

# 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

熊田一彦<sup>1</sup>・江口利幸<sup>2</sup>・青木一也<sup>3</sup>・貝戸清之<sup>4</sup>・小林潔司<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 舗装研究室(〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail : k.kumada.aa@ri-nexco.co.jp

<sup>2</sup>正会員 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 舗装研究室(〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 (株) パスコ 研究開発センター(〒153-0043 東京都目黒区東山 2-8-11 目黒ビル新別館 1F)

<sup>4</sup>正会員 大阪大学大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

<sup>5</sup>フェロー会員 京都大学経営管理大学院経営管理講座(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究は、ネットワークレベルにおける中・長期的な高速道路舗装の劣化モデルを対象として、多段階指数劣化ハザードモデルを用いてマルコフ推移確率を推計する方法により、舗装路面の劣化過程を統計的に評価する方法を検討したものである。具体的には、全国的高速道路からモニタリング対象とする区間を選定し、一定期間内の経年変化に関する情報に基づいて、劣化状態を離散的な複数のレーティングで表現したマルコフ推移確率を多段階指数ハザードモデルを用いて推計する。その際、説明変数の増加に対する推計精度の低下や、劣化が進行した舗装に対して補修が実施されるサンプル欠損の課題を考慮した推定方法を用いる。さらに、これら一連の検討プロセスを体系的に整理し、具体的な高速道路舗装の劣化モデルを提案する。

**Key Words** : *pavement management, pavement deterioration curve, Markov mode, hazard model*

## 1. はじめに

社会資本のアセットマネジメントでは、ライフサイクル費用の低減化が図れるような、最適な補修計画を求めることが重要な課題である。この場合、将来的な補修需要を予測し、維持補修に必要となる予算計画を策定することが必要となる。アセットマネジメントを実施するうえで、劣化予測モデルはライフサイクル費用や補修需要を推計するために重要な役割を果たす。統計的な劣化予測モデルは、多くの計測サンプルから、劣化過程の統計的な規則性をモデル化することを目的としている。これまでに、健全度が離散的に評価される土木施設の劣化予測については、多段階指数劣化ハザードモデルを用いてマルコフ推移確率を推計する方法が提案されている<sup>1),2)</sup>。

マルコフ連鎖モデルは離散的な健全度データを扱う場合には操作性に優れており、多段階劣化ハザードモデルを用いることにより、劣化状態を劣化現象に対する複数の健全度を用いて表現することが可能である。

本研究は、これら統計的な劣化予測の推計方法を、東・中・西日本高速道路株式会社(以下、「NEXCO」という。)が管理する高速道路舗装の劣化モデルに適用することを目的としている。

その際、資産量が膨大となる道路舗装データに対して、全国的高速道路からモニタリング対象とする区間を選定し、一定期間内における経年変化を継続的に測定した代表サンプルデータに基づき評価することとした。

さらに、舗装の劣化過程に影響する多様な因子を考慮する場合、説明変数の増加に対しサンプル数が減少する影響から、個々の説明変数の説明力が低下するという問題が生じる。この場合、ハザード率の異質性を確率分布で表現した混合マルコフ劣化ハザードモデルにより、標準的な劣化速度に対する相対評価から劣化モデルを推定する方法<sup>3)</sup>を適用した。

また、補修が実施された区間では補修直前のデータが取得されない(損傷が回復したデータが取得される)ことから、推計においてサンプル欠損が発生する。サンプル欠損が存在する場合、劣化進行が相対的に早いサンプルの情報が乏しくなり、遅いサンプルの影響が大きくなることから、舗装寿命を過大に評価する危険性がある。このため、選択肢サンプリング法を用いてサンプル欠損バイアスを考慮する推定方法<sup>4)</sup>を適用した。

最後に、現実的に適用可能な劣化モデルを策定するため、これら一連の検討プロセスを体系的に整理し、高速道路舗装の劣化モデルを検討した結果を報告する。

## 2. 本論文の目的と検討の範囲

### (1) これまでの検討経緯と本論文の目的

これまでに著者らは、高速道路舗装の劣化モデルについて、その操作性の良さや推計コストを考慮し、マルコフ推移確率を用いて推計する方法を検討してきた<sup>1)~6)</sup>。しかしながら、これら既往研究は、個々の課題に対し、特定路線区間における限定的なデータベースを用いてモデルの現象再現性を評価したものであり、交通量や舗装種別などに応じ、現実的に適用できる劣化曲線を策定するためには、そのプロセスを体系的に整理する必要がある。

これら問題意識の下、本論文では全国ネットワークレベルにおける劣化モデルの推計問題を対象に、**図-1**に示す検討プロセスを提案する。具体には、これまでの既往研究で得られた個々の成果を適用しながら、各プロセスにおける課題と解決策を例示的に記述する。その際、統計的劣化モデルの適用性を評価し、実用性を考慮した高速道路舗装の統計的劣化モデルを提案する。

なお、本論文において用いた統計的劣化予測モデルとその推計方法に関しては、その考え方を示すに留め、数学的記述は記載していない。その詳細は、参考文献<sup>2)~4)</sup>を参照されたい。

### (2) 本検討の範囲

本研究の対象とする損傷は「ひび割れ・わだち掘れ・IRI (International Roughness Index : 国際ラフネス指数)」の3項目であり、構造的な損傷の問題は取り上げない。一般に舗装は、機能的あるいは構造的な損傷かにより補修の工法や方法が異なるため、最適な補修計画を策定するためには、機能的損傷の進行と構造的な耐久性の評価に基づき、ライフサイクル費用の評価を行うことが必要となる。今回対象とした「ひび割れ・わだち掘れ・IRI」の測定結果は、これら損傷を明確に区分できるものではなく、これについては今後の検討課題としたい。

## 3. モニタリングによる代表サンプルの取得

### (1) 劣化過程と測定スキーム

舗装路面の劣化予測モデルを推定するためには、路面性状に関する時系列データを蓄積することが必要となる。いま、ある舗装区間の損傷が、**図-2**に示すように進行したと考える。NEXCOにおける路面性状は測定用車両を用いて測定されており、ひび割れ率やわだち掘れ量といった測定データは連続値で与えられる。しかし、現実的には路面性状調査によって舗装の状態を常時把握することは不可能であり、限られた時間軸において定期的に測定が実施されることになる。ネットワークレベルにおける補修計画の分析においては、連続値で与えられた測定デ

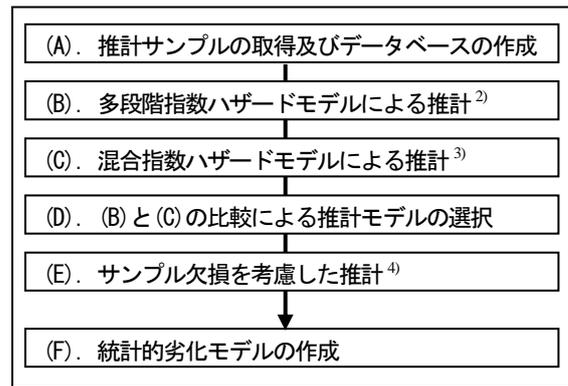


図-1 劣化モデルの検討プロセス

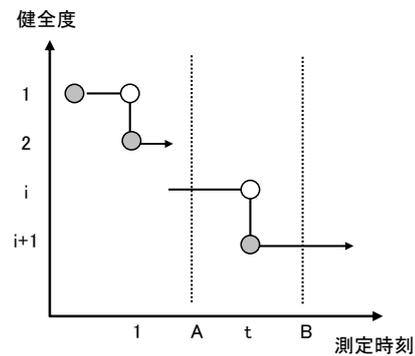


図-2 劣化過程と測定スキーム

ータをある離散的な健全度に置き換えて議論する機会が多い。離散的な健全度による補修計画の策定は、操作性に優れているためである。このため、本研究においても、各路面性状の測定値について離散的な健全度で表現する方法を採用する。**図-2**の例では、健全度を表すレーティングを状態変数 ( $i=1, \dots, j$ ) で表現している。ここでは、最も健全な状態 (供用開始時または補修により損傷が回復した状態) を  $i=1$  で表し、状態変数  $i$  の値が大きくなるほど損傷が進行することを示している。時刻  $A$  の測定により、当該舗装区間の損傷状態は実測値で観測され、その時の健全度は  $i$  と判定される。さらに、時間の経過に応じて損傷が進行し、次の測定時刻  $B$  において健全度が  $i+1$  と判定されるが、損傷度が変化した時刻  $t$  は確認できない。このように、劣化過程のサンプルパスは、2つの定期測定の間において健全度  $i$  から  $i+n$  ( $n=0, \dots, j-i$ ) へ変化する。

### (2) 分析データ件数

本検討に用いたデータ件数 (測定区間数) を**表-1**に示す。分析データは、平成18~20年度の3年間に路面性状を測定した約24千件 (約2,400km車線) であり、基本的に測定間隔を1年として実施した。このため、任意の区間 (1区間長100m) における時間軸上の測定時刻は3回

であり、状態変数  $i$  に関する 2 回分の進行過程を取得している。なお、測定期間中に補修が実施された場合は、サンプル欠損データとして取扱う。今回は、サンプリング期間が 3 年間で短いことから、同一区間で 2 回連続してサンプル欠損が生じたケースは存在しない。この場合、状態変数  $i$  に関する 1 回分の進行過程とサンプル欠損データをそれぞれ取得することになる。

### (3) モニタリング区間

全国にモニタリング区間を設定し、母集団から抽出したデータを用いるサンプリング推計では、分析対象とする実測サンプルが母集団に占める割合が少ない場合、母集団から一様にランダム抽出すると膨大な量の実測サンプルが必要となる。舗装の劣化予測の場合、一般に舗装データベースが整備されていれば個々のサンプルの舗装特性に関する情報が利用可能である。しかしながら、本ケースでは母集団におけるサンプルの分布特性を事前に得ることが困難な状況であったことから、特定の舗装特性を有するサンプルを重点的に抽出する方法を採用した。

具体的には、まずモニタリング区間の総延長を約 1,200km 車線とした。これは、路面性状測定に要する費用や舗装特性データの更新・取得に関する現場組織の協力体制を考慮したものであり、NEXCO の 3 会社に属する計 12 の支社から各 100km の測定延長を設定した。次に、舗装特性データとして「地域区分、交通区分、供用年数」の 3 項目を重点項目とし、データに偏りが生じないように平均的な分散を考慮した。このように全国から選定した 40 地域における、モニタリング区間の舗装特性の分布を表-2 に、その内容を a) から e) にそれぞれ示す。

#### a) 地域区分

地域区分は、NEXCO の技術基準（設計要領第一集 舗装編）におけるアスファルト舗装の地域区分を基に「積雪寒冷地域（積寒地域）と、その他の地域（一般地域）」の 2 項目に分類した。なお、舗装地域区分は気候特性（平均降雪量など）および交通特性（チェーン装着率など）を考慮したものである。

#### b) 交通区分

交通区分は、NEXCO の技術基準（同）の舗装交通量区分を基に、平成 18 年度の交通量データベースを用いて 3 項目に区分した。なお、交通区分は方向（上下線）別の 1 日当たり大型車交通量により表-3 のように区分している。

#### c) 供用年数

供用年数は、開通年度から平成 20 年度までの経過年数を基に「短期間（15 年未満）、中期間（15 年以上 30 年未満、長期間（30 年以上 45 年未満）」の 3 項目に区分した。

#### d) 舗装種別

舗装種別は、表層の舗装種別により「高機能舗装（高機能）、密粒度舗装（密粒度）、コンクリート舗装（コンク

表-1 分析データの内容

測定時刻 (A)	測定時刻 (B)	取得サンプル (件)	うち、サンプル欠損 (件)
H18	H19	12,565	849
H19	H20	11,358	288
H18	H20	60	15
計		23,983	1,152

表-2 モニタリング区間の道路特性データの内訳

地域区分	積寒地域	一般地域	-
件数 (比率)	8,449 (35%)	15,534 (65%)	-
交通区分	重交通区間	中交通区間	軽交通区間
件数 (比率)	9,567 (40%)	7,607 (32%)	6,809 (28%)
供用年数	短期間	中期間	長期間
件数 (比率)	6,264 (26%)	7,189 (28%)	10,530 (44%)
舗装種別	高機能	密粒度	コンクリート
件数 (比率)	16,031 (67%)	6,751 (28%)	1,181 (5%)
道路構造	土工部	橋梁部	トンネル部
件数 (比率)	17,647 (74%)	4,539 (19%)	1,797 (8%)

表-3 交通区分の内容

交通区分	内 容
重交通区間	5,000 台/日/一方向以上
中交通区間	1,500 以上、5,000 台/日/一方向未満
軽交通区間	1,500 台/日/一方向未満

リート)」の 3 項目に分類し、路面性状測定時に取得されるデータを用いた。

#### e) 道路構造

道路構造は、一般的な構造区分として用いられる「土工部、橋梁部、トンネル部」の 3 項目に分類した。データは舗装種別と同様、路面性状測定時に取得されるデータを用いた。

### (4) 路面性状の測定

路面性状の測定項目「ひび割れ・わだち掘れ・IRI」は、NEXCO の規定する試験方法に従って測定した。また、測定結果は 100m 区間ごとに測定値を算出しており、これは 100m 区間の平均的な損傷度を表している。

なお、NEXCO では補修に関する目安の基準値として、測定項目ごとに補修目標値を規定している。これは、当該値に達する前に補修を実施することが望ましいとする値であり、国土交通省の MCI などに見られるような総合的な評価指標は現在のところ採用していない。したがって、舗装の補修を実施する場合には、100m 区間中に存在する損傷のうち、最も劣化が進行した（損傷度の大きい）路面性状に対して補修が実施されることになる。

## 4. マルコフ推移確率の推計

測定されたデータを離散的な健全度に置き換え、マルコフ推移確率を多段階指数ハザードモデルを用いて推定し、説明変数による劣化速度（状態変数  $i=1$  から  $i=j$  に至る過程）の違いを分析する。また、推定結果は供用性曲線を用いて表現し、測定サンプル数の少ない説明変数において生じる推計精度の低下の問題について考察する。

### (1) 健全度ランクの設定

路面性状データは連続値として記録されており、本研究で提案する劣化予測モデルを推定するためには、連続値を離散的な健全度に置き換える必要がある。今回、各路面性状に関する健全度を、表-4 に示すレーティングに分類した。なお、各路面性状に対する健全度ランクの最終段階は、NEXCO の補修目標値を採用している。

表-4 路面性状値における健全度ランク

健全度ランク	わだち掘れ Ru (mm)	ひび割れ Cr (%)	IRI (mm/m)
1	Ru < 5	Cr = 0	IRI < 1
2	5 ≤ Ru < 10	0 < Cr < 2.5	1.0 ≤ IRI < 1.5
3	10 ≤ Ru < 15	2.5 ≤ Cr < 5	1.5 ≤ IRI < 2.0
4	15 ≤ Ru < 20	5 ≤ Cr < 10	2.0 ≤ IRI < 2.5
5	20 ≤ Ru < 25	10 ≤ Cr < 20	2.5 ≤ IRI < 3.0
6	25 ≤ Ru	20 ≤ Cr	3.0 ≤ IRI < 3.5
7	—	—	3.5 ≤ IRI

### (2) 説明変数の設定

説明変数は、各地域の道路特性に応じた劣化速度を評価するため、表-5 に示す「舗装種別」「道路構造」「交通区分」を用いる。なお、説明変数は、表-2 に示す道路特性のうち、舗装の劣化に影響を及ぼすと考えられる組合せを考慮のうえ選定した。具体には、パラメータの符号条件および説明変数の検定結果 (t 値) から、最終的に当該変数においてのみ有意な結果を得ている。

表-5 説明変数の内容

項目	区分
舗装種別	高機能舗装 (高機能)
	密粒度舗装 (密粒)
	コンクリート舗装 (CO)
道路構造	土工部 (土工)
	橋梁部 (橋梁)
	トンネル部 (TN)
交通区分	重交通区間 (重交通)
	中交通区間 (中交通)
	軽交通区間 (軽交通)

注：( ) 内は、文中もしくは図中で使われる略語

ここで、説明変数の組合せは全 27 パターン (舗装種別:3 × 道路構造:3 × 交通区分:3=27) となるが、NEXCO では橋梁部にコンクリート舗装を適用していないことから 3 パターン (コンクリート舗装:1 × 橋梁部:1 × 交通区分:3=3) を除いた計 24 パターンとなる。なお今回、説明変数のパラメータは質的データ (1, または 0) として適用している。

表-6 除外サンプル数と分析対象件数

路面性状	除外サンプル数	分析対象件数
ひび割れ	4,375	19,608
わだち掘れ	3,435	20,548
IRI	4,296	19,687

### (3) 分析データのフィルタリング

推計を行うにあたり、2 回の測定時刻間において補修が実施された (サンプル欠損データ) 区間および、健全度ランクが改善された区間のデータを分析対象から除いている。また、舗装種別において表-5 に示す区分以外の種別 (ギャップ舗装など) が報告された 20 件についても、データ件数が極めて少ないことから対象外とした。この結果、最終的に推計に用いたデータ件数を表-6 に示す。

表-7 数え上げによる劣化傾向 (ひび割れ)

事前健全度	事後健全度					
	1	2	3	4	5	6
1	8,803	2,412	90	51	8	6
2		5,311	655	231	48	11
3			489	298	56	10
4				392	176	27
5					227	65
6						242

なお、路面性状ごとの除外サンプル数に差が生じているが、これは健全度ランクが改善された区間による影響であり、測定誤差の課題が考えられる。これまでに測定誤差については、一般道路を対象とした分析事例<sup>7)</sup>が報告されているが、本検討では測定誤差の問題は取り上げていない。今回は、測定間隔が約 1 年と比較的短期間であることから、高速道路における評価への適用性を含め、今後の検討課題としたい。

表-8 推計結果 (ひび割れ率と舗装種別)

健全度ランク	$\beta_{i,1}$ :定数項	$\beta_{i,2}$ :高機能	$\beta_{i,3}$ :密粒	$E[\theta]$ :平均
1	0.2554 (44.8494)	0	0.1598 (8.5152)	0.3080
2	0.0800 (7.7427)	0.0547 (4.5700)	0.1962 (12.3862)	0.1580
3	0.1658 (3.4441)	0.5051 (7.7805)	0.7176 (11.0766)	0.6850
4	0.3959 (8.5704)	0	0.1460 (2.5420)	0.4010
5	0.3370 (10.7440)	0	0	0.3370

### (4) 数え上げによる劣化傾向

ひび割れの測定データを基に、多段階指数ハザードモデルに用いる分析対象サンプル数を、事前健全度と事後健全度に着目して整理した結果を表-7 に示す。同表の各行は、事前健全度  $i$  に、各列は事後健全度  $j$  に対応している。各事前健全度に対する事後健全度のサンプル数は、劣化の進行度に応じて減少している。また、事前健全度

劣化進行年数 (年)

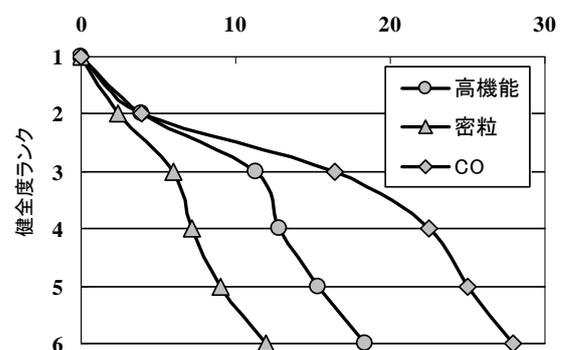


図-3 供用曲線 (ひび割れ率と舗装種別)

が4以上のケースでは、事前健全度が1および2の状態に比べ、サンプル数が非常に少なくなっている。このことから、損傷が進行した区間におけるサンプル欠損の可能性が読み取れる。

### (5) 推計結果

ひび割れの検討ケースにおいて、舗装種別を説明変数とした場合における、多段階指数ハザードモデルのパラメータ推計値を表-8に、これを供用曲線で表現した結果を図-3に示す。なお、実際の推計値は健全度ランク（凡例のマーク部）ごとに算出したものであるが、供用曲線は便宜的に健全度ランク間を曲線で表現している。

また、同表の下段には各説明変数のt値を（）内に示しており、有意水準95%で説明変数の優位性を検定している。本ケースでは、密粒度舗装（密粒）の場合、健全度が5以外の状態におけるパラメータ $\beta_{i,3}$ がすべて正值となっており、劣化速度が速いことが理解できる。しかし、健全度が5の場合はt値が小さく、有意な説明力をもたないことが判明した。したがって、健全度が5の場合は説明変数として採用していない。またこの結果、舗装種別による劣化速度には違いが見られる。このように、多段階指数ハザードモデルを用いてマルコフ推移確率を推計することで確定的な関係を見だしにくい舗装劣化の進行過程を容易に表現することができる。

### (6) 推計精度の低下の課題

多段階指数ハザードモデルは、健全度ごとに劣化速度の違いを評価することが可能であるが、説明変数の組み合わせケースが増加した場合、各ケースのサンプル数に大きな偏りが生じると、推計精度が低下する問題が発生する可能性がある。4.(2)で示したように、説明変数の組み合わせによる全24パターンに対し、多段階指数ハザードモデルを用いて、わだち掘れの供用曲線を推計した結果を図-4に示す。供用曲線には、劣化進行が経験的に「特異」と考えられるケースが見られることがわかる。具体には表-9に示すように、最終ランクまでの経過年数が80年を超えるなど、劣化進行が極端に遅いと考えられるケースが存在する。また、これらケースに共通した特徴として、サンプル数が極端に少ないこと、説明変数の組合せにコンクリート舗装（CO）、トンネル部（TN）が多く見られることがわかる。

## 5. 混合指数ハザードモデルによる推定

前項で提示したように、多段階指数ハザードモデルでは、多様な因子により影響される舗装の劣化過程を考慮する場合、必然的に説明変数の数が増加することで、個々の説明変数の説明力が低下する問題が生じる。そのため、道路特性に関する説明変数を用いた評価が可能な多段階

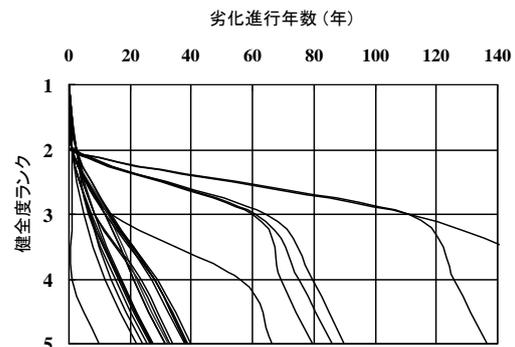


図-4 24パターンによる供用曲線（わだち掘れ）

表-9 特異ケース

説明変数の 組合せパターン	経過年数 (最終ランク)	サンプル数 (対全数比)
CO_TN_軽交通	79.7	303 (1.48%)
CO_TN_重交通	85.8	4 (0.02%)
CO_土工_中交通	89.8	229 (1.12%)
高機能_TN_中交通	136.4	45 (0.22%)
高機能_橋梁_中交通	171.6	405 (1.97%)

指数ハザードモデルに対し、劣化過程の異質性を確率分布から推計する混合指数ハザードモデルの2つのモデルを用いて評価する。具体には、説明変数の全組合せ24パターンに対し、多段階指数ハザードモデルによる確定的な劣化過程と混合指数ハザードモデルによる相対的な劣化過程を比較評価することで、「特異」な劣化パスが含まれるケースに対し、供用曲線を選定する方法を検討した。

### (1) 混合指数ハザードモデル

グループ間の劣化速度を相対評価する混合指数ハザードモデルは、各グループにおけるハザード率の異質性を確率分布で表現するため、グループ間における劣化速度の変動を「異質性」と定義し、ハザード率がガンマ分布に従うようなモデルとして定式化している<sup>3)</sup>。具体には、平均的な劣化過程を表すマルコフ推移確率を多段階指数ハザードモデルを用いて推定する際、説明変数による劣化速度の違いを確率変数で表現し、個別ケース毎に固有なハザード率の変動特性を表すパラメータ（以下、「異質性パラメータ」という。）を同時に推計する。その際、マルコフ劣化モデルの最尤推定量、および異質性パラメータの最尤推定量を用いれば、各グループの劣化速度を相対評価することが可能である。なお、マルコフ推移確率の算出は、4.と同様のプロセス（ここでは、説明変数は考慮しない）で実施している。

### (2) 推計結果

説明変数の組合せによる全24パターンに対し、混合指数ハザードモデルを用いて、わだち掘れの供用曲線を推計した結果を図-5に示す。劣化進行速度は、図-4と比較してパターンごとのばらつきが小さい。これは、平均的

な劣化速度に対し、異質性パラメータの分散が相対的に小さいことを意味している。図-6は、異質性パラメータの推定値の頻度分布を示している。異質性パラメータの平均値は0.989、分散は0.022であり、最小値は0.75、最大値は1.50であった。

このように、混合指数ハザードモデルでは、異質性パラメータの推計値を基に、劣化速度の相対評価を行うことが可能であり、今回、データ件数が少なく、劣化過程が「特異」と判断されるようなケースについては、データのばらつきを確率分布で評価する方法を用いた。

### (3) 推計モデルの選択

多段階指数ハザードモデルによる推計結果に対し、経験的に「特異」と考えられるケースを対象に、混合指数ハザードモデルの推計結果と比較評価した。表-9における特異ケースのうち、説明変数「CO\_土工\_中交通」の組合せにおいて比較した結果を図-7に示す。本ケースでは、多段階指数ハザードモデルにより最終ランクまでの経過年数が90年と推定された結果が混合指数ハザードモデルでは32年となり、後者を適合モデルとして選択している。なお、実際にトンネル部は、従前にはコンクリート舗装を、近年では高機能舗装をコンポジット舗装の表層として適用しており、これらの関係は深い。今回、このようなサンプル数が少ない特異データは、経験的な知識により選別することが可能であり、これら適合モデルは主観評価に基づき選定している。なお、両モデルのハザード率から対数尤度を求めるなど、統計的なモデル選択問題については、今後の検討課題としたい。

## 6. サンプル欠損を考慮した推計

3. (3)でも示したように、NEXCOでは舗装の補修を実施する場合に、100m区間中に存在する損傷のうち、最も劣化が進行した（損傷度の大きい）路面性状に対して補修が実施される。これは、補修理由にひび割れが選択された場合には、わだち掘れやIRIの損傷が相対的に小さい場合が含まれることを意味する。また、実際の補修範囲の選定には、点在する損傷区間を連続して補修するなど、部分的には損傷の小さい区間が含まれることも考えられる。このように、補修目標値に達する前に補修が実施されると、比較的損傷が進行した状態に関する測定データが乏しくなるというサンプル欠損が発生する。

今回の3年間のモニタリング調査においても、実際に約5%の区間でサンプル欠損が生じている。今後、モニタリング調査を継続的に実施していく際にも、サンプル欠損は重要な課題となる。ここでは、サンプル欠損バイアスを考慮した推計結果を供用曲線を用いて表現するとともに、サンプル欠損により劣化過程を過大に評価する問題について考察する。

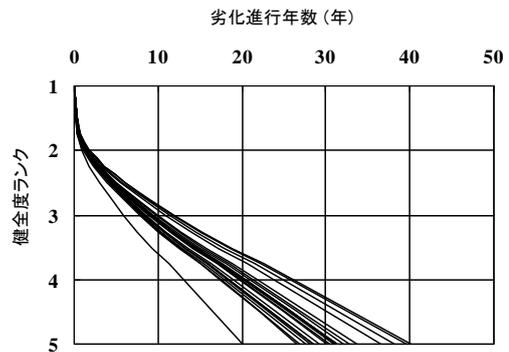


図-5 混合指数ハザードモデルによる供用曲線（わだち掘れ）

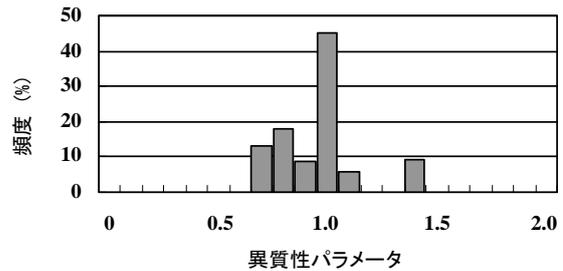


図-6 異質性パラメータの推定結果

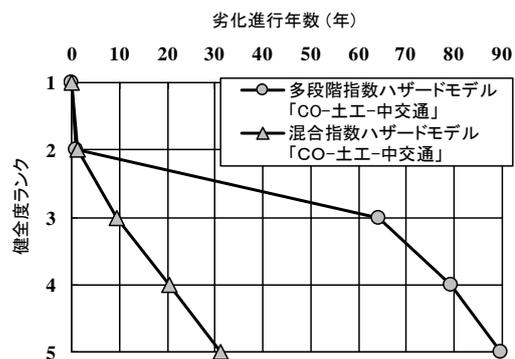


図-7 両モデルによる比較例  
コンクリート舗装 (00) \_土工部 (土工) \_中交通区間のパターン

### (1) サンプル欠損バイアス

基本的にサンプル欠損は、主にプロジェクトレベルにおける技術的な判断により生じる問題であり、補修目標値に対して比較的良好的な状態で補修されるようなケースを指す。いま、図-8に示すような2つの劣化過程のサンプルパスを考える。これは、時刻Aにおいて補修が実施され、良好な状態にあったそれぞれの舗装区間が、時間の経過とともに、異なる供用性曲線に従って損傷が進行している様子を示す。パスAでは、測定時刻Cまで補修が実施されず損傷が進行した状態が観測されている。一方、パスBでは、時刻Bにおいて補修により健全度が回復している。仮に、パスBにおいて時刻Bに補修が実施されなければ、図中の破線で示した供用性曲線に従って損傷が進行し、測定時刻Cにおいて損傷が進行した状態が観測される。しかし、時刻Bにおいて補修が実施されているために、時刻Bから新たに発生したパスCといった

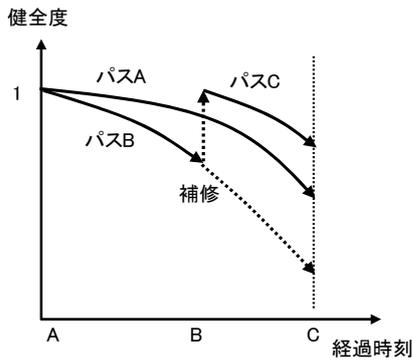


図-8 補修によるサンプル欠損

良好な状態におけるデータが測定されることになる。このように、舗装の補修が実施されることにより、損傷が進行した状態の実測サンプルが系統的に欠損し、定期的な測定によって状態が良いサンプルが相対的に多く取得される。このような比較的状态が良いサンプル集合を用いて劣化予測を推定すると、劣化確率を過小評価するという問題が発生する。このような補修によりサンプルが欠損するために、劣化予測モデルの推定結果が歪められる問題をサンプル欠損バイアスと呼ぶ。

## (2) サンプル欠損バイアス

IRI の検討ケースを例に、サンプル欠損の有無における事前健全度の頻度分布を比較した結果を図-9 に示す。

IRI の増加に伴い、サンプル欠損データの頻度が大きくなる傾向が見られる。多段階指数ハザードモデルにおける通常の最尤推定法を用いて推定すると、サンプル欠損の影響は考慮されず、損傷が相対的に進展した舗装に関する実測サンプルが欠損することがわかる。これらサンプル欠損バイアスを補正するため、修正対数尤度関数の推定方法を定式化している<sup>4)</sup>。具体には、サンプル欠損バイアスは、完全サンプル（サンプル欠損なし）がランダム抽出されないことに起因して発生することから、対象とするサンプル集合を測定間隔と事前健全度に着目して複数のサンプル部分集合に分割するとともに、各サンプル部分集合から実測サンプルをランダム抽出できるようなデータ発生メカニズムを構成することにより、サンプル欠損バイアスを除去する方法を用いた。

## (3) 推計結果

サンプル欠損バイアス補正の有無による供用性曲線の比較結果を図-10 に示す。なお、同図の結果は、IRI の平均的な劣化過程を示しており、説明変数は考慮していない。サンプル欠損バイアスを補正した場合の供用性曲線は、サンプル欠損補正を行わない場合の供用性曲線よりも下方に位置している。しかも、IRI の損傷が進行した健

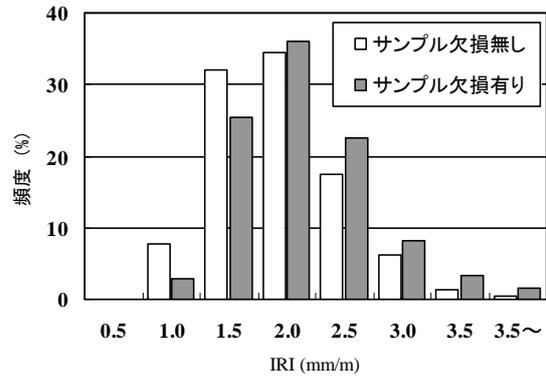


図-9 サンプル欠損の有無における事前健全度の頻度分布

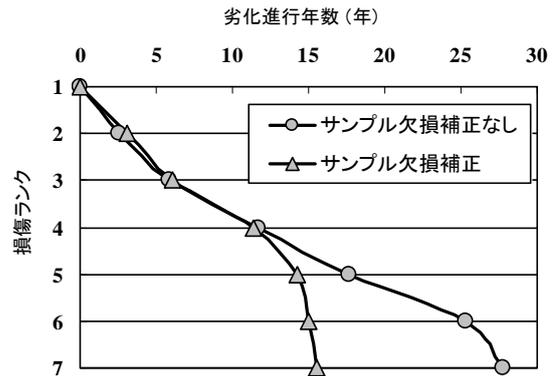


図-10 サンプル欠損バイアスの補正 (IRI)

全度 5 以降では、サンプル欠損バイアスを補正した推計において、IRI の劣化速度が早い傾向が見られる。このことから、サンプル欠損バイアスを補正しない場合、舗装の劣化進行年数を過大に評価する危険性があることが読み取れる。

## 7. 高速道路舗装の統計的劣化モデルの提案

これまでの検討過程を基に、高速道路舗装の統計的劣化モデルを推計した結果を以下に示す。なお、分析対象サンプルは、5. (3) において選択した 2 の劣化モデルに応じて分割し、各モデルを用いて再推計している。その際、同様な劣化傾向が確認された説明変数については統一している。また、サンプル欠損バイアスの補正については、指数ハザードモデルに対し適用している。

### (1) ひび割れの劣化モデル

ひび割れの劣化モデルを図-11 に示す。なお、最も健全な状態 ( $i=1$ ) から、補修目標値である最終ランク ( $i=j$ ) に至るまでの経過年数を表-10 に示しており、これを各図の凡例として活用されたい。

ひび割れの劣化進行は、説明変数の組合せによる差が相対的に大きく、全体的には損傷ランクが 3 を超えると劣化進行が早くなる傾向が見られる。舗装種別では、「高機能」に比べ「密粒」で劣化進行がやや速く、バインダ

の把握力の差が影響したものと考えられる。また、交通区分では「重交通」区間では劣化進行が早い、「中交通」と「軽交通」区間では明確な違いを確認できなかった。なお、トンネル部「TN」およびコンクリート舗装「CO」では劣化進行が相対的に遅い。これはトンネル部ではコンクリート舗装またはコンポジット舗装構造を採用していることから、これら剛性の高い舗装構造が影響したものと考えられる。

## (2) わだち掘れの劣化モデル

わだち掘れの劣化モデルを図-12 に示す。

わだち掘れの最終ランクまでの経過年数は、全体的に他の路面性状に比べ遅い傾向が見られる。これは近年、高速道路におけるわだち掘れの損傷が、減少してきている傾向と一致する。なお、説明変数ごとの関係については「ひび割れ」と同様の傾向を示している。また今回、混合指数ハザードモデルを選択したパターンとの差が大きく表れており、同モデルへのサンプル欠損補正の適用について、今後検討する必要がある。

## (3) IRI の劣化モデル

IRI の劣化モデルを図-13 に示す。

IRI の最終ランクまでの経過年数は、説明変数ごとの分散が 4.97 と最も小さく、全て多段階指数ハザードモデルを適用している。なお、IRI の劣化進行は「橋梁」部で相対的に早い。これは、橋梁ジョイント部の段差等、部分的な損傷が早期に生じることが影響したものと考えられる。

## 8. おわりに

本研究では、高速道路舗装の統計的劣化モデルについて、現場レベルにおける実用性を考慮した検討を進めてきた。今回、中・長期的な補修計画を合理的に説明できる劣化モデルを提案した意義は NEXCO において極めて高い。また、これら推計方法は他の道路舗装にも適用が十分可能であると考えられる。一方で、本検討は 3 年間のモニタリングデータを用いたものであり、継続的なデータ蓄積による推計精度の向上および検証が必要であることは言うまでもない。

なお、今回推計した劣化モデルは、ネットワークレベルにおける平均的な劣化傾向を表すものであるが、これらはプロジェクトレベルにおける個別区間評価のベンチマーキングとして活用することが期待できる。ベンチマーキングよりも現実の劣化が早い区間に関しては、早期劣化の要因を、劣化が遅い区間からは長寿命の要因を分析することで、継続的な技術改善を遂行する道標となる。また、新たな材料や工法による試験施工区間をモニタ評価し、最適工法を選択していくなど、PDCA サイクルに

表-10 説明変数と最終ランクまでの経過年数 (単位: 年)

No.	説明変数の組合せ		ひび割れ	わだち掘れ	IRI		
1	高機能	土工	重交通	10.0	17.2	15.4	
2,3			中・軽交通	13.3	17.6	20.0	
4		橋梁	重交通	10.2	25.5	12.6	
5,6			中・軽交通	13.5	27.7	16.3	
7		T N	重交通	20.6	31.0	14.2	
8,9			中・軽交通	26.9	31.5	18.8	
10	密粒	土工	重交通	9.0	16.0	14.1	
11,12			中・軽交通	10.2	16.4	16.7	
13		橋梁	重交通	9.2	21.4	11.6	
14,15			中・軽交通	10.5	23.6	13.7	
16		T N	重交通	13.1	30.1	13.0	
17,18			中・軽交通	21.5		15.6	
19		CO	土工	重交通	29.2	31.5	19.0
20				中交通		32.1	
21			軽交通	44.2	24.1		
22	T N		重交通	18.1		30.5	18.0
23,24			中・軽交通	28.1		35.6	24.1

※ 表中の網掛けは、混合指数ハザードモデルの結果を示す。

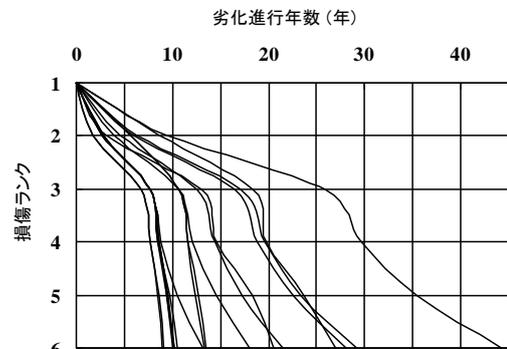


図-11 ひび割れの劣化モデル

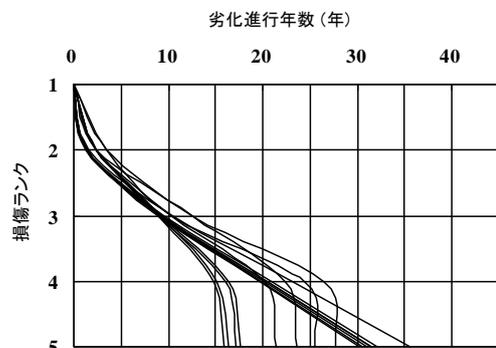


図-12 わだち掘れの劣化モデル

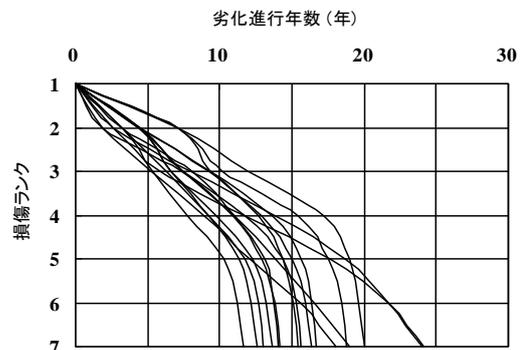


図-13 IRI の劣化モデル

基づいた舗装マネジメントを実施することで、舗装全体のライフサイクルの向上に結び付くものとする。

そのためにも、本論文で課題としてあげたような、データの質的な問題（モニタリング区間および説明変数の選定方法）の改善と、推計モデルの定式化（推計モデルの統計的な選択方法、サンプル欠損バイアスを混合ハザードモデルへ適用する方法）、さらには構造的な損傷評価への適用などについて、引続き検討していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 小林他：インフラストラクチャのマネジメント：研究展望，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.15-27，2003.
- 2) 津田他：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.
- 3) 小林他：インフラストラクチャのマネジメント：研究展望，土木学会論文集，No.744/IV-61，pp.15-27，2003.
- 4) 津田他：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.
- 5) 小濱他：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.
- 6) 小林他：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.
- 7) 貝戸他：階層型指数劣化ハザードモデルによる舗装ひび割れ過程のモデル化，土木学会論文集 F，Vol.63，No.3，pp.386-402，2007.
- 8) 林他：競合的劣化ハザードモデル：舗装ひび割れ過程への適用，土木学会論文集 D，Vol.65，No.2，pp.143-162，2009.
- 9) 小林他：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.

## A PAVEMENT DETERIORATION FORECASTING MODEL IN EXPRESSWAYS BASED ON MONITOR DATA

Kazuhiko KUMADA, Masayuki EGUCHI, Kazuya AOKI, Kiyoyuki KAITO and Kiyoshi KOBAYASHI

The development of a pavement deterioration forecasting model for network level has been strongly needed for nationwide toll road operators NEXCO to appropriately achieve asset management, so that the life cycle cost of pavements can be minimized in mid/long term. In this study based on road surface monitoring data extensively collected from nationwide selected sections under NEXCO, the pavement performances are described by the multiple rating indices, and the Markov transition probabilities are modeled by multi-staged exponential hazard model. The originating points of the models here are the consideration of practical issues including decrease of accuracy in forecasting with increase of explanatory factors, and sample drops due to repairing pavements at higher ratings. The applicability of the models are also evaluated from practical views as road operators.