



Title	実測データに基づく損傷の深層化を考慮した高速道路舗装マネジメントに関する研究
Author(s)	中村, 和博
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98801
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

実測データに基づく
損傷の深層化を考慮した
高速道路舗装マネジメントに関する研究

中 村 和 博

2024 年 6 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	高速道路のアスファルト舗装における損傷	3
1.2.1	高速道路におけるアスファルト舗装の標準断面構成	3
1.2.2	高速道路舗装の損傷形態の変遷	3
1.2.3	アスファルト舗装の損傷の深層化	8
1.3	高速道路舗装マネジメントの高度化の必要性	12
1.3.1	社会基盤のアセットマネジメント	12
1.3.2	高速道路舗装のビッグデータとマネジメント	13
1.3.3	損傷の深層化に対応した高速道路舗装マネジメント	15
1.4	本論文の構成	17
	参考文献	19
第 2 章	損傷の深層化の実態分析	24
2.1	はじめに	24
2.2	本章の概要と目的	26
2.3	位置情報によるデータ連携	28
2.3.1	NEXCO-PMS の概要	28
2.3.2	点検システムの概要	28
2.3.3	データ連携	28
2.4	路面管理の実態	30
2.4.1	路面性能の実状	30
2.4.2	日常点検で確認される変状の傾向	30
2.4.3	個別路線における分析	33
2.4.4	路面管理実態から見る損傷の深層化の影響	34
2.5	損傷の深層化を考慮した修繕施策の提案	36
2.5.1	劣化進行段階に応じた修繕施策の策定手法	36
2.5.2	修繕サイクルの長期化に向けた一施策	38

2.6	おわりに	42
参考文献		44
第 3 章	高速走行に対応した路面たわみ量測定装置	47
3.1	はじめに	47
3.2	本章の基本的な考え方	48
3.2.1	HSWD の必要性	48
3.2.2	移動式たわみ測定装置	48
3.2.3	光切断法による路面たわみ量の測定	49
3.3	予備検討	51
3.3.1	荷重載荷方法の検討	51
3.3.2	たわみ形状計測精度の確認	55
3.4	実走行を想定した測定車両の製作	58
3.4.1	測定車両の検討	58
3.4.2	測定システムの検討	58
3.5	試験測定	61
3.5.1	試験測定の概要	61
3.5.2	HSWD における路面たわみ量算定方法の検討	61
3.5.3	試験測定結果	70
3.6	おわりに	72
参考文献		74
第 4 章	統計的劣化予測手法を用いた舗装補修計画の高度化	77
4.1	はじめに	77
4.2	本章の基本的な考え方	79
4.2.1	既往研究の概要	79
4.2.2	舗装補修工事を計画するための劣化予測	79
4.2.3	本章の位置付け	81
4.3	連続量を用いた劣化ハザードモデル	84
4.3.1	劣化進行プロセス	84
4.3.2	ベースラインモデル	86

4.3.3	尤度関数の定式化	87
4.3.4	劣化リスク管理指標	89
4.4	適用事例	91
4.4.1	データ概要	91
4.4.2	連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定結果	91
4.4.3	調査間隔の違いによるモデル推定結果への影響	99
4.5	おわりに	101
付録：データ獲得パターン 2 の場合の尤度関数		102
参考文献		103
第 5 章 地域の環境・材料条件を考慮した舗装構造設計手法		107
5.1	はじめに	107
5.2	本章の基本的な考え方	108
5.2.1	T _A 法の課題	108
5.2.2	供用実態を加味した舗装構造設計	108
5.3	統計的劣化予測モデルの概要	111
5.3.1	モデル化の前提条件	111
5.3.2	モデルの定式化	111
5.3.3	モデルの推定方法	113
5.4	地域の環境・材料条件による舗装の劣化速度	116
5.4.1	環境・材料条件の定量化と地理空間的連携	116
5.4.2	マルコフ劣化ハザードモデルの推定結果	121
5.5	長寿命化に向けた舗装構造設計	125
5.5.1	混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定結果	125
5.5.2	地域の環境・材料条件を考慮した A _s 層厚の算定	128
5.6	おわりに	132
参考文献		134
第 6 章 結論		137
謝辞		139

表目次

1.1	補修目標値	14
2.1	補修目標値	31
2.2	新名神（甲賀土山～草津）の舗装構成	33
3.1	たわみ形状計測精度の確認結果	57
3.2	試験測定区間の概要	62
3.3	試験測定時の気象条件	62
4.1	補修目標値	78
4.2	サンプルサイズ	92
4.3	パラメータ推定結果	94
5.1	IRI の健全度区分	117
5.2	分析データのサンプルサイズ	117
5.3	マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定結果	122
5.4	混合マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定結果	126

図目次

1.1	高速道路のアスファルト舗装の標準断面構成	4
1.2	表層用混合物の配合設計の地域区分	6
1.3	高機能舗装施工前後の事故件数の比較	6
1.4	深層部の損傷メカニズム	11
1.5	高速道路舗装の損傷の深層化	11
1.6	社会基盤マネジメントの概念	13
1.7	アセットマネジメントサイクル	13
1.8	本論文の構成	18
2.1	位置情報によるデータ連携	29
2.2	路面性能の傾向	31
2.3	日常点検による変状の傾向	32
2.4	新名神（甲賀土山～草津）の点検レコードの推移	34
2.5	新名神（甲賀土山～草津）の路面性能の推移	35
2.6	支社ごとの IRI の比較	37
2.7	Δ IRI と点検レコード密度の関係	37
2.8	As 層厚の違いによる路面性能の比較	39
2.9	IRI と As 層厚の関係	39
2.10	累積大型車交通量と As 層厚の関係	40
2.11	累積大型車交通量別の IRI と As 層厚の関係	40
2.12	変状レコードの有無による Δ IRI の傾向	41
3.1	高速道路舗装マネジメントにおける構造健全度情報の追加	49
3.2	光切断法の概要	50
3.3	舗装モデル	52
3.4	舗装モデルの FEM 解析結果	52
3.5	動的 FEM 解析モデル	53
3.6	動的 FEM 解析結果	53
3.7	たわみ量の時刻歴応答（軸重 10t, 走行速度 80km/h）	54
3.8	たわみ形状計測精度確認の実験状況	55
3.9	たわみ形状計測結果	57

3.10	光切断法による路面たわみ量測定ユニット	60
3.11	差分処理の必要性	63
3.12	路面たわみ量の算定方法	63
3.13	車体の傾きの影響の除去	64
3.14	路面たわみ量の算定結果：移動平均処理によるノイズ除去 (70km/h の測定例)	66
3.15	HSWD たわみ量（補正無し）と FWD たわみ量の関係	67
3.16	路面高さの変化量によるたわみ量補正の概念図	67
3.17	HSWD たわみ量と路面高さの変化量の関係	68
3.18	路面高さの変化量による FWD たわみ量と HSWD たわみ量の差の関係	69
3.19	試験測定結果	71
4.1	統計的劣化予測手法を用いた舗装補修工事の計画	80
4.2	期待劣化パスの違い	81
4.3	高速道路舗装の標準構成	83
4.4	データ獲得パターンの違いによる劣化パフォーマンスカーブ	88
4.5	高速道路のアスファルト舗装の基本単位	92
4.6	調査回数ごとのデータ数	92
4.7	劣化パフォーマンスカーブ	95
4.8	補修履歴の獲得状況	96
4.9	調査時点と IRI の関係	98
4.10	調査間隔による推定結果（A 支社）	99
5.1	地域の環境・材料条件を考慮した高速道路の舗装構造設計手法	109
5.2	年間総雨量（1km メッシュ）	118
5.3	降雨量データの地理空間的連携	119
5.4	はく離面積率の地理空間的連携	120
5.5	はく離面積率のマッピング結果	120
5.6	マルコフ劣化ハザードモデルによる劣化曲線	123
5.7	異質性パラメータの頻度分布	126
5.8	各 IC 区間（地域）の劣化曲線	127
5.9	ハザード率と異質性パラメータの関係（健全度ランク 3）	127
5.10	期待寿命（20 年）に応じた As 層厚	130
5.11	期待寿命（30 年）に応じた As 層厚	131

写真目次

1.1	名神高速道路で発生した路面のひび割れ	4
1.2	チェーン規制後の骨材飛散状況	7
1.3	基層用混合物の土砂化	8
1.4	下層路盤の永久変形	9
1.5	アスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れ (採取したブロック供試体を上下反転して撮影)	10
3.1	試作した HSWD の外観	59
3.2	道路縦断方向の計測 (車体の前方から後方に向けて撮影)	59
3.3	スリット光の照射状況	60
4.1	路面性状調査車両	78

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

高速道路ネットワークをはじめとする社会基盤は、我が国の生活・経済・文化活動を支える国民共有の財産である。我々は、社会基盤の有効活用と保全を図り、将来世代に継承していかなければならない。しかし、少子高齢化の進行、経済成長率の鈍化といった現在の社会経済情勢において、社会基盤の整備・維持管理に資する財政的な制約は一段と厳しさを増している。また、我が国の社会基盤は、高度経済成長期以降に集中的に整備されており、今後、建設から 50 年以上経過する施設の割合が加速的に進行していくことが見込まれている。

社会基盤に対するアセットマネジメントの重要性が高まっている中、時間的に変動していく施設の劣化状態をモデル化することは、維持管理費用や劣化リスクの将来予測、あるいは維持管理施策の最適化のために極めて重要となる。こうした背景から、現場で実測された点検・調査データをもとにした統計的劣化予測モデルに関する研究が蓄積されている。2005 年に開発されたマルコフ劣化ハザードモデル^{1),2)}によって、社会基盤施設の劣化過程を表すマルコフ推移確率を、非集計データに対して、構造条件や環境条件などを特性変数として考慮したうえで推定する手法が確立された。さらに、マルコフ劣化ハザードモデルを拡張させた数多くのモデル³⁾⁻⁷⁾が開発されている。社会基盤の老朽化が深刻な現状において、長年にわたって蓄積された劣化予測モデルを、実務的課題の解決やアセットマネジメントの継続的稼働に向けて、適材適所で実装していくことが重要になっている。

西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 西日本）が管理する高速道路ネットワークは、総延長 3,603km（2023 年 9 月時点）に達し、約 293 万台／日（2022 年度）の交通を担っている。一方、管理延長の約 6 割が供用開始から 30 年を超える中、大型車交通量の増加や凍結防止剤の散布といった過酷な使用環境のもと、各種構造物の老朽化が進行している。この問題に対し、2012 年 11 月、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（以下、NEXCO3 会社）は、高速道路ネットワークの機能を永続的に健全な状態で保つため、「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討会（以下、長期保全委員会）」を設置した。長期保全委員会では、高速道路本体の構造物について、大規模更新・修繕の必要性やその対策方法の検討が進められた^{注 1)}。長期保全委員会の検討結果を踏まえ、2015 年 3 月、国土交通大臣から道路整備特別措置法に基づく更新事業の認可を受け、NEXCO3 会社は大規模更新・

修繕事業に着手し、現在では、橋梁床版の取替等の工事が全国各地で本格的に展開されている。2019 年より、これらの事業のフォローアップが行われ、更新事業の実施等により得られた新たな課題が整理された^{注2)}。それと同時に、2014 年度から実施している 5 年に 1 度の近接目視による定期点検や点検技術の高度化を踏まえた調査等により、従来の知見にはなかった損傷のメカニズムなどが新たに確認された^{注2)}。

近年、本研究で対象とする高速道路のアスファルト舗装において、損傷が深層部まで進展していることが確認されている⁸⁾ことを受け、長期保全委員会の検討対象構造物に舗装が追加された。2023 年 1 月に公表された中間とりまとめ^{注2)}において、アスファルト舗装に関する検討結果として、1) 損傷が路盤まで進行していること、2) 路盤部の損傷は、アスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れ、下層路盤の脆弱化と永久変形であること、3) 路盤部の高耐久化を図る対策が必要であること、4) 舗装の健全性をより網羅的に把握するため、舗装表面のたわみ量を移動しながら測定できる車両の開発が重要であること、が整理されている。

こうした中、現行の料金徴収期間では、点検強化により判明した重大な損傷に対応するための更新事業や、国土強靱化等の社会的要請を踏まえた高速道路の進化に関する事業に必要な財源の確保が困難になっていることを受け、2023 年 9 月、道路整備特別措置法および独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構法の一部が改正された。この改正により、料金徴収期間が最長 2115 年までに延長され、期間内において 50 年の債務返済計画が確認された都度、高速道路の更新・進化に関する事業化が可能となった。したがって、高速道路の安全・安心を確保する取り組みにおいても、中長期的視野に立脚した事業計画を立案・検討することが重要になっている。

1.2 高速道路のアスファルト舗装における損傷

1.2.1 高速道路におけるアスファルト舗装の標準断面構成

高速道路舗装の構造設計には、路床の設計 CBR と計画交通量から舗装断面を決定する T_A 法を標準的に採用している。 T_A 法で設計される高速道路舗装の標準断面構成は、図-1.1 に示すとおり、表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤・下層路盤の 4 層構成となっている。ここで、舗装全厚の最小厚さは 35cm、アスファルト混合物層厚（表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤の合計厚（以下、 A_s 層厚））の最小厚さは 18cm、表層と基層の合計厚さは 10cm（原則）、下層路盤の種別はセメント安定処理路盤（原則）が、それぞれ規定されている⁹⁾。本研究では、アスファルト安定処理上層路盤と下層路盤を「深層部」と定義する。

1.2.2 高速道路舗装の損傷形態の変遷

(1) 名神高速道路のひび割れ

1963 年 7 月、我が国初の高速道路として、名神高速道路の栗東インターチェンジ（以下、IC）～尼崎 IC が開通した。しかし、開通後 2 年が経過した頃から、写真-1.1(a) に示すような線状ひび割れが確認された¹⁰⁾。ひび割れの進行は予想外に早く、線状ひび割れの発生後 1～2 年で、写真-1.1(b) に示す亀甲状ひび割れに進行することが確認された。この状況を受け、ひび割れの発生原因を明らかにするため、1967 年から大規模な調査が開始された。調査では、表層上で繰り返し平板載荷試験とベンゲルマンビームによるたわみ量測定が行われ、順次表層以下の層をはぎ取り、各層上での載荷試験と密度測定、採取した材料を用いた各種室内試験が行われた。調査の結果、名神高速道路のひび割れの発生原因は、 A_s 層厚（10cm）が不足している断面構成に集約されることが明らかになった¹⁰⁾。

(2) 東名高速道路の流動わだち掘れ

東名高速道路の舗装設計では、AASHO (American Association of State Highway Officials) 道路試験の結果を踏襲した SN 設計法を適用し、舗装構造の強化を目的にアスファルト安定処理上層路盤を採用した。その結果、名神高速道路で経験した早期ひび割れ発生の問題は解決するに至った。一方で、供用開始直後から、わだち掘れの発生に苦慮することとなった。東名高速道路の舗装設計で参考とした AASHO 道路試験において確認されたわだち掘れの発生状況は、アスファルト混合物の圧密や流動は比較的小さく、上・下層路盤面や路床面での変位が大きいというものであった。これに対し、東名高速道路では、牧之原地区で実施された開削調査の結果、路面上のわだち掘れは表層混合物の圧密と流動によるものであり、アスファルト安定処理上層路盤の上面で数

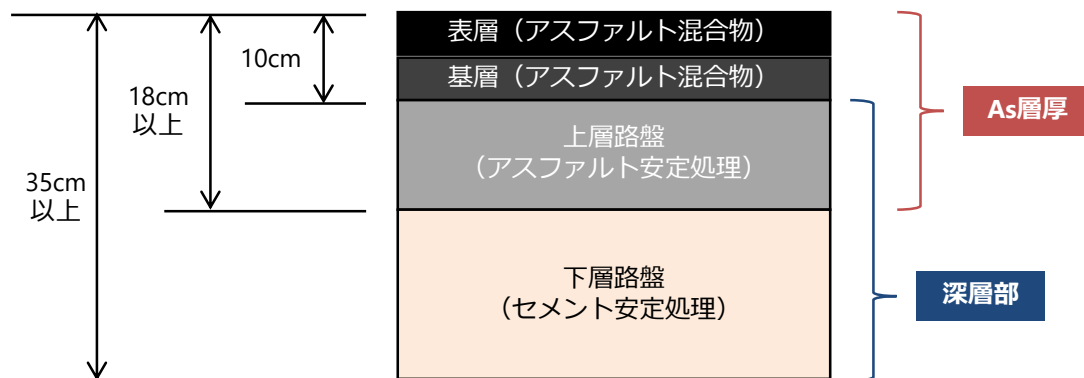


図-1.1 高速道路のアスファルト舗装の標準断面構成



(a) 線状ひび割れ



(b) 亀甲状ひび割れ

写真-1.1 名神高速道路で発生した路面のひび割れ¹⁰⁾

mm 程度の変形が確認されたものの、下層路盤以下では全く変形していないことが確認された。このことから、東名高速道路で発生したわだち掘れは、アスファルト混合物の流動が主な要因であると判断された¹⁰⁾。

これらの調査結果を踏まえ、1992 年以降の建設、補修工事では、流動わだち掘れ対策として、1) 表層用混合物の見直し、2) ホイールトラッキング試験による動的安定度（DS : Dynamic Stability）の導入、3) 使用アスファルトの見直し、が図られた。表層用混合物の見直しでは、それまでに使用していた表層用混合物（タイプ I）に比べ、骨材粒度が粗く耐流動性に優れるタイプ A 混合物の配合粒度を新たに設定した。動的

安定度は、耐流動性に優れた混合物を適用するにあたり、混合物の性能評価手法として導入したもので、交通区分と地域区分により目標値が設定された。また、わだち掘れの要因分析の結果、アスファルト混合物の耐流動性を高めるために、針入度の低いストレートアスファルトを使用することが効果的であることが明らかになったため、ストレートアスファルト 40/60 の適用が図られた。さらに、大型車交通量が 15,000 台/日・一方向以上の超重交通区間では、混合物の耐流動性をより向上させるため、ストレートアスファルトにゴム・熱可塑性エラストマーを添加した改質アスファルトが適用された。

(3) 積雪寒冷地域における摩耗わだち掘れ

高速道路の整備が全国的に展開されるとともに、東名高速道路で問題となった流動わだち掘れに加えて、積雪寒冷地においては、スパイクタイヤやタイヤチェーンによって表層がすり減る摩耗わだち掘れが急増した。摩耗わだち掘れは、骨材やアスファルトよりはるかに硬い金属製スパイクピンやチェーンがアスファルト混合物を削り取ることにより発達する。特に摩耗わだち掘れが顕著な地域では、わだち掘れ量の進行量が 7mm/年程度であると報告されており、一般地域（非積雪寒冷地）に該当する東名高速道路のわだち掘れ量の進行量である 2mm/年程度に比べはるかに大きな値を示していた¹⁰⁾。

流動わだち掘れと摩耗わだち掘れの研究が進められていくにつれ、流動わだち掘れに対する抵抗力を大きくすると摩耗わだち掘れが発生しやすく、逆に摩耗抵抗性を大きくすると流動わだち掘れを起こしやすくなるというトレードオフの性質を有することが明らかになった¹⁰⁾。具体的には、混合物のアスファルト量を多くしていくと流動変形量は増大し摩耗量は減少すること、アスファルトの針入度を小さくすると流動変形量は減少するが摩耗量は増大することが明らかになった。また、混合物中の粗骨材量を多くすると流動変形量は減少するが摩耗量は増大することも明らかになった。このため、配合設計要素である粗骨材量やアスファルト量は、流動変形と摩耗量のバランスを考慮して決定する必要性があった。したがって、交通条件や気象条件を考慮し各地域に適した混合物の配合を決定するため、表層混合物の配合設計において図-1.2 に示す 3 つの地域区分（摩耗地域、準摩耗地域、一般地域）による配合基準が設定された¹⁰⁾。

(4) 高機能舗装の導入に伴う表層の骨材飛散と基層のはく離

高速道路ネットワークが全国に拡大していくにつれて、我が国のモータリゼーションも大きく進展し、1965 年に約 720 万台であった自動車の保有台数は、1993 年には 6,150 万台にも達していた¹¹⁾。このような急激な自動車保有台数の伸びとともに、車両

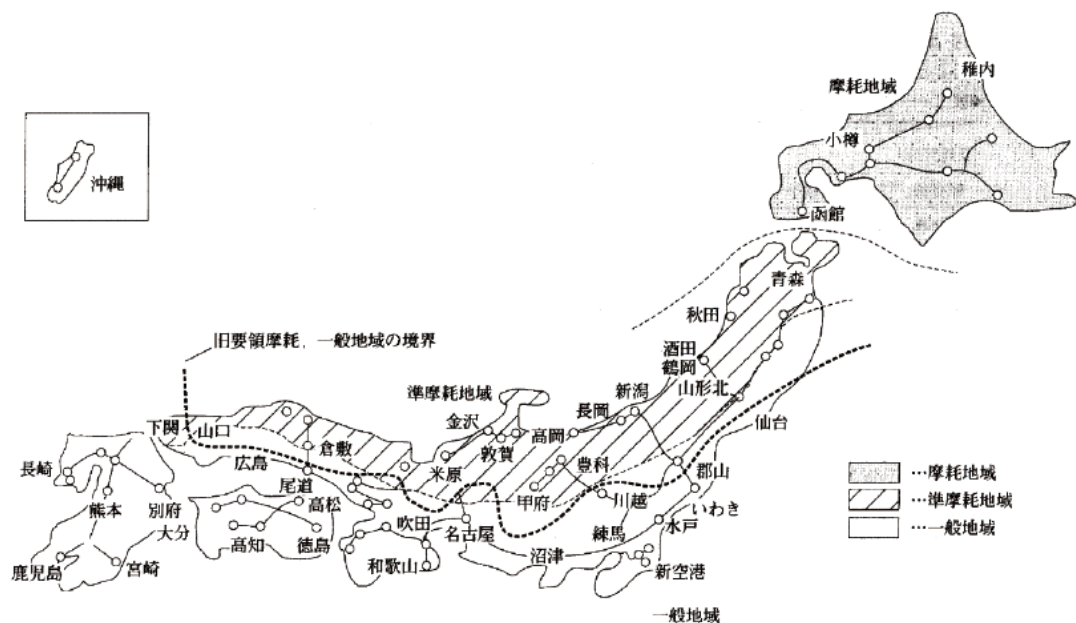


図-1.2 表層用混合物の配合設計の地域区分¹⁰⁾

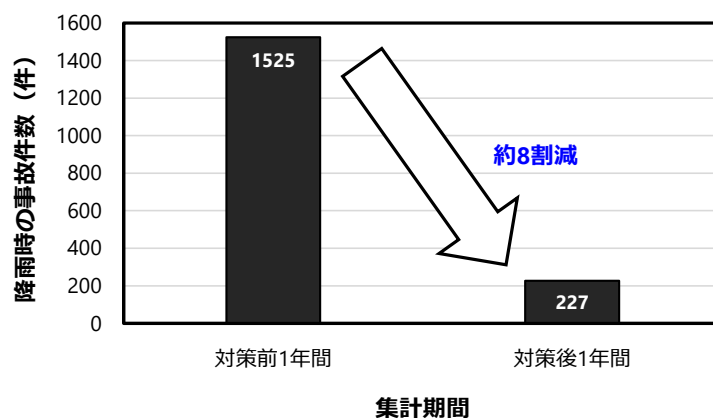


図-1.3 高機能舗装施工前後の事故件数の比較¹²⁾

の大型化・高性能化といった要因，さらには社会経済活動の多様化などの要因が加わり，1988 年ごろから交通事故が急増し大きな社会問題になっていた¹¹⁾。こうした情勢のもと，当時，国内外において注目を集めていた排水性舗装について，1991 年から高速道路への適用に関する試験施工が実施された。図-1.3 は，高速道路上で降雨時に交通事故が多く発生していた箇所（調査対象 164 箇所）において，排水性舗装を施工した前後における事故件数を比較した結果であり，排水性舗装の効果により降雨時の交通事故が約 8 割も減少したことが確認された¹²⁾。以上の経緯から，1998 年，日本道路



写真-1.2 チェーン規制後の骨材飛散状況¹⁰⁾

公団（以下、JH）は、排水性舗装を高機能舗装と称し、高速道路舗装の表層の標準工種として採用した。

高機能舗装の最大の特徴は、舗装内部に有する 20%程度の空隙へ雨水が浸透し、基層面を通じて路肩に排水することである。空隙を確保するため、高機能舗装用混合物の配合は、細骨材量が少なく、粗骨材をアスファルトで点状に接着する構造を呈している。このため、高機能舗装に使用するアスファルトは、従来のアスファルトに比較して接着性能を高めた高粘度改質アスファルトを使用している。この結果、混合物の変形抵抗性が飛躍的に向上し、副次的に流動わだち掘れの発生が抑制され、東名高速道路の供用後から苦慮し続けたわだち掘れ対策に終止符が打たれることになった。

一方で、1) 骨材飛散、2) 基層のはく離、といった、高機能舗装の採用によって新たな損傷の発生が確認された。高速道路上において、高機能舗装特有の損傷形態である骨材飛散は、写真-1.2 に示すように、タイヤチェーン装着車の走行で骨材飛散が生じる冬季路面の損傷形態であった。そのため、骨材飛散に対応するためには、高粘度改質アスファルトの骨材把握力を適切に評価したうえで向上させる必要があった。そこで、ポリマー改質アスファルトの曲げ試験方法¹³⁾を考案し、曲げ仕事量ならびに曲げスティフネスの基準値を満足する積雪寒冷地用の高粘度改質アスファルトが開発され、骨材飛散対策に適用された。

舗装内部に雨水を浸透させるという高機能舗装の特徴は、舗装構造設計条件で考慮していない要素である。特に、排水経路となる基層は雨水に触れる機会が増え、舗装が変形した場合は基層面に雨水が滞水した状態で繰り返し交通荷重が作用する供用条件となる。この影響により、基層用混合物は、骨材からアスファルト被膜が剥がれる「はく離」を引き起こしやすくなる。アスファルトは骨材同士をつなぐ接着剤の役割



写真-1.3 基層用混合物の土砂化

を果たしており、はく離により接着効果が薄れてくると、基層用混合物は不安定になり最終的に土砂化（写真-1.3）に至る。この対策として、基層用混合物のはく離を防止することを目的に、混合物の水密性を高めるため、空隙率を小さくするように配合設計の粒度範囲が見直された。また、使用する骨材はアスファルトとの親和性に優れた材料が選定されるように、それまで任意だったアスファルト被膜のはく離試験による骨材自体のはく離抵抗性の確認が義務化された。さらには、配合設計における耐久性試験として水浸ホイールトラッキング試験を行い、混合物としてのはく離抵抗性の確認を義務化し、必要に応じてはく離防止剤や改質アスファルトの使用により基層用混合物の耐水性能の改善が図られた。なお、最新（2023年7月）の高速道路舗装に関する技術基準¹⁴⁾において、現地の施工実態を考慮し、基層用混合物の使用アスファルトは改質アスファルトを標準とするように改定された。

1.2.3 アスファルト舗装の損傷の深層化

名神高速道路で経験した早期ひび割れの発生と、東名高速道路で顕在化したわだち掘れの問題は、舗装には構造上の寿命と混合物特性上の寿命とが存在し、舗装設計において双方のバランスを考慮する必要性を指摘した。すなわち、舗装厚を必要以上に大きくしても混合物の寿命が先に到達する場合は、舗装構造は有効に活用されない。しかし、東名高速道路の構造設計で想定したように、舗装構造が10年で寿命に到達するとすれば、その時点で下層路盤から表層までを修繕することになり、時間的制約と莫大な修繕費用の観点から現実的ではない。したがって、舗装構造体としては、将来にわたりできるだけ長期間耐えられる構造とし、路面性状の状況に応じて表層だけを切削オーバーレイで補修する、いわゆる畳の表替え方式が現実的で経済的な方策であると結論付けられた¹⁰⁾。

表層を対象に切削オーバーレイで補修し、高速道路舗装路面の供用性を確保すると

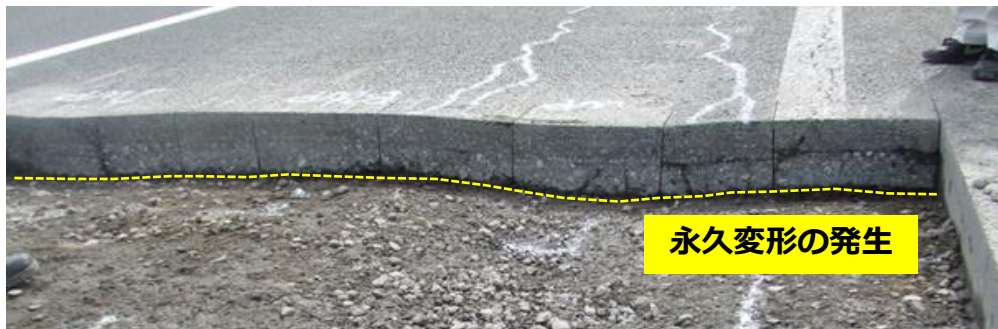


写真-1.4 下層路盤の永久変形

いう考え方は、高機能舗装を全面展開する際にも適用され、供用路線の補修に際し、既設の損傷した表層を高機能舗装に置き換え、基層はそのまま存置する形態の工事が各地で進められた。表層を高機能舗装に切り替えた箇所では、経年劣化を受けている基層が雨水にさらされ、既設の基層のはく離が進行することとなった。そのため、既設基層用混合物のはく離抵抗性を評価する手法が考案され¹⁵⁾、補修工事における舗装深さ方向の補修範囲の決定にあたっては、既設基層用混合物のはく離抵抗性や損傷状況を確認することが重要視されることになった。その結果、現在の高速道路舗装の補修では、基層域までを対象にすることが一般的となっている。

以上に示したとおり、従来までは、表層・基層に発生した損傷に対して補修を繰り返すことで、高速道路舗装の健全性が維持できると想定されてきた。しかしながら、近年、路面に土砂が噴出する現象やアスファルト安定処理上層路盤部のひび割れの発生など、路盤部まで損傷が進行する事例が散見されている。路盤部まで損傷が進行している箇所に対し、表層・基層のみを補修した場合、十分な補修効果が得られず、短期間で新たな損傷が発生し補修頻度が著しく高くなるといった問題が生じている^{注2)}。

このような状況を受け、高橋ら⁸⁾は、実道のアスファルト舗装では、実際にどのような要因で舗装の内部の損傷が進行するのかを明らかにするため、「高速道路におけるアスファルト舗装の解体新書プロジェクト」と称する開削調査を全国的に実施した。調査の結果、1) それまでに数回の打換えを余儀なくされていた箇所において、下層路盤の永久変形、滞水による脆弱化（写真-1.4）、2) As 層厚が 18～20cm と薄い IC 間において、アスファルト安定処理上層路盤に下面から進展する疲労ひび割れが発生していること（写真-1.5）、また、その周辺部においてははく離が生じていること¹⁶⁾、3) 損傷箇所のアスファルト舗装は、各層間が一体化されておらず、ひび割れ等から浸透した雨水が各層間を水平方向に流れ、付着切れしている状態であること、4) 基層用混合物のはく離抵抗性が低下していること、が明らかになった。開削調査の知見は、長期保全委員会において、深層部の損傷メカニズムとして図-1.4 のとおり整理された^{注2)}。図

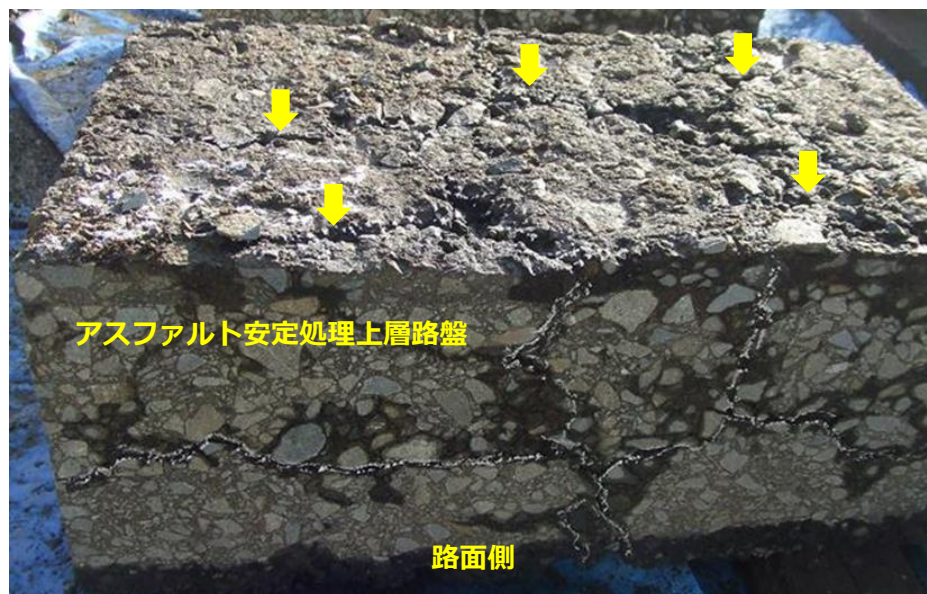


写真-1.5 アスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れ
(採取したブロック供試体を上下反転して撮影)

-1.4(a)の深層部の損傷の発生段階では、表基層の損傷に対し補修を繰り返している中で、交通荷重等の疲労がアスファルト安定処理上層路盤に蓄積し、下部に疲労ひび割れが生じる。図-1.4(b)の損傷進行段階では、さらなる交通荷重等の増加により、疲労ひび割れがアスファルト安定処理上層路盤全層に進行する。そして、図-1.4(c)の下層路盤の損傷段階では、アスファルト安定処理上層路盤のひび割れの発生により、雨水が下層路盤まで浸入し、下層路盤の脆弱化に伴う永久変形が発生する。

我が国の高速道路草創期の名神・東名から現在までの時系列において、各時期でクローズアップされた損傷形態を舗装構造の層別に分類し、模式的に整理したものを図-1.5に示す。表層のひび割れやわだち掘れが問題となった時期（名神・東名）、基層の耐久性・耐水性が問題となった時期（高機能舗装の導入）を経て、現在はアスファルト安定処理上層路盤・下層路盤といった舗装構造の深層部の損傷に対応しなければならない新たな時期に突入したと考えられる。本研究では、舗装構造に対する損傷の発生部位が、表層⇒基層⇒アスファルト安定処理上層路盤・下層路盤に進展している現象を「損傷の深層化」と定義する。

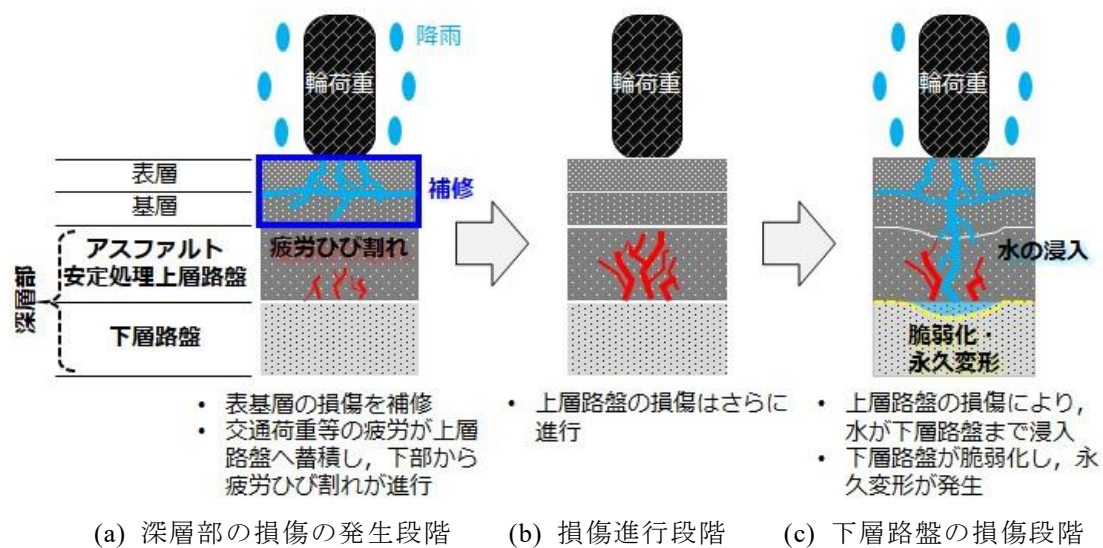


図-1.4 深層部の損傷メカニズム^{注2}

時系列	昭和	平成	令和
舗装断面	名神/東名 新規5道	全国ネットワーク 高機能舗装の導入	開削調査
表層	・名神：ひび割れ ・東名：流動わだち	・寒冷地：摩耗わだち	・骨材飛散
基層			・はく離
上層路盤			・疲労ひび割れ
下層路盤			・脆弱化 ・永久変形

損傷の深層化

図-1.5 高速道路舗装の損傷の深層化

1.3 高速道路舗装マネジメントの高度化の必要性

1.3.1 社会基盤のアセットマネジメント

高速道路ネットワークに代表される社会基盤は、経時的な材料劣化や繰り返し作用する外力の影響により、不可避免的に性能の低下が生じる。そのため、社会基盤の管理者には、管理対象の全貌を把握し、性能の変化を予測してその低下を防止する、あるいは機能的陳腐化などに対して必要な機能を峻別し、状況に応じた性能を確保する取り組みが求められている。これらの活動を合理的に実施するためには、ベテラン技術者の長年の経験や知識に頼るのではなく、膨大かつ多岐にわたる関連情報を統計的手法により有効に活用することが重要である。このような考えのもと、金融資産管理で確立されてきたアセットマネジメントの概念をアナロジーとした、データに基づく客観的で説明性や透明性が高い社会基盤のマネジメント手法が検討されている¹⁷⁾。

マネジメントの概念を単純化すると、図-1.6のように「情報」「知識」「意思決定」という3つのプロセスが循環する構造となる¹⁸⁾。マネジメントとは、最終的に何らかの意思決定（社会基盤施設を補修するか否か、更新するか否かなど）を行う行為である。当然ながら、「意思決定」には「知識」が必要となり、「知識」を獲得するためには「情報」が不可欠である。ただし、単に情報と言っても、高度知識社会と呼ばれる今日において、我々が手にすることができる情報はまさにビックデータである。このビックデータから真に有益かつ高度な情報を抽出することがマネジメントの第一歩となるだけでなく、意思決定の質を大きく左右する。

社会基盤のアセットマネジメントは、社会基盤の健全度を診断し、劣化した社会基盤の最適な維持補修計画を求めることを目的としている。アセットマネジメントサイクルは、図-1.7のとおり整理できる¹⁹⁾。図中の右側のサイクルほど、短い期間でPDCAが実施される。最も左側の構想レベルのサイクルでは、長期的な視点から社会基盤資産群の補修シナリオやそのための予算水準を決定することが課題となる。中央の戦略レベルのサイクルでは、新たに得られたモニタリング結果等に基づいて、例えば、将来5ヵ年程度の中期的な予算計画や戦略的な補修計画を立案することが重要な課題となる。最も右側の実施レベルのサイクルは、各年度の補修予算の下で、補修箇所に優先順位を付け、補修事業を実施するものである。各マネジメントレベルでは、それぞれのレベルにおけるPDCAサイクルを運用し、アセットマネジメント上の課題の解決やマネジメント技術の継続的な質的向上を図ることが必要となる。実施レベルにおける「Check」では、実際の維持補修活動を通して年度当初の計画どおりに事業が遂行されているかどうかを評価する。そして、実施レベルの評価を蓄積し戦略レベルの評価を、戦略レベルの評価を蓄積し構想レベルの評価が実施される。評価の結果は次の計画に適宜反映され、マネジメントの効率性、精度の向上が図られる。さらに、この継

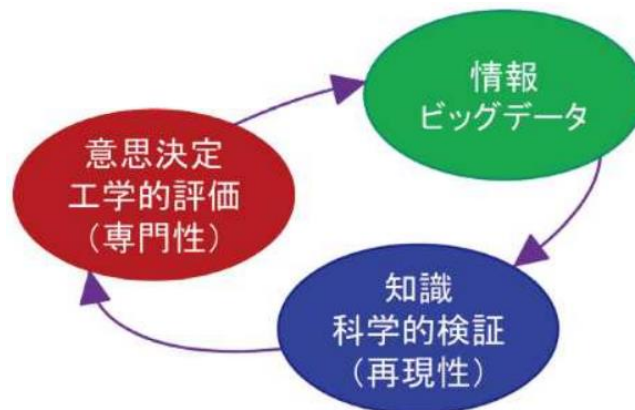


図-1.6 社会基盤マネジメントの概念¹⁸⁾

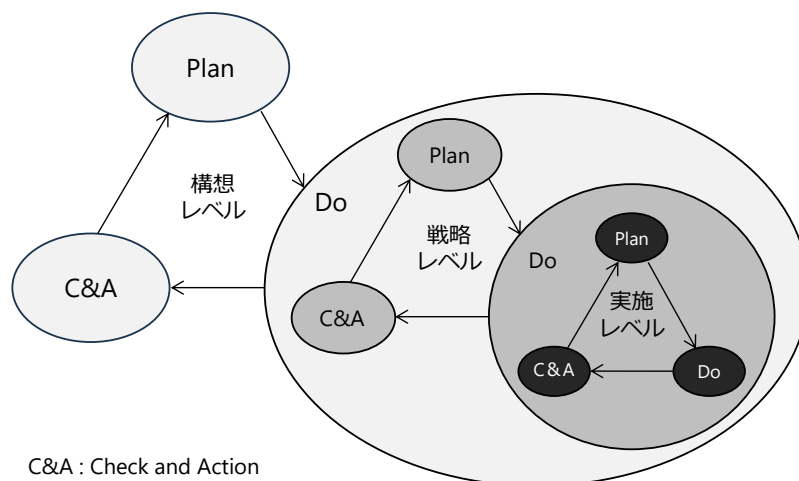


図-1.7 アセットマネジメントサイクル¹⁹⁾

継続的な維持管理サイクルのなかで得られた知見は、維持管理計画の見直しのみならず、新設（大規模な修繕を含む）構造物の計画や設計・施工に反映することも重要である。これらのアセットマネジメント活動の結果は必要に応じて外部に公開され、透明性を確保するとともに、説明責任を果たす役割を持つことになる¹⁹⁾。

1.3.2 高速道路舗装のビッグデータとマネジメント

(1) 路面性状に関するデータ

橋やトンネルに代表される構造物は、一般的に長期間（耐用年数 50 年以上）供用することを前提に建設される。一方、本研究で対象とする高速道路のアスファルト舗装は、構造設計で考慮する年数を 10 年という短期間に設定している。このことは、路面性状測定車の導入に大きく関係する。

表-1.1 補修目標値

ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI
20%	25mm	3.5mm/m

日本初の高速道路として名神高速道路の栗東 IC～尼崎 IC 間が 1963 年に開通した。以降の新規道の建設も順調に進み、1976 年度末には供用延長が 2,000km に達した。アスファルト舗装の設計年数 10 年を超えた区間が生じたこの時期から、舗装の維持管理の作業量が増大してきた。これを受け、合理的かつ体系的に舗装をマネジメントするために、適切に路面性状を評価する技術が求められた¹⁰⁾。路面性状の評価技術の要件として、1) 管理する全区間にわたり路面性状を定量的に評価できること、2) 測定のために車線規制等の交通規制を要しないこと、3) 多量の測定データを効率的に処理できることが検討された。そして、民間会社の協力を得ながら、東京道路エンジニア株式会社（現：中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京株式会社）により、JH グループ会社初の開発がすすめられ、1984 年に路面性状測定車 1 号車を製造し、1985 年に建設省の技術評価認定を受け、JH 内での測定に用いられた¹⁰⁾。以降、他のグループ会社でも路面性状測定車両が開発・導入され、現時点において NEXCO 西日本グループは 2 台の車両を保有している。NEXCO 西日本は、1～3 年間隔で路面性状調査を実施しており、これまでに獲得した情報量は、JH が民営化された 2005 年以降、NEXCO3 会社が共同で開発した舗装マネジメントシステム（以下、NEXCO-PMS）に保存されている調査データのみを対象にした場合でも、100m・車線を基本単位として約 2 百万件（NEXCO 西日本の調査データ）にのぼる。

路面性状に関するビックデータは、高速道路舗装マネジメントの実務のさまざまな場面で活用されている。例えば、NEXCO 西日本では、老朽化が進む高速道路を効果的にマネジメントするため、従前の業務量や費用という視点ではなく、実際に高速道路事業にもたらされる成果に観点をおき客観的な意思決定指標（アウトカム指標）によって事業計画を立案する手法を取り入れている。具体的なアウトカム指標として、路面性状に関し、快適走行路面率 98%を経営目標（2021 年～2025 年の中期経営計画）に掲げている。快適走行路面率の定義は「快適に走行できる舗装路面の車線延長比率」であり、総資産延長のうち舗装路面の状態から舗装補修が必要と判断される箇所を除いた延長の割合のことである。すなわち、路面性状値を表-1.1 に示す補修目標値（この値に達するまでに補修を行うことが望ましいとされている値）に照らし合わせ、高速道路ネットワークの舗装路面の状態を網羅的に数値化し、予算計画や補修計画を立案している。

膨大な路面性状データは、アセットマネジメント分野における研究の進展にも貢献している。近年の代表的な統計的劣化予測手法として、劣化の速度を定義するハザード率に、構造条件、環境条件、材料条件などの相違を説明変数として内包することが可能なマルコフ劣化ハザードモデル¹⁹⁾や、社会基盤施設の劣化ハザード率を確率分布で表現する混合マルコフ劣化ハザードモデル^{4), 20)}が開発され、路面性状データに適用した事例が数多く蓄積されている²¹⁾⁻²⁴⁾。

(2) 舗装構造の健全度に関するデータ

舗装構造の深層部の損傷状況を確認するため、各地で FWD (Falling Weight Deflectometer) 調査や開削調査が実施されている。FWD 調査で獲得した路面たわみ量は、表層種別、下層路盤種別、As 層厚を組合せ、舗装構造の健全度評価に用いられている²⁵⁾。この評価法は、アスファルト構造の変状を、A:アスファルト層全層の変状、B:表基層の変状、C:構造的には変状無し、に区分できる。NEXCO 西日本の現場実務者は、FWD 調査結果に開削調査やコア調査の情報を補完したうえで、深さ方向の補修断面を決定している。

FWD 調査のデータベースを用い、舗装構造の健全度に関する統計的劣化予測手法の研究事例も蓄積され始めている。大井ら²³⁾の研究では、高速道路上で定期的な実施した FWD 調査データを用いて、舗装耐荷力の劣化因子を特定するとともに、主要なカテゴリー(地域特性・路盤種別・As 層厚)ごとにパフォーマンスカーブを作成している。貝戸ら²⁶⁾の研究では、舗装構造の健全度の劣化予測と層別修繕効果の評価を行う方法論が提案されている。具体的には、舗装構造の耐荷力推移を劣化・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・直後の耐荷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である。これらの研究は、損傷の深層化が顕著となっている高速道路舗装マネジメントに対し、時宜を得た極めて有用な成果であり、舗装マネジメントの高度化に関する重要な情報を提供している。

1.3.3 損傷の深層化に対応した高速道路舗装マネジメント

舗装マネジメントには、ネットワークレベルとプロジェクトレベルの 2 つの取組みが存在する²⁷⁾。ネットワークレベルの取組みは、管理区域内のすべての舗装路面の平均的な供用性能を捉え、それが年数とともにどのように変化していくかを合理的に予測し、その平均供用性能を管理目標以上に保つために必要な最小費用を求めることにある。一方、プロジェクトレベルの取組みは、ある路線の対象区間の舗装の供用性能を管理基準以上に保つために、いつ、どのように修繕を行えば費用が最小になるかを求めることである。

従来、高速道路舗装の新設・改築では、 T_A 法に基づき、舗装が置かれている地域の環境・材料条件にかかわらず、一定のサービス水準を一律に確保するという考え方が採用されてきた。また、補修の段階では、表層・基層に生じた変状に対して補修を繰返すことで、舗装の健全性が維持できると考えられてきた。しかしながら、今後は、人的・財政的なリソースの制約の厳しさが増す中で、損傷の深層化といった舗装の老朽化に対応し、高速道路舗装の要求性能である安全・安心・快適な路面を持続的に提供しなければならない。そのためには、これまでの点検・調査で獲得してきた膨大な実測データの分析や、舗装構造の健全度を網羅的に把握できる新たな調査方法の開発を通じ、損傷の深層化の状態をネットワークレベルで定量的に評価する必要がある。また、プロジェクトレベルにおける補修箇所を選定や補修工法の選択にあたっては、現場の調査で得られた実測データに基づき、合理的根拠を有した意思決定を行わなければならない。

以上の問題意識のもと、本研究では、舗装の長寿命化による安全・安心・快適な高速道路舗装の持続的な提供を目的とし、各種データ連携や統計的劣化予測モデルなどのアセットマネジメントにおける要素技術を適材適所で実用に供し、地域の環境・材料条件を考慮した高度な高速道路舗装マネジメント手法を提案する。

1.4 本論文の構成

本論文は図-1.8 に示す 6 章からなり、その内容は以下のように要約される。

第 1 章は本論文の序論であり、社会基盤の老朽化が進む中、高速道路のアスファルト舗装においては損傷の深層化への対応が課題であることを述べ、本研究の必要性を明らかにする。また、各章の内容を簡単に記述している。

第 2 章では、各種モニタリング情報を有効活用し、損傷の深層化に対応した効率的な舗装修繕施策の方向性を提案する。舗装路面のモニタリングは、日常点検と路面性状調査に大別され、それぞれのデータは別々のシステムで管理されており、日常点検の情報が修繕計画に十分に活用されていない現状がある。そこで、日常点検・路面性状調査と舗装建設時の情報を、路線・キロポストといった位置情報を介して連携させた分析を実施する。その分析を通じ、路面から得られる情報を用いて舗装深層部の損傷状況を定量的に評価する方法を検討し、劣化状態に応じた修繕施策の策定手法や、As 層厚の重要性を考慮した修繕サイクルの長期化への方向性を考察する。

第 3 章では、舗装構造の健全度に関する情報を効率的かつ網羅的に把握し、マネジメントに反映するために、高速走行に対応した移動式たわみ測定装置の開発に向け、光切断法を用いた路面たわみ量測定手法の基礎的研究を行う。具体的には、荷重の載荷方法として、効果的な車軸と車輪の構成を FEM 解析により選定する。そして、車両制限令の一般的制限値を満足しつつ、選定した車軸と車輪の構成により、軸重 10t の載荷が可能で、車輪通過位置の路面形状を連続的に取得できる車両を試作する。さらに、実供用下の高速道路における試験測定を通して、本技術の実現可能性を言及する。

第 4 章では、舗装補修工事の実施にあたり、直近の路面性状調査データが不足する場合において、統計的劣化予測手法を用いた補修計画の支援方法を検討する。具体的には、舗装の補修を判断する路面の管理（性能）指標に対する補修目標値が連続値で運用されていることを考慮し、連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定する方法を採用する。この際、実務において使用されている膨大な路面性状調査データを用いた分析を行う。また、補修履歴の情報の欠損が、パフォーマンスカーブの推定結果に与える影響を考察する。

第 5 章では、地域条件で異なる舗装の劣化要因を的確に把握し、長寿命化施策へ反映する方法を検討する。具体的には、構造条件として As 層厚を採用し、地域の環境・材料条件として降雨特性と骨材のはく離抵抗性を定量化したうえで、高速道路舗装の劣化速度に与える影響を分析する。さらに、混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定パラメータを用いて、地域の環境・材料条件を考慮した舗装構造設計手法を提案する。

第 6 章は結論であり、前章までに得られた結果を統括し、本論文の成果とする。

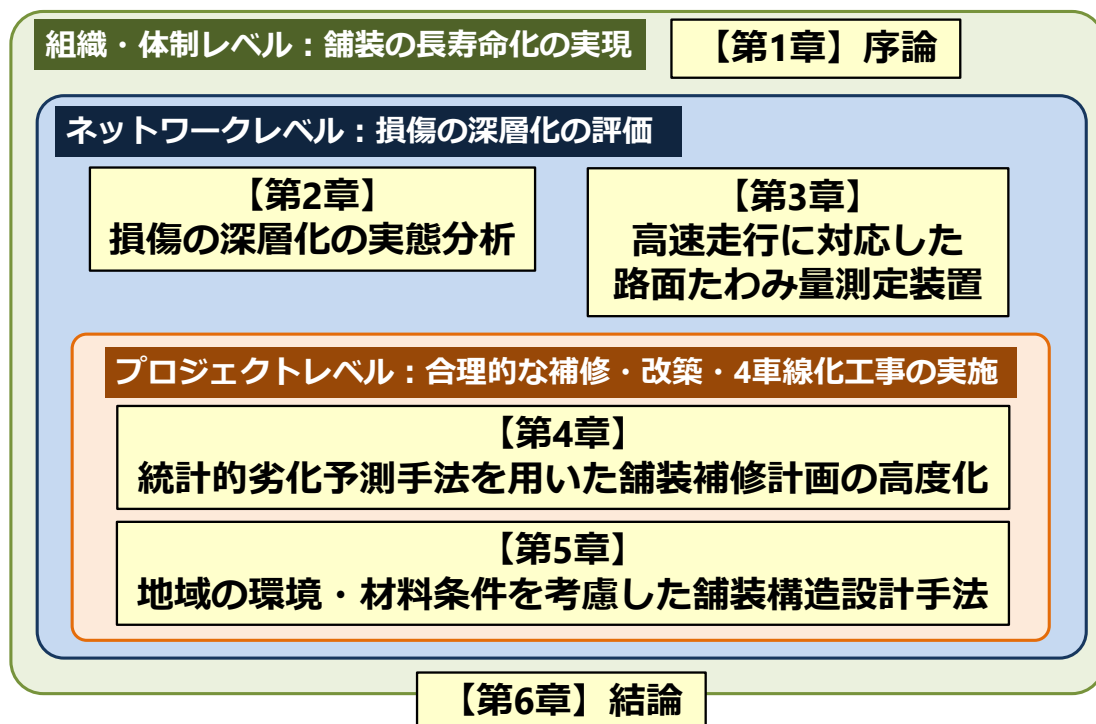


図-1.8 本論文の構成

注釈

注1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，高速道路資産の長期保全及び更新のあり方中間とりまとめ，2013.4.

注2) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，高速道路資産の長期保全及び更新のあり方中間とりまとめ，2023.1.

参考文献

- 1) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005 [Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. and Kobayashi, K.: Estimating Markovian Transition Probabilities for bridge deterioration forecasting, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.]
- 2) 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 Japan Society of Civil Engineers, Ser.A*, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.]
- 3) 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. [Kobayashi, K., Kumada, K., Sato, M., Iwasaki, Y. and Aoki, K.: A pavement deterioration forecasting model with reference to sample dropping, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.F*, Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.]
- 4) 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 bench-marking, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A*, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.]

- 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, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.72, No.1, pp.34-51, 2016.]
- 6) 小林潔司, 貝戸清之, 小濱健吾, 早矢仕廉太郎, 深谷渉: 事業効率性評価のための確率的劣化フロンティア分析, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016. [Kobayashi, K., Kaito, K., Obama, K., Hayashi, R. and Fukatani, W.: Stochastic deterioration frontier analysis for efficiency evaluation of management bodies, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016.]
- 7) 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方法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.2, pp.125-139, 2018. [Mizutani, D.: A disaggregative estimation method of Markov transition probabilities with discontinuous transition of condition states, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.74, No.2, pp.125-139, 2018.]
- 8) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.3 (舗装工学論文集第20巻), pp.I_93-I_101, 2015. [Takahashi, S., Ono, Y. and Sato, M.: Field survey to identify the important key factors for long term durability of asphalt pavement on expressways in Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.71, No.3 (Journal of Pavement Engineering, Vol.20), pp.I_93-I_101, 2015.]
- 9) 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: 設計要領, 第一集, 舗装建設編, 2023. [East Nippon Expressway Co., Ltd., Central Nippon Expressway Co., Ltd. and West Nippon Expressway Co., Ltd.: Sekkeiyoryo, No.1, Hosoukensetsuhen, 2023.]
- 10) 公益財団法人高速道路調査会: 高速道路の舗装技術史, 2022. [Express Highway Research Foundation of Japan, History of Express Highway Pavement Technologies]
- 11) 竹本恒行: 高速道路における排水性舗装の現況と課題, 土木学会論文集, No.484/

- V-22, pp.1-9, 1994. [Takemoto, T.: Some Aspects on The Pervious Macadam on The Expressway, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.484/V-22, pp.1-9, 1994.]
- 12) 本松資朗, 山本稔 : 高機能舗装の特性と舗装診断技術, 騒音制御, Vol.25, No.3, pp.122-128, 2001. [Motomatsu, S. and Yamamoto, M.: Specific Characters and Investigation Technology of Porous Pavement, *Journal of INCE/J*, Vol.25, No.3, pp.122-128, 2001.]
- 13) 黄木秀実, 上坂憲一, 本松資朗, 高橋茂樹 : 改質アスファルトの新たな性能評価手法と混合物性状の相関性について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 第 5 部門, V-045, 2002. [Ouki, H., Uesaka, K., Motomatsu, S. and Takahashi, S.: KaishitsuAsphalt no aratanaseinouhyoukasyuhouto kongoubutsuseijyouno soukanseinit suite, *Proceedings of the 57th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 5th Division, V-045, 2022.]
- 14) 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 : 設計要領, 第一集, 舗装保全編, 2023. [East Nippon Expressway Co., Ltd., Central Nippon Expressway Co., Ltd. and West Nippon Expressway Co., Ltd.: Sekkeiyoryo, No.1, Hosouhozenhen, 2023.]
- 15) 本松資朗, 神谷恵三, 松本大二郎, 山田優 : 既設基層混合物のはく離抵抗性の評価方法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 9 巻, pp.73-79, 2004. [Motomatsu, S., Kamiya, K., Matsumoto, D. and Yamada, Y.: Evaluation of stripping resistance for existing binder course mixture, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Journal of Pavement Engineering*), Vol. 9, pp.73-79, 2004.]
- 16) 株式会社高速道路総合技術研究所 : 長寿命舗装のつくり方, 2019. [Nippon Expressway Research Institute Company Limited: Choujumyouhosounotsukurikata, 2019.]
- 17) 小林潔司, 中谷昌一, 玉越隆史, 青木一也, 竹末直樹 : 実践道路アセットマネジメント入門ー継続的改善を実現するためのマネジメントの基本ー, コロナ社, 2019. [Kobayashi, K., Nakatani, S., Tamakoshi, T., Aoki, K. and Takesue, N.: Guidance on Practical Road Asset Management – Management Fundamentals to Achieve Continual Improvement -, Corona Publishing Company Limited, 2019.]
- 18) 貝戸清之 : 点検ビックデータ時代におけるインフラマネジメントーインフラの劣化

- 予測－，生産と技術，Vol.71，No.1，pp.101-103，2019. [Kaito, K.: Infrastructure Management based on Inspection Big Data – Focusing on Deterioration Prediction of Infrastructures -, *Manufacturing and Technology*, Vol.71, No.1, pp.101-103, 2019.]
- 19) 小林潔司：アセットマネジメント：課題と展望，計画行政，Vol.39，No.2，pp.27-32，2016. [Kobayashi, K.: Asset Management: Issues and Perspectives, *Planning and Public Management*, Vol.39, No.2, pp.27-32, 2016.]
- 20) 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., Obama, K.: Statistical mathematics for risk & asset management, Denkishoin Company Limited, 2019.]
- 21) 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，土木学会舗装工学論文集，第14巻，pp.229-237，2009. [Kumada, K., Eguchi, M., Aoki, K., Kaito, K. and Kobayashi, K.: A pavement deterioration forecasting model in expressways based on monitor data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Journal of Pavement Engineering*), Vol.14, pp.229-237, 2009.]
- 22) 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 (舗装工学)，Vol.67，No.2，pp.91-110，2011. [Mori, H., Fujiwara, E., Kaito, K., Kobayashi, K. and Hashimoto, T.: Investigating pavement structure deterioration with a relative evaluation model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.67, No.2, pp.91-110, 2011.]
- 23) 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 (舗装工学)，Vol.70，No.2，pp.11-25，2014. [Oi, A., Miyazaki, B., Obama, K., Kaito, K., Kobayashi, K. and Yamaguchi, K.: Deterioration prediction of expressway pavement with periodic FWD data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.70, No.2, pp.11-25, 2014.]
- 24) 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 (建設マネジメント)，Vol.71，No.3，pp.142-161，2015. [Miyazaki, B., Kato, H., Obama, K., Kaito,

- K., Kazato, T. and Tanaka, K.: A proposal for evaluation method of pavement repair policy based on enormous data of road surface conditions, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.F4 (Construction and Management)*, Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.]
- 25) 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. [East Nippon Expressway Co., Ltd., Central Nippon Expressway Co., Ltd. and West Nippon Expressway Co., Ltd.: Tyosayoryo, 2023.]
- 26) 貝戸清之, 小林潔司, 神谷恵三, 新雄成 : 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, 土木学会論文集, Vol.79, No.1, 22-00130, 2023. [Kaito, K., Kobayashi, K., Kamiya, K. and Nii, Y.: Evaluation of deflection recovery through stratified repair based on a deterioration and recovery process, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.79, No.1, 22-00130, 2023.]
- 27) 笠原篤 : 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.1-12, 1993. [Kasahara, A.: State of the art of pavement management systems, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.478/V-21, pp.1-12, 1993.]

第 2 章 損傷の深層化の実態分析

2.1 はじめに

西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 西日本）が管理する高速道路の約半数が供用から 30 年を超え、長期間の供用により高速道路舗装の大部分を占めるアスファルト舗装の老朽化が進行している。高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト¹⁾が発表されて以降、NEXCO 西日本管内においても各地で開削調査が実施されており、損傷が舗装構造の深い層まで進展していることが確認²⁾されている。これらの損傷形態は、アスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れや下層路盤の脆弱化であり、それに起因して路面にはポンピングや局所的な沈下（以下、局部変形）といった変状が生じている³⁾。このような深層に及ぶ損傷に対応しつつ、高速道路舗装の要求性能である安全・安心・快適な路面の提供を実現するためには、表基層の適時修繕や老朽化の進行を踏まえた路盤の再構築および補強により、舗装の長寿命化が可能となる効率的な舗装修繕施策を立案しなければならない。

NEXCO 西日本における現状の舗装マネジメントでは、日常的なマネジメントとして、1) 安全な道路交通を確保し第三者等への被害を未然に防止すること、2) 舗装の変状発生状況等を日常的に確認することを目的とした日常点検を実施している。日常点検では、主に高速道路本線内から確認できる範囲を対象として、車上目視および車上感覚により点検し、必要に応じて降車し変状の状態を確認している。日常点検の頻度は、交通量や地域特性から 2～3 日に 1 回を標準としている。また、日常点検とは別に、24 時間 365 日体制で高速道路をパトロールする交通管理隊は、交通管理において支障があるポットホールや局部変形などの舗装路面に関する変状を発見した場合、即時に土木系技術者に情報を共有している。これらの情報は、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（以下、NEXCO3 会社）が共同で開発した点検補修管理システム（以下、点検システム）に格納され、異常の発見からポットホールの穴埋めやひび割れ部のシール材注入といった維持補修の実施まで一元的に管理されている。中長期的なマネジメントとしては、路面性状調査を 1～3 年間隔で行い、その診断結果に基づき修繕計画を策定したうえで舗装補修工事を実施し、修繕された内容は NEXCO3 会社で共同開発した舗装マネジメントシステム（以下、NEXCO-PMS）に格納されている。このように、日常点検と路面性状調査の各データは異なるシステム上で管理されており、日常点検の情報が修繕計画に十分に生かされていないのが現状である。

以上の問題意識のもと，本研究では日常点検と路面性状の各データを活用した高速道路舗装の新たな修繕施策について検討した．本章は，これらの検討結果について報告する．具体的には，2.2 で，本章の概要と目的を述べ，2.3 で，データ連携の方法を示し，2.4 で，現状の路面管理の実態を整理する．そして，2.5 で，路面性状調査と日常点検のデータを連携した分析を通じ，舗装の劣化進行状態に応じた修繕施策の策定手法や，アスファルト層厚の重要性を踏まえた修繕サイクルの長期化への方向性を考察する．

2.2 本章の概要と目的

高速道路で標準的に採用しているポーラスアスファルト舗装（以下、高機能舗装Ⅰ型）には、ポンピングや局部変形といった従来の密粒度舗装とは異なる形態の変状が生じることが知られている。これらの変状は、従来の路面性状値の３要素（ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI（評価長 200m））で直接的に捉えることが困難であるとされており、新たな指標によるマネジメントが提案されている。宮崎らの研究³⁾では、これまでの高速道路の路面管理基準の代替的なものとして、評価長 10m、評価指標 IRI を用いることを提案し、実データに基づいた推計結果からその適用可能性について述べている。推計の結果は、評価長 10m、評価指標 IRI による評価が、現場管理者が経験的に獲得している実務的な感覚と整合が高いものであり、その補修要否判断の決定の際に重要な基準になり得る可能性があるとして報告している。江口らの研究⁴⁾では、わだち掘れ測定用に使用する横断プロファイルを、縦断方向に連続的に分布させた３次元点群データに変換し、この３次元化したプロファイルに対して標準偏差を算定することで、路面に生じるポンピングを検出できると報告している。しかし、これらの研究は、ポンピングや局部変形といった現象そのものを捉えるための新たな指標の創設といった観点で有用性が高いものの、それぞれの指標に対して舗装マネジメントを実践していくための計測頻度や補修目標値の設定などについて検討が必要であり、現時点において実用化に至っていない。このため、ポンピングや局部変形の形態を物理量として表すことができないものの、その発生状況や補修状況などは、それ以外の損傷事象とともに点検システムに経時的に把握・記録されていることから、日常点検データを分析し、舗装マネジメントに反映することが有用であると考えられる。

川村らの研究⁵⁾では、路面性状調査結果の報告様式に目視調査（日常点検）結果を追加した事例を示している。この工夫により、実務担当者は、路面性状調査の結果に基づき修繕が必要と判断される箇所と目視調査で変状が発見されている箇所の位置関係を同時に把握することが可能となる。そして、これらの箇所が近傍にある場合、路面の平坦性や施工の効率性を確保する観点を含めた修繕範囲を計画することが可能になると述べられている。しかし、舗装深層部の損傷が路面にポンピングや局部変形を引き起こし、それに伴い路面性状値が悪化する可能性を考慮すると、路面性状調査と目視調査の結果を組み合わせ、舗装深層部の損傷状況を定量的に評価するというアプローチが考えられるが、この事例では考察されていない。

本研究では、これまでに獲得されている路面性状調査と日常点検結果の各データおよび舗装建設時の情報を、路線・車線・キロポストといった位置情報で連携した分析を行う。この分析を通じ、近年における路面性能の実状と日常点検で確認される変状の傾向を整理し、舗装深層部の損傷の進展によってどのような事象が路面に生じてい

るのかを明らかにしていく．本研究の独創性は，路面から得られるこれらの情報を用い，舗装深層部の損傷状況を定量的に評価する方法を検討することにある．また，膨大なデータに基づき舗装深層部の損傷状況をネットワークレベルで区分することを試み，この損傷区分に応じた修繕施策についての考察を加える．さらに，路線の違いなどにより様々な舗装構造が存在していることから，舗装の損傷状況と舗装構造との関係を分析し，損傷抑制につながる施策の方向性を見出していく．これらのことは，舗装の損傷の深層化に対する修繕施策の改善に向けた有用な知見を示すものとする．

2.3 位置情報によるデータ連携

2.3.1 NEXCO-PMS の概要

NEXCO-PMS は、高速道路舗装の建設データおよび管理段階で発生する補修履歴データを効率的に蓄積するとともに、定期的に観測される路面性状測定データから現況の把握と将来の予測を行い、効率的な舗装修繕計画の策定を支援することを目的としたシステムである。NEXCO-PMS は、主に「舗装構成データベース（以下、DB）」と「路面性状 DB」で構成されている。舗装構成 DB は、道路名・車線名・キロポスト（以下、KP）などの位置情報、供用開始日・舗装種類・舗装厚さ・補修履歴などの舗装構成情報が記録されている。路面性状 DB は、路面性状調査で獲得された路面性状値が記録されている。NEXCO 西日本では、各地域や路線の特性を考慮し、1～3 年に 1 回の頻度で路面性状調査を実施しており、ひび割れ率・わだち掘れ量・IRI の値を定期的に獲得している。それぞれの評価長は、ひび割れ率およびわだち掘れ量は 100m、IRI は 200m を採用している。路面性状調査は、NEXCO 西日本の 4 支社（関西・中国・四国・九州）で年度単位の業務として実施され、その成果が路面性状 DB に記録されている。

2.3.2 点検システムの概要

点検システムは、点検の実施から点検記録の保存までといった一連の保全事業サイクルについて、点検および補修の記録を確実に蓄積し、構造物の状況把握、今後の点検調査や補修計画の立案、変状の進行・原因分析を行う基礎データを収集することを目的としたシステムである。点検システムは「点検実施情報 DB」で構成され、点検実施情報 DB には、道路名・車線名・KP などの位置情報、点検部位、点検日や点検者といった点検実施情報、変状の状態、変状の写真、判定結果、補修内容が記録されている。点検システムは NEXCO 西日本グループ全体で使用しており、日常点検や交通管理（パトロール）において発見された舗装に関するすべての情報が記録されている。

2.3.3 データ連携

NEXCO 西日本は、道路やインターチェンジ（以下、IC）やジャンクション（以下、JCT）といった資産情報ならびに上下線や走行・追越車線といった車線区分にコード番号を付与し、各システムや DB ではこれらのコード番号を共通で使用している。NEXCO-PMS 内の「舗装構成 DB」「路面性状 DB」、点検システム内の「点検実施情報 DB」の道路名・車線名・KP といった位置情報も共通のコード番号が付与されており、これらの情報をもとに図-2.1 に示す手順で 3 つの DB を連携させた。なお、本研究では、高速道路舗装の資産数として最も数量が多い土工部のアスファルト舗装を対象とした。

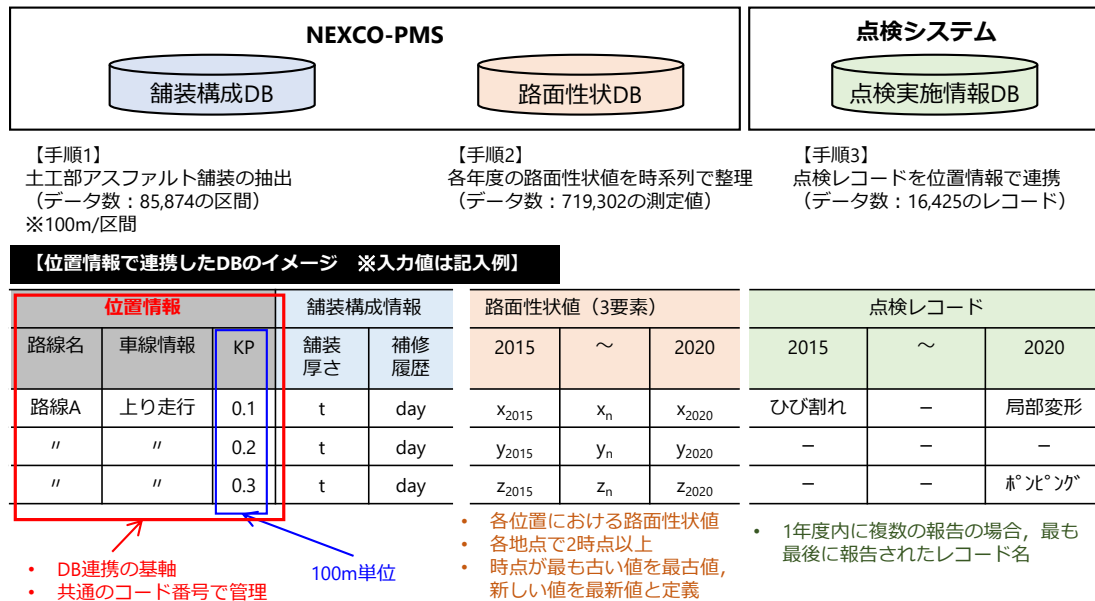


図-2.1 位置情報によるデータ連携

まず、舗装構成 DB から土工部アスファルト舗装の情報を抽出し、これを位置情報による DB 連携の基軸とした。路面性状 DB からは、各年度単位の路面性状値を抽出し、位置情報をもとに時系列的に整理した。なお、本研究では、現場における舗装マネジメントの実態から、位置情報データを 100m 単位（基本道路区間）で集約した。このため、200m の評価長で算出する IRI は、それを同値で 100m ごとに割当てることとした。

次に、点検実施情報 DB からは、同じく土工部アスファルト舗装で確認された変状のうち、「ひび割れ」「ポットホール」「わだち掘れ」「ポンピング」「局部変形」を抽出した。なお、近年の高速道路舗装の表層は高機能舗装 I 型になっており、「わだち掘れ」と報告される変状は局所的なものがほとんどであることから、本研究では「局部変形」と同一に扱うこととした。このようにして整理した点検実施情報について、位置情報により舗装構成、路面性状のデータと連携させ、次節以降の分析を行った。

2.4 路面管理の実態

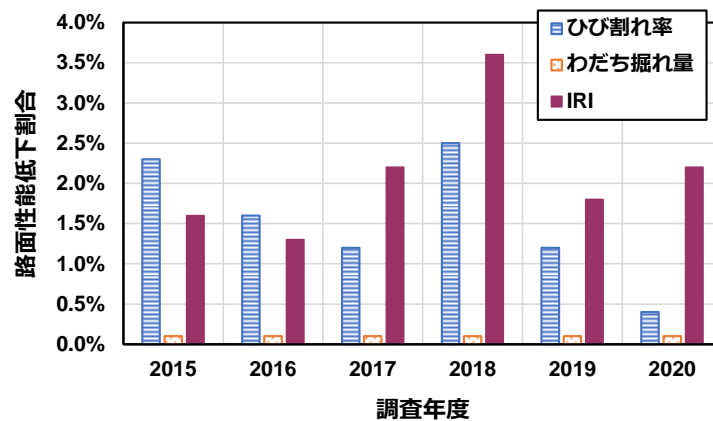
2.4.1 路面性能の実状

本項ではひび割れ率、わだち掘れ量、IRI の路面性状の 3 要素（以下、路面性能）の実状について分析する。データの対象期間は、NEXCO 西日本における路面性状調査の最大間隔である 3 年を考慮し、各地点において 2 回以上の調査データが獲得されている可能性が高い 6 年間として 2015 年～2020 年とする。図-2.2(a)は、各年度に獲得された路面性状値がその時点において、表-2.1 の補修目標値を超えている割合、つまり路面性能が低下している割合を示している。ここで、補修目標値とは、この値に達するまでに補修を行うことが望ましいとされている値である。近年、路面性能低下割合は、IRI が他の要素に比べて大きくなっている。図-2.2(b)は、2015 年～2020 年の間において同一地点で 2 回以上の調査データが獲得されている箇所を対象に、それぞれの箇所における最も古いデータと最も新しいデータを抽出し、それぞれのデータ群において算定した路面性能低下割合を比較している。同図からも、ひび割れ率やわだち掘れ量については経年による路面性能低下割合に目立った傾向は見受けられないが、IRI は増加している傾向である。

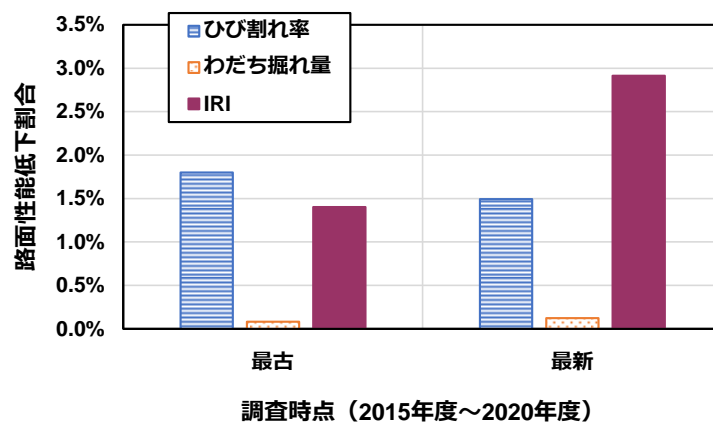
IRI 算定の入力値は縦断プロファイルであり、上下方向の変位が大きくなると IRI も大きくなる。その要因は様々であるが、老朽化等に伴う舗装深層部の損傷に起因したポンピングや局部変形が路面に生じた場合も IRI が大きくなる可能性が考えられる。したがって、IRI を良好に保ち、安全で快適な路面を持続的に提供するためには、ポンピングや局部変形の発生に関する情報が蓄積されている日常点検のデータと IRI を時系列的に整理した路面性状のデータを連携した分析を行い、舗装の劣化状況を評価する必要があると考えられる。なお、図-2.2 両図においてわだち掘れ量の割合が低く推移している理由としては、表層に高機能舗装 I 型などの耐流動性に優れた混合物を採用していることがあげられる。

2.4.2 日常点検で確認される変状の傾向

点検システムが本格的に運用開始された 2012 年以降のデータを対象に、近年における舗装路面の変状の傾向を分析する。図-2.3(a)は各年度における点検で発見された変状の報告数（以下、点検レコード数）の推移、図-2.3(b)は変状種別の比率を示している。なお、点検レコードは日常点検で変状を発見した際に登録される。例えば、その変状が軽微であり、変状の発見段階では状態監視と判断した後、その変状が進展した場合は点検レコードの内容が変更される（点検レコード数は増えない）。一方、点検レコードが登録された変状の補修が完了した後、同じ場所に変状が再発した場合は、新たに点検レコードを登録する（点検レコードの数は増える）。図-2.3 より、舗装に関す



(a) 各年度の路面性能低下割合



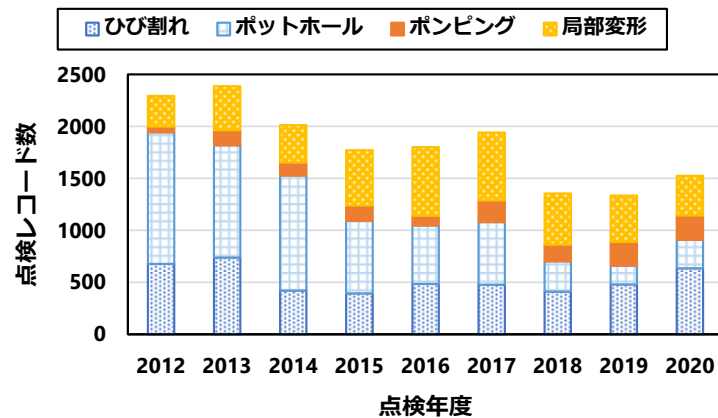
(b) 各測定箇所の最古値・最新値の比較

図-2.2 路面性能の傾向

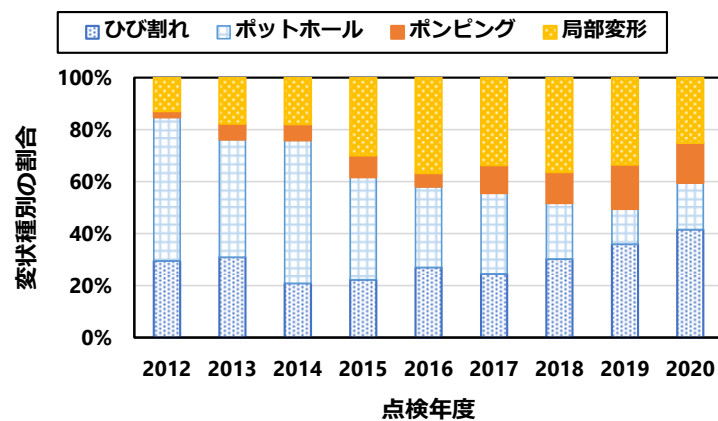
表-2.1 補修目標値

ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI
20%	25mm	3.5mm/m

る点検レコード数は経年的に減少している傾向が確認できる。特にポットホール の点検レコード数は、2012 年度は年間 1000 件以上であった状況から 2020 年度時点では年間 300 件程度になっている。NEXCO 西日本では、予算や交通規制の制約により現地レベルの調整はあるものの、路面にポットホールやポンピング等の変状が確認された場



(a) 各年度の点検レコード数



(b) 各年度の変状種別の割合

図-2.3 日常点検による変状の傾向

合（それらを応急的に処置した場合も含む），当該箇所を含む 100m・車線を修繕の対象にしている．この対応により，ポットホール等が発生したピンポイントの箇所は事後保全的な措置となるものの，その周辺はポットホールにつながる予備軍的な損傷が改善される．これが予防保全としての効果をもたらし，ポットホールの点検レコードを減少させる一要因として考えられる．一方で，路盤など深層部の損傷が疑われる¹⁾ポンピングと局部変形の点検レコード数は，年度によるばらつきがあるものの年間 600～700 件程度で推移している．

表-2.2 新名神（甲賀土山～草津）の舗装構成

舗装構成	区間A (土工延長8.9km)		区間B (土工延長10.1km)	
	各層厚さ (cm)	As層厚さ (cm)	各層厚さ (cm)	As層厚さ (cm)
表層	4	30	4	21
基層	6		6	
As b	20		11	
Cs b	15		19	

※Asb：アスファルト安定処理上層路盤

※Csb：セメント安定処理下層路盤

2.4.3 個別路線における分析

NEXCO 西日本が管理する新名神高速道路の甲賀土山 IC～草津 JCT 間は 2008 年に供用を開始し、建設時の舗装設計に基づき表-2.2 に示す 2 断面が採用されている。それぞれの区間における 2019 年の日平均大型車交通量は、区間 A：11,005 台/日・方向，区間 B：11,284 台/日・方向とほぼ同じであるにもかかわらず、それぞれの区間の舗装の損傷状況は大きく異なっており、区間 B ではアスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れや下層路盤の脆弱化といった深層におよぶ損傷が報告されている²⁾。

図-2.4 は、当該区間において日常点検データが整備されている 2012 年以降の点検レコード数の推移を示している。アスファルト層（表層，基層，アスファルト安定処理上層路盤）の合計厚さ（以下，As 層厚）が 30cm の区間 A は、2020 年までに切削オーバーレイ等の修繕工事は実施されていない。一方，As 層厚が 21cm の区間 B は、供用後 1～2 年が経過した段階で路面にポンピングや局部変形といった損傷が多発していた。これを受け区間 B では、2010 年より，As 層厚を 21cm から 24cm に改良する修繕工事が実施されており，その効果により，近年は点検レコード数を低く抑えることができる。図-2.5 は，それぞれの区間における路面性能の推移であり，図-2.5(a) がひび割れ率，図-2.5(b) が IRI である。ひび割れ率は，区間 A と区間 B の差は確認できない。一方，IRI の推移は，経年による変化がほとんど生じていない区間 A と異なり，区間 B では値が大きくなっている。

以上のとおり，深層部の損傷が実際に確認されている区間 B では，日常点検で報告される変状が多発し，路面性能では IRI が大きくなる傾向を確認した。なお，区間 B において，As 層厚の改良（21cm→24cm）の効果により，IRI の劣化進行が抑制や鈍化されるかなど，今後の傾向を見極めていく必要があると考える。

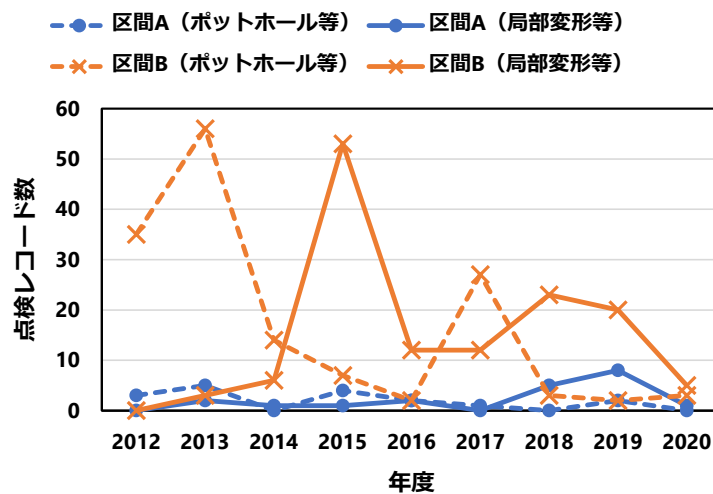
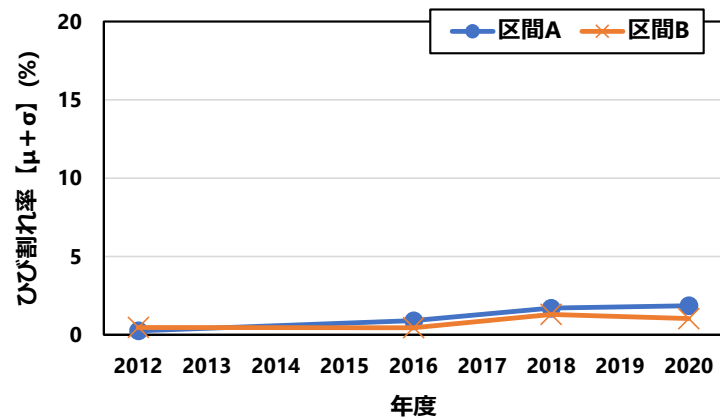


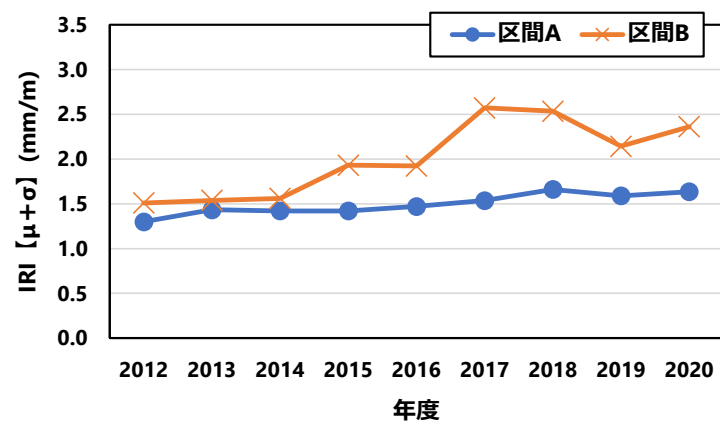
図-2.4 新名神（甲賀土山～草津）の点検レコードの推移

2.4.4 路面管理実態から見る損傷の深層化の影響

上記の分析結果から、高速道路舗装における深層部の損傷は舗装路面にポンピングや局部変形といったかたちで現れる。IRIはその局所的な変状を捉えることは困難であるが、変状の進展や補修・修繕の影響等、舗装マネジメントにおける重要な情報を捉えることができる可能性を有している。したがって、次節において、路面性状調査と日常点検のデータから、双方の路面変状の状況を組み合わせた分析を行い、舗装の劣化進行状態を評価する手法や、その評価を踏まえた修繕施策の策定手法を検討する。



(a) ひび割れ率



(b) IRI

図-2.5 新名神（甲賀土山～草津）の路面性能の推移

2.5 損傷の深層化を考慮した修繕施策の提案

2.5.1 劣化進行段階に応じた修繕施策の策定手法

図-2.6 は、各地点の IRI の最新値について支社ごとの平均値を算出した結果である。最も値が低かった A 支社を 1.0 としたときの比を示しており、D 支社と B 支社は 1.1 程度、C 支社は 1.3 程度と、現状の IRI 値は C 支社管内が最も大きいことがわかる。次に、図-2.7 は、各支社が管理する路線ごとに算定した IRI の進行速度を表す Δ IRI と日常点検による変状の発生状況を表す点検レコード密度の関係を示している。ここで、 Δ IRI とは、各地点における 2015 年～2020 年の間で測定された IRI について、最新値から最古値を減じ、その 2 値間の期間を年単位に換算した年数で除した値である。なお、最新値から最古値を減じた解がマイナスとなる地点（IRI が数値として改善している地点）のデータは除外している。また、点検レコード密度とは、同期間の 2015 年～2020 年で報告された点検レコード数を支社・路線単位で集計し、それを各路線の土工部の車線管理延長で除した値である。図-2.7 の各プロットの位置は、点検レコード密度も Δ IRI も小さい A 支社、点検レコード密度は小さいが Δ IRI は大きい B 支社と D 支社、点検レコード密度も Δ IRI も大きい C 支社というように、支社単位で大まかに区別できる。図-2.7 には上記の区別を点線で示しており、それぞれを状態 1、状態 2、状態 3 と表記した。このような舗装の劣化状態が地域によって異なるという傾向は、既往の文献^{6),7)}でも指摘されている。

舗装深層部の損傷に対応し、安全・安心・快適な高速道路舗装路面を持続的に提供するためには、予防保全型の管理を行い、舗装の長寿命化を図ることが必要である。舗装点検要領⁸⁾では「路盤以下の層の保護を通じた長寿命化」の重要性が示されており、表基層の適時修繕により路盤損傷の防止を図ることは、舗装の予防保全のひとつと考えることができる。これらのことから、舗装の修繕施策の策定にあたっては、路盤以下の状況を考慮した意思決定が必要であり、本研究では路面から得られる情報を用いて舗装深層部の損傷状況を評価する方法を検討する。具体的には図-2.6 と図-2.7 を組み合わせた分析である。まず、状態 1 の A 支社は、IRI の値が小さいうえにその増加傾向も見られず、かつ日常点検で報告される点検レコード数も少ない。したがって、状態 1 のエリアは舗装深層部が「健全」な状態にあると判断することができる。次に状態 2 の D、B 支社は、IRI の値はまだ小さく、日常点検で報告される点検レコード数も少ない。一方、 Δ IRI の値が大きく IRI が劣化傾向にあることから、深層部の損傷が徐々に進行している可能性が疑われる。つまり、状態 2 のエリアは、舗装深層部が「劣化進行段階」にあると考えることができる。最後に状態 3 の C 支社は、IRI の値が大きく、かつ日常点検において変状が多く報告されている。したがって、状態 3 のエリアは「劣化終局段階」と判断することができる。なお、状態 2 に区分した D 支社

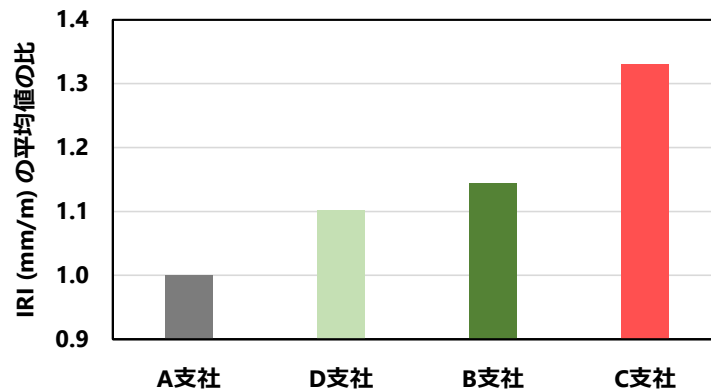


図-2.6 支社ごとの IRI の比較

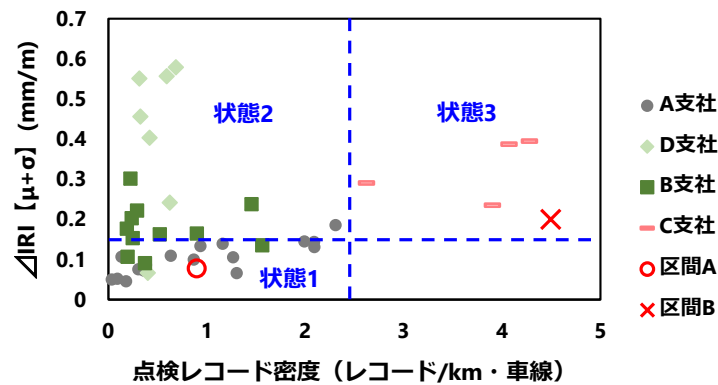


図-2.7 ΔIRI と点検レコード密度の関係

の一部の路線では、他の路線に比べΔIRIが大きく早期に状態3へ遷移する可能性が考えられることから、今後、当該路線の日常点検で報告される変状状況を注視する必要がある。また、図-2.7には2.4.3 個別路線における分析の対象とした新名神の区間Aと区間Bの値を併記した。As層厚が厚く舗装の状態が良い区間Aは状態1のエリアにプロットされた。一方、開削調査により舗装深層部の損傷が実際に確認されている区間Bは状態3のエリアにプロットされており、本研究の分析手法による舗装深層部の劣化状態区分と符合する。

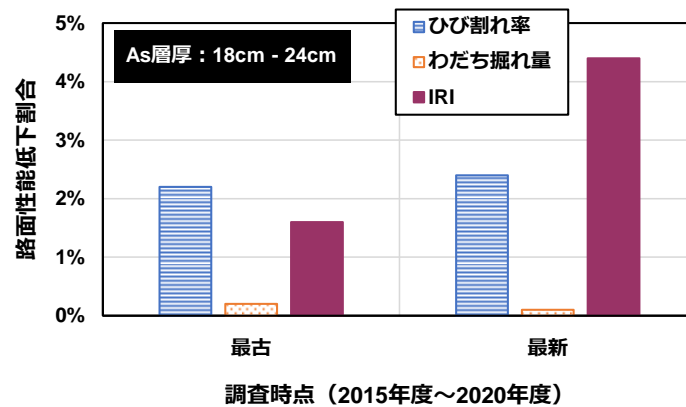
舗装深層部の損傷状況を上記のとおり捉えれば、これからの高速道路舗装の修繕施策を次のとおり考えることができる。まず、状態1のエリアは、継続して得られる路面性状調査データ、日常点検結果について本研究の分析手法等を活用し、舗装深層部において損傷発生の兆候が見られないか、経過観察していくことが望まれる。次に、状態2のエリアでは、路面性状調査で獲得される路面性能値のうち、これまで以上に

IRI を重要視する．つまり，予防保全型の管理を行い舗装の長寿命化を実現するためには，IRI 値に基づいた表基層の切削オーバーレイを実施し，舗装深層部の損傷を抑制することが必要である．また，例えば浸透型補修工法⁹⁾などを用いた既設舗装の延命を図る予防的維持を積極的に実施していくことも，取り得る施策の一つとして考えられる．最後に，状態 3 のエリアでは，道路管理者としてのリスク事象を起こさないように留意したうえで，日常点検で変状が発生した箇所に対応しつつ，ある程度の範囲（例えば現状と同等の 100m・車線）をまとめて修繕し路面の損傷を改善していくことで，ポットホールを含めた変状の発生の抑制につなげていく．この際，舗装深層部が損傷している可能性を踏まえ，深層部の打換え工を含めた計画を検討することも必要である．

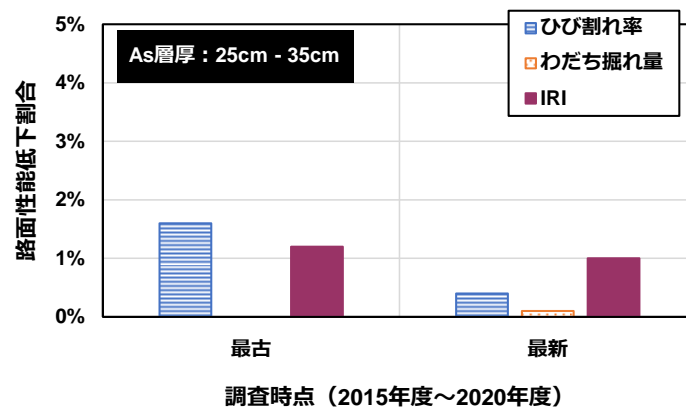
2.5.2 修繕サイクルの長期化に向けた一施策

舗装損傷の深層化に対応したマネジメント手法を検討するため，舗装の構造耐力に関連性が高いと考えられる As 層厚^{10), 11)}と路面性能の関係を分析した．図-2.8 は路面性能低下割合の傾向を As 層厚別で示しており，図-2.8(a)が As 層厚 18cm 以上 24cm 以下，図-2.8(b)が As 層厚 25cm 以上 35cm 以下の分析結果である．なお，As 層厚 18cm は高速道路における最低の As 層厚であり，24cm 以下と 25cm 以上の区分はそれぞれのグループのデータ数がほぼ同等になるように設定した．両図から，近年において路面性能低下割合が増加する傾向にあるのは，As 層厚が薄い箇所の IRI であることが確認できる．

図-2.9 は各地点の IRI の最新値と As 層厚の関係であり，IRI は As 層厚が厚くなるほど平均値とばらつきが小さくなる傾向となっている．この関係は，交通履歴も一要因と考えられることから，その影響について分析を試みる．図-2.10 は各地点の供用開始から 2019 年までの累積大型車交通量と As 層厚の関係であり，概しては正の傾向となった．これは，高速道路のアスファルト舗装の構造設計に採用している T_A 法では，設計交通量を考慮して As 層厚を設計しているため，それを反映しているものと考えられる．続いて，図-2.9 と同様に，As 層厚別のデータが広く分布している図-2.10 の青点線で囲む範囲（500 万台～1500 万台）と赤実線で囲む範囲（6000 万台～8000 万台）のデータを抽出し，IRI と As 層厚の関係を分析した結果を図-2.11 に示す．この分析においても IRI は As 層厚が厚くなるほど平均値とばらつきが小さくなる傾向である．これらのほか，亀山らの研究¹⁰⁾では，IRI の算定に含まれる縦断プロファイルの 0.8～1.6m の波長成分が，アスファルト混合物層の層厚に影響を受けることを報告していることから，IRI の劣化状況は交通履歴よりも As 層厚の影響が大きいことがうかがえる．なお，交通作用による IRI の劣化状況への影響等については，今後分析を行っていく予定である．

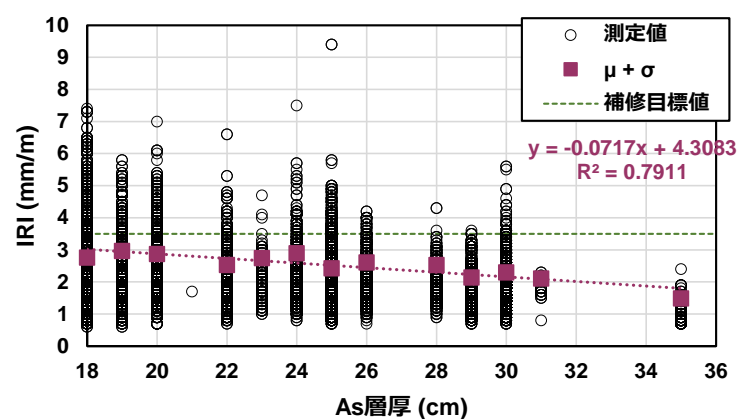


(a) As 層厚：18cm 以上 24cm 以下



(b) As 層厚：25cm 以上 35cm 以下

図-2.8 As 層厚の違いによる路面性能の比較



※異常値 (As層厚：20cm, IRI：15.2) を除外

図-2.9 IRI と As 層厚の関係

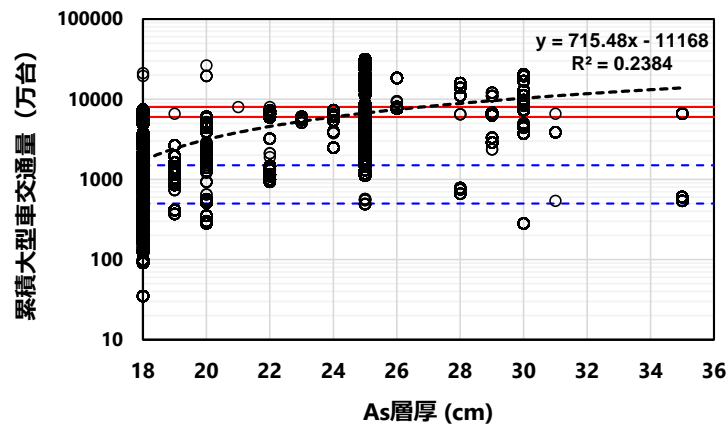


図-2.10 累積大型車交通量と As 層厚の関係

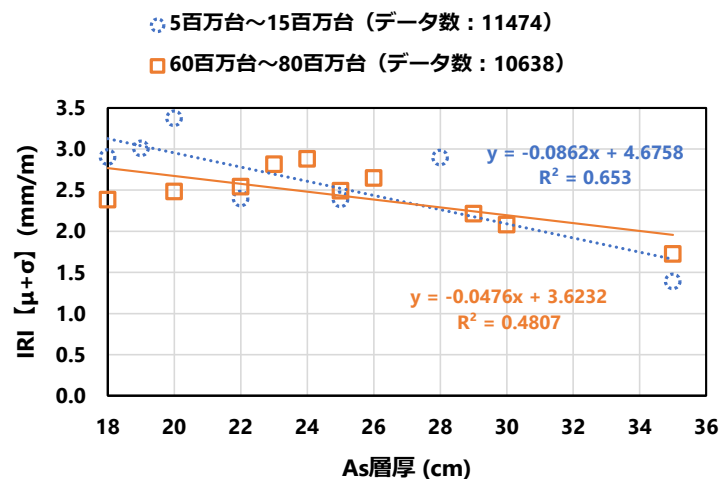


図-2.11 累積大型車交通量別の IRI と As 層厚の関係

図-2.12 は、変状レコードの有無による Δ IRI の傾向を As 層厚別に示している。ここで、変状レコード有りとは、図-2.1 に示したデータ連携において、2015 年～2020 年の間に日常点検で何らかの変状が報告された箇所のことをいう。なお、図-2.12 の凡例は、変状レコード有りのデータについて、舗装内部の変状が路面に現れていると考えられる「ポンピング」・「局部変形」のグループとそれ以外のグループに区分している。図-2.12 より、 Δ IRI は As 層厚が薄い箇所のほうが大きい値を示している。また、変状レコード無しの地点に比べ変状レコード有りの地点の Δ IRI の値が大きくなっており、変状レコード有り地点の比較では、ひび割れ・ポットホールグループに比べポ

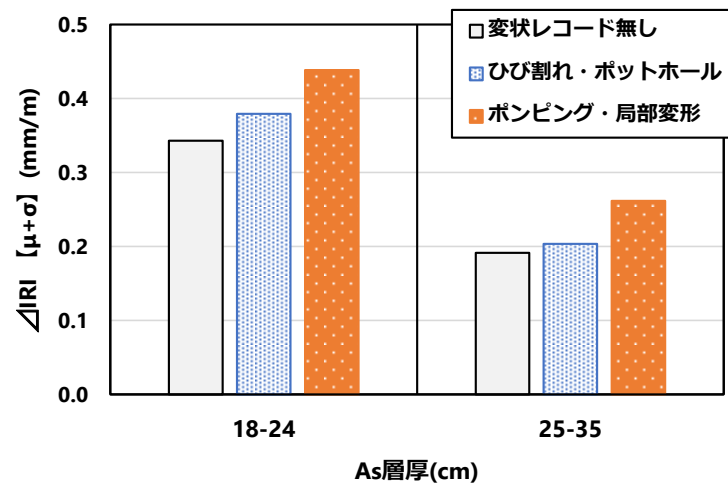


図-2.12 変状レコードの有無による ΔIRI の傾向

ンピング・局部変形のグループの方の値が大きくなっている。

以上の分析結果から、IRIの大きさとAs層厚の間には関係性が認められ、As層厚を厚くし舗装構造の強化を図ることによって、変状の発生を抑制し、長期的にIRIを良好な状態で保つことができると考えられる。

2.6 おわりに

本研究では、高速道路舗装の損傷が舗装構造の深い層まで進展していることを踏まえ、長寿命化が可能となる効率的な舗装修繕施策の立案として、これまで別々に管理されていた NEXCO-PMS と点検システムのデータを位置情報で連携した分析を行い、以下の知見を得た。

- ・ 近年の高速道路舗装では、路面性能のうち IRI の劣化が進行している。
- ・ 日常点検で報告される点検レコードは、ポットホールが経年的に減少している一方で、ポンピングや局部変形といった舗装構造の深層部の損傷が影響していると考えられる項目は、未だ多く報告されている。
- ・ 実際に深層部の損傷が確認されている新名神の事例では、路面には日常点検で報告される変状が多発し、路面性能では IRI の値が大きくなっている。
- ・ 以上のことから、IRI は舗装の損傷の深層化の進展を捉える可能性がある。
- ・ IRI の劣化進行性を表す \angle IRI と道路延長あたりの点検レコード数を表す点検レコード密度の関係をを用い、舗装深層部の損傷状況を「健全」、「劣化進行段階」、「劣化終局段階」に評価する方法を示した。
- ・ また、劣化状態に応じた予防保全の実施など、舗装の長寿命化に向けた修繕施策を示した。
- ・ 舗装の修繕サイクルの長期化に向けた施策として、舗装構造耐力と密接に関係している As 層厚を厚くすることの有効性を示した。

一方で、今後、高速道路舗装マネジメントのさらなる高度化に向けて、次のような課題があげられる。第 1 に IRI の劣化因子の特定があげられる。我が国の高速道路舗装において、アスファルト舗装の構造設計は主に T_A 法が用いられている。 T_A 法は、一定のサービス水準を維持できる寿命を舗装がおかれている地域・環境にかかわらず一律に確保することを目的とし、路床の設計 CBR と設計期間中の総通過 10ton 換算軸重から求まる T_A をもとに、舗装各層の厚さを決定する。しかし、舗装劣化の地域特性については、既往文献^{6),7)}においても指摘されており、本研究の実証分析においても地域（支社）ブロック単位で IRI の劣化状況が異なることを確認した。一方で、累積大型車交通量による IRI の劣化状況の違いは確認できなかった。これらのことから、地域特有の気象・風土などが舗装の寿命に与える影響や、交通作用に関しては実際の軸重の分布の影響を分析するなど、IRI の劣化因子を特定することで高速道路舗装マネジメントのさらなる高度化が期待できる。第 2 に、DB の入力データの精緻化である。本研究において NEXCO-PMS や点検システムに記録されているデータを調べたところ、舗装構成が登録されていない路線・区間があることや現実的には考えにくい舗装構成（厚さ）の入力値が散見された。また、点検システムにおいては多くの関係者がデータを

入力することから、川村ら⁵⁾も指摘しているとおり、例えば同じ変状であっても個人差により異なる種別が入力される可能性等が考えられた。今後、舗装マネジメント分野において DX を推進していくにあたり、DB に入力されるデータはすべての業務の根幹となる。したがって、例えば写真を撮影すると自動で変状内容が入力されるなど、AI 等の様々な技術を駆使して DB やフロントシステムを継続的に改善していく必要がある。第 3 には、路面性状測定車を用いた測定手法のように、舗装耐力を直接的かつ連続的に取得できる測定システムの開発があげられる。今後、例えば MWD¹²⁾のような装置を高速道路舗装にも適用できるシステムを開発し、日常点検・路面性状・構造耐力を効率的かつ一元的に管理できる舗装マネジメント手法を構築することが望ましい。

参考文献

- 1) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.3 (舗装工学論文集第 20 巻), pp.I_93-I_101, 2015. [Takahashi, S., Ono, Y. and Sato, M.: Field survey to identify the important key factors for long term durability of asphalt pavement on expressways in Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 71, No. 3 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 20), pp. I_93-I_101, 2015.]
- 2) 濱梶方希, 洲崎尚樹, 英恵司: 新名神高速道路の舗装損傷に関する開削調査結果, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, V-306, 2015. [Hamakaji, M., Susaki, N. and Hanabusa, K.: Shinmeishinkosokudorono hososonsyonikansuru kaisakutyousakekka, *Proceedings of the 70th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 5th Division, V-306, 2015.]
- 3) 宮崎文平, 風戸崇之, 濱梶方希, 小濱健吾, 貝戸清之: 高機能舗装を対象とした高速道路の路面管理基準に関する実証的研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.69, No.3 (舗装工学論文集第 18 巻), pp.I_175-I_183, 2013. [Miyazaki, B., Kazato, T., Hamakaji, M., Obama, K. and Kaito, K.: An empirical study of the road surface management criteria for porous asphalt pavement of expressway, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 69, No. 3 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 18), pp. I_175-I_183, 2013.]
- 4) 江口利幸, 川村彰, 富山和也, 高橋茂樹, 遠藤慶三: 横断プロファイルの 3 次元点群データ化による路面の変状評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.73, No.3 (舗装工学論文集第 22 巻), pp.I_71-I_78, 2017. [Eguchi, M., Kawamura, A., Tomiyama, K., Takahashi, S. and Endo, K.: A basic study on evaluation of spotted surface defects by a 3-dimension formulating system using transverse profile data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 73, No. 3 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 22), pp. I_71-I_78, 2017.]
- 5) 川村和将, 亀山修一, 伊倉雄弘: 高速道路における舗装の日常点検方法の改善および修繕計画への活用, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.75, No.2 (舗装工学論文集第 24 巻), pp.I_33-I_40, 2019. [Kawamura, K., Kameyama, S. and Igura, T.:

Improvement of daily inspection method of pavement on expressway and utilization to repair plan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 75, No. 2 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 24), pp. I_33-I_40, 2019.]

- 6) 佐藤正和, 貝戸清之, 小林潔司, 小濱健吾, 宮崎文平: T_A 法と舗装劣化寿命誤差, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.1, pp.1-18, 2015. [Sato, M., Kaito, K., Kobayashi, K., Obama, K. and Miyazaki, B.: T_A -method and pavement depreciation lifetime error, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 71, No. 1, pp. 1-18, 2015.]
- 7) 高橋茂樹, 加藤亮, 山口清人, 竹林宏樹: アスファルト舗装の破損実態を踏まえた新たな構造設計思想の提案, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.78, No.1, pp.52-69, 2022. [Takahashi, S., Kato, R., Yamaguchi, K., and Takebayashi, H.: Proposal for structural design of asphalt pavement based on the deterioration status in fields, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 78, No. 1, pp. 52-69, 2022.]
- 8) 国土交通省道路局, 「舗装点検要領」, 2016. [Road Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Hosotenkenyoryo*, 2016.]
- 9) 大原基憲, 本松資朗, 上坂憲一: 高機能舗装 I 型の予防保全型維持・修繕工法の開発 -浸透型補修材散布・注入工-, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, V-588, 2014. [Ohara, M., Motomatsu, S. and Uesaka, K.: *koukinoIgatano yobohozengataiji / syuzenkohono kaihatsu -sintogatahosyuzaisanpu / tyunyuko-*, *Proceedings of the 69th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 5th Division, V-588, 2014.]
- 10) 亀山修一, 川村彰, 早坂保則, 高橋守人, 笠原篤: PIARC 路面性状国際共通試験における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp. 119-129, 2001. [Kameyama, S., Kawamura, A., Hayasaka, Y., Takahashi, M. and Kasahara, A.: The relationship between longitudinal profile and bearing capacity of the pavement in the PIARC evenness experiment, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No. 683 / V-52, pp. 119-129, 2001.]
- 11) 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，第 13 卷，pp.171-178，2008. [Kamiya, K. and Kazato, T.: A study on damage evaluation of asphalt pavement in the Japanese expressways, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Journal of Pavement Engineering*), Vol. 13, pp. 171-178, 2008.]

- 12) 梅田隼，塚本真也，山口和郎，綾部孝之，寺田剛：移動式たわみ測定装置（MWD）のたわみ量解析手法の提案，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.77，No.2（舗装工学論文集第 26 巻），pp.I_179-I_187，2021. [Umeda, J., Tsukamoto, M., Yamaguchi, K., Ayabe, T. and Terada, M.: Proposal of new deflection analysis method using a moving wheel deflectometer (MWD), *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 77, No. 2 (*Journal of Pavement Engineering*, Vol. 26), pp. I_179-I_187, 2021.]

第3章 高速走行に対応した路面たわみ量測定装置

3.1 はじめに

西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 西日本）が管理する高速道路のアスファルト舗装において、舗装構造の深層部まで進展する深刻な損傷が確認¹⁾されている状況の中、高速道路舗装の安全な路面を持続的に提供するために、高速道路舗装マネジメントの高度化が求められている。第2章では、NEXCO 西日本が獲得している膨大な路面性状調査と日常点検のデータ連携から、IRI により損傷の深層化の進展を評価したうえで、今後の舗装マネジメントにおける長寿命化の方向性を提案した。これに対し、本章では、舗装構造健全度の情報をより直接的に評価できる手法を検討する。

NEXCO 西日本は、1～3 年間隔で路面性状調査を実施し、舗装の劣化管理指標としてひび割れ率、わだち掘れ量、IRI を獲得し、現況の舗装の劣化状態を把握するとともに、統計的劣化予測手法²⁾を用いて将来の劣化状態を予測したうえで、ネットワークレベルの修繕計画や中長期的な予算計画を立案している。各年度の舗装補修工事では、路面性状調査や日常（目視）点検の情報から修繕箇所を選定し、当該箇所に対して開削調査や FWD 調査を行い、修繕方法（深さ方向の補修断面の設計）を決定している。しかし、開削調査や FWD 調査は、1) 調査にあたって交通規制が必要となること、2) 調査に多大な時間と労力が必要となること、といった課題があることから、調査目的はプロジェクトレベルにおける補修深さの検討となっている。すなわち、深層部にまで損傷が進展していると考えられる道路区間だけが調査対象となり、調査結果の情報は限られた範囲でしか獲得できていない。今後、損傷の深層化が顕在化している高速道路舗装に対し、合理的なマネジメントを行うためには、舗装構造の健全度に関する情報を網羅的かつ大量に獲得し、ネットワークレベルのマネジメントに反映していく必要がある^{注1)}。

以上の問題意識のもと、本研究では、舗装構造の健全度を評価する一つの指標である路面たわみ量を、高速で移動しながら測定できる装置（以下、HSWD : High Speed Wheel Deflectometer）の技術開発について、基礎的な検討を行うことを目的とする。具体的には、路面に所定の輪荷重を載荷した際に生じるたわみ量を光切断法で測定する手法を検討する。以下、3.2 で本章の基本的な考え方を述べる。3.3 で予備検討の内容を説明し、3.4 では今回試作した HSWD の概要を報告する。そして、3.5 において、実供用下の高速道路本線上で実施した HSWD 試験測定結果と FWD 調査結果を比較し、HSWD による路面たわみ量測定手法について検討する。

3.2 本章の基本的な考え方

3.2.1 HSWD の必要性

高速道路舗装において、舗装構造の深層部の損傷が顕在化している状況を考慮すると、路面に関する劣化管理指標に加え、舗装構造の健全度に関する情報を取り入れたマネジメントの実践が必要となる。具体的には、図-3.1 に示すとおり、路面性状調査で獲得する 100m・車線を基本単位としたひび割れ率・わだち掘れ量・IRI のデータベースに、構造健全度に関する情報を追加し、ネットワークレベルの補修計画等に反映させることである。FWD 調査や開削調査は、多大な労力を要するとともに、健全度評価の情報は点評価となることから、図-3.1 を実現することは現実的に困難である。そこで、路面性状調査車両の運用と同様に、1) 管理する全区間にわたり、舗装構造の健全度に関する情報を定量的に獲得できること、2) 測定のために車線規制等の交通規制を要しないこと、3) 大量の測定データを効率的に処理できること、が可能となる HSWD の開発が急務である。

3.2.2 移動式たわみ測定装置

(1) 既存の測定技術

諸外国では、道路ネットワーク全体の舗装構造の健全度を把握することを目的に、移動しながら連続的に路面たわみ量を測定する試験機の開発が進められている³⁾。しかし、これらの機械を日本に導入するには、車両の寸法が車両制限令に抵触するなどの課題がある。

我が国においては、日本の道路を走行可能な大きさまで小型化すること、小型化に応じた適切な測定手法を構築することを目的として、移動式たわみ測定装置（MWD：Moving Wheel Deflectometer）の開発が進められている⁴⁾⁻⁶⁾。現行の MWD の測定システム⁶⁾では、輪荷重によって生じる路面のたわみ速度をドップラー振動計により計測し、ノイズを除去する演算を行い、路面たわみ量を算出する手法をとっている。MWD により実路面を測定した結果では、MWD 測定の再現性は非常に高く、FWD たわみ量ともよく一致すると報告されている。しかし、MWD の測定では速度依存性が認められないとしつつも、公開されているデータは時速 20～40km における試験結果であり、高速道路の測定に必要な速度域に関する精度は不明となっている。

(2) 高速道路舗装の測定に求められる技術

HSWD により、交通規制を実施せずに高速道路上を移動しながら測定するためには、時速 70～80km 程度での測定が可能となるシステムが必要である。また、HSWD の効率的な運用を踏まえると、測定車両は車両制限令の一般的制限値を満足し、測定に際

位置情報 (100m単位)	ひび割れ 率	わだち 掘れ量	IRI	構造 健全度
○.○kp	○%	○mm	○mm/m	●●●
△.△kp	△%	△mm	△mm/m	▲▲▲
□.□kp	□%	□mm	□mm/m	■ ■ ■

・ } 網羅的・
・ 膨大に

構造健全度の情報を追加

図-3.1 高速道路舗装マネジメントにおける構造健全度情報の追加

して特殊車両通行許可の申請を不要にする必要がある。さらに、高速道路の舗装構造設計では、舗装最小厚（表層から下層路盤までの合計厚さ）が 350mm に、アスファルト混合物層（表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤）の最小厚が 180mm にそれぞれ規定されている。そのため、一般道と比較して高速道路上で得られる路面たわみ量は小さくなると考えられ、HSWD では 0.2mm 程度の路面たわみ量を検出できる必要があると考えられる。

3.2.3 光切断法による路面たわみ量の測定

非接触で物体の形状を計測する手法は数多く存在し、その中で汎用的な方法の一つがレーザー変位計である。MWD 開発初期⁴⁾や諸外国の代表的な移動式たわみ測定装置である RWD : Rolling Wheel Deflectometer⁷⁾において、路面たわみ量の測定にレーザー変位計が用いられている。開発初期の MWD や RWD は、数個のレーザー変位計の測定値から路面のたわみ量を算出する手法を採用している。測定結果は、路面凹凸や車両振動の影響を受け、FWD 調査結果と高い相関性を得るためには 100m 程度の平均データを用いる必要があるとされている。しかし、路面たわみ量を算出する過程において、データの平均長を長くすると、短い距離の支持力低下区間があり、たわみが大きくなる場合であっても、当該部分のたわみは移動平均によって平滑化処理されてしまい、明確なトレンドが得られなくなる可能性が指摘されている⁵⁾。

一方、非接触で物体の形状を計測する手法には「光切断法」⁸⁾もある。光切断法の概念を図-3.2 に示す。光切断法は撮影対象物（路面）に対して真上から線状のレーザー光（以下、スリット光）を照射し、その反射光をカメラ（イメージングセンサ）で受光して撮影対象物の高さ情報（路面プロファイル）を取得する。光切断法の計測精度は、カメラとレーザーの性能、カメラとレーザーの相対的な位置関係などによって決定される。例えば、路面性状調査車両のわだち掘れ測定に実装されている光切断法では、わだち掘れ測定の必要性能が横断プロファイルメータによるわだち掘れ深さの測定値に

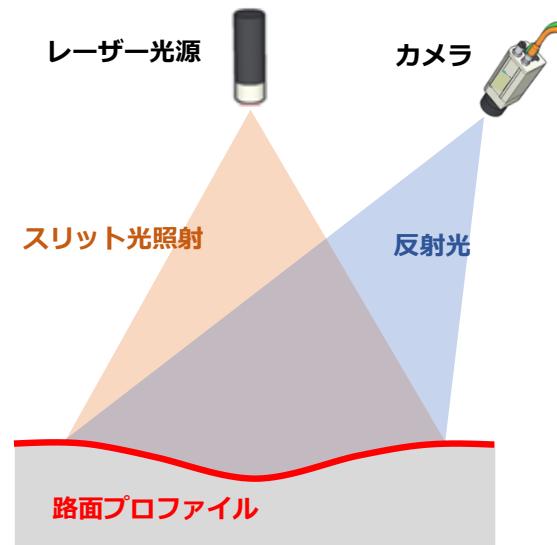


図-3.2 光切断法の概要

対し $\pm 3\text{mm}$ とされていることから、計測精度は mm 単位のレベルであると考えられる。一方で、錠剤の外観検査に光切断法を適用した事例⁹⁾では、 $10\mu\text{m}$ の計測精度が報告されている。このように、光切断法による形状計測の適用範囲は広く、路面たわみ量の測定に適したシステムを検討することが可能であると考えられる。

本研究では、路面に所定の輪荷重を載荷した際に生じるたわみ量を光切断法で測定する手法を検討する。光切断法の原理の最大の特長は、ある範囲の高精度な高さ情報を連続的に取得できることにある。このため、従来の数点のレーザー変位計を用いた測定手法に比べ、高さ情報の量が圧倒的に多くなり、路面たわみ量を求めるために様々な計算方法を検討することが可能となる。また、多くの路面性状調査車両において、路面の形状計測に光切断法が実装されている状況を鑑みると、光切断法の応用的な活用方法として路面たわみ量の測定方法を示すことは、我が国の舗装の点検・調査・診断技術の発展に貢献できるものと考えられる。

3.3 予備検討

3.3.1 荷重載荷方法の検討

舗装構造の健全度を評価するにあたり、指標となる路面たわみ量の大きさの範囲は広い方が望ましい。一般論として、ある荷重が載荷された際に生じる路面たわみ量は、載荷荷重の大きさに比例するものと考えられる。一方で、HSWD を効果的に運用するためには、HSWD の走行について特殊車両申請等の手続きが不要になるよう、車両寸法や重量を道路法に基づく車両制限の一般的制限値内に収めなければならない。以上を考慮し、本項では、HSWD を想定した車軸、タイヤ、荷重、走行速度の違いによる路面たわみ量の関係性を有限要素法（FEM）解析により検討する。なお、FEM 解析には、タイヤが舗装に載荷された際に生じる動的たわみの解析が可能な「SOLIDWORKS Simulation Premium（2018）」を使用した。

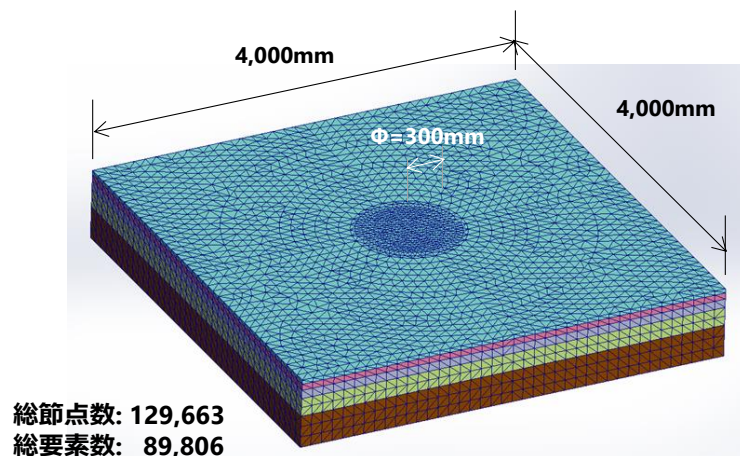
(1) 舗装モデルの検討

FEM 解析にあたり、図-3.3 に示す FWD 測定を模した舗装モデルを構築し、解析に用いるパラメータ値等を検討した。舗装構成は、高速道路舗装における最低舗装厚（350mm）とした。各層のパラメータは、筆者らの研究成果¹⁰⁾や一般値¹¹⁾により、健全な状態の舗装の値（20℃）として設定した。動的荷重条件は、円形等分布荷重を次式のとおり設定した。

$$F(t) = P_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi}{T}t\right) \quad (3.1)$$

ここに、 $F(t)$ ：時刻 t における載荷荷重、 P_{\max} ：ピーク荷重（49kN）、 T ：ライズタイム（15msec）である。動的解析における減衰モデルは、参考文献¹²⁾よりフォークトモデルを採用し、質量係数 $\alpha=0$ 、剛性係数 $\beta=0.01$ を採用した。

舗装モデルの FEM 解析の結果を図-3.4 に示す。凡例は、たわみ量の発生位置と荷重を示している。載荷点直下（位置：0mm）におけるたわみのピーク値は 0.2507mm となった。図-3.3 に示す条件で 49kN の荷重を載荷した際の載荷点の変形量を、多層弾性理論による舗装構造解析ソフトである GAMES：General Analysis of Multi-layered Elastic Systems¹³⁾で求めると 0.2869mm となり、今回の FEM 解析結果と近似している。また、載荷荷重のピークと各センサー位置の路面たわみ量のピークがあらわれる時間の位相差は 0.006 秒であり、参考文献¹⁴⁾で示された位相差 0.007 秒（グラフ読み取り値）と同程度であることから、妥当な結果と考えられる。以上のとおり、本研究の FEM 解析の舗装モデルは妥当性を有していると考えられる。



構成	厚さ (mm)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
表層	40	4,012	0.35
基層	60	9,991	0.35
アスファルト安定処理路盤	80	9,121	0.35
セメント安定処理路盤	170	3,000	0.20
路床	300	80	0.35

図-3.3 舗装モデル

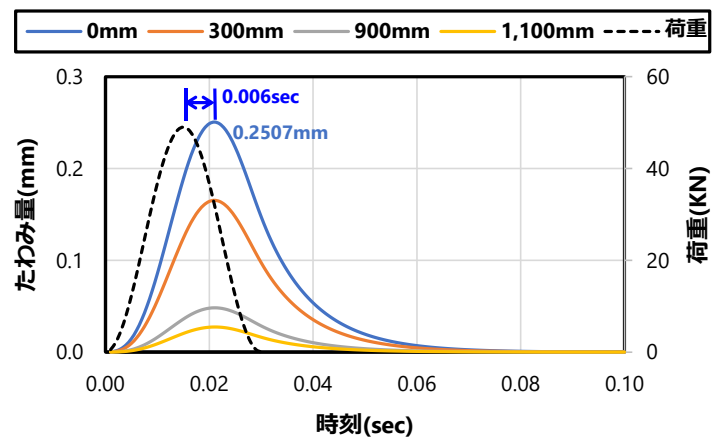


図-3.4 舗装モデルの FEM 解析結果



図-3.5 動的 FEM 解析モデル

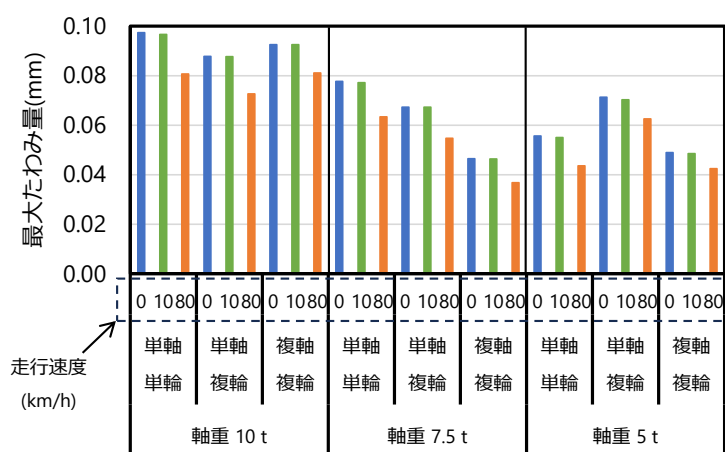


図-3.6 動的 FEM 解析結果

(2) 荷重載荷方法と路面たわみ量の関係

構築した舗装モデル上において、荷重（軸重）の大きさ、車軸とタイヤの配置、走行速度をパラメータにした動的 FEM 解析を行い、路面たわみ量との関係を分析した。解析のパターンは、1) 軸重：10t, 7.5t, 5t, 2) 車軸とタイヤの配置：単軸単輪，単軸複輪，複軸複輪，3) 走行速度：0km/h, 10km/h, 80km/h の 27 パターン（3×3×3）とした。解析に用いたタイヤサイズは、最大負荷能力を考慮し、軸重 10t で単軸単輪パターンは 435/45R22.5，軸重 7.5t で単軸単輪パターンは 315/70R22.5，その他のパターンは 275/70R22.5 とした。なお、タイヤは複雑な構造を有しているが、過去の経験から、解析におけるタイヤのヤング率は 5MPa を採用した。

解析モデルを図-3.5 に、解析結果を図-3.6 に示す。今回の解析結果は、すべてのパターンにおいて、最大たわみ量は 0.1mm よりも小さくなっている。軸重の大きさでは、軸重が大きいほうが最大たわみ量が大きくなっている。車軸とタイヤの配置の違いに

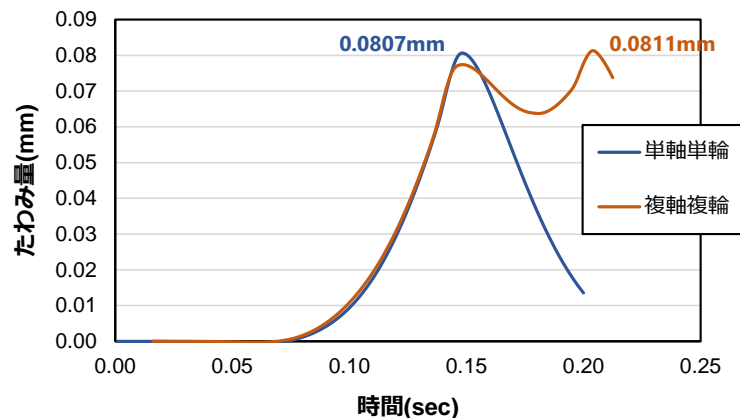


図-3.7 たわみ量の時刻歴応答（軸重 10t，走行速度 80km/h）

よる最大たわみ量の大小は，軸重の大きさにより傾向が異なっており，軸重 10t の場合の最大たわみ量は単軸単輪≒複軸複輪>単軸複輪となっている．走行速度では，静止状態（0km/h）ならびに低速（10km/h）に比べ，高速（80km/h）の最大たわみ量は小さくなっている．なお，動的荷重の載荷により発生するたわみの影響範囲は，載荷点から $\pm 1,100\text{mm}$ （ $L=2,200\text{mm}$ ）であった．

今回の動的 FEM 解析では，荷重載荷時に時刻歴に応じてタイヤに変位が生じ，解析が複雑化し，たわみ量の計算が収束しなかった．このため，タイヤの変位量を静的な条件で求め，タイヤの変位量が一定となるように解析を実施した．このような荷重の載荷条件が，FWD モデルに対して動的 FEM 解析で得られたたわみ量が小さくなっている原因として考えられる．しかし，軸重が大きくなるにつれて発生たわみ量が大きくなること，載荷速度が速くなるにつれて発生たわみ量が小さくなることは，概ね実務者の経験に沿うものであり，載荷方法の違いによる相対的な評価には適用できるものとする．

図-3.7 は，軸重 10t・走行速度 80km/h における車軸とタイヤの配置の違いによるたわみ量の時刻歴応答を示している．最大たわみ量の比較では，単軸単輪が 0.0807mm，複軸複輪が 0.0811mm となっている．複軸複輪のたわみ量が大きくなっている要因は，前軸の荷重載荷により発生した路面のたわみが復元する前に後軸の荷重が作用し，路面たわみ量が増幅しているものと推測する．しかし，その差は 0.0004mm と極めて小さい．単軸単輪と複軸複輪の構造を考慮すると，1) 複軸複輪に比べ単軸単輪ほうが明らかに構造がシンプルで測定装置が簡便になること，2) 路面の状態や走行時の振動等の影響により，複軸複輪の路面たわみ量の増幅には誤差が生じると考えられる．以上から，HSWD における荷重の載荷方法は，軸重 10t，単軸単輪方式を採用する．

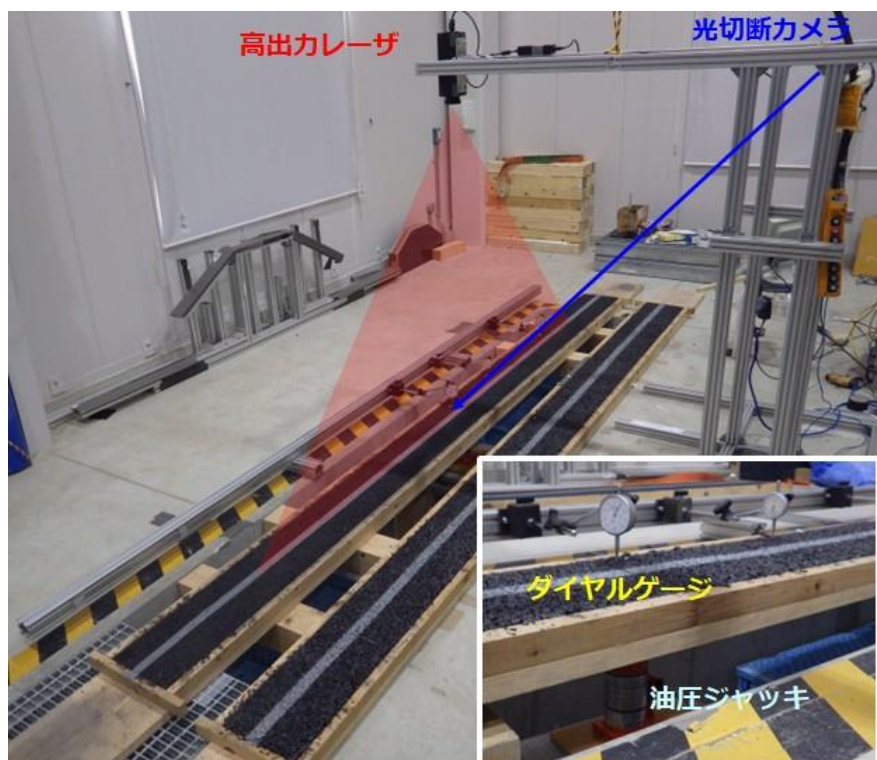


図-3.8 たわみ形状計測精度確認の実験状況

3.3.2 たわみ形状計測精度の確認

前項の解析結果のとおり，健全な状態を想定した高速道路舗装に，単軸単輪で構成される HSWD で軸重 10t を走行速度 80km/h で載荷した場合，路面に生じるたわみ量は 0.1mm 程度と算定された．そこで本項では，光切断法によるたわみ形状計測が，0.1mm 程度の精度を有しているかを実験的に確認する．

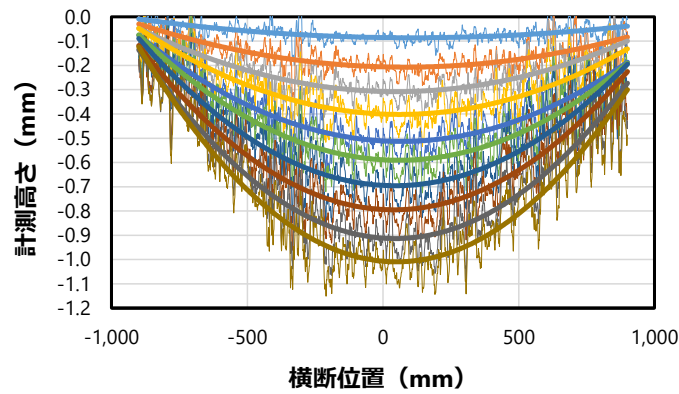
実験状況を図-3.8 に示す．実験に使用した試験体の寸法は，4,000×250mm とした．合材の種類は，高速道路に標準的に使用されているポーラスアスファルト舗装（以下，高機能舗装Ⅰ型）と，その比較として密粒度舗装（以下，密粒）とした．試験体の作製は，所定の寸法の木製の型枠を準備し，その中に合材を舗設し，仕上げとしてプレートで表面を転圧した．なお，新設のアスファルト舗装面はアスファルトの油分が多く，その影響により光切断法のスリット光が散乱することから，供用中のアスファルト舗装面を模擬するために灰色艶消し塗装を施した．作製した試験体は，長手方向の端部を架かりで，中央部をジャッキで支持することが可能な開口部に設置した．実験では，まず，レベル（路面たわみ量 0mm）となるように，中央部および中央から 430mm の位置に設置したダイヤルゲージの変位量が 0mm となるようにジャッキで調整した．次に，中央部の変位量が 1.0mm となるようにジャッキを除荷した状態において，光切断

法によるたわみ形状計測を行った。その後、中央部の変位量を 0.1mm ずつ変化させ（ジャッキを載荷）、光切断法によりたわみ形状を計測した。なお、既往研究^{4)~6)}でも課題とされているとおり、HSWD を用いた実路での測定では、車両の走行に伴う振動や車体の傾きなどのノイズが発生する。しかし、本予備実験では、まずは測定条件が最も良好である静止状態において光切断法によるたわみ形状計測精度を確認し、HSWD の測定に対する適用可能性を検討することとした。

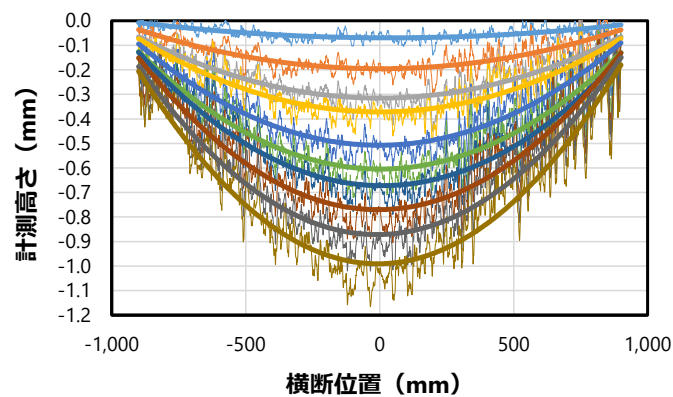
実験結果を表-3.1 および図-3.9 に示す。表-3.1 から、ダイヤルゲージの読み値と光切断法による計測値の誤差の標準偏差は、中央部で高機能舗装 I 型：0.015mm、密粒：0.025mm、中央から 430mm 離れた位置で高機能舗装 I 型：0.043mm、密粒：0.052mm となった。中央部に比べて 430mm 離れた位置の誤差が大きくなった原因は、光切断法の横断方向の計測位置は画像のピクセル量で管理しており、中央部のたわみ量が大きくなると、実計測とピクセル量管理で横断位置にずれが生じていることが考えられる。図-3.9 は、光切断法で得た高さのプロファイルデータとそれらを 2 次式で近似したたわみ曲線であり、図-3.9(a)が高機能舗装 I 型、図-3.9(b)が密粒の計測結果である。着色線の違いは中央部（横断位置 0mm）のダイヤルゲージの読み値（0.1mm 間隔）である。なお、本予備検討では、前述の FEM 解析で得られたたわみの影響範囲である中央部から $\pm 1,100\text{mm}$ （ $L=2,200\text{mm}$ ）の高さデータを光切断法で取得したが、実験中に供試体が落下する恐れがあり、中央部から $\pm 900\text{mm}$ の位置で栈木により供試体を固定したことから、図-3.9 の計測結果は中央部から $\pm 900\text{mm}$ までの範囲を示している。図-3.9 から、光切断法で得られる高さデータは、中央部から離れた位置においてもたわみ量に応じたたわみ曲線が再現できていることが確認できる。以上の検討結果から、光切断法によるたわみ形状計測において、0.1mm 程度の精度を有していると判断できる。また、舗装種別の影響については、高機能舗装 I 型と密粒で計測結果に大差はなく、光切断法によるたわみ形状計測は、アスファルト舗装の合材種別に関係なく適用可能と判断できる。

表-3.1 たわみ形状計測精度の確認結果

舗装種別	高機能舗装 I 型						密粒					
確認位置	中央			中央から430mm			中央			中央から430mm		
測定種別	ゲージ	光切断	誤差	ゲージ	光切断	誤差	ゲージ	光切断	誤差	ゲージ	光切断	誤差
測定値 (mm)	0.10	0.07	-0.03	0.05	0.04	-0.01	0.10	0.04	-0.06	0.07	0.05	-0.02
	0.20	0.17	-0.03	0.14	0.13	-0.01	0.20	0.18	-0.02	0.15	0.15	0.00
	0.30	0.28	-0.02	0.19	0.20	0.01	0.30	0.30	0.00	0.24	0.23	-0.01
	0.40	0.36	-0.04	0.27	0.25	-0.02	0.40	0.36	-0.04	0.31	0.27	-0.04
	0.50	0.49	-0.01	0.34	0.31	-0.03	0.50	0.51	0.01	0.39	0.37	-0.02
	0.60	0.56	-0.04	0.40	0.36	-0.04	0.60	0.59	-0.01	0.46	0.49	0.03
	0.70	0.68	-0.02	0.47	0.44	-0.03	0.70	0.66	-0.04	0.53	0.56	0.03
	0.80	0.77	-0.03	0.54	0.54	0.00	0.80	0.77	-0.03	0.59	0.67	0.08
	0.90	0.89	-0.01	0.60	0.67	0.07	0.90	0.88	-0.02	0.67	0.77	0.10
	1.00	1.01	0.01	0.67	0.76	0.09	1.00	1.02	0.02	0.75	0.85	0.10
誤差の標準偏差	0.015			0.043			0.025			0.052		



(a) 高機能舗装 I 型



(b) 密粒

図-3.9 たわみ形状計測結果

(着色線の違いは横断位置 0mm のダイヤルゲージの読み値 (0.1mm 間隔))

3.4 実走行を想定した測定車両の製作

3.4.1 測定車両の検討

HSWD 測定車両の設計条件や予備検討の結果，各種計測機器・解析 PC などを搭載するスペースなどを考慮すると，HSWD 測定車両は大型車となり，候補として 1) 車両一体型，2) 牽引型があげられる．1) 車両一体型（MWD は車両一体型）の場合，後軸が駆動軸となりディファレンシャルギアが搭載される．HSWD では，軸重 10t の荷重調整を後軸で行うこととなり，同じく後軸で光切断法により路面たわみ量を測定するシステムとなる．この時，ディファレンシャルギアにより光切断法の視野が確保しづらくなる．一方，2) 牽引型のうち我が国で一般的なセミトレーラーは，設計の自由度が高く，軸重の調整も容易になる．また，今後の開発において，様々な計器類を必要に応じて拡張することが可能となる．さらに，トレーラーヘッドを切り離すことで測定車両の保管性も向上する．以上の理由から，HSWD の測定車両はセミトレーラーをベースに製作することにした．

本研究で製作した HSWD の外観を写真-3.1 に示す．車両検査証において，車両の寸法（トレーラーヘッドを含む）は，長さ：805cm，幅：249cm，高さ 345cm であり，重量（トレーラーヘッドを含む）は，車両総重量：12,550kg，後後軸重 9,970kg である．このように，各値は車両制限令の一般的制限値内となっていることから，HSWD の運用にあたり特車申請は不要である．また，ウェイト調整により軸重 10t の載荷が可能となり，軸重の検査値は 9,970kg と 10t に近似している．トレーラーヘッドと HSWD 測定車両（セミトレーラー）の連結は，コンテナトレーラーなどで汎用的に採用されている形式にした．HSWD の架装部はトレーラーのシャシに剛結し，測定時に架装部とトレーラー部にねじれが生じにくくするようにした．

HSWD の完成系は，従来の路面性状値（ひび割れ率・わだち掘れ量・IRI）と路面たわみ量を同時に取得することを目指している．そのため，写真-3.1 に示す A 部には路面たわみ量の測定ユニット，B 部には路面性状測定ユニット（ひび割れ率・わだち掘れ量）を設置できるように製作した．また，C 部の位置にはレーザー変位計を設置できるようにしてあり，この計測値から IRI を算定することが可能となる．そのほか，HSWD には，位置情報計測機器，距離車速計測機器，測定ユニット制御パソコン，発電機を搭載する．

3.4.2 測定システムの検討

従来，主にわだち掘れ量の測定として路面性状調査車両に実装されている光切断法のユニットは，道路横断方向にスリット光を照査している．これに対し，HSWD の路面たわみ量測定は車線縦断方向に行うこととし，舗装構造の健全度に関する情報を連



写真-3.1 試作した HSWD の外観

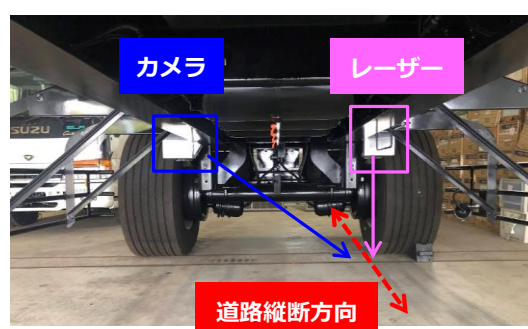


写真-3.2 道路縦断方向の計測（車体の前方から後方に向けて撮影）

続的に取得できるようにした．光切断法を用い，道路縦断方向のたわみ形状を計測する場合，写真-3.2 に示すとおり，例えば OWP の測定では，OWP のタイヤ内側にスリット光を真上から照射し，それを対角の IWP 側からカメラで撮影することになる．

HSWD 測定では，タイヤ直下のたわみ量が特に重要な意味を持つことになることから，タイヤ中心の直上に光切断法のユニットの中心を配置することが合理的である．しかし，この際，車軸，サスペンション，フェンダー，ブレーキ等がカメラの視野を塞ぐこととなる．そこで，カメラの視野を確保するために，ブレーキとサスペンションの配管を車軸に固定するなどの工夫を施したが，予備検討で把握したたわみの影響範囲であるタイヤ中心 $\pm 1,100\text{mm}$ ($L=2,200\text{mm}$) の範囲を 1 台のカメラで測定することは困難であった．したがって，図-3.10 に示すとおり，光切断の測定ユニットを（前）ユニットと（後）ユニットに分割し，2 台のカメラを用いて車両の附属物が視野に入らないようにしたうえで，たわみ形状を取得することとした．このとき，機器取付の都合上から，光切断法の測定範囲は，たわみの影響範囲をカバーできるように $\pm 1,225\text{mm}$ ($L=2,450\text{mm}$) とした．この場合でも，光切断ユニットの中心からタイヤ直下までの距離は 612mm であり，予備検討の結果（図-3.9）から光切断法の精度は確保されるものと考えられる．

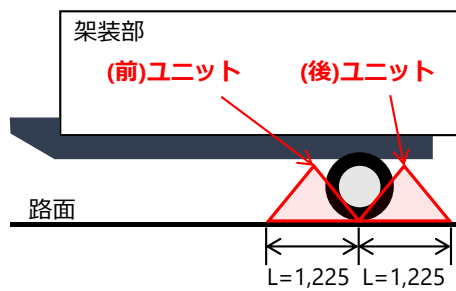


図-3.10 光切断法による路面たわみ量測定ユニット

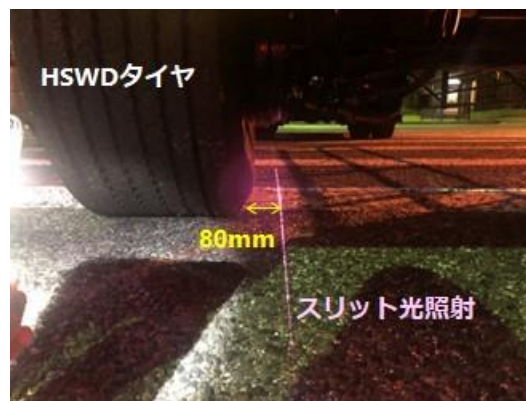


写真-3.3 スリット光の照射状況

実際のスリット光の照査状況を写真-3.3に示す．現段階では，タイヤ内側の縁からスリット光照射位置までの距離が約 80mm 離れている．これは，測定時の車体の傾きやタイヤの変形を考慮したものであるが，この距離は極力短い方が望ましく，今後引き続き検討すべき事項の一つである．

HSWD では，路面たわみ量に関する情報を面的に獲得することを目的に，OWP と IWP の路面たわみ量を同時に取得することを想定し，車両の製作において十分に配慮している．しかし，本基礎研究の段階では，OWP 側のみに測定ユニットを配置し，試験測定を行うこととした．したがって，次節の試験測定のデータは，すべて OWP 側で取得した路面形状に関する情報である．

3.5 試験測定

3.5.1 試験測定の概要

試作した HSWD を用い、実供用下の高速道路において試験測定を実施した。本研究では、HSWD の技術開発に関して光切断法によるたわみ量測定方法に関する基礎的なデータを収集することを目的に、現在において路面たわみ量を測定する代表的な調査方法である FWD 調査を同じ区間で実施し、双方の測定値を比較整理することとした。試験測定区間の概要を表-3.2 に示す。当該区間には、2022 年に実施した路面性状調査において、局所的なひび割れや沈下の発生、部分的なパッチング補修跡を確認している。また、過年度に実施した FWD 調査において、大きなたわみが発生する箇所があることを確認している。

HSWD 試験測定は、高速走行試験（70km/h）と低速走行試験（10km/h）を実施した。試験測定の実施日時と測定時の気象条件を表-3.3 に示す。試験測定のうち、FWD 調査と低速走行試験は夜間通行止め規制内で実施した。HSWD のデータサンプリング間隔は 1,380fps であり、縦断方向データの取得間隔は 10km/h 測定時で約 2mm 間隔、70km/h 測定時で約 14mm 間隔である。FWD 調査の横断方向の測定位置は OWP とし、現地の走行軌跡の状況から、外側線内側から 600mm の位置で測定した。縦断方向の測定間隔は 10m を基本とし、特に舗装路面の状態が悪い部分については 5m 間隔で測定した。高速走行試験は、FWD 調査・低速走行試験の約 2 週間後（夜間通行止め期間終了後）、同じ時間帯（夜間）に、交通規制を設置せず一般車両も供用している状態において実施した。

3.5.2 HSWD における路面たわみ量算定方法の検討

(1) 路面たわみ量の算定方法

HSWD は、光切断法により、路面に荷重が載荷された状態の路面形状を連続的に取得する。したがって、図-3.11 (a) の理想的な測定の模式図に示すとおり、測定データの両端を結ぶ基準線からの差を計算し、得られたデータから直接的にたわみ量を算定することを想定していた。しかし、測定データを整理したところ、既往研究^{4), 7)}でも報告されているとおり、路面の凹凸などの影響が測定値に含まれていることが明らかになった。図-3.11 (b) の青点線のような路面の凹凸が測定値に含まれる場合、荷重の載荷によりたわみが発生すると青実線のようなかたちになる。このとき、両端を結ぶ基準線（黒点線）から高さの差を算出すると、計算値にはたわみ量に加えて路面の凹凸等の影響が含まれることになる。そこで、本研究では、たわみ発生前の高さ（青点線）からたわみ発生後の高さ（青実線）の差をとることで、路面の凹凸等の影響を取り除き、たわみ量を抽出する方法を試みた。

表-3.2 試験測定区間の概要

項目		内容
路線名		徳島自動車道
区間		土成IC～脇町IC
上下線		下り線
車線		走行車線
KP（区間①）		KP38.1～KP38.6：800m
KP（区間②）		KP40.1～KP40.4：300m
供用開始年月		1994（平成6）年3月 ^{※1}
大型車交通量 ^{※2}		654台／日
舗装厚さ	表層	4cm
	基層	6cm
	上層路盤	10cm（As安定処理）
	As層厚	20cm
	下層路盤	20cm（粒状路盤）
	舗装総厚	40cm

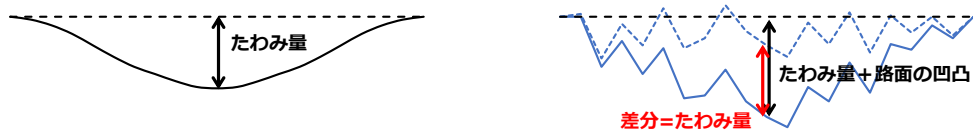
※1：当該区間は2021年3月に4車線化されたが、
本研究の測定範囲は1994年の開通部分

※2：2020年の年平均値

表-3.3 試験測定時の気象条件

項目	内容	
	FWD・低速走行	高速走行
測定日時	2022/11/7 21時～4時	2022/12/1 21時～4時
天候	晴れ	晴れ
平均気温	11℃	7℃
平均路温	15℃	8℃

本研究で採用した路面たわみ量の算定方法を図-3.12に示す。ある解析点と（前）ユニットの中央が一致したとき，（前）ユニットで測定する範囲（ $L=1,225\text{mm}$ ）のデータ（青線）を「荷重無し（と見立てた）の高さデータ」とする。その微小時間後，解析点と荷重載荷タイヤの位置が一致したとき，（前）ユニットの後半分（ $L=612.5\text{mm}$ ）と（後）ユニットの前半分（ $L=612.5\text{mm}$ ）を繋ぎ合わせたデータ（赤線）を「荷重有りの高さデータ」とする。次に，「荷重無し」と「荷重有り」の高さデータを重ね合わせ，中心A・端部B・端部Cとして500ピクセルに相当する約230mmの範囲のデータを抽出する。



(a) 理想的な測定 (b) 路面に凹凸がある場合の測定

図-3.11 差分処理の必要性

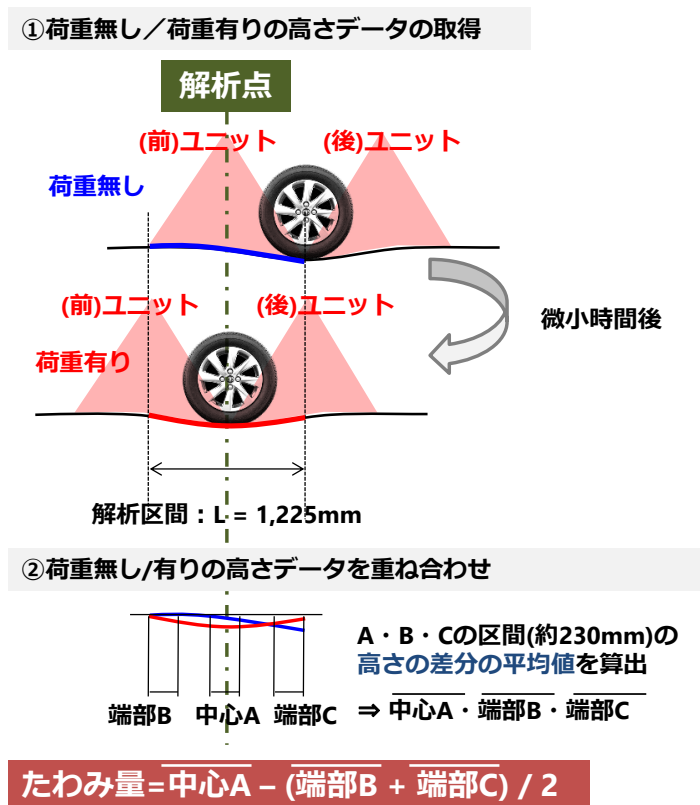
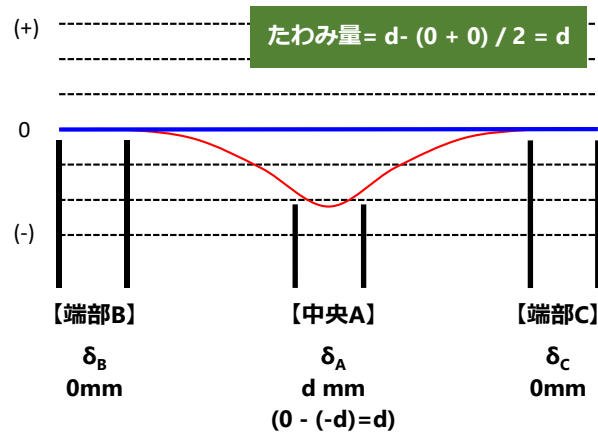


図-3.12 路面たわみ量の算定方法

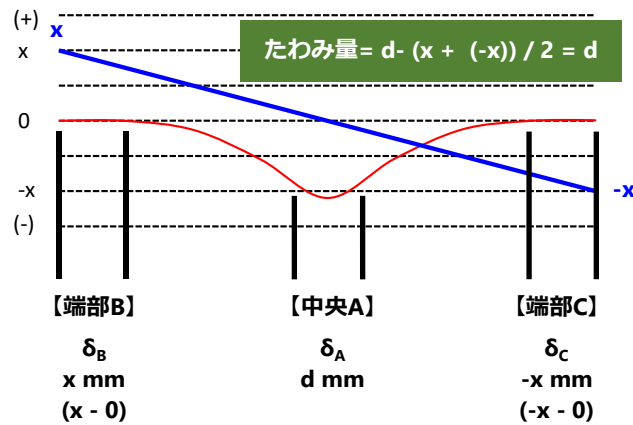
それぞれの範囲において 1 ピクセルごとに荷重無しと荷重有りの高さの差を計算し、その値から平均値を算定する。そして、路面たわみ量を次式で計算する。

$$D = \delta_A - \frac{\delta_B + \delta_C}{2} \quad (3.2)$$

ここに、 D ：路面たわみ量、 δ_A ：中心 A の範囲における高さの差分の平均値、 δ_B ：端部 B の範囲における高さの差分の平均値、 δ_C ：端部 C の範囲における高さの差分の平均値である。図-3.13 は式(3.2)の計算を模式的に示している。図-3.13 (a) はたわみ量の



(a) 車体の傾きが無い場合



(b) 車体の傾きがある場合

図-3.13 車体の傾きの影響の除去

計算範囲において、車両の傾きがない状態をイメージしており、式(3.2)の方法によりたわみ量 d が算定される。一方、図-3.13(b)のように、例えば荷重無しのデータ取得時に車体が x だけ傾いた状態においても、式(3.2)を用いることで傾きの影響がキャンセルされ、たわみ量 d が算定される。

なお、本来、荷重無しの高さデータは荷重載荷部から十分離れた位置の情報であることが望ましいが、本基礎研究では、実道において走行する車両の輪荷重によって生じる路面のたわみ形状を光切断法により計測可能であることを検証することが優先課題であることから、測定ユニットを図-3.10に示す配置とした。このため、当該の測定ユニットから得られるデータを用い、上記に示す手法によりたわみ量を算出することで、以降の基礎的検討を進めることとした。今後の課題として、HSWDの路面たわみ量の算定にあたり、ハードウェア、ソフトウェア双方の観点で改善を継続していく必要がある。

(2) 移動平均の適用

前項で示した方法により，区間①のキロポスト（以下，KP）38.4～KP38.5 の 100m 区間において，70km/h の測定値から路面たわみ量を計算した結果を図-3.14 に示す．図-3.14(a) は移動平均長を可変させた分析である．同図には，表層種別が高機能舗装 I 型の範囲と密粒でパッチング補修されている範囲を付記している．移動平均無し：黒線の分析結果において，密粒の範囲に車両振動の影響と思われる周期的な振幅，それに加えて高機能舗装の範囲には表面のテクスチャの影響と思われる激しい振幅が認められる．つまり，光切断法の連続データを用い，無載荷状態から載荷状態を差分しても，路面たわみ量の算定結果にはノイズが含まれることが確認された．

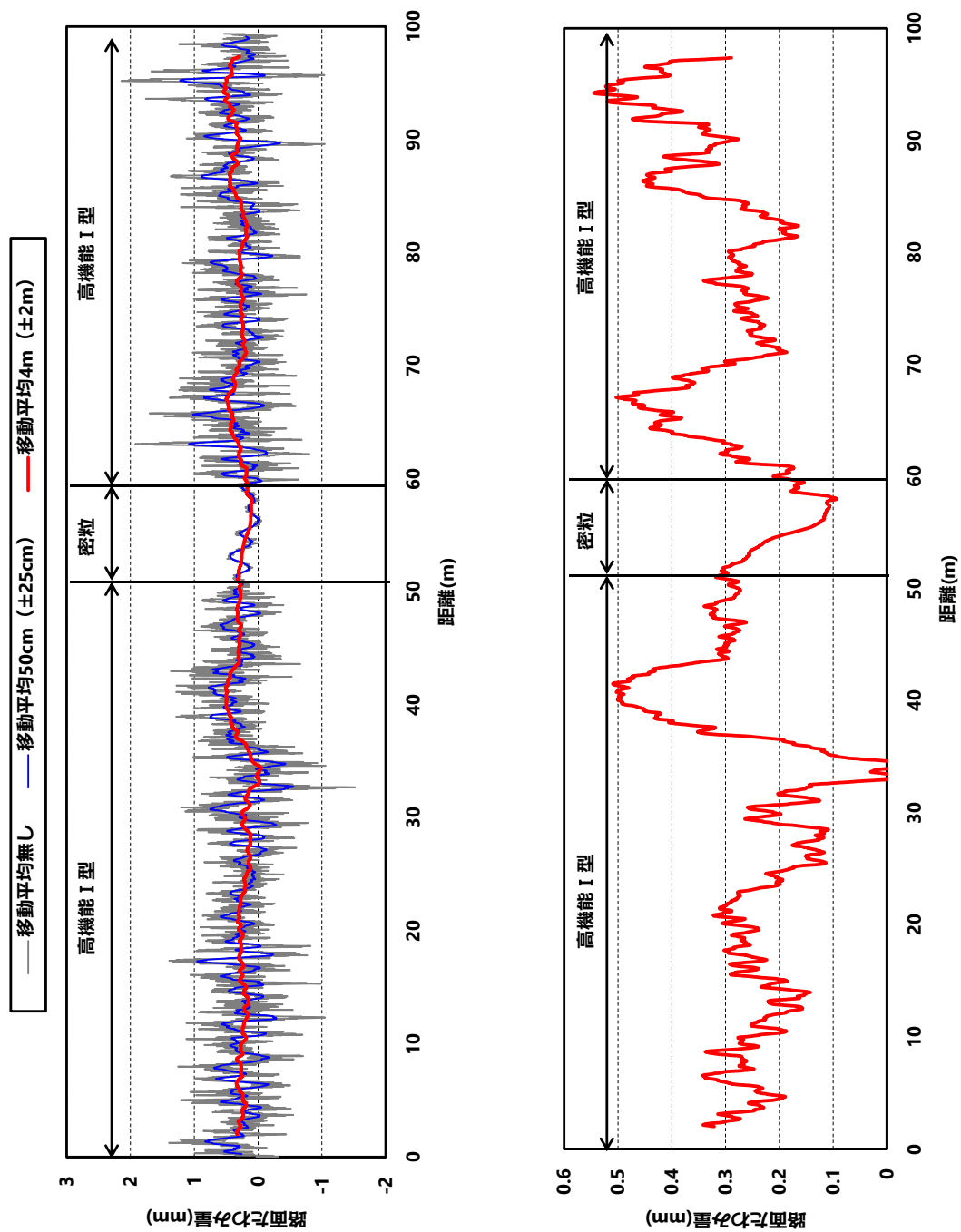
このような周期的な振幅を除去する最も簡便な方法は移動平均であり，本研究でも移動平均の区間長を試行的に変化させた分析を実施した．移動平均による分析の結果，移動平均長 50cm：青線では，高機能舗装 I 型のテクスチャの影響と思われる激しい振幅が除去された．さらに，移動平均長 4m：赤線では，車両の振動の影響と思われる周期的な振幅も除去された．ここで，移動平均処理を行うと，短い区間で生じている不健全箇所のトレンドが消失する可能性⁵⁾が指摘される．これに対し，図-3.14(b) は，移動平均長 4m の分析結果を拡大して示している．同図から，移動平均長を 4m にした場合でも，0.1mm 程度のたわみ量の大小のトレンドは捉えることが可能であると考えられる．なお，本研究では，ノイズ除去に移動平均を適用したが，周波数分析に基づくフィルタ処理等についても，引き続き検討が必要である．

(3) HSWD たわみ量と FWD たわみ量の関係

前項までの計算方法（移動平均後）により求めた HSWD たわみ量と FWD の D_0 たわみ量（以下，FWD たわみ量）の比較を図-3.15 に示す．凡例は HSWD の測定速度で区別している．本図から，ややばらつきは大きいものの，回帰直線の傾きは右肩あがりの傾向が確認できる．図中には 1:1 のラインを併記しており，10km/h の HSWD たわみ量は FWD たわみ量と概ね同じ範囲に分布している．一方，70km/h の HSWD たわみ量は FWD たわみ量に比べ小さく，FWD たわみ量の分布範囲が $150\mu\text{m}$ ～ $1,000\mu\text{m}$ であるのに対し，HSWD たわみ量の分布範囲は $10\mu\text{m}$ から $500\mu\text{m}$ となっている．

(4) 路面高さの変化量による HSWD たわみ量の補正

HSWD たわみ量と FWD たわみ量の測定結果の差は複数の要因によって生じるものと考えられ，一つの要因として載荷荷重の影響があげられる．FWD 測定では，載荷版に載荷される荷重を計測し，その値を標準荷重である 49KN に補正したうえでたわみ量を算出している，一方で，現状の HSWD には実際の載荷荷重を計測する機構を備えていない．そこで，本研究では，FWD たわみ量を正解の値とし，光切断法で計測する



(a) 移動平均長の比較 (b) 移動平均長 (4m) の分析結果 (拡大)

図-3.14 路面たわみ量の算定結果：移動平均処理によるノイズ除去
(70km/h の測定例)

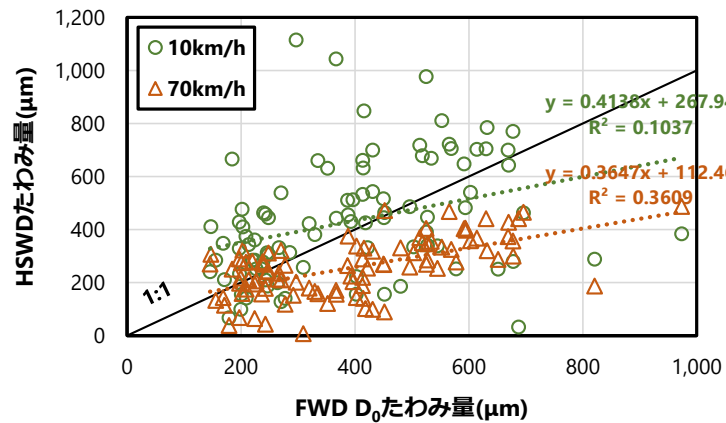


図-3.15 HSWD たわみ量（補正無し）と FWD たわみ量の関係

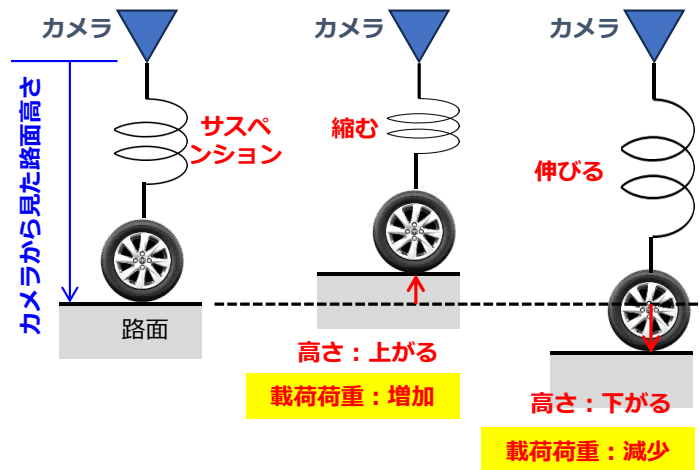


図-3.16 路面高さの変化量によるたわみ量補正の概念図

荷重載荷時の高さ情報のうち、解析点直下（＝車軸直下）の路面高さ情報を用いて HSWD たわみ量の値を補正することを試みる．具体的には、図-3.16 に示すとおり、カメラから見た車軸直下の相対的な路面高さが上がる（正の値）／下がる（負の値）により、車両のサスペンションが縮む／伸びるを表現し、サスペンションが縮むということを経路面に載荷される荷重が増加する、サスペンションが伸びるということを経路面に載荷される荷重が減少するということを仮定する．

図-3.17 は、HSWD たわみ量と路面高さの変化量の関係を整理した結果である．10km/h の分析結果では、路面高さの変化量の値が小さい範囲は HSWD たわみ量が小さく、逆に路面高さの変化量の値が大きくなるにつれ、HSWD たわみ量が大きくなる傾向が伺える．このことから、路面高さの変化量により HSWD たわみ量を補正できる

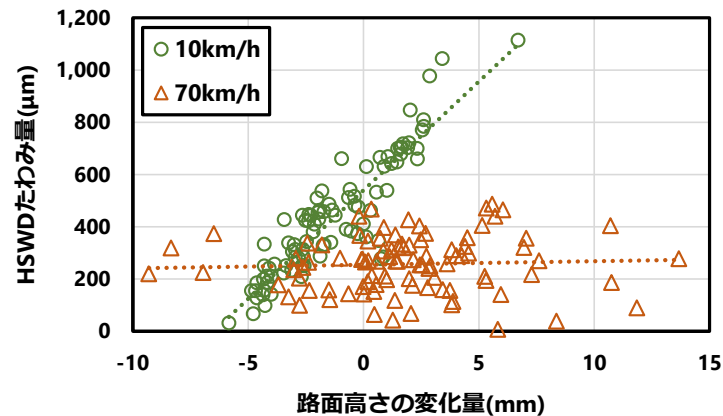
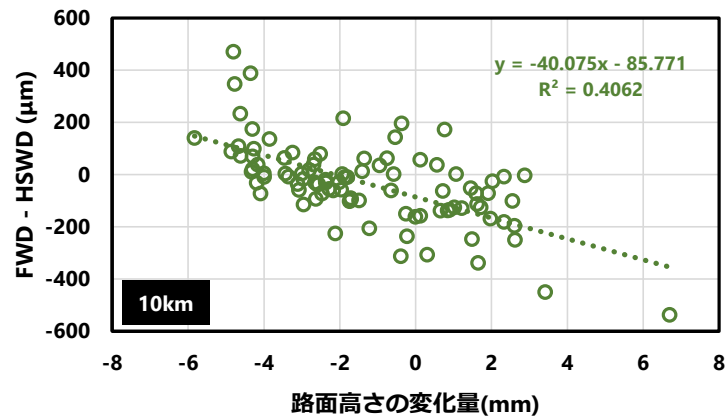


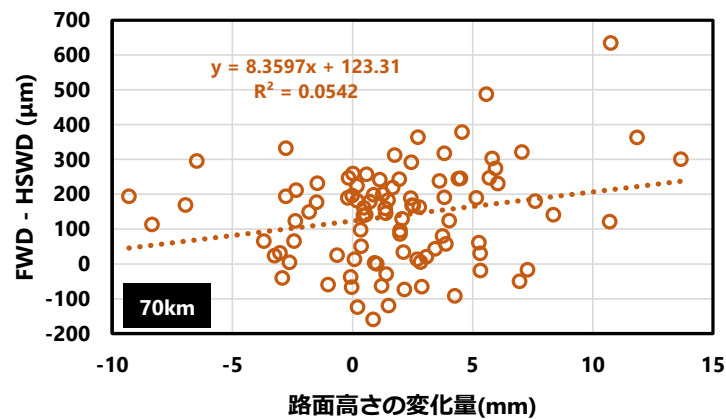
図-3.17 HSWD たわみ量と路面高さの変化量の関係

可能性が考えられる。また，図-3.15 の 10km/h の測定結果において，HSWD たわみ量のばらつきが大きい要因として，載荷荷重が影響しているともいえる。一方，70km/h の測定結果では，HSWD たわみ量と路面高さの変化量には明確な関係性は見られない。この原因として，例えば凸型の路面を乗り越えるような場合，凸型の路面にタイヤが接触した際にサスペンションが縮み，凸型を乗り越えた後にサスペンションが伸びることになるが，高速走行では凸型を乗り越えた後のサスペンションが戻りきらないなど，路面への載荷状態と HSWD の路面高さの関係が低速走行時と異なることが考えられる。このような事象の影響等については，引き続き検証していく必要がある。

図-3.15 で示したとおり，70km/h の HSWD たわみ量と FWD たわみ量の大小は同じ傾向を示していることは確認されているが，HSWD たわみ量が FWD たわみ量に比べて全体的に小さい値となっている。そこで，本基礎研究では，10km/h の分析で HSWD たわみ量を補正できる可能性を示した路面高さの変化量による補正方法を 70km/h にも適用し，HSWD たわみ量と FWD たわみ量の関係性を視覚的に判別しやすくするものとする。路面高さの変化量により HSWD たわみ量を補正するため，同じ位置の FWD たわみ量と HSWD たわみ量の差を計算し，路面高さの変化量との関係を整理した。その結果を図-3.18 に示しており，図-3.18(a) が 10km/h，図-3.18(b) が 70km/h の測定結果である。本研究では，それぞれの図に示した最小二乗法による回帰式をたわみ補正量として HSWD たわみ量に加算し，試験測定結果として取りまとめることとした。すなわち，補正後の HSWD たわみ量 RD は，



(a) 10km/h



(b) 70km/h

図-3.18 路面高さの変化量による FWD たわみ量と HSWD たわみ量の差の関係

$$RD = D + \Delta D \quad (3.3)$$

$$\Delta D(10) = -40.075x - 85.771 \quad (3.3a)$$

$$\Delta D(70) = 8.3597x + 123.31 \quad (3.3b)$$

となる．ここで， D ：式(3.2)で計算される HSWD たわみ量， $\Delta D(10)$ ：10km/h 測定時の HSWD たわみ量の補正量， $\Delta D(70)$ ：70km/h 測定時の HSWD たわみ量の補正量， x ：路面高さの変化量である．

本項の分析結果は，HSWD の実用化に向けて合理的な HSWD たわみ量の補正手法の開発が必要であることを指摘している．今後，カメラから見た路面高さとサスペンションの伸縮量の関係を把握し，それが路面に載荷される実荷重へどのように影響する

のか，さらには載荷荷重の速度依存性などについて，実験的・解析的に検証することが重要な課題である．その際，既往研究⁶⁾において，車軸に取り付けたひずみゲージにより載荷荷重を推定することが可能であるとしていることを参考に，同手法の HSWD への適用性も検証する必要がある．

3.5.3 試験測定結果

前項の方法により算定した HSWD たわみ量（補正後）と FWD たわみ量（荷重補正值）を比較した結果を図-3.19 に示す．本図から，低速走行（10km/h），高速走行（70km/h）とも，HSWD たわみ量と FWD たわみ量の大小は概ね同じような傾向を示しており，今回試作した HSWD により舗装構造の健全度に関する情報を獲得できる可能性があると考えられる．

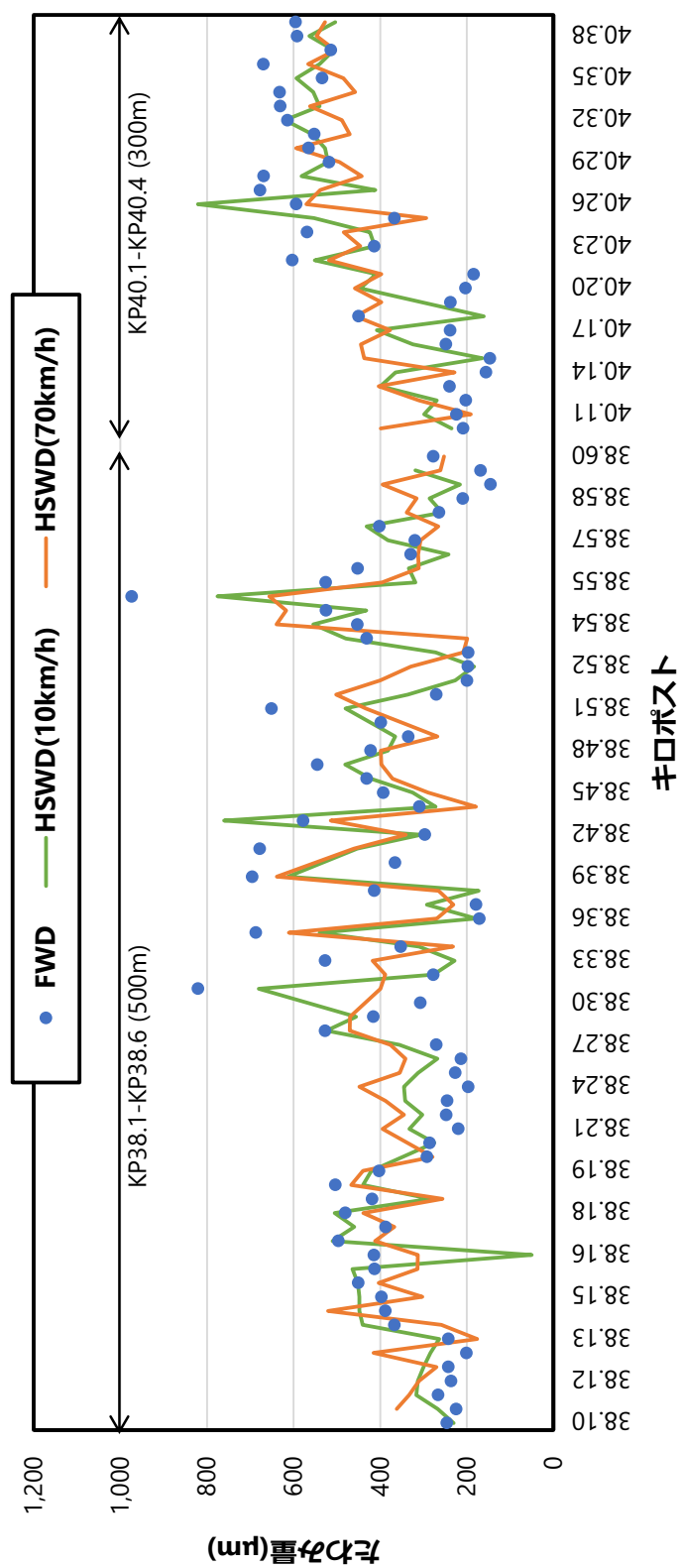


図-3.19 試験測定結果

3.6 おわりに

本研究では、高速道路のアスファルト舗装の損傷の深層化が顕在化している状況を受け、舗装構造の健全度の情報を網羅的に把握するための HSWD の技術開発について、光切断法を用いた路面たわみ量の測定方法に関する基礎的な検討を実施した。得られた知見は以下のとおりである。

- ・ 予備検討では、FEM 解析用の舗装モデルを構築し、荷重（軸重）の大きさ、車軸とタイヤの配置、走行速度をパラメータにした動的 FEM 解析を行った。その結果、HSWD の荷重の載荷方法は、軸重 10t、単軸単輪方式を採用した。
- ・ 予備検討として実施した舗装が健全な状態を想定した動的 FEM 解析において、HSWD で得られる路面たわみ量は 0.1mm 程度であったことから、光切断法によるたわみ形状の計測精度を実験的に検証した。その結果、たわみ形状計測の誤差の標準偏差は約 0.02mm（中央部）であることを確認し、実用的に考えて、光切断法は HSWD のたわみ形状の計測方法として適用できるものと考えられた。
- ・ 予備検討の結果を踏まえ、HSWD の試作車両を製作した。HSWD はセミトレーラーをベースにし、車両検査証の各値は車両制限令の一般的制限値を満足しており、HSWD の走行に際して特車申請は不要である。
- ・ HSWD では、車軸やブレーキを避けカメラの視野を確保するために、光切断のユニットを 2 セット配置した。
- ・ 試作した HSWD を使い、実供用下の高速道路において、試験測定を行った。HSWD の測定値は、移動平均によるノイズ処理を行い、路面高さの変化量（サスペンションの伸縮）によるたわみ量の補正を行うことで、同箇所測定した FWD たわみ量に近似することを確認した。

一方で、本研究に関して今後に残された課題がいくつかある。

第 1 に、ハードウェアの改良があげられる。本研究では、（前）ユニットで得られる路面形状を無載荷部として見立てたが、本来、無載荷部の路面形状はタイヤ（荷重載荷位置）から十分に離れた位置とすることが望ましい。また、現状の HSWD における光切断のスリット光の照射位置は、車両の傾きやタイヤの変形を考慮し、タイヤ端から 80mm 離れた位置に設定しており、特に 70km/h の HSWD たわみ量が FWD たわみ量に比べて小さく算出される要因の一つとなっている可能性も考えられ、スリット光の照射位置をタイヤにより近づける方法を検討する必要がある。

第 2 に、測定値の合理的な補正方法の開発が必要である。本研究において、HSWD たわみ量の算定にあたり荷重補正を行う必要性が指摘された。そのため、路面高さの変化量とサスペンションの伸縮の関係、それに伴う路面へ載荷される実荷重の関係、さらには載荷荷重の速度依存性の有無などについて、実験的・解析的に検証する必要

がある。その際、サスペンションの伸縮は左右で微妙に異なると考えられ、それが測定値に与える影響についても留意する必要がある。

第3に、HSWDの測定実績の積み重ねと補修工事の実態の照合を進めることがあげられる。本研究では、HSWDの技術開発にあたり、HSWDたわみ量とFWDたわみ量を比較することで基礎的な検討を行った。今後もHSWDたわみ量の測定精度向上に向けた検証を継続するべきであることは言うまでもない。一方で、HSWDの開発の目的は、損傷の深層化に対応した高速道路舗装マネジメントの実践に資するデータの獲得である。具体的には、路面性状調査と同様に100m間隔で舗装構造の健全度に関する情報を連続的に取得し、その情報を補修箇所選定の優先度や補修断面の決定、膨大なデータによる舗装構造の健全度の劣化予測モデルの構築などに活用することである。そのため、1) 高速道路には信号や交差点がなく、移動式たわみ測定装置によるデータ取得の容易性に優れること、2) NEXCO西日本の路面性状調査を実施し、そのノウハウを有している西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社がHSWDの開発エンジンであること、といった利点を最大限に活かし、HSWD測定をNEXCO西日本管内全域で行い、測定結果と実際の補修実態と照らし合わせ、HSWDの測定データに適した舗装構造健全度評価方法の確立を視野に入れることができる。

注釈

注1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，高速道路資産の長期保全及び更新のあり方中間とりまとめ，2023.1.

参考文献

- 1) 高橋茂樹，小野義道，佐藤正和：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71，No.3（舗装工学論文集第20巻），pp.I_93-I_101，2015. [Takahashi, S., Ono, Y. and Sato, M.: Field survey to identify the important key factors for long term durability of asphalt pavement on expressways in Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.71, No.3 (Journal of Pavement Engineering, Vol.20), pp.I_93-I_101, 2015.]
- 2) 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，土木学会舗装工学論文集，第14巻，pp.229-237，2009. [Kumada, K., Eguchi, M., Aoki, K., Kaito, K. and Kobayashi, K. : A pavement deterioration forecasting model in expressways based on monitor data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Journal of Pavement Engineering*, Vol.14, pp.229-237, 2009.]
- 3) 加納孝志，岩永真和，大場拓也，堀越智浩，永島直紀，森嶋洋幸：「移動式たわみ測定装置」について，アスファルト，Vol.51，No.224，pp.43-54，2008. [Kano, T., Iwanaga, M., Oba, T., Tsukakoshi, T., Nagashima, N. and Morishima, H.: Idoshikitawamisokuteisochinitsuite, *Asphalt*, Vol.51, No.224, pp.43-54, 2008.]
- 4) 寺田剛，川名太，久保和幸，竹内康，松井邦人：移動式たわみ測定装置を用いた舗装の健全性評価手法に関する一検討，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.68，No.3（舗装工学論文集第17巻），pp.I_13-I_20，2012. [Terada, T., Kawana, F., Kubo, K., Takeuchi, Y. and Matsui, K.: A study on evaluation of pavement soundness using a mobile deflection measuring device, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.68, No.3 (Journal of Pavement Engineering, Vol.17), pp.I_13-I_20, 2012.]

- 5) 竹内康：舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価，道路政策の質の向上に資する技術研究開発研究報告レポート，No.24-9，2015. [Takeuchi, Y.: Development of Moving Wheel Deflectometer (MWD) and pavement soundness evaluation using MWD, *Technical Research and Development for Road Policy Quality Improvement Study Summary*, No.24-9, 2015.]
- 6) 梅田隼，塚本真也，山口和郎，綾部孝之，寺田剛：移動式たわみ測定装置（MWD）のたわみ量解析手法の提案，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.77，No.2（舗装工学論文集第 26 巻），pp.I_179-I_187，2021. [Umeda, J., Tsukamoto, M., Yamaguchi, K., Ayabe, T. and Terada, M.: Proposal of new deflection analysis method using a moving wheel deflectometer (MWD), *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 77, No. 2 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 26), pp. I_179-I_187, 2021.]
- 7) Mostafa A. Elseifi, Ahmed M. Abdel-Khalek, Kevin Gaspard, Zhongjie Zhang, Said Ismail : Evaluation of continuous deflection testing using the rolling wheel deflectometer in Louisiana, *Journal of Transportation Engineering*, pp.414-422, 2012.
- 8) 井口征士，佐藤宏介：三次元画像計測，昭晃堂，1990. [Iguchi, S., Sato, K.: 3D imaging techniques for measurement, Shokodo Company Limited, 1990.]
- 9) 松田晋也：錠剤外観検査における錠剤表面形状認識の高精度化技術－光切断法による錠剤表面の高速・高精度 3D 測定－，製剤機械技術学会誌，Vol.23，No.4，pp.10-14，2014. [Matsuda, S.: The High-Resolution 3D Light Section Method – High Accuracy Technology to Recognize the Tablet Surface Appearance -, *Journal of Pharmaceutical Machinery and Engineering*, Vol.23, No.4, pp.10-14, 2014.]
- 10) 松本大二郎，中村和博，佐藤正和，神谷恵三：高速道路におけるアスファルト舗装の補修設計に用いる材料定数に関する研究，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.69，No.3（舗装工学論文集第 18 巻），pp.I_101-I_108，2013. [Matsumoto, D., Nakamura, K., Sato, M., and Kamiya, K.: A study on the material constants used for the repair design method of asphalt pavements on the Japanese expressways, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.69, No.3 (Journal of Pavement Engineering, Vol.18), pp.I_101-I_108, 2013.]

- 11) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧，2006. [Japan road Association: Hososekkeibinran, 2006.]
- 12) 小澤良明，松井邦人：フォークトモデルで構成された舗装構造の波動伝播解析，土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.314-322, 2008. [Ozawa, Y., and Matsui, K.: Wave propagation analysis of pavement structures composed of foigt model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E*, Vol.64, No.2, pp.314-322, 2008.]
- 13) 公益社団法人土木学会：多層弾性理論による舗装構造解析入門－GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems)を利用して－，舗装工学ライブラリー3，2005. [Japan Society of Civil Engineers: Tasoudanseironniyoru hosoukouzoukaisekinyuumon -Games (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) wo riyoushite-, Pavement Engineering Library 3, 2005.]
- 14) 東滋夫，金井利浩，岡部俊幸，林信也，松井邦人：FWD による時系列データの舗装構造評価への適用，土木学会舗装工学論文集，第3巻，pp.31-38, 1998. [Higashi, S., Kanai, T., Okabe, T., Hayashi, S. and Matsui, K.: Application of time historical data to structural evaluation of asphalt pavements, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Journal of Pavement Engineering*), Vol. 3, pp. 31-38, 1998.]

第4章 統計的劣化予測手法を用いた

舗装補修計画の高度化

4.1 はじめに

高速道路のアスファルト舗装の損傷の深層化が進展¹⁾する中、高度な舗装マネジメントを実践するためには、ネットワークレベルとプロジェクトレベルの2つの取組み²⁾を有機的に連携していく必要がある。このうち、第2章および第3章では、ネットワークレベルの取組みとして、損傷の深層化の状況を定量的に把握する方法論を検討した。本章では、プロジェクトレベルの取組みのうち、舗装マネジメントの根幹ともいえる舗装補修工事の実施計画の策定に対し、現状の課題を整理したうえで具体的な解決策を見出していく。

舗装マネジメントのプロジェクトレベルの取組みは、実務的には、個々の区間の「点検」「診断」「措置」「記録」といったメンテナンスサイクルを構築することである³⁾。このうち「点検」「診断」に該当する行為として、西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 西日本）は路面性状調査により舗装の劣化状態を把握している。路面性状調査とは、**写真-4.1**に示す路面性状調査車両を高速道路上に走行させ、舗装の劣化管理指標であるひび割れ率、わだち掘れ量、IRI（International Roughness Index：国際ラフネス指数）を獲得する調査である。これらの劣化管理指標に対する管理基準として、**表-4.1**に示す補修目標値が設定されている。ここで、補修目標値とは、この値に達するまでに補修を行うことが望ましいとされる値である。つまり、メンテナンスサイクルのうち「措置」に該当する舗装補修工事は、路面性状調査で獲得した劣化管理指標値を補修目標値に照らし合わせ、その実施箇所が選定される。そして、これらの調査結果や工事記録（補修履歴）は、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（以下、NEXCO3 会社）が開発した舗装マネジメントシステム（以下、NEXCO-PMS）に膨大なデータとして「記録」される。

舗装の劣化が経時的に進行することを鑑みれば、舗装補修計画の策定にあたっては、その都度、路面性状調査を実施することが望ましい。しかしながら、NEXCO 西日本における路面性状調査の実施は、調査費用や解析技術者の確保といった調査リソースの制約により、1～3年間隔となっている。一方で、舗装補修工事の実施に関しては、1) 交通規制の制約から工事期間が限定されること、2) 工事受注者（施工業者）の確保といった調達の問題から予算（工事）の平準化が必要なことを考慮しなければならない。



写真-4.1 路面性状調査車両

表-4.1 補修目標値

ひび割れ率	わだち掘れ量	IRI
20%	25mm	3.5mm/m

また，舗装は直接的に通行車両と接する構造物であり，車両が高速で走行する高速道路においては，舗装の変状発生が車両の走行安全性に与える影響が大きい．これらの理由から，NEXCO 西日本では，ほぼ 1 年間隔で，補修が必要な箇所を選定し舗装補修工事を実施している．このように，路面性状調査の実施（最大 3 年間隔）と舗装補修工事の実施（概ね 1 年間隔）のタイミングが合致しない場合があり，舗装補修工事の計画策定にあたり，直近（1 年以内程度）の路面性状調査データが不足する場合がある．

以上の問題意識のもと，本研究では，統計的劣化予測手法を用いた舗装補修計画の策定を支援する方法を検討する．具体的には，舗装の劣化管理指標および補修目標値が連続値で管理されていることを踏まえ，連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定する方法を採用する．この際，NEXCO 西日本が実務で使用している路面性状調査のデータを分析に用いる．以下，4.2 で本章の基本的な考え方を述べる．4.3 では，連続量を用いた劣化ハザードモデルの概要を説明する．そして，4.4 において，本研究で提案する連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定について，路面性状調査データに対する適用性を分析する．

4.2 本章の基本的な考え方

4.2.1 既往研究の概要

近年，社会基盤に対するアセットマネジメントの重要性が高まる中，現場で獲得された点検，調査データをもとにした統計的な劣化予測モデルに関する研究が蓄積されている．2005 年に開発されたマルコフ劣化ハザードモデル⁴⁾は，数多くのモデル⁵⁾⁻⁹⁾に拡張され，舗装分野における実務への適用事例¹⁰⁾⁻¹³⁾も蓄積されている．マルコフ劣化ハザードモデルでは，施設の劣化状態が離散的なレーティングによって代表されており，推定されたマルコフ推移確率は劣化状態の将来予測や補修施策の策定などマクロレベルでのアセットマネジメント戦略を検討する場合に用いられている．路面性状調査により獲得される舗装の劣化管理指標は連続量であるため，劣化管理指標を離散的な健全度に置き換えたうえでマルコフ劣化ハザードモデルが推定されてきた．

一方で，施設の劣化状態が連続量として観測される場合の高精度な劣化予測モデルとして，連続量を用いた劣化ハザードモデル¹⁴⁾が水谷らによって開発されている．水谷らは，任意の関数を近似することを目的として開発されたフレキシブル曲線により，社会基盤施設の劣化過程を表現するパフォーマンス曲線を近似的に表現し，近似されたパフォーマンス曲線をベースラインモデルとして，特性変数に応じて比例的に劣化過程の変動を表現する劣化ハザードモデルを提案している．また，当該モデルを尤度関数の完備化操作と潜在変数を用いた MCMC 法を用いて推定することにより，供用開始時点が観測されていないような施設の調査データを用いた場合においてもモデル推定が可能であることを示している．具体事例として，株式会社高速道路総合技術研究所（以下，NEXCO 総研）が Falling Weight Deflectometer によるたわみ量調査（以下，FWD 調査）で獲得した舗装たわみ量に関するデータベースを用いた事例を示している．通常，FWD 調査による健全度情報は 1 時点のみしか得られないことが少なくないが，当該研究期間中に舗装構造評価に関する基礎データ収集を目的とした計画的な FWD 調査が実施されており，同一地点において 2～3 回の FWD 調査データが得られている．

4.2.2 舗装補修工事を計画するための劣化予測

老朽化が進む高速道路を効果的にマネジメントするためには，路面性状調査で得られたデータに基づき舗装補修工事の箇所を合理的に選定する必要がある．図-4.1 の上段に示すとおり，工事の実施間隔である 1 年に合わせて調査の間隔を 1 年とすることができると，調査で得られた結果から補修工事の実施計画を立案すればよい．この運用では，毎年の調査で補修が必要とされる箇所を毎年補修することになることから，1 回あたりの補修ボリュームは毎回同程度（工事量の平準化）となる．しかし，現状で調査間隔を 3 年としている管理区間では，調査間隔を 1 年にしようとする，調査に必要なリソースは単純に 3 倍

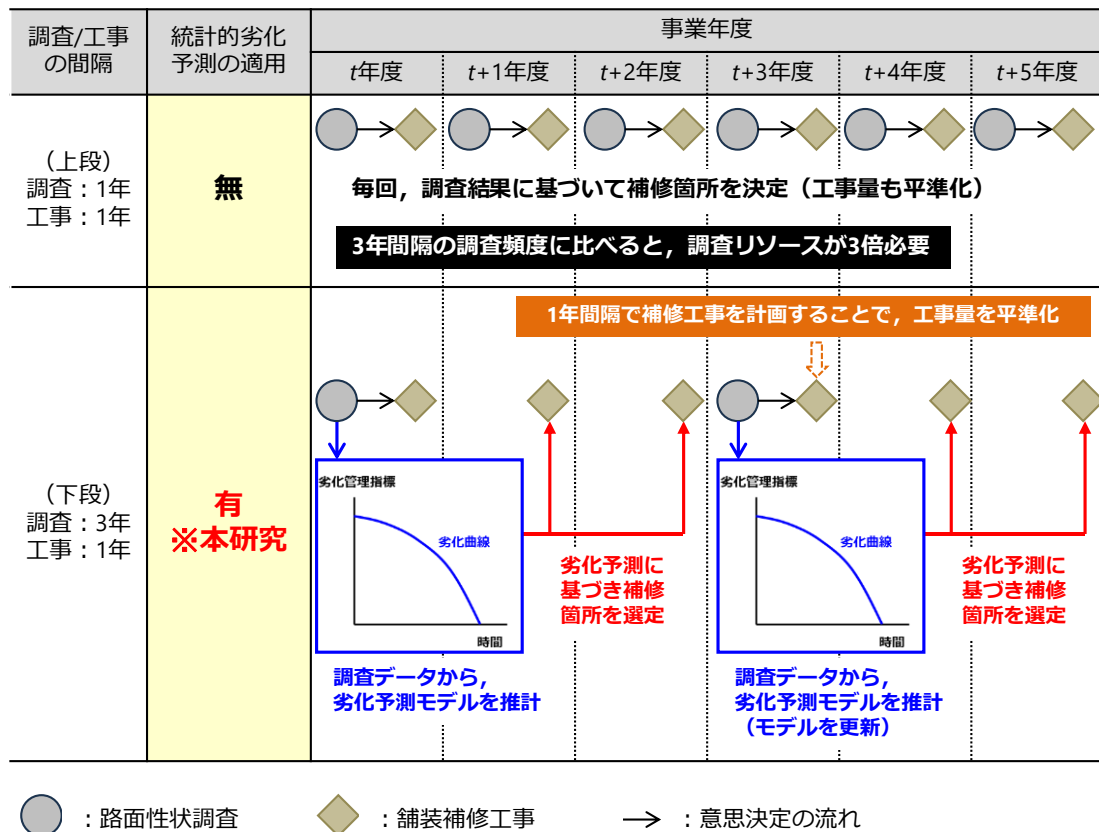
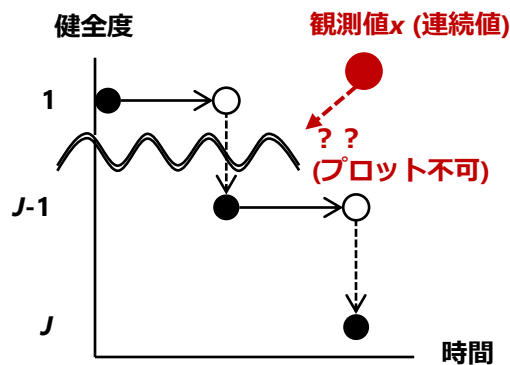


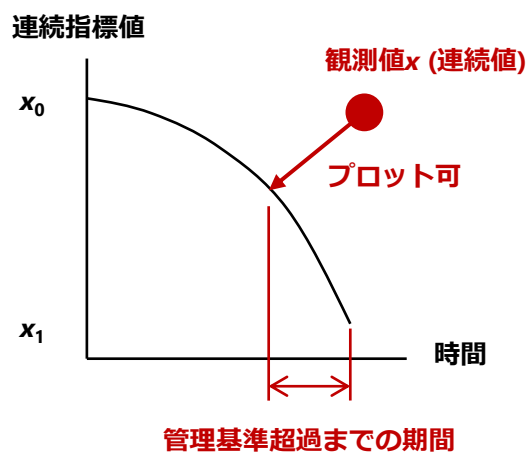
図-4.1 統計的劣化予測手法を用いた舗装補修工事の計画

となる。

一方、工事の実施間隔が1年で調査間隔が3年の場合の意思決定の流れを図-4.1の下段に示す。まず、調査の実施により補修が必要と判断される箇所について、補修工事を実施する（ t および $t+3$ 年度）。次に、調査から1年後および2年後（ $t+1$ 、 $t+2$ 、 $t+4$ および $t+5$ 年度）の工事計画では、直近の調査データが存在しないため、 t 年度（ $t+3$ 年度）の路面性状調査で獲得したデータから管理指標の劣化を予測し、補修箇所を選定する必要がある。公共性が極めて高い高速道路舗装に対する劣化予測モデルの推定は、客観的かつ定量的であり、学術的な根拠を有した統計的劣化予測手法による支援が必要である。また、劣化予測モデルの推定精度が悪く、予測に基づく補修箇所と舗装の劣化の実態が一致していない場合、次回（ $t+3$ 年度）の路面性状調査で得られる路面性状値が補修目標値を超過する箇所が増加し、その年度（ $t+3$ 年度）の工事量が増加する可能性がある。したがって、新たな路面性状調査データが獲得される都度モデルを更新し、予測精度の向上に向けた取組みを継続することが重要であり、そうすることで図-4.1上段に近い運用となり、工事量の平準化につながる事となる。



(a) マルコフ劣化ハザードモデル



(b) 連続量を用いた劣化ハザードモデル

図-4.2 期待劣化パスの違い

4.2.3 本章の位置付け

(1) 適用する劣化ハザードモデル

統計的劣化予測手法は、膨大な量の点検データの背後に存在する統計的規則性を記述する手法である。このうち、劣化管理指標が離散的な健全度で評価される場合、マルコフ劣化ハザードモデルを推定することにより、施設の劣化状態がある健全度に到達した時点から劣化が進展して次の健全度に進むまでの時間（以下、寿命）の確率分布を得ることができる。各健全度の寿命の期待値を算出することにより、図-4.2(a)に示すような施設の劣化過程の期待値を表した期待劣化パスが得られる。ここで、健全度 1 が新設状態であり、健全度 J は最も劣化が進行した段階である。各健全度の期待

寿命の総和を取れば施設の期待寿命となる。一方、連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定すると、図-4.2(b)に示すような劣化管理指標の時間的推移を直接的に表現したパフォーマンスカーブが得られる。ここで、連続指標値 x_0 が新設状態、 x_1 が管理基準である。

本研究では舗装補修工事の計画を立案するために劣化予測モデルの推定結果を利用する。すなわち、路面性状調査で舗装の劣化管理指標の値が獲得された時、獲得された各地点の値を用いて舗装補修工事の工期内に補修目標値を超える地点を予測するために用いる。この時、先述したように、高速道路のアスファルト舗装の路面性状調査により獲得される舗装の劣化管理指標は連続量であることを考えると、マルコフ劣化ハザードモデルを用いた場合、連続量を離散化して健全度により代表させているため、図-4.2(a)に示すように路面性状調査結果の観測値を直接的に用いて予測することが困難となる。当然のことながら、観測値を健全度に置き換えて予測することも可能ではあるが、多くが同一の健全度となるため、現場において具体的な工事箇所を選定するために優先順位をつけるといった作業を直感的に行うことが困難となる。一方、連続量を用いた劣化ハザードモデルでは、図-4.2(b)に示すように、ある観測値を獲得した際、直接的にプロットすることが可能であり、管理基準を超過するまでの時間を算定することができるため、現場において工事箇所を選定する作業を容易に行うことができる。このように、舗装補修工事の計画を立案するといった目的では、連続量を用いた劣化ハザードモデルを適用することに利点がある。

(2) データの質

本研究では、実際の実務で使用している NEXCO-PMS 格納データを用いる。実務データベースでは、一部の情報が不足している場合がある。実際、NEXCO 西日本は管理エリアを4つの支社に分けており、それぞれの支社において NEXCO-PMS へのデータ登録状況が異なっている。本研究では、これらの質が異なるデータから連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定することを試みる。すなわち、既往研究¹⁴⁾で用いられているような研究目的で計画的に獲得されたデータベースとは異なり、実務で実際に利用されているデータベースを用い、データの不足状況がモデルの推定結果に与える影響を考察する。

(3) 路面性状値 (IRI) による分析

既往研究¹⁴⁾において分析の対象に用いている FWD 調査は、一般的に、各補修箇所の補修方法（舗装の深さ方向の補修範囲）を検討するために実施される。また、FWD 調査は、調査にあたって 1) 交通規制と 2) 多大な労力と費用を要する。したがって、これまでに実施された FWD 調査は、調査箇所が限定的であり、調査データが獲得され

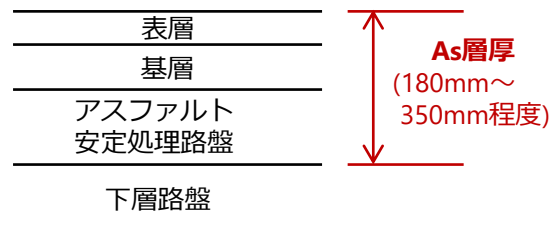


図-4.3 高速道路舗装の標準構成

ていない箇所が存在する。これに対し、本研究では、網羅的にデータが獲得されており、NEXCO 西日本を含めた多くの道路管理者が舗装補修工事の実施箇所の選定に採用している路面性状調査データを用いた分析を行い、補修工事の実施計画への適用を検討する。

本研究で問題意識としている高速道路舗装の損傷の深層化とは、図-4.3 に示す高速道路舗装の標準構成のうち、アスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れや下層路盤の脆弱化といった損傷形態である¹⁾。これら深層部の損傷は舗装路面にポンピングや局所的な沈下といったかたちで現れる。第2章で示したとおり、路面性状調査で獲得される劣化管理指標のうち、IRIは、局所的な変状の物理量を捉えることは困難であるが、深層部の損傷の進展や補修・修繕の影響といった舗装マネジメントにおける重要な情報を捉えられる可能性があることが明らかにされている¹⁵⁾。また、IRIの算出は、路面性状調査車両に取り付けられたレーザー変位計で路面のプロファイルを測定し、測定したプロファイルデータをプログラム処理するだけであり、算出のために人による作業が必要となるひび割れ率と異なり算出が容易であるといえる。これらのことから、本研究では、舗装の老朽化に対するマネジメントの観点も考慮したうえで、路面性状調査データに含まれる劣化管理指標としてIRIに着目し、IRIデータに対して連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定する。

以上のとおり、本研究は新たなモデルの開発を目的とするのではなく、高速道路舗装マネジメントの根幹ともいえる補修工事の実施計画に対し、数多くの統計的劣化予測モデルの中から連続量を用いた劣化ハザードモデルを選定し、社会実装に向けた検討を行うものである。その際、路面性状調査の中でもデータを獲得しやすく、かつ高速道路舗装の損傷の深層化の進展を捉える可能性があるIRIを分析に用いることや、実務データベースで一部の情報が不足する場合に劣化予測の推定結果に与える影響について考察を加えることに、本研究の独創性と実用的価値を見出すことができる。

4.3 連続量を用いた劣化ハザードモデル

4.3.1 劣化進行プロセス

連続量を用いた劣化ハザードモデルは水谷ら¹⁴⁾に詳しいが、読者の便宜のためにモデルの詳細について述べる。いま、対象とする施設 $i(i = 1, \dots, I)$ の劣化管理指標を x_i 、直近の建設（補修）時点からの経過時間を t_i と表す。劣化が進行するほど、劣化指標値は大きな値をとると考える。劣化の進展により指標値が小さくなるような劣化事象の場合、指標値の逆数 x_i^{-1} をモデルの非特性変数として採用すればいい。劣化プロセスの進行過程を表す劣化ハザードモデルを

$$x_i = \exp(-B_i)f(t_i, \boldsymbol{\beta}) \quad (4.1a)$$

$$B_i = \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}' + \sigma w_i \quad (4.1b)$$

$$(i = 1, \dots, I)$$

と定式化する。ここで、 B_i は施設 i の劣化特性の異質性を反映する指標であり、式(4.1b)に示すように特性変数項 $\mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'$ と誤差項 σw_i の和で表せる。式(4.1b)において、 $\mathbf{z}_i = (z_i^1, \dots, z_i^M)$ は施設 i の劣化に影響を及ぼす特性変数ベクトル、 $\boldsymbol{\theta} = (\theta^1, \dots, \theta^M)$ はパラメータベクトル、 w_i は施設 i に固有な劣化要因を表す確率誤差項、 σ は偏差パラメータを表す。また、 $f(t_i, \boldsymbol{\beta})$ はベースラインの劣化過程を表す劣化モデル（以下、ベースラインモデル）であり、 t_i に関して単調増加関数である。また、 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_N)$ はベースラインモデルを特徴づける未知パラメータベクトルである。 $\exp(-B_i) = 1$ が成立する場合、劣化曲線はベースラインモデルに一致する。力学的モデルにより理論的曲線を導出できる場合には、理論的曲線をベースラインモデルとして用いることができる。理論モデルが存在しない場合、例えばフレキシブル関数を用いてベースラインモデルを近似的に表現することが必要となる。

式(4.1a)の両辺の対数をとれば、

$$y_i = \ln f(t_i, \boldsymbol{\beta})$$

$$= \ln x_i + \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}' + \sigma w_i \quad (i = 1, \dots, I) \quad (4.2)$$

を得る。ただし、 $y_i = \ln f(t_i, \boldsymbol{\beta})$ は非線形化された寿命インデックスである。確率変動項 w_i が確率密度関数

$$g_w(w_i) = \exp\{-w_i - \exp(-w_i)\} \quad (4.3)$$

で表現される標準ガンベル分布に従うと仮定する。ただし、 $E(w_i) = \gamma$ であり、 $\gamma (= 0.57722 \dots)$ はオイラー定数である。式(4.2)を

$$w_i = \frac{y_i - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \quad (i = 1, \dots, I) \quad (4.4)$$

と書き直し、確率密度関数(4.3)の変数変換を行う。その結果、劣化特性 \mathbf{z}_i を有する施設 i の劣化管理指標値が x_i に到達するまでの寿命インデックス y_i の条件付き分布を表す

確率密度関数は,

$$\begin{aligned} h_y(y_i|x_i, \mathbf{z}_i) &= \frac{1}{\sigma} g_w \left(\frac{y_i - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \\ &= \frac{1}{\sigma} \exp \left\{ -\exp \left(\frac{y_i - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) - \frac{y_i - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

と表すことができる. 寿命インデックス $y_i = \ln f(t_i, \boldsymbol{\beta})$ には未知パラメータ $\boldsymbol{\beta}$ が含まれている. 寿命インデックスの 1 階微分を $f_d(t_i, \boldsymbol{\beta}) = df(t_i, \boldsymbol{\beta})/dt_i$ と表記すれば,

$$dy_i = \frac{f_d(t_i, \boldsymbol{\beta})}{f(t_i, \boldsymbol{\beta})} dt_i \quad (4.6)$$

が成立する. したがって, 管理水準 x_i に到達するまでの実寿命 t_i の条件付き分布を表す確率密度関数は,

$$\tau(t_i|x_i, \mathbf{z}_i) = \frac{f_d(t_i)}{\sigma f(t_i)} \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{\ln f(t_i) - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) - \frac{\ln f(t_i) - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \quad (4.7)$$

と表される. 確率密度関数(4.3)より, 生存関数は,

$$\begin{aligned} S_w(w_i) &= 1 - \int_{\infty}^{w_i} g_w(w) dw \\ &= 1 - \exp\{-\exp(-w_i)\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

と表現される. 劣化特性 \mathbf{z}_i を有する施設 i において, 寿命インデックス y_i が経過した時点で, 劣化管理指標値が x_i まで到達していない確率は, 生存関数

$$\begin{aligned} S_y(y_i|x_i, \mathbf{z}_i) &= S_w \left(\frac{y_i - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \\ &= 1 - \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{y_i - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4.9)$$

を用いて表現できる. さらに, 実経過時間 t_i に関する生存関数は,

$$S_y(y_i|x_i, \mathbf{z}_i) = 1 - \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{\ln f(t_i) - \ln x_i - \mathbf{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right\} \quad (4.10)$$

で表される. このように, 連続量を用いた劣化ハザードモデルに対しても, 生存関数(4.10)を導出することができる. 伝統的なハザードモデル¹⁶⁾⁻¹⁹⁾は, 対象物の寿命が確率分布すると仮定しているのに対して, 連続量を用いた劣化ハザードモデルでは, 個々の施設の劣化速度の異質性が寿命分布の原因となっている. また, 生存関数は, 劣化管理指標が所与の管理水準 x_i に到達するまでの経過時間の分布を示したものである. 当然のことながら, 確率変動項 w_i の確率分布として, ガンベル関数以外の確率分布 (例えば, 対数正規分布, ロジスティック分布等) を採用することも可能である. ガンベル分布は, ハザード率が経過時間に対して一定, 逓増, 逓減となるような変化過程を表現できるという柔軟な構造を有している. 以上の理由により, 本研究では確率誤差

変動としてガンベル分布を採用することとするが、対象とする社会基盤施設の劣化特性に応じて、複数の誤差項の分布の候補の中から統計的に最適な分布をモデル推定後に事後的に比較し選定することによって、劣化予測結果の実データに対する適合性を向上させることも可能となる。

4.3.2 ベースラインモデル

式(4.1a)において、 $\exp(-B_i) = 1$ が成立する場合、 $x_i = f(t_i, \boldsymbol{\beta})$ が成立する。このとき、ベースラインモデルは、標準的な施設*i*の建設（補修）時点からの経過時間 t_i と劣化管理指標 x_i の関係を表すモデルとなる。このような劣化過程を力学的理論に基づいて解析的モデルとして導出することが可能であれば、ベースラインモデルとして力学的モデルを採用することができる。このとき、劣化ハザードモデルを用いて、施設が置かれている環境による劣化速度の異質性を表現することができる。しかし、ベースラインモデルとして利用可能な既往モデルや経験的知見が存在しない場合、ベースラインモデルを近似的に表現できるようなフレキシブル関数を発見的に求めることが必要となる。このとき、1) その候補となるフレキシブル関数を複数種類設定し、2) フレキシブル関数を用いた劣化ハザードモデルのパラメータを推定し、3) 個々のモデルの尤度関数に基づく統計的な情報量基準を比較することにより、最も望ましいフレキシブル関数の選択とパラメータの最尤推定値を求めるという手順を採用することが必要となる。ベースラインモデルとして多様なフレキシブル関数を利用することができるが、ベースラインモデルは時間の経過に伴い劣化管理指標値が増加する標準的劣化過程を表現することが必要となるため、ベースラインモデルの定義域 $[0, T]$ に対して

$$f(0, \boldsymbol{\beta}) = 1 \quad (4.11a)$$

$$\frac{\partial f(t_i, \boldsymbol{\beta})}{\partial t_i} \geq 0 \quad (4.11b)$$

が成立しなければならない。式(4.11a)は、標準的劣化過程を表現するための基準化条件であり、式(4.11b)は単調増加条件である。本研究の適用事例として、ベースラインモデルの候補として多項式モデル、べき乗関数モデル、指数関数モデル、ワイブル分布関数モデルという4種類の関数形を採用する。この場合、フレキシブル関数のパラメータ値 $\boldsymbol{\beta}$ は任意の値を採用できるのではなく、条件(4.11a), (4.11b)を満足しなければならないことはいうまでもない。いま、あるフレキシブル関数 $f(t_i, \boldsymbol{\beta})$ に対して、パラメータベクトル $\boldsymbol{\beta}$ の許容集合 $\Omega_f(\boldsymbol{\beta})$ を次式のように定義する。

$$\Omega_f(\boldsymbol{\beta}) = \{\boldsymbol{\beta} \in \mathcal{B} | \forall t \in [0, T], \text{eqs. (11a), (11b)}\} \quad (4.12)$$

ただし、 \mathcal{B} はパラメータ $\boldsymbol{\beta}$ の定義域である。本研究ではこのようなパラメータの定義域を考慮したパラメータの推定方法を用いる。

4.3.3 尤度関数の定式化

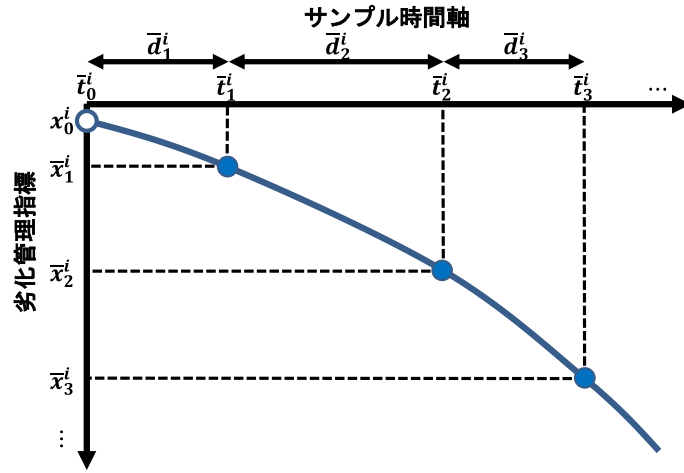
いま、施設 $i (i = 1, \dots, I)$ ごとに時間軸上の異なる時点で劣化管理指標を実測している場合を考える．各施設で観測された劣化管理指標の時系列データを用いて、劣化ハザードモデルを推定する．施設 i に対して、 $t_0^i = 0$ を初期時点（供用開始時点あるいは補修時点）とするサンプル時間軸 $t_0^i, t_1^i, t_2^i, \dots$ を定義する．サンプル時間軸上の点を時点と呼び、カレンダー時刻と区別する．時点 $t_h^i (h = 1, \dots, H_i)$ は、施設 i の劣化管理指標に対する h 回目の観測時点である．劣化管理指標の観測時点間隔を $d_h^i = t_h^i - t_{h-1}^i$ と定義する．本研究では、劣化管理指標の観測状況に応じて、2 種類の尤度関数を定式化する．ただし、劣化管理指標 $x_h^i (h = 1, \dots, H_i)$ は、その値が大きくなるほど劣化が進展していることを表す．

図-4.4 には、本研究で対象とする 2 種類のデータ獲得パターンを示している．記号「 \square 」は、実際に観測されモデル推定に利用可能なデータであることを意味する．同図の各点において観測される部分的な情報を用いて、青色で示した劣化管理指標の時間的推移を推定することを考える．図-4.4(a) では、施設 i において、供用開始時点、あるいは、直近の補修時点が記録されている場合を想定し、1 回目の調査間隔 \bar{d}_1^i は調査データとして既知である．しかし、現実には、供用開始時点（あるいは、過去の補修時点）に遡って劣化管理指標を観測しておらず、最近の実測データのみに基づいて、劣化ハザードモデルを推定せざるを得ない場合も少なくない．図-4.4(b) は、このような不完全データが獲得されるようなデータ観測スキームを表している．この図は、供用開始時点、あるいは、直近の補修時点に関する情報が残されておらず、補修時点から最初の調査時点までの調査間隔 \bar{d}_1^i が未知であるような状況を模式的に示している．施設 i の劣化管理指標に関する調査サンプルの情報 $\bar{\mathbf{e}}_i (i = 1, \dots, I)$ を $\bar{\mathbf{e}}_i = (\bar{\mathbf{x}}_i, \bar{\mathbf{d}}_i, \bar{\mathbf{z}}_i)$ と表す．ただし、 $\bar{\mathbf{z}}_i = (\bar{z}_1^i, \dots, \bar{z}_M^i)$ は施設 i の劣化特性を表すベクトルであり、 $\bar{z}_m^i (m = 1, \dots, M)$ は施設 i の m 番目の劣化特性を表している．また、 \bar{z}_i は時間的に一定であると仮定する．さらに、調査間隔ベクトル $\bar{\mathbf{d}}_i$ は、パターン 1 の場合、 $\bar{\mathbf{d}}_i = (\bar{d}_1^i, \dots, \bar{d}_{H_i}^i)$ であり、パターン 2 の場合、 $\bar{\mathbf{d}}_i = (\bar{d}_2^i, \dots, \bar{d}_{H_i}^i)$ で表される． $\bar{\mathbf{x}}_i = (\bar{x}_1^i, \dots, \bar{x}_{H_i}^i)$ である．一般性を損なうことなく、施設 $i = 1, \dots, I'$ に関してはパターン 1 による調査サンプルが獲得できるが、残りの施設 $i = I' + 1, \dots, I$ に関してはパターン 2 の調査サンプルが獲得されていると考える．

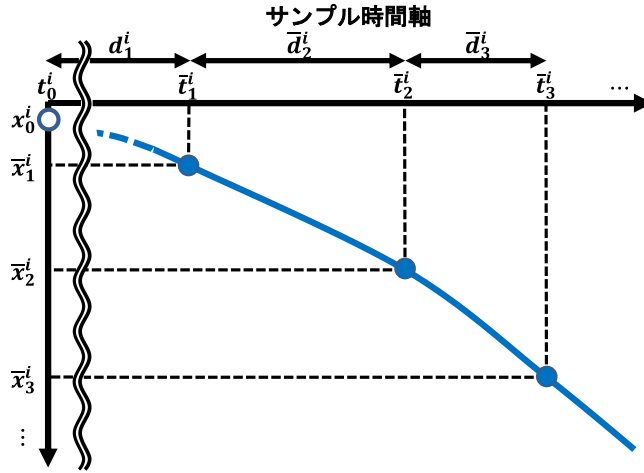
(1) パターン 1

まずデータ獲得パターン 1 での尤度関数は実寿命の条件付き確率密度関数(4.7)により、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_i(\bar{\mathbf{e}}_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma) \\ = \prod_{h=1}^{H_i} \tau(\bar{t}_h^i | \bar{x}_h^i, \bar{z}_i) \end{aligned}$$



(a) 供用開始，直近の補修時点が既知（パターン 1）



(b) 供用開始，直近の補修時点が不明（パターン 2）

図-4.4 データ獲得パターンの違いによる劣化パフォーマンスカーブ

$$= \prod_{h=1}^{H_i} \left[\frac{f_d(\bar{t}_h^i)}{\sigma f(\bar{t}_h^i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(\bar{t}_h^i) - \ln \bar{x}_h^i - \bar{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \frac{\ln f(\bar{t}_h^i) - \ln \bar{x}_h^i - \bar{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \right] \quad (4.13)$$

($i = 1, \dots, I'$)

と表現できる．ただし， $\bar{t}_h^i = \sum_{a=1}^h \bar{d}_a^i$ である．なお，式中では， $f(t, \boldsymbol{\beta})$ を $f(t)$ と簡略化して表記する．

(2) パターン 2

データ獲得パターン 2 での尤度関数を定式化する．パターン 2 においては，1 回目の調査間隔 $d_1^i = t_1^i$ が観測されていないため，寿命 t_1^i を確率変数として取り扱う．寿命 t_1^i

と実調査間隔 $(\bar{d}_2^i, \dots, \bar{d}_{H_i}^i)$ の同時生起確率は、寿命 t_1^i の生起確率 $\tau(t_1^i | \bar{x}_1^i, \bar{z}_i)$ と劣化ハザードモデルによる寿命の生起確率 $\tau(t_1^i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i | \bar{x}_h^i, \bar{z}_i)$ の混合確率モデルとして表現できる．このとき、調査データ Ξ_i に関する尤度関数は、積分計算により、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_i(\bar{\Xi}_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma) &= \int_0^\infty \tau(t_1^i | \bar{x}_1^i, \bar{z}_i) \prod_{h=2}^{H_i} \tau(t_1^i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i | \bar{x}_h^i, \bar{z}_i) dt_1^i \\ &= \int_0^\infty \frac{f_a(t_1^i)}{\sigma f(t_1^i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(t_1^i) - \ln \bar{x}_h^i - \bar{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \frac{\ln f(t_1^i) - \ln \bar{x}_h^i - \bar{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \\ &\quad \cdot \prod_{h=1}^{H_i} \left[\frac{f_a(t_1^i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)}{\sigma f(t_1^i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(t_1^i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i) - \ln \bar{x}_h^i - \bar{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\ln f(t_1^i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i) - \ln \bar{x}_h^i - \bar{z}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$(i = I' + 1, \dots, I)$$

と表現することができる．いま、施設 $i = I' + 1, \dots, I$ に対して獲得された調査サンプルは補修・更新時点におけるデータが観測されていないため、1回目の調査間隔 $d_1^i = t_1^i$ が観測不可能である．そのため推定の際は、仮にその値が ξ である場合を考え、モデル推定を行う．詳細に関しては付録を参照されたい．

本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ (Markov Chain Monte Carlo, 以下 MCMC) 法の反復計算により、劣化ハザードモデルの未知パラメータの事後分布に従う乱数を発生させ、統計量を算出することによりモデル推定を行う．

4.3.4 劣化リスク管理指標

劣化管理指標の低下過程に劣化カテゴリ間の異質性が存在し、カテゴリごとの劣化特性が異なる．連続量を用いた劣化ハザードモデルでは、劣化管理指標の寿命が確率分布する．個々の劣化カテゴリに対して、初期時点からある一定の時間 T_i が経過した時点での劣化管理指標の確率分布も知ることができる．このように、劣化管理指標の低下に関するリスク管理指標を「劣化リスク管理指標」と呼ぶ．初期時点から一定の時間 T_i が経過した現時点を考える．未知パラメータ $(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma)$ を所与としたとき、式(4.2)より、劣化管理指標 x_i は

$$x_i = \exp(-\bar{z}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}' - \hat{\sigma} w_i) f(T_i, \hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (4.15)$$

と表される．ただし、記号「 $\hat{\cdot}$ 」は推定値を意味する．ここで、確率誤差項 w_i が式(4.3)の確率密度関数 $g_w(w_i)$ に従うことを考慮すれば、変数変換

$$w_i = \frac{\ln f(T_i, \hat{\boldsymbol{\beta}}) - \ln x_i - \bar{z}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}'}{\hat{\sigma}} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.16)$$

により、経過時間 T_i における対数劣化管理指標 $t_i = \ln x_i$ の条件付き分布を表す確率密度

関数は,

$$f_i(t_i|T_i, \bar{z}_i) = \frac{1}{\hat{\sigma}} f_w \left(\frac{\ln f(T_i, \hat{\beta}) - t_i - \bar{z}_i \hat{\theta}'}{\hat{\sigma}} \right) \quad (4.17)$$

と表すことができる. さらに, 変数変換 $x_i = \exp(t_i)$ より, 経過時間 T_i における劣化管理指標 x_i の条件付き確率密度関数は,

$$\begin{aligned} f_{x_i}(x_i|T_i, \bar{z}_i) &= \frac{1}{\hat{\sigma} x_i} f_w \left(\frac{\ln f(T_i, \hat{\beta}) - \ln x_i - \bar{z}_i \hat{\theta}'}{\hat{\sigma}} \right) \\ &= \frac{\kappa x_i^{\kappa-1}}{\rho_i(T_i)} \exp \left\{ -\frac{x_i^\kappa}{\rho_i(T_i)} \right\} \end{aligned} \quad (4.18)$$

と表すことができる. ただし,

$$\kappa = \frac{1}{\sigma} \quad (4.19a)$$

$$\rho_i(T_i) = \left\{ \exp \left(\frac{\bar{z}_i \hat{\theta}' - \ln f(T_i, \hat{\beta})}{\hat{\sigma}} \right) \right\}^{-1} \quad (4.19b)$$

である. すなわち, 劣化管理指標 x_i はワイブル分布 $\mathcal{W}(\mu(T_i), \nu^2(T_i))$ に従うことになる. ただし, $\mu(T_i)$, $\nu^2(T_i)$ はワイブル分布の期待値, および分散であり,

$$\mu(T_i) = \rho_i(T_i)^{1/\kappa} \Gamma(\kappa^{-1} + 1) \quad (4.20a)$$

$$\nu^2(T_i) = \rho_i(T_i)^{2/\kappa} \left\{ \Gamma \left(\frac{2}{\kappa} + 1 \right) - \Gamma^2 \left(\frac{1}{\kappa} + 1 \right) \right\} \quad (4.20b)$$

と表せる. $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数である. さらに, 劣化管理指標の確率分布を表す分布関数 $H(x_i|T_i, \bar{z}_i)$ は

$$H(x_i|T_i, \bar{z}_i) = 1 - \exp \left\{ -\frac{x_i^\kappa}{\rho_i(T_i)} \right\} \quad (4.21)$$

と表せる. このとき, リスク管理水準を $\varepsilon \times 100\%$ とした VaR(Value at Risk) 指標 $x_{[\text{VaR}],i}(\varepsilon)$ は,

$$H(x_{[\text{VaR}],i}(\varepsilon)|T_i, \bar{z}_i) = 1 - \varepsilon \quad (4.22)$$

を満足するような $x_{[\text{VaR}],i}(\varepsilon)$ として定義できる. すなわち, $x_{[\text{VaR}],i}(\varepsilon)$ は, 経過時間 T_i において, それを満たさない (指標自体の数値が上回るような) 劣化管理指標値が出現する超過確率が ε となるような臨界的な劣化管理指標値を表す. また, 経過時間 T_i における期待劣化管理指標値 $E[x_i]$ は, 式(4.20a)より

$$E[x_i] = \Gamma \left(\frac{1}{\kappa} + 1 \right) \exp \left(\frac{\ln f(T_i, \hat{\beta}) - \bar{z}_i \hat{\theta}'}{\kappa \hat{\sigma}} \right) \quad (4.23)$$

となる. さらに, 上式において経過時間 T_i の値を変化させ, 経過時間 T_i と期待劣化管理指標値 $E[x_i]$ の関係を表した曲線を本研究では「劣化パフォーマンスカーブ」と呼ぶ.

4.4 適用事例

4.4.1 データ概要

本研究では、NEXCO-PMS に格納されている路面性状調査データを使用する。NEXCO-PMS では、図-4.5 に示すとおり 100m 区間を基本単位（以下、地点）とし、1) 事務所などの管理者情報、2) 路線名、車線区分（走行／追越／登坂／付加）、上下線、キロポスト、インターチェンジ区間（以下、IC 区間）などの位置情報、3) 舗装種別（アスファルト舗装／コンクリート舗装）、舗装構成（舗装厚さ）、構造物区分（土工部／橋梁部／トンネル部）、4) 供用開始年月日、補修年月日、5) 路面性状調査が実施された日時、観測された路面性状値の情報が記録されている。4.2.3 で述べたとおり、本研究では、舗装の老朽化に伴う損傷の深層化を捉える可能性のある IRI 値に着目することとし、土工部のアスファルト舗装を対象に分析する。IRI の測定頻度は NEXCO 西日本の各支社（A 支社～D 支社）により異なっており、A 支社は 1 年間隔、B 支社～D 支社は 2～3 年間隔となっている。本研究の分析対象期間は、最大調査間隔の 3 年を考慮し、2 時点のデータが取得されている可能性が高い 6 年間とし、対象年度は NEXCO-PMS のデータ整理状況から 2015～2020 年度とする。

第 2 章に示した研究成果¹⁵⁾により、IRI の劣化には表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤の合計厚（以下、As 層厚）が深く関係していることが明らかになっている。したがって、次項の連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定では、特性変数ベクトルに As 層厚を採用し、As 層厚を 180mm 以上 220mm 未満($m = 1$)、220mm 以上 260mm 未満($m = 2$)、260mm 以上 350mm 未満($m = 3$)と 3 区分に分類し、特性変数ベクトル $\mathbf{z}_i = (z_i^1, \dots, z_i^M)$ を

$$z_i^m = \begin{cases} 1 & \text{地点}i\text{の劣化特性カテゴリが}m\text{のとき} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (4.24)$$
$$(m = 1, \dots, 3)$$

と設定した。これは、NEXCO 西日本が、FWD 調査によるアスファルト層の健全度評価区分²⁰⁾において採用している As 層厚の分類を参考にした。整理した分析データのサンプルサイズを表-4.2 に、ある 1 地点の調査回数ごとのデータ数を図-4.6 に示す。なお、期間中に IRI 値が 1 回しか測定されていないサンプルと IRI 値が回復したサンプルは除外している。

4.4.2 連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定結果

(1) パラメータ推定値と劣化パフォーマンスカーブ

ベースラインに関して、任意の経過時間における劣化管理指標の低下過程を柔軟に表現するために、時間の経過に対して単調増加するような関数の中から、ベースライ

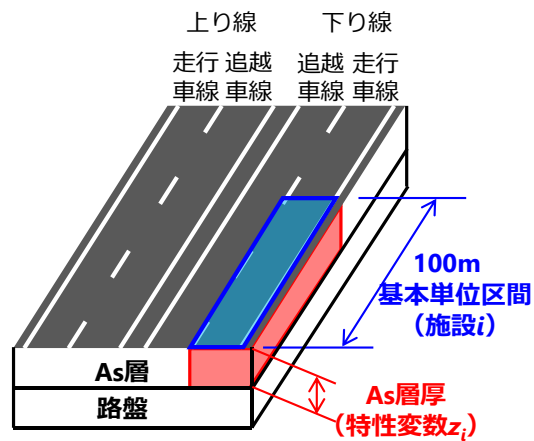


図-4.5 高速道路のアスファルト舗装の基本単位

表-4.2 サンプルサイズ

支社	As層厚(mm)		データ数
A	180 以上	220 未満	2858
	220 以上	260 未満	7799
	260 以上	350 未満	2535
B	180 以上	220 未満	3314
	220 以上	260 未満	9156
	260 以上	350 未満	756
C	180 以上	220 未満	4300
	220 以上	260 未満	538
	260 以上	350 未満	-
D	180 以上	220 未満	7625
	220 以上	260 未満	4462
	260 以上	350 未満	3244

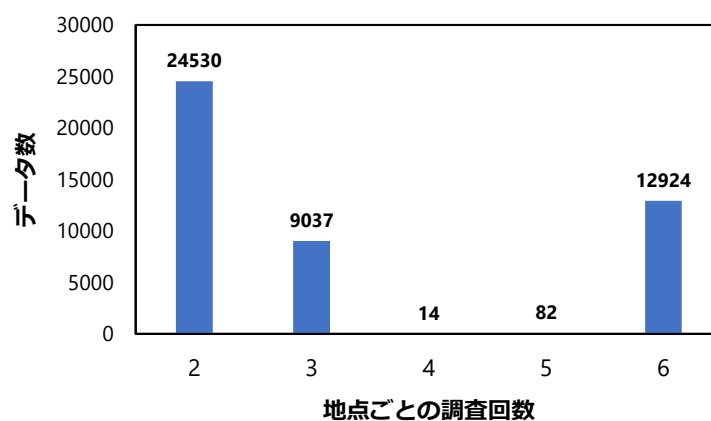


図-4.6 調査回数ごとのデータ数

ンモデルを選定する必要がある．本研究では，試行錯誤の結果として多項式モデル $f(t_i, \beta) = \beta_1 t^2 + \beta_2 t + \beta_3$ を採用した．以下では，多項式モデルをベースラインモデルとして分析した結果を述べる．

表-4.3 に β, θ, σ の未知パラメータの事後分布に関する統計量を示す．同表に示すように，90%ベイズ信用域と Geweke 検定統計量を用いることにより，推定された未知パラメータの信頼性と事後分布への収束性を議論することができる．本研究では，Geweke 検定量の絶対値が 1.96 を下回った場合，有位水準 5% で MCMC 法によるサンプルが事後分布に収束しているという帰無仮説を棄却できないと判断した．以下では，事後分布の期待値をそれぞれの未知パラメータの推定値として，連続量を用いた劣化ハザードモデルによる劣化予測結果を説明する．

図-4.7 に，NEXCO 西日本各支社の IRI について，連続量を用いた劣化ハザードモデルで推定した劣化パフォーマンスカーブを示す．同パフォーマンスカーブは，全ての区間の平均的な劣化過程を示している．IRI の劣化の傾向として，初期時点からある程度の期間は劣化パフォーマンスの低下が緩やかとなっており，供用年数が長くなるにつれて劣化パフォーマンスの低下が大きくなっていることが確認できる．また，劣化特性カテゴリについて，As 層厚の大きい道路区間の方が劣化パフォーマンスの低下を抑えられることが確認でき，IRI と As 層厚の関係について既往研究¹⁵⁾の考察と符合する．一方，支社ごとの IRI 値が補修目標値である 3.5mm/m に達するまでの時間に関して，A 支社では 14～17 年となっており，実務での経験的知見から得られる高速道路舗装の寿命との整合性が取れた結果となっている．これに対し，A 支社を除く 3 支社において，B 支社では 35～48 年，C 支社では 28～35 年，D 支社では 20～27 年となっており，A 支社とは大きく離れた結果が得られた．この結果の原因として，支社ごとに補修履歴情報の獲得状況が異なっていたことが考えられる．

(2) 補修履歴の獲得状況の影響

図-4.8 に，各支社の補修年月日の登録状況の分布を示す．NEXCO-PMS のシステム運用上，補修年月日が記録される項目欄が空欄となっていた地点に対して，補修年月日として供用開始年月日を記録している．そこで，図-4.8 の判例に，補修年月日と供用開始年月日が同一時刻で記録されているデータを「補修履歴なし」，補修年月日と供用開始年月日が異なる時刻で記録されているデータを「補修履歴あり」と区分して示している．A 支社は，ほぼ「補修履歴あり」となっており，現時点から 20 年程度にわたり満遍なく補修されている状況が窺える．図-4.7 の劣化パフォーマンスカーブで算出された寿命が 15 年程度となっていることから，A 支社の補修履歴の情報は正確に記録されていると考えられる．換言し，A 支社の舗装は，供用あるいは補修後，最大 20 年程度で補修が行われていると捉えると，期待寿命が 15 年程度となっている図-4.7

表-4.3 パラメータ推定結果

パラメータ	A 支社	B 支社	C 支社	D 支社
β_1	0.0115	0.0149	0.0228	0.0271
	(0.0109, 0.0121)	(0.0142, 0.0156)	(0.0200, 0.0249)	(0.0196, 0.0245)
	0.0119	-0.7588	0.4554	0.0119
β_2	0.1391	0.0139	0.0005	0.0004
	(0.1328, 0.1443)	(0.0113, 0.0167)	(0.00002, 0.0018)	(0.00001, 0.0015)
	0.5583	-0.6878	-0.6573	0.5583
β_3	0.7515	6.756	1.7512	0.2139
	(0.7228, 0.7779)	(6.4287, 6.9827)	(1.5363, 1.9870)	(0.1655, 0.2661)
	-1.9264	-0.8539	-1.4851	-1.9264
θ_1 180 以上 220 未満	0.3299	1.9469	1.5417	1.1967
	(0.2884, 0.3681)	(1.8984, 1.9851)	(1.4191, 1.6356)	(1.1575, 1.2364)
	0.6802	-0.7648	0.1677	1.2599
θ_2 220 以上 260 未満	0.4608	2.3832	1.9861	1.3919
	(0.4195, 0.4981)	(2.3354, 2.4225)	(1.8561, 2.0865)	(1.3519, 1.4343)
	0.6404	-0.7721	0.3773	1.5027
θ_3 260 以上 350 未満	0.5621	2.3695		1.6849
	(0.5187, 0.6019)	(2.3168, 2.4152)	-	(1.6396, 1.7278)
	0.7651	-1.1976		1.1614
σ	0.8477	0.4761	0.5536	0.8712
	(0.5439, 0.5648)	(0.4708, 0.4821)	(0.5429, 0.5646)	(0.8616, 0.8810)
	-0.3741	0.6261	1.1615	-0.8214

1 行目：期待値，2 行目：90%信頼区間，3 行目：Geweke 検定統計量

の劣化パフォーマンスカーブは，補修実態と照らし合わせて概ね妥当であると推定できる．ただし，NEXCO-PMS の補修履歴の記録は最新の情報のみが上書きされているため，最新の補修の 1 時点前の補修情報が不足しており，平均的な補修間隔を算定することは困難である．図-4.7 の劣化パフォーマンスカーブの精度に対して確度高く検証を行うためには，新規供用後からの補修情報をすべて記録する取り組みが必要である．

一方，B～D 支社については，最新の補修履歴の記録が正確に行われていない可能性がある．B 支社では直近 5 年よりも以前，C，D 支社については直近 10 年間の補修履歴が極端に少なくなっており，B，C 支社では供用開始から 1 回も補修されていないと

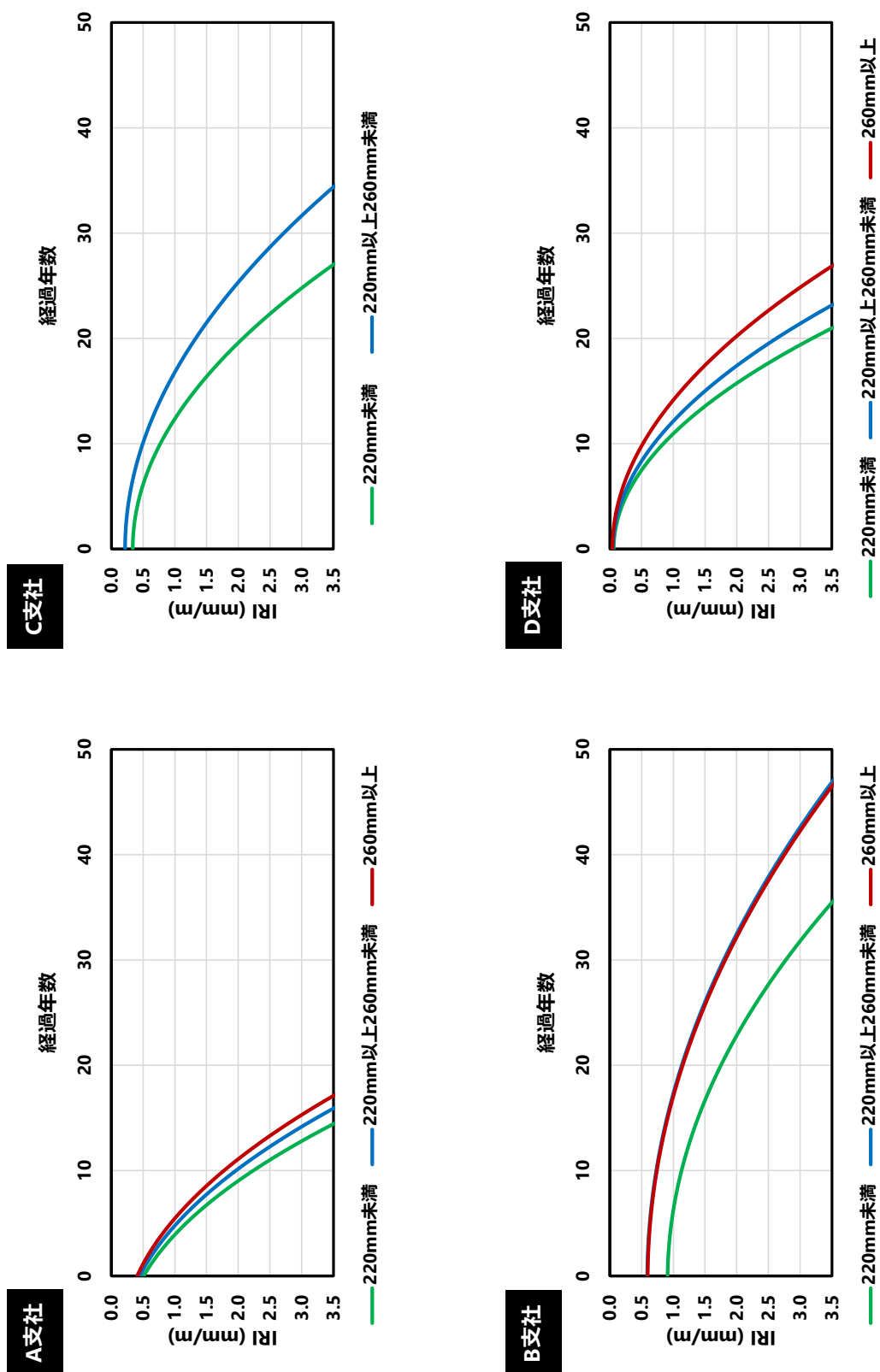


図-4.7 劣化パフォーマンスカーブ

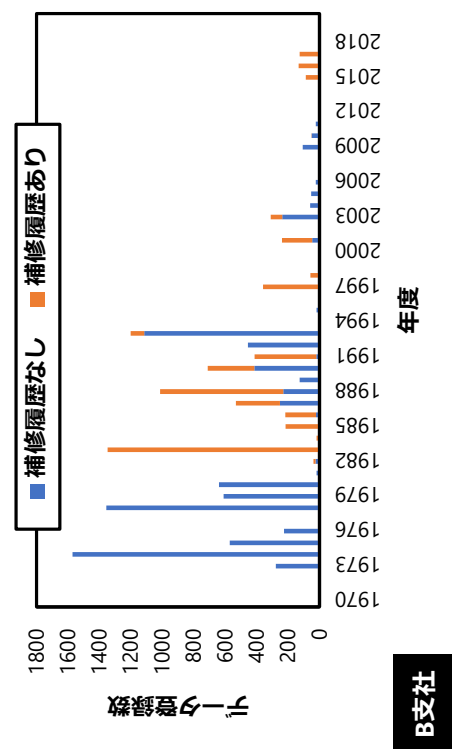
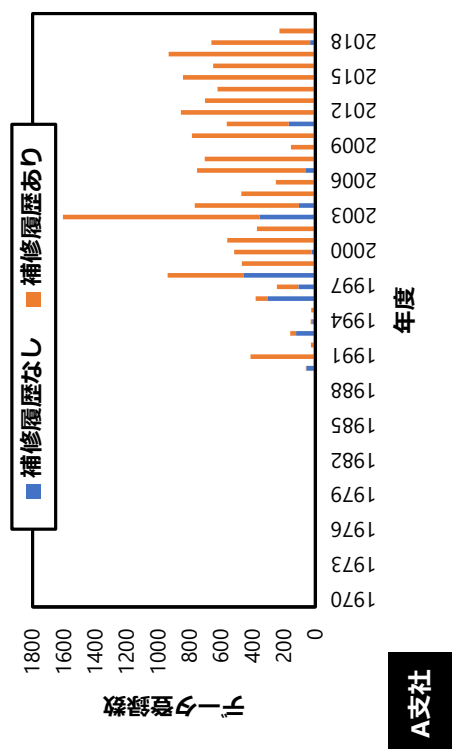
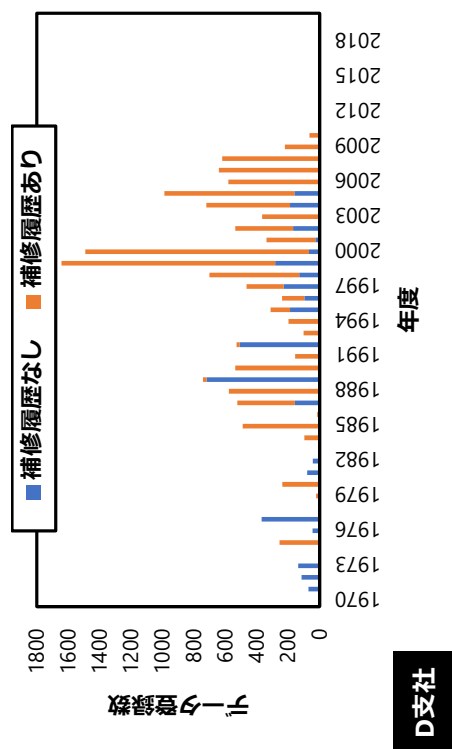
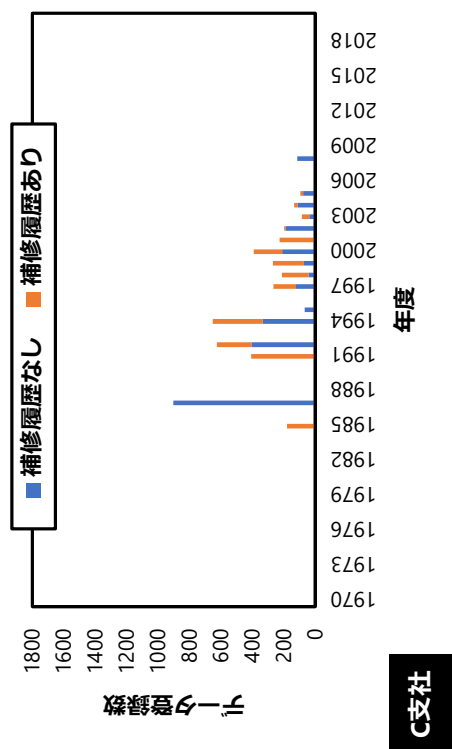


図-4.8 補修履歴の獲得状況

いう情報も相対的に多く記録されていることがわかる。図-4.7 と 図-4.8 の分析結果から、補修履歴が獲得されていないことにより、1 度目の路面性状調査までの期間が長期化し、連続量を用いた劣化ハザードモデルの期待寿命が長く推定されたと考えられる。そこで、B～D 支社に対して、直近の補修の実施年月日を獲得できなかった場合に適用できる図-4.4(b)に示すデータ獲得パターンを想定して分析を行った。本来であれば、調査間隔が不明である地点にのみ、調査間隔に対して確率変数を設定して分析を進めるべきであるが、B～D 支社においては最新の補修年月日の記録の信頼性が疑わしいデータが多く、全ての地点において確率変数を設定し、潜在変数ベクトル ξ を用いてモデルを推定することとした。その結果、潜在変数ベクトル ξ を用いずにモデルを推定した結果（図-4.7）と同様に、期待寿命が長く推定された結果が得られた、あるいはモデル推定において収束判定が満たされず推定不可能であった、というように望ましい結果は得られなかった。

原因として、全ての地点に対して調査間隔の確率変数を設定したことが考えられる。先述したように、確率変数は調査間隔が不明である地点に対して設定されるべきである。すなわち、補修が実施されたものの補修年月日が記録されていない地点に対してのみ設定される必要がある。しかしながら、便宜上区分した「補修履歴なし」は、補修年月日と供用開始年月日が同一時刻で記録されているデータとしているため、補修が実施されたものの補修年月日が記録されていない地点、補修が実施されていない地点、の二つが混在している。後者に関しては確率変数を設定するべきではないが、NEXCO-PMS 上では両者の区別をつけることができない実状がある。また、「補修履歴あり」においても、補修年月日と供用開始年月日が異なる時刻で記録されているデータとしているため、本来であれば確率変数の設定は不要である。確率変数を設定することは既知である調査間隔の情報を失わせることを意味する。しかしながら、B～D 支社のデータにおいては、舗装の耐用年数からみて補修年月日の記録が最新ではないと考えられるデータが数多く存在していたため、確率変数を設定せざるを得ない実状があった。

図-4.9 に B 支社の供用開始または補修からの経過時点とその時の IRI 値の散布図を示す。「補修履歴なし」のデータを青丸にて示している。「補修履歴なし」のデータが、補修が実施されたものの補修年月日が記録されていない地点のみのデータであれば、ほぼ全てのデータが図中の右上エリアにプロットされることが想定されるが、右下エリアにも「補修履歴なし」のデータが数多く見られる。右下エリアにプロットされた地点は補修が実施されていない地点も含まれており、調査間隔の確率変数を設定すべきではない地点と推察されるが、両者を区別することはできない。また、「補修履歴あり」のデータを橙丸にして示している。補修年月日が正確に記録されているのであれば、ほぼ全てのデータが図中の左エリアにプロットされることが想定されるが、中央

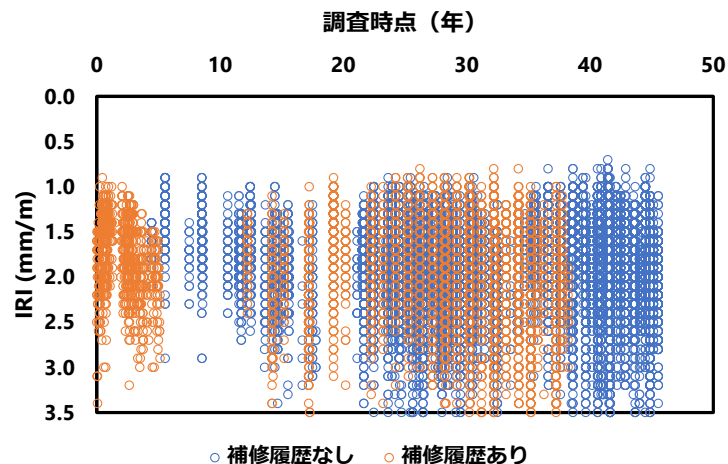


図-4.9 調査時点と IRI の関係

～右のエリアにも「補修履歴あり」のデータが数多く見られるため、補修年月日が正確に記録されていない可能性がある。当然のことながら、これらを区別することは不可能である。

以上より、既往研究¹⁴⁾において調査間隔が不明である不完全なデータに対して連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定する手法が提案されているものの、本研究で対象としている NEXCO-PMS に格納されている路面性状調査データを用いた場合には、データベースの不完全性により調査間隔が不明であるデータのみを分離することが困難であったため、適用が困難であることが判明した。なお、モデルの推定時、潜在変数ベクトル ξ の具体設定において、全ての地点において同一の潜在変数ベクトル ξ を設定する、全ての地点において異なった潜在変数ベクトル ξ を設定する、の2つのパターンを設定して分析を実施した。潜在変数ベクトル ξ の設定によって推定結果は変わると考えられるが、その他いずれの設定においても、先述した調査間隔を確率変数として設定すべき地点を分離することが困難であるという理由により、望ましい推定結果が得られるとは考え難い。連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定するためには、補修履歴に関する情報を確実に獲得・蓄積していくことが重要である。

なお、補修履歴が記録されていない一つの要因として、NEXCO-PMS におけるデータベースの基本単位と補修工事の工区割が一致しないことが考えられる。データベースでは、100m 間隔のキロポスト単位で各種データが整理されている。一方、補修現場では、補修費用の削減のために 100m より短い延長で補修することがある。そもそも、土工部／橋梁部の切替えがキロポスト 100m 単位でそろわず、土工部と橋梁部が接続する箇所は 100m の基本単位区間内にそれぞれの構造が含まれているため、補修工事

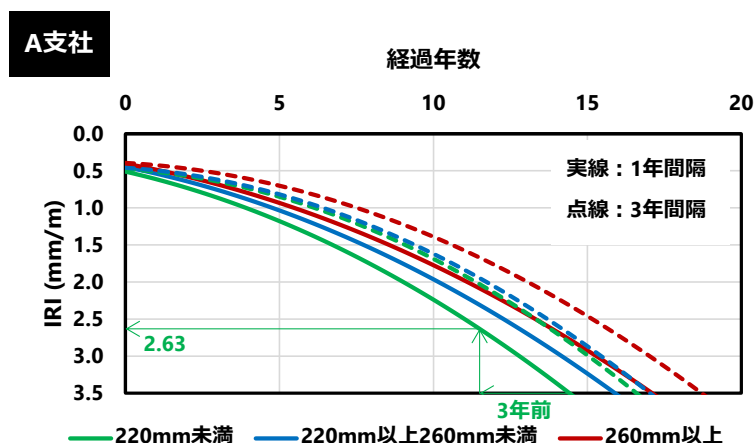


図-4.10 調査間隔による推定結果（A 支社）

実績を NEXCO-PMS 上に記録することが単純作業にはなっていない実状がある．これに対し，A 支社では，工事記録情報から 1m 間隔の補修履歴のデータを作成して NEXCO-PMS 上に記録している．NEXCO-PMS では，1m 間隔の補修情報を，100m 基本単位区間で最も小さいキロポスト（100m 基本単位区間で最も起点側）の情報を代表値として自動的に出力する機能を有している．今回の A 支社の分析結果から，このようにある程度の割り切りでルール化された入力データを用いても，実務上問題のない劣化予測結果を得ることができた．ただし，工事記録情報から 1m 間隔の補修履歴のデータ作成には多大な労力が必要となる．今後，高速道路舗装マネジメントの高度化に向けて補修履歴の確実な蓄積は極めて重要な作業であることから，工事記録情報と NEXCO-PMS の有機的な自動連携機能の開発が必要である．

4.4.3 調査間隔の違いによるモデル推定結果への影響

A 支社では，IRI に関する路面性状調査を 1 年間隔で実施しており，舗装補修工事の実施間隔の 1 年と合致している．したがって，実施計画を策定するうえで直近の調査データが存在することになり，精度の高い計画立案が可能となる．一方で，B～D 支社の調査間隔は 2～3 年となっており，A 支社においても調査費用やリソースの削減を考慮すると，調査間隔を延長できることが望ましい．そこで，補修情報が獲得されている A 支社のデータを用い，調査間隔の違いが連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定結果に与える影響を分析した．具体的には，2015～2020 年度の対象期間において A 支社ではほぼ全ての地点で 6 回の調査データを有するため，これを 3 年間隔すなわち 2 回分の調査データとして構成し直したうえで，ハザードモデルを推定した．推定結果を図-4.10 に示す．調査間隔の違いによる期待寿命の変化は，180mm 以上 220mm 未満

で 14 年→15.2 年, 220mm 以上 260mm 未満で 16 年→17 年, 260mm 以上 350mm 未満で 17 年→18.5 年となり, 調査間隔を 1 年から 3 年に変更することにより, 期待寿命が 1~1.5 年延びる結果となった。

しかしながら, 本研究の目的は, 連続量を用いた劣化ハザードモデルを用いて舗装補修工事の計画の策定を支援することにあるため, 補修目標値に到達する直前の 3 年分 (=調査間隔) の劣化速度に着目すればよい。そこで, 図-4.10 の 1 年間隔・As 層厚 180mm 以上 220mm 未満の劣化曲線に対する緑細線で示す例のように, 補修目標値である $IRI = 3.5 \text{ mm/m}$ に到達する 3 年前の IRI 値を調査間隔の違いで比較すると, 180mm 以上 220mm 未満で $2.63 \text{ mm/m} \rightarrow 2.58 \text{ mm/m}$, 220mm 以上 260mm 未満で $2.66 \text{ mm/m} \rightarrow 2.61 \text{ mm/m}$, 260mm 以上 350mm 未満で $2.72 \text{ mm/m} \rightarrow 2.67 \text{ mm/m}$ となり, 大きな影響は見られない。したがって, 補修工事の実施計画を支援するための連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定においては, A 支社の IRI に関する調査間隔は, 1 年から 3 年に変更可能であることが示唆された。

4.5 おわりに

本研究では、舗装補修計画の支援に用いる統計的劣化予測手法として、高速道路舗装の劣化管理指標が連続値で管理されていることを踏まえ、連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定した。分析には NEXCO-PMS に蓄積されているデータのうち、近年の高速道路舗装の課題である損傷の深層化を評価可能な IRI を使用した。IRI と As 層厚の関係性を考慮し、連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定において As 層厚を説明変数に採用したところ、IRI の劣化速度は As 層厚の影響を受け、As 層厚が薄い箇所ほど劣化が速い傾向を示した。NEXCO 西日本の 4 支社で比較した推定結果から、補修履歴の有無がモデルの推定に与える影響が大きく、今後のマネジメントでは補修履歴の確実な収集が必要であることを指摘した。

一方で、本研究に関して今後に残された課題がいくつかある。第 1 に、劣化ハザードモデルを推定する基本単位の検討が必要である。本研究では、4 支社単位でモデルの推定を実施した。しかしながら、舗装補修計画の支援といったプロジェクトレベルの問題を対象にするのであれば、例えば IC 区間など、モデルを推定する単位（範囲）は小さいほうが望ましいと考えられる。一方で、データ量の減少に伴い計算が収束しなくなるなどモデル推定の精度の低下が示唆される。したがって、材料条件や気候条件などの地域的な要因が舗装の劣化に与える影響を評価し、これらを説明変数に組み込んだ事例を蓄積することが望まれる。第 2 に、舗装の劣化過程に関する力学的モデルの検討があげられる。本研究では、試行錯誤の結果としてベースラインモデルに多項式モデルを採用した。しかしながら、本研究の方法論は、力学的手法と統計学的手法のハイブリット型モデルとして利用可能であることを特徴とする。近年、各地で実施された開削調査により、舗装深層部の実際の損傷状況を踏まえた舗装構造の破壊基準式が提案²¹⁾されており、これらと路面性状値の時系列データを関連付け、力学的に舗装の劣化過程を定義することが望まれる。第 3 に、本研究で推定した連続量を用いた劣化ハザードモデルの精度の検証があげられる。A 支社において蓄積されている補修履歴の情報は最新の情報のみとなっており、それ以前の補修履歴の情報が不明である。つまり、例えば平均補修間隔のような精度検証に必要な情報を算定することが、現時点では困難な状況にある。補修履歴を追加しなければならない B～D 支社も合わせ、さらなるデータの蓄積と分析を継続し、本研究で推定したモデルの精度検証と改善をしていく必要がある。

【付録】 データ獲得パターン 2 の場合の尤度関数

いま、施設 $i = I' + 1, \dots, I$ に対して獲得された調査サンプルがデータ獲得パターン 2 に該当し、補修・更新時点におけるデータが観測されていないと考える、1 回目の調査間隔 $d_1^i = t_1^i$ が観測不可能であるが、仮にその値が ξ である場合を考える。このとき、調査間隔 ξ_i の場合に調査データ $\bar{\mathbf{e}}_i$ が観測される尤度関数は、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_i(\bar{\mathbf{e}}_i, \xi_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma) &= \tau(\xi_i | \bar{\mathbf{x}}_1^i, \bar{\mathbf{z}}_i) \prod_{h=2}^{H_i} \tau(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i | \bar{\mathbf{x}}_h^i, \bar{\mathbf{z}}_i) \\ &= \frac{f_d(\xi_i)}{\sigma f(\xi_i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(\xi_i) - \ln \bar{\mathbf{x}}_h^i - \bar{\mathbf{z}}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) - \frac{\ln f(\xi_i) - \ln \bar{\mathbf{x}}_h^i - \bar{\mathbf{z}}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \\ &\quad \cdot \prod_{h=2}^{H_i} \left[\frac{f_d(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)}{\sigma f(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i) - \ln \bar{\mathbf{x}}_h^i - \bar{\mathbf{z}}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\ln f(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i) - \ln \bar{\mathbf{x}}_h^i - \bar{\mathbf{z}}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right\} \right] \end{aligned} \quad (\text{付 4.1})$$

$(i = I' + 1, \dots, I)$

と表現できパターン 1 の尤度関数に一致する。ただし、上記の尤度関数の中に含まれる潜在変数ベクトル $\boldsymbol{\xi} = (\xi_{I'+1}, \dots, \xi_I)$ は観測できない変数である。そこで式(4.26)を用いて、潜在変数の確率分布を推定することを考える。式(4.26)を用いて、潜在変数 $\xi_i (i = I' + 1, \dots, I)$ に関する条件付事後確率 $\Pr[\xi_i | \bar{\mathbf{e}}_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma]$ は、

$$\begin{aligned} \Pr[\xi_i | \bar{\mathbf{e}}_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\theta}, \sigma] &\propto \frac{f_d(\xi_i)}{f(\xi_i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(\xi_i) - \ln \bar{\mathbf{x}}_h^i - \bar{\mathbf{z}}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) - \frac{\ln f(\xi_i)}{\sigma} \right\} \\ &\quad \cdot \prod_{h=2}^{H_i} \left[\frac{f_d(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)}{f(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)} \cdot \exp \left\{ -\exp \left(\frac{\ln f(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i) - \ln \bar{\mathbf{x}}_h^i - \bar{\mathbf{z}}_i \boldsymbol{\theta}'}{\sigma} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\ln f(\xi_i + \sum_{a=2}^h \bar{d}_a^i)}{\sigma} \right\} \right] \end{aligned} \quad (\text{付 4.2})$$

と表現できる。本研究では、上記の尤度関数を用いて、MCMC 法により劣化予測モデルの未知パラメータと潜在変数を同時にサンプリングする。

参考文献

- 1) 高橋茂樹, 小野義道, 佐藤正和: 高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.3 (舗装工学論文集第20 巻), pp.I_93-I_101, 2015. [Takahashi, S., Ono, Y. and Sato, M.: Field survey to identify the important key factors for long term durability of asphalt pavement on expressways in Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.71, No.3 (Journal of Pavement Engineering, Vol.20), pp.I_93-I_101, 2015.]
- 2) 笠原篤: 舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/V-21, pp.1-12, 1993. [Kasahara, A.: State of the art of pavement management systems, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.478/V-21, pp.1-12, 1993.]
- 3) 日本道路協会: 舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針, 2018. [Japan Road Association: *Hosotenkenyoryonimotodukuhosomanejimentosisin*, 2018.]
- 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.69-82, 2005 [Tsuda, Y., Kaito, K., Aoki, K. and Kobayashi, K.: Estimating Markovian Transition Probabilities for bridge deterioration forecasting, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.]
- 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. [Kobayashi, K., Kumada, K., Sato, M., Iwasaki, Y. and Aoki, K.: A pavement deterioration forecasting model with reference to sample dropping, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.F*, Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.]
- 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. [Obama, K., Okada, K., Kaito, K., and Kobayashi, K.: Disaggregated hazard rates evaluation and bench-marking, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A*, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.]
- 7) 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, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.72, No.1, pp.34-51, 2016.]
- 8) 小林潔司, 貝戸清之, 小濱健吾, 早矢仕廉太郎, 深谷渉: 事業効率性評価のための確率的劣化フロンティア分析, 土木学会論文集 D3, Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016. [Kobayashi, K., Kaito, K., Obama, K., Hayashi, R. and Fukatani, W.: Stochastic deterioration frontier analysis for efficiency evaluation of management bodies, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.72, No.2, pp.173-190, 2016.]
- 9) 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方法, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.2, pp.125-139, 2018. [Mizutani, D.: A disaggregative estimation method of Markov transition probabilities with discontinuous transition of condition states, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.74, No.2, pp.125-139, 2018.]
- 10) 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, 土木学会舗装工学論文集, 第 14 巻, pp.229-237, 2009. [Kumada, K., Eguchi, M., Aoki, K., Kaito, K. and Kobayashi, K.: A pavement deterioration forecasting model in expressways based on monitor data, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Journal of Pavement Engineering*, Vol.14, pp.229-237, 2009.]
- 11) 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 (舗装工学), Vol.67, No.2, pp.91-110, 2011. [Mori, H., Fujiwara, E., Kaito, K., Kobayashi, K. and Hashimoto, T.: Investigating pavement structure deterioration with a relative evaluation model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.67, No.2, pp.91-110, 2011.]
- 12) 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 (舗装工学), Vol.70, No.2, pp.11-25, 2014. [Oi, A., Miyazaki, B., Obama, K., Kaito, K., Kobayashi, K. and Yamaguchi, K.: Deterioration prediction of expressway pavement with periodic FWD data,

- Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.70, No.2, pp.11-25, 2011.]
- 13) 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 (建設マネジメント), Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015. [Miyazaki, B., Kato, H., Obama, K., Kaito, K., Kazato, T. and Tanaka, K.: A proposal for evaluation method of pavement repair policy based on enormous data of road surface conditions, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.F4 (Construction and Management)*, Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.]
- 14) 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, pp.191-210, 2016. [Mizutani, D., Kobayashi, K., Kazato, T., Kaito, K. and Matsushima, K.: A continuous deterioration hazard model: application to pavement structure, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.72, No.2, pp.191-210, 2016.]
- 15) 中村和博, 松本大二郎, 小濱健吾, 川本熙鷹, 貝戸清之: 路面性状調査と日常点検のデータ連携に基づく高速道路舗装の新たな修繕施策, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.78, No.2, pp.I_200-I_210, 2023. [Nakamura, K., Matsumoto, D., Obama, K., Kawamoto, h. and Kaito, K.: New repair measures for expressway pavement based on data linkage of road surface condition survey and daily inspection, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.78, No.2, pp.I_200-I_210, 2023.]
- 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) Lee, E. T. and Wang, J. W.: *Statistical Methods for Survival Data Analysis*, John Wiley & Sons, 2003.
- 19) Cox, D. R. and Oakes, D.: *Analysis of Survival Data*, Chapman & Hall/CRC, 1998.

- 20) 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, 2023. [East Nippon Expressway Co., Ltd., Central Nippon Expressway Co., Ltd. and West Nippon Expressway Co., Ltd.: Tyosayoryo, 2023.]
- 21) 高橋茂樹, 加藤亮, 山口清人, 竹林宏樹 : アスファルト舗装の破壊実態を踏まえた新たな構造設計思想の提案, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.78, No.1, pp.52-69, 2022. [Takahashi, S., Kato, R., Yamaguchi, K., and Takebayashi, H.: Proposal for structural design of asphalt pavement based on the deterioration status in fields, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.78, No.1, pp.52-69, 2022.]

第 5 章 地域の環境・材料条件を考慮した 舗装構造設計手法

5.1 はじめに

舗装マネジメントのうち、第 2 章・第 3 章では、ネットワークレベルにおける高速道路舗装の現状を評価する方法を、第 4 章では、プロジェクトレベルにおけるメンテナンスサイクルの「措置」に該当する舗装補修計画の策定方法を検討した。これに対し、本章では、舗装ライフサイクルにわたる情報を有機的に連携し、それらを長寿命化に向けた舗装構造設計に反映する手法を具現化する。

高速道路舗装の構造設計は、原則として T_A 法を採用している。 T_A 法は、路床の設計 CBR と設計交通量（総通過 10t 換算軸数）から求められる T_A 値（等値換算厚）に基づいて、舗装各層の厚さを決定する手法である。 T_A 法は、一定のサービス水準を維持できる寿命を、舗装が置かれている地域の環境・材料条件にかかわらず一律に確保することを目的としている。しかし、西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 西日本）が管理する高速道路舗装では、長期間の供用により損傷の深層化が進展¹⁾し、寿命が地域（＝インターチェンジ区間（以下、IC 区間））によって異なることが報告されている^{2), 3)}。このため、高速道路舗装の長寿命化を図るうえで、舗装劣化要因の地域性を把握し、構造設計のパラメータとして採用することが重要である。

以上の問題意識のもと、本研究では、降雨量や骨材事情といった地域の環境・材料条件と舗装の劣化速度の関係を統計的に分析し、分析結果を舗装構造設計に活用する手法を提案する。以下、5.2 で、本章の基本的な考え方を述べる。5.3 では、本研究で用いる統計的劣化ハザードモデルの概要を説明する。そして、5.4 において、マルコフ劣化ハザードモデルを用いて、舗装の劣化速度に影響を与える要因を分析する。さらに、5.5 において、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて、NEXCO 西日本管内の舗装劣化速度を地域間で比較し、推定したパラメータ値から地域の環境・材料条件を考慮した舗装構造設計を提案する。

5.2 本章の基本的な考え方

5.2.1 T_A 法の課題

高速道路のアスファルト舗装の構造設計法の変遷を整理すると、名神高速道路：CBR 設計法，東名高速道路：SN 設計法，縦貫 5 道（東北，中央，北陸，中国，九州）～現在： T_A 法となる。名神高速道路の設計に適用された CBR 設計法では，基盤面となる路床の CBR に応じて舗装全厚を決定するが，舗装各層の構成は設計者の経験によるものであった。そのため，交通量に比してアスファルト混合物層の厚さが薄くなり，舗装の耐荷力不足につながった。東名高速道路の設計には，同時期に公表された米国の AASHO (American Association of State Highway Officials) 道路試験の知見を導入した SN 設計法が適用され，舗装全厚に加え，舗装各層に適用する混合物の強度を考慮した構造設計が可能となった。一方で，SN 設計法では，AASHO 道路試験の試験条件であった路床の CBR が 3 という特定の基盤条件での設計曲線のみしか設定されておらず，基盤条件が異なる場合の設計法が確立されていなかった。名神・東名に続く縦貫 5 道，それ以降の全国高速道路ネットワーク網の整備を考えると，建設地点の基盤条件は多岐にわたっており，東名での SN 設計法を踏襲しながらも，路床支持力の違いを加味し得るような設計法の開発が必要であった。そこで，設計条件が明確な東京，大阪，名古屋付近の一级国道で，当時のアスファルト舗装要綱の C 曲線に基づいて設計された舗装を選び，舗装の破壊状況，路床の CBR および舗装厚指数などの関係が調査された⁴⁾。調査の結果，舗装厚指数と CBR の関係の両対数紙上に，供用後 3 年以上経過しても構造的に欠陥がない区間と欠陥が生じた区間に境界線があることが見出された。そして，舗装厚指数を等値換算厚 T_A に，輪荷重を 10t 換算軸数に変換し，現在の高速道路舗装の構造設計に適用されている T_A 法の設計曲線が構築された。

路床の設計 CBR と設計交通量から舗装断面をカタログ的に決定できる T_A 法の簡便さは，全国各地に高速道路ネットワークを拡大してきた現在まで，高速道路舗装の構造設計の標準として採用されてきた。一方，舗装の寿命が地域によって異なる一つの要因として，我が国特有の複雑な気候や地質の条件を T_A 法では考慮できていない可能性が考えられる。今後，NEXCO 西日本の舗装事業は，改築工事や 4 車線化工事が主な対象となる。これらの事業は，既供用路線上で実施されるため，舗装の寿命が地域によって異なるという実態を考慮すると，現在までに蓄積してきた膨大な路面性状などのデータを分析したうえで，舗装の劣化過程の地域特性を構造設計に反映できる手法の検討が必要である。

5.2.2 供用実態を加味した舗装構造設計

インフラ構造物のライフサイクルを事業区分で考えると，計画→調査・設計→工事

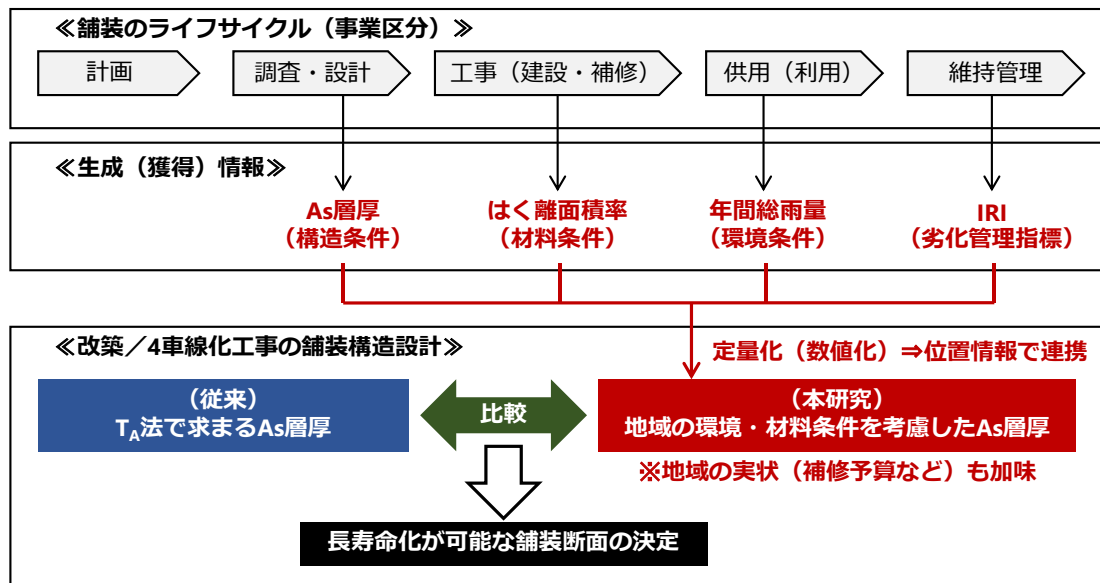


図-5.1 地域の環境・材料条件を考慮した高速道路の舗装構造設計手法

→供用（利用）→維持管理となる。各事業段階では多種多様な情報が生成され、ある事業で生成された情報は、同じ事業内の別の作業や次の事業で活用される⁵⁾。T_A法の課題が舗装の劣化の地域性を考慮できていない点にあるのであれば、今後の改築工事や4車線化工事の構造設計の実務において、当初建設時の情報や供用中の履歴をフィードバックする必要性が考えられる。近年の損傷の深層化の形態を考慮すると、フィードバックの際に有効なキーワードとして、「表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤の合計厚さ（以下、As層厚）」「はく離」「舗装内部への雨水の浸透」があげられる。そこで、本研究では、図-5.1に示すとおり、調査・設計段階で設定されるAs層厚（構造条件）、工事（新設工事および通常維持で実施する構造設計を伴わない補修工事を含む）の段階で確認される使用骨材のはく離面積率⁶⁾（材料条件）、供用（利用）段階における年間総雨量（環境条件）、維持管理の段階で獲得される路面性状値（劣化管理指標）を有機的に連携し、次の修繕（改築工事）あるいは建設工事（4車線化工事）の構造設計に反映させる手法を検討する。この際、1）改築工事や4車線化工事（先行的に路床まで仕上げられていることがある）においては、路床の置き換え（路床仕上がり高さの変更を含む）を実施することが困難で、路床支持力や舗装全厚の変更が不可能である場合があること、2）深層部の損傷への対策としてAs層厚の増厚が有効であると提案されている一方で、その具体的な手法が明示されていないこと、3）使用材料の観点では、高弾性アスファルト混合物（HiMA：High Modulus Asphalt）の開発やセメント安定処理路盤の強化が進んでいること、を考慮し、本研究では、特にAs層厚の設計方法に着目する。

具体的には、各条件を定量化したうえで膨大な路面性状データを地理空間的に関連付け、マルコフ劣化ハザードモデルにより舗装の劣化速度に与える影響を分析する。また、IC 区間の劣化速度の異質性を考慮できる混合マルコフ劣化ハザードモデルにより、舗装の劣化速度を地域間で比較し、各地域における As 層厚と舗装の寿命の関係を把握する。そして、改築工事や 4 車線化工事の舗装構造設計実務において、従来の T_A 法による計算結果と本研究の手法から求まる As 層厚を比較する。最終的に、補修に充てられる予算の規模や補修工事を実施するうえで必要な交通規制の容易さなど、舗装が置かれている実状を考慮したうえで舗装構造を決定する。この一連のプロセスを、高速道路舗装の損傷の深層化に対応し、長寿命化が可能となる施策の一つとして提案する。

なお、第 2 章で示したとおり、深層部の損傷は路面にポンピングや局部変形を引き起こし、路面の縦断プロファイルを入力値として算定する IRI (International Roughness Index : 国際ラフネス指数) が大きくなる傾向を確認している⁷⁾。また、IRI と As 層厚の間には関係性が見られ、As 層厚を厚くし舗装構造を強化することで、IRI を低く抑えられることを確認している⁷⁾。すなわち、路面性状調査で獲得できる IRI は深層部の損傷の進展を捉えられる可能性のある指標であると考えており、本章の分析においても IRI データを用いることとする。

5.3 統計的劣化予測モデルの概要

5.3.1 モデル化の前提条件

本研究で用いるマルコフ劣化ハザードモデル^{8), 9)}, 混合マルコフ劣化ハザードモデル¹⁰⁾は既往研究や成書¹¹⁾に詳しいが, 読者の便宜のためにモデルの概要について述べる.

カレンダー時刻 s_0 を初期時点とする離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考え, 離散的時間軸上の点を時点と呼び, カレンダー時刻と区別する. 単位時間幅を1に基準化する. 舗装の健全性を I 個の健全度 $i (i = 1, \dots, I)$ で表現する. i の値が大きくなるほど, 劣化が進展している. 時点 t における舗装の健全度を状態変数 $h(t) = i (i = 1, \dots, I; t = 0, 1, \dots)$ を用いて表現する. 舗装の劣化過程がマルコフ連鎖に従うと仮定し, 離散時間軸上の単位時間間隔における健全度間の推移確率をマルコフ推移確率を用いて表現する. 推移確率は, 時点 t における健全度 $h(t) = i$ を与件とし, 次の時点 $t + 1$ における健全度 $h(t + 1) = j (j \geq i)$ が生起する条件付確率

$$\text{Prob}[h(t + 1) = j | h(t) = i] = \pi_{ij} \quad (5.1)$$

を用いて定義される. このようなマルコフ推移確率は所与の2つの時点 $t, t + 1$ の間において生じる健全度間の推移確率を示したものであり, 当然のことながら, 対象とする調査間隔が異なれば推移確率の値は異なる. 補修がない限り常に劣化が進行するので, $\pi_{ij} = 0 (i > j)$ が成立する. また, 推移確率の定義より $\sum_{j=i}^I \pi_{ij} = 1$ が成立する. すなわち, マルコフ推移確率に関して,

$$\left. \begin{array}{l} \pi_{ij} \geq 0 \\ \pi_{ij} = 0 (i > j \text{ のとき}) \\ \sum_{j=i}^I \pi_{ij} = 1 \end{array} \right\} \quad (5.2)$$

が成立しなければならない. 健全度 I は, 補修のない限りマルコフ連鎖における吸収状態であり, $\pi_{II} = 1$ が成立する. なお, マルコフ推移確率は過去の劣化履歴には依存しない. マルコフ連鎖モデルでは, 健全度が $i - 1$ から i に推移した時点に拘わらず, 時点 t から時点 $t + 1$ の間に推移する確率は時点 t における健全度のみに依存するという性質(マルコフ性)を満足する.

5.3.2 モデルの定式化

(1) マルコフ劣化ハザードモデル

健全度 i の開始時刻を τ_{i-1} とし, 健全度 i の寿命 $\tau_i - \tau_{i-1}$ を確率変数 Z_i で表す. また, Z_i が従う確率分布の確率密度関数, 累積分布関数, 生存関数をそれぞれ f_i, F_i, S_i とする. ζ_i まで健全度 i が継続した条件の下で, 次の瞬間に健全度が $i + 1$ に推移する条件付き確

率をハザード関数 $\lambda_i(\zeta_i)$ を用いて表す． λ_i の定義は

$$\lambda_i(\zeta_i) = \lim_{dt \rightarrow +0} \frac{\text{Prob}[\zeta_i \leq Z_i < \zeta_i + dt | Z_i \geq \zeta_i]}{dt} \quad (5.3)$$

であり，

$$\lambda_i(\zeta_i) = \frac{f_i(\zeta_i)}{S_i(\zeta_i)} \quad (5.4)$$

となる． λ_i の選び方により様々なハザードモデルを提案できるが，マルコフ劣化ハザードモデルにおいては λ_i として ζ_i に依らない定数であるハザード関数

$$\lambda_i(\zeta_i) = \theta_i \quad (5.5)$$

を採用する．ただし， $\theta_i > 0$ である．このとき，

$$f_i(\zeta_i) = \theta_i \exp(-\theta_i \zeta_i) \quad (5.6)$$

$$S_i(\zeta_i) = \exp(-\theta_i \zeta_i) \quad (5.7)$$

$$F_i(\zeta_i) = 1 - \exp(-\theta_i \zeta_i) \quad (5.8)$$

が得られる．

ここで， $h(\tau_A) = i$ が生起した条件の下で $h(\tau_B) = j(> i)$ が生起する条件付き確率 $\pi_{ij}(z)$ は若干の計算により

$$\pi_{ij}(z) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_s} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_s} \exp(-\theta_s z) \quad (5.9)$$

と表される．表記の規則として

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_s} = 1 & s = i \text{ のとき} \\ \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_s} = 1 & s = j \text{ のとき} \end{cases} \quad (5.10)$$

が成立すると考える．式(5.9)をマルコフ劣化ハザードモデルと呼ぶ．マルコフ劣化ハザードモデルにおいて， τ_A から τ_B の間に健全度が i から j に推移する確率は，ハザード率 θ_i および τ_B と τ_A の差である z のみにより記述される．

(2) 混合マルコフ劣化ハザードモデル

混合マルコフ劣化ハザードモデルにおいては，式(5.5)に示されるハザード関数 λ_i に対して，IC 区間 $k(k = 1, \dots, K)$ ごとに固有なハザード率の変動特性を表す異質性パラメータ ε^k を導入する．すなわち，

$$\lambda_i^k(\zeta_i) = \theta_i \varepsilon^k \quad (5.11)$$

を考える．このとき， $h(\tau_A) = i$ が生起した条件の下で $h(\tau_B) = j(> i)$ が生起する条件付き確率 $\tilde{\pi}_{ij}^k(z)$ は若干の計算により

$$\tilde{\pi}_{ij}^k(z) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_s} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_s} \exp(-\theta_s \varepsilon^k z) \quad (5.12)$$

と表される．ただし，表記の規則として式(5.10)が成立しているとする．ここで，異質性パラメータ $\varepsilon^k (k = 1, \dots, K)$ が標準的なハザード率 θ_i からの乖離の程度を表す確率変数であり，平均1，分散 $1/\phi$ のガンマ分布

$$G(\varepsilon; \phi) = \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} (\varepsilon)^{\phi-1} \exp(-\phi \varepsilon) \quad (5.13)$$

から抽出された確率標本であると考え．このとき，式(5.12)において添え字 k は表記されなくなり，左辺は ε の条件付き確率 $\tilde{\pi}_{ij}(z|\varepsilon)$ となることに留意されたい．無条件確率 $\tilde{\pi}_{ij}(z)$ は若干の計算により，

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{ij}(z) &= \int_0^\infty \tilde{\pi}_{ij}(z|\varepsilon) G(\varepsilon; \phi) d\varepsilon \\ &= \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_s} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_s} \cdot \frac{\phi^\phi}{(\theta_s z + \phi)^\phi} \end{aligned} \quad (5.14)$$

となる．式(5.14)を混合マルコフ劣化ハザードモデルと呼ぶ．

5.3.3 モデルの推定方法

(1) 調査データの概要

高速道路舗装に対して，2つの異なる時点において路面性状調査が実施された場合を考える．IC 区間 $k (k = 1, \dots, K)$ の道路区間（基本単位 100m） $l_k (l_k = 1, \dots, L_k)$ に関して初回の調査が実施されたカレンダー時刻を $\bar{\tau}_A^{l_k}$ と表す．それから，時間 z^{l_k} が経過したカレンダー時刻 $\bar{\tau}_B^{l_k} = \bar{\tau}_A^{l_k} + z^{l_k}$ に2度目の調査が実施されたとする．記号「 $\bar{\tau}$ 」は実測値を表す． $\sum_{k=1}^K L_k = L$ 個のサンプルには，初回から2回目の調査が実施された時刻までの期間長 z^{l_k} と，2回の調査で計測された調査結果 $h(\bar{\tau}_A^{l_k})$ ， $h(\bar{\tau}_B^{l_k})$ に関する情報が利用可能である．調査時点の健全度に基づき，ダミー変数 $\delta_{ij}^{l_k}$ を

$$\delta_{ij}^{l_k} = \begin{cases} 1 & \bar{h}(\tau_A^{l_k}) = i, \bar{h}(\tau_B^{l_k}) = j \text{ のとき} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (5.15)$$

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

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

と定義する．さらに，ダミー変数ベクトルを $\bar{\delta}^{l_k} = (\bar{\delta}_{11}^{l_k}, \dots, \bar{\delta}_{I-1,I}^{l_k})$ ，舗装の劣化速度に影響を及ぼす構造特性や環境条件を表す特性行ベクトルを $\bar{x}^{l_k} = (\bar{x}_1^{l_k}, \dots, \bar{x}_M^{l_k})$ と表す．ただし $\bar{x}_m^{l_k} (m = 1, \dots, M)$ は IC 区間 k の調査情報サンプルに関する m 番目の特性変数の観測値を表す．また，第1番目の特性変数は定数項に該当する変数であり，恒等的に $x_1^{l_k} = 1$ である．定期的な調査で得られる IC 区間 k ，道路区間 l_k の調査サンプルが有する情報を $\xi^{l_k} = (\bar{\delta}^{l_k}, \bar{z}^{l_k}, \bar{x}^{l_k})$ と表す．また，調査データ全体を Ξ と表す．

(2) マルコフ劣化ハザードモデルの推定手法

道路区間 l_k の健全度 i における劣化過程を表現するハザード関数 $\lambda_i^{l_k}(\zeta_i^{l_k}) = \theta_i^{l_k}$ において、ハザード率 $\theta_i^{l_k}$ は特性ベクトル \mathbf{x}^{l_k} に影響を及ぼされ则认为、パラメータベクトル $\boldsymbol{\beta}_i$ を用いて

$$\theta_i^{l_k} = \exp(\mathbf{x}^{l_k} \cdot \boldsymbol{\beta}_i') \quad (5.16)$$

と表す。ただし、 $\boldsymbol{\beta}_i = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,M})$ は未知パラメータ $\beta_{i,m} (m = 1, \dots, M)$ による行ベクトル、記号「 $'$ 」は転置操作を表す。

いま、道路区間 l_k において、情報サンプル $\boldsymbol{\xi}^{l_k}$ が観測される確率は式(5.9)を用いて表すことができる。したがって、調査データ $\boldsymbol{\Xi}$ が観測される同時生起確率の対数、すなわち尤度関数 $\ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\Xi})$ は式(5.9)、式(5.16)を用いて

$$\ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\Xi}) = \sum_{k=1}^K \sum_{l_k=1}^{L_k} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \bar{\delta}_{ij}^{l_k} \ln[\pi_{ij}(\bar{\mathbf{z}}^{l_k}, \bar{\mathbf{x}}^{l_k}; \boldsymbol{\beta})] \quad (5.17)$$

と定義できる。 $\ln \mathcal{L}(\boldsymbol{\beta}; \boldsymbol{\Xi})$ を最大化するような最尤推定値 $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ は以下の連立方程式

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\hat{\boldsymbol{\beta}}; \boldsymbol{\Xi})}{\partial \beta_{i,m}} = 0 \quad (5.18)$$

の解として得られる。式(5.18)はNewton法を基本とする逐次反復法により解くことができる。

(3) 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定手法

道路区間 l_k の健全度 i における劣化過程を表現するハザード関数 $\lambda_i^{l_k}(\zeta_i^{l_k}) = \theta_i^{l_k} \varepsilon^k$ において、ハザード率 $\theta_i^{l_k}$ は特性ベクトル \mathbf{x}^{l_k} に影響を及ぼされ则认为、パラメータベクトル $\boldsymbol{\beta}_i$ を用いて

$$\theta_i^{l_k} = \exp(\mathbf{x}^{l_k} \cdot \boldsymbol{\beta}_i') \quad (5.19)$$

と表す。ただし、 $\boldsymbol{\beta}_i = (\beta_{i,1}, \dots, \beta_{i,M})$ は未知パラメータ $\beta_{i,m} (m = 1, \dots, M)$ による行ベクトルを表す。混合マルコフ劣化ハザードモデルは式(5.14)で示したように、各健全度におけるハザード率 $\theta_i^{l_k}$ と異質性パラメータ ε^k の確率分布の分散パラメータ ϕ を用いて表現できる。したがって、未知パラメータベクトルを $\mathbf{v} = (\boldsymbol{\beta}_1, \dots, \boldsymbol{\beta}_{I-1}, \phi)$ としたとき、調査データ $\boldsymbol{\Xi}$ が観測される同時生起確率の対数、すなわち対数尤度関数 $\ln \mathcal{L}(\mathbf{v}; \boldsymbol{\Xi})$ は式(5.14)、式(5.19)を用いて

$$\ln \mathcal{L}(\mathbf{v}; \boldsymbol{\Xi}) = \sum_{k=1}^K \sum_{l_k=1}^{L_k} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \bar{\delta}_{ij}^{l_k} \ln[\tilde{\pi}_{ij}(\bar{\mathbf{z}}^{l_k}, \bar{\mathbf{x}}^{l_k}; \mathbf{v})] \quad (5.20)$$

と定義できる。 $\ln \mathcal{L}(\mathbf{v}; \boldsymbol{\Xi})$ を最大にするような最尤推定値 $\hat{\mathbf{v}}$ は

$$\frac{\partial \ln \mathcal{L}(\hat{\mathbf{v}}, \Xi)}{\partial v_i} = 0 \quad (5.21)$$

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

を同時に満足するような $\hat{\mathbf{v}} = (\hat{\boldsymbol{\beta}}_1, \dots, \hat{\boldsymbol{\beta}}_{I-1}, \hat{\phi})$ として与えられる.

続いて、確率標本であるとした異質性パラメータ ε^k の実現値を推定する. 異質性パラメータがガンマ分布 $G(\varepsilon; \phi)$ (式(5.13)を参照) に従い、パラメータの最尤推定値 $\hat{\mathbf{v}} = (\hat{\boldsymbol{\beta}}_1, \dots, \hat{\boldsymbol{\beta}}_{I-1}, \hat{\phi})$ を与件としたとき、IC 区間 k に属する L_k 個の情報サンプル $\boldsymbol{\xi} = (\xi^1, \dots, \xi^{L_k})$ が観測される同時生起確率 $\rho^k(\varepsilon^k; \hat{\mathbf{v}}, \boldsymbol{\xi})$, すなわち部分尤度は

$$\rho^k(\varepsilon^k; \hat{\mathbf{v}}, \boldsymbol{\xi}) = \prod_{l_k=1}^{L_k} \prod_{i=1}^I \prod_{j=1}^I \{\tilde{\pi}_{ij}(\bar{z}^{l_k}, \bar{\mathbf{x}}^{l_k}, \hat{\boldsymbol{\beta}}; \varepsilon^k)\}^{\bar{\delta}_{ij}^{l_k}} G(\varepsilon^k; \hat{\phi}) \quad (5.22)$$

と定義できる. 式(5.22)の両辺の対数をとることにより部分対数尤度は,

$$\ln \rho^k(\varepsilon^k; \hat{\mathbf{v}}, \boldsymbol{\xi}) = \sum_{l_k=1}^{L_k} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I \bar{\delta}_{ij}^{l_k} \ln[\tilde{\pi}_{ij}(\bar{z}^{l_k}, \bar{\mathbf{x}}^{l_k}, \hat{\boldsymbol{\beta}}; \varepsilon^k)] + \ln\{G(\varepsilon^k; \hat{\phi})\} \quad (5.23)$$

と表せる. したがって、異質性パラメータ $\varepsilon^k (k = 1, \dots, K)$ の条件付きの最尤推定値は、最大化問題

$$\max_{\varepsilon^k} \{\ln \rho^k(\varepsilon^k; \hat{\mathbf{v}}, \boldsymbol{\xi})\} \quad (5.24)$$

の最適解 $\hat{\varepsilon}^k$ として求めることができる.

5.4 地域の環境・材料条件による舗装の劣化速度

5.4.1 環境・材料条件の定量化と地理空間的連携

高速道路舗装の劣化速度を評価するにあたり、本研究では、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（以下、NEXCO3 会社）が共同で開発した舗装マネジメントシステム（以下、NEXCO-PMS）に格納されている路面性状データのうち、舗装の深層部の損傷の進展を捉える可能性がある IRI⁷⁾に着目した。NEXCO-PMS 上において、路面性状データは 100m 単位で記録されており、本研究においても基本単位区間を 100m とした。分析にあたり、路面性状調査により獲得された IRI は、表-5.1 に示すとおり離散的な健全度に変換した。分析対象期間は、NEXCO 西日本における路面性状調査の最大間隔 3 年を考慮し、2 時点のデータが獲得されている可能性が高い 2015 年度～2020 年度の 6 年間とした。

NEXCO-PMS は、舗装構成データベース（以下、舗装構成 DB）と路面性状データベース（以下、路面性状 DB）で構築されている。舗装構成 DB には、位置情報（路線名、キロポスト、上下線種別、車線（走行／追越））、舗装各層の種別、舗装各層の厚さが記録されている。路面性状 DB には、路面性状調査によって獲得された路面性状値が調査年度ごとに記録されている。本研究では、舗装構成 DB と路面性状 DB のデータを位置情報で連携し、さらに路面性状データについては、基本単位区間の 100m ごとに時系列データとして整理した。

本研究では、損傷の深層化に対応し長寿命化に向けた舗装構造設計手法の提案として、As 層厚の増厚に着目している。したがって、舗装構成 DB に入力されている舗装各層の厚さの情報が重要である。このため、各層の厚さが、表層 4cm、基層 6cm、アスファルト安定処理上層路盤 8cm～25cm、舗装全厚 35cm～55cm、と、実務上、現実的な値が記録されている舗装区間を分析の対象とした。表層種別については、NEXCO 西日本の管理エリアの高機能舗装化率（管理車線延長のうち、表層に高機能舗装を適用している割合）が約 9 割に達している実態から、分析にあたり区別しないこととした。下層路盤の種別や路床の設計 CBR については、1) 本研究で主に対象としている 4 車線化や改築事業において、現地レベルで路床や下層路盤の変更が困難である場合があること、2) そもそも舗装構成 DB でこれらの情報が不足していること、から、分析にあたり区別しないこととした。このように整理したデータベースから、2 時点の健全度ペアを 1 サンプルとし、時点の進行に伴い健全度が回復しているサンプルは除外し、最終的に分析対象とした路面性状データのサンプルサイズは 122,942 となった。分析対象の事前健全度－事後健全度ごとのサンプルサイズを表-5.2 に示しており、過去の統計分析事例から、パラメータ推定に影響を与えるような不具合はないと考えられる。

劣化速度の推定にあたり、近年の損傷の深層化は As 層厚の薄い区間で顕著であるこ

表-5.1 IRI の健全度区分

健全度	IRI (mm/m) の範囲
1	$IRI \leq 1.0$
2	$1.0 < IRI \leq 1.5$
3	$1.5 < IRI \leq 2.0$
4	$2.0 < IRI \leq 2.5$
5	$2.5 < IRI \leq 3.0$
6	$3.0 < IRI \leq 3.5$
7	$3.5 < IRI$

表-5.2 分析データのサンプルサイズ

		事後健全度						
		1	2	3	4	5	6	7
事前健全度	1	3,535	2,575	476	86	20	8	9
	2	-	31,895	12,855	2,745	623	192	98
	3	-	-	30,722	10,183	2,308	497	287
	4	-	-	-	11,644	3,898	959	472
	5	-	-	-	-	3,102	1,142	514
	6	-	-	-	-	-	748	469
	7	-	-	-	-	-	-	880

とから、構造条件として As 層厚を採用した。ここで、一般的に、舗装の劣化に交通条件（大型車交通量）が影響することが考えられている。しかし、高速道路舗装の構造設計に T_A 法が適用されていることを考慮すると、既往文献²⁾においても報告されているとおり、交通量の多い区間は As 層厚が厚くなっていると推測され、As 層厚を用いた分析により交通条件の影響を包含できると考え、本研究では交通量による分析は対象外とした。また、As 層厚を説明変数に採用することにより、 T_A 法で構築されている舗装に対し、設計 CBR の影響も含まれるものと考えられる。

次に、深層部の損傷の主要因が雨水の浸透であることを考慮し、地域の環境条件として年間総雨量を採用した。なお、環境条件としては、雨量のほかに気温があげられるが、予備検討において舗装の劣化速度と明確な関連が見られなかったことから、本研究では対象外とした。この理由として、1) 舗装深層部の損傷に対しては、気温が影響しない可能性が考えられること、2) アメダスの気温データを本線に紐づける際、平面的な距離関係で重み付けを行ったが、標高による気温変化を考慮できていないこと、が考えられる。

さらに、アスファルト安定処理上層路盤の疲労ひび割れ周辺にははく離が確認され

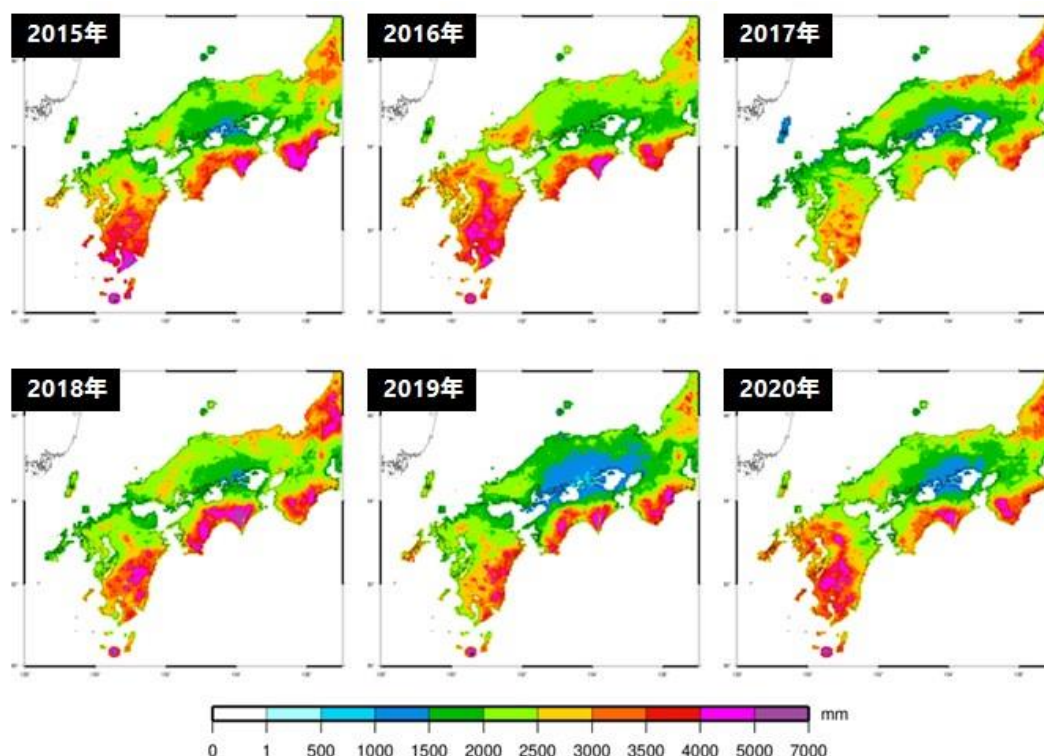


図-5.2 年間総雨量（1km メッシュ）

ていることから，材料条件として地域の骨材事情の影響を考慮するため，使用骨材のはく離抵抗性を採用した．

(1) 構造条件：As 層厚

NEXCO-PMS には，路面性状データに紐づくかたちで舗装構成に関するデータも蓄積されており，記録されている As 層厚を構造条件として使用した．

(2) 環境条件：年間総雨量

NEXCO 西日本では，各種構造物の排水設計に用いる降雨強度図を作成するため，雨量に関する様々なデータを整理している．このうち，本研究の分析には年間総雨量（図-5.2）を採用した．年間総雨量データの収集期間は路面性状データと同様の 2015～2020 年とし，分析には 6 年間の平均値を使用した．

年間総雨量は座標が付与された 1km メッシュで算出されている．そこで，図-5.3 に示すとおり，年間総雨量メッシュ上に高速道路の位置を地理空間的に合わせ，各キロポストと各メッシュの中心座標の距離を算出し，最も近いメッシュを該当メッシュとし，その値を該当キロポストの降雨量データとして関連付けた．

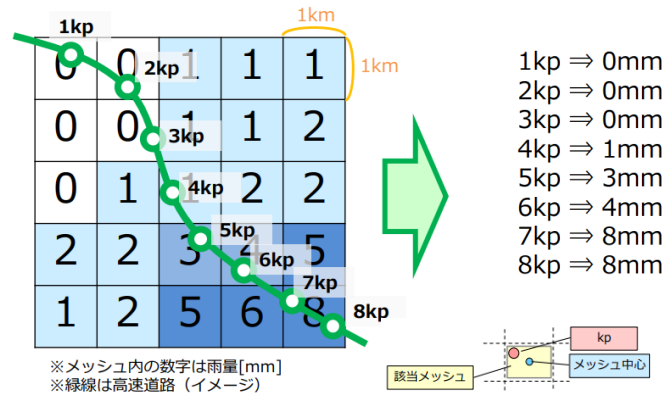


図-5.3 降雨量データの地理空間的連携

(3) 材料条件：骨材のはく離面積率

NEXCO 西日本では、各プラント単位で実施される舗装工事の配合設計において、アスファルト被膜のはく離試験方法により、使用骨材のはく離抵抗性をはく離面積率で確認している。本研究では、NEXCO 西日本が実施した舗装工事において、2021 年度に報告された各プラントの配合設計書から、ストレートアスファルトで試験を実施したはく離面積率のデータベースを作成した。

ここで、アスファルト混合物は、適正な温度範囲内で施工に使用する必要があることから、運搬時間が長くなることによる混合物の温度低下リスクを考慮し、一般的に工事箇所の近隣のプラントから出荷されることとなる。一方で、NEXCO-PMS には、出荷プラントの情報は記録されていない。また、高速道路を対象とした場合、各プラントからの混合物の供給可能範囲は、高速走行による運搬時間の短縮や運搬時の混合物の保温対策の実施によって広域となり、その限界値を設定することは困難である。

そこで、本研究では、はく離面積率のデータベースで対象としたすべてのプラント（77 箇所）の情報を扱い、各プラントの位置と本線の平面的な距離で重み付けを行い、はく離面積率の情報を地理空間的に高速道路のキロポストへ関連付けた。すなわち、図-5.4 に示すとおり、プラント $i (i = 1, \dots, I)$ について、プラントの位置情報を X_i 、プラントにおけるアスファルトはく離面積率を z_i とすると、高速道路本線のある位置 X におけるはく離面積率 $\hat{z}(X)$ は、逆距離加重法¹²⁾により

$$\hat{z}(X) = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i} \quad (5.25)$$

$$w_i = |X - X_i|^{-1}$$

と表される。このようにして高速道路本線の位置に関連付けたはく離面積率を図-5.5 に示す。図中の丸はプラントの位置を、線は高速道路本線の位置を表しており、色分

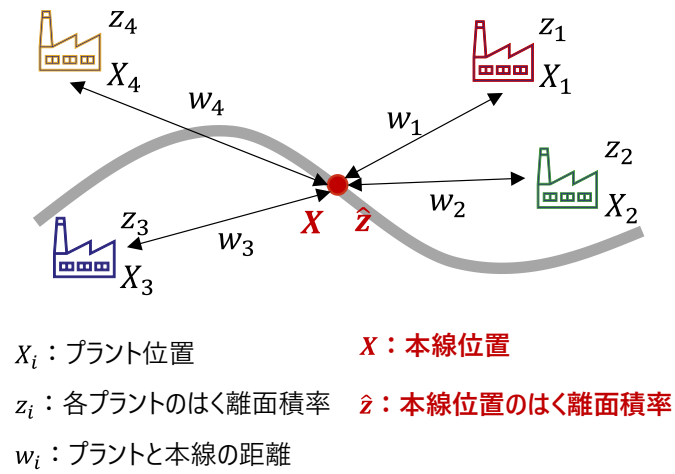


図-5.4 はく離面積率の地理空間的連携

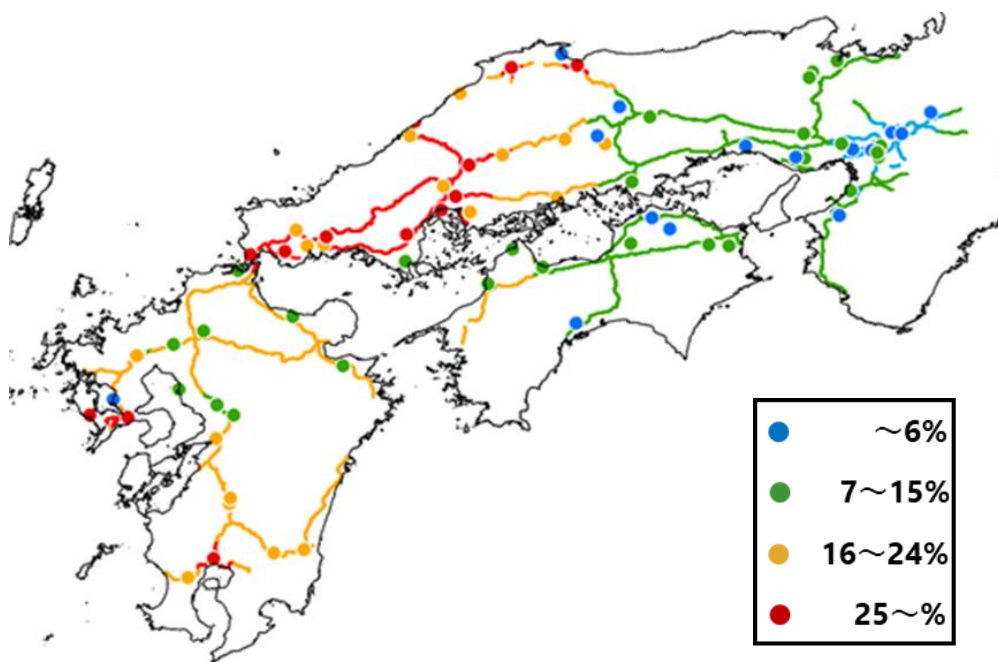


図-5.5 はく離面積率のマッピング結果

けははく離面積率の値を表している。本図から、地域によって骨材のはく離面積率が異なることが確認できる。

5.4.2 マルコフ劣化ハザードモデルの推定結果

地域の環境・材料条件が舗装の劣化に与える影響を確認するため、前節で整理した説明変数を用い、IRIの劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルにより推定した。なお、構造条件、環境条件、材料条件の影響を個々に評価するため、それぞれ個別にモデルを推定した。マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定結果を表-5.3に、劣化曲線を図-5.6に示す。なお、モデルの推定に際し、各説明変数の説明力に関する仮説を有意水準5%とし、t検定で棄却されない説明変数の組み合わせの中から、最もAIC¹³⁾が小さくなる説明変数の組み合わせを選択した。ここで、表-5.3のパラメータ推計結果について、推定値から算出されるハザード率 $\theta_i = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2)$ の値が大きいくほど、劣化の進行が早くなる。すなわち、 $\beta_{i,2}$ の値が負であれば、その説明変数の影響によりIRIの劣化速度は遅くなり、 $\beta_{i,2}$ の値が正であれば、IRIの劣化速度は速くなる。各説明変数によりIRIの劣化過程は問題なく推定され、IRIの期待寿命や、構造条件・環境条件・材料条件による劣化速度の差異は実務者の経験に沿うものとなっていることから、本分析結果は概ね妥当であると考えられる。

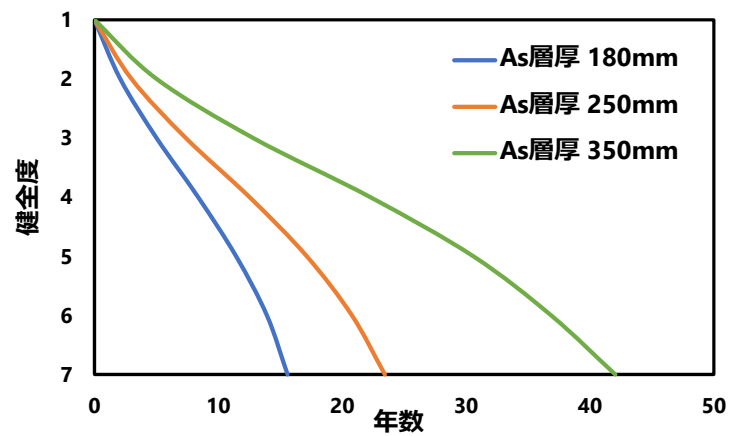
表-5.3(a)および図-5.6(a)は構造条件：As 層厚を説明変数にした分析結果である。As 層厚は、本研究の分析対象とした180mm～350mmを0～1で正規化している。この結果から、As 層厚が厚いほどIRIの劣化が遅くなっており、高速道路舗装の構造設計におけるAs 層厚の最低値である180mmの区間の寿命は16年であるのに対し、As 層厚250mmの区間の寿命は23年で約1.4倍、As 層厚350mmの区間の寿命は42年で約2.6倍となっている。高速道路舗装の構造設計に適用しているTA法は、路床の設計CBRと設計交通量（総通過10t換算軸数）から、同一の寿命が得られるTA値（等値換算厚）を求め、舗装各層の厚さを決定する手法である。しかしながら、本分析により、As 層厚の違いによって舗装の寿命が大きく異なることが明らかとなった。

表-5.3(b)および図-5.6(b)は、環境条件：年間総雨量（2015～2020年の平均値）を説明変数にした分析結果である。年間総雨量についても、最小雨量1,344mm～最大雨量4,480mmを0～1で正規化している。この結果から、年間総雨量が多いほどIRIの劣化が速くなっており、最小雨量1,344mmの区間の寿命は22年であるのに対し、全エリアの平均雨量2,001mmの区間の寿命は20年で0.9倍、最大雨量4,480mmの区間の寿命は15年で0.7倍となっている。なお、パラメータ推定結果を見ると、健全度ランクが大きくなるにつれて正の値が大きくなる傾向が伺える。これは、健全度ランクが小さいデータを供用開始（補修）後の年数が短い区間、健全度ランクが大きいデータを供用開始（補修）後の年数が長い区間と捉え、舗装深層部への雨水の浸透は供用年数の増加とともに徐々に進行し、年間総雨量が多い地域ほど深層部の損傷への影響が大きくなることを示唆している。

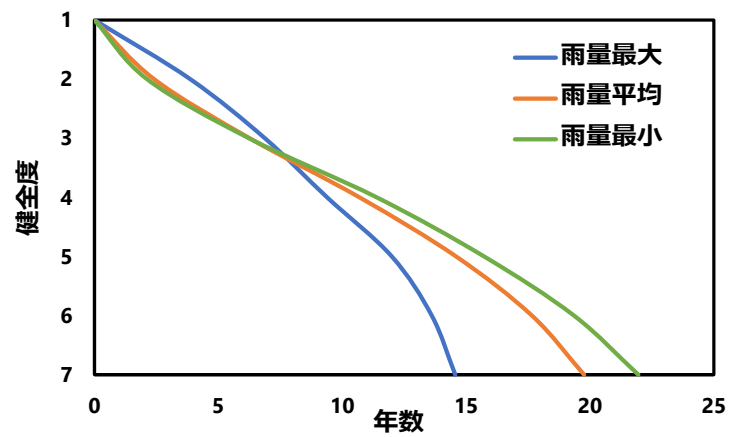
表-5.3(c)および図-5.6(c)は材料条件：はく離面積率を説明変数にした分析結果で

表-5.3 マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定結果

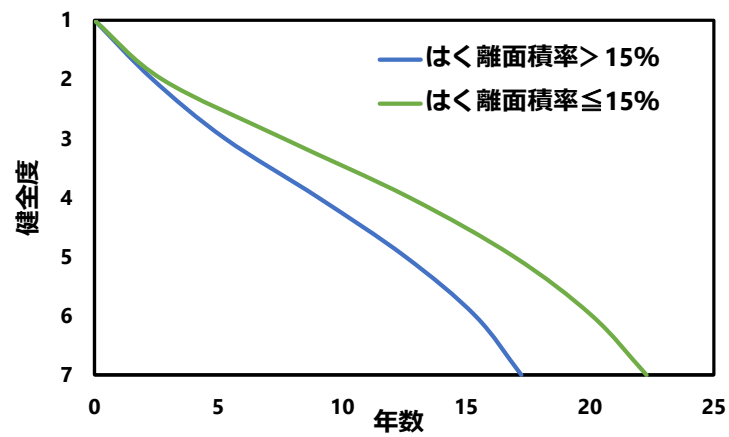
(a) As層厚				(b) 年間総雨量				(c) はく離面積率			
健全度 ランク	βの推定値		As層厚	健全度 ランク	βの推定値		年間総雨量	健全度 ランク	βの推定値		はく離面積率
	定数項				定数項				定数項		
1	-0.7333	-0.8794 (-10.5)		1	-0.7522	-0.6000 (-4.3)		1	-1.0049	0.1510 (4.1)	
2	-1.0748	-0.9793 (-26.6)		2	-1.4148	0.3125 (5.3)		2	-1.5882	0.5175 (33.1)	
3	-1.2106	-1.0353 (-27.8)		3	-1.6399	0.7196 (11.7)		3	-1.6267	0.2995 (19.1)	
4	-1.1199	-0.9979 (-19.5)		4	-1.4661	0.5064 (5.9)		4	-1.4381	0.1820 (8.5)	
5	-0.9101	-0.9276 (-12.1)		5	-1.2881	0.8810 (5.8)		5	-1.1481	0.1097 (3.4)	
6	-0.5109	-1.1334 (-9.1)		6	-0.9542	1.0076 (4.5)		6	-0.7864	0.1678 (3.3)	
AIC		194.801	※(): t値	AIC		197.164	※(): t値	AIC		195.739	※(): t値



(a) As 層厚



(b) 年間総雨量



(c) はく離面積率

図-5.6 マルコフ劣化ハザードモデルによる劣化曲線

ある。はく離面積率は、NEXCO 西日本の品質管理規定である 15%を基準に、15%以下と 15%超の 2 カテゴリに分類している。この結果から、はく離面積率の値が 15%超では IRI の劣化が速くなっており、はく離面積率が 15%以下の寿命は 22 年であるのに対し、はく離面積率が 15%より大きい区間の寿命は 17 年で約 0.8 倍になっている。ここで、本研究で分析の対象としたほとんどのプラントは、表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤に同じ骨材（粒形は異なる）を使用していることを確認している。これを前提としたうえで、NEXCO 西日本では、表層および基層用混合物の使用骨材が品質管理規定であるはく離面積率 15%以下を満足しない場合、はく離防止剤の添加や改質アスファルトを使用することで混合物の耐水性を高め、最終的に水浸ホイールトラッキング試験により混合物としての使用可否を判定している。一方、本研究で着目している舗装構造の深層部であるアスファルト安定処理上層路盤の配合設計では、これらの基準が適用されていない。開削調査の結果において、アスファルト安定処理上層路盤の下面に発生している疲労ひび割れ周辺には、はく離が生じているということも考慮すると、本研究の分析結果において骨材の良否により舗装の劣化速度に違いが生じた理由は、はく離面積率の高い骨材が無対策で使用されているアスファルト安定処理上層路盤の耐久性の差が影響している可能性が示唆される。

5.5 長寿命化に向けた舗装構造設計

5.5.1 混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定結果

混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定の単位は、高速道路の IC 区間を 1 グループとし、分析の対象は 381 グループとなった。混合マルコフ劣化ハザードモデルの説明変数は、前節において舗装の劣化速度に影響を与えることが明らかになった、As 層厚、年間総雨量、骨材のはく離面積率を採用した。なお、モデルの推定に際し、各説明変数の説明力に関する仮説を有意水準 5% とし、t-検定で棄却されない説明変数の組み合わせの中から、最も AIC が小さくなる説明変数の組み合わせを選択した。

混合マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定結果を表-5.4、図-5.7 に、各 IC 区間の劣化曲線を図-5.8 に示す。表-5.4 から、混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定においても、As 層厚、年間総雨量、はく離面積率は、IRI の劣化に対し説明変数として統計的に有意であることが確認できる。このうち、As 層厚は、全ての健全度ランクにおいて As 層厚が厚くなるほど IRI の劣化速度が遅くなる傾向を示しており、舗装の劣化速度に対して As 層厚の影響が大きいことが確認できる。また、環境条件：年間総雨量は健全度ランク 5～6 において、材料条件：骨材のはく離面積率は健全度ランク 2～4 において影響している。これらの分析結果は、開削調査結果から得られた舗装深層部の損傷メカニズムを定量的に表現できる可能性を示唆している。すなわち、舗装内部への雨水の浸透により、最初に、As 層厚が薄く、かつ、はく離抵抗性に劣る骨材の使用地域において、アスファルト安定処理上層路盤の混合物にはく離が生じ、交通荷重等の蓄積と合わせて疲労ひび割れの発生の原因となる。次に、深層部の損傷形態として問題になっている下層路盤の脆弱化、永久変形について、開削調査の結果³⁾として、下層路盤の含水比は不変ではなく、供用とともに増加し、それに伴って永久変形が徐々に進行し始めることを報告している。これを本研究の結果に照らし合わせると、時間の経過に伴い年間総雨量の多い地域ほど舗装内部への雨水の浸透量が増加し、下層路盤の含水比の変化により、脆弱化、永久変形が生じ、最終的に路面に大きな凹凸が生じる（IRI が大きくなる）原因になっていると考えられる。

図-5.7 に示す異質性パラメータの頻度分布の平均は 0.944、分散は 0.261 であった。分析の対象とした IC 区間の中で、異質性パラメータの最小値は 0.131、最大値は 3.346 であり、地域により異質性パラメータが異なっていることが確認できる。また、図-5.8 に示すとおり、各 IC 区間（地域）による IRI の劣化過程を記述し、舗装の期待寿命が各 IC 区間で大きく異なることを確認した。各 IC 区間の劣化曲線は、説明変数として採用した As 層厚、年間総雨量、はく離面積率と、説明変数で表現しきれない各 IC 区間の劣化特性を表す異質性パラメータで表現されている。同じ地域内で同じ舗装を構築すると、同じような寿命が与えられるという前提に立つと、今後実施していく改築

表-5.4 混合マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定結果

健全度 ランク	β の推定値			
	定数項	As層厚	年間 総雨量	はく離 面積率
1	-0.5623 -	-0.9391 (-10.8)	-	-
2	-1.3215 -	-0.7907 (-23.1)	-	0.4663 (28.7)
3	-1.4227 -	-0.9984 (-25.9)	-	0.2638 (16.2)
4	-1.2220 -	-0.9991 (-22.4)	-	0.1659 (7.6)
5	-1.1341 -	-0.8605 (-10.7)	0.4494 (2.9)	-
6	-0.7413 -	-1.0132 (-7.6)	0.5540 (2.2)	-
ϕ	11.9941 (268.82)			
AIC	193,499			

※(): t値

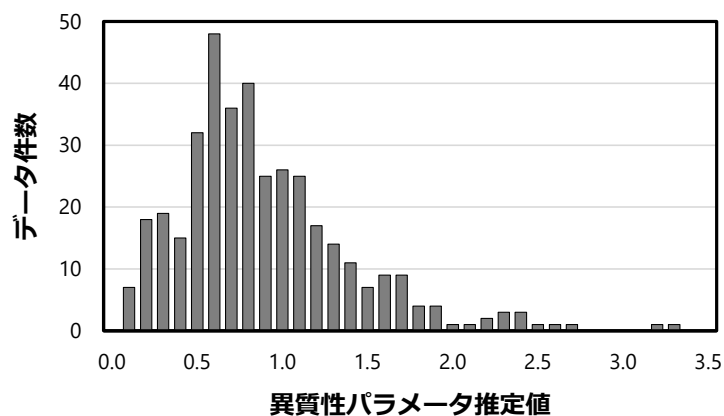


図-5.7 異質性パラメータの頻度分布

工事（同じ場所での舗装の再構築）や4車線化工事（極めて隣接する場所での舗装の新築）では、本研究で見出した各IC区間の舗装の劣化特性から、期待寿命に応じたAs層厚を提案するという手法をとることが、舗装の長寿命化の観点で重要であると考えられる。

次に、ハザード率と異質性パラメータの推定値を用いて、各IC区間の劣化速度の相

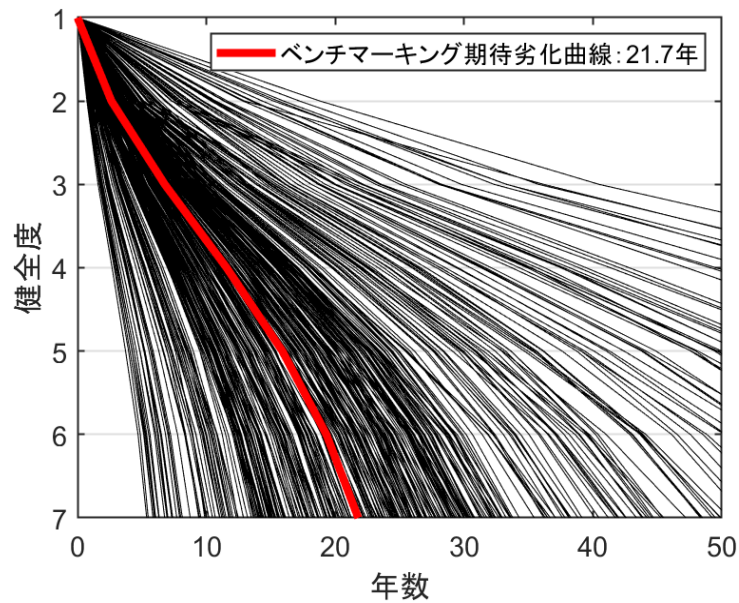


図-5.8 各 IC 区間（地域）の劣化曲線

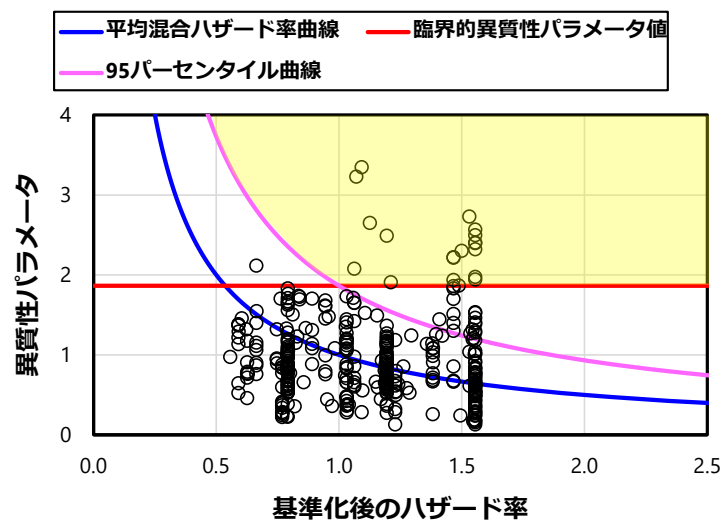


図-5.9 ハザード率と異質性パラメータの関係（健全度ランク 3）

対的に評価する．図-5.9 は，健全度 3 におけるハザード率と異質性パラメータの推定値の関係を示している．図中の横軸はハザード率 $\theta_3^{l_k} (l_k = 1, \dots, L_k; k = 1, \dots, K)$ の平均が 1 となるように基準化した値である．図中の青色の曲線は，ハザード率と異質性パラメータの積で表される個別のハザード率 $\lambda_3^{l_k}$ に対して $\lambda_3^{l_k} = 1$ となるようなハザード率と異質性パラメータの関係を示している．この曲線を平均混合ハザード率曲線と定義する．同曲線より上方に位置する IC 区間は平均よりも劣化の進行が速いことを示している．

ここで、全 IC 区間の中で、劣化速度の速い上位 $\alpha \times 100\%$ の中に入るような IC 区間の集合 $\bar{\Omega}_\alpha$ (重点設計検討集合) を

$$\bar{\Omega}_\alpha = \{k \in (1, \dots, K) \mid \varepsilon^k(\hat{\theta}) \geq \bar{\varepsilon}_\alpha\} \quad (5.26)$$

と定義する．ここに、 $\bar{\varepsilon}_\alpha$ は信頼度 $(1 - \alpha) \times 100\%$ とした場合の異質性パラメータの上限値（以下、臨界的異質性パラメータ値）であり

$$\bar{\varepsilon}_\alpha = \min_c \left\{ c \mid \int_c^\infty \bar{f}(\varepsilon; \hat{\phi}) d\varepsilon \leq \alpha \right\} \quad (5.27)$$

で定義される．異質性パラメータの推定値が信頼度 $(1 - \alpha) \times 100\%$ の重点設計検討集合 $\bar{\Omega}_\alpha$ に属する場合、その IC 区間は信頼度 $(1 - \alpha) \times 100\%$ で劣化の進行が速いと判断することができる．例えば、異質性パラメータの推定値に基づいて、信頼度を 95% とする重点設計検討集合 $\bar{\Omega}_{0.05}$ を定義する．信頼度を 95% とした場合、臨界的異質性パラメータ値 $\bar{\varepsilon}_{0.05} = 1.865$ なる．図-5.9 には、横軸に平行となる赤色の実線 $\bar{\varepsilon}_{0.05} = 1.865$ を示しており、この実線より上方に位置する IC 区間が重点設計検討集合となる．また、図-5.9 にはハザード率と異質性パラメータの積の 95 パーセンタイル曲線（桃色）も併せて示しており、95 パーセンタイル曲線より上に位置し、重点設計検討集合 $\bar{\Omega}_{0.05}$ にも属する部分（黄色で着色した範囲）の IC 区間は特に劣化の進行が早く、異質性パラメータの値も高い．そのため、舗装構造設計の実施にあたり、本研究で説明変数として採用した As 層厚、年間総雨量、使用骨材のはく離抵抗性とは別の舗装の劣化要因を調査し、その対応を考慮することが必要となる．

5.5.2 地域の環境・材料条件を考慮した As 層厚の算定

前項の分析結果により、ある IC 区間 k の、個別ハザード率 $\lambda_i^k (i = 1, \dots, 6)$ は

$$\lambda_i^k = \exp(\beta_{i,1} + \beta_{i,2}x_2^k + \beta_{i,3}x_3^k + \beta_{i,4}x_4^k)\varepsilon^k \quad (5.28)$$

となる．ここで、 x_2^k は As 層厚、 x_3^k は年間総雨量、 x_4^k ははく離面積率、 ε^k はある IC 区間 $k (k = 1, \dots, 381)$ の劣化特性を表す異質性パラメータである．また、IC 区間の期待寿命 $E[T]^k$ は個別ハザード率 λ_i^k を用いて

$$E[T]^k = \sum_i \frac{1}{\lambda_i^k} \quad (5.29)$$

と表せる．

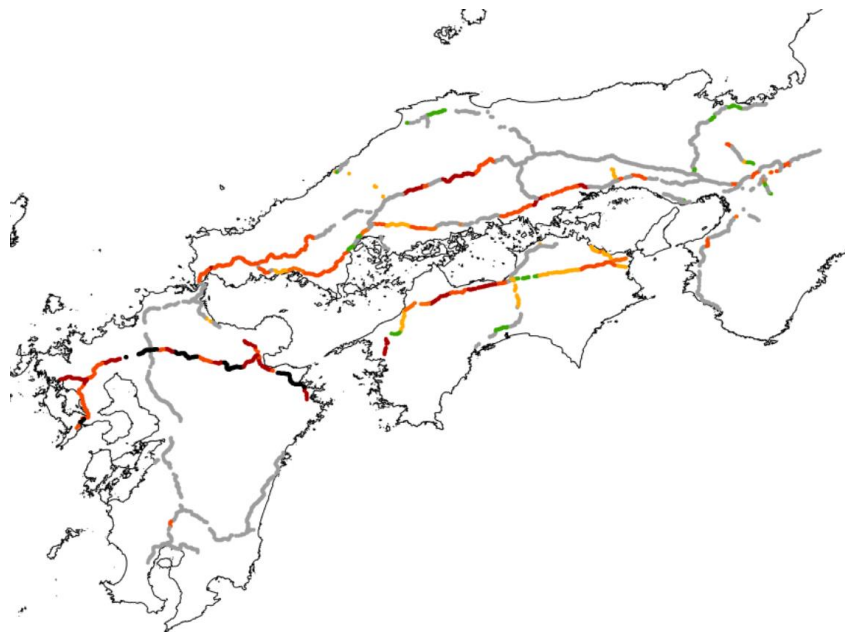
式(5.28)のうち、As 層厚は事業者側でコントロールできるパラメータであり、本研究の分析結果から、各 IC 区間の期待寿命は As 層厚の影響が大きいことがわかっている．また、材料条件であるはく離面積率については、現状でははく離抵抗性が劣る骨材の使用プラントにおいて、その骨材をはく離抵抗性に優れる骨材に変更するという手段をとることは、実務的に困難である．一方、事業者側の仕様設計において、アスフ

アスファルト安定処理上層路盤の配合基準を引き上げ、はく離防止剤の添加や使用アスファルトの変更、HiMA の適用など、アスファルト安定処理上層路盤の耐水性の強化を図ることは検討可能である。実際、新名神高速道路の舗装事業において、アスファルト安定処理上層路盤の耐水性を向上させた事例が報告されている¹⁴⁾。

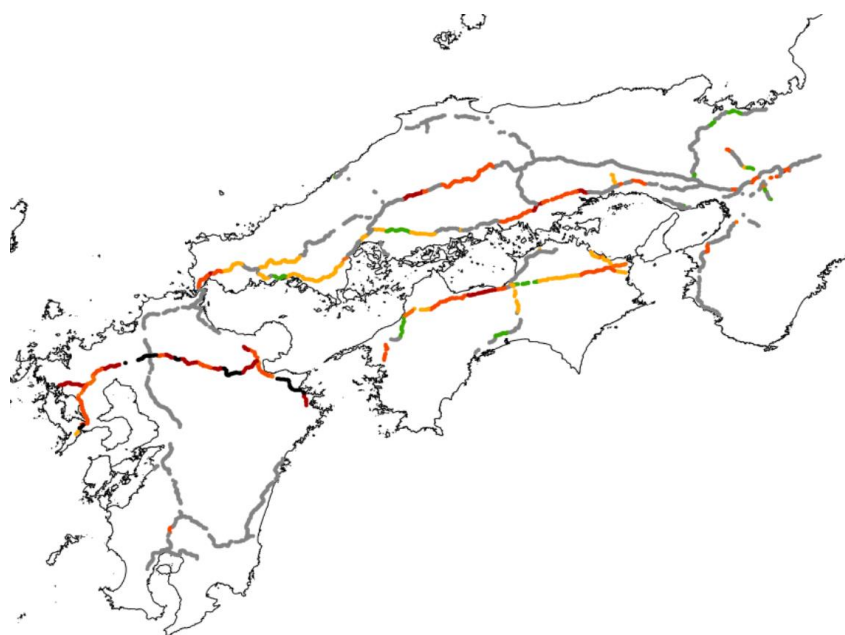
図-5.10 および図-5.11 は、地域の環境・材料条件を考慮した舗装の長寿命化に資する構造設計の一事例として、前節の混合マルコフ劣化ハザードモデルで推定したパラメータを用い、各 IC 区間の期待寿命が 20 年（図-5.10）・30 年（図-5.11）となる As 層厚と材料条件を求めた結果を示している。それぞれの図の (a) が現状の骨材を使用した場合、(b) がはく離面積率 15% 以下となる対応（アスファルト安定処理上層路盤の耐水性強化等）を施した場合の推定結果である。図中の凡例のうち、グレーの区間は、既設舗装の寿命が設定した期待寿命（20 年・30 年）をすでに上回っている区間（各ケースにおいて As 層厚を変更する必要がない区間）である。着色（緑～濃赤）している区間は、既設舗装の寿命が設定した期待寿命を下回っている区間であり、色の違いは設定した期待寿命を確保できる As 層厚を提案している。黒色の区間は、既設舗装の寿命が設定した期待寿命を下回り、かつ As 層厚を 350mm にしても設定した期待寿命とならない区間である。

本研究の手法は、調査・設計段階～維持管理段階で獲得される種々の情報を有機的に連携させ、それを修繕（改築工事）あるいは建設工事（4 車線化工事）に反映させることが可能であり、地域の環境・材料条件を考慮した高速道路の舗装構造設計の具現化である。また、現場管理者は、補修に充てられる予算の規模、補修工事を実施するうえで必要な交通規制の容易さ、補修工事を実施する受注者の確保など、各 IC 区間により異なる事情を抱えている。本研究の手法は、期待寿命の設定が可変であり、それぞれの実状に柔軟に対応することができる。例えば、本研究の事例において、As 層厚を 350mm にしても設定した期待寿命を得られなかった区間（図-5.10 および図-5.11 の黒色の区間：図-5.9 の黄色の範囲に含まれる）に対しては、管理実態を踏まえて期待寿命の設定を見直すことや、現地の詳細調査を通じて本研究では考慮できていない他の劣化要因を見極めたうえで、適切な対策を検討することが可能となる。

なお、本研究で得られた結果は、深層部の損傷の進行を間接的に評価する IRI⁷⁾を劣化指標に採用して求めていることに留意が必要である。今後、舗装構造の健全度を直接的に評価するたわみ量を採用することや、力学的な舗装構造設計との連携を視野に入れていくことで、より汎用的なモデルに発展することが期待できる。



(a) 現在の骨材を使用した場合



(b) はく離面積率 15%以下となる対策を実施した場合

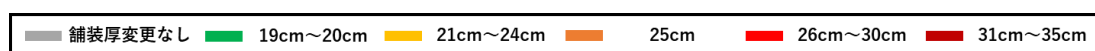
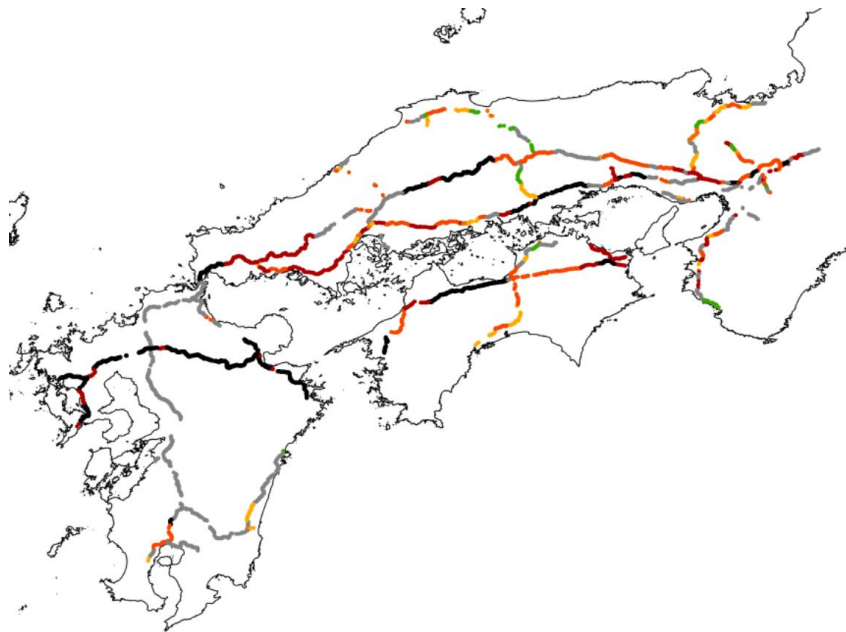
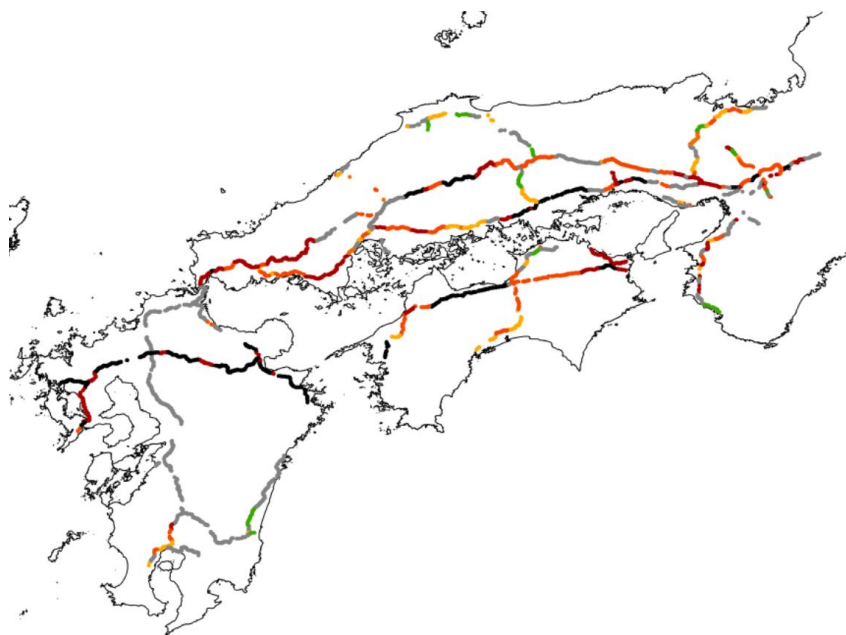


図-5.10 期待寿命（20年）に応じた As 層厚



(a) 現在の骨材を使用した場合



(b) はく離面積率 15%以下となる対策を実施した場合

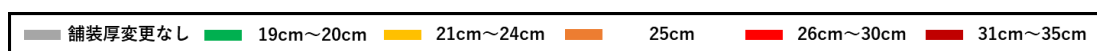


図-5.11 期待寿命（30年）に応じたAs層厚

5.6 おわりに

本研究では、深層部の損傷が顕在化している高速道路舗装に対し、統計的手法により舗装の劣化速度に影響を与える要因を分析した。また、地域の環境・材料条件を考慮した長寿命化が可能となる舗装構造設計手法を提案した。具体的には、深層部の損傷の進展を捉えられる可能性のある IRI の時系列データを用い、マルコフ劣化ハザードモデルにより劣化速度を推定した。マルコフ劣化ハザードモデルの分析の結果、As 層厚が薄いほど、年間総雨量が多いほど、はく離面積率が 15%を超える骨材の採取地域ほど、舗装の劣化が速く進行することを確認した。また、As 層厚、年間総雨量、はく離面積率を説明変数に用いて混合マルコフ劣化ハザードモデルを推定し、舗装の劣化速度を IC 区間毎に比較した。混合マルコフ劣化ハザードモデルの分析の結果、舗装の劣化速度は各 IC 区間（地域）で大きく異なることが明らかになった。さらに、地域の環境・材料条件を考慮した舗装構造設計として、混合マルコフ劣化ハザードモデルのパラメータ推定値を用い、各 IC 区間において任意の期待寿命となる As 層厚を算定した。今後、NEXCO 西日本の主な舗装事業は改築工事や 4 車線化工事となり、供用実績が明らかな箇所のごく近傍で舗装が建設されることを前提にすると、舗装構造設計の実務において、従来の T_A 法による計算結果と本研究の手法から求まる As 層厚を比較し、舗装構造を決定するというプロセスが、舗装の長寿命化を図るうえで重要であると述べた。

一方で、本研究に関して今後に残された課題がいくつかある。第 1 に、データの更新、モデルの改善の継続があげられる。5.2.2 で述べたとおり、高速道路舗装の劣化形態は時代とともに変化していることから、劣化メカニズムに応じた修繕施策を行うためには、定期的な路面性状調査で獲得されるデータ等により劣化予測モデルを更新し続ける必要がある。第 2 に、舗装の劣化要因のさらなる検証があげられる。本研究では、As 層厚、年間総雨量、はく離面積率を説明変数に採用し、舗装の劣化速度を表現した。しかし、本研究の予備検討では明確な関係性は認められなかったものの、舗装の劣化に影響を与える環境的要因として温度（気温）を指摘している研究事例¹⁵⁾があり、今後は標高も考慮したうえで詳細に分析する必要がある。また、交通量の影響は As 層厚で考慮していると考え、本研究の対象外としたが、交通量は地域の経済状況に左右されるなど、舗装では重要な設計条件である。近年、高速道路の入口に設置が進んでいる自動軸重計により、通行車両の荷重の実測値が蓄積されていることから、これらを考慮した交通条件を取り入れる手法の検討が必要である。さらに、既往の研究事例⁹⁾のように、舗装のライフサイクルのプロセス（計画～建設～維持管理）において生成されるあらゆるデータの流れを明らかにすることで、本来は連携されるべき情報（例えば、本研究で分析の対象外とした設計 CBR など）が可視化されることや、こ

れまで着目されていなかった情報を舗装の劣化要因に取り上げることができる可能性もある。そして、新たな劣化要因を定量化し、高速道路の位置情報と連携させたデータベースを構築したうえで、さらなる分析を進めていく必要がある。第 3 に、路面性状測定車を用いた測定手法のように、舗装構造の健全度を直接的かつ連続的に取得できる測定システムの開発があげられる。今後、例えば MWD¹⁶⁾や第 3 章で示した HSWD を高速道路舗装の調査に適用し、直接的な舗装構造の健全度に関する情報と舗装の劣化要因の関係を明らかにすることで、舗装の長寿命化に向けたマネジメントの高度化が期待される。

注釈

注1) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，高速道路資産の長期保全及び更新のあり方中間とりまとめ，2023.1.

参考文献

- 1) 高橋茂樹，小野義道，佐藤正和：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71，No.3（舗装工学論文集第20巻），pp.I_93-I_101，2015. [Takahashi, S., Ono, Y. and Sato, M.: Field survey to identify the important key factors for long term durability of asphalt pavement on expressways in Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 71, No. 3 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 20), pp. I_93-I_101, 2015.]
- 2) 佐藤正和，貝戸清之，小林潔司，小濱健吾，宮崎文平：T_A法と舗装劣化寿命誤差，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71，No.1，pp.1-18，2015. [Sato, M., Kaito, K., Kobayashi, K., Obama, K. and Miyazaki, B.: T_A-method and pavement depreciation lifetime error, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 71, No. 1, pp. 1-18, 2015.]
- 3) 高橋茂樹，加藤亮，山口清人，竹林宏樹：アスファルト舗装の破損実態を踏まえた新たな構造設計思想の提案，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.78，No.1，pp.52-69，2022. [Takahashi, S., Kato, R., Yamaguchi, K., and Takebayashi, H.: Proposal for structural design of asphalt pavement based on the deterioration status in fields, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 78, No. 1, pp. 52-69, 2022.]
- 4) 竹下春見：アスファルト舗装の構造設計に関する考え方，舗装，Vol.1，No.2，pp.3-6，1966. [Takeshita, H.: Asphalthosounokouzousekkeinikansurukangaekata, *Hosou*, Vol.1, No.2, pp.3-6, 1966.]
- 5) 宮島正悟，小野憲司，佐野透：港湾におけるアセットマネジメント促進に向けたインフラ情報の構造化と利活用ニーズの分析，土木学会論文集 F4（建設マネジメン

- ト), Vol.78, No.2, pp.I_113-I_129, 2022. [Miyajima, S., Ono, K. and Sano, T.: Structuring and analysing port infrastructure related information linkage for modernizing asset management, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F4 (Construction and management)*, Vol. 78, No. 2, pp. I_113-I_129, 2022.]
- 6) 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 : NEXCO 試験方法, 第 2 編アスファルト舗装関係試験方法, 2020. [East Nippon Expressway Company Limited, Central Nippon Expressway Company Limited, West Nippon Expressway Company Limited: NEXCOshikenhouhou, Part2 Asphalt Pavement Test Methods, 2020.]
- 7) 中村和博, 松本大二郎, 小濱健吾, 川本熙鷹, 貝戸清之 : 路面性状調査と日常点検のデータ連携に基づく高速道路舗装の新たな修繕施策, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.78, No.2, pp.I_200-I_210, 2023. [Nakamura, K., Matsumoto, D., Obama, K., Kawamoto, h. and Kaito, K.: New repair measures for expressway pavement based on data linkage of road surface condition survey and daily inspection, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.E1 (Pavement Engineering)*, Vol.78, No.2, pp.I_200-I_210, 2023.]
- 8) 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 deterioration forecasting, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.]
- 9) 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 Japan Society of Civil Engineers, Ser.A*, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.]
- 10) 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 bench-marking, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A*, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.]
- 11) 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., Obama, K.: Statistical mathematics for risk & asset management, Denkishoin Company Limited, 2019.]
- 12) C. Brunson, L. Comber (湯谷啓明, 工藤和奏, 市川太祐 訳): R による地理空間データ解析入門, 共立出版, 2018. [C. Brunson, L. Comber: An Introduction to R for Spatial Analysis and Mapping, Kyoritsu Shuppan Company Limited, 2018.]
- 13) Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.19, Issue 6, pp.716-723, 1974.
- 14) 松本大二郎, 岩本淳治, 橘竜瞳: 耐水性向上を目指したアスファルト安定処理上層路盤の配合検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 第 5 部門, V-004, 2016. [Matsumoto, D., Iwamoto, J. and Tachibana, R.: Taisuiseikoujouwomezashita asufarutoanteisyoriuousourobanno haigoukentou, *Proceedings of the 71th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, 5th Division, V-004, 2016.]
- 15) 丸山記美雄, 木村孝司: 積雪寒冷地における舗装の損傷と対策, アスファルト, Vol.57, No.230, pp.26-31, 2014. [Maruyama, K. and Kimura, T.: Pavement Distress in Cold Snowy Regions and Countermeasures, Asphalt, Vol.57, No.230, pp.26-31, 2014.]
- 16) 梅田隼, 塚本真也, 山口和郎, 綾部孝之, 寺田剛: 移動式たわみ測定装置 (MWD) のたわみ量解析手法の提案, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.77, No.2 (舗装工学論文集第 26 巻), pp.I_179-I_187, 2021. [Umeda, J., Tsukamoto, M., Yamaguchi, K., Ayabe, T. and Terada, M.: Proposal of new deflection analysis method using a moving wheel deflectometer (MWD), *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E1 (Pavement Engineering)*, Vol. 77, No. 2 (Journal of Pavement Engineering, Vol. 26), pp. I_179-I_187, 2021.]

第 6 章 結論

本研究では、損傷の深層化に対する高速道路舗装マネジメント手法の確立を目指し、現場実測データに基づき損傷の深層化の現状をネットワークレベルで評価し、合理的な補修設計・補修計画を立案する手法を示した。また、舗装構造の健全度を、直接的、連続的、網羅的に把握することが可能となる調査方法に関して、基礎的検討を行った。以下にその内容を整理する。

第 2 章では、これまで別々のシステムで管理されている路面性状調査と日常点検のデータについて、位置情報を介して連携させた分析を行い、IRI が深層部の損傷の進展や補修・修繕の影響といった舗装マネジメントにおける重要な情報を捉えることができる可能性を示した。また、IRI の時間的な劣化進行性を表現する Δ IRI と、道路延長あたりの日常点検における変状発生数を表現する点検レコード密度を定義し、それらの関係性から、ネットワークレベルにおける深層部の損傷状況を評価する方法を示した。さらに、深層部の損傷状態応じた予防保全の実施や、舗装構造耐力と密接に関係している表層・基層・アスファルト安定処理上層路盤の合計厚さ（以下、As 層厚）を厚くすることの有効性など、舗装修繕サイクルの長期化に向けた具体的な施策を提案した。

第 3 章では、高速走行に対応した移動式たわみ測定装置である HSWD の技術開発について、光切断法を用いた路面たわみ量の測定方法に関する基礎的な検討を実施した。予備検討として、荷重（軸重）の大きさ、車軸とタイヤの配置、走行速度をパラメータにした動的 FEM 解析を行い、HSWD の荷重の載荷方法として、軸重 10t・単軸単輪の方式が、車両制限令の一般的制限値を満足する中で、最も効果的に路面たわみを生じさせることを示した。予備検討の結果に加え、光切断法のカメラの視野に対する車軸等の影響を回避する工夫を実施したうえで、HSWD の試作車両を製作した。そして、実供用下の高速道路において HSWD の試験測定を行い、光切断法で得られた高さデータに対し、移動平均によるノイズ処理と、カメラと路面の相対的な高さの変化量によるたわみ量の補正を行うことで、HSWD で測定した路面たわみ量が同箇所でも測定した FWD の D_0 たわみ量と近似することを示した。

第 4 章では、舗装補修計画の策定に統計的劣化予測モデルを適用するにあたり、路面の管理指標に対する補修目標値が連続値で運用されていることを考慮し、連続量を用いた劣化ハザードモデルを推定する必要性を示した。適用事例として示した連続量を用いた劣化ハザードモデルの推定には、劣化指標に損傷の深層化の進展を捉える可能性がある IRI を、説明変数に深層部の劣化速度に影響を与える As 層厚を採用した。

モデルの推定結果は As 層厚が薄い箇所ほど IRI の劣化が速く、実務的な経験と整合するものであった。一方で、分析データを西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO 西日本）の 4 支社に分割し、モデルの推定結果を比較したところ、補修履歴の有無がモデルの推定結果に与える影響が大きく、今後、高速道路舗装マネジメントの高度化を図るうえで、補修履歴の確実な収集が重要であることを指摘した。

第 5 章では、舗装の劣化要因として As 層厚、年間総雨量、使用骨材のはく離面積率を取り上げ、マルコフ劣化ハザードモデルによる分析を通じ、As 層厚が薄いほど、年間総雨量が多いほど、はく離面積率が 15%を超える骨材の採取地域ほど、舗装の劣化が速く進行することを示した。また、混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定により、舗装の劣化速度は各 IC 区間（地域）で大きく異なることを示した。さらに、混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定パラメータから、期待寿命に応じた As 層厚の設計方法を示し、従来の T_A 法による計算結果と本研究の手法から求まる As 層厚を比較し舗装構造を決定するプロセスを、舗装の長寿命化施策として具体的に提案した。

本論文は、NEXCO 西日本が実測・蓄積してきた膨大な調査・点検データを、位置情報を介して有機的に連携し、マルコフ劣化ハザードモデルなどの統計的劣化予測手法を適材適所に実用することで、損傷の深層化に対する高速道路舗装マネジメントとして課題解決に向けた具体的な方法論を述べた。今後、新たな獲得データや舗装の損傷形態の変化に対してモデルを継続的に改善し、舗装工学における力学的な検討との連携を視野に入れながら、本研究成果を高速道路舗装の設計、施工、維持管理の実務へ実装していくことが期待される。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、様々な方々から多大なるご指導とご支援を賜りました。ここに心より感謝の意を表します。

大阪大学大学院工学研究科 貝戸清之教授には、学内外における様々なプロジェクトの要職に就かれ多忙を極める中、本論文の査読を快くお引き受けくださりました。「これまで積み上げてきた統計的劣化予測モデルを、社会の実務的課題の解決に如何にして役立てていくか」という貝戸先生の徹底的な現場主義に基づく研究方針は、共同研究講座の招へい研究員という私の立場の意義を明確にさせていただき、心に響く激励でした。また、土木学会をはじめ数多くのプロジェクトで研究成果の発表機会を与えていただいたことは、研究者としての成長はもちろんのこと、多様な方々と交流を深めることができた貴重な経験となりました。貝戸先生より頂戴したご助言と本論文の知見を高速道路舗装マネジメントの実務に実装し、安全・安心な高速道路舗装路面の持続的な提供に貢献するよう、日々邁進いたします。深く感謝の意を表するとともに、心からお礼申し上げます。誠にありがとうございました。

大阪大学大学院工学研究科 鎌田敏郎教授、乾徹教授には、本論文の副査をお引き受けいただき、幅広い観点からご助言を賜りました。また、NEXCO 西日本高速道路学共同研究講座の共同研究にご参画いただき、NEXCO が抱える様々な現場の課題に対し、貴重な研究成果を与えていただきました。深く感謝申し上げます。

高知工科大学データ&イノベーション学群 小濱健吾准教授には、共同研究講座の構成員として共有の時間を過ごさせていただきました。損傷の深層化に対する高速道路舗装マネジメントのあり方について、私の実務的な考え方に対し、小濱先生が持つ統計的劣化予測モデルに関する深い知識と学術的な視点からのご意見を賜り、数え切れないほどの議論をさせていただきました。また、土木学会等への論文投稿にあたっては、査読意見の本質に対して適切に回答できるようにご指導を賜りました。小濱先生のご支援のおかげで本論文を取りまとめることができました。心から感謝申し上げます。ありがとうございました。

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻社会基盤マネジメント学領域の研究室の方々にも、多大なご協力を賜りました。笹井晃太郎特任助教には、本論文の取りまとめのほか、学位取得に関する学内の手続きに関してご丁寧な案内を賜り、私は迷うことなく本論文の完成に注力することができました。川本熙鷹氏には、ビックデータの整理から統計解析まで、本論文の根幹となる分析を実直に進めていただきました。深く感謝申し上げます。

NEXCO 西日本インベーションズ(株) 兼澤秀和社長には、本共同研究講座への門を開いていただきました。共同研究講座の着任に若干の不安があった私に温かいお言葉をおかけくださり、背中を後押ししていただきました。深く感謝申し上げます。

(株)高速道路総合技術研究所道路研究部 松本大二郎部長には、私の舗装の師匠として、研究全体の構成から拙文の修正まで、幅広いご指導を賜りました。思い返せば 10 年以上もの長い間、上司と部下の関係にとどまらず、公私にわたって多くの経験を共有させていただきました。本論文を取りまとめる中、私が挫けそうになった際にも、心強い励ましとともに貴重なご助言を賜りました。誠にありがとうございました。舗装に対する情熱を心に宿し、一方では冷静沈着に物事を判断される松本部長の技術力に尊敬の念を示し、少しでも近づけるように努力しつづけます。これからも、どうぞよろしくお願い申し上げます。

西日本高速道路エンジニアリング四国(株)技術本部技術部技術開発課 林詳悟課長、技術統括課 橋爪謙治課長には、第 3 章の HSWD 技術開発をご担当頂きました。移動式たわみ測定装置の高速走行対応という極めて難題に対し、怯むことなく立ち向かえたのも、お二人の熱意と技術があつてのことでした。深く感謝申し上げます。

私が所属する西日本高速道路(株)の先輩、同僚の方々からも、実に多くのご指導、ご助言、ご協力を賜りました。技術本部 田山聡技術上席主幹には、貝戸先生に私をご紹介いただき、学位論文執筆へ導いていただきました。また、共同研究講座の研究代表者として、講座の安定した運営にご尽力いただきました。深く感謝申し上げます。

関西支社 上田武志副支社長、技術本部技術環境部技術統括課 清水敬司課長、櫻谷慶治課長代理、久田裕史主任、関西支社総務企画部企画調整課 上田浩之課長には、論文執筆にご理解をいただき、研究遂行に没頭できる環境を整えていただきました。深く感謝申し上げます。

技術本部技術環境部技術統括課 風戸崇之課長代理、佐野慶成主任、四国支社高知高速道路事務所 岡崎風時課長には、NEXCO 西日本における舗装を取り巻く情勢を適時適切に共有いただきました。共同研究講座の最大の使命でもある NEXCO 西日本ニーズと大阪大学シーズのマッチングに関して議論させていただき、本論文の実務的な価値を高めていただきました。深く感謝申し上げます。

最後に私事ではありますが、私の研究生活は家族の支えによって遂行することができました。激務に耐えうる丈夫な体に育ててくれた両親、土木技術者の先輩としてアドバイスをくださった義父母、そして、いつも身近にいて応援しつづけてくれた妻 恵里奈と 3 人の子どもたち 廉、花音、彩羽に、心からありがとうございました。

2024 年 6 月 中村 和博