

社会技術研究開発事業 令和5年度研究開発実施報告書

S D G s の達成に向けた共創的研究開発プログラム

シナリオ創出フェーズ

「科学的根拠に基づくPPP/PFI道路インフラマネジメント
手法の構築と社会実装」

貝戸 清之

(大阪大学大学院工学研究科 教授)

川井 晴至

(インフロニア・ホールディングス株式会社 総合インフラサービス戦略部 インフラサービス改革室 参事役)

目次

1. 研究開発プロジェクト名	2
2. 研究開発実施の具体的内容	2
2 - 1. 目標	2
2 - 2. 実施内容・結果	8
2 - 3. 会議等の活動	16
3. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況	17
4. 研究開発実施体制	18
5. 研究開発実施者	19
6. 研究開発成果の発表・発信状況，アウトリーチ活動など	20
6 - 1. シンポジウム等	20
6 - 2. 社会に向けた情報発信状況，アウトリーチ活動など	20
6 - 3. 論文発表	20
6 - 4. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）	21
6 - 5. 新聞／TV報道・投稿，受賞等	21
6 - 6. 知財出願	21

1. 研究開発プロジェクト名

「科学的根拠に基づくPPP/PFI道路インフラマネジメント手法の構築と社会実装」

2. 研究開発実施の具体的内容

2 - 1. 目標

(1) 目指すべき姿

■ 解決すべき特定地域における社会課題

(1) - 1 自治体が抱える課題

我が国の道路インフラ（橋梁、道路、トンネルなど）は高度経済成長期に集中的に建設されたため、現在それらの団塊的な老朽化が顕在化してきている。道路インフラは国内の社会・経済・文化活動の根幹であり、当然のことながらあらゆるSDGsの達成に直接・間接的に貢献する。ところが、道路インフラの管理団体、中でも一部の地方自治体においては、厳しい予算制約、人的リソースや技術力の不足などに起因して、道路インフラを適切に管理することが困難な状況にある。

これらの問題に対する自治体側の方針は、主に「公共施設等総合管理計画」に記載されている。将来にわたる財政状況が可視化されている点は評価できるものの、道路インフラの更新に要する費用は、ある一定の更新期間、規定の単価に基づいて単純に算出されたものに過ぎない。これから高度経済成長期に整備された道路インフラが団塊的に耐用年数を迎えるため、その更新費用の不足に対し、例えば20%の削減を技術的根拠なく目標として設定している自治体がほとんどである。厳しい見方をすれば、自治体は道路インフラの資産状況（劣化状況）を正確に評価できておらず、長寿命化計画を策定している橋梁や下水道を除けば、将来の長期にわたる維持管理・更新費用を、科学的根拠に基づいて定量的に把握できていない。

道路インフラだけでなく、地下に埋設され、地上からは目視できない上下水道の管路などの老朽化問題も顕著であるが、インフラを取り巻く将来の見通し、すなわち料金徴収額の値上げ等を伴う住民負担の増加について、良くも悪くもブラックボックス化されており、自治体管理の良い部分についても、住民に正しく伝わっていない状況にある。正確な情報に基づき議論がなされていない点に問題の本質（本プロジェクトの提案意義）がある。

(1) - 2 現状のPPP/PFIの課題

日本におけるPFI（Private Finance Initiative）は、主にイギリスの制度を参考に導入し、1999年にPFI法が成立、2011年にPFI法が改正され、料金徴収を伴う事業においてコンセッション方式（利用料金の徴収を行う公共施設等について、施設の所有権を公共主体が有したまま、施設の運営権を民間事業者に設定する方式）の適用が可能となった。PFI法成立から20年以上が経過するが、主な課題は、①PPP/PFI契約に基づき民間の技術的な創意工夫が遺憾なく発揮できない、②民間資金の活用を目的としながら資本

市場をほとんど活用しきれていないことにある。

これまでのPFI事業においては、行政側が維持管理などの仕様を細かく決め、一定額を民間事業者に支払うサービス購入型が中心であった。これは法律の問題ではなく、自治体側の運用の問題であり、民間事業者の自由な経営を認めていないということである。国や自治体がどのようなルールで民間事業者に対価を支払うかは、PFI事業のスキームにおいて重要な課題であり、民間事業者の創意工夫によるパフォーマンスの向上を引き出し、それに応じた対価の支払いが行われる等のインセンティブが機能する官民連携の仕組みの構築が急がれる。

イギリスではM25などの高速道路は無料であり、料金徴収を伴わない事業においても、アベイラビリティ・ペイメント方式（公共部門の管理者等が民間事業者の提供するサービスに対して対価を支払う契約等のうち、公共施設等の利用可能性（Availability）や管理者等が求めるサービス水準に関する指標を設定し、サービス対価等の一部又は全部が、当該指標の達成状況に応じて決まる方式）の採用により、民間事業者のパフォーマンスに応じて支払い額が決定される性能規定型のPPP/PFI契約が主流である。日本でもキャッシュフローを生み出さない事業における官民連携事業として、指標連動方式の導入がうたわれているが、どのような要求水準を上回れば増額になるのか等、指標と目標値の適切な設定は容易ではない。

一方、資本市場の活用に関する問題は多岐にわたるが、自治体側から道路インフラの資産状況や期待寿命が提示されないために、民間資金の担い手である金融機関が事業リスクを正確に評価できない状況は主要な課題の1つである。現状では、当該事業の技術的な問題点を抽出し、事業リスクを許容できるのは、全国規模の大手企業に限られる。金融機関は事業自体のリスクとリターンを検討して融資条件を設定すべきであるが（プロジェクトファイナンス）、それが困難であるために、大手企業の信用に基づき融資を行っている。このことは、地域の中小企業にとって不公平な競争環境を生み出している。事業のリスクが算定できないうえに、金融機関からは大手企業よりも高い金利でしか融資を受けられない。地域の地元企業と全国企業の不要な軋轢を生じさせる一因であり、PPP/PFIの活用が進まない遠因となっている。

■ 目指すべき姿（SDGs達成のビジョン）

官民連携事業を通じて、官と民が一体となったインフラサービスを構築し、自治体の厳しい予算制約、人的リソースの枯渇や技術力不足などの問題を解決し、自治体・住民・地元企業の「三方良し」の実現を、日本全国の地域において推進する。過剰な建設コストを抑えながら収益や運営モデルを見直し、道路インフラを持続可能なソリューションとして、あたりまえの価値を高め、守り続けていく。目指すのは、その時代にあわせて、その国や地域、そこで暮らす人々が、最適な道路インフラサービスを選択できる社会であり、地域社会の安全・安心とサステナビリティを実現する。

そのためには、開かれた情報に基づき、道路インフラの在り方を議論することが重要である。自分たちの地域の道路インフラの管理水準を、財政状況や費用負担、利便性や満足度を勘案して、自らで決めていく。そのためのテクニカルなツールとして、コンセ

セッション方式やアベイラビリティ・ペイメント方式における性能規定型のPPP/PFI契約の導入や、プロジェクトファイナンスの実現が必要となる。地域における社会課題に対するソリューションの根底には、共通して、合意形成を行うための科学的根拠に基づく定量的な指標の設計が求められている。

道路インフラの資産状況や期待寿命が共有され、データに基づく意思決定や政策判断が可能となり、より適切な定量的な指標の設計に向けて、新たなサービスが創出され続ける。そのような、自由で公平な競争社会の実現が目指すべき姿である。

■ SDG sの総合的な活用

● 特に優先する目標群

科学的根拠に基づき定量的な指標や目標が設定されることにより、道路インフラの長寿命化に資する最適維持管理計画の立案や、中温化アスファルト混合物の使用等によるCO2削減手法の検討が具体的な行動としてリンクする。これにより、不必要な補修・更新を回避させ、産業廃棄物やCO2の発生を抑制する（カーボンニュートラル、SDG12）。

アベイラビリティ・ペイメント方式における性能規定型PPP/PFI契約に基づく民間の技術的な創意工夫が遺憾なく発揮され、自治体の厳しい予算制約、人的リソースの枯渇や技術力不足などの問題を解決することにより、社会コストが軽減され、同時に社会インフラの利用者に対する安全・安心が確実に担保される（SDG11）。

民間資金の活用を促し、資本市場を活性化することで（プロジェクトファイナンスの実施等）、地元の建設業者や地域に根差した信用金庫などがPPP/PFI事業に参画し、地域で新しいエコシステムを創出することで、地域経済が活性化する（SDG8）。

科学的根拠に基づき定量的な指標や目標を設定し、「SDG11 住み続けられるまちづくりを」（ターゲット11.1, 11.3, 11.7, 11.a, 11.b）を優先する目標群とする。セッション方式やアベイラビリティ・ペイメント方式における性能規定型のPPP/PFI契約を導入する過程において、インフラ長寿命化に向けた最適維持管理計画の立案、中温化アスファルト混合物の使用等によるCO2削減、民間資金の活用や資本市場を活性化に関する検討が必要とされ、具体的な行動にブレークダウンされる。すなわち、「SDG12 つくる責任 つかう責任」（ターゲット12.4, 12.7, 12.8）、および、「SDG8 働きがいも経済成長」（ターゲット8.3, 8.10）についても、複合的に同時解決が可能となる。

また、本研究開発プロジェクトの成果を、日本版PPP/PFIモデルとして確立し、途上国等への海外展開を目指す。日本企業と日本政府（外務省、国土交通省、JICA、JBIC等）が一体となり、日本の超低金利※を活用することで、相手国の政府財政負担を増やすことなく、インフラ整備が可能である。これにより、ターゲット（6.1, 6.2, 7.b, 8.1, 9.1, 9.2, 9.a, 10.b, 11.1, 11.3, 11.5, 11.c, 13.1, 17.4）への波及効果が得られる。

（※途上国の政策金利は数%～10%程度であるが、JICAの金利は条件にもよるが概ね1%未満である。実際には市中の実質金利で資金調達となるため、低金利の効果

はさらに大きくなる。）

● 相反しないように留意する目標群

コンセッション方式やアベイラビリティ・ペイメント方式における性能規定型PPP/PFI契約は、従来の公共工事の契約手続きと比較し、煩雑で導入の難易度がやや高い。このため、過疎地域等の行政職員が少ない自治体単体では、PPP/PFI事業の実施が難しいことが懸念される。その結果、地域間でのインフラ管理レベルにばらつきが生じ、不平等が生じる可能性がある。（SDG8 働きがいも経済成長も、SDG10 人や国の不平等をなくそう、SDG9 産業と技術革新の基盤をつくろう）

相反を回避する方策としては、既存の行政の縦割り構造にこだわることなく、複数の自治体を包括的に取り組むことである。これは、国土交通省が推進する「地域インフラ群再生戦略マネジメント」やPPP協定制、総務省の「連携中枢都市圏構想」（政令指定都市や県庁所在地などの地方の中核都市が周辺の消滅自治体の行政サービスの維持・向上や地域の経済活性化、地域間の連携強化などを推進）などの施策とも一致している。本提案プロジェクトの成果を国土交通省等の施策の一部として提案・実装することで、相反を回避し、「SDG11 住み続けられるまちづくりを」の推進が可能となる。

	創造される価値	優先する SDGsのゴールや ターゲット	相反に留意する SDGsのゴールや ターゲット
環境面	不必要な補修・更新を回避させ、産業廃棄物やCO ₂ の発生を抑制	SDG12 つくる責任 つかう責任	SDG8 働きがいも経済成長も
社会面	社会コストの軽減と社会インフラの利用者に対する安全・安心の確実な担保	SDG11 住み続けられるまちづくりを	SDG10 人や国の不平等をなくそう
経済面	地域での新しいエコシステムの創出による地域経済の活性化	SDG8 働きがいも経済成長も	SDG9 産業と技術革新の基盤をつくろう

（2）研究開発プロジェクト全体の目標

目標は、科学的根拠に基づく道路インフラの最適維持管理計画（PPP/PFI事業計画）の立案とその導入効果の定量的評価である。具体的な実施項目は以下の3つである。1) 路面性状調査データを用いた舗装の劣化予測と要因分析（2023.10～2025.3）：インター区間ごとに舗装の寿命と劣化に影響を及ぼす要因を特定する【技術シーズ1, 2の活用】。2) 契約終端条件の非斉次性を考慮した最適維持管理手法（2024.1～2025.9）：PPP/PFI契約の終了時点でのインフラの健全性を与件として、契約期間中の費用最小化を達成する最適維持管理計画を立案し、現行の計画との比較を通して、費用削減効果を定量化する【技術シーズ1, 2の拡張】。3) PPP/PFI事業導入効果の定量的評価（2024.1～2025.9）：民間技術を導入することによる業務の効率性を計量化するとともに、不

要な修繕・更新の削減によるCO₂および廃棄物の抑制効果を計量化する【技術シーズ3の活用】。

技術シーズ1：	目視点検データを用いた統計的劣化予測手法（マクロ予測）
技術シーズ2：	目視点検データを用いた統計的劣化予測手法（ミクロ予測）
技術シーズ3：	確率的フロンティア分析を用いた事業効率性評価手法

大項目A) 路面性状調査データを用いた舗装の劣化予測と要因分析（2023.10～2024.12）：劣化予測に必要なデータ提供は愛知道路コンセッション株式会社（以下、ARC）・吉田隆朗（協力者）が行う。データ整理と解析用データベース構築はインフロニアG（川井晴至，堀川真加），データ分析は阪大G（貝戸清之，笹井晃太郎，解析補助員）が担当する。劣化予測結果に対する要因分析は，貝戸と川井を中心として，前田建設G（中島良光，濱島彩織）も含めて全員で実施する。FWD試験を実施して，その結果として得られるアスファルト層の損傷指標をKPIとして，その値が 800×10^{-6} 以上であることをもって，予測結果の妥当性を確認する【解決策の有効性確認】。KPIが基準値以下となる場合には，劣化予測を行う道路区間を100mから10mに変更する，あるいは劣化要因として降水量や路面温度などの環境条件も考慮した劣化予測を再度実施する。

大項目B) 契約終端条件の非斉次性を考慮した最適維持管理手法（2024.1～2025.9）：ライフサイクル費用評価に必要な過去の補修実績等のデータ提供はARC・吉田（協力者）が行う。それを踏まえた補修単価等の工事の積算は前田建設G（中島，濱島），インフロニアG（川井），理論モデル構築およびデータ分析は阪大G（貝戸，笹井，新規雇用博士研究員，解析補助員）が担当する。ライフサイクル費用最小化に基づく最適維持管理計画の妥当性は，貝戸と川井を中心として，全員で実施する。本プロジェクトでは具体的に今後20年間の費用削減効果をKPIとして，LCC費用削減率15%を上回ることをもって計画の妥当性を評価する【他地域展開のための適用可能条件】。KPIが基準値を下回る場合には，補修工法や単価の設定を見直し，再度分析を実施する。また，本プロジェクトでは劣化予測を100m単位で実施しているため，補修工事の延長も同じ100m単位を想定しているが，実務的な維持管理計画との整合性を重視して，どの程度の延長で補修工事を集約化させるかというゾーニング戦略も検討する。

大項目C) PPP/PFI事業導入効果の定量的評価（2024.10～2025.9）：データの提供はARC・吉田（協力者）が行い，データ分析は阪大G（貝戸，笹井，解析補助員），前田建設G（中島，濱島）が担当し，事業導入効果の定量的評価の妥当性は，貝戸と川井を中心として，全員で実施する。

以上の大項目A～Cの研究成果（解決策の有効性確認，他地域展開のための適用可能条件，PPP/PFI事業導入効果の定量的評価）をもとにして，PPP/PFI契約書の雛形，アプリケーション開発（汎用的ソフトウェア）と普及・定着活動の全国展開の計画案を含めた【事業計画を作成】し，最終報告書とする。これには研究協力組織であるNTTドコモ，NTTコムウェアも加わる。

本プロジェクトでは単に技術開発を進めるだけではなく、各研究協力組織や関係するステークホルダーとの協働・連携・ビジネスモデルを構築する。具体的には、阪大Gが中心となって開発する理論モデルをもとに、インフロニアGが実務的視点からPPP/PFI事業スキームの策定を主導する。前田建設Gは愛知道路コンセッション株式会社Gと協働し、愛知有料道路におけるステークホルダーを洗い出し、共創的研究開発を主導する。NTTドコモGとNTTコムウェアGが他地域展開における本プロジェクトパートナーとして、地方自治体への働きかけを行う。その際、国土交通省が推進する官民連携の動きとも密接に協調していく。これにより、政策方針や官民の取り組みと合わせた効果的な研究開発を推進し、より大きな社会的インパクトをもたらすことを目指す。これらの連携を通じて、新たなビジネスモデルの構築につなげる。ビジネスモデル構築と市場導入により、持続的なインパクトを持つ成果を生むことが可能となる。そのためには、汎用性の高い基本原則を基にモデルを構築し、個別の検証が必要になる項目を精査することが重要である。インフロニアG、前田建設G、愛知道路コンセッション株式会社Gが有する道路コンセッション事業におけるノウハウを活用するとともに、NTTドコモGとNTTコムウェアGが有する国内有数のネットワークにより研究開発成果の展開を目指す。

2 - 2. 実施内容・結果

研究開発期間中（24ヶ月）のスケジュール

研究開発項目	初年度 (2023.10～2024.3)	2 年度 (2024.4～2025.3)	最終年度 (2025.4～2025.9)	以降 (研究開発期間 終了後の展開)
大項目 A 中項目 A-1 インフォニア グループ° 阪大 グループ° 中項目 A-2 阪大 グループ° 前田建設グループ° インフォニア グループ°	分析のトライ & エラー 	実証試験フィールド： 愛知有料道路 サイトビジット 2024.10 KPI 調査箇所における FWD値 800×10^{-6} 以上	シナリオ作成 KPI未達成の場合、 再度、要因分析を実施。 要因特定後、補修工法選定へ	ベースライン（基本原則）と 要因分析（個別の検証）により 他地域展開を可能に
大項目 B 中項目 B-1 前田建設グループ° インフォニア グループ° 中項目 B-2 阪大 グループ° インフォニア グループ°	マイルストーン① 2024.9 	主となる計画 收拾策 分析のトライ & エラー 理論・ アルゴリズム開発 KPI 今後20年間の LCC低減率 15%以上	【他地域展開のための 適用可能条件】 KPI未達成の場合、 補修工法の再選定へ	最適維持管理手法を他地域展開 するために、事業で異なる維持管 理業務の条件設定（個別の検証要 素）を特定
大項目 C 中項目 C-1 阪大 グループ° 中項目 C-2 前田建設グループ°		マイルストーン② 2025.9 理論・ アルゴリズム開発 評価	KPI未達成の場合、 補修工法の再選定へ	- 事業効率性評価の実証分析 - PPP/PFI の事業効率性評価をもと に、SDGs 達成の解決策および事 業計画を創出

(2) 各実施内容

今年度の到達点①：愛知有料道路における舗装の劣化予測を行う。

実施項目①-1：路面性状調査データ整理と解析データベースの構築

実施内容：

- 1) 愛知有料道路の過去の調査データを集約する。
- 2) データ処理により、分析に適した形式に整理する。
- 3) 整理されたデータを統合し、劣化予測のためのデータベースを作成する。

実施体制：インフロニアグループ

実施項目①-2：劣化曲線および期待寿命の推定

実施内容：

- 1) 先に構築したデータベースから、劣化に関連する指標を中心にデータを抽出する。
- 2) 抽出したデータを使用して、舗装の劣化曲線を統計的にモデリングする。
- 3) 劣化曲線をもとに、各種の舗装材料や使用条件における期待寿命を推定する。

実施体制：阪大グループ

今年度の到達点②：最適維持管理計画を立案のためのデータクレンジングを行う。
(次年度も継続)

実施項目②-1：補修工事の選定と単価積算、費用項目の決定

実施内容：

- 1) 過去の補修履歴等に基づき補修工事のメニュー選定を行う。
- 2) 選定した補修工事メニューについて、各工事の単価を積算する。
- 3) 最適維持管理計画の立案に含めるべき費用項目を決定する。

実施体制：前田建設グループ

(3) 成果

1. はじめに

近年の我が国の社会基盤施設を取り巻く問題として急速な老朽化，管理者である公共団体における人材および予算不足が挙げられる．そこで，民間企業の技術や経営に関する能力と資金を活用して効率的な維持管理を実現する方法としてPPP事業が考えられる．しかし，空港や上下水道分野等と比較すると道路分野においてはPPP事業を活用するノウハウが相対的に不足している．加えて，道路舗装は社会基盤施設の中で比較的耐用年数が短く，それに伴い補修を高頻度で行う．したがって，道路分野におけるPPP事業の活用を推進するべく，PPP事業の特徴に合わせた最適維持管理計画の立案および事業参入効果の定量的評価が求められている．これらを行うためには第一に，道路の劣化を予測しその要因を推定する必要がある．そこで，本年度は実際にPPP事業化されている道路を対象とした路面性状データを用いて道路の劣化予測と要因分析を行う．

2. 混合マルコフ劣化ハザードモデル

分析の対象とする道路舗装を K 個の道路グループ（評価単位）に分割する．さらに，グループ $k(k = 1, \dots, K)$ は，合計 L_k 個の道路で構成されている．グループ k に固有なハザード率の異質性を表すパラメータ ε^k を導入する．このとき，グループ k の施設 $l_k(l_k = 1, \dots, L_k)$ の健全度 $i(i = 1, \dots, I - 1)$ のハザード率を，個別ハザード率

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

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

を用いて表す．異質性パラメータ ε^k は，グループ k の標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ からの乖離の程度を表す確率変数である． ε^k の値が大きくなるほど当該グループ k に含まれる全ての道路の劣化速度が標準ハザード率に対して大きいことを意味する．また， $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ はグループ k の施設 l_k が有する健全度 i の平均的なハザード率（以下，標準ハザード率）である．道路の構造や環境条件を表す説明変数ベクトル x^{l_k} および健全度 i に関する未知パラメータベクトル β_i を用いて，標準ハザード率 $\tilde{\lambda}_i^{l_k}$ を

$$\tilde{\lambda}_i^{l_k} = \exp(x^{l_k} \beta_i) \quad (2)$$

と表す．グループ k 内の道路が，ある時刻に健全度 i と判定されて時間 z^{l_k} 後に健全度 j と判定されるマルコフ推移確率 $(z^{l_k} | \varepsilon^k)$ は式(1)により，

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

と表現する¹⁾．本研究ではパラメータの推計手法としてマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いた階層ベイズ推計²⁾を用いる．異質性パラメータ ε_k の事前分布として平均1，分散 $1/\phi$ のガンマ分布を設定する．さらにガンマ分布の分散パラメータに対しても事前分布として平均 $\alpha\gamma$ ，分散 $\alpha\gamma^2$ のガンマ分布を仮定している．

表-1 健全度評価基準

健全度	MCI値	
	自動車専用道路	一般有料道路
IV	≥ 7.1	≥ 6.6
III	6.1～7.0	5.6～6.5
II	5.0～6.0	4.5～5.5
I	< 5.0	< 4.5

3. 実証分析

3.1. データの概要

混合マルコフ劣化ハザードモデルを実際にPPP事業化されている愛知有料道路の道路舗装点検データベースに対して適用した。愛知有料道路では、2012年から2021年にかけて路面性状調査が行われており、ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性が測定されている。これらの測定結果から、舗装路面の全体的な健全性を評価するためのMCI値を算出することができる。

3.2. データセットの構築

混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用するため、MCIを表-1の健全度評価基準に従って区分した。分析に用いるデータセットを構築するため、補修を行わないコンクリート舗装部と、走行車線と使用条件が異なるパーキングエリアや料金所のデータは除外した。加えて、補修の実施によって健全度が前回点検時より回復しているデータと、健全度が回復しておらずとも点検間に補修が実施されたデータを除外した。

混合マルコフ劣化ハザードモデルにおけるグルーピングについて、IC区間ごとに1グループとした。しかし、上り線と下り線間で交通量の差が大きい区間に関しては、これを異質性として捉えて上り線と下り線でグループを分けた。加えて、分析対象区間に存在する各橋梁の前後区間をまとめて1つのグループとした。

説明変数について、はじめに、土構造と路盤材料の分析を行った。各データの土構造が盛土か切土か、上層路盤材料が瀝青安定材系か粒度調整碎石系かを区別する2種類のダミー変数を採用した。これにより4種類の組合せが生じ、全データの平均的な劣化過程を表すベンチマーク期待劣化パスと区別して、分類別ベンチマーク期待劣化パスと呼ぶ。つぎに、上り線と下り線、走行車線と追越車線について分析を行った。土構造と路盤材料の分析と同様に、上下車線と走行追越車線を区別する2種類のダミー変数を採用し、4種類の組合せについて劣化過程を記した。

3.3. 推計結果

各グループの期待劣化パスとデータサンプル全体の平均的な劣化曲線であるベンチマーク期待劣化パスを図-1に示す。ベンチマーク期待寿命は22.3年である。舗装は一般的に更新が必要になるまでに供用から10年から20年を想定するが、同図からもわかるように、最も劣化の速い区間では期待寿命が約7年、劣化の遅い区間では期待寿命が30年を超える区間が

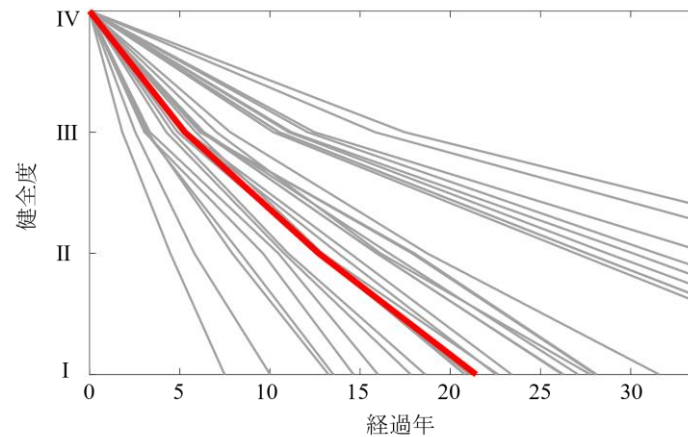


図-1 全グループとベンチマークの期待劣化パス

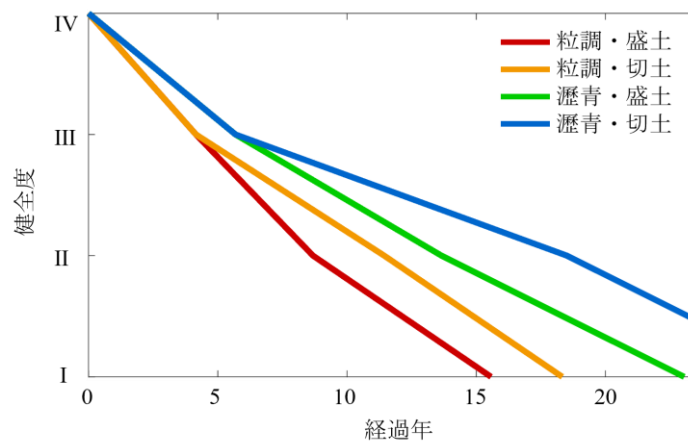


図-2 分類別ベンチマーク期待劣化パス

存在するなど、IC区間ごとの期待劣化パスには、大きなバラツキが見られた。

つぎに、分類別ベンチマーク期待劣化パスを図-2に示す。土構造は切土より盛土の場合に、上層路盤材料は瀝青安定処理材より粒度調整碎石が用いられている場合に期待寿命が小さくなり、土構造よりも上層路盤の属性の方が期待寿命に与える影響が大きいことが推定された。一般的に、瀝青安定処理材は粘弾性が高く温度変動や繰り返し荷重への耐久性が高いと考えられている。粒度調整材は相対的に繰り返し荷重や外部環境による影響が大きく、劣化が加速する。また、盛土の場合は設置後の地盤の沈下や水はけの悪さが劣化を速める原因となることが考えられる。切土は、より安定した地盤に設置されるため、外部からの圧力や環境条件の変化に対してより耐久性が高いことが考えられる。したがって、図-2に示す結果は土木技術者が持つ感覚・経験知と大きな乖離はない。しかし、それらの影響を定量的に分析し、科学的根拠により政策決定を行うためには、上記の様な分析が重要である。

図-3は、上下線区分と走行追越車線の影響を考慮した期待劣化パスを示している。同図では、先述のとおり、上下線区分と走行追越の組合せによる4つの期待劣化パスが描かれている。上下線区分では、下り線の期待寿命が短く、走行追越では、走行車線の期待寿命が短い。

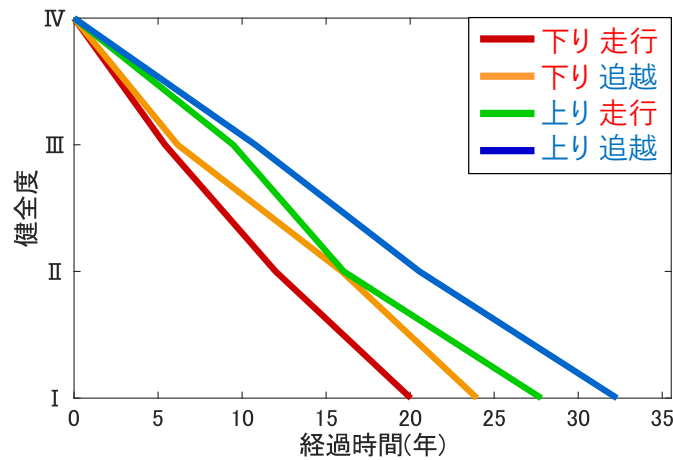


図-3 上下線区分と走行追越車線の影響

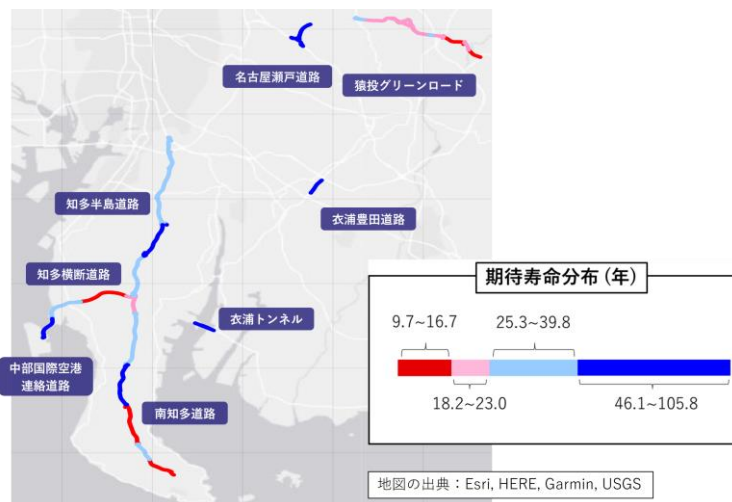


図-4 異質性パラメータに基づく劣化速度マッピング

しかし、上下線や走行追越で舗装構成や材料が著しく異なることはないため、下り線であることと走行車線が期待寿命を短くする直接の原因であるとは考えにくい。したがって、相関関係はあれど因果関係を論ずるには早計である。一方で、下り線と走行車線の両者に共通する事項は重量交通の存在である。愛知有料道路では名古屋市内から離れる方向が下りであるため、市内で載荷されたトラックなどが、郊外で積み荷を降ろす傾向がある。また、重量交通は通常、追越車線を走らず、走行車線を通過する。したがって、重量交通が舗装劣化の原因であることは推察できる。しかし、愛知有料道路では、大型車交通量などのデータは一部で調査されているものの、軸重データなど重量交通を定量的に分析するためのデータの蓄積は、統計分析を行うためには十分でない実情がある。したがって、図-3の結果をもとに、今後は、重量交通が多い区間を特定し、軸重に関する調査を行い、重量交通が舗装劣化の影響となっている仮説の検証が重要である。

舗装劣化速度の空間的関係を視覚化することを考える。図-4は、混合マルコフ劣化ハザードモデルにより推定された異質性パラメータの値に基づき、期待寿命の大小をIC区間ごとに色分けした結果を示す。同図では、ベンチマーク期待寿命と比較して劣化速度が速く期待

寿命が短いIC区間を赤色で、劣化速度が遅く期待寿命が長いIC区間を青色で示している。その中でも特に劣化が速く期待寿命が16.7年を下回る区間を濃い赤色で、特に劣化が遅く期待寿命が39.8年を上回る区間を濃い青色で示している。視覚化により、劣化が速い傾向がある道路と遅い傾向がある道路が分かる。管理者にとって特に重要な情報は劣化の速い区間であり、赤色の区間が地図下部の南知多半島道路、地図中央左部の知多横断道路の一部、地図右上の猿投グリーンロードに多いことが分かる。

4. おわりに

本研究では、実際にPPP事業化されている道路に対して混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用し、劣化速度を推定して要因の一部を特定した。その結果、盛土と切土または粒度調整砕石と瀝青安定材の属性間で比較をすると、それぞれ前者の劣化が速いことを確認した。また、上下線と走行追越車線で期待寿命が異なることを示した。しかし、上下線と走行追越車線については、それらが劣化の直接的な原因ではなく、重量交通の影響が卓越している可能性が考えられる。最後に、混合マルコフ劣化ハザードモデルの異質性パラメータの推定結果に基づき、劣化速度をマッピングした。これにより、一部の道路区間では劣化が速いなど、空間的な劣化傾向を把握することが可能になった。

【参考文献】

- 1) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.
- 2) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木学会論文集D3, Vol.68, No.4, pp.255-271, 2012.

（４）当該年度の成果の総括・次年度に向けた課題

2023年度の研究開発の進捗は概ね当初の予定通りである。大項目Aの統計的劣化予測と、劣化因子の抽出においては、（３）成果に示す通り、舗装の上層路盤の材料、土構造（切土か盛土）、上下線区分、走行追越車線区分などで舗装の期待寿命に統計的に有意な差があることが分かり、それらの影響を定量的に分析することができた。大項目Bの最適補修政策を策定するための意思決定モデルの構築にも着手しており、愛知有料道路を対象とした分析結果を2024年度の土木学会が主催する学会や研究発表会にて広く公表する予定である。

また、2025年度のソリューション創出フェーズへの移行を目指して、研究開発成果を広く社会実装していくための道筋についても検討している。具体的には、官民連携モデリング事業の一環としてさいたま市における実証研究を進めており、研究開発成果が一つの有料道路を対象としたものに留まらず、自治体を含め、多くの道路インフラ管理者を展開先として適用できる可能性を検証している。

一方で、2025年度以降に残された課題は、PPP/PFI契約書の雛形やアプリケーション開発などである。これらの準備段階にある成果に関しては引き続き開発を進める必要がある。

次年度の目標としては、既存の成果を踏まえて大項目BやCの内容など、さらなる実証分析を進め、PPP/PFI事業の社会実装への道筋をつけることである。また、ソリューション創出フェーズに移行するためには、地方自治体が直面する財政やリソースの限界に対応可能な道路インフラマネジメント手法の普及・定着活動を加速させることが求められる。これを達成するためには、研究開発成果を具体化し、政策決定に活用できるようなツールやモデルの開発を行うとともに、関連するステークホルダーとの連携をさらに強化していくことが不可欠である。また、持続可能なインフラ運用を実現するために、国土交通省や地方自治体といった公共機関との連携による共創的な研究開発を促進することが重要である。

2 - 3. 会議等の活動

年月日	名称	場所	概要
2023/10/4	劣化予測WG	Web会議	劣化予測に関する開発方針の検討
2023/10/25	最適補修政策WG	大阪大学	最適補修政策に関する開発方針の検討
2023/11/15	社会実装WG	Web会議	社会実装に関する開発方針の検討
2023/11/19-20	全体会議	秋葉原	RISTEX・SOLVE全体会議
2023/11/21	社会実装WG	Web会議	全体会議の内容共有
2023/11/27	社会実装WG	Web会議	事業モデル展開先に関する議論
2023/12/4	戦略会議	Web会議	貝戸PJ戦略会議
2023/12/13	劣化予測WG	大阪大学	劣化予測に関する研究進捗の共有と今後の方針に関する議論
2024/1/9	東京大学との意見交換	東京大学	愛知有料道路を対象に床版の土砂化予測を行っている東京大学の研究グループと意見交換
2024/1/22	デンソーとの意見交換	Web会議	デンソーと道路管理に関する意見交換
2024/2/7	社会実装WG	大阪大学	舗装マネジメントシステムに関する議論
2024/2/28	最適補修政策WG	Web会議	最適補修政策に関する研究進捗の共有と今後の方針に関する議論
2024/3/3	劣化予測WG	Web会議	劣化予測に関する研究進捗の共有と今後の方針に関する議論
2024/3/7	サイトビジット	愛知有料道路	愛知有料道路で現場見学
2024/3/14	さいたま市との意見交換	さいたま市 大宮区役所	自治体における舗装マネジメントの現状について意見交換

3. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況

本プロジェクトではPPPおよびPFIを活用した道路インフラの効果的なマネジメント手法の研究開発を進める。具体的には、はじめに統計的劣化予測モデルを開発し、説明変数として統計的に有意である情報項目を抽出し、舗装の劣化要因について分析する（大項目A）。つぎに、上記の統計的劣化予測モデルにより推定された、舗装健全度の状態推移確率を用いて、最適維持管理計画を策定する意思決定モデルを構築する（大項目B）。そして、大項目AとBの研究のアウトプットを活用して、PPP/PFI事業導入効果の定量的評価を行う（大項目C）。これらの研究開発項目は、愛知有料道路における舗装マネジメントシステムを活用した実証分析を通じて、研究開発成果の社会実装への道筋を探索している。この実証分析では、実際の舗装路面性状調査データを用いて、舗装の劣化予測と最適な補修タイミングの特定を行い、費用効率の良い道路維持管理を目指している。

さらに、2025年度のシナリオ創出フェーズからソリューション創出フェーズへの移行を見据えて、上記の研究開発成果をもとに、地方自治体が直面する予算制約や資源の限界に対応可能な新たな道路インフラマネジメント手法について、地方自治体への適用可能性に関する検討を始めている。具体的には、協働実施者の川井は国土交通省総合政策局社会資本整備政策課が進める官民連携モデリング事業にシーズ提案を行い、インフラ群マネジメントの検討の一部として本手法をさいたま市をフィールドに実施中である。本事業は、インフラの老朽化やカーボンニュートラルの推進など、地方公共団体の抱える課題は深刻化・多様化しておりことを受け、これら政策課題への解決として、PPP/PFI手法の活用ニーズが高まっているとした上で、国土交通省が、インフラの運営等に関し、民間提案に基づく先導的な官民連携手法を、民間・国土交通省と一体となって創出し、地方公共団体に広げていく取組である。したがって、本プロジェクトの出口戦略として、このような国土交通省事業との連携が重要であることがわかる。また、協働実施者の川井が中心となり、インフラGで道路包括事業に関する意見交換を約200の自治体と行っている。研究開発成果の展開に向けて、各自治体のニーズを把握することが重要であり、自治体とのパイプライン構築が重要である。また、パイプラインの構築には本プロジェクトの参画機関である、NTTグループの人的ネットワークを活用している。

さらに、全体会議や戦略会議などで、本プロジェクトのマネジメントチームから、関係するすべてのステークホルダーとの連携を密にすることを期待するとの意見を頂戴した。これを受け、マネジメントチームの助力を受けながら、道路利用者側の意見を聞くため、デンソーとの意見交換の場を設けた。さらに、インフラ運営において欠かせないステークホルダーである、銀行などの金融機関との連携についても協議を始めた。また、国土交通省が進めるインフラ群マネジメント再生戦略と関連するSIPプロジェクトを足掛かりに、地方自治体との連携も進めている。

本プロジェクトを通じて得られた知見と成果は、学術会議や国内外のシンポジウムで積極的に発表していく予定である。特に令和6年度では既に2件の発表を予定している。これにより、PPP/PFIを用いた道路インフラマネジメントのベストプラクティスが業界に広く認知され、政策提言や業界標準の見直しなど、持続可能な社会基盤の構築に向けた実践的なモデルとして定着することを目指す。

4. 研究開発実施体制

阪大グループ

役割：理論モデルの構築，データ分析

概要：劣化予測，最適維持管理手法，事業導入効果の定量的評価手法の開発と適用を手掛ける．各研究項目でのデータ分析を担当する．

必要性：理論モデルの構築により研究の根拠を確立する．

インフロニアグループ

役割：データベースの構築，事業スキーム策定，協力組織調整

概要：解析用のデータベース構築，PPP/PFI導入効果を反映した事業スキームの策定を主導し，協力組織間の調整役を果たす．

必要性：データベースは研究の基盤，事業スキームは成果の実装を支える．協力組織調整は活動の連携を保障する．

前田建設グループ

役割：舗装マネジメント実務指南，コーディネータ

概要：舗装の補修工事に関する工法選定や単価設定などを主体となって実施する．コーディネータとして多数の異なる専門分野や利害関係を持つステークホルダー間のコミュニケーションを円滑にし，プロジェクトの進行に必要な情報共有や意思決定を促進させる役割を担う．

必要性：舗装工事の品質と経済性を確保し，ステークホルダー間の情報共有と効率的な推進を実現する．

5. 研究開発実施者

阪大グループ（リーダー氏名：貝戸清之）

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
貝戸 清之	カイト キョ ユキ	大阪大学	大学院工学研 究科	教授
笹井 晃太郎	ササイ コウ タロウ	大阪大学	大学院工学研 究科	特任研究員

インフロニアグループ（リーダー氏名：川井晴至）

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
川井 晴至	カワイ セイ ジ	インフロニア・ホ ールディングス	総合インフラ サービス戦略 部	
松尾 健二	マツオ ケン ジ	インフロニア・ホ ールディングス	総合インフラ サービス戦略 部	
堀川 真加	ホリカワ マ ナカ	インフロニア・ホ ールディングス	総合インフラ サービス戦略 部	
松林 卓	マツバヤシ タク	インフロニア・ホ ールディングス	総合インフラ サービス戦略 部	

前田建設グループ（リーダー氏名：中島良光）

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
中島 良光	ナカジマ ヨ シミツ	前田建設工業株 式会社	ICI総合セン ター	
安井 利彰	ヤスイ トシ アキ	前田建設工業株 式会社	ICI総合セン ター	
濱島 彩織	ハマジマ サ オリ	前田建設工業株 式会社	土木事業本部 土木技術部	
郭 慶煥	カク キョン ファン	前田道路株式会社	技術本部 技術研究所 社会基盤開発 室”	

6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など

6-1. シンポジウム等

年月日	名称	主催者	場所	参加人数	概要
	なし				

6-2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

(1) 書籍, フリーペーパー, DVD

- ・(タイトル, 著者, 発行者, 発行年月等)
なし

(2) ウェブメディアの開設・運営

●協働実施者：川井晴至

- ・【日本でここだけ】民間委託で運営する有料道路に潜入取材！隈研吾さん監修のPA
がめっちゃオシャレ

https://www.youtube.com/watch?v=0ATH_Rsg_e0

2023年8月3日

- ・インフラの持続可能性を高める官民連携（PPP/PFI）セミナー 第3回：道路・交通
分野でのモデルケースの解説

「民間事業者によるバリューアップ」

<https://www.infroneer.com/jp/news-article/2024/03/19/813.html>

2024年3月19日

(3) 学会(6-4.参照)以外のシンポジウム等への招聘講演実施等

●協働実施者：川井晴至

- ・EBPMによる地域インフラ群マネジメントに関するシンポジウム
「EBPMに基づく包括的民間委託や官民連携を目指して」

2024年1月29日

大阪大学中之島センター佐治敬三メモリアルホール

6-3. 論文発表

(1) 査読付き(0件)

●国内誌(0件)

・

●国際誌（0件）

・

（2）査読なし（0件）

・

6－4．口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）

（1）招待講演（国内会議0件，国際会議0件）

・

（2）口頭発表（国内会議0件，国際会議0件）

・

（3）ポスター発表（国内会議0件，国際会議0件）

・

6－5．新聞／TV報道・投稿，受賞等

（1）新聞報道・投稿（1件）

●インフロニアHD（協働実施者：川井晴至）

・建設通信新聞

「自治体向けに修繕計画支援」

2024年4月1日

・日刊工業新聞

「ドコモなど、道路の長期修繕計画策定を支援 デジタル基盤開発」

2024年4月4日

（2）受賞（0件）

・

・

（3）その他（1件）

●協働実施者：川井晴至

・「ICTへの置き換えだけではDXは成し得ない」.デジタルツイン構想が導く新時代のインフラ維持

<https://hiptokyo.jp/hiptalk/dtrm/>

2023年8月7日

6－6．知財出願

（1）国内出願（0件）

なし

（2）海外出願（0件）

なし