

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成 果 報 告 レ ポ ー ト  
N o . 2022-3

研究テーマ

統計的アセットマネジメント手法に基づく  
バックキャスト型道路政策の深化についての技術研究開発

研究代表者：大阪大学教授

共同研究者：京都大学特任教授，名誉教授

京都大学特定教授

高知工科大学准教授

東北大学助教

大阪大学特任助教

貝戸 清之

小林 潔司

松島 格也

小濱 健吾

水谷 大二郎

笹井 晃太郎

令和 6 年 5 月

新道路技術会議

# 目次

第 1 章	研究概要	1
1.1	研究背景・目的	1
1.2	研究内容	1
1.3	研究体制	2
第 2 章	橋梁部材に対する点検時措置による劣化抑制効果の事後評価 (RQ1-1)	3
2.1	はじめに	3
2.2	本研究の基本的な考え方	3
2.3	適用事例	5
2.4	おわりに	9
第 3 章	劣化・回復過程を考慮した層別修繕によるたわみ回復量の評価 (RQ1-2)	11
3.1	はじめに	11
3.2	本研究の基本的な考え方	12
3.3	適用事例	16
3.4	おわりに	21
第 4 章	連続量を用いた多元的劣化過程モデルによる高速道路の予防保全に向けた提案 (RQ2)	24
4.1	はじめに	24
4.2	本研究の基本的な考え方	24
4.3	適用事例	26
4.4	おわりに	30
第 5 章	部材・損傷の劣化シミュレーションに基づく橋梁の補修優先順位の決定 (RQ3)	32
5.1	はじめに	32
5.2	本研究の基本的な考え方	32
5.3	リスク分析	33
5.4	適用事例	37
5.5	おわりに	38
第 6 章	道路ネットワークの日・区間別の年次補修・規制計画：Bi-level 解法による最適化 (RQ4)	41
6.1	はじめに	41
6.2	本研究の基本的な考え方	41
6.3	適用事例	43
6.4	おわりに	46

# 第 1 章 研究概要

## 1.1. 研究背景・目的

道路インフラに対するメンテナンスやマネジメントを実践するためのデータ収集を目的とするハードウェア技術の発展が著しく、フィールドから膨大な量のデータが獲得されている。このような状況のもとで DX 時代におけるアセットマネジメントの展望を見据えると、今後は工程ごと、構造種別ごとに分権的に蓄積されたビッグデータを融合させ、いかにして意思決定の高度化に資する情報へと昇華させていくか、いかにして道路施策の深化に資する知見を創出させていくかが重要な研究課題となる。研究代表者等は、これまで目視点検データを用いた統計的劣化予測技術を基軸とする統計的アセットマネジメント手法の開発に携わってきた。本研究開発においても、統計的劣化予測に基づくアセットマネジメントを中心に、DX 時代におけるバックキャスト型道路政策を効率的に支援し、深化させる方法論を開発する。

従来のアセットマネジメントにおいては、補修を経験した道路インフラが少数であったために、補修の実施に伴う健全度の回復によって、（補修が実施されていなければ観測されていたであろう）それ以降の劣化状態が観測できなくなるというサンプル欠損バイアスの影響を無視することができた。しかし、近年補修を経験した道路インフラの数が増加している（増加し続ける）こと、補修が実施される道路インフラは相対的に劣化の進展速度が速い傾向にあることを勘案すると、令和 6 年の点検 3 巡目以降の劣化予測精度にサンプル欠損バイアスが及ぼす影響が無視できなくなる可能性は想像に難くない。そのため、本研究開発ではリサーチクエスション（RQ）1-1「サンプル欠損バイアスの影響下において、その影響を考慮した統計的劣化予測は可能か」という問いを課し、課題解決のための方法論を開発する。また従来のアセットマネジメントでは、補修によって道路インフラの健全度は想定した健全度まで回復し、補修後の道路イン

フラは補修前と同様の劣化過程を進むものと考え、それが永続的に繰り返されるという前提のもと、ライフサイクル費用最小化を達成するような最適補修計画の立案に主眼が置かれてきた。補修を経験した道路インフラが増え、それらの点検データがある程度蓄積されてきたことから、RQ1-2「補修による健全度回復量と、補修後の劣化速度を定量的に評価できるか」を設定し、これらを同時推定可能な劣化モデルと推定手法を開発する。RQ1-1 と RQ1-2 によって二期目以降（補修後）のライフサイクルを迎える道路インフラのアセットマネジメントの体系化を図る。

このアセットマネジメント手法を基幹技術として、これまでのアセットマネジメントでは用いられてこなかった詳細な劣化属性情報や、アセットマネジメント以外の道路政策との融合を視野に入れて、RQ2「アセットマネジメントと劣化属性情報との融合による意思決定の高度化は可能か（アセットマネジメント×属性情報）」、RQ3「科学的根拠に基づく EBPM の道路政策への適用は可能か（アセットマネジメント×EBPM）」、RQ4「道路ネットワークとしてのリスク評価は可能か（アセットマネジメント×リスクマネジメント）」を設定して、従来分権的に検討されることが多かった道路政策に対して、DX 時代を見据えた意思決定の高度化と政策の深化を図る。

## 1.2. 研究内容

### 1.2.1. 補修を経験した道路インフラ群のアセットマネジメントに関する研究

a) サンプル欠損バイアスを考慮した統計的劣化予測手法の精緻化

小林等の先駆的研究<sup>\*1</sup>を踏襲した上で、モデルの修正・拡張、ベイズ推定アルゴリズムを構築する点に学術的特

<sup>\*1</sup> 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.

色を有する。これにより、例えば道路橋を対象とした場合には（補修がなされた道路インフラの割合が増加していく）3 巡目以降の点検データを用いた場合であっても、精緻な劣化予測が可能となり、補修優先順位の決定（ベンチマーキング）や最適補修計画の立案（プロファイリング）を支援することができる。

b) 劣化速度に着目した補修効果の定量的評価手法の開発

補修による健全度回復量と補修後の劣化速度を潜在変数とした混合確率モデルとその同時推定アルゴリズムの開発に学術的価値と独創性を見出すことができる。また、橋梁、あるいは舗装に対する点検データを用いた適用事例を通して、回復量と劣化速度を 2 指標とする補修効果の定量的評価が可能となる。これにより、補修を経験した道路インフラが多数を占める状況下におけるアセットマネジメント手法の体系化を図ることができる。

1.2.2. 補修優先順位および工法選定手法の開発

例えば、点検データと詳細な補修履歴、あるいは交通情報（ETC2.0 やトラフィックカウンター）などの劣化属性情報を融合させることによって高度な意思決定や、派生的な意思決定に貢献する知見の創出が可能となる。これより、前者では、例えば舗装の層別補修の工法選択（補修工法選定チャート）と最適タイミングの決定（全層打ち替えのタイミング決定）、後者では過積載車両が舗装に及ぼす影響の評価、さらには過積載車両の取り締まり強化に向けたエビデンスとしての利活用が考えられる。

1.2.3. 個別施設計画を事例とする EBPM の開発

統計的劣化予測に基づく道路インフラの期待寿命を科学的根拠として、橋梁の個別施設計画の立案を試みる。アセットマネジメントと EBPM を融合させる点に独創性を有し、部材の健全度評価から橋梁全体評価への移行にフォルトツリー分析を用いること、さらにフォルトツリーの末端事象の重みを AI を援用して（点検データを用いて機械学習させ）決定する点に学術的特徴がある。これにより、道路管理者の技術レベルに依存しない個別施設計画書の作成と、作成された個別施設計画の事後検証が可能となる。

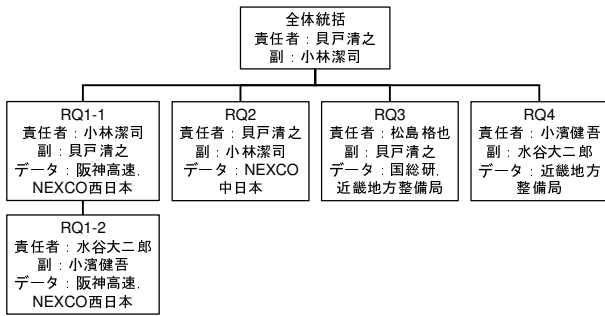
1.2.4. 経年劣化を考慮した道路ネットワークのリスク評価手法の開発

経年劣化を考慮した道路インフラのリスク評価が可能となる（アセットとリスクマネジメントの融合）。さら

に構造種別間のリスク評価を融合させることによって、道路ネットワークとしてのリスク評価を行う。この技術から派生的に、ネットワークの脆弱性評価（クリティカルインフラの抽出）や、レジリエンス評価への道筋を付ける。

1.3. 研究体制

(1) 体制図



上図の RQ（リサーチクエッション）は 1.2 に記した研究項目と以下の様に対応している。

RQ1-1：サンプル欠損バイアスを考慮した統計的劣化予測手法の精緻化

RQ1-2：劣化速度に着目した補修効果の定量的評価

RQ2：補修優先順位および補修工法選定のための方法論の開発

RQ3：個別施設計画を事例とする EBPM の開発

RQ4：経年劣化を考慮した道路ネットワークのリスク評価手法の開発

(2) 研究者所属・役職

	研究者氏名	所属	役職
○	貝戸 清之	大阪大学	准教授 ※ 1
	小林 潔司	京都大学	特任教授、名誉教授
	松島 格也	京都大学	准教授 ※ 2
	小濱 健吾	大阪大学	特任准教授 ※ 3
	水谷 大二郎	東北大学	助教
	笹井 晃太郎	大阪大学	特任研究員 ※ 4

※ 1 令和 6 年 3 月より大阪大学教授

※ 2 令和 5 年 6 月より京都大学特定教授

※ 3 令和 6 年 4 月より高知工科大学准教授

※ 4 令和 6 年 4 月より大阪大学特任助教

## 第 2 章 橋梁部材に対する点検時措置による劣化抑制効果の事後評価 (RQ1-1)

### 2.1. はじめに

現在我が国では約 73 万橋の橋梁が供用下にある。そのうち建設から 50 年以上経過した橋梁の割合は 2022 年時点では約 34% であり、2032 年には 59% に達することが見込まれていることから、老朽化の進行が懸念されている<sup>1)</sup>。増加する損傷に対して、道路会社は補修数の増加、要補修損傷の発生抑制に努めている。要補修損傷の発生抑制のために道路会社では点検時に応急措置を行うことがある（以下、「点検時措置」と称する）。点検時措置は点検実施時に損傷の応急措置を行うこと<sup>2)</sup>と定義され、定期点検実施時に発見された損傷のうち応急措置が可能なものについては点検と同時に措置を行うとともに、措置実施内容を点検結果と共に記録し点検データを蓄積している。点検時措置の目的には安全性の向上（第三者への影響の抑制）と予防保全がある。予防保全を目的とする措置では軽微な損傷に対して簡易補修を行うことにより損傷の進行を遅らせ要補修損傷へ成長させないこと、すなわち次回点検実施時に発見される要補修損傷数の抑制が期待される。しかしながら点検措置実施による要補修損傷の発生抑制効果に対する定量的評価は未だなされていない。

そこで本研究では、軽微な損傷に対する点検時措置が要補修損傷の発生抑制に及ぼす効果を表-2.1 に示す各劣化状態に分類される将来の損傷数により評価を行う。具体的にはまず、点検時措置を実施、未実施それぞれのデータに基づきマルコフ劣化ハザードモデル<sup>3),4)</sup>により劣化過程を推定する。次に点検時措置を現行の実施数から変更することが法定点検間隔である 5 年経過後にそれぞれの劣化状態に分類される損傷数に及ぼす影響について劣化・補修のシミュレーションを通じて感度分析により推定する。しかし、点検時措置の実施の有無により各損傷の劣化過程が本来の過程から変化することが想定

されるため、点検時措置実施・未実施の点検データからそれぞれ直接推定可能な劣化過程のみを考慮することは不十分である。そこで本研究では、点検時措置の実施に伴う点検データの選択バイアスを考慮可能な劣化予測モデル<sup>5)</sup>を用いて感度分析の実施に十分な劣化過程を推定し、シミュレーションに適用する。

### 2.2. 本研究の基本的な考え方

#### 2.2.1. 点検時措置

道路管理者では定期点検時に発見された損傷に対し発見時点で軽微な補修を施すことがある。例えば、定期点検時に鋼部材の浮き錆を伴うさび腐食損傷を発見した場合は落下する可能性の高い浮き錆を除去した後、防錆スプレーを塗布する。また、コンクリート部材の浮きを発見した場合は、浮き部分を除去し内部の鉄筋が露出している場合には鉄筋に対し防錆スプレーを塗布し、コンクリートを除去した範囲に剥落防止スプレーを塗布する。

なお、今回対象とした道路構造物においてその損傷の程度は表-2.1 に示す判定区分に基づき 5 段階で判定され、S は緊急の対策が必要な損傷、A は対策を要する損傷、B は損傷の状況を観察する必要がある損傷、C は軽微な損傷、そして OK はそれ以外の損傷と定義している。また、浮き錆やコンクリートの浮き等の落下の恐れがある損傷を含み、第三者への影響が懸念される損傷は判定区分のうち S2 ランクの損傷とされ、第三者への影響を抑制する目的で点検時措置を実施する。

一方で図-2.1 図-2.2 に示す一例のように、落下の恐れがある損傷を含まず、B ランクや C ランクに区分される比較的軽微な損傷に対しても、損傷の進行を遅らせ劣化の抑制を目的として、鋼部材のさび腐食に対しては防錆スプレーを塗布し、コンクリート部材の露出した鉄筋に対しても防錆スプレーの塗布およびはく落防止スプ

表 2.1 道路会社における定期点検の点検判定区分と本研究に用いる健全度

損傷区分 (道路会社)		損傷状態	本研究での 健全度
S	S1	機能低下が著しく、 構造物の安全性から緊急に対策の必要がある場合	-
	S2	第三者への影響があると考えられ、緊急に対策の必要がある場合	
	A	機能低下があり対策の必要がある場合	
	B	第三者に対し影響を及ぼす恐れ等があり対策の必要がある場合	
	C	損傷の状況を観察する必要がある場合	
	OK	損傷が軽微である場合	
		上記以外の場合	1

レーを塗布する。

本研究では、表-2.1 に示す判定区分のうち A ランクに区分される損傷を要補修損傷、B および C ランクに区分される損傷を軽微な損傷と定義する。そして劣化の抑制を目的として軽微な損傷に実施される点検時措置の要補修損傷の発生抑制効果を定量的に評価する。また、以降判定区分 OK, C, B, A を健全度 1, 2, 3, 4 とそれぞれ表記することとする。健全度の判定と点検時措置について点検開始から終了までを時系列で整理したものを図-2.3 に示す。点検では損傷毎に損傷状態を判定し健全度を記録する（措置前判定）。ここで本研究では点検時措置は点検の対象である全ての損傷のうち、劣化速度が大きいものから優先的に実施されると仮定する。措置前判定により点検時措置の実施が決定された損傷（劣化速度が相対的に大きいと判断された損傷）に対しては点検時措置が実施され、新たに損傷状態が判定、記録される（措置後判定）。なお、実施する点検時措置の内容によっては措置前判定と措置後判定が同じ健全度となる場合も存在する。一方で点検時措置が不要とされた損傷（劣化速度が相対的に小さいと判断された損傷）に対しては点検時措置は実施されず、便宜上、措置後判定として措置前判定と同じ健全度が記録される。

### 2.2.2. 劣化過程の分類

前述の通り、本研究では点検対象の全ての損傷  $\Omega$  のうち相対的に劣化速度が大きい損傷  $+\Omega$  から優先的に点検時措置が実施されると仮定する。また、点検時措置が未実施である損傷は相対的に劣化速度が小さい損傷  $-\Omega$  と表す。いま図-2.4 に示すように  $\Omega, +\Omega, -\Omega$  それぞれについて措置が実施された場合、されなかった場合の計 6 通りの劣化過程を考える。

このうち点検データから直接、推定することが可能な劣化過程は  $+\Omega$  に対して点検時措置が実施された劣化過程 1 と点検時措置が未実施の  $-\Omega$  から推定される劣化過程 2 である。他の 4 つの劣化過程は点検データから直接

推定することが不可能であるため、以降、点検データから劣化過程 3,4,5,6 を推定する手法について述べる。

まず、点検データから直接推定が可能な劣化過程 2 に基づき劣化過程 3,4 を推定する手法について述べる。劣化過程 2 と 3 の相違点は対象とする損傷が  $-\Omega$  であるか  $\Omega$  かにある。 $-\Omega$  は  $+\Omega$  を含まない。つまり劣化過程 3 は全ての損傷からなる集合に対する劣化過程を表し、劣化過程 2 は相対的に劣化速度が大きい損傷についての情報が欠損している集合に対する劣化過程を表す。すなわち  $-\Omega$  に基づき推定される劣化過程は劣化速度が大きい損傷についてのサンプル欠損バイアスが生じている。したがって、参考文献<sup>5)</sup>で提案されているサンプル欠損バイアスを考慮した劣化予測モデルを適用することにより  $+\Omega$  の情報の欠損によるバイアスを補正できるため、全ての損傷  $\Omega$  に対する劣化過程 3 を推定することができる。また、劣化過程 4 は劣化速度が大きい損傷の集合  $+\Omega$  に対する劣化過程である。したがって全損傷  $\Omega$  に対する劣化過程 3 を基に仮想サンプルを用いた劣化シミュレーションを実施し、シミュレーション結果から劣化の進行が速い仮想サンプルの劣化過程に着目することにより劣化過程 4 を推定することができる。

次に点検データから直接的に推定可能な  $-\Omega$  に対する劣化過程である劣化過程 1 に基づき劣化過程 5,6 を推定する手法について述べる。劣化過程 1 と 5 の相違点は対象とする損傷が  $+\Omega$  であるか  $\Omega$  かにある。 $+\Omega$  は  $-\Omega$  を含まない。つまり劣化過程 5 は全ての損傷からなる集合に対する劣化過程を表し、劣化過程 1 は相対的に劣化速度が小さい損傷についての情報が欠落している集合の劣化過程を表す。すなわち、 $+\Omega$  に基づき推定される劣化過程 1 は劣化速度が相対的に小さい損傷についての情報の欠損（以下、サンプル欠損逆バイアス）が生じている。そこでサンプル欠損バイアスを考慮した劣化予測モデルを適用することにより  $-\Omega$  の情報の欠損に起因したデータバイアスを補正できるため、全ての損傷  $\Omega$  に対して点



図 2.1 点検時措置前



図 2.2 点検時措置後

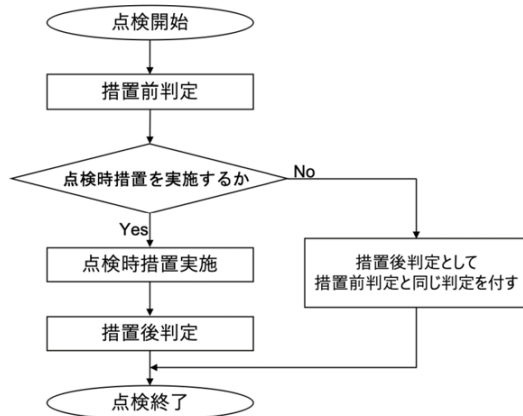


図 2.3 点検開始から終了までの流れ

表 2.2 点検データ諸元

適用対象	鋼桁端部・本体さび腐食、 RC 橋脚鉄筋露出 等
措置内容	防錆処置
サンプルサイズ	194,279
前回点検年度	H11-R2
今回点検年度	H26-R4

表 2.3  $+\Omega$  の健全度分布

		今回措置前判定				合計
		1(OK)	2(C)	3(B)	4(A)	
前回前判定	1(OK)	7,425	8,079	2,095	154	17,753
	2(C)	0	5,564	440	217	6,221
	3(B)	0	0	1,647	138	1,785
	4(A)	0	0	0	1,058	1,058
合計		7,425	13,643	4,182	1,567	26,817

検時措置が未実施の場合の劣化過程 5 を推定できる。また、劣化過程 6 は劣化速度が相対的に小さい損傷の集合  $-\Omega$  に対する劣化過程である。したがって全損傷  $\Omega$  に対する劣化過程 5 を基に仮想サンプルを用いた劣化シミュレーションを実施し、シミュレーション結果から劣化の進行が遅い仮想サンプルの劣化過程に着目することにより劣化過程 6 を推定することができる。

### 2.2.3. サンプル欠損バイアス

点検データを基に劣化過程 3 を推定することを考える。 $-\Omega$  は劣化速度が相対的に小さい損傷からなる集合のため、 $-\Omega$  のみに基づき劣化過程を推定した場合、劣化過程を過小評価してしまう恐れがある。ここで点検時措置が未実施のデータにおいて  $-\Omega$  は獲得可能であることに對して、 $+\Omega$  は獲得不可能である。本来、劣化過程 3 は両方のデータを基に推定する必要がある。しかし、実際に獲得されているデータのみに基づき劣化過程を推定した場合は  $-\Omega$  のみからなる劣化過程となるため劣化速度を過小評価することとなる。このように一部のサンプルがシステムの理由により獲得できないために生じる劣化過程の過小評価問題をサンプル欠損バイアスと称する。

### 2.2.4. サンプル欠損逆バイアス

点検データに基に劣化過程 5 を推定することを考える。点検時措置の仮定から措置対象となる損傷データは相対的に劣化速度が大きい損傷からなる集合  $+\Omega$  である。したがって  $+\Omega$  のみに基づき劣化過程を推定した場合、劣化速度を過大評価してしまう恐れがある。ここで点検時措置が実施されたデータにおいて  $+\Omega$  は獲得可能であることに對して、 $-\Omega$  は獲得不可能である。本来、劣化過程 5 は  $\Omega$  に基づき推定する必要がある。しかし、実際に獲得されているデータのみに基づき劣化過程を推定した場合は  $+\Omega$  のみからなる劣化過程となるため劣化速度を過大評価することとなる。このように一部のサンプルがシステムの理由により獲得できないために生じる劣化仮定の過大評価問題をサンプル欠損逆バイアスと称する。また全体の本研究フローを図-2.7 に示す。

## 2.3. 適用事例

### 2.3.1. 概要

本研究で提案した手法を点検データに適用し分析を行う。分析の対象とする点検データの諸元を表-2.3.1 に示す。点検データに記録されている損傷に対する措置

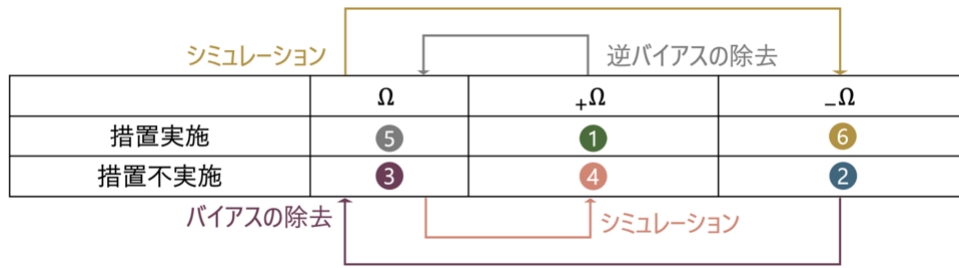


図 2.4 劣化過程と評価の流れ

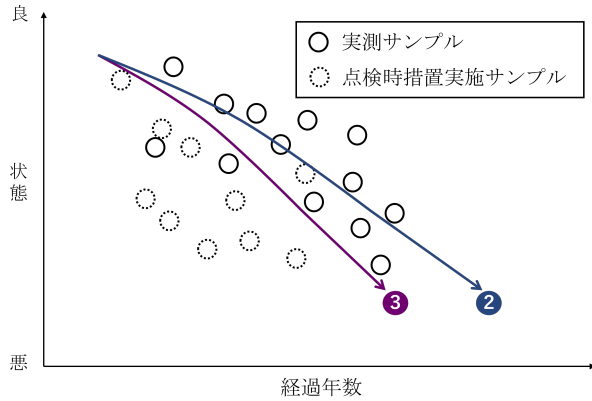


図 2.5 劣化速度の大きいサンプルが欠損するメカニズム

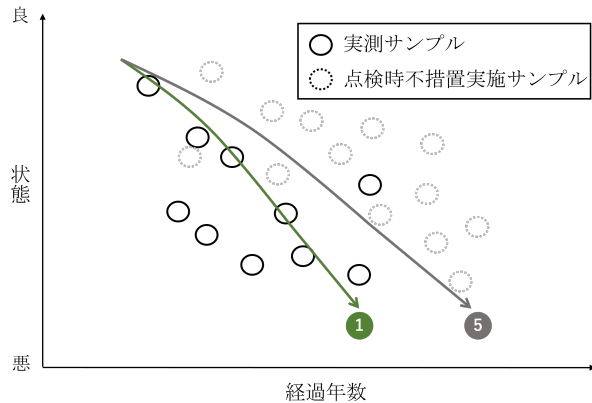


図 2.6 劣化速度の小さいサンプルが欠損するメカニズム

内容は防錆処置に限らないが、分析には一定のサンプルサイズが必要であることを踏まえ、本研究では点検時措置内容の中でも最も多く実施される防錆処置を対象とした。使用する点検データ全体を  $\Omega$  とし、点検時措置により防錆スプレーが塗布された損傷群を  $+\Omega$ 、塗布されなかった損傷群を  $-\Omega$  とする。また、健全度の基準は表-2.1 に従うこととする。  $+\Omega$  のサンプルサイズは 26,816、  $-\Omega$  のサンプルサイズは 167,461 である。  $+\Omega$ 、  $-\Omega$  の劣化に関する健全度推移の分布を表-2.3 および表-2.4 に示す。また、  $+\Omega$  から得られた点検時措置の実施による健全度の回復の実績値を表-2.5 に示す。

表 2.4  $-\Omega$  の健全度分布

		今回措置前判定				合計
		1(OK)	2(C)	3(B)	4(A)	
前回後判定	1(OK)	10	28	11	0	49
	2(C)	0	111,878	7,806	501	120,185
	3(B)	0	0	39,274	1,634	40,908
	4(A)	0	0	0	6,320	6,320
合計		10	111,906	47,091	8,455	167,462

表 2.5 点検時措置による健全度回復の分布

		今回措置前判定			
		1(OK)	2(C)	3(B)	4(A)
前回後判定	1(OK)	1	0	0	0
	2(C)	0.690	0.310	0	0
	3(B)	0.686	0.041	0.273	0
	4(A)	0	0.001	0.001	0.998

特性  $x$  としては定数項のみを採用し、  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T$  とする。この点に関しては、本来であれば様々な特性を考慮した上で多角的に検討することが求められる。しかし、本研究においては統計的に有意な特性が存在しなかったこと、および特性を考慮するとその組み合わせによってはサンプル数が極端に少なくなってしまうことから、特性として定数項のみを採用した。

### 2.3.2. 劣化過程 1, 2, 3, 5 の推定

MCMC 法におけるバーンイン回数は  $\bar{l} = 2,000$ 、アルゴリズム回数は  $\bar{l} = 12,000$  とする。以上の条件に基づいた  ${}_u\beta$  のベイズ推計推定結果を表-2.6 に示す。いずれの Geweke 検定統計量も絶対値が 1.96 以下であることから、有意水準 5% で MCMC 法によるパラメータのランダムサンプリングが定常状態に収束していることを意味する収束仮説を棄却できない。マルコフ劣化ハザードモデルにおいては、各健全度の寿命はその健全度のハザード率をパラメータに持つ指数分布に従うため、それぞれの劣化過程の健全度  $i$  の期待寿命  ${}_uRMD_i$  は

$${}_uRMD_i = \int_0^\infty {}_u\zeta_i u f_i({}_u\zeta_i) d{}_u\zeta_i = \frac{1}{\exp(-{}_u\beta_i)} \quad (2.1)$$



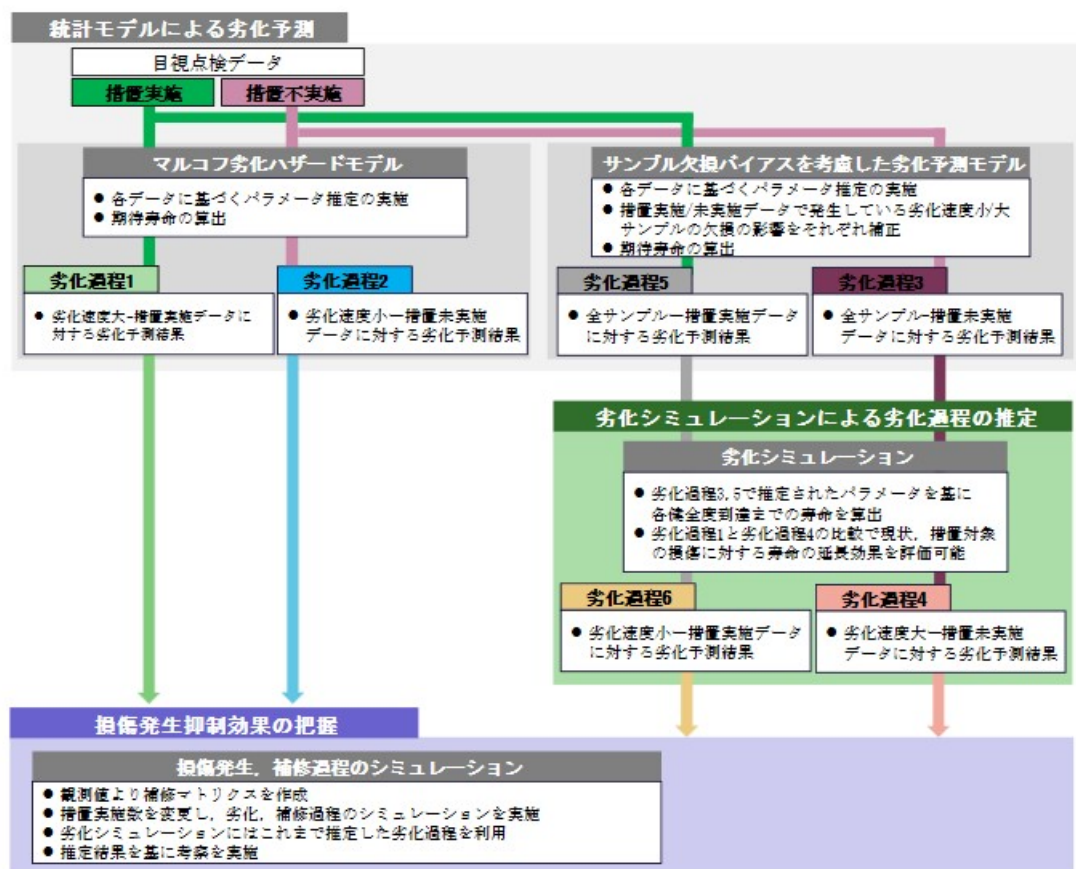


図 2.7 本研究で実施する分析

表 2.6 パラメータ推定結果

事後分布統計量	健全度	パラメータ推定値			
		$1\beta_i$	$2\beta_i$	$3\beta_i$	$5\beta_i$
期待値	1(OK)	-1.530	-0.889	-1.540	-0.885
GEWEKE 検定統計量		-0.458	-0.124	-0.641	-1.783
期待値	2(C)	-2.867	-4.120	-2.448	-4.236
GEWEKE 検定統計量		0.516	1.309	1.396	0.179
期待値	3(B)	-3.137	-4.521	-3.244	-3.962
GEWEKE 検定統計量		-0.386	-0.460	-1.738	1.260

表 2.7 シミュレーション結果

健全度推移	$4RMD_i$	$6RMD_i$
1 → 2 (OK → C)	0.36	14.20
1 → 3 (OK → B)	12.72	41.14
1 → 4 (OK → A)	41.54	98.40

であり，劣化過程 1 および 2 の平均的な経時変化を図-2.3.2 に示す。

### 2.3.3. 劣化過程 4, 6 の推定

劣化過程 3, 5 に基づいて，それぞれ劣化過程 4, 6 の推定を行う．まず，劣化過程 3 に基づく劣化現象のシミュレーションを行う．この劣化過程は  $+K + -K$  個の要素からなる  $\Omega$  の平均的な劣化過程とみなせるため，シミュレーション結果のうち，寿命が下側  $100 \times \frac{+K}{+K + -K} \%$  点に相当する劣化過程が， $+K$  個の要素からなる  $+\Omega$  の平均的な劣化過程 4 に対応すると考える．同様に，劣化過程 5 に基づく劣化現象のシミュレーションを行う．その

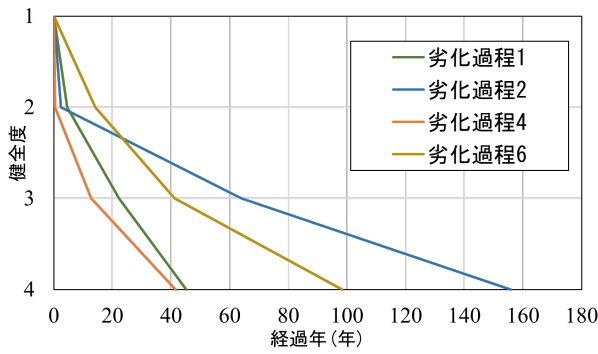


図 2.8 劣化過程

上で、この劣化過程は  $+K + -K$  個の要素からなる  $\Omega$  の平均的な劣化過程とみなせるため、シミュレーション結果のうち、寿命が上側  $100 \times \frac{+K}{+K + -K} \%$  点に相当する劣化過程が、 $-K$  個の要素からなる  $-\Omega$  の平均的な劣化過程 6 に対応すると考える。シミュレーションにより得られた各劣化過程の期待寿命を表-2.7 に示す。また、劣化過程 4 および 6 の平均的な経時変化を図-2.3.2 に示す。

#### 2.3.4. 点検時措置の実施数の影響評価

$c_{,i}k_j (c \in \{+, -\}, i \in \{2, 3\}, j \in \{1, 2, 3, 4\})$  を表-2.8 に示す。各値は正であれば措置実施数を増加させた際に当該健全度に分類される損傷数が増加し、負であれば措置実施数を増加させた際に当該健全度に分類される損傷数が減少することを表す。ただし、健全度 1, 4 に対しては、措置実施数の変更による影響が顕著に見られなかったため割愛し、健全度 2, 3 に対して詳細な分析と考察を与える。まず、全体を考察する。いずれの集合に対しても措置実施数を変更する健全度より小さい健全度（表-2.8 赤着色部）の 5 年後の増加率は 22% 以上である。また、 $-\Omega$  の健全度 2 に対する実施数の変更を除き、措置実施数を変更する健全度以上の健全度（表-2.8 青着色部）の 5 年後の増加率は負値である。このことから、措置実施数を現行から増加させれば 5 年後の損傷群の状態は改善される（例えば、健全度 3 に対する点検時措置数を 100 件増加させると、5 年後の健全度 4 要補修損傷（要補修損傷健全度 4）は 10 件減少する）ことがわかり、一方で減少させれば 5 年後の損傷群の状態は悪化することがわかる。次に、措置実施数を変更する健全度より小さい健全度（表-2.8 赤着色部）の増加率について考察する。増加率は以下の 2 つの要因により依存する。第一は、点検時措置の実施による健全度の一時的な回復である。第二は、措置実施数の変更により本来と異なる劣化過程を経験する損傷が存在することによる長期的な劣化速度の抑制である。措置実施数の変更によって

経験する劣化過程が変更された際、その劣化過程が本来の劣化過程に比べて劣化速度が小さければ、5 年間でその差に起因する状態の改善が確認できる。実際、 $+\Omega$  に対して措置実施数を増加させた場合は劣化過程が 4 から 1 に変更される損傷があるが、図-2.3.2 より劣化過程 4 より劣化過程 1 のほうが劣化速度が小さいことが確認できる。つまり、 $+\Omega$  に対しては 2 つの要因の双方により、増加率が正值となったことがわかる。一方、 $-\Omega$  に関しては劣化過程が 2 から 6 に変更される損傷があるが、図-2.3.2 によれば劣化過程が 2 より 6 のほうが劣化速度が大きいことが確認できる。しかし、健全度 3 までの劣化速度に大きな違いは見られないことから、 $-\Omega$  に対しては 2 つの要因のうち点検時措置の実施による健全度の一時的な回復のみにより、増加率が正值となったことが考えられる。さらに、措置実施数を変更する健全度以上の健全度（表-2.8 青着色部）の増加率について考察する。点検時措置の目的は損傷群の状態の改善であるため、措置実施数を変更する健全度以上の健全度の増加率は負値であることが望ましい。上と同様に、 $+\Omega$  に対しては 2 つの要因の双方により増加率が負値となったことが考えられる。 $-\Omega$  に関して、図-2.3.2 から劣化過程 2 と 6 の健全度 3 までの劣化速度は健全度 4 までの到達年数と比較して小さい値であるため、健全度が 3 に分類される損傷数に関する増加率は、点検時措置の実施による健全度の一時的な回復のみにより負値となったと考えられる。一方、劣化過程 6 の健全度 3 以降の劣化速度は劣化過程 2 より大きく、これは点検時措置の実施により劣化速度が抑制されるという想定から反する結果である。そのため、点検時措置の実施による健全度の一時的な回復の効果が劣化速度の逆転により抑制されている。劣化速度の逆転の原因として、 $-\Omega$  に本研究で定義したサンプル欠損が十分に生じていなかった可能性が考えられる。この点に関しては追加的な考察が求められるが、本研究においては措置実施数変更の影響評価を目的に 6 つの劣化過程を考えることを優先した。しかし、表-2.4 より  $-\Omega$  で健全度 4 に分類される損傷数はそもそも少なく、結果として  $_{-,2}k_4$ ,  $_{-,3}k_4$  の絶対値が小さく、これら 2 つの増加率は他の増加率に比べて十分に無視できるといえる。以上の結果を点検時措置の意思決定に反映させるためには、絶対値の大きい  $c_{,i}k_j$  に着目すればよい。維持管理のための予算は限られているため、より少ない点検時措置で損傷群の状態が改善することが好ましく、点検時措置の実施を見送った場合に、損傷群の状態の悪化の程度が小さい損傷対象に関しては点検時措置を実施しないという意思決定ができる。措置実施数を変更する

表 2.8 増加率

サンプル集合	実施数変更健全度	増加率			
		1(OK)	2(C)	3(B)	4(A)
$+\Omega$	2(C)	0.23	-0.05	-0.17	-0.02
	3(B)	0.23	0.42	-0.55	-0.10
$-\Omega$	2(C)	0.49	-0.48	-0.01	0.00
	3(B)	0.48	0.22	-0.67	-0.03

健全度より小さい健全度の増加率の絶対値は総じて大きい  
ため、措置実施数の変更のこれらへの影響は顕著である。  
しかし、措置実施数を変更する健全度以上の健全度の増加率の絶対値の中には小さいものもある。 $+\Omega$ 、 $-\Omega$   
いずれに対しても、健全度 2 の措置実施数を変更したとき  
の増加率に比べて健全度 3 に対する増加率のほうが大きい  
傾向にある。そのため、将来発生する要補修損傷のさらなる  
発生抑制を期待する措置実施数の増加場合は、健全度 2 より 3  
に対する点検時措置数ほうを増や優先すべきである。この結果は、  
健全度 3 に対する措置実施数を減少させた場合に損傷群の状態が  
より顕著に悪化することと同値であるため、点検時措置数の最適化  
のために措置実施数を減少させる場合は、際に優先すべきは健全度 2  
に対する点検時措置数を減らすべきである。

## 2.4. おわりに

本研究では、軽微な損傷に対する点検時措置の要補修  
損傷発生抑制効果を、将来の各健全度に分類される損傷  
数に与える影響を評価することで定量的に評価した。点  
検時措置の実施数を変更した際に本来と異なる劣化過程  
を経験する損傷が存在することを指摘し、サンプル欠損  
の概念を拡張することで不足する劣化過程を推定する手  
法を提案した。その上で、点検時措置の実施数を現行か  
ら変更した場合、5 年後に各健全度に分類される損傷数  
の変化率を増加率として定義し、点検時措置が損傷群に  
与える影響を評価する手法を提案した。その結果、次の  
2 点が明らかになった。1 つ目は、軽微な損傷に対する  
点検時措置の実施は、5 年後の要補修損傷の発生を抑制  
させる効果を有することが明らかとなった。2 つ目は、  
健全度 3 に対する措置実施数を増加させたときの要補修  
損傷発生抑制効果は、健全度 2 に対する措置実施数を増  
加させたときのその効果より顕著であった。そのため、  
将来発生する要補修損傷を抑制するために点検時措置の  
実施数を変更する必要がある場合、健全度 3 に対する点  
検時措置数を増加させることで、5 年後の構造物の状態  
を改善することができる。一方、点検時措置実施数の最

適化のために措置実施数を減少させる必要がある場合、  
健全度 2 に対する点検時措置を減少させることで、5 年  
後の構造物の状態が悪化する影響を小さく抑えることが  
できる。最後に、本研究の残された課題について 2 点記  
す。第一として、本研究で提案した手法を用いるため  
には、解析に十分なデータ数が求められる点があげられ  
る。点検時措置として実施される措置内容に着目した際  
、その措置内容が施された損傷数が解析に十分でないもの  
が少なからず存在し、その措置内容に関して考察するこ  
とが不可能であった。実際、本研究における評価は防錆処  
置に対してのみである。第二として、点検時措置の実施  
により劣化速度が増大したケースが存在したことがあげ  
られる。この原因の可能性として、対象の損傷群に本研  
究で定義したサンプル欠損が生じていなかった可能性が  
考えられる。この問題の実務上の影響は十分無視でき  
ると結論付けたが、今後考察を続けることにより解決す  
ることが望まれる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2022。  
[Road Bureau MLIT:Douro maintenance nenpou ,  
2022]
- 2) 阪神高速道路株式会社，阪神高速技術株式会社：  
道路構造物の点検要領，2018。[Hanshin Express-  
way Company Limited, Hanshin Expressway Engi-  
neering Company limited:Inspection Procedure for  
Road, 2018.]
- 3) 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.[Tsuda,Y.,  
Kaito,K., Aoki,K. and Kobayashi,K.:Estimating  
Markovian Transition Probabilities For Bridge De-  
terioration Forecasting, Journal of JSCE, No.801  
I-73, pp.69-82, 2005. ]
- 4) 小林潔司，小濱健吾：リスク・アセットマネジメント  
のための統計数理，電気書院，2019。[Kobayashi,K.

and Obama,K.:*Risk AssetManagement no tameno toukeisuuri, Denkishoin, 2019.*]

- 5) 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.[Koyabashi,K., Kumada, K., Sato,M., Iwasaki,Y. and Aoki, K.:A pavement deterioration forecasting model with refferenct to sample dropping, Journal of JSCE, Vo.63, No.1, pp.1-15,2007.][
- 6) 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.[Kaito,K.and Kobayashi,K.:Bayesian Estimation of markov deterioration hazard model, Journal of JSCE, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.]
- 7) Geweke, J. : Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments, Bayes-ian Statistics, Vol. 4, pp.169-193, Oxford University Press, 1996.
- 8) Chib, S.: Marginal likelihood from Gibbs output, Journal of the American Statistical Association, Vol.90, pp.1313-1321, 1995.
- 9) Newey, W. K. and West, K. D.: A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation coisistent covariance matrix, Econometrica, Vol.55, pp.703-708, 1987.

## 第3章 劣化・回復過程を考慮した層別修繕によるたわみ回復量の評価（RQ1-2）

### 3.1. はじめに

我が国の高速道路では、走行性、防音性、経済性などに優れることから、道路舗装の大部分にアスファルト舗装を採用している。アスファルト舗装は道路表面から順に表層、基層、上層路盤、下層路盤により構成される<sup>1)</sup>。昭和40年から平成10年にかけて表層には主に密粒度舗装が用いられていたが、平成10年以降高機能（排水性）舗装に移り変わってきている。高速道路において高機能舗装が標準的に採用されるに至った理由は、表面の水を排水させることにより安定的なすべり抵抗を確保し雨天時の交通事故発生の防止につながるほか、車両騒音を吸音できる等の機能を有する点にある。一方で、表層から基層へと雨水を通水させる構造であるために、損傷が基層以深に進展しつつ表層に顕在化するという特徴も有する。

表層を対象とした修繕が多く実施されていた密粒度舗装とは異なり、近年では経年劣化も相まって、基層と上層路盤の修繕が増加傾向にある。しかし、修繕が深層を対象とするに従って工事に必要となる費用や通行規制期間は増大する。道路管理者は、損傷を修繕することに加え、工事費用や通行規制による経済的損失を抑えることも同時に考慮しなければならず、様々な条件を総合的に勘案した上で最も適した修繕層を決定することが求められる。そのためには層別修繕によって、健全度（構造耐力）の回復量と劣化速度の抑制効果を定量的に評価する枠組みを構築することが重要である。

社会基盤施設の劣化予測手法としてマルコフ劣化ハザードモデル<sup>2)</sup>が開発されて以降、幅広い施設を対象に適用事例が増えている。舗装構造を対象にした研究事例<sup>3)–5)</sup>も数多く存在し、これらの事例ではFWD (Falling Weight Deflectometer) 調査によって得られたたわみ量をもとに耐力のランクを定め、舗装構造の健全度指標

としている。FWD 調査データを用いてマルコフ劣化ハザードモデルを推定するためには、調査時点間の耐力ランクの推移情報（2回の調査によるランクペア）が必要となる。ところが、調査対象の道路区間の中には2回の調査の間に修繕が実施された区間も一部存在する。このような道路区間のデータは一般的にはモデル推定の際には除外される。あるいは、修繕時点が判明していれば、修繕時に最も健全な状態に耐力が回復すると仮定し、ランクペアを作成することも可能である。しかしながら、舗装構造のように複数の層から構成され、修繕時に全ての層が修繕されるとは限らない（修繕層の選択に多様性がある）場合にはこの仮定が適切でないことは想像に難くない。FWD 調査等を通して修繕直後の構造耐力を直接評価することができない現状においては、構造耐力の劣化過程と修繕による回復過程を同時に表現するモデルの開発と、実データを用いた実証分析が不可欠である。ただし、マルコフ劣化ハザードモデルは、個々の施設が共通の劣化過程を有すると仮定して定式化されている。一方で、この仮定を取り払い、複数の不可観測要因に起因した劣化過程の変動を異質性として捉え、対象施設群を分割したグループごとの劣化過程を推定する混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>6)</sup>が提案されている。舗装構造の劣化過程は、修繕層や修繕工事の施工品質、環境・材料特性等を含む様々な要因が影響するため、修繕効果を評価することを目的としたときに共通の劣化過程を仮定することは適切ではない。修繕履歴を用いて舗装区間をグルーピングした上で、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いてグループごとの劣化過程を表現することが望ましい。

以上の背景を踏まえ、本研究では高速道路舗装を対象に、2回の調査の間に修繕履歴が存在する調査データベースに基づいて混合マルコフ劣化ハザードモデルを推



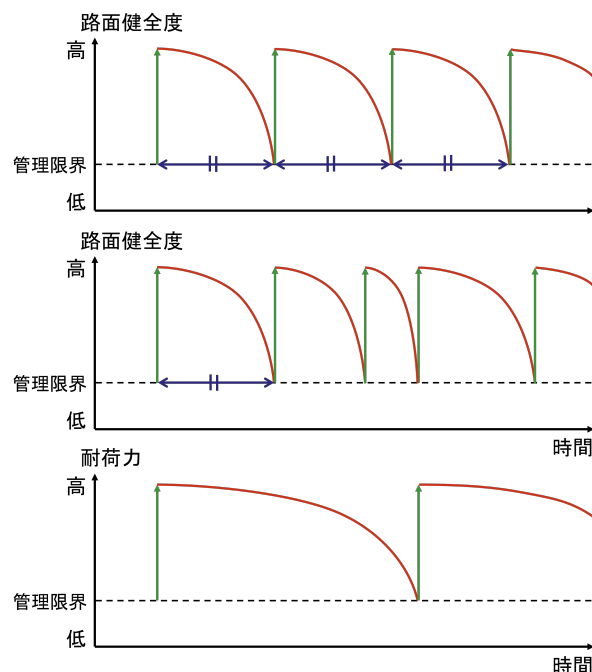
定する方法論を開発する。修繕履歴データからは修繕時点と修繕層に関する情報が獲得される。修繕直前・直後の耐力ランクは確定的には判明しないが、2回の調査データと修繕履歴データをもとにランクの推移を劣化・回復の複合過程として記述することができる。本研究では、劣化過程と回復過程における耐力ランクの推移確率をマルコフ推移確率で表す。その上で、経年におけるランク推移に修繕時点におけるランク推移が介在する状態を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。さらに、マルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMC法）を用いて、提案モデルをベイズ推定する方法論を開発する。本研究で提案する方法論の開発によって、1) 修繕後の劣化速度の違いを表す異質性パラメータと、2) 回復過程の推移確率をもとに修繕効果を定量的に評価することが可能となる。

## 3.2. 本研究の基本的な考え方

### 3.2.1. 既往研究の概要（永続的な劣化・回復過程）

社会基盤施設を対象とした劣化予測手法であるマルコフ劣化ハザードモデルの開発以降、マルコフ劣化ハザードモデルを応用したモデルが数多く開発されている。その一例として、小濱等<sup>6)</sup>は、対象施設群を複数の施設グループに分割しグループごとの劣化過程の差異を不可観測要因による異質性として捉え、施設グループ単位での劣化ハザード率を推定するための混合マルコフ劣化ハザードモデルを開発した。また、これらの劣化予測手法をもとに施設に対する補修効果を評価するための方法論が開発されている。水谷等<sup>7)</sup>は、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いることにより、補修前と補修後の劣化速度の異質性に関して相対比較を行い補修効果を定量的に示した。

マルコフ劣化ハザードモデルおよびその応用モデルを舗装マネジメントに適用した事例も多数存在する。熊田等<sup>8)</sup>は、地域区分、交通区分、供用年次に着目して、それらの項目が多様性を有するように全国の高速道路から1,200kmのモニタリング区間を選定し、その道路区間を対象とした路面性状調査データを用いてマルコフ劣化ハザードモデルの推定を行った。路面性状調査データを用いたひび割れ率、わだち掘れ、IRIの劣化予測は、高速道路を対象とした宮崎等<sup>9)</sup>、国道を対象とした森等<sup>10)</sup>、市道を対象とした青木等<sup>11)</sup>のように数多くの適用事例が存在する。このように当初の舗装マネジメントにおいては、舗装路面の維持管理に主眼が置かれており、一部の高速道路で顕在化し始めていた経年に伴う構造耐力力の低下を扱った研究事例は存在しなかった。大井等<sup>3)</sup>



注) 図の上段は永続的な劣化・回復過程を仮定した条件下における路面健全度の劣化過程を模式的に示している。これに対して中段は、上段と同じ路面健全度の劣化過程であるが、下段の構造耐力力の低下に伴って、劣化が速く進行していることがわかる。ただし、この場合であっても、修繕の直前と直後の両方の点検・調査データを獲得することが困難であることから、修繕が実施されると最も良い健全状態まで確定的に回復するという前提が設けられている。

図 3.1 路面健全度と劣化・回復過程と構造耐力力の低下過程

は、舗装路面の状態ではなく、構造耐力力の予測を目的としてFWD調査データを用いてマルコフ劣化ハザードモデルを推定し、舗装構造の劣化因子を特定するとともに、推定時に交互作用を考慮する必要性について言及した。路面性状調査データやFWD調査データは本来連続量であり、連続量の時間変化を直接的にモデル化した劣化ハザードモデルも水谷等<sup>12)</sup>によって提案されているものの、1) マルコフ劣化ハザードモデルは、最終的に離散的健全度として評価可能な点検・調査データを獲得することができれば、対象となる社会基盤施設や劣化事象を限定しないこと、さらには2) マルコフ決定モデルと連動させることにより、劣化予測にとどまらずライフサイクル費用評価やそれに基づく最適点検間隔の決定が可能である<sup>13)</sup>ことに特徴と実務的整合性を有する。しかし、これらの既往研究においては、それぞれの劣化事象が独立にモデル化されており、複数の劣化事象が互いに影響を及ぼし合うような複合的劣化過程は考慮されていなかった。

この点に関して、小林等<sup>4)</sup>は、舗装構造の劣化は路面の劣化と耐力力の低下の複合的な現象であるという考え

から、耐荷力の低下過程を齊次マルコフ過程で表現し、路面の劣化過程を耐荷力の状態に依存する非齊次マルコフ過程で表現する階層的隠れマルコフ劣化モデルを提案した。さらに小林等<sup>5)</sup>は、階層的隠れマルコフ劣化モデルを拡張し、耐荷力の低下過程も路面健全度の影響を受けるという相互の依存関係を考慮した複合的隠れマルコフ劣化モデルを提案した。また、小林等<sup>14)</sup>は舗装耐荷力の低下が舗装路面の修繕周期に影響を及ぼすことに着目して、路面補修と舗装更新のタイミングを階層的隠れマルコフ劣化モデルと期待ライフサイクル費用によって評価する最適補修更新モデルを提案している。階層的、あるいは複合的隠れマルコフ劣化モデルが表現する路面健全度と耐荷力の概念的な劣化過程を図-3.1に示す。例えば、路面健全度の劣化過程は、耐荷力の低下に伴って、期待寿命が短くなっていることが同図中段と下段より見て取れる。従来のアセットマネジメントでは健全度が低下した舗装に対して修繕を実施することによって、健全度が新設状態にまで回復し、その後の劣化は再び修繕前と同じ過程をたどるような永続的な劣化・回復過程（同図上段）が仮定されていた。このため、切削オーバーレイを繰り返すほど、路面の期待寿命が短くなる（修繕サイクルが短くなる）という実務者の知見とは整合的ではなかったが、これらの隠れマルコフ劣化モデルの開発によりこの問題は解決された。以上のように、劣化過程に関しては複雑な実事象を精緻に表現可能なモデルと、点検・調査データを用いたモデル推定手法が開発されている。その一方で、路面健全度、耐荷力が管理限界に達した際に実施される修繕や補修に伴う回復過程に関しては、最も健全性が高い状態に確定的に回復する（厳密には事前に設定した健全度に、事前に設定した割合で確定的に回復する）という前提が依然として残ったままである。これは修繕の直前と直後（特に直後）に、点検・調査を実施することがない（修繕工事に対する竣工検査は実施されるが、今後の維持管理を目的とする点検・調査は実施されずその時点における健全度情報は記録されない）ために、回復過程を推定するのに十分なデータサンプルを獲得できなかったことに起因する。さらに、修繕の直前と直後の健全度を潜在変数とするような劣化・回復過程の推定および予測手法も存在せず、永続的な劣化・回復過程がアセットマネジメントの基本的な考え方であった。したがって、構造耐荷力のように、修繕を実施したとしても健全性が当初設定した水準に回復しない不可逆的な劣化過程を推定することはできず、大規模修繕を含む更新事業の妥当性や正当性を説明することは困難であった。これは予防保全であっても同様であり、予

防保全による劣化回復量や劣化速度の抑制効果を評価するデータが存在しないのが実情である。

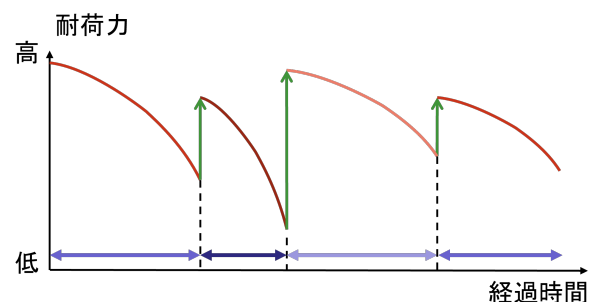
### 3.2.2. 損傷部位の深層化と FWD 調査の活用

アスファルト舗装の舗装構造は、道路表面から順に表層、基層、上層路盤、下層路盤という複数の層で構成される多層構造を有している。路面は自動車利用による摩耗や繰り返し荷重、天候・気象等の直接的な影響により劣化が進展する。加えて深層における損傷の発生が路面にも影響し、表層におけるひび割れやわだち掘れ、平坦性の低下等の現象が発生する。一方で、基層や上層路盤、下層路盤も雨水や地下水の浸透、繰り返し荷重の作用等により劣化が進展する。表層は、密粒度舗装と高機能舗装に大別される。表層に密粒度舗装が用いられていた昭和 40 年から平成 10 年にかけては表層におけるひび割れやわだち掘れ等の損傷が見られることが多く、それに対する修繕として主に表層の切削オーバーレイが実施されていた。平成 10 年以降表層に高機能舗装が用いられるようになると、表層において損傷が顕在化する前に基層の方が先に損傷するケースが増加した。すなわち、基層や路盤においてアスファルトの剥離や土砂化、疲労ひび割れの発生、脆弱化等が起きた後、それに起因するポンピング現象やポットホール等の損傷が表層において見られるようになった。これは、高機能舗装が表面の水を基層へ通水させるという構造上の特徴を有しているためである。このような状況に応じて、基層を含めた 2 層の打ち換えが標準的な修繕工法になりつつある。基層以下の層を打ち換える場合、その層より上部に位置する層の全てを打ち換えることになる。つまり、基層修繕は表層修繕を、上層路盤修繕は基層修繕を、さらに極小事例である下層路盤修繕は上層路盤修繕を、それぞれ包含している。したがって、より深層を対象に修繕が実施されると、舗装構造の健全度はより大きく回復することが見込まれる。その一方で、修繕費用や工事期間は増大し、予算や規制時間の制約等から修繕延長を伸ばすことは難しくなる。修繕を実施すべき区間を適切に選定し、最も効果的な層に対して修繕を実施する必要がある。

道路管理における点検・調査業務としては、一般的に日常巡回、路面性状調査、FWD 調査が実施される。密粒度舗装が主流であった時期においては、上述したように損傷が路面から下層へ進展することはほとんどなかった、あるいは、下層へ進展するような場合にも路面の損傷が先に確認されたため、路面性状調査を通して獲得されるひび割れ率やわだち掘れ量が切削オーバーレイの実施を判断する際の指標となっていた。一方で、高機能舗装が主流となった近年においては、局所的な損傷が卓越

するため、100m を基本単位とする道路区間でひび割れ率が管理限界の 20%、わだち掘れ量が 20mm に到達するような全域的な損傷が発現すること自体が稀である。このため、路面性状調査であれば IRI、特に従来の 100m よりも短い 10m を基本単位とする IRI 評価が有効であるとの指摘がある。しかし、2 年に一度の頻度で実施される路面性状調査では深刻な損傷を長期間放置することになりかねない。現状では路面性状調査を参考としつつ、日常巡回を通してポンピングやポットホールの発生頻度が高い道路区間を修繕対象区間として選定することが多い。さらに、選定された道路区間に対して FWD 調査が実施される場合もあるが、車線規制には警察協議という制約が伴うので、むしろ実施されないことが多い。したがって、耐荷力評価の記録が残るのは修繕工事の一部でしかない。このように、一連の業務フローは事後的な対応にとどまっており、計画的な修繕・更新施策の立案には至っていない。また、2.(1) で述べたような修繕、とくに層別修繕の効果を定量的に評価することはできない。

路面や表層の損傷を対象とする舗装マネジメントであれば、路面性状調査データを中心とすることは可能であったが、損傷部位の深層化が進む中での舗装マネジメントにおいては舗装耐荷力を評価可能な FWD 調査データを中心に据えた方法論を展開していくことが望ましい。実際に構造耐荷力の低下、すなわち深層における損傷が疑われる事例が増加したため、1) 修繕層の決定のための FWD 調査の実施頻度が高まってきたこと、2) 定期的な FWD 調査の必要性が認識されるようになり一部道路区間で試験的に定期調査が行われるようになったことによって、本研究の適用事例で取り上げた道路区間のように FWD 調査データの蓄積が進んできた。新たな舗装マネジメントを展開するためには、路面性状調査データから FWD 調査データへの転換、すなわち表層・基層の切削オーバーレイという通常修繕による路面状態の管理から、舗装耐荷力の低下のような不可逆的な劣化事象を対象とした大規模修繕や更新（全層打ち換え）による性能管理への転換が必要である。そこで、本研究では FWD 調査データを用いて舗装構造の耐荷力ランクを定め、これを健全度指標とすることにより舗装構造の劣化予測と層別修繕時の回復予測を行う。そのために、舗装構造の耐荷力の経年による低下に加え、修繕時の向上を表現できる混合マルコフ劣化ハザードモデルの拡張モデルを提案する。



注) 緑色の矢印は大規模修繕による耐荷力の回復量を示す。舗装耐荷力のような性能指標は、実施タイミングや工法によって回復量が異なることが想定される。また、青色の両矢印は修繕タームを示す。深層における損傷の蓄積によって、修繕タームごとに耐荷力の低下速度が異なる場合がある。

図 3.2 耐荷力の推移

### 3.2.3. 劣化・回復の複合過程モデル

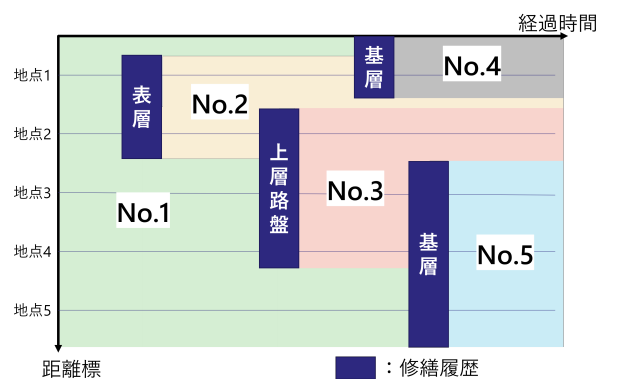
舗装の構造耐荷力の推移を、1) 経年により耐荷力が低下する劣化過程と、2) 修繕時に耐荷力が向上する回復過程の複合過程として記述する。その概念図を図-3.1 と比較するように、図-3.2 に示す。耐荷力が低下と不確実な回復を繰り返しながら推移する様子が見て取れる。図中の赤線で表される劣化過程の差異は、構造特性、環境条件、使用条件の不確実性により生じる。図中の緑矢印で表される回復過程の推移の差異は、層別の修繕による不確実性（修繕工法、タイミング、施工の品質）が大きいと考えられる。さらに、修繕ターム（供用開始または修繕直後から次の修繕直前までの期間、図中の青両矢印）ごとに劣化過程は異なることが想定される。これは、層別の修繕により、修繕層より下層（例えば、基層修繕が実施された場合の上層路盤・下層路盤・路床）には損傷の蓄積が進む箇所が存在する可能性による。すなわち、損傷の蓄積が進んでいる箇所を含む層よりも上層の修繕に留めてしまった場合、修繕前よりも修繕後の方が低下速度は速まると考えられる。あるいは、損傷の蓄積が進んでいる箇所を含む層を適切に選定して修繕が実施された場合、荷重を下層へと伝える上層部分が一新されるため、修繕後の低下速度は遅くなることも考えられる。以上を踏まえ、1) 層別修繕による構造耐荷力の回復量と、2) 層別修繕後の耐荷力低下速度の抑制効果を実際の FWD 調査データに基づいて定量的に評価可能である点に本研究の新規性と独自性がある。

一般的に、混合マルコフ劣化ハザードモデルを推定するためには 2 時点間の健全度推移に関するデータが必要となる。すなわち、 $n$  回の調査により判明した  $n$  個の健全度をもとに  $n - 1$  個の健全度ペアを作成して推定に用いる。このとき、2 回の調査時点の間に修繕履歴が存



在するものが含まれることがある。このような健全度ペアは劣化過程の健全度推移に修繕時の健全度回復が含まれるため、すなわち健全度が1回目よりも2回目の方が改善するため、従来のモデル推定においては除外されることが多かった。あるいは、修繕時点が判明していれば、修繕時に最も健全な状態に耐荷力が回復すると仮定し、ランクペアを作成することも可能である。しかしながら、舗装構造のように複数の層から構成され、修繕時に全ての層が修繕されるとは限らない（修繕層の選択に多様性がある）場合にはこの仮定が適切でないことは想像に難くない。本研究においては、むしろこのように2回の調査の間に修繕履歴が存在するデータに着目して、修繕時における健全度回復の程度を推定する。

舗装耐荷力に関する情報を獲得するためのFWD調査には、先述したとおり、修繕箇所の選定とその修繕層の決定を目的に実施される調査と、定期的な実施される調査がある（現状、実務においては前者のためのFWD調査が大半である）。調査対象となる道路区間の選定に関して、路面性状調査の結果より相対的に劣化の進展が速いと判断できる道路区間を抽出する方法<sup>10)</sup>が提案されているが、基本的に調査地点は道路管理者の経験的判断に基づいて行われる。ただし、FWD調査を実施する際には対象道路区間の通行規制を行う必要があり、その実施地点数や実施回数は制約を受ける。したがって、FWD調査が実施される地点は劣化の進展が速く、その後に修繕される可能性が高い。このような状況下では、劣化過程の推移確率を推定するために必要となる修繕を含まない2時点間の調査ペアが獲得される一方で、修繕を含む調査ペアが獲得される割合も高い。しかしながら、回復過程の推移確率を推定するために必要となる修繕直前と修繕直後の調査結果を獲得することはFWD調査の性質上困難である（FWD調査実施時点である $\tau_A$ と $\tau_B$ においては耐荷力ランクを直接観測可能であるが、修繕実施直前と直後の時点 $\tau_5$ における耐荷力ランクは観測できない）。そこで、本研究では混合マルコフ劣化ハザードモデルの拡張による修繕時の耐荷力の回復を考慮した劣化予測モデルを提案し、回復過程の推移確率を推定する。2時点における調査結果は観測可能であるが、その間に実施された修繕の直前・直後の耐荷力ランクは観測できないと考える。劣化・回復過程の推移確率と修繕履歴をもとに2時点における調査結果が獲得される尤度を定式化することにより、劣化・回復の複合過程が推定される。これにより、2時点における調査の間に修繕が含まれるデータをもとに混合マルコフ劣化ハザードモデルを推定することが可能となり、データ増加による推



注）同一グループを色分けして示している。なお青帯は修繕が実施されたことを表すが、各青帯に記載した層を対象に修繕が実施されたことを想定している。

図 3.3 グルーピングのイメージ

定精度の向上が見込まれる。さらに、回復過程の推移確率を修繕層別に推定することにより、層別修繕によるたわみ回復量を評価することが可能となり、修繕効果の定量的な評価につながる。

混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>6)</sup>では、劣化過程に介入する異質性を確率変数で表現する。すなわち、評価単位とする施設グループに特有のシステムの要因に基づく劣化速度の違いが、異質性を表すパラメータ（以下、異質性パラメータ）に表れると考える。評価単位の設定に関しては、分析者の目的により変化する。例えば、宮崎等<sup>9)</sup>は、高速道路舗装の重点管理路線の抽出を目的に、評価単位を個々の路線に設定した分析を行った。森等<sup>10)</sup>は、国道のある路線に着目し、当該路線における重点管理区間の抽出を目的に、道路構造物である橋梁、トンネル、交差点をもとに道路区間を区分し、これを評価単位とした分析を行った。本研究においては、層別修繕後における耐荷力低下速度の抑制効果を評価することを目的としているため、FWD調査が実施された個々の地点別に図-3.2に示すような修繕タームを設けた上で、修繕タームごとの劣化速度の差異を異質性パラメータにより表現することを試みる。しかし、調査地点×修繕タームによる評価単位を設定すると、個々の施設グループに属する調査ペアが極少数となってしまうことが懸念される。そこで、本研究では、修繕タームが同一の修繕工事（修繕履歴データ上において同一時点に同一層かつ連続した区間を対象に実施された修繕工事）によって定義される区間を同一グループと見なし、これを評価単位とする。そのイメージを図-3.3に示すとともに、図-3.3を用いて以下に具体的なグルーピングの手順を記す。まず、供用開始以後の全区間（図-3.3における地点1～5）をグループNo.1とする。次に、修繕工事が行われた場

合、それ以後の修繕対象区間（地点 1,2）をグループ No.2 に更新する．同様の操作により，グループ No.3（地点 2～4），グループ No.4（地点 1），グループ No.5（地点 3～5）を順次更新していく．以上の手順によって設定されるグループでは，環境・使用条件や構造・材料特性，修繕工事時期・品質，修繕対象層等の要素が各グループ内で同等であることが想定される．つまり，グループごとの劣化速度の違いが見られた場合，これらの要素が複合的に影響しあっていることが考えられる．さらに，各修繕がどの層を対象に実施されていたかによってグループを分類し，分類されたグループ群間で違いが見られれば，劣化速度に対して修繕対象層の影響が存在することを意味する．

ただし， $M$  次元正規分布  $\mathcal{N}_M(\boldsymbol{\zeta}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i)$  の確率密度関数は，

### 3.3. 適用事例

#### 3.3.1. データの概要

本研究で提案した方法論を，高速道路において獲得された FWD 調査データに対して適用し，その有効性を実証的に検討する．対象路線は，上り・下り走行車線である．対象路線内には，アスファルト舗装の土工区間と橋梁区間，コンクリート舗装のトンネル区間が存在する．これらは全く異なる舗装構造を有しておりその劣化過程も異なることが考えられたため，本研究の適用対象として想定するアスファルト舗装の土工区間以外のデータは推定時のデータセットから除外する．対象区間では 2006～2021 年にかけて FWD 調査が実施され，6,060 地点において合計 11,154 回の調査記録が獲得されている．また，対象区間における 1980～2021 年にかけての修繕履歴から修繕地点と修繕時点，修繕層に関する情報が得られる．FWD 調査データをもとに耐荷力ランクのペアサンプルを 5,094 個作成し，2 回の調査の間に修繕が実施されているサンプル 1,580 個については修繕履歴に関する情報を付記する．一方で，修繕履歴がない 3,514 個のサンプルのうち，損傷指標が回復している 1,542 個のサンプルは推定精度の観点から除外した．なお，この理由については，利用可能なデータ上は確認できなかったが実際には修繕が実施されていた，あるいは 1 回目と 2 回目で調査地点が完全には一致していなかったものと推察される．さらにはアスファルト舗装の場合には，同一の調査地点であっても，調査時の温度や路面の状態，FWD 試験機の種類，地下水位などの条件の相違によって，FWD 調査データ（たわみ）に差が生じることがあることから，損傷指標が回復しているサンプルが獲

得されたものとする．以上の操作により，修繕履歴を含まないサンプルを 1,972 個，修繕履歴を含むサンプルを 1,580 個作成し，合計 3,552 個のサンプルを得た．さらに，修繕履歴を含む 1,580 個のサンプルを対象に完備化操作（潜在変数の導入）を行い，劣化過程に関しては 3,308 個の耐荷力ランク推移ペアが，回復過程に関しては 1,728 個の耐荷力ランク推移ペアが獲得された．劣化過程に関しては，修繕履歴を含まないサンプル 1,972 個と合計して，5,280 個の耐荷力ランク推移ペアが獲得されたことになる．

層別修繕による耐荷力低下速度の抑制効果を評価するために，舗装区間のグルーピング，引いてはランク推移ペアサンプルのグルーピングを行う．その結果，5,280 個のサンプルは 684 グループに分類された．なお，グルーピングの方法は 3.23.2.3 に既述した通りであるが，分析対象とした 3 路線は同一路線内においても供用開始時期が異なる（新設工事が実施された時期が異なる）区間が確認されたため，供用開始時期が一致しない区間については別のグループとして分類した．しかし，各グループのサンプル数を確認すると，極少数（5 未満）のグループが存在していた．これらのグループを含めてモデルの推定を行ったものの，極少サンプルにより推定された異質性パラメータは，偶然獲得された極少数のサンプルに適合しているだけの可能性がある．そこで，本研究では 3.33.3.3 における劣化速度抑制効果に関して，684 グループから極少数のグループを除外した 289 グループを対象に評価することとした．

FWD 調査によるたわみ調査結果に基づいて，舗装構造の耐荷力ランクを損傷指標  $D_a^{31)}$ （通常  $D_i$  を用いて表されるが，耐荷力ランク  $i$  との混同を避けるため本研究においては  $D_a$  を用いる）

$$D_a = \frac{D_0 - D_{90}}{\Delta} \times 10^6 \quad (3.1)$$

を用いて設定する．ただし， $D_0$ ， $D_{90}$  は，それぞれ重錘の載荷点直下，および載荷点から 90cm 離れた地点のたわみ量 (mm)， $\Delta$  はアスファルト層の設計厚 (mm) を表す．なお，FWD 試験により得られたたわみ量は路床の影響を強く受ける可能性を有するため，厳密にはその影響を考慮する必要があるとも考えられる．この点に関して，神谷・風戸<sup>31),32)</sup>は蓄積された FWD 調査結果と採取コアの強度試験結果から， $D_a$  値を用いてアスファルト層の損傷を評価できる可能性があるとしており，本研究においてはこの考え方を踏襲している． $D_a$  値を表-3.1 に示すように離散化し，耐荷力ランクを定義した．

表 3.1 耐荷力ランク

表層種別				高機能Ⅰ型					
路盤種別				粒状路盤			セメント安定処理路盤		
As 層厚				220mm 未満	220-260mm	260mm 以上	220mm 未満	220-260mm	260mm 以上
評価	C	ランク	1	$D_a < 800$	$D_a < 500$	$D_a < 200$	$D_a < 800$	$D_a < 400$	$D_a < 150$
	B		2	$800 \leq D_a < 1150$	$500 \leq D_a < 650$	$200 \leq D_a < 350$	$800 \leq D_a < 1000$	$400 \leq D_a < 600$	$150 \leq D_a < 275$
			3	$1150 \leq D_a < 1500$	$650 \leq D_a < 800$	$350 \leq D_a < 500$	$1000 \leq D_a < 1200$	$600 \leq D_a < 800$	$275 \leq D_a < 400$
			4	$1500 \leq D_a < 2250$	$800 \leq D_a < 1200$	$500 \leq D_a < 750$	$1200 \leq D_a < 1800$	$800 \leq D_a < 1200$	$400 \leq D_a < 600$
	A		5	$2250 \leq D_a$	$1200 \leq D_a$	$750 \leq D_a$	$1800 \leq D_a$	$1200 \leq D_a$	$600 \leq D_a$
表層種別				密粒度・高機能Ⅱ型					
路盤種別				粒状路盤			セメント安定処理路盤		
As 層厚				220mm 未満	220-260mm	260mm 以上	220mm 未満	220-260mm	260mm 以上
評価	C	ランク	1	$D_a < 500$	$D_a < 300$	$D_a < 150$	$D_a < 500$	$D_a < 200$	$D_a < 100$
	B		2	$500 \leq D_a < 750$	$300 \leq D_a < 400$	$150 \leq D_a < 225$	$500 \leq D_a < 750$	$200 \leq D_a < 350$	$100 \leq D_a < 150$
			3	$750 \leq D_a < 1000$	$400 \leq D_a < 500$	$225 \leq D_a < 300$	$750 \leq D_a < 1000$	$350 \leq D_a < 500$	$150 \leq D_a < 200$
			4	$1000 \leq D_a < 1500$	$500 \leq D_a < 750$	$300 \leq D_a < 450$	$1000 \leq D_a < 1500$	$500 \leq D_a < 750$	$200 \leq D_a < 300$
	A		5	$1500 \leq D_a$	$750 \leq D_a$	$450 \leq D_a$	$1500 \leq D_a$	$750 \leq D_a$	$300 \leq D_a$

注) 調査要領<sup>33)</sup>で定義される損傷指標  $D_a$  に基づく評価区分 (C・B・A の 3 段階) を用いて, 評価 B および A を細分化し, 耐荷力ランク (1~5 の 5 段階) を設定した。

表 3.2 パラメータの推定結果

耐荷力ランク $i$	定数項 $\hat{\beta}_{i,1}$	地域特性 $\hat{\beta}_{i,2}$
1	0.33	-2.41
	(0.11, 0.55)	(-2.73, -2.08)
	1.60	-1.67
2	0.24	-2.49
	(0.07, 0.43)	(-2.81, -2.14)
	0.36	-1.43
3	-0.27	-2.34
	(-0.45, -0.09)	(-2.73, -1.92)
	1.58	-0.98
4	-1.09	-2.72
	(-1.26, -0.92)	(-3.32, -2.14)
	1.53	-1.93
$\phi$	1.54 (1.52, 1.56) -1.83	

注) 各パラメータごとに第 1 行はパラメータの期待値, 第 2 行はパラメータ推定値の 95% 信用域の下限値と上限値, 第 3 行は Geweke 検定統計量を表している。

得られたサンプルに対し, 地域特性 (豪雪地帯とそれ以外) を, それぞれ 0 または 1 の値をとるダミー変数として説明変数に採用した。すなわち, 説明変数ベクトル  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$  は,

$$x_1 = 1 \quad (\text{定数項}) \quad (3.2)$$

$$x_2 = \begin{cases} 0 & (\text{豪雪地帯のとき}) \\ 1 & (\text{それ以外のとき}) \end{cases} \quad (3.3)$$

となる。標準ハザード関数は,

$$\tilde{\theta}_i = \exp \left( \hat{\beta}_{i,1} + x_2 \hat{\beta}_{i,2} \right) \quad (3.4)$$

と表せる。

### 3.3.2. モデルの推定結果

5.(1) のサンプルで構成されるデータベースを用いて, 修繕時の回復を考慮したマルコフ劣化モデルを推定する。パラメータの推定結果を表-3.2 に示す。同表より, 地域特性が劣化過程に及ぼす影響を表すパラメータベクトル  $\hat{\beta}_{i,2}$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) が全て負の値をとることが見て取れる。これは, 各説明変数の値が大きくなると, ハザード関数式 (3.4) が小さくなる, すなわち劣化が遅くなることを意味する。具体的には, 豪雪地帯 ( $x_2 = 0$ ) よりそれ以外 ( $x_2 = 1$ ) の方が耐荷力の低下が遅いことを表す。なお, MCMC 法を実施する際にマルコフ連鎖が定常状態に達するためのサンプル数として  $\underline{n} = 2,000$  と設定した。本研究では  $\bar{n} = 12,000$  と設定し,  $\underline{n} = 2,000$  個の標本を事後分布に収束する過程からの標本として除外した, 残りの 10,000 個の標本をもとに分析を行う。表-3.2 に示す通り, Geweke 検定統計量はいずれも 1.96 を下回っており, 有意水準 5% でパラメータのランダムサンプリングが定常状態に収束したことを意味する収束仮説を棄却できない。

推定した異質性パラメータの事後分布の期待値から作成した異質性パラメータの度数分布を図-3.4 に示す。総数 684 の異質性パラメータの平均値は 1.00 であった。異質性パラメータの事前分布として設定したガンマ分布の特性が反映されていることがわかる。次に, 各グルー

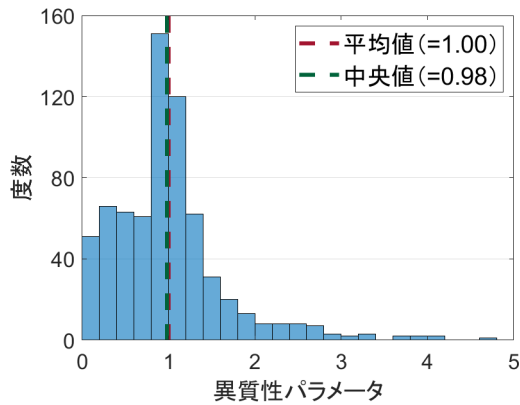


図 3.4 異質性パラメータの度数分布

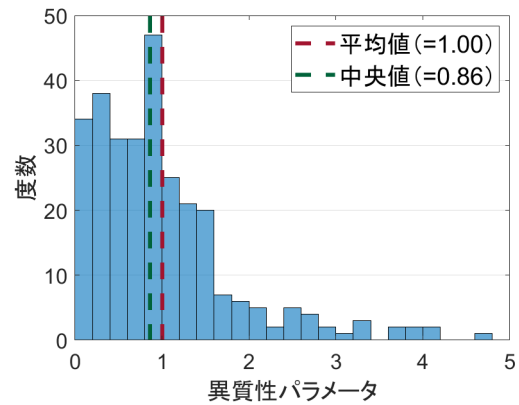


図 3.6 評価に用いる異質性パラメータの度数分布

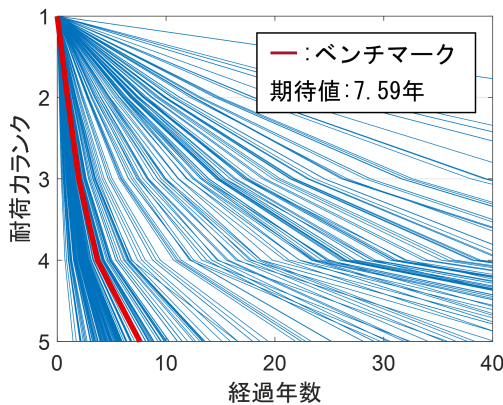


図 3.5 異質性を考慮したパフォーマンスカーブ

注) 図の視認性を考慮し、総数 684 からランダムに抽出した 300 グループのパフォーマンスカーブを示す。

ブの期待寿命を異質性パラメータを用いて算出し、パフォーマンスカーブとして描いたものを図-3.5 に示す。ここで、耐荷力ランク  $i$  ( $i = 1, \dots, I-1$ ) に初めて到達した時点から、耐荷力が低下して次のランクに進むまでの期待期間長を耐荷力  $i$  の期待寿命と呼び、

$$ET_i^k = \frac{1}{\hat{\theta}_i^{l_k} \varepsilon^k} = \frac{1}{\exp(\hat{\beta}_{i,1} + x_2^{l_k} \hat{\beta}_{i,2}) \cdot \varepsilon^k} \quad (3.5)$$

と定義する。期待寿命の累積値をプロットし、直線で結んだものがパフォーマンスカーブである。図中には、グループ別のパフォーマンスカーブに加えて、684 グループの平均的なパフォーマンスカーブをベンチマークケースとして描いている。ベンチマークケースにおける初期時点からランク 5 に到達するまでの期待年数は、7.59 年であった。その一方で、期待年数が 5 年に満たないグループや 40 年を超えるグループも確認された。このことから、舗装構造の寿命には、局所的な環境条件や使用条件、修繕効果により大きな差異が存在することがわかる。

表 3.3 評価に用いる異質性パラメータの基本統計量

個数	中央値	平均値	標準偏差	変動係数
289	0.86	1.00	0.82	0.82

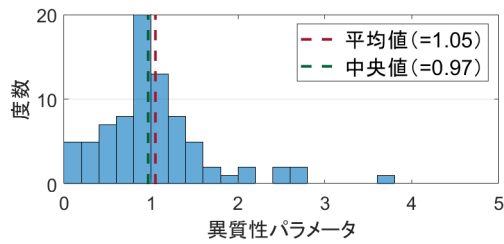
### 3.3.3. 劣化速度の抑制効果の評価

層別修繕による舗装構造の劣化速度の抑制効果を評価する。3.3.3.1 にて既述した通り、評価対象とするのはサンプルが極少数のグループを除いた 289 グループである。これらのグループに関して、推定した異質性パラメータの事後分布の期待値から作成した異質性パラメータの度数分布を図-3.6 に示す。また、表-3.3 には、分布の特徴を表す値として、異質性パラメータの個数、中央値、平均値、標準偏差、変動係数をまとめている。289 グループにおける異質性パラメータの平均値は 1.00 であった。これは、全グループにおける異質性パラメータの平均値とほぼ等しい。さらに、修繕区間によって定義される舗装区間のグループを、当該修繕がどの層を対象に実施されていたかにより分類する。すなわち、評価対象とする 289 グループは、「表層修繕後」、「基層修繕後」、「上層路盤修繕後」、「下層路盤修繕後」の 4 種類に「修繕無し（供用開始から 1 回目の修繕までの間）」を加えた合計 5 種類に分類される。（以下、「修繕後」を省略して表記する。）図-3.3 を用いて例を示すと、No.1 は「修繕無し」、No.2 は「表層」、No.3 は「上層路盤」、No.4 と No.5 は「基層」にそれぞれ分類されることとなる。

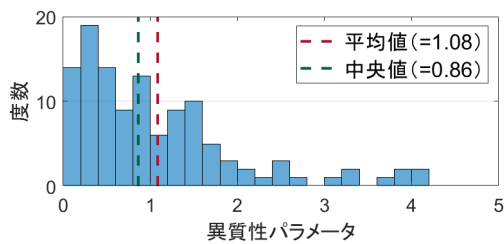
修繕層別に分類した異質性パラメータの度数分布を図-3.7 に示す。また、表-3.4 には、これらの分布の特徴を表す値として、異質性パラメータの個数、中央値、平均値、標準偏差、変動係数をまとめている。同図および同表からは、分類：修繕無しに関する劣化速度の傾向を読み取ることが困難であった。具体的には、「修繕無し」は供用開始後から 1 回目の修繕までを指し、新設

表 3.4 修繕層別に分類した異質性パラメータの特性

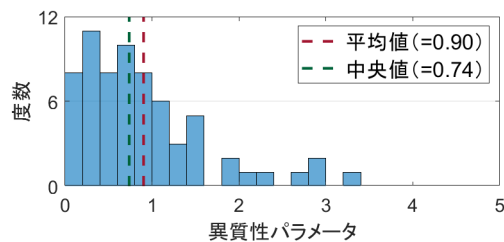
分類	個数	中央値	平均値	標準 偏差	変動 係数
表層	84	0.97	1.05	0.64	0.61
基層	117	0.86	1.08	0.95	0.87
上層路盤	67	0.74	0.90	0.74	0.82
下層路盤	10	0.38	0.44	0.35	0.81
修繕無し	11	0.60	0.90	1.27	1.42



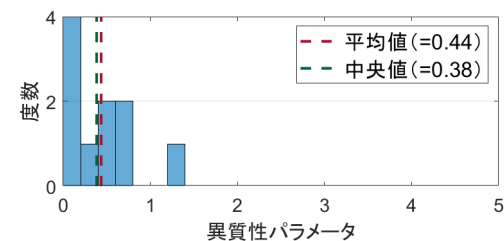
分類：表層



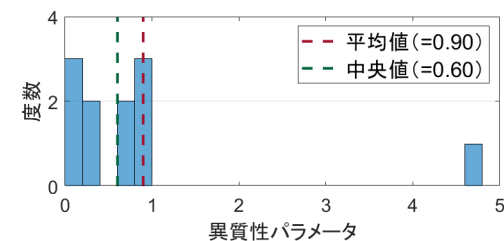
分類：基層



分類：上層路盤



分類：下層路盤



分類：修繕無し

図 3.7 修繕層別に分類した異質性パラメータの度数分布

後の状態とも解釈できるため、劣化速度は「下層路盤」と同等あるいはそれ以下であると考えるのが自然である。しかし、推定された異質性パラメータはこの予想と反する結果を示している。その理由に関して、利用可能なデータ上は確認できなかったが実際には修繕が実施されていたサンプルが含まれており、当該サンプルが適切にグルーピングされていなかったことが考えられる。したがって、本研究では、「表層」～「下層路盤」に着目し、層別修繕後の劣化速度の分析に重点を置くこととした。

まず、「表層」～「下層路盤」における異質性パラメータの中央値および平均値に着目すると、1)「表層」と比較して「基層」の中央値が小さいことと、2)「基層」と比較して「上層路盤」の中央値および平均値がいずれも小さいこと、3)「上層路盤」と比較して「下層路盤」の中央値および平均値がいずれも小さいことがわかる。これらの中央値および平均値の大小関係は、より深い層、つまり表層よりも基層、基層よりも上層路盤、上層路盤よりも下層路盤を対象に修繕を実施した場合に、劣化速度が大きく減少する傾向にあることを示している。ゆえに、全体的な傾向として、修繕の対象をより深い層とした場合に劣化速度の抑制効果が大きいといえる。次に、異質性パラメータの変動係数に着目すると、「表層」と比較して「基層」～「下層路盤」の変動係数が大きいことがわかる。このことは、基層～下層路盤修繕後に、全体的な傾向に従って劣化速度が大幅に減少する舗装区間と、全体的な傾向に反して劣化速度が大幅に増加する舗装区間が混在することを示している。舗装構造の抜本的な修繕を目的に、適切に修繕対象層が選定された舗装区間では、その後の劣化速度が大きく減少する一方で、修繕対象層よりも下層に損傷が蓄積していた箇所を含む舗装区間では、劣化速度が増加する傾向があると考えられる。

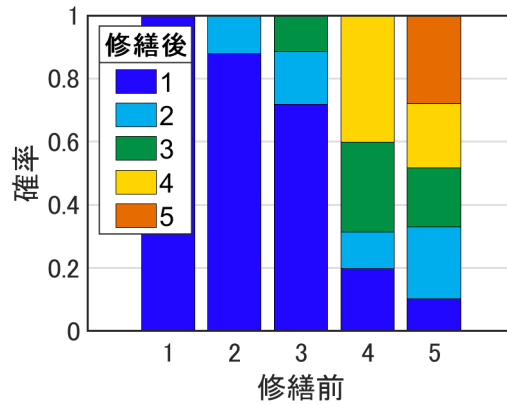
### 3.3.4. 回復過程推移確率の推定結果

層別修繕による回復過程の推移確率の推定結果を図-3.8～図-3.11に示す。各図において (a) は回復過程の推移確率行列を、(b) はそれを図示したものである。ま



表層		修繕後ランク				
		1	2	3	4	5
修繕前 ランク	1	1	0	0	0	0
	2	0.88	0.12	0	0	0
	3	0.72	0.17	0.11	0	0
	4	0.20	0.12	0.28	0.40	0
	5	0.10	0.23	0.19	0.20	0.28

(a) 推移確率行列

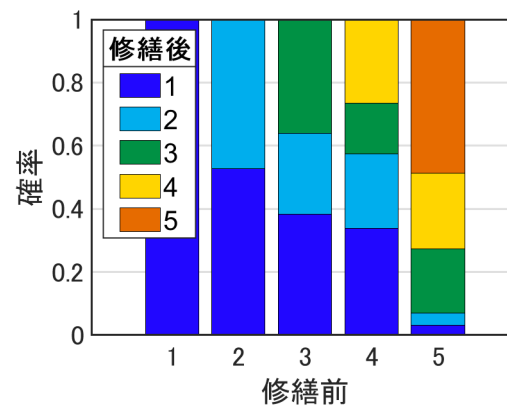


(b) 状態遷移

図 3.8 回復過程推定結果：表層修繕

基層		修繕後ランク				
		1	2	3	4	5
修繕前 ランク	1	1	0	0	0	0
	2	0.53	0.47	0	0	0
	3	0.38	0.26	0.36	0	0
	4	0.34	0.24	0.16	0.26	0
	5	0.03	0.04	0.20	0.24	0.49

(a) 推移確率行列



(b) 状態遷移

図 3.9 回復過程推定結果：基層修繕

表 3.5 層別修繕サンプル数

修繕層	サンプル数
表層	210
基層	933
上層路盤	449
下層路盤	136
合計	1,728

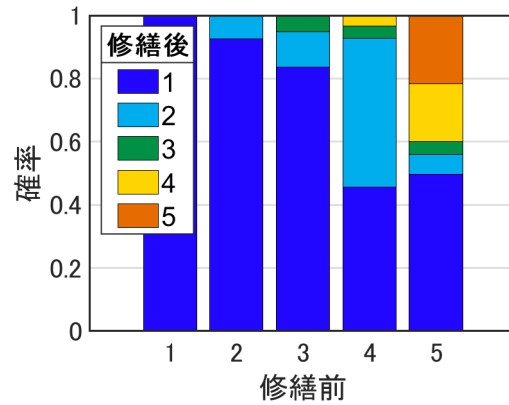
た、推定に用いた各層の修繕サンプル数を表-3.5 に示す。分析対象路線において実施された修繕履歴から、2 回の FWD 調査の間に実施され、その修繕範囲に調査地点を含むものをサンプルとして計上している。

修繕前のランクが 4 または 5 であったものが修繕後にランク 1 へと回復する確率（損傷評価区分 A から C への回復確率）は、表層修繕ではそれぞれ 0.20, 0.10 と推定され（図-3.8）、基層修繕ではそれぞれ 0.34, 0.03 と推定された（図-3.9）。これらの確率は、上層路盤修繕ではそれぞれ 0.46, 0.50 と推定され（図-3.10）、表層修繕

および基層修繕と比較して高いことがわかる。また、修繕前のランクが 4 または 5 であったものが修繕後にランク 3 以下へと回復する確率（損傷評価区分 A から B および C への回復確率）は、表層修繕ではそれぞれ 0.60, 0.52 と推定され（図-3.8）、基層修繕ではそれぞれ 0.74, 0.27 と推定された（図-3.9）。これらの確率は、上層路盤修繕ではそれぞれ 0.97, 0.60 と推定され（図-3.10）、こちらも表層修繕および基層修繕と比較して高いことが示された。下層路盤修繕の推定結果（図-3.11）からは、修繕前のランクが 2, 3, 4 のいずれであっても、修繕後にランク 1 へと回復する確率が 0.87 以上と推定された。これは、ほとんどのケースで下層路盤修繕によって完全な回復が期待できることを意味している。ただし、修繕前のランクが 5 のサンプルは極めて少なく、推定された回復確率は事前分布として設定した影響を強く残している。その結果、ランク 1～5 への推移確率はそれぞれ 0.20 に近い値となっている。

上層路盤		修繕後ランク				
		1	2	3	4	5
修繕前ランク	1	1	0	0	0	0
	2	0.93	0.07	0	0	0
	3	0.84	0.11	0.05	0	0
	4	0.46	0.47	0.04	0.03	0
	5	0.50	0.06	0.04	0.18	0.22

(a) 推移確率行列

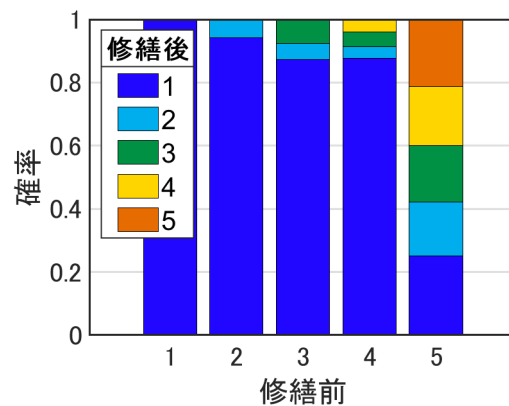


(b) 状態遷移

図 3.10 回復過程推定結果：上層路盤修繕

下層路盤		修繕後ランク				
		1	2	3	4	5
修繕前ランク	1	1	0	0	0	0
	2	0.94	0.06	0	0	0
	3	0.87	0.05	0.08	0	0
	4	0.88	0.04	0.04	0.04	0
	5	0.25	0.17	0.18	0.19	0.21

(a) 推移確率行列



(b) 状態遷移

図 3.11 回復過程推定結果：下層路盤修繕

### 3.4. おわりに

本研究では、表層の高機能舗装化に伴い損傷部位・修繕が深層化する高速道路舗装構造を対象として、舗装構造の劣化予測と層別修繕効果の評価を行う方法論を提案した。具体的には、舗装構造の耐力力推移を劣化・回復の複合過程として記述し、それぞれの推移確率を算出するために、修繕直前・直後の耐力力ランクを潜在変数と捉えモデル化し、2時点間の調査データと修繕履歴をもとにした推定手法を提案した。これにより、調査時点間に修繕履歴の存在するデータをもとにした舗装構造の劣化予測に加え、修繕効果の定量的な評価が可能となった。高速道路に対する適用事例では、より深層を対象としたときにその後の劣化速度が大きく減少する傾向と、耐力力ランク回復確率が高くなるという傾向が確認された。

しかし、本研究に関して今後に残された研究課題が存在する。第一に、回復過程のマルコフ推移確率に説明変数を考慮する必要がある。同じ層までの修繕であったとしても、修繕工法や施工条件の相違を内包させ、それら

の劣化過程を比較することによって修繕効果を最も発現することができるタイミングや工法を選定することができる。また、そのような方法論を提示することにより、実務者に対して、修繕時の記録を詳細に残すことの意義を説明することが可能となる。第二に、ライフサイクル費用により修繕タイミングや最適な修繕層を決定することが可能な方法論を開発することが重要である。特に、舗装耐力力の低下というような不可逆的な劣化事象を対象とした大規模修繕や更新の実施タイミングを、表層・基層の切削オーバーレイのような通常修繕の実施タイミングとの垂直的同期関係<sup>35)</sup>を考慮した方法論によって検討することが重要である。

### 参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.
- 2) 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.

- 3) 大井明, 宮崎文平, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司, 山口清人: 定期的な FWD 調査データを用いた高速道路舗装の劣化予測, 土木学会論文集 E1, Vol.70, No.2, pp.11-25, 2014.
- 4) 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 5) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Nguyen Dinh THAO, 北浦直樹: データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.2, pp.63-80, 2015.
- 6) 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.
- 7) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司: 階層ベイズ法による補修効果の事後評価, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.3, pp.204-221, 2013.
- 8) 熊田一彦, 江口利幸, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: モニタリングデータを用いた高速道路舗装の統計的劣化モデルの検討, 舗装工学論文集, 土木学会, Vol.14, pp.229-237, 2009.
- 9) 宮崎文平, 加藤寛之, 小濱健吾, 貝戸清之, 風戸崇之, 田中克則: 膨大な路面性状調査データに基づく舗装補修施策の評価法の提案, 土木学会論文集 F4, Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.
- 10) 森悠, 藤原栄吾, 貝戸清之, 小林潔司, 橋本拓己: 相対評価モデルを用いた舗装構造の劣化診断, 土木学会論文集 E1, Vol.67, No.2, pp.91-110, 2011.
- 11) 青木一也, 小田宏一, 児玉英二, 貝戸清之, 小林潔司: ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価, 土木技術者実践論文集, Vol.1, pp.40-52, 2010.3
- 12) 水谷大二郎, 小林潔司, 風戸崇之, 貝戸清之, 松島格也: 連続量を用いた劣化ハザードモデル: 舗装耐荷力への適用, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.2, pp.191-210, 2016.
- 13) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之: 劣化過程の不確実性を考慮した路面性状調査の最適実施方策, 土木学会論文集 E1, Vol.67, No.2, pp.75-90, 2011.
- 14) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之, 松村泰典: 舗装構造の最適補修更新モデル, 土木学会論文集 E1, Vol.68, No.2, pp.54-68, 2012.
- 15) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連, 1979.
- 16) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 17) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 18) Titterton, D. M., Smith, A. F. M. and Makov, U. E.: *Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions*, John Wiley & Sons, 1985.
- 19) Rovert, C. P.: Mixtures of Distributions: Inference and Estimation, in: Gillks, W. R., Richardson, S. and Spiegelhalter, D. J. (eds.): *Markov Chain Monte Carlo in Practice*, Chapman & Hall, 1996.
- 20) Rovert, C. P., Rydén, T. and Titterton, D. M.: Bayesian inference in hidden Markov models through the reversible jump Markov chain Monte Carlo method, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, Vol.62, pp.57-75, 2000.
- 21) Demster, A. P., Laird, N. M. and Rubin, D. B.: Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, Vol.39, pp.1-33, 1977.
- 22) Celeux, G., Hurn, M. and Robert, C. P.: Computational and inferential difficulties with mixture posterior distributions, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.95, pp.957-970, 2000.
- 23) Diebolt, J. and Robert, C. P.: Estimation of finite mixture distributions through Bayesian sampling, *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, Vol.56, pp.363-375, 1994.
- 24) 和合肇: ベイズ計量経済分析, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその応用, 東洋新聞社, 2005.
- 25) 伊庭幸人, 種村正美, 大森裕浩, 和合肇, 佐藤整尚, 高橋明彦: 計算統計学のフロンティアー計算統計 II, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺, 岩波書店, 2005.
- 26) 小林潔司, 貝戸清之, 林秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D, Vol.64, No.3, pp.493-512, 2008.
- 27) Ibrahim, J. G., Ming-Hui, C. and Sinha, D.: *Bayesian Survival Analysis*, Springer Series in Statistics, 2001.
- 28) Geman, S. and Geman, D.: Stochastic relaxation, Gibbs distributions and the Bayesian restoration of images, *Transaction on Pattern Analysis and*



*Machine Intelligence*, Vol.6, pp.721-741, 1984.

- 29) 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計, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.4, 255-271, 2012.
- 30) 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.
- 31) 神谷恵三, 風戸崇之: 高速道路舗装の損傷評価方法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol.13, pp.171-178, 2008.
- 32) 風戸崇之, 神谷恵三: 高速道路舗装の補修設計に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol.15, pp.73-79, 2010.
- 33) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 調査要領, 2020.
- 34) 水谷大二郎: 健全度推移の不連続性を考慮したマルコフ推移確率の非集計的推定手法, 土木学会論文集 D3, Vol.74, No.2, pp.125-139, 2018.
- 35) 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, Vo.64, No.2, pp.200-217, 2008.

## 第 4 章 連続量を用いた多元的劣化過程モデルによる高速道路の予防保全に向けた提案（RQ2）

### 4.1. はじめに

国土交通省の舗装点検要領<sup>1)</sup>では、表層や基層の適時修繕による路盤以下の層の保護等を通じ、長寿命化に向けた舗装の効率的な修繕の実施が提唱されており、予防保全の導入が求められている。高速道路舗装の維持管理においては、安全性や走行快適性の観点から具備すべき性能に関する路面指標（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI: International Roughness Index）を路面性状調査によって定期的に獲得している。また、Falling Weight Deflectometer によるたわみ量調査（以下、FWD 調査）は、応答たわみを計測することにより舗装が有する耐荷力を評価できる。アセットマネジメントでは、これらのような点検データを用いた統計的劣化予測に関する研究が蓄積されており、マルコフ劣化ハザードモデル<sup>2)</sup>の開発を契機に、多様な条件下で利用可能な統計的劣化予測モデルが多数開発されている。例えば、管理者が設定した評価単位ごとの異質性の計量化が可能な混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>3)</sup>においては、実務への適用事例も数多くみられる。さらに、高速道路舗装における路面指標や耐荷力指標のように劣化管理指標が連続量によって表現される場合に、連続量をカテゴリーに離散化することなく直接適用可能なモデルとして連続量劣化ハザードモデル<sup>4)</sup>や、離散的健全度評価がなされた個別の劣化事象に混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用し、各劣化事象内の異質性間に介在する相関性をモデル化した多元的劣化過程モデル<sup>5)</sup>などのモデルが存在する。しかし、これらのモデルは単一の指標あるいは健全度のような離散的指標を対象としており、複数の連続量指標の依存構造を考慮した劣化過程を表すモデルは存在しない。本研究では、個別に獲得される連続量の劣化管理指標に基づき、複数の連続量指標を用いて記述される劣化過程全体をモデル化する方法論を提案する。具体的には、個別の

評価指標における劣化過程を異質性を考慮した連続量劣化ハザードモデルにより表現するとともに、異質性パラメータの同時分布関数を表すコピュラを用いて複数指標間の相関構造を記述する。本研究で提案する方法論を用いることにより、連続量を用いた複数の劣化事象に関する劣化過程のベンチマーキングと劣化速度の相対評価および複数の劣化事象の時間的進展を同時に考慮した連続量を用いた多元的劣化過程モデルを開発する。さらに、モデルの推計結果を用いて、社会基盤施設の多元的劣化予測や複数の劣化事象の特性を考慮した維持補修戦略の検討のために有用な情報を作成するための方法論を提案する。以下、2. で本研究の基本的な考え方を述べ、3. で連続量を用いた多元的劣化過程モデルを提案し、4. でMCMCを用いたモデルの推定手法について詳述する。5. で、高速道路舗装を対象とした適用事例を通じて連続量を用いた多元的劣化過程モデルの有用性を議論する。

### 4.2. 本研究の基本的な考え方

#### 4.2.1. 構造物劣化速度の多元的評価

従来より、単一の健全度指標に基づいて構造物の劣化過程を表現する研究が蓄積されている。例えば、舗装の劣化過程に関しては、1) ひび割れ、わだち掘れ、平坦性という個別劣化事象を MCI 指標という単一の評価指標に総合化するとともに、1 元化された総合化指標の時間的変化をモデル化する方法、2) ひび割れ、わだち掘れ、平坦性という個別劣化事象のみに着目し、それぞれの劣化事象の経年的変化をモデル化する方法が採用されてきた。しかしながら、社会基盤施設の劣化過程には、多様な劣化要因が介在するために、1) 構造物によっては、ある単一の劣化事象が卓越する場合や、2) 複数の劣化事象が互いに相互作用を及ぼしながら劣化が進展する場合などがありうる。現実に観測される点検データには、この

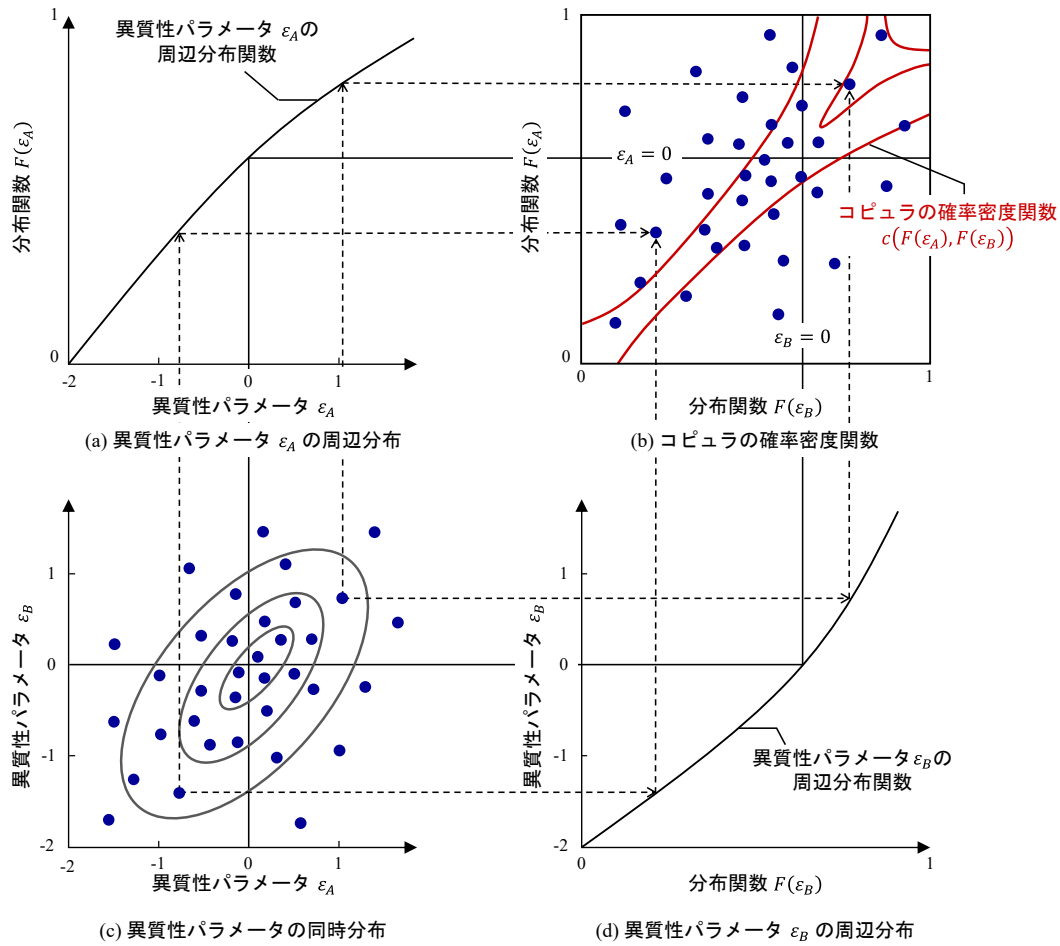


図 4.1 異質性パラメータの同時分布とコピュラ

ような複数の場合が混在する．このため、1つの指標として総合化されたデータを用いた場合、その指標がどの劣化事象の状況を表しているのかという情報は獲得できない．また、単一の劣化事象を用いた劣化過程モデルでは、社会基盤施設ごとの劣化事象の異質性や劣化事象間の相関性を表現できないという限界が存在する．

本研究で提案する連続量を用いた多元的劣化過程モデルは、構造物の劣化管理指標が連続量として表現される場合に適用可能である．単一の劣化事象に関して、構造物カテゴリーにより劣化メカニズムが多様に異なることに着目し、異質性を考慮した連続量劣化ハザードモデルを用いて、着目している劣化事象の進行過程を表現する．連続量劣化ハザードモデルでは、ベースラインモデルをベンチマーキングケースとして、構造物カテゴリーの異質性を異質性パラメータ  $\varepsilon$  により表現する．異質性パラメータ  $\varepsilon$  が確率密度関数  $p(\varepsilon)$  に従って分布する場合、個々の構造物カテゴリーの劣化速度を相対的に評価することが可能となる．すなわち、 $\varepsilon = 0$  の場合がベンチマーキングケースに該当し、 $\varepsilon > 0$  のサンプルはベンチマーキングケースより相対的に劣化が早い構造物カテ

ゴリーとして、 $\varepsilon < 0$  の場合は劣化が遅いカテゴリーとして相対評価することが可能となる．

#### 4.2.2. コピュラによる相関構造のモデル化

社会基盤施設の劣化状態を複数の劣化管理指標で評価する場合、それぞれの劣化事象に関する劣化速度の異質性を表す異質性パラメータが互いに相関構造を持つ可能性が存在する．本研究では、多変量周辺分布間の依存構造を表現するためにコピュラ<sup>6)</sup>を用いる．コピュラは、複数の確率変数の周辺分布関数とそれらの同時分布関数を接合する関数であり、多変量周辺分布の確率構造を維持しながら、同時分布関数を推定できる点に特徴がある．図-4.1は、複数の社会基盤施設の劣化状態を2種類の劣化事象  $A, B$  を用いて評価する場合を想定し、コピュラ、異質性パラメータの周辺分布、同時分布の関係を模式的に示している．(a)と(d)は各異質性パラメータの周辺分布関数であり、それぞれの劣化事象の劣化速度に関する相対評価を行うことができる．(c)は、横軸に異質性パラメータ  $\varepsilon_A$ 、縦軸に異質性パラメータ  $\varepsilon_B$  を用いて、異質性パラメータの組  $(\varepsilon_A, \varepsilon_B)$  を2次元空間上にプロットした同時分布である．このような異質性パラ

メータの空間的分布状態に関する情報を用いることにより、異質性パラメータ間の相関関係による傾向把握に加えて、個別の劣化事象に関する劣化速度を踏まえた総合評価を行うことが可能になる。例えば、2種類の劣化事象を対象とする2次元空間上においては、構造物の劣化特性を各象限の4つのカテゴリー群に分類することができる。第1象限は2つの劣化事象がともにベンチマーキングケースより劣化速度が相対的に早いカテゴリー群、第2象限と第4象限はそれぞれ劣化事象A、Bの進行が卓越しているカテゴリー群、第3象限は2つの劣化事象がともにベンチマーキングケースより劣化の進展が遅いカテゴリー群として評価できる。さらに、(b)に表されるコピュラと各異質性の周辺分布関数を用いて推定が可能な異質性パラメータの同時確率密度関数から、一方の異質性パラメータが既知である場合の、他方の異質性パラメータが生起する条件付き確率密度を算出できる。

### 4.3. 適用事例

#### 4.3.1. データの概要

本研究では、連続量を用いた多元的劣化過程モデルを高速道路舗装の点検データに適用する。高速道路会社が管理する2006年から2021年にかけて実施された路面性状調査およびFWD調査により獲得した路面指標（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI）、耐荷力指標（ $D_i$  指標）を用いる。データベースには、1) 路線名、車線区分、キロポストなどの位置情報、2) 補修年月日、補修層、3) 表層、基層、上層路盤、下層路盤種別と厚さなどの舗装構成に関する情報が高速道路舗装上の地点ごとに記載されている。本研究では獲得されたたわみ量に基づき、舗装耐荷力をAs層の損傷として評価するための $D_i$  指標を

$$D_i = \frac{D_0 - D_{90}}{A} \times 10^6 \quad (4.1)$$

と定義している<sup>14), 15)</sup>。ここに、 $D_0$  は重錘の載荷点直下のたわみ量 [mm]、 $D_{90}$  は載荷点から90cm離れた地点のたわみ量 [mm]、 $A$  はAs層の設計厚 [mm] である。本適用事例においても、 $D_i$  指標を耐荷力指標として採用する。舗装の劣化過程は路面の劣化過程と耐荷力の低下過程で構成される複合的過程であり<sup>16), 17)</sup>、路面指標と耐荷力指標に相関関係が存在すると考えられ、これらの相関性の不確実性をコピュラを用いて表現する。また、FWD調査は舗装表面に重錘を落下させ、そのときに生じるたわみ量の測定を通して舗装耐荷力を診断する手法のために通行規制を行う必要があり、耐荷力指標を広範囲かつ高密度に得ることは難しい。一方、測定車が対象区間を走行しながら実施する路面性状調査は通行規

制の必要がなく、網羅的に路面指標を獲得することができ。このように、一部の点検データ（劣化事象）においても、部分的にのみ点検結果が観測されている場合においても、多元的劣化過程モデルを用いると、連結可能性条件を満足する場合には、多元的劣化過程全体を推定することができる。構造物カテゴリーを路面指標評価長の最小単位である10[m]に設定したところ、総カテゴリー数は3,565となった。このうち、312カテゴリーで路面指標と耐荷力指標の双方が獲得されたため連結可能性条件が満たされた。

#### 4.3.2. 推計結果

分析を実施するデータに関して、排水性舗装（国内の高速道路では高機能舗装I型という呼称が良く用いられる）のみを対象とする。耐荷力指標として $D_i$  指標のみを用いるのに対して、路面指標としてはひび割れ率、わだち掘れ量、IRIの3指標を用いる。本研究では耐荷力指標と各路面指標の関係を独立に評価するために、1)  $D_i$  指標-ひび割れ率、2)  $D_i$  指標-わだち掘れ量、3)  $D_i$  指標-IRIの合計3種類の組み合わせについて個別の連続量を用いた多元的劣化過程モデルを適用して分析を行った。また、劣化特性カテゴリーとして下層路盤種別である粒状路盤とセメント安定処理路盤を考慮し、特性変数を以下の式で定義する。

$$z_i = \begin{cases} 0 & \text{地点 } i \text{ が粒状路盤のとき} \\ 1 & \text{地点 } i \text{ がセメント安定処理路盤のとき} \end{cases} \quad (4.2)$$

特性変数 $z_i$ に基づき、特性パラメータ $\theta$ を推定することにより、下層路盤として粒状路盤あるいはセメント安定処理路盤を用いた場合の影響を評価できる。

表-4.1には、耐荷力指標の未知パラメータ $\beta^D, \theta^D, \sigma^D$ の推定結果、ベイズ推定の95%信用域、Geweke検定統計量<sup>18)</sup>を示している。同様に、表-4.2に、路面指標の未知パラメータ（ひび割れ率： $\beta^C, \theta^C, \sigma^C, \alpha^C$ 、わだち掘れ量： $\beta^R, \theta^R, \sigma^R, \alpha^R$ 、IRI： $\beta^I, \theta^I, \sigma^I, \alpha^I$ ）の推定結果を示す。ただし、ひび割れ率については供用開始時および補修直後に完全回復する（ $\beta_3^C = 0$ ）と考え、 $\beta_1^C, \beta_2^C$ のみ表記している。これらのパラメータを利用して、図-4.2～図-4.5に示すような各指標の劣化パフォーマンスカーブを算出することができる。次に、コピュラを含むモデル全体のWAICを表-4.3に示す。コピュラとして、ガンベル・コピュラ、クレイトン・コピュラ、フランク・コピュラの3種類を用いた。同表より、 $D_i$  指標-ひび割れ率はクレイトン・コピュラ、 $D_i$  指標-わだち掘れ量および $D_i$  指標-IRIについてはガンベル・コピュラがWAIC最小を達成す

表 4.1 耐荷力指標におけるパラメータ  $\beta, \theta, \sigma$  の推定結果

パラメータ	期待値	上限 5%	下限 5%	Geweke 検定統計量
$\beta_1^D$	74.81	96.58	44.57	-0.156
$\beta_2^D$	1.126	1.137	1.109	0.086
$\beta_3^D$	151.5	162.5	142.2	0.677
$\theta^D$	1.602	2.271	0.353	1.697
$\sigma^D$	1.322	1.422	1.171	-0.257

表 4.2 路面指標におけるパラメータ  $\beta, \theta, \sigma$  の推定結果

	パラメータ	期待値	上限 5%	下限 5%	Geweke 検定統計量
ひび割れ率	$\beta_1^C$	0.395	0.405	0.375	0.071
	$\beta_2^C$	1.311	1.315	1.304	0.838
	$\theta^C$	1.410	1.443	1.356	0.883
	$\sigma^C$	1.120	1.129	1.103	-1.491
	$\alpha^C$	0.866	1.330	0.210	0.273
わだち掘れ量	$\beta_1^R$	5.007	5.154	4.784	-1.629
	$\beta_2^R$	1.086	1.087	1.083	1.531
	$\beta_3^R$	2.164	2.191	2.117	0.655
	$\theta^R$	0.302	0.312	0.284	0.924
	$\sigma^R$	0.451	0.457	0.438	-0.981
	$\alpha^R$	1.085	1.182	1.002	0.938
IRI	$\beta_1^I$	0.771	0.793	0.727	0.816
	$\beta_2^I$	1.143	1.145	1.139	-0.548
	$\beta_3^I$	0.041	0.047	0.034	-0.143
	$\theta^I$	0.270	0.286	0.243	0.403
	$\sigma^I$	0.606	0.613	0.593	-1.439
	$\alpha^I$	1.084	1.178	1.003	-1.571

表 4.3 コピュラの候補と WAIC

コピュラ	$D_i$ 指標-ひび割れ率	$D_i$ 指標-わだち掘れ量	$D_i$ 指標-IRI
ガンベル	18,651	16,751	15,993
クレイトン	18,568	16,777	16,013
フランク	18,608	16,787	16,004

る最適コピュラとして選定された。なお、各指標に関するベースラインモデルを表すフレキシブル関数  $f_d(t, \beta)$  (多項式関数, べき乗関数, 指数関数) についても WAIC による評価を並行して実施しており、いずれの指標においても指数関数  $f_d(t, \beta) = \beta_1(\beta_2^t - 1) + \beta_3$  が採用された。

#### 4.3.3. 異質性パラメータの同時確率密度関数

連続量を用いた多元的劣化過程モデルでは、コピュラの確率密度関数と周辺確率密度関数を用いて、異質性パラメータの同時確率密度関数を表現できる。図-

4.6～図-4.8 に、 $D_i$  指標-ひび割れ率、 $D_i$  指標-わだち掘れ量、 $D_i$  指標-IRI の異質性パラメータの同時確率密度関数を示す。図-4.6 の  $D_i$  指標-ひび割れ率において、ひび割れ率の異質性パラメータのばらつきが路面指標の中で最も大きいものの、 $D_i$  指標の異質性パラメータとの相関係数は 0.597 となり、正の相関が確認された。図-4.7 の  $D_i$  指標-わだち掘れ量は、双方の異質性パラメータが 0 付近に集中しており、相関係数は 0.160 で最も小さい値をとった。図-4.8 の  $D_i$  指標-IRI も、 $D_i$  指標-わだち掘れ量と同様の傾向がみられるが、IRI の異

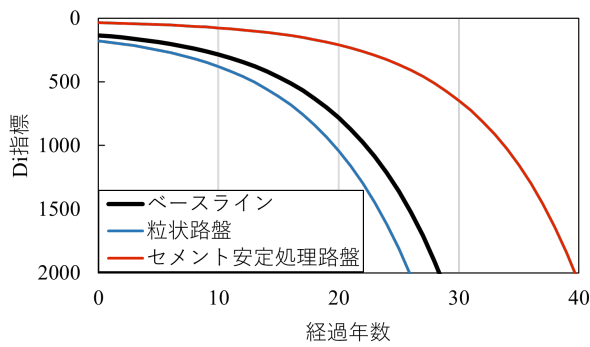


図 4.2  $D_i$  指標の劣化パフォーマンスカーブ

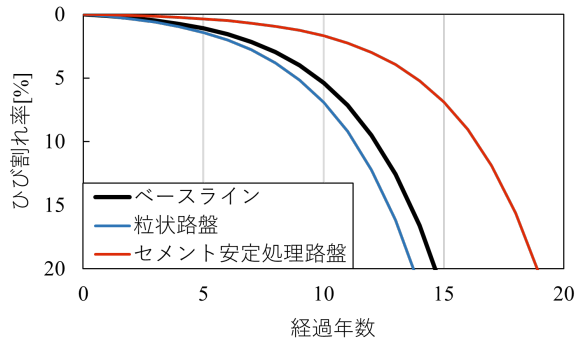


図 4.4 わだち掘れ量の劣化パフォーマンスカーブ

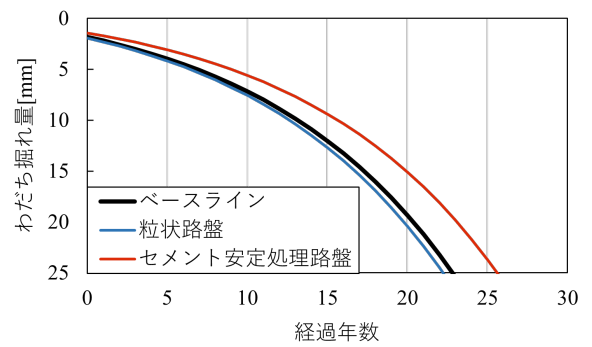


図 4.3 ひび割れ率の劣化パフォーマンスカーブ

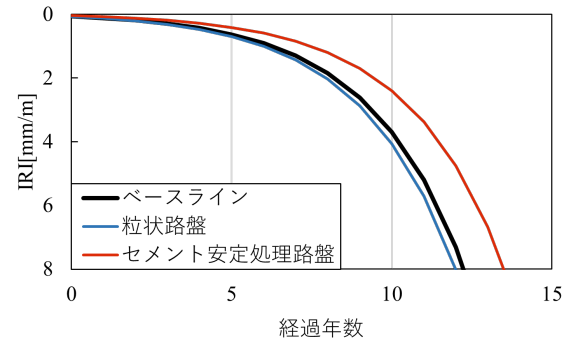


図 4.5 IRI の劣化パフォーマンスカーブ

質性パラメータのばらつきが比較的大きく、相関係数は 0.219 であった。以上に示した異質性パラメータの同時確率密度関数から、本適用事例では  $D_i$  指標-ひび割れ率の組み合わせにおいて、それぞれの劣化速度が相互に影響を及ぼしている可能性が示唆される。また、 $D_i$  指標とひび割れ率の組み合わせでは、クレイトン・コピュラが WAIC を最小とするコピュラとして推定結果に採用されたため、同時確率密度関数が第 3 象限で歪曲した形状になっている。クレイトン・コピュラでは、確率変数間の依存度合いは相対的に左下側で強く、右上側で弱い。このことは、双方の異質性が小さい値をとる第 3 象限において特に相関が強いことを表し、 $D_i$  指標とひび割れ率のいずれか一方が小さい値をとるとき、もう一方の指標も小さい値をとりやすいことを意味する。

なお、本研究ではガンベル・コピュラ、クレイトン・コピュラ、フランク・コピュラの 3 種類のコピュラを対象に推定結果として用いるコピュラを選定したが、多様なコピュラを候補としてモデルを推定し、WAIC をさらに小さくするようなモデルを選定することが望ましい。

#### 4.3.4. 多元的劣化過程

高速道路舗装の劣化管理指標について、FWD 調査は舗装表面に重錘を落下させ、そのときに生じるたわみ量の測定を通して舗装耐荷力を診断する手法のために通行規制を行う必要があり、これまでに耐荷力指標を測定し

た地点は全体のごく一部に留まっている。一方、測定車が対象区間を走行しながら実施する路面性状調査は通行規制の必要がなく、網羅的に路面指標を獲得することができる。したがって、耐荷力指標が未知、かつ路面指標が既知（複数回測定）のケースがデータセットの大部分を占める。

そこで、耐荷力指標と各路面指標における異質性の同時確率密度関数に基づいて、未知の耐荷力指標を定量的に予測することを考える。本適用事例では、耐荷力指標-わだち掘れ量と、耐荷力指標-IRI の組み合わせでは相関関係が確認できなかったものの、ひび割れ率と耐荷力指標に正の相関がみられたため、図-4.6 に示した異質性パラメータ ( $\varepsilon_D, \varepsilon_C$ ) の同時確率密度関数を利用して、未知の耐荷力指標の予測を行う。

仮に、ある地点  $i$  におけるひび割れ率の異質性  $\varepsilon_C = 1$  であった場合、同時確率密度関数を周辺化することにより、図-4.9 に示すような耐荷力指標の異質性  $\varepsilon_D$  の確率密度分布が得られる。 $\varepsilon_D$  の期待値は 0.11 であり、劣化速度が比較的大きいことが示唆される。また、確率密度関数を利用して異質性が期待値より大きな値をとるような危険側に対するリスク評価も可能である。図-4.10 には、ひび割れ率のみが獲得されている場合を想定し、図-4.9 の結果を用いて算出した  $\varepsilon_C = 0, \varepsilon_C = 1$  とした場合における耐荷力指標の期待劣化パフォーマンスカー

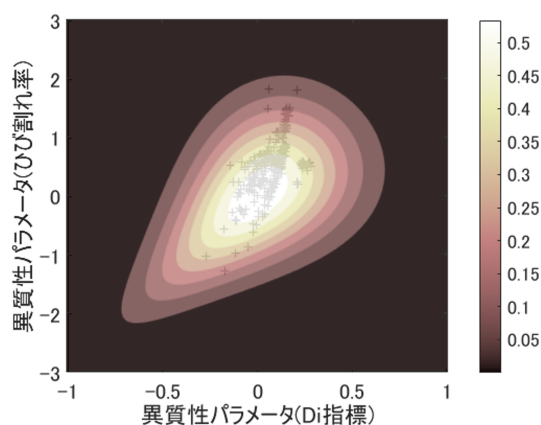


図 4.6 異質性パラメータ ( $\varepsilon_D, \varepsilon_C$ ) の同時確率密度関数

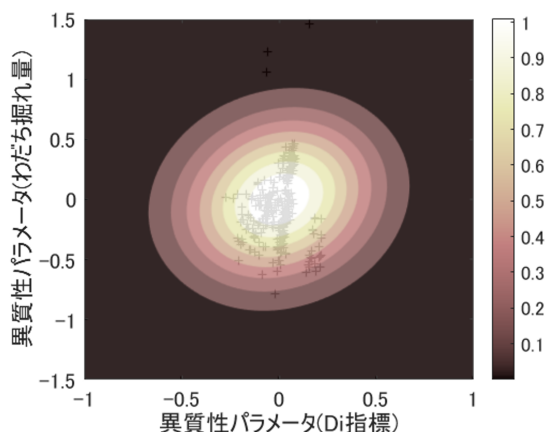


図 4.7 異質性パラメータ ( $\varepsilon_D, \varepsilon_R$ ) の同時確率密度関数

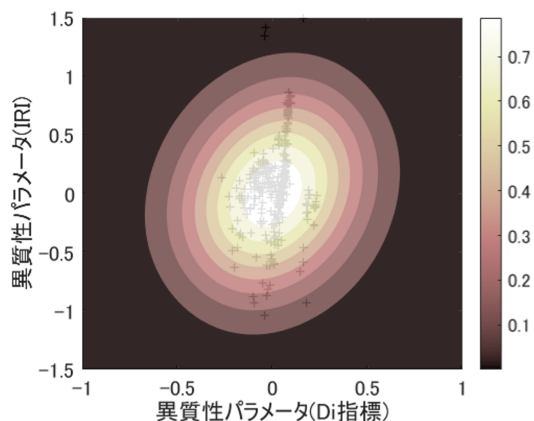


図 4.8 異質性パラメータ ( $\varepsilon_D, \varepsilon_I$ ) の同時確率密度関数

ブを示している。同図から、ひび割れ率の異質性が高い方が耐荷力の劣化が速い様子を定量的に評価することが可能となる。

#### 4.3.5. 実務的示唆

本研究では、異質性を考慮した連続量劣化ハザードモデルにおける異質性パラメータ間の相関性をコピュラを用いて定量化した。社会基盤施設の劣化速度を多元的に

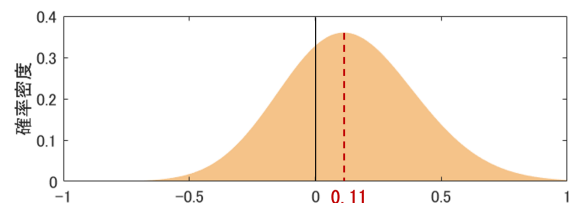


図 4.9  $\varepsilon_D$  の確率密度関数 ( $\varepsilon_C = 1$  の場合)

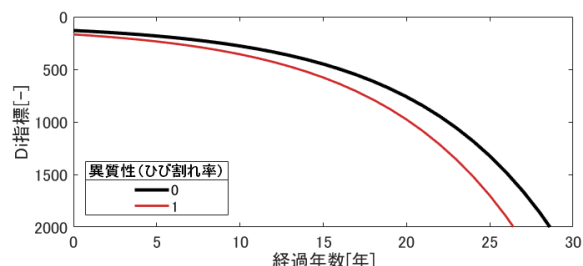


図 4.10 路面指標の差異による耐荷力指標の変動

評価することにより、以下のような考察を行うことができる。再び図-4.6 に着目すると、路面指標、耐荷力指標ともに異質性パラメータが 0 以上となる第 1 象限に位置するグループは、路面と耐荷力の双方で劣化の進展が速い。このグループに対しては、表層や基層のような浅い層の補修のみならず、上層路盤や下層路盤のような深い層を含む大規模な補修・更新の必要性を考慮に入れ、重点的な管理を行わなければならない。次に、路面指標の異質性パラメータが 0 以上、耐荷力指標の異質性パラメータが 0 以下となるような第 4 象限に位置するグループに対しては、舗装の損傷は浅い層に留まっているとみられるものの、表層や基層の打ち替えを想定する必要がある。また、路面指標の異質性パラメータが 0 以下、耐荷力指標の異質性パラメータが 0 以上となるような第 2 象限に位置するグループに対しては、舗装の深層で劣化が進展している可能性があるため重点的な管理を行うとともに、路面に損傷が表出した場合には大規模な補修・更新を勘案した補修計画を立てなければならない。さらに、あるグループが図-4.6 の各象限に位置する同時確率は、異質性パラメータの同時確率密度関数を用いて、第 1 象限が 0.33、第 2 象限が 0.17、第 3 象限が 0.33、第 4 象限が 0.17 と算出できる。これらは管理対象とする全区間の距離に対する、各象限に位置する合計距離の割合を意味しており、予算計画や大規模補修計画に有益な情報を提供できると考えられる。加えて、路面指標のみ獲得されている場合においては、耐荷力指標の異質性パラメータという断片的な情報を用いて、当該グループが、第 1 象限か第 2 象限、あるいは、第 3 象限か第 4 象



限のいずれに位置するのかを定量的に評価することができる。このように、部分的な観測情報から多元的な劣化過程を確率的に表現可能な点も本研究の特徴である。

#### 4.4. おわりに

本研究では、FWD 調査および路面性状調査により測定した舗装の耐荷力指標と路面指標（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI）を対象として、連続量を用いた多元的劣化過程モデルを適用し、予防保全的な補修計画の立案に資する分析を行った。具体的には、個別劣化事象の進行過程を異質性を考慮した連続量劣化ハザードモデルを用いて表現し、管理基準値における期待寿命と各対象施設固有の劣化速度の異質性を推定した。また、アルキメディアン・コピュラにより劣化事象間の異質性相関構造を表現可能な多元的劣化過程モデルを用いて、舗装の耐荷力指標と路面指標における異質性をグルーピングし、大規模修繕あるいは予防的補修の必要性の評価が可能となった。さらに、本研究で提案した方法論を高速道路の実点検データに適用したところ、分析に用いた当該区間においては、ひび割れ率と耐荷力指標の間に正の相関があり、特に双方の異質性が小さい領域で相関が強い傾向を確認した。

今後の課題として、以下の2点があげられる。第1に、適用事例を増やし、提案手法の有用性を検証しなければならない。本適用事例において分析対象とした区間は特に劣化が進行している区間であるため、平均的な劣化傾向を表しているとは言い難い。したがって、耐荷力指標と最も相関が強い路面指標はひび割れ率であるという知見は、当該区間のみ有効である。今後、複数の路線に提案手法を適用し、路面指標と耐荷力指標を明確にする必要がある。第2に、複数の劣化管理指標の異なる相関関係をより詳細に表現する必要がある。本研究では、耐荷力指標と各路面指標の組み合わせについてそれぞれ1パラメータ・アルキメディアン・コピュラを用いて分析を行ったが、より柔軟に依存構造を表現できる2パラメータ・アルキメディアン・コピュラを用いることが望ましい。また、3つ以上の指標の相関構造について同時に分析を行うことも可能である。その際、各指標間に異なる種類のコピュラを定義した vine コピュラ<sup>19)</sup>を用いることにより劣化事象間の相関関係をより精緻に記述することができる。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：舗装点検要領，2017。[Road Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Trans-

port and Tourism : Pavement Inspection Procedure, 2017.]

- 2) 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，pp68-82，2005。[Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. and Kobayashi, K.: Estimating Markovian Transition Probabilities for Bridge Deterioration Forecasting, *Jornal of Japan Society of Civil Engineers*, No.801, pp.69-82, 2005.]
- 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。[Obama, K., Okada, K., Kaito, K. and Kobayashi, K.: Disaggregated Hazard Rates Evaluation and Benchmarking, *Jornal of Japan Society of Civil Engineers A*, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.]
- 4) 水谷大二郎，小林潔司，風戸崇之，貝戸清之，松島格也：連続量を用いた劣化ハザードモデル：舗装耐荷力への適用，土木学会論文集 D3(土木計画学)，Vol.72，No.2，191-210，2016。[Mizutani, D., Kobayashi, K., Kazato, T., Kaito, K. and Matsushima, K.: A Continuous Deterioration Hazard Model : Application to Pavement Structure, *Jornal of Japan Society of Civil Engineers D3*, Vol.72, No.2, 191-210, 2016.]
- 5) 水谷大二郎，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：社会基盤施設の多元的劣化過程モデル，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.72，No.1，pp.34-51，2016。[Mizutani, D., Obama, K., Kaito, K. and Kobayashi, K.: Multidimensional Infrastructure Deterioration Process Model, *Jornal of Japan Society of Civil Engineers D3*, Vol.72, No.1, pp.34-51, 2016.]
- 6) Nelsen, R. B.: *An Introduction to Copulas*, Springer, 1999.
- 7) 戸坂凡展，吉羽要直：コピュラの金融実務での具体的な活用方法の解説，日本銀行金融研究所，金融研究，pp.115-162，2005。[Tozaka, H. and Yoshida, T.: Explanation of The Specific Use of Copulas in Financial Practice, *Monetary and Economic Studies, Institute for Monetary and Economic Studies, Bank of Japan*, pp.115-162, 2005.]
- 8) Sklar, A.: Random variables, joint distribution functions, and copulas, *Kybernetika*, Vol.9, No.6, pp.449-460, 1973.



- 9) Gumbel, E. J.: Bivariate exponential distributions, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.55, No.292, pp.698-707, 1960.
- 10) Clayton, D. G.: A model for association in bivariate life tables and its application in epidemiological studies of familial tendency in chronic disease incidence, *Biometrika*, Vol.65, No.1, pp.141-151, 1978.
- 11) Frank, M. J.: On the simultaneous associativity of  $F(x, y)$  and  $x + y - F(x, y)$ , *Aequationes Mathematicae*, Vol.19, pp.194-226, 1979.
- 12) Breyermann, W., Dias, A. and Embrechts, P.: Dependence structures for multivariate high-frequency data in finance, *Quantitative Finance*, Vol.3, No.1, pp.1-14, 2003.
- 13) Watanabe, S.: Asymptotic Equivalence of Bayes Cross Validation and Widely Applicable Information Criterion in Singular Learning Theory, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.11, (DEC), pp.3571-3591, 2010.
- 14) 神谷恵三, 田中敏弘, 風戸崇之: 高速道路舗装の補修設計手法に関する一考察, 舗装工学論文集, 土木学会, Vol.12, pp.1-7, 2007.
- 15) 神谷恵三, 風戸崇之: 高速道路舗装の損傷評価に関する研究, 舗装工学論文集, 土木学会, Vol.13, pp.171-178, 2008.
- 16) 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 17) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Thao, N. D., 北浦直樹: データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.2, pp.63-80, 2015.
- 18) 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.
- 19) Bedford, T. and Cooke, R. M.: Vines-a new graphical model for dependent random variables, *Annals of Statistics*, Vol.30, No.4, pp.1031-1068, 2002.

## 第 5 章 部材・損傷の劣化シミュレーションに基づく橋梁の補修優先順位の決定 (RQ3)

### 5.1. はじめに

EBPM の検討内容として橋梁の長寿命化計画（個別施設計画）の立案を考える。2022 年時点において、近接目視点検は 2 巡目に入っている。1 巡目（2014～2018 年）においては、早期あるいは緊急に措置を講ずるべき橋梁（すなわちⅢ判定とⅣ判定の橋梁）を抽出し、それらに対する具体的な補修・更新計画を作成すればそれが個別施設計画となった。1 巡目は対処療法的な事後保全段階であり、全ての橋梁を対象として目視点検データを収集するという事に主眼が置かれていた。一方で、2 巡目の近接目視点検においては、（新たにⅢ判定、Ⅳ判定となる橋梁の抽出はもちろんのこと、）いわゆる計画的な予防保全にシフトすることが求められる。具体的には大量のⅡ判定橋梁（点検時点では損傷が顕在化していない橋梁群）の中から次期点検時までⅢ判定、Ⅳ判定に進行する可能性のある橋梁を抽出して補修優先順位を決定することが必要であり、これまでに蓄積された膨大な点検データの本格的な分析が不可欠である。これらの点検データは橋梁部材・損傷ごとに記録されている。

橋梁の損傷発生過程は、各事象がランダムに発生するような数え上げ過程としてモデル化できる。これらの損傷発生をポアソン過程としてモデル化する。さらに、現実の橋梁の損傷発生過程は、橋梁の部材さらには地域ごとに異なる劣化特性を有していると考えられるため、橋梁部材の損傷発生率の異質性を考慮することが可能な混合ポアソン過程を提案する。その際、発生率をポアソンモデルで表現するとともに、その異質性をガンマ分布で表現したポアソンガンマ発生モデルを用いて橋梁部材・損傷の発生確率を求める。新規で発生した損傷、およびすでに観測された損傷のその後の劣化過程はマルコフ劣化ハザードモデルにより表現する。ポアソンモデルと同様に、橋梁の部材・損傷ごとに劣化過程が異なると考えら

れることから、それらの異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルにより損傷の状態推移を表現することができる。

以上の問題意識のもと、本研究では健全度Ⅱ判定の橋梁を対象に、統計的劣化予測結果とフォルト・ツリー分析（部材から橋梁全体系へ至るリスク経路の可視化とリスクの定量的評価）に基づく、補修優先順位の決定フローの開発を行う。さらに、開発した決定フローを実際の橋梁群に適用し、具体的な補修優先順位を提案する。

### 5.2. 本研究の基本的な考え方

#### 5.2.1. 個別施設計画を対象とした EBPM

個別施設計画における EBPM は、橋梁の長期的な耐久性と機能性を保持することを目指す。本研究では、予防保全を中心に、継続的な橋梁の健全性評価と潜在的リスクの早期識別に重点を置くことが特徴である。この過程で、科学的根拠に基づく厳密なデータ分析が行われ、橋梁の各部材の状態を定期的にモニタリングし、必要に応じた補修や更新計画を策定する。これより、橋梁の機能性を長期間にわたり維持し、最終的には橋梁全体の寿命を延ばすことが期待できる。

本研究では、リスクベースの意思決定が重要視される。すなわち、リスク評価に基づき、最も注意を要する部材に対して補修作業を行うことで、橋梁の安全性を確保しつつ、経済性も追及する。このような計画的かつ戦略的な維持管理は、将来的に大規模な修繕や建て替えのコストを削減し、長期的な視点から見た時のコスト効率の良い維持管理を実現する。

個別施設計画を対象とした EBPM の枠組みを採用することにより、橋梁管理はデータに基づいた科学的根拠から意思決定過程の透明性が高くなり、理解しやすいものとなる。このプロセスを通じて、橋梁の劣化予測、リ

スク評価、さらには補修資材配分の効率化が可能となることから、橋梁の維持管理に関する意思決定が容易となる。結果として、社会インフラとしての橋梁の価値を長期間にわたり最大化し、持続可能な社会の実現に貢献することが期待される。本研究が提案する個別施設計画における EBPM のアプローチは、橋梁管理の新たな標準となる可能性を秘めており、将来的には他の社会基盤施設の管理においても応用されることが期待される。科学的根拠に基づく管理手法の普及は、インフラの持続可能性を高め、結果として社会全体の利益へとつながる。

### 5.2.2. リスク評価

目視点検データを用いた統計的劣化予測結果を活用したリスクマネジメント研究として、貝戸ら<sup>1)</sup>は、道路巡回頻度の決定問題に対して、路上障害物の発生リスクをポアソンガンマモデルにより定式化し、点検データからモデルの推計を行った。さらに、津田等<sup>2)</sup>は、多段階の健全度で表現される橋梁の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルにより定式化し、管理限界到達時のリスク評価を可能にした。さらに小濱等<sup>4)</sup>は、個々の社会基盤構造物の劣化速度の差異を異質性パラメータとして表現する、混合マルコフ劣化ハザードモデルを開発した。

一方で、複数部材により構成される橋梁のリスクを考える際には、橋梁全体リスクに直結するような部材を抽出し、そのような部材の損傷が橋梁全体の劣化リスクに発展する可能性を記述することが有効である。このような問題に関しては一般的にフォルト・ツリー分析が適用される。土木分野においてもいくつかの適用事例<sup>5)6)</sup>があり、山本等<sup>7)</sup>は高速道路の交通管制システムのメカニズムをフォルト・ツリーを用いて表現している。その際、システムを構成する機器の故障による社会影響度を表現し、生起確率との積によって末端事象のリスクを定量化した。これにより、末端事象ごとに異なるシステムの故障がもたらす社会的影響度の相違を考慮したリスク評価が可能となった。本研究においても、フォルト・ツリーを構成する際に橋梁部材ごとの重要度を考慮する。これらの値は、点検データから特定のアルゴリズムに従って算出される定量指標であることが望ましい。そこで、機械学習手法の一つである決定木の特徴量重要度を用いることを考える。決定木のジニ不純度の最小化に基づく、ツリーアルゴリズムを橋梁部材データに適用することで、その重要度を求めることが可能である。したがって、本研究では橋梁部材の重要度を求めることを目的として、部材健全度評価から橋梁全体の健全度評価を推論する決定木を構築する。

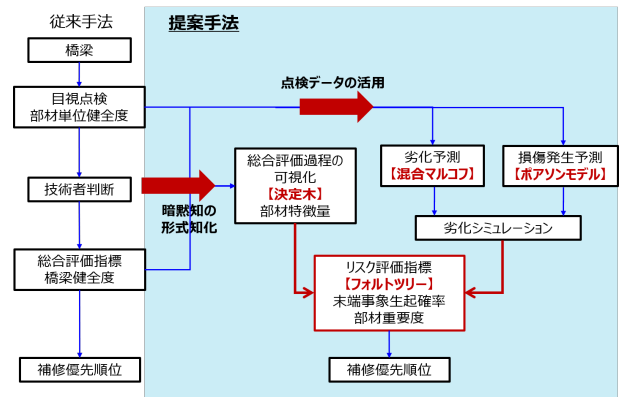


図 5.1 本研究の分析フロー

### 5.2.3. 橋梁の健全度判定

道路橋管理者は国土交通省が示す道路橋定期点検要領<sup>8)</sup>に従い定期点検を行っている。定期点検では、部材単位と道路橋ごとの健全度診断を表-5.1 の区分により行う。橋梁定期点検要領に従い、部材単位の健全性の診断を行う際、構造上の部材区分あるいは部位毎、損傷種類毎に行うことを基本している。また、道路橋毎の健全性の診断を行う際は、当該橋梁の対策区分の判定や、所見あるいは部材単位の健全性の診断の結果などを踏まえて総合的に判断している。補修計画の策定の際、一般的に道路橋毎の健全性の診断結果を用いるが、同一判定内の優劣がついていない。本研究では、部材単位の健全性の診断を用いて、道路橋および全体の健全度に関するリスク値を算出し比較することで、同一判定内の優劣を付けられる点において優位性がある。さらに、部材ごとの重要度を機械学習を援用することで明らかにし、フォルトツリー分析に用いる点に学術的特徴がある。本研究の分析フローを図-5.1 に示す。

## 5.3. リスク分析

### 5.3.1. 次期健全度シミュレーション

部材-損傷グループ  $k$  ( $1, \dots, K$ ) を対象として、任意期間後の新規損傷発生と劣化状況のシミュレーションを行う。シミュレーションはモンテカルロ法を採用する。モンテカルロ法では、乱数を用いて数値のばらつきを人為的に発生させ、変数の近似解を得ることで推定値を求めることが可能である。シミュレーションは混合マルコフ劣化ハザードモデルのマルコフ推移確率に基づき、任意時点の健全度  $i$  から  $z$  後に次期健全度  $j$  となる推移確率  $\Pi^k = [\pi_{i,j}^k(z)]$  を用いて行う。

いま、部材-損傷グループ  $k$  に属する  $l_k$  ( $l_k = 1, \dots, L_k$ ) において、時刻  $\tau_A^{l_k}$  で観測された健全度  $h(\tau_A^{l_k})$  を与件とし、将来時点  $\tau_B^{l_k} = \tau_A^{l_k} + z$  における

表 5.1 4 段階健全度評価基準

健全度	区分	状態
I	健全	道路橋の機能に支障が生じていない状態.
II	予防保全段階	将道路橋の機能に支障が生じていないが、 予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態.
III	早期措置段階	道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、 早期に措置を講ずべき状態.
IV	緊急措置段階	利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、 緊急に措置を講ずべき状態.

健全度を  $h(\tau_B^{l_k})$  と表す. ここで,  $z$  ( $z = 1, \dots, Z$ ) は任意の時間幅を示す. 一様分布に従う乱数  $r \in [0, 1]$  を発生させ

$$\sum_{s=h(\tau_A^{l_k})}^{\theta_l-1} \pi_{h(\tau_A^{l_k}),s}^k < r \leq \sum_{s=h(\tau_A^{l_k})}^{\theta_l} \pi_{h(\tau_A^{l_k}),s}^k \quad (5.1)$$

を満たす場合, 任意の時間幅で健全度は  $h(\tau_A^{l_k})$  から  $h(\tau_B^{l_k}) = \theta_l$  へ推移したとみなす. また, この期間において, 対象とする部材にはポアソンガンマモデルによる損傷発生確率  $P_o$  に基づき, 新規損傷が発生するものとする. この手順を  $N$  回繰り返すことを考え, シミュレーション  $n$  ( $n = 1, \dots, N$ ) 回目の結果を添え字  $n$  を用いて表す.  $N$  回のシミュレーションは, 目視点検上の管理限界を示す  $\theta_l$  を設定して行う. 本研究においては,  $\theta_l$  を III と設定する. シミュレーションでは, 部材-損傷グループ  $k$  に属する損傷  $l_k$  ( $1, \dots, L_k$ ) の健全度が任意期間後に少なくとも一つが  $\theta_l$  となる個数を数える. ここで, 損傷  $l_k$  が  $n$  回目のシミュレーションにおいて, 健全度  $h(\tau_A^{l_k})$  から  $h(\tau_B^{l_k}) = \theta_l$  へ推移する場合をダミー変数を用いて

$$\zeta_{l_k}^n = \begin{cases} 1 & h(\tau_B^{l_k})^n = \theta_l \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (5.2)$$

と定義する. さらに,  $n$  回目シミュレーション時の部材-損傷グループ  $k$  に属する  $L_k$  個の損傷のうち, 少なくとも一つが管理限界に到達する場合をダミー変数を用いて

$$\kappa_k^n = \begin{cases} 1 & \sum_{l_k=1}^{L_k} \zeta_{l_k}^n \geq 1 \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (5.3)$$

$N$  回のシミュレーションにおいてグループ  $k$  が管理限界に到達する確率を  $P(k)$  とする.

$$P(k) = \frac{\sum_{n=1}^N \kappa_k^n}{N} \quad (5.4)$$

以上の手順により算出された  $P(k)$  を末端事象としてフォルト・ツリーを構成する. 劣化シミュレーションの概略図を図-5.2 に示す.

### 5.3.2. フォルト・ツリー分析

本研究で分析対象となる橋梁は複数の部位から構成される構造系である. フォルト・ツリー分析 (以下, FTA と略記) は, 部位レベルの劣化事象の発生が橋梁全体のリスクに発展するメカニズムを階層的に表現し, 下位レベルにあるリスク事象の生起確率に基づいて, 分析対象とする全体の期待リスクを評価することが可能である. 事象間の因果関係は, AND ゲートと OR ゲートと呼ばれる論理構造を用いて表現する. 本研究では, 頂上事象として, を管理する際の期待リスク (目視点検で最低ランクの健全度が判定されるリスク) が発生する事象としている. いま, 図-5.3 に, 単純なフォルトツリーを想定し, より上位のリスク事象が生起する確率および期待リスクの計算方法を説明する. 上位事象を  $A$  とし, 中位事象として  $B, C$ , 下位事象として  $D, E$  を考える. さらに, 各リスク事象が生起する確率をそれぞれ  $P(x)$  ( $x = A, B, C, D, E$ ) とする. このとき, 中位事象  $B$  のリスク事象が生起する確率は, 下位事象  $D$  と  $E$  に関する「OR 事象 (事象  $D$  と  $E$  のいずれか一方が生起した場合に生起する事象)」であることから

$$\begin{aligned} P(B) &= P(D \cup E) \\ &= P(D) + P(E) - P(D \cap E) \end{aligned} \quad (5.5)$$

と表される. 上位事象  $A$  については, 中位事象  $B$  と  $C$  に関する「AND 事象 (事象  $B$  と  $C$  の両方が生起した場合に生起する事象)」であり,

$$P(A) = P(B \cap C) = P(B)P(C) \quad (5.6)$$

と表すことができる.

つぎに, 期待リスクをリスク事象生起確率  $\times$  重要度として定義する. ここで, 重要度は, 全体の管理限界に対して各部位のリスク事象が与える構造的な影響の程度と

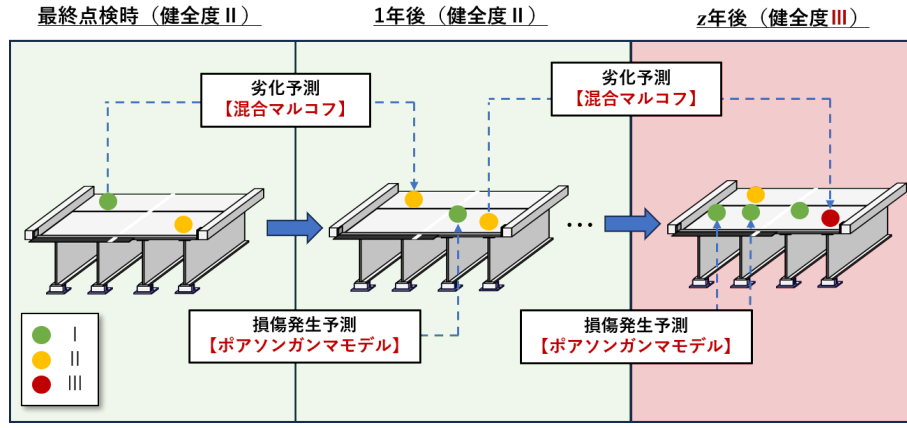


図 5.2 劣化シミュレーションの概略図

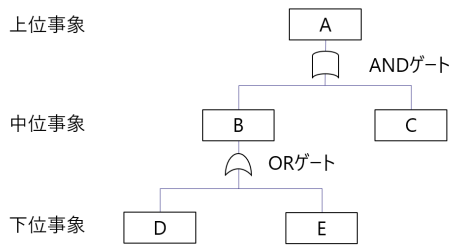


図 5.3 フォルト・ツリーの基本概念

して定義される．本研究では，重要度として決定木により算出された特徴量重要度を用いた．いま，各部位の重要度をそれぞれ  $T(x) (x = A, B, C, D, E)$ ，期待リスクを  $R(x) (x = A, B, C, D, E)$  とすれば，OR ゲートで結合される中位事象 B の期待リスク  $R(B)$  は，

$$R(B) = P(D)T(D) + P(E)T(E) - P(D \cap E) \min\{T(D), T(E)\} \quad (5.7)$$

となる式 (5.7) の第 3 項は，事象 D と事象 E が同時に生じた場合には，重要度の大きな事象が生じたものとして期待リスクを計算することを意味している．さらに，AND ゲートで結合される上位事象 A の期待リスク  $R(A)$  は

$$R(A) = P(B)P(C) \max\{T(B), T(C)\} \quad (5.8)$$

と表せる．以上は，単純なフォルト・ツリーを想定しているために，上位に位置する事象が下位に位置する 2 つの事象の結合によって表現されている．しかしながら，実際の橋梁はより複雑な構造系をなしており，下位に位置する事象が複数の事象の結合によって表現される場合，リスク事象生起確率，および期待リスクの計算式は以下で示す一般化した計算式を用いる．いま，上位事象 H が，下位事象  $H_n (n = 1, \dots, N)$  を AND ゲートで結

合したもので表現されたとすると，上位のリスク事象生起確率  $P(H_n) (n = 1, \dots, N)$  として，

$$P(H) = P\left(\bigcap_{n=1}^N H_n\right) = \prod_{n=1}^N P(H_n) \quad (5.9)$$

となる．また，上位事象 H の期待リスク  $R(H)$  は，下位事象のリスク事象の影響度を  $T(H_n) (n = 1, \dots, N)$  として，

$$R(H) = \prod_{n=1}^N P(H_n) \max\{T(H_1), \dots, T(H_N)\} \quad (5.10)$$

と表される．一方，上位事象 H が下位事象を OR ゲートで結合したもので表現されたとすると，上位リスク事象生起確率は，包除原理により，

$$P(H) = P\left(\bigcup_{n=1}^N H_n\right) \quad (5.11)$$

$$= \sum_{n=1}^N P(H_n) - \sum_{i < j} P(H_i \cap H_j) + \sum_{i < j < k} P(H_i \cap H_j \cap H_k) - \dots + (-1)^{1-\delta_N} P(H_1 \cap \dots \cap H_N) \quad (5.12)$$

となる．ただし， $\delta_N$  は  $N$  が奇数の時に 1 を，偶数の時に 0 を取るダミー変数である．また，上位事象 H の期待

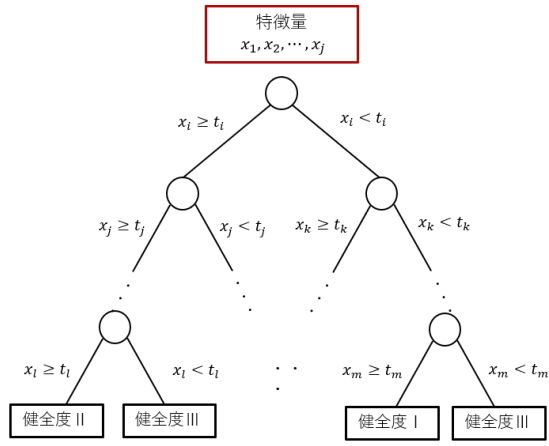


図 5.4 決定木

リスクは,

$$\begin{aligned}
 R(H) &= \sum_{n=1}^N P(H_n) T(H_n) \\
 &- \sum_{i < j} P(H_i \cap H_j) \min\{T(H_i), T(H_j)\} \\
 &+ \sum_{i < j < k} P(H_i \cap H_j \cap H_k) \max\{T(H_i), T(H_j), T(H_k)\} \\
 &- \dots + (-1)^{1-\delta_N} P(H_1 \cap \dots \cap H_N) \\
 &\times [\max\{T(H_1), \dots, T(H_N)\}]^{\delta_N} \\
 &\times [\min\{T(H_1), \dots, T(H_N)\}]^{1-\delta_N} \quad (5.13)
 \end{aligned}$$

と表すことができる。以上の演算ルールを用いて、全体の期待リスクを計算することができる。すなわち、末端のリスク事象生起確率、影響度を与件とすることで、全体の期待リスクの定量的な評価が可能となる。

### 5.3.3. 決定木

本研究では教師あり機械学習である決定木により、橋梁の構成部材の健全度から橋梁全体の健全度を推論する。教師あり機械学習とは、あらかじめ人間が用意した入力と出力の組み合わせを訓練データとして与え、入出力の関係を学習することで新しく与えた入力に対して出力を予測する機械学習法である。決定木は、ある基準に基づいてデータの分割を繰り返し、複雑な識別境界を得ることが可能である。また、一般に分類問題および回帰問題を対象としたノンパラメトリックモデルであるため、あらゆる問題に適用可能であることが知られている。本研究では分類問題を扱うため、以下では分類問題に限定した説明を行う。

図-5.4 に示すように、入力として特徴量ベクトル  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_j)$  をデータを特徴量  $x_j$  と閾値  $t_m$  の大小関係により、各領域に特定のクラスを割り当てることで分類を行う。ノード  $m$  の分割規則を構成する際に、これらすべての点を不純度で評価する。ここで、不純度と

はどれだけクラスの観測値が混ざっているかを表す指標である。決定木は、不純度の減少量が最大となるように分岐を行い、作成したツリーにより推論を行う。いま、ノード  $m$  において候補となる特徴量と閾値の組み合わせ  $\theta = (x_j, t_m)$  により、データ  $Q_m$  を  $Q_m^{left}$  と  $Q_m^{right}$  に分割する。

$$Q_m^{left}(\theta) = \{(\mathbf{x}, C) | x_j \leq t_m\} \quad (5.14)$$

$$Q_m^{right}(\theta) = Q_m \setminus Q_m^{left}(\theta) \quad (5.15)$$

本手法では、決定木の学習方式として CART(classification and regression tree)<sup>15)</sup> を用いており、CART では不純度としてジニ不純度が推奨されている。ノード  $m$  において、 $i$  番目のクラス  $C_i$  ( $i = 1, \dots, K$ ) のデータが選択される確率を  $P(C_i|m)$  とすると、ジニ不純度  $L(Q_m)$  は

$$L(Q_m) = \sum_{i=1}^K (P(C_i|m)(1 - P(C_i|m))) \quad (5.16)$$

と表すことができる。さらに分割後の不純度

$$L(Q_m, \theta) = \frac{n_m^{left}}{n_m} L(Q_m^{left}(\theta)) \quad (5.17)$$

$$+ \frac{n_m^{right}}{n_m} L(Q_m^{right}(\theta)) \quad (5.18)$$

を推計する。ここで、分割前のサンプル数を  $n_m$ 、分割後のサンプル数をそれぞれ  $n_m^{left}, n_m^{right}$  と表している。さらに、最適な特徴量と閾値のペア  $\hat{\theta}$  を決定する関数を

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} L(Q_m, \theta) \quad (5.19)$$

で定義する。分割後の不純度最小化に基づき、各ノードに対して入力ベクトルごとに考え得る  $\hat{\theta}$  を決定することで木が成長する。本手法を用いることで、所与のデータから適切に分類することが可能になる。しかしながら、ここに示した学習法によれば、学習データを完全に分けるまで分割を進めるため、過学習の問題が生じる。本研究では、木の最大深さを調節し、過学習を防ぐことにした。

決定木をはじめとしたツリーモデルは、各特徴量が分類にどの程度寄与したのかを表す特徴量重要度を算出することが可能である。決定木における特徴量  $x_j$  に対する特徴量重要度  $I(j)$  は、

$$I(j) = \sum_{m \in F(j)} \left[ n_m \cdot L(Q_m) \right. \quad (5.20)$$

$$\left. - \{n_m^{left} \cdot L(Q_m^{left}) \right. \quad (5.21)$$

$$\left. + n_m^{right} \cdot L(Q_m^{right})\} \right] \quad (5.22)$$



		グループ（部材種別）													合計
		堅壁	胸壁	翼壁	橋台その他	主橋トラス上・下弦材	主橋トラス部	横桁	床版	主桁	主桁部	梁部	格点	柱部・壁部	
グループ（損傷種別）	腐食				○	○		○	○	○	○	○	○	○	9
	亀裂							○			○				2
	防食機能の劣化							○	○	○	○	○			5
	ひびわれ	○	○								○	○			4
	剥離・鉄筋露出		○						○	○	○			○	5
	漏水・遊離石灰								○	○	○				3
	補修・補強材の損傷								○	○				○	3
	床版ひびわれ								○						1
	うき	○	○					○	○		○	○		○	7
	遊間の異常										○				1
	その他	○	○						○	○	○			○	6
	定着部の異常						○								1
	漏水・滞水				○				○			○			3
	変形・欠損		○					○	○		○			○	5
	土砂詰まり				○										1
合計		3	5	0	3	1	1	5	10	2	11	8	1	3	56

図 5.5 部材-損傷グループ

と表される．ここで、 $F(j)$  は特徴量  $x_j$  で分割されたすべてのノード集合である．本研究では式 (5.22) を全特徴量に対して規格化する．すなわち、 $I(j) \in [0, 1]$  となるように規格化して用いる．

## 5.4. 適用事例

### 5.4.1. 適用事例の概要

本研究で提案した補修優先順位決定モデルを、国土交通省近畿地方整備局（以下、近畿地整）が管理する橋梁に適用する．4,175 橋における供用開始年数から 1 巡目までに発生した部材-損傷データ 177,743 件、2 時期点検データ総数 114,045 件を対象として、ポアソンガンマモデル、混合マルコフ劣化ハザードモデルにより、部材-損傷ごとの損傷発生確率および状態推移確率を推定した．さらに、推計モデルに基づく劣化シミュレーションを実施し、フォルトツリー分析を行う．劣化シミュレーションで対象となる部材損傷全 56 グループをに図-5.5 示す．フォルトツリー分析は 2 巡目点検により健全度がⅡと判定された 3,909 橋に対して行う．

### 5.4.2. 劣化リスクの算出

決定木はデータ総数 11,598 件（80% 訓練データ、10% テストデータ、10% 検証データ）を対象とし、分類過程から特徴量重要度を算出した．特徴量として、橋梁の主要部材である主桁、横桁、床版、下部構造、支承、その他の計 6 部材の健全度を設定し、全ての健全度が明らかとなっている橋梁に対して決定木の推論を行う．このように、部材健全度から橋梁全体の健全度を推論する

決定木を構築し、算出された特徴量重要度を重要度として考える．特徴量重要度の値が高いことは、すなわち橋梁全体の健全度を分類において顕著な影響を及ぼしていることを示す．さらに、本研究では、特定のデータセットに対する過剰適合を避けるために検証データセットを用意し、最大深さを 4 として設定する．これにより、モデルの汎用性能を保ちつつ、高い分類精度を保つ決定木を構築した．テストデータにおける分類精度は 0.881 であり、高い精度を記録した．図-5.6 に本研究で構築されたツリーを示し、分類過程から算出された特徴量重要度を表-5.2 示す．特徴量重要度の観点から主桁の損傷が重要視される傾向にあるといえる．さらに図-5.7 では精度の内訳を示す混同行列を示す．Predicted label は予測結果、True label は正解となる健全度を示す軸である．さらに、1,2,3 の数字はそれぞれ橋梁の健全度判定Ⅰ、Ⅱ、Ⅲを示す．すなわち、対角成分が分類において正解となった橋梁数である．混同行列の 1 行 2 列目の成分と 2 行 1 列目の成分の数が多いことから、部材健全度から、橋梁全体の健全度Ⅰ、Ⅱを分類することが容易ではないことが考えられる．今後、決定木においては健全度Ⅰ、Ⅱ判定の分類精度を向上させることが課題となる．

図-5.6 に本研究で橋梁に適用するフォルト・ツリーを示す．末端事象となるのは、各橋梁の部材-損傷ごとに実施した劣化シミュレーションの結果である．分析対象となるデータでは、支承の損傷が十分に観測されず、損傷発生確率および状態推移確率が算出できないことから、分析対象外としている．末端事象は確率事象となるが、中位事象には決定木の特徴量重要度を乗じていることからリスク事象となる．期待リスクが高い橋梁は、対象期間内に健全度Ⅲ判定となる可能性が高い橋梁であるといえる．また、フォルト・ツリーの利点として、リスクの発生経路が明確であることが挙げられる．末端事象の確率を確認することで、期待リスクに影響を与える部材-損傷を把握することができる．

### 5.4.3. 補修優先順位の提案

図-5.10 に劣化シミュレーションを 1,5 年後とした場合の期待リスクの分布を示す（左図が 1 年後、右図が 5 年後を対象）．さらに図-5.11 には拡大したものを示す．対象期間を変えることで期待リスクが分散すると同時に、期待リスクの高い橋梁数が増加傾向にある．これより、長期的な視点においては、多くの橋梁の劣化リスクが高まることが確認できる．シミュレーションは任意の期間を対象として行うことが可能である．したがって、補修施策の計画年次に合わせて設定することが望ましい．

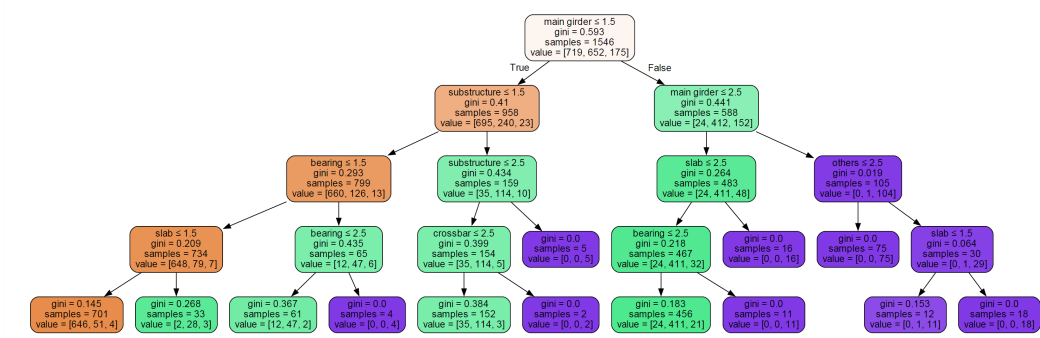


図 5.6 本研究で構築した決定木

表 5.2 特徴量重要度

	主桁	横桁	床版	下部構造	支承	その他
特徴量重要度 $I(j)$	0.616	0.005	0.106	0.153	0.120	0.000

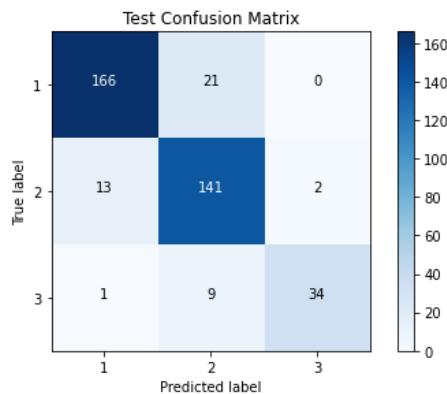


図 5.7 混同行列

リスク値の分布上位に位置する橋梁の中には、期待リスクが 1 を上回る橋梁が存在する。期待リスクはいずれかの橋梁部材・損傷が健全度Ⅲ判定となる確率に基づいて算出される。しかしながら、中位事象において重要度を乗じていることからリスク事象となる。リスク値の算出式は 5.3.2 の式 (5.13) 式によりリスク値大きく算出するようにしているためである。  $\delta_N$  が奇数時の重要度は max 関数により大きな値をとり、偶数時の重要度は min 関数により小さな値を取る演算ルールに従う。決定木による特徴量重要度に大きな差が乗じている場合、以上の演算ルールに従うとリスク値が 1 を超えるような大きな値となる傾向がある。しかしながら、期待リスクは橋梁部材のいずれかが健全度Ⅲ判定となる確率に基づいて算出されるため、期待リスクが高いものは劣化する確率が高い橋梁であると解釈しても問題はない。

図-5.9 に実際の橋梁に FTA を適用した結果を示す。最終点検から 5 年後の時点を対象に劣化予測を行ってい

る。末端事象では、健全度Ⅲへの劣化確率が最も高い主桁に着目している。対象橋梁においては、主桁のうきの劣化確率が高い。したがって主桁のうきに焦点を当てた補修が必要であると考えられる。このように、末端事象の確率を確認することで注意すべき橋梁部材とその損傷を把握することができる。期待リスクが上位に着目し、末端事象の確率に基づいた補修計画を策定するで効率化が期待される。

## 5.5. おわりに

本研究では、橋梁の長寿命化計画（個別施設計画）における EBPM を目的とし、補修優先順位の決定フローの開発を行った。ポアソンガンマモデルを用いることで、橋梁部材において対象期間内に発生する損傷を表現した。さらに、発生した損傷と既存の損傷は混合マルコフ劣化ハザードモデルにより劣化過程を表現するシミュレーションモデルを提案した。提案モデルを通じて、橋梁各部材に存在する損傷リスクをフォルト・ツリー分析により体系化し、橋梁ごとの期待リスクを算出した。フォルト・ツリー分析の利点を活かし、リスクの発生経路が明確化されることから、重点的に補修を講じるべき橋梁部材・損傷を把握することが可能となる。

科学的根拠に基づいた個別施設計画における EBPM の枠組みを採用することで、橋梁管理は明確化された意思決定過程へと変化する。劣化予測、リスク評価を通じて橋梁維持管理の意思決定がより効率的となり、社会インフラとしての価値を長期にわたり最大化し、持続可能な社会への貢献が期待される。本研究で提案する EBPM のアプローチは、橋梁管理の新たな標準となる可能性があり、将来的には他の社会基盤施設への応用も



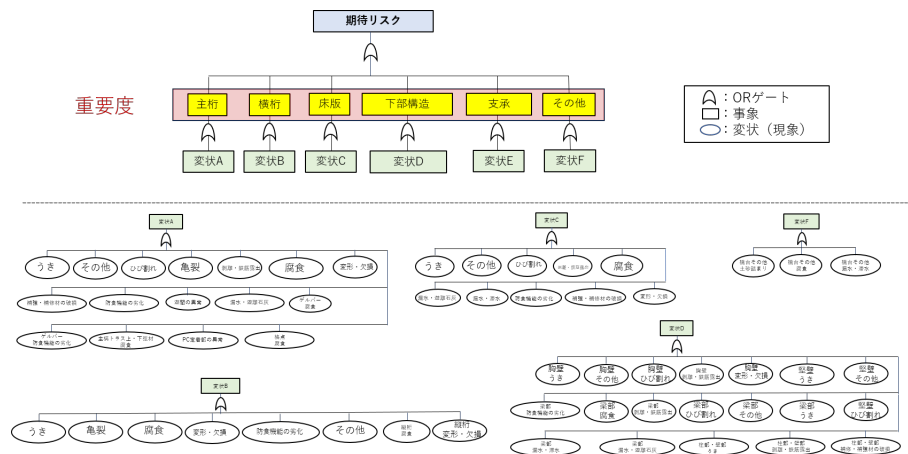


図 5.8 橋梁を対象とした FTA

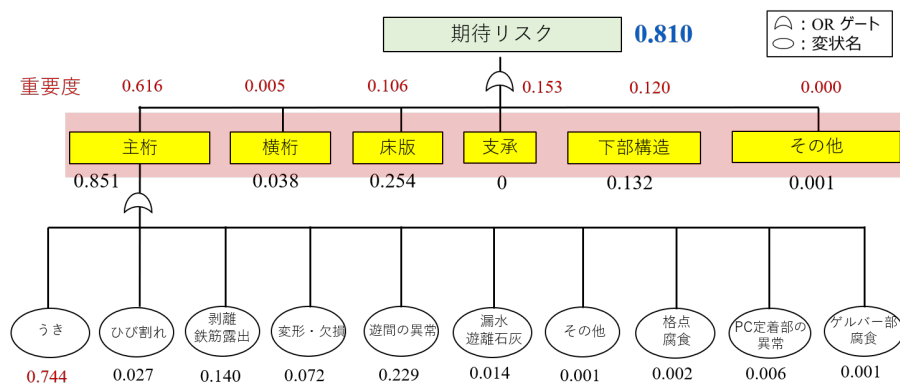


図 5.9 実橋梁における FTA の適用結果

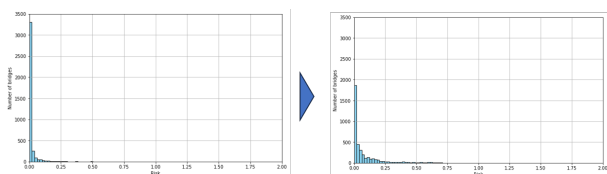


図 5.10 期待リスクの分布

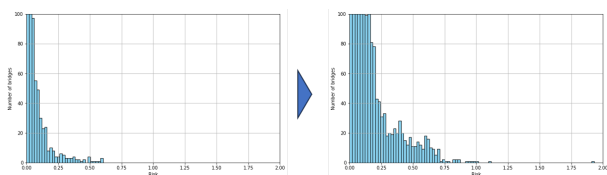


図 5.11 期待リスクの分布 (拡大)

見込まれる。本研究における提案手法は広範な応用可能性を秘めており、持続可能な社会構築への一助となることが期待される。

## 参考文献

- 1) 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集
- 2) 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.
- 3) 貝戸清之, 福田泰樹, 起塚亮輔, 橋爪謙治, 出口宗浩, 横山和昭: 遊離石灰法に基づく RC 床版の劣化予測および補修優先順位の決定法, 土木学会論文集 F4, Vol. 68, No.3, pp.123-140, 2012.
- 4) 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.
- 5) 貝戸清之, 金治英貞, 小林寛, 間嶋信博, 大石秀雄, 松岡弘大: 目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法, 土木学会論文集 F4, Vol. 67, No. 2, pp.74-91, 2011.
- 6) 貝戸清之, 金治英貞, 杉岡弘一, 大石秀雄, 松岡弘大: 鋼材腐食ハイブリッド劣化予測とフォルト・ツリー分析を用いた長大橋の最適点検間隔, 土木学会論文集 F4, Vol. 69, No. 2, pp.84-101, 2013.
- 7) 山本浩司, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化現

象を考慮した大規模交通管制システムの動的故障解析, 土木学会論文集 F, Vol.64 No.3, pp.295-310, 2008.

- 8) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領, 2019.
- 9) 東京大学教養学部統計学教室編：統計学入門, 東京大学出版会, 1991.
- 10) Maher, M.J.and Summersgill, I.: A comparative methdology for the fitting predictive accident models, *Accident Analysis & Prevention*, Vol.28, pp.281-296, 1996.
- 11) 阿部誠, 近藤文代：マーケティングの科学- POS データの解析-, 朝倉書店, 2005.
- 12) 伊庭幸人：計算統計学のフロンティア - 計算統計 II, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺, 岩波書店, 2005.
- 13) 秋山孝正, 奥嶋政嗣：交通機関選択分析のためのファジィ決定木手法の比較検討, 土木学会論文集 D, Vol.63 No.2, pp.145-157, 2007.
- 14) Breiman,L.,Friedman,J.H.,Olshen,R.A.and Stone,C.J.:Classification and Regression-Trees,Wadsworth,1984.
- 15) 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計, 土木学会論文集 D3, Vol.68, No.4, pp.255-271, 2012.

## 第6章 道路ネットワークの日・区間別の年次補修・規制計画：Bi-level 解法による最適化（RQ4）

### 6.1. はじめに

道路ネットワークに含まれる道路舗装は、時間の経過とともに荷重により不確実に劣化していく。劣化した舗装は、通行車両の快適性や安全性に影響を及ぼすため、効果的な補修のタイミングを決定するマネジメント計画が不可欠である。また、補修工事に伴う交通規制の利用者への影響や、補修工事費用の規模の経済性、舗装の相互影響を考慮すると、個々の舗装単位ではなく、全舗装からなる舗装システムを対象とした長期的なマネジメント計画の策定が求められる。数理最適化の観点から、将来の劣化予測に基づいた全舗装のマネジメント計画の一括最適化が理想であるが、計算コストの観点からこのような一括最適化は現実的ではない。それに対して、複数年度にわたる補修方針を示す長期計画と、具体的な年度ごとの補修スケジュールを示す短期計画に分割して最適化するアプローチが有効である。実務においても、中長期計画や年度補修計画といった、長期計画と短期計画にそれぞれ相当するものが存在する。本研究では、このような分割アプローチにおける長期計画の最適化の方法論を提案する。

長期計画、短期計画に分割する際には、長期計画と短期計画の費用の整合性が極めて重要である。長期計画の主要目的は、計画期間内の舗装ライフサイクル費用を最小化することにあるが、このライフサイクル費用は短期計画実施に伴う費用の総和に基づいて算出される。しかしながら、長期計画の最適化段階で厳密に短期計画の実施に伴う費用を算出できないため、予測された費用見積を用いてライフサイクル費用が算出される。この長期計画による費用見積もりと、実際の短期計画実施に伴う費用が大きく乖離する場合、短期計画における予算不足や過剰配分などの問題が生じるリスクだけでなく、導出される長期計画が最適でない可能性も高まる。

上記の問題意識のもと、本研究では長期計画の最適化の新しいアプローチを提案する。具体的には、短期計画実施に伴う費用を補修件数に関して非線形かつ逓減する費用関数で近似し、この関数を用いて長期計画を最適化するという方法論を提案する。提案する方法論では、まず対象とする道路ネットワークにおける舗装の最適な短期計画とその短期計画実施に伴う費用をサンプリングし、短期計画実施に伴う費用と最適な短期計画に含まれる補修件数の関係を示す非線形かつ逓減する費用関数で推定する。次に、得られた費用関数を長期計画の最適化問題に組み込むことで、短期計画実施に伴う費用の特徴に即した長期計画の最適化が可能になる。また、長期計画の最適化問題において、道路ネットワーク全体の劣化を確定的に近似することで、大規模な道路ネットワークにおいても最適化が可能となる。

### 6.2. 本研究の基本的な考え方

#### 6.2.1. 道路舗装のマネジメント計画と分割アプローチ

本研究の対象である道路舗装のマネジメント計画と分割アプローチについて説明する。道路ネットワークに含まれる舗装は、荷重や天候など不確実な要因により劣化が進行、劣化した舗装は通行車両の快適性や安全性に影響を及ぼす。全舗装の劣化状態を把握し、適切な補修を行うため、年度ごとに一斉点検が行われる。この時、管理者が設定した基準値以上に劣化している舗装に対しては、必ず年度内の補修が必要となるが、劣化が基準値未満の舗装に対しても、費用削減のための予防補修の実施が可能である。マネジメント計画の目的は全舗装のライフサイクル費用を最小化することであり、そのためには各日の補修スケジュールの最適化が必要となり、これがマネジメント計画の中核である。このような不確実性を考慮したライフサイクル費用最小化問題は、マルコフ決

定過程として定式化され、観測される全舗装の状態ごとの最適な年度内スケジュールが最適解となる。また、道路舗装の補修には、次の3つの代表的な舗装間の相互影響が存在する：i) 補修に伴う交通規制がリンクの容量低下を引き起こし、容量低下したリンクの組み合わせに応じて利用者の移動時間が増加する。ii) 複数の近隣する舗装の補修を同時に行う場合、建設機材と施工者の移動費用等が節約され、舗装当たりの補修費用が低下する。iii) 施工技術者の人数に限りがあるため、日ごとの工事能力の上限が存在する。これらの相互影響の存在により、単一舗装単位の計画ではなく、全舗装を対象としたマネジメント計画の導出が必要である。マルコフ決定過程は全舗装の劣化状態のパターンの列挙が必要であるが、全舗装の劣化状態のパターン数は非常に多く、マネジメント計画の厳密な最適化は困難である。

本研究では、このようなマネジメント計画を長期計画と短期計画に分割して最適化してゆくアプローチを提案する。長期計画はライフサイクル費用の最小化が目的であるが、日単位の補修スケジュールを直接最適化せず、代わりに各年度における補修する舗装を決定する。短期計画は各年度内の費用最小化が目的であり、長期計画で決定された各年度に補修する舗装に基づいて、日単位の補修スケジュールを最適化する。各年度の初めに、長期計画と全舗装の健全度に基づき、当年度内に補修する舗装が決定される。例えば、長期計画のある年度のが「健全度2、3の舗装に対して補修を行う」である場合、その年度に点検により観測された健全度2、3の舗装は、当年度内に補修が必要な舗装として決定される。長期計画により決定された補修が必要な舗装の組み合わせに対し、短期計画では365日毎日どの舗装を補修するか、道路ネットワークのどこを交通規制するかを決定する。短期計画では、補修による利用者への影響、補修の規模の経済性、一日に補修できる区間数の上限等、様々な要素を詳細に考慮し、スケジュールが最適化される。このように、長期計画では主に劣化の不確実性を考慮し、短期計画では主に舗装の相互影響を考慮することで、大規模な道路ネットワークにおいてもマネジメント計画の導出が可能となる。

#### 6.2.2. 既往研究

道路ネットワークのマネジメント分野では、長期計画と短期計画それぞれについて研究が蓄積されてきた。長期計画を対象とした重要な研究として、Golabi et al.<sup>1)</sup>は道路ネットワーク内の舗装の健全度の割合と、単年度補修費用の変動幅に制約が存在する最適化問題に対して、全ての舗装が同質であると仮定することにより健全

度ごとの補修する割合を最適施策とする方法を提案した。全ての舗装が同質である仮定により、のアウトプットが補修する舗装の組み合わせではなく補修する健全度の割合をになるため、問題の計算コストを大きく削減し実規模なネットワークでの導出を可能にした。同様に、Smilowitz and Madanat<sup>3)</sup>、青木等<sup>8)</sup>、Nakazato et al.<sup>7)</sup>も、同質なインフラを前提とした大規模なシステムにおける補修施策を前提としており、Smilowitz and Madanatは点検の不確実性、青木等<sup>8)</sup>は点検間隔も含めた最適化、Nakazato et al.<sup>7)</sup>は年度毎の費用の平準化を考慮した研究である。これらの研究では、年度ごとの補修費用、すなわち短期計画の費用が、年度内の補修数に対して線形であると仮定している。

短期計画を対象とした研究の例として、Miralinaghi et al.<sup>5)</sup>は道路ネットワークの補修による道路リンクの通行止めやそれによる年度内の利用者費用の増加を考慮した問題を対象としている。同手法は、Miralinaghi et al.<sup>6)</sup>において利用者費用に加えて工事発注の規模の経済性を考慮した問題へと拡張されている。González et al.<sup>2)</sup>は道路ネットワーク全体における工事実施能力の上限を考慮した問題を対象としており、このように様々な実情を想定した短期計画に関する研究が蓄積されてきたが、短期計画との整合性に焦点を当てた研究はまだ見られない。

実規模な道路ネットワークの長期計画と短期計画の同時最適化に関する研究も筆者の知る限り存在しないが、長期計画で主に考慮される劣化と長期的に発生する費用と、短期計画で主に考慮される道路ネットワークの構造に依存する費用、を同時に扱った研究存在する。Medury and Madanat<sup>4)</sup>は、リンク単位の利用者費用をApproximate Dynamic Programmingという手法を用いてリンク毎に非線形な関数の推定を行い、それによりリンク単位の非線形な関数を考慮した施策の導出を可能にしている。中里等<sup>7)</sup>は、ネットワークのグルーピングと集計化に基づく近似的解法を提案し、グループごとに施設を同質だと仮定する手法により、組み合わせ爆発を回避しつつ、実務者にも理解されやすい補修施策を導出できる方法を提案している。

上述のようにネットワークレベルのインフラセットマネジメント施策最適化に関する研究が蓄積されてきている。しかしながら、道路ネットワークの長期計画と短期計画の分割アプローチを用いて、短期計画による年度内費用と補修数の非線形性を明示的に考慮した長期計画の研究は著者等の知る限りこれまで存在しない。

### 6.2.3. 非線形費用関数による短期計画の費用近似

分割アプローチにおいて、長期計画と短期計画の費用の整合性は重要な課題である。長期計画ではライフサイクル費用の最小化が目的であるが、このライフサイクル費用は、各年度の短期計画の実施に伴い発生する費用の和である。短期計画の最適化は複雑であるため、長期計画の策定段階では、短期計画の実施に伴い発生する費用を関数などを用いて近似し、近似関数に基づいた最適化が行われる。長期計画で道路ネットワークの構造を考慮することが、厳密な最適化を難しくさせる要因であるため、長期計画の策定時に年度毎の費用を補修の数と補修単価を単純に掛け合わせて計算、すなわち年度毎の費用を補修数の線形近似する方法が一般的である。実際の短期計画の策定時には、補修作業の規模の経済性や利用者への影響など、道路ネットワークの構造に依存する非線形な要素が多数存在するため、線形な仮定は計算コストを大きく削減できる一方で、長期計画の最適性を著しく損なう可能性がある。これにより長期計画の決定段階での年度ごとの費用見積もりが短期計画の実施により発生する実際の費用との乖離が大きくなり、短期計画における予算不足や過剰な予算配分等に繋がる可能性と、最適でない施策が長期計画で導出される可能性が上がる。

本研究では、近似関数の費用と実際の費用との乖離をより低下させるため、非線形な近似関数に基づいた最適化を提案する。この方法論の特徴は、短期計画を大量にシミュレーションし、短期計画の費用と補修数量の関係を表す非線形な費用関数を推定することにある。具体的には、最適化された短期計画と、その短期計画による補修費用の組み合わせを大量に生成し、その組み合わせから補修費用と補修数の関数を推定する。推定された費用関数は、長期計画のマネジメント施策を策定する際に使用され、関数に基づいた非線形な費用を考慮することで、提案した方法論では、以下の二つの仮定を採用している。まず、i) 道路ネットワーク全体の健全度の割合の推移は確定的であるとする。舗装区間ごとの劣化の推移は不確実であるが、本研究が考える実規模なネットワークは膨大な数の区間があるため、ネットワーク全体で見た劣化は確定的に近いと見なす。ii) 短期計画の費用関数は非線形な逓減する関数で表せる。舗装の相互影響の特徴である利用者への影響と補修費用への影響には規模の経済性が存在するため、逓減する関数で表せると仮定する。

本研究の提案する方法論を用いて、効率的な補修施策の導出を可能にするだけでなく、長期計画策定段階の費用見積もりと実際の費用との間の乖離を減少させるこ

表 6.1 最適マネジメント施策の計算条件

	0.8	0.15	0.05
マルコフ推移確率行列: $P$	0	0.8	0.2
	0	0	1
健全度 $M$ 未満の舗装の 補修単価: $c_m, \forall 1 \leq m < M$	100		
健全度 $M$ の舗装の 補修単価: $c_M$	200, 300, \dots, 1,000		
時間割引率: $\rho$	0.04		

とで、道路ネットワークのより適切なライフサイクル費用評価が可能となる。また、短期計画費用関数を推定することによって、道路ネットワークの工事数に対する費用の変動特徴を解明することも同様に本研究の貢献となる。巨視的な費用関数を実際に推定し可視化することで、道路ネットワークの全体における費用関数の特徴と性質を解明し、長期計画の解釈性、説明性を高めることができる。このように本研究の方法論は、長期計画と短期計画の間の統合を促進し、道路ネットワークマネジメントにおける意思決定の新たな展望を提供するものである。

## 6.3. 適用事例

### 6.3.1. 条件設定とサンプリング結果

数値計算事例では Nguyen ネットワークを対象とし、提案手法による最適マネジメント施策を導出する。ここで用いる Nguyen ネットワークは図 6.1 の通り、13 ノード、19 リンクからなる道路ネットワークであり、舗装システムは  $N = 2,640$  の舗装区間により構成される。Nguyen ネットワークは交通流配分等の実験で用いられる仮想道路ネットワークモデルであるが、総延長 264km と実際の都市内高速道路ネットワークに近い規模を有する。また、ノード 1, 4 が始点ノード、ノード 2, 3 が終点ノードであり、ネットワーク内の始点と終点をつなげる経路が複数存在するため、非線形な利用者費用関数を考慮する必要性があるネットワークである。なお、最適化で使用するパラメータは表 6.1 の通りである。なお、本研究における数値計算はすべて以下のスペックを有する計算機とプログラムを用いて行った：Windows 11 Home (64-bit) operating system; Intel(R) Core(TM) i9-9980XE CPU @ 3.00GHz; 1.9.3 Julia version; and 9.1.2 build v9.1.2rc0 (win64) Gurobi optimizer version.

短期計画の費用のサンプリングではモンテカルロシミュレーションを  $D = 2,700$  回実行し、その結果を図

表 6.2 費用関数のパラメータの推定結果

利用者費用関数のパラメータ: $\theta_u$	$a_u = 86,611.19, b_u = 29.45, c_u = -251,231.57$
交通規制費用関数: $\theta_w$	$a_w = 139,122.33, b_w = 130.06, c_w = -696,781.29$

表 6.3 端点近辺の推定費用

	交通規制費用 $C_w$	利用者費用 $C_u$
「予防補修なし」端点 $\check{\chi}$	$C_w(\check{\chi}) = 139,183.00$	$C_u(\check{\chi}) = 244,638.64$
「健全度 2 予防補修」端点 $\hat{\chi}$	$C_w(\hat{\chi}) = 204,252.40$	$C_u(\hat{\chi}) = 308,235.73$

表 6.4 最適マネジメント施策

$c_3$	最適マネジメント 施策	定常状態における 補修区間数 $\chi^*$	定常状態における 交通規制費用 $C_w(\chi^*)$	定常状態における 利用者費用 $C_u(\chi^*)$	定常状態における 総費用 $\tilde{C}(\mathbf{r}^*(\mathbf{s}^*))$
200 300 400 500 600 700 800 900	予防補修なし	$\check{\chi} = 0.114$	139183	244638.64	444,013.64 474,109.64 504,205.64 534,301.64 564,397.64 594,493.64 624,589.64 654,685.64
1,000	全ての健全度 2 を予防補修	$\hat{\chi} = 0.2$	204,252	308,235.73	684,087.73

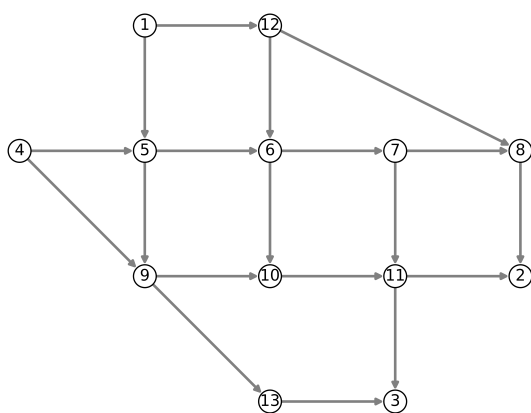


図 6.1 Nguyen ネットワーク

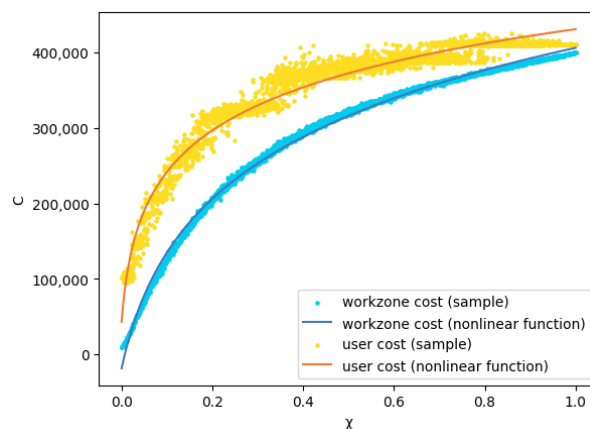


図 6.2 サンプル結果と非線形な費用関数を用いた推定結果

6.2 に示す。図 6.2 の横軸が補修区間数  $\chi$ ，縦軸が費用であり，黄色い点が最適短期計画の利用者費用，青い点が最適短期計画の工事費用である。2 種類の費用ともに補修区間数  $\chi$  の増加に対して単調増加かつ逓減する傾向を示しており，凹関数で近似できる形となった。このように逓減する形状になるとしては交通規制費用と利用者費用には規模の経済性が存在するためだと思われる。また，利用者費用の点は同じ  $\chi$  でも複数グループに分かれているところの確認でき， $\chi = 0.3$ ， $\chi = 0.8$  近辺でそれぞれ上下 2 階層の費用の集合が見られる。最適な短期

計画においては，利用者費用を削減するため，直列な舗装区間を同じ日にちに補修するなど，なるべく交通規制が少ない日程に集中する。しかし，日単位で実施できる交通規制数には上限が存在するため，補修区間数が増加するにつれ，交通規制が必要な日数も増加する。このような 2 階層は，交通規制が必要な日数が増加する  $\chi$  近辺で発生している現象である可能性があげられる。また，このサンプリングで要した時間は合計で約 110,000 秒である。



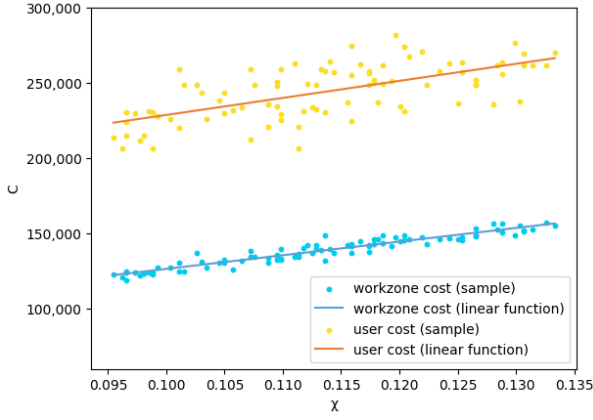


図 6.3 「予防補修なし」の端点  $\hat{\chi}$  近辺のサンプル

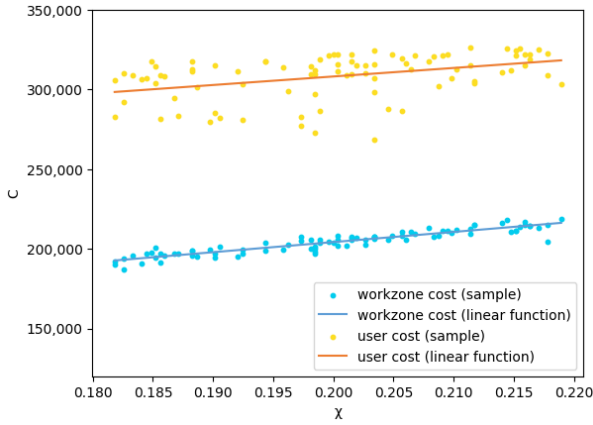


図 6.4 「全ての健全度 2 を予防補修」の端点  $\hat{\chi}$  近辺のサンプル

### 6.3.2. 費用関数の推定

2 種類の費用とともに補修区間数  $\chi$  の増加に対して単調増加かつ逓減することに着目し、ここではフレキシブル関数として対数関数を採用し、利用者費用関数  $C_u(\chi)$  と交通規制費用関数  $C_w(\chi)$  はそれぞれ

$$C_u(\chi) = a_u \log(\chi + b_u) + c_u \quad (6.1)$$

$$C_w(\chi) = a_w \log(\chi + b_w) + c_w \quad (6.2)$$

で近似できると仮定する。

$a_u, b_u, c_u, a_w, b_w, c_w$  は推定するパラメータであり、 $\theta_u = (a_u, b_u, c_u)$ ,  $\theta_w = (a_w, b_w, c_w)$  である。推定は最尤推定法を用いて行い、その結果交通規制費用関数が図 6.2 の青い線、利用者費用関数が黄色い線である。推定されたパラメータは表-6.2 の通りである。関数の定義域に対して非負条件が必要であるが、本研究で考慮する道路舗装システムでは、全ての舗装の健全度が 1 の状態からでも、少なくとも 5% の舗装区間が健全度 3 になるため、最小でも  $\chi = 136$  となる。推定された 2 種類の関数ともに定義域において正であり、かつ 1 階微分が

常に正であるため、フレキシブル関数の条件を満たす。

### 6.3.3. 最適マネジメント施策

最適マネジメント施策を導出する方法について説明する。数値計算事例においては、 $M = 3$  つの健全度を有する問題を対象としており、操作変数は  $r_2(s^*)$  のみとなる。図-6.2 の点と推定した結果からもわかるように、2 種類の利用者費用共に逓減する。利用者費用は逓減するため、 $\frac{\partial^2 C_u^a(\chi)}{\partial \chi^2} < 0$ ,  $\frac{\partial^2 C_w^a(\chi)}{\partial \chi^2} < 0$  が成立する。 $\frac{\partial \chi}{\partial r_2(s^*)} < 0$  であるため、利用者費用関数  $C_u^a(\chi)$  の  $r_2$  の 2 階微分は

$$\frac{\partial C_u^a(\chi)}{\partial r_2(s^*)} = \frac{\partial \chi}{\partial r_2(s^*)} \frac{\partial C_u^a(\chi)}{\partial \chi} < 0 \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C_u^a(\chi)}{\partial r_2(s^*)^2} &= \frac{\partial}{\partial r_2(s^*)} \left( \frac{\partial C_u^a(\chi)}{\partial r_2(s^*)} \right) \\ &= \frac{\partial \chi}{\partial r_2(s^*)} \frac{\partial}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial r_2(s^*)} \frac{\partial C_u^a(\chi)}{\partial \chi} \\ &= \left( \frac{\partial \chi}{\partial r_2(s^*)} \right)^2 \frac{\partial^2 C_u^a(\chi)}{\partial \chi^2} < 0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

と負であるため、利用者費用関数  $C_u^a(\chi)$  は  $r_2(s^*)$  の凹関数となる。交通規制費用関数  $C_w^a(s^*)$  も同様に、2 階微分が負の凹関数となる。これにより、目的関数の右辺は  $r_2(s^*)$  の凹関数 2 種類と、 $r_2(s^*)$  の線形関数の和で表せ、凹関数になる。このような  $r_2(s^*)$  の凹関数は、最適値は端点解（制約条件を満たす最小値と最大値）のいずれかとなる。以上により、本事例においては  $r_2(s^*)$  を最適化するにあたり、費用関数が逓減することに着目し、端点の比較による最適化を行う。

端点の比較を行うために、ここでは前節で推定した費用関数を直接用いるのではなく、端点近辺での費用を改めて推定し、より精度の高い最適化を目指す。最小の端点  $r_2(s^*) = 0$  はマネジメント施策「予防補修なし」を意味しており、この場合の定常状態は  $s^* = [0.457, 0.429, 0.114]$ 、最適補修ベクトルは  $r^*(s^*) = [0.114, 0, -0.114]$ 、定常状態における補修数は  $\chi$  は  $Nr_3^*(s^*) \approx 302$  である。この最小の端点に対応する補修区間数  $\chi = 0.114$  を  $\hat{\chi}$  とする。最大の端点  $r_2(s^*) = 0$  はマネジメント施策「全ての健全度 2 に対する予防補修」を意味しており、この場合の定常状態は  $s^* = [0.8, 0.15, 0.05]$ 、最適補修ベクトルは  $r^*(s^*) = [0.2, -0.15, -0.05]$ 、定常状態における補修数は  $N[r_2^*(s^*) + r_3^*(s^*)] = 528$  である。また、この端点に対応する補修区間数  $\chi = 0.2$  を  $\hat{\chi}$  とする。2 つの端点  $\hat{\chi}$  と  $\hat{\chi}$  の、補修数前後 2% の補修区間数のサンプルをまとめたのが図 6.3, 6.4 である。ここでは、端点の費用を補修数前後 2% の補修区間数のサンプルの平均値で近似結果を表 6.3 に示す。

表 6.5 シミュレーション結果の平均と標準偏差

	平均	標準偏差
補修区間数 $\chi$	301	16.9
交通規制費用 $C_w$	139,367	6,425
利用者費用 $C_u$	244,081	16,632

以上の結果を用いて、 $c_M = 200, 300, \dots, 1,000$  の時の「予防補修なし」と「全ての健全度 2 に対する予防補修」の 2 施策を比較し、定常状態の費用  $\tilde{C}$  が小さい方を最適マネジメント施策として導出した結果が表-6.4 である。予防補修なしの施策の方が交通規制費用も利用者費用も低いが、最大健全度の補修単価  $c_3$  が増加するにつれ、予防補修を行う施策が最適となる。

#### 6.3.4. シミュレーションによる提案方法論の妥当性評価

表-6.4 の最適マネジメント施策を適用したシミュレーションを行い、シミュレーションによる各種費用と表-6.4 で導出した費用を比較する。ここでは  $c_3 = 500$  とし、舗装システムを新設から 100 年間マネジメントする問題を考える。具体的には、 $t = 1 \dots, 100$  の期間で  $s(t_0) = [1, 0, 0]$  から予防補修なしの施策を適用した場合のシミュレーションを計 40 回行った。このシミュレーションで要した時間は合計で約 130,000 秒である。図 6.5 があるシミュレーションにおける、各年度の補修区間数  $\chi$  の推移である。紫の線は算出された定常状態における年度補修区間数、藍色の点と線はシミュレーションにおける各年度の補修区間数を意味する。 $t_z = 0 \sim 5$  においては初期状態の影響が残っており、 $t_z = 6$  以降はシミュレーションの値が算出された値近辺にあると思われる。このことから、 $t_z = 6$  以降は定常状態に到達したと考えられる。

これを踏まえ、全シミュレーションにおける定常状態に達した  $t_z = 6$  以降の計 3,800 のサンプルにおける補修区間数、交通規制費用、利用者費用のヒストグラムを作成し、図 6.6, 6.8, 6.7, 6.9 が得られた。ヒストグラム図中の縦線は提案した方法論により最適化された値で、表 6.4 の値を用いる。また、シミュレーション結果の各データの平均と分散をまとめたのが表 6.5 である。

3 種類のデータともに、平均値が表 6.4 と非常に近い値が得られた。このことから、本研究の数値計算においては、提案した方法論で各年度の補修区間数、費用の期待値をある程度正確に予測できると考えられる。一方で、補修区間数と交通規制費用は正規分布に近い形状であったものの、利用者費用のヒストグラムは正規分布とは言い切れない形状となった。これはシミュレーション

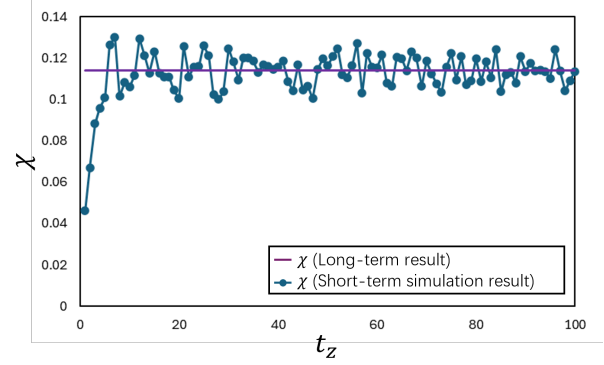


図 6.5 シミュレーションにおける、各年度の補修区間数  $\chi$  の推移

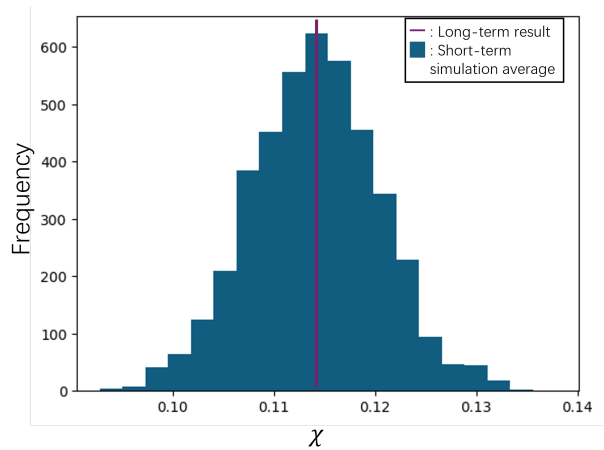


図 6.6 各年度の補修区間数  $\chi$  のヒストグラム

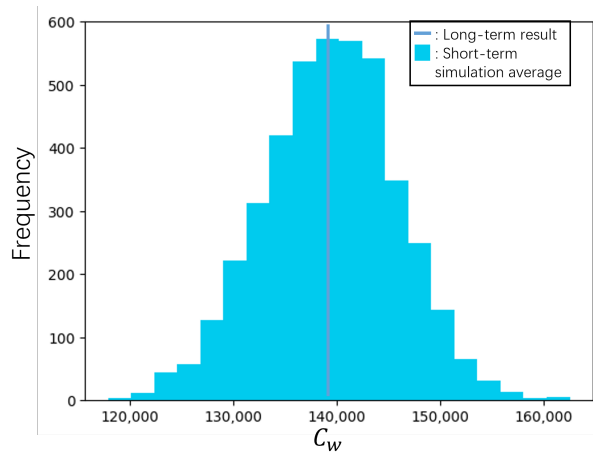


図 6.7 各年度の交通規制費用  $C_w$  のヒストグラム

の回数が不足している、もしくは利用者費用がそもそも正規分布でないためだと考えられる。

#### 6.4. おわりに

本研究では、舗装システムのマネジメント計画を長期計画と短期計画に分割して最適化するアプローチにより、長期計画を最適化する新たな方法論を提案した。提

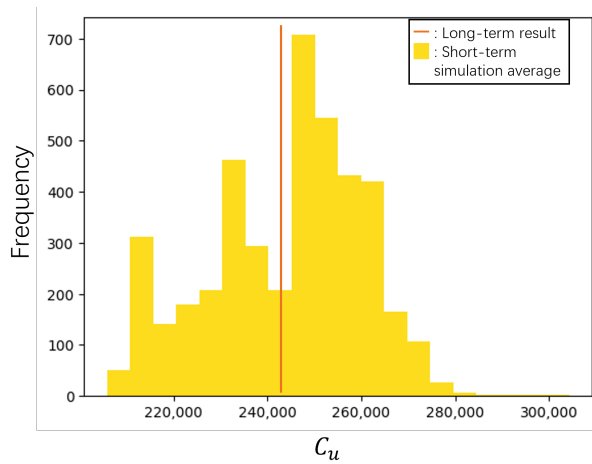


図 6.8 各年度の利用者費用  $C_u$  のヒストグラム

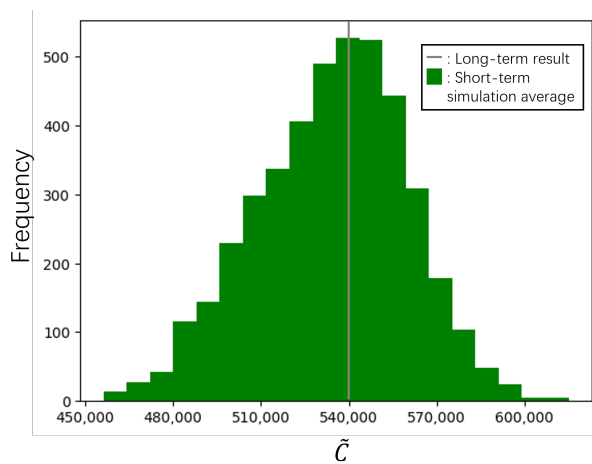


図 6.9 各年度の総費用  $\tilde{C}$  のヒストグラム

案した方法論においては、まず最適化された短期計画の実施に伴う交通規制費用、利用者費用と補修区間数をサンプリングし、次にこれらのサンプリング結果を用いて近似的な費用関数を推定し、費用関数の推定結果に基づいて長期計画を最適化する。適用事例において、巨視的な費用関数が明瞭な形状を有していることを確認した。また、最適化された短期計画の実施に伴う 2 種類の費用が補修区間数に対して線形ではなく逓減する形であることが判明し、それに基づいて端点近辺での費用関数の近似を行い最適マネジメント施策を導出した。また、導出された最適マネジメント施策は最適な短期計画の実施に伴う補修区間数や年度費用の期待値をある程度正確に推定できる可能性があることを、適用事例で示した。提案方法論により、従来手法では困難であった、補修区間数に対する短期計画の実施に伴う費用の非線形性を、長期計画でも考慮した最適化が可能になり、より現実的な長期計画の最適化が可能となる。また、最適化された短期計画の実施に伴う費用関数が単調増加かつ逓減であるこ

とを、適用事例で確認することができた。

本研究の適用事例において導出された短期計画の 2 種類の最適費用は、補修区間数に対して逓減する傾向であった。このような逓減する性質を用いて、最適マネジメント施策の導出は端点解の比較のみで可能であったが、逓減が保証されないようなケースでも、関数の微分を用いた数理最適手法（例えばラグランジュの未定乗数法等）を用いて解くことが可能である。また、凹関数や凸関数以外の場合には、これらの数理最適手法を用いることで局所解になる可能性があり、その解決は今後の課題となる。

## 参考文献

- 1) Golabi, K., Kulkarni, R. B. and Way, G. B.: A statewide pavement management system, *Interfaces*, Vol.12, No.6, pp.5-21, 1982.
- 2) González, A. D., Dueñas - Osorio, L., Sánchez - Silva, M., and Medaglia, A. L.: The interdependent network design problem for optimal infrastructure system restoration. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(5), pp.334-350, 2020.
- 3) Smilowitz, K. and Madanat, S.: Optimal inspection and maintenance policies for infrastructure networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, Issue 1, pp. 5-13.
- 4) Medury, A. and Madanat, S.: Incorporating network considerations into pavement management systems: A case for approximate dynamic programming, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.33, pp.134-150, 2013.
- 5) Miralinaghi, M., Woldemariam, W., Abraham, D. M., Chen, S., Labi, S., and Chen, Z.: Network - level scheduling of road construction projects considering user and business impacts. *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(7), pp.650-667, 2020.
- 6) Miralinaghi, M., Davatgari, A., Seilabi, S. E., and Labi, S.: Contract bundling considerations in urban road project scheduling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(4), pp.427-450, 2022.
- 7) 中里悠人, 水谷大二郎, 長江剛志: 道路ネットワークの補修施策: グルーピングと集計化に基づく近似的解法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.78,

No.5, pp.I\_193-I\_204, 2023.

- 8) 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, pp.240-257, 2006.
- 9) Bellman, R.: A Markovian decision process, *Journal of Mathematics and Mechanics*, Vol.6, Issue 5, pp.679-684, 1957.
- 10) Nakazato, Y. and Mizutani, D.: 365-day sectional work zone schedule optimization for road networks considering work zone synchronization and user cost, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (査読修正中)

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート No.2022—3  
統計的アセットマネジメントに基づくバックキャスト型道路政策の深化についての技術研究開発

2024.5