilon^k z^{l_k}) \quad (2)$$

となる。また、点検時刻 $\tau_A^{l_k}$ と $\tau_B^{l_k} = \tau_A^{l_k} + z^{l_k}$ の間で健全度が $i$ から $j$  ( $> i$ )に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z^{l_k}|\varepsilon^k)$ は、式(1)より、

$$\begin{aligned} \pi_{ij}(z^{l_k}|\varepsilon^k) &= \sum_{s=i}^j \prod_{m=i, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_m^{l_k}}{\tilde{\lambda}_m^{l_k} - \tilde{\lambda}_s^{l_k}} \exp(-\tilde{\lambda}_s^{l_k} \varepsilon^k z^{l_k}) \\ &= \sum_{s=i}^j \psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^{l_k}) \exp(-\tilde{\lambda}_s^{l_k} \varepsilon^k z^{l_k}) \end{aligned} \quad (3)$$

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

と表すことができる<sup>1)</sup>。ただし、 $\tilde{\lambda}^{l_k} = (\tilde{\lambda}_1^{l_k}, \dots, \tilde{\lambda}_{I-1}^{l_k})$ である。また、 $\psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^{l_k})$ は

$$\psi_{ij}^s(\tilde{\lambda}^{l_k}) = \prod_{m=i, \neq s}^{j-1} \frac{\tilde{\lambda}_m^{l_k}}{\tilde{\lambda}_m^{l_k} - \tilde{\lambda}_s^{l_k}} \quad (4)$$

となり、標準ハザード率のみの関数で表される。

目視点検データを用いて、混合マルコフ劣化ハザードモデルを推計し、領域 $k$  ( $k = 1, \dots, K$ )に含まれるすべての道路区間を対象とした標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^k$ 及び、異質性パラメータ値 $\varepsilon^k$ を推計する。このとき、各領域における舗装の平均的劣化速度を表すハザード率 $\lambda_i^k$ は、式(1)で表される標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^k$ と異質性パラメー

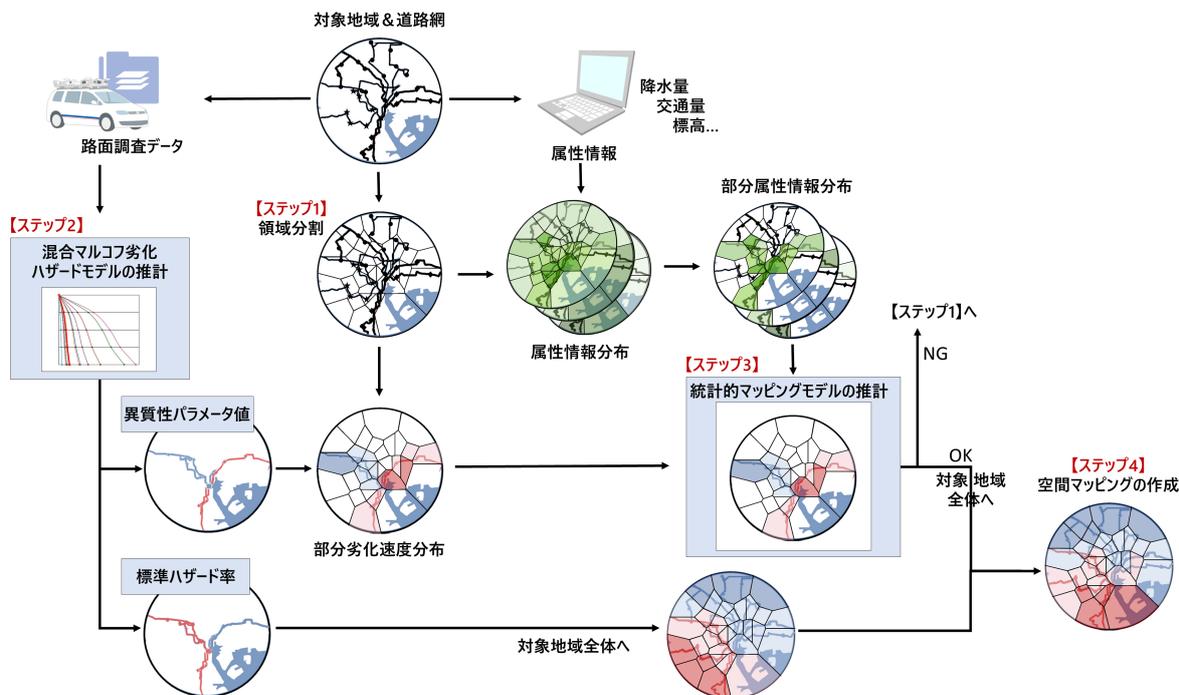


図-1 空間マッピングの作成手順

タ  $\varepsilon^k$  の積によって算出される。路線（道路区間）は緯度・経度の位置情報を有しており、位置情報を空間的 2次元マップ上の各領域と対応づけることが可能である。  $K$  個の領域  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) のそれぞれに対応して 1 つの異質性パラメータ値を対応させることができる。

### c) 統計的マッピングモデルの推計 (ステップ 3)

異質性パラメータ値の推計値  $\varepsilon^k$  が得られた  $K$  個の領域を対象として、異質性パラメータ値を舗装劣化に影響を及ぼす属性情報を用いて説明する統計的マッピングモデルを推計する。統計的マッピングモデルに関しては、4.(2) で説明する。統計的マッピングモデルの推計精度は、当然のことながら領域分割の方法に依存する。統計的マッピングモデルの推計精度が不十分な場合、領域分割の方法を変更するなどのフィードバックが必要となる。

### d) 劣化速度に関する空間マップの作成 (ステップ 4)

ステップ 2 で推計した混合マルコフ劣化ハザードモデルで用いた説明変数が、対象地域のすべての領域において観測可能であれば、すべての領域に対して標準ハザード率  $\tilde{\lambda}_i^k$  ( $i = 1, \dots, I-1; k = 1, \dots, Q$ ) を算定できる。一方、異質性パラメータ  $\varepsilon^k$  に関しては、路面性状点検結果が入手可能な領域  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) に対してのみ入手可能である。そこで、ステップ 3 で推計した統計的マッピングモデルを用いて異質性パラメータ値の代替値  $\bar{\varepsilon}^k$  ( $k = K+1, \dots, Q$ ) を求める。これにより、すべての領域の期待劣化速度  $\lambda^k = \tilde{\lambda}^k \bar{\varepsilon}^k$  を求めることができる。以上の手順により、対象地域全体に

わたる劣化速度分布を作成することができる。

混合マルコフ劣化ハザードモデルでは、劣化速度の領域（路線）間の違いは、説明変数もしくは異質性パラメータを用いて表現される。舗装の劣化速度に直接影響を及ぼすような要因は説明変数で取り上げることが望ましい。しかしながら、説明変数は路面性状点検を実施した局所的地点に関する情報が必要となる。本研究における実証分析の対象とするミャンマーにおいて、このような局地的情報を獲得することは不可能である。一方、異質性パラメータ値は、領域間という集計化されたレベルにおける異質性を表現している。このような観点から、本研究における実証分析では、混合マルコフ劣化ハザードモデルの説明変数として定数項のみを取り上げる。

### (2) 統計的マッピングモデルの作成

統計的マッピングモデルは、路面性状点検データが存在する領域  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) に対して、ステップ 2 で求めた異質性パラメータの推計値  $\varepsilon^k$  を、当該の領域で観測可能な属性情報  $z^k = (1, z_1^k, \dots, z_M^k)$  を用いて再現するモデルである。ステップ 3 で作成された統計的マッピングモデルは、ステップ 4 において路面性状点検データが存在しない領域  $k$  ( $k = K+1, \dots, Q$ ) の異質性パラメータ値  $\varepsilon^k$  を、当該の領域で観測可能な属性情報  $z^k = (1, z_1^k, \dots, z_M^k)$  を用いて推計することになる。属性情報は簡易舗装の劣化に影響を及ぼすと考えられる影響要因であり、それぞれの領域における舗

装の劣化環境を表す降水量，気温，標高，大型車交通量，CBR 値などの変数で表される。

いま，異質性パラメータ値  $\varepsilon^k$  ( $k = 1, \dots, Q$ ) の定義域が  $[0, \infty)$  であることに留意して，異質性パラメータ値を属性情報  $z^k$  を用いて推計する統計的マッピングモデルを

$$\varepsilon^k = \exp(B^k) \quad (5a)$$

$$B^k = \theta z^{k'} + \sigma \omega^k \quad (5b)$$

と定式化する<sup>2)</sup>。ただし， $\theta = (\theta_0, \dots, \theta_M)$  は統計的マッピングモデルのパラメータベクトル， $\sigma$  は偏差パラメータ， $\omega^k$  は領域  $k$  に固有な確率誤差項を表す。上式の両辺の対数をとれば

$$\ln \varepsilon^k = \theta z^{k'} + \sigma \omega^k \quad (6)$$

を得る。確率誤差項が確率密度関数

$$f(\omega^k) = \exp\{-\omega^k - \exp(-\omega^k)\} \quad (7)$$

で表現される標準ガンベル分布に従うと仮定する。ただし， $E(\omega^k) = \gamma$  であり， $\gamma = 0.57722\dots$  がオイラー定数である。式 (6) を

$$\omega^k = \frac{\ln \varepsilon^k - \theta z^{k'}}{\sigma} \quad (8)$$

と書き直し確率密度関数の変数変換を行う。このとき，

$$f(\varepsilon^k | z) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\exp\left(-\frac{\ln \varepsilon^k - \theta z^{k'}}{\sigma}\right) - \frac{\ln \varepsilon^k - \theta z^{k'}}{\sigma}\right\} \quad (9)$$

と表すことができる。

いま，領域  $k$  ( $k = 1, \dots, K$ ) における異質パラメータの推計値ベクトルを  $\bar{\varepsilon} = (\bar{\varepsilon}^1, \dots, \bar{\varepsilon}^K)$  と表す。また，属性情報の観測値ベクトルを  $\bar{z} = (z^1, \dots, z^K)$  と表す。このとき，推計値ベクトル  $\bar{\varepsilon}$  を再現する対数尤度は

$$\ln \mathcal{L}(\bar{\varepsilon} | \theta, \bar{z}) = \sum_{k=1}^K \left\{ -\exp\left(-\frac{\ln \bar{\varepsilon}^k - \theta \bar{z}^{k'}}{\sigma}\right) - \left(\frac{\ln \bar{\varepsilon}^k - \theta \bar{z}^{k'}}{\sigma}\right) \right\} - K \ln \sigma \quad (10)$$

と表される。式 (10) を最大にするような未知パラメータベクトル  $\theta, \sigma$  の最尤推計値を  $\theta^*, \sigma^*$  と表す。このとき，領域  $k$  ( $k = K+1, \dots, Q$ ) における異質性パラメータの推計値は

$$\bar{\varepsilon}^k = \exp(\theta^* \bar{z}^{k'}) \cdot \int_0^\infty \exp(\sigma^* \omega^k) f(\omega^k) d\omega^k \quad (11)$$

と表される。

## 4. 実証分析

### (1) データベースの概要

本研究では，ミャンマーにおける貧困削減プロジェクトにより建設された道路を対象とした実証分析を行う。対象とする JICA プロジェクトにおいて，2016 年か

表-1 舗装路面の 7 段階健全度評価基準

健全度	判定基準
1	損傷無し
2	ポットホール・ひび割れの発生 パッチングが必要
3	区間の 30 %未満が損傷 (ポットホール・ひび割れ・パッチング)
4	区間の 30 %以上が損傷 (ポットホール・ひび割れ・パッチング)
5	路盤の損傷等の重大な損傷の発生 更新が必要
6	舗装端部の劣化
7	その他の損傷

ら 2018 年にかけて新規建設された 14 路線 (PW-01～PW-14) のうち，PW-01 はコンクリート舗装，PW-03 は高級舗装であるがそれ以外の路線は簡易舗装で建設されている。事前調査の段階で，簡易舗装に関しては当初 10 年程度の平均寿命が期待されていたが，複数の路線において急速に劣化が進んでいることが確認されている。2019 年 1 月から舗装に対する目視点検が実施され，舗装の劣化状態は 7 段階の健全度で評価されている (表-1)。本研究では，2019 年 1 月から 12 月にかけて実施された目視点検データをもとにデータベースを作成し，このデータベースを用いて混合マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータを推計した。推計に際して，異質性パラメータを設定する舗装の基本単位を路線単位とし，これにより，異質性パラメータの総数はコンクリート舗装を除く 13 となった (最終的に 13 本の期待劣化パスを推計するが，空間マッピングの作成に用いるのは簡易舗装 12 路線)。なお，補修の実施による状態回復や，点検誤差などの理由により，健全度が前回の目視点検時点より回復しているデータサンプルは予め除外した。また，舗装の一般的な劣化過程は表-1 の健全度 1～5 で説明できる一方，健全度 6 と 7 はこの劣化過程の延長線上にある事象ではなく，意味合いが異なる事象が多分に含まれていたために，これらもデータベースから除外した。最終的に，混合マルコフ劣化ハザードモデルの推計のために，合計 10,013 データが利用可能であった。

### (2) 期待劣化パスおよび部分的劣化速度分布

4.(1) で述べた舗装のデータベースを用いて，混合マルコフ劣化ハザードモデルを階層ベイズ推計<sup>3)</sup>した。階層ベイズ法では標準ハザード率の推計に加え，13 路線それぞれに対する異質性パラメータも同時に推計している。本来であれば，交通量などの可観測要因は説明変数として採用し，不可観測要因を異質性パラメータで表現すべきである。しかし，今回の解析においては，そのように情報の細分化に耐え得るほどの情報量を獲得できていないために，説明変数を採用せずに，路

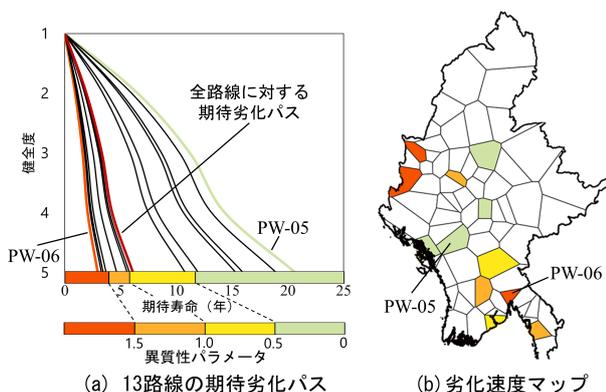


図-2 13路線の期待値劣化パスおよび部分的劣化速度分布

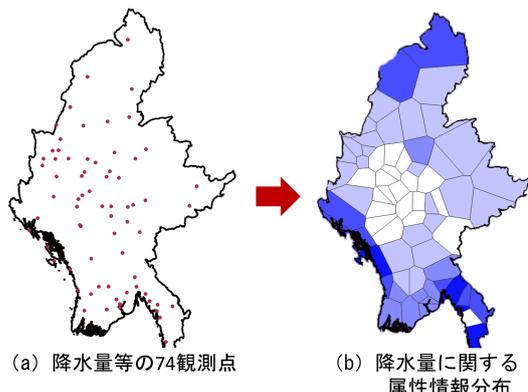


図-3 ミャンマー全土のボロノイ分割

線ごとの劣化速度の相違を全て異質性パラメータに集約して表現することとした。13路線に対して、異質性パラメータを用いてそれぞれの期待劣化パスを求めた。これらの期待劣化パスを一括して図-2(a)に示す。同図に示すように、期待寿命が3年以下の路線(PW-06)から、20年以上の路線(PW-05)が存在することがわかる。全路線に対する期待劣化パスの期待寿命が約6.1年であることを踏まえると、簡易舗装の期待寿命には路線ごとに大きな差異が存在することが理解できる。これらの異質性パラメータ(期待寿命)に基づいて、部分的劣化速度分布を作成する。期待劣化パスを推計した13路線は道路区間ごとに緯度・経度情報を有している。3.においてミャンマー全土を74領域に分割したが、13路線がそれぞれいずれの領域に属するかは容易に判断できる。また、図-2(a)には期待寿命をカラーバー表示しているが、それぞれの路線の期待寿命のカラーをそれぞれの路線が存在する領域に対して同色で表示したものを図-2(b)に示す。本研究では同図を部分的劣化速度分布と定義する。当然のことながら、部分的劣化速度分布は実際に点検データを獲得して期待劣化パスと期待寿命が推計できた路線が位置する領域のみが着色される。参考までに、図-2(a)で示したPW-05とPW-06が属する領域を図-2(b)に例示する。以上のように、実際の点検データを用いて路線の期待劣化パスや期待寿命を推計できる点に本研究の優位性がある。

### (3) 空間マッピングの作成

#### a) 部分的属性情報分布の作成

空間マッピングの作成に際して、管理対象となる社会基盤施設が存在する領域(地域)における属性情報が必要となる。前述したように、属性情報は社会基盤施設の劣化に影響を及ぼすと考えられる要因であり、舗装の劣化であれば、降水量、気温、標高、大型車交通量などの構造条件、使用条件、環境条件となる。例えば、デジタル地図を利用すれば、標高に関する情報は無数

に獲得することが可能である。その一方で、舗装の劣化に多大な影響を及ぼすと考えられる降水量に関する情報はミャンマー全土で74地点における観測にとどまる(図-3(a))。空間マッピングを作成する際には、マネジメント上の意思決定の目的に応じて領域分割数を決定する必要があるが、本研究では舗装マネジメントを行う上で不可欠な情報である降水量に着目して、74領域に分割することとした。ミャンマー全土を74領域に分割する手段としてはボロノイ分割<sup>8)</sup>を用いる。ボロノイ分割とは、隣り合う2点間を結ぶ直線に垂直二等分線を引き、各点の最近隣領域を分割する手法であり、分割された図をボロノイ図という。ボロノイ分割を用いることによりミャンマー全土を網羅した属性情報分布の作成が可能となる。主な属性情報はMyanmar Climate Report<sup>7)</sup>から取得した。Myanmar Climate Reportにはミャンマー全土78地点における1981年から2010年の30年間に収集された属性情報が記載されている。具体的には、観測地点ごとの緯度/経度、標高、月ごとの平均降水量、最高気温、最低気温、湿度等のデータが記載されている。78地点の中で標高データに欠損があった地点を除いた74地点(図-3(a))に対してボロノイ分割を実行した。ボロノイ分割された74領域に対して、降水量、気温などの属性情報をそれぞれ割り当て、属性情報の数に応じた属性情報分布を作成した。図-3(b)は降水量に関する属性情報分布である。色が濃いほど降水量が多いことを表現している。同図より、ミャンマーは北部と沿岸部の降水量が多く、内陸部は降水量が少ないことが読み取れる。

#### b) 推計結果

空間マッピングの作成に際して、統計的マッピングモデルに採用すべき属性情報分布(説明変数の候補)として、標高、気温、年平均降水量、幅員、交通量、CBR値等を選定し、多重共線性の影響や、AICを勘案しながら推計を行う。また、舗装の劣化を分析する際には、一般的には大型車交通量が使用される。しかしながら、

表-2 統計的マッピングモデルの推計結果

定数項	降水量	CBR 値	交通量	偏差 パラメータ
$\theta_0$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\sigma$
-1.424	0.6212	-0.6552	1.439	0.2172
(-5.617)	(1.497)	(-2.104)	(3.749)	(-)

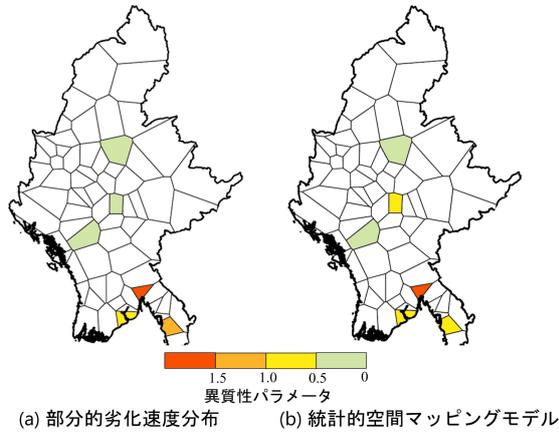


図-4 部分的劣化速度分布と部分的属性情報分布重合との比較

大型車である大型バスとマイクロバスの交通量のデータが多く、路線で欠損していることを考慮し、交通量のデータとしては大型トラックの日平均台数を採用した(以下、大型車)。さらに、分析に用いる路線のCBR値は2.0%~5.9%と10.0%~の2種類存在した。したがって、推計に際して、CBR値は2.0%~5.9%を0、10%を1に2値変換し、その他の定量的な説明変数は最大値が1となるように規格化を行っている。

異質性パラメータ値としては、4.(2)で推計された路線ごとの値を用いている。ただし、交通量測定が未実施であった路線や、天候の変化が大きい山間部斜面の路線は降水量の現地における実測値とポロノイ分割による推計値との乖離が大きかったために、部分的劣化速度分布から予め除外した。その結果、6路線が部分的劣化速度分布として使用可能となった。図-4(a),(b)にはそれぞれ分析に用いた部分的劣化速度分布と部分的属性情報分布の重ね合わせにより作成した空間マッピングを示している。3.(2)に基づいて、異質性パラメータ値 $\epsilon^k$ と、属性変数として降水量、CBR値、大型車交通量を採用したときの統計的マッピングモデル(式(5a))の推計結果を表-2に示す。降水量に関してt-値が1.96を下回っているが、降水量の影響は簡易舗装の寿命に対して工学的に無視することはできないと判断したために、棄却せずに採用した。図-4(a),(b)を比較することにより部分的属性情報分布の重ね合わせによって表現された空間マッピングが部分的劣化速度分布を精度よく再現していることが理解できる。

#### (4) 空間マッピングと舗装選定

空間マッピングを作成するために採用した属性情報は月平均降水量、日平均交通量、CBR値であり、これらのうち新規道路建設の舗装選定のための政策変数となり得るのは、交通量とCBR値である。すなわち、降水量は与件であり、設計や供用中に制御可能な変数ではない。そのため政策変数に応じた条件ごとの空間マッピングを作成することができる。そこで、図-5には、大型車交通量50台/日、100台/日、150台/日、200台/日の4ケース、CBR値が2.0%~5.9%と10%の2ケース、合計8ケースの空間マッピングを示している。それぞれの空間マッピングより、大型車交通量とCBR値の組み合わせに応じて、当該領域における簡易舗装の期待寿命を把握することができる。例えば交通量が日平均200台以上見込まれ、CBR値が2.0%~5.9%の地域で簡易舗装を選択すると、ミャンマー国内のいずれの地域に道路を新設したとしても、その期待寿命は3年以内である。したがって、この条件下で簡易舗装を選択することは不適切であり、生活道路の建設が不可欠であるならば高級舗装を選択することが望ましい。より具体的に、図中のZ地域にPW-15を建設する計画があると仮定する。交通量が月間200台見込まれ、CBR値が2.0%~5.9%の場合に簡易舗装を採用すると、前述の通りに期待寿命は3年以内である。この地域において、期待される耐用年数が12年以上であるならば、通行規制によって交通量を制限したとしても条件を満たすことはできない。その一方で地盤改良を実施するなど、CBR値を10%以上にすることが可能であり、かつ大型車交通量を100台以下に制限できるならば、耐用年数12年以上を達成することができる。以上のように、空間マッピングを活用することによって新規建設道路に対する舗装選定を支援することができる。

#### 5. おわりに

本研究では、ミャンマーにおける道路事業を対象として、劣化異質性と属性情報を用いた空間マッピング手法を用いて道路舗装の劣化速度を相対評価する方法論を提案した。具体的には、1) 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計により推計された各路線の異質性パラメータの分布である部分的劣化速度分布と、2) 各路線が位置する領域が有する属性情報の分布である部分的属性情報分布との関係を表す統計的マッピングモデルを推計することにより、属性情報のみを用いて領域ごとの劣化速度の評価を行った。また、領域ごとの劣化速度を空間マッピングの作成により可視化し、具体的な使用方法として舗装の選定や交通量規制への適応方法を示し、空間マッピングの実務における有用

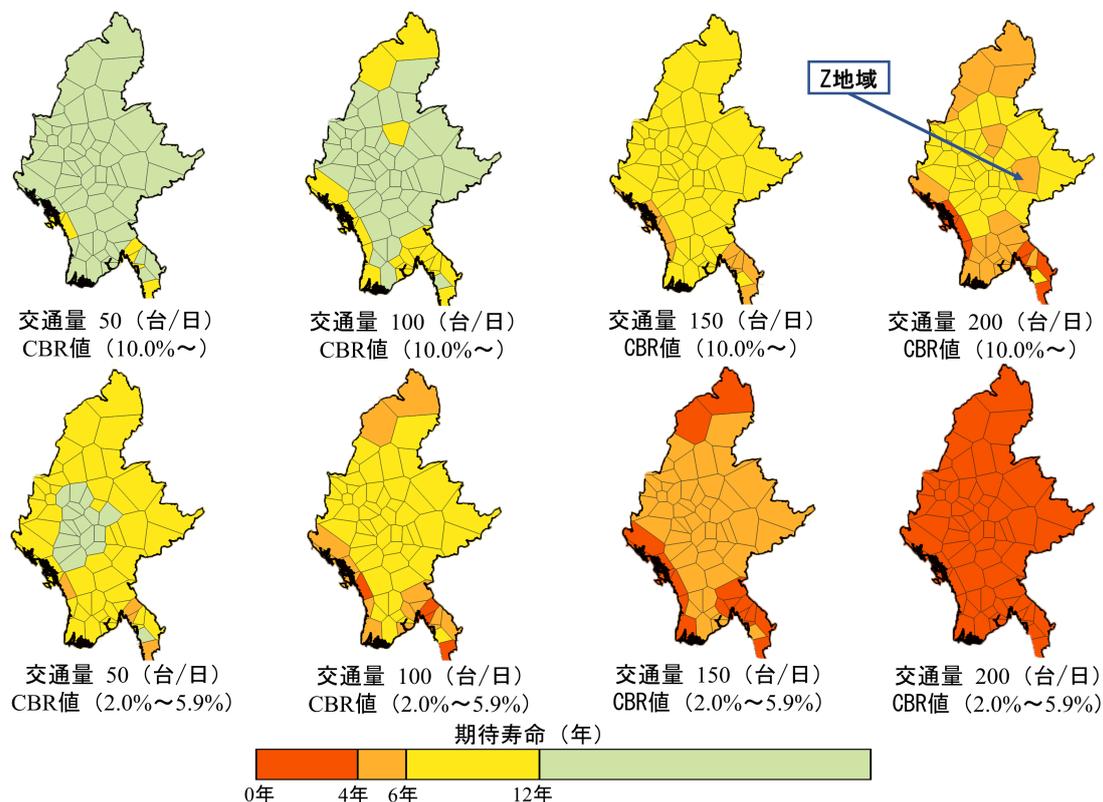


図-5 条件別空間マッピング

性を確認した。

一方で、今後に残された課題を整理しておく。第1に本研究で用いた統計的マッピングモデルの精度向上を図る必要がある。このためには、路面性状点検データが取得可能な道路区間数を増加させることが必要である。第2に本研究は舗装を対象とした1つの事例を提示したに過ぎず、今後その他の社会基盤施設に対する適用を通して適用範囲の拡張を目指していくことが重要である。さらに、社会基盤施設の寿命に着目したマップだけでなく、維持管理の効率性<sup>9)</sup>に着目した管理効率性マッピングのような派生的技術開発も重要となる。

謝辞：本研究は、土木学会インフラマネジメント技術国際展開研究助成「実点検データを用いた統計的劣化予測に基づく社会基盤施設マネジメント技術のミャンマー国での展開」（研究代表者：貝戸清之）と、国立研究開発法人科学技術振興機構、科学技術イノベーション政策のための科学研究開発プログラム「科学的エビデンスに基づく社会インフラのマネジメント政策形成プロセスの研究（研究代表者、貝戸清之）」の助成を受けて実施した。ここに感謝の意を表す。また本研究は、独立行政法人国際協力機構「貧困削減地方開発事業（フェーズ2）」における現地活動をとりあげたものであり、ここに本プロジェクトの関係各位に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 小林潔司: 土木工学における実践的研究: 課題と方法, 土木技術者実践論文集, 土木学会, Vol.1, pp.143-155, 2010.
- 3) 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.
- 4) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推定, 土木学会論文集D3, Vol.68, No.4, pp.255-271, 2012.
- 5) Thao, N., D., Aoki, K., Kato, T., Toan, T., N., Kobayashi, K. and Kaito, K.: A practical process to introduce a customized pavement management system in Vietnam, *Journal of JSCE, F5 Division*, Vol.3, pp.246-258, 2015.
- 6) 小林潔司, 中谷昌一, Nam Toan To, 大迫湧歩, 青木一也, 安部倉完, Dinh Thao Nguyen: 建設時点の不完全性と橋梁劣化予測: ベトナムを対象として, 土木学会論文集F5, Vol.75, No.1, p.22-41, 2019.
- 7) Lai Lai Aung, Ei Ei Zin, Pwint Theingi, Naw Elvera, Phyu Phyu Aung, Thu Thu Han, Yamin Oo and Reidun Gangsto Skaland: Myanmar Climate Report, Norwegian Meteorological Institute METreport, No.9, 2017.
- 8) 杉原厚吉: なわばりの数理モデル, 共立出版, 2009.
- 9) 小林潔司, 貝戸清之, 小濱健吾, 早矢仕廉太郎, 深谷渉: 事業体効率性評価のための確率的劣化ハザードフロンティア分析, 土木学会論文集D3, Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016.