社会技術研究開発事業
令和６年度研究開発実施報告書

ＳＤＧｓ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

（前田建設工業株式会社　経営革新本部　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．研究開発目標 2
２‐２．実施内容・結果 8
２‐３．会議等の活動 18
３．研究開発成果の活用・展開に向けた状況 19
４．研究開発実施体制 20
５．研究開発実施者 22
６．研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など 24
６－１．シンポジウム等 24
６－２．社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など 24
６－３．論文発表 24
６－４．口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表） 25
６－５．新聞／TV報道・投稿、受賞等 25
６－６．知財出願 25

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・安心とサスティ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．

■　ＳＤＧｓ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．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協定制度，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，不必要な修繕・更新の削減によるCO_2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となる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．

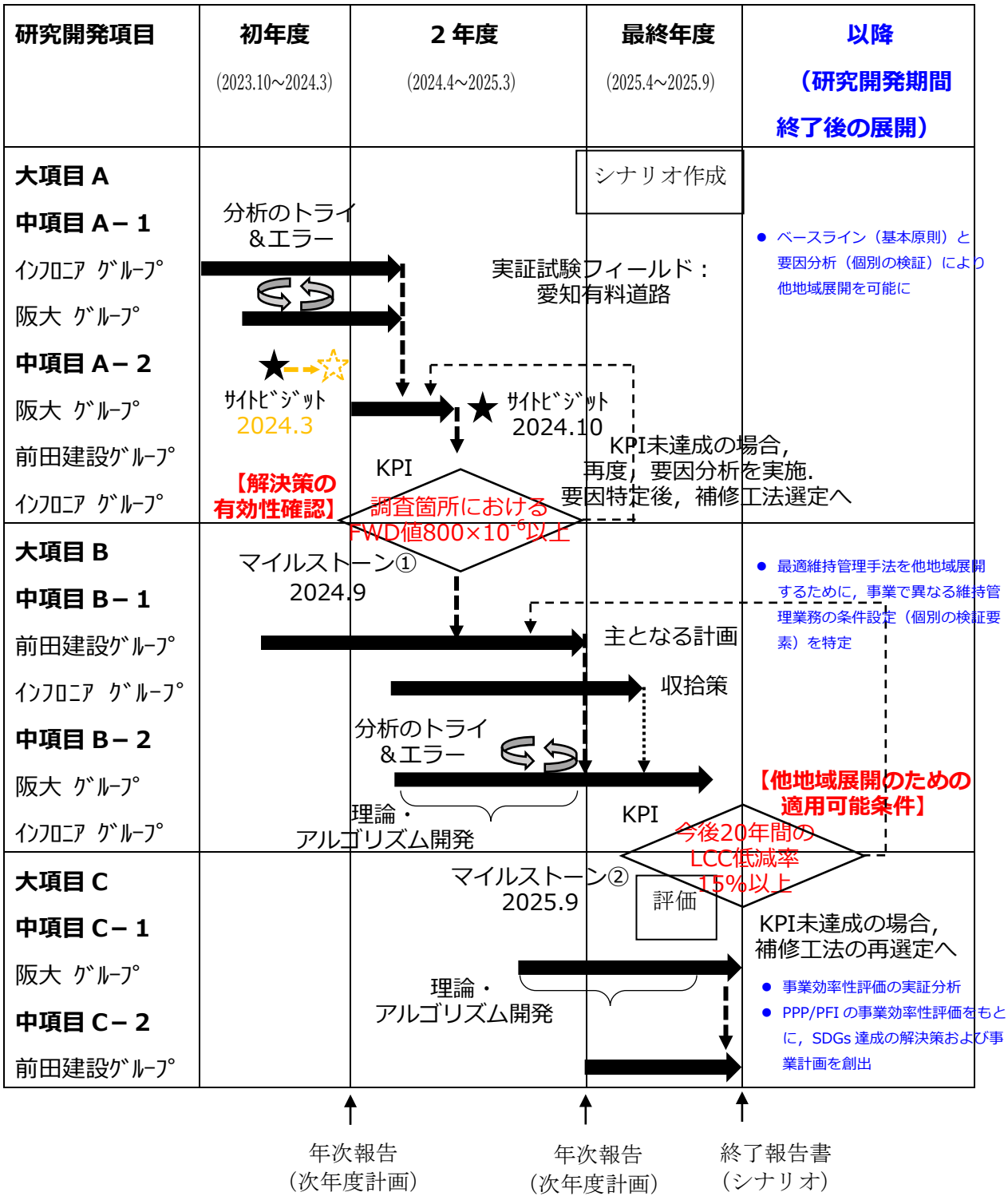
本プロジェクトでは単に技術開発を進めるだけではなく，各研究協力組織や関係するステークホルダーとの協働・連携・ビジネスモデルを構築する．具体的には，阪大G

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

（１）スケジュール

研究開発期間中（24ヶ月）のスケジュール



（２）各実施内容

今年度の**到達点①**：対象道路区間の路面性状調査データ（ひび割れ率，わだち掘れ量，IRI）を用いてマルコフ劣化ハザードモデルおよび混合マルコフ劣化ハザードモデルに基づいて，路線単位，インター区間単位の劣化曲線および期待寿命を推定する．路線やインター区間の劣化予測結果には相違が生じるものと考えられるが，その相違をもたらす劣化要因について，台帳データや日常巡視記録をもとに統計的検定手法により特定する．

実施項目①-1：期待寿命の相違に影響を及ぼす劣化要因の特定
実施内容：混合マルコフ劣化ハザードモデルのグルーピングや説明変数を検討し，舗装の劣化曲線の差異を生じさせる原因を特定し，その影響の統計的検定を行う．
実施体制：阪大グループ

今年度**の到達点②**：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．また，最適維持管理計画を策定するため，目的関数に含めるべき，費用項目，便益項目などについて検討する．

実施項目②-1：データクレンジング
実施内容：最適維持管理計画を立案するためには，道路インフラのライフサイクル費用を最小化する維持管理計画を立案することが不可欠である．そのためには，過去の補修履歴等に基づき補修工事のメニュー選定と単価の積算を行う必要がある．さらに，工事に伴う通行規制による料金収入の減少，交通渋滞，交通事故リスクなど，最適維持管理計画の立案に含めるべき費用項目を関係者間の協議を踏まえて決定していく．
実施体制：前田建設グループ，インフロニアグループ

実施項目②-2：非斉次型の最適維持管理手法の構築
実施内容：PPP/PFI契約の終了時点でのインフラの健全性（どのような健全状態でインフラを返却するか）を与件とする，非斉次型マルコフ決定モデルを定式化【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の拡張】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する．さらに，現行の計画，あるいは斉次型の計画（永続的な管理計画）との比較を通して，費用削減効果を定量化する．
実施体制：阪大グループ

今年度の**到達点③**：民間技術の導入による業務効率性を計量化する．PPP/PFIプロジェクトの運営における民間技術の活用が，業務効率に与える影響を，確率的フロンティア分析を通じて定量的に評価する．この分析では，PPP/PFI導入前後のデータを比較し，導入によるコスト効率の変化を分析する．PPP/PFIモデルの効率性向上に寄与する具体的な証拠を提供し，今後の運営戦略に活用できる情報を作成するとともに，他地域展開を目指した事業モデルの骨子を構築する．

実施項目③-1：事業効率性評価
実施内容：民間技術を導入することによる業務の効率性を確率フロンティア分析により計量化する．具体的には確率的費用フロンティアモデルを用いて推定した費用効率性パラメータの分布をPPP/PFI導入前後で比較し，有意性検定を行う．
実施体制：阪大グループ

（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，団塊的な老朽化や管理者である公共団体における人的・財的リソースの不足が上げられる．そこで，効率的な維持管理を実現するために，民間企業の技術や経営に関する能力と資金を活用するPPP/PFI事業が有効であると考えられている．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/PFI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/PFI事業の活用を推進するべく，PPP/PFI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．このために昨年度は，実際にPFI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った．そして本年度は，劣化予測結果を活用した補修の意思決定モデルを開発し，最適補修政策とLCCを推定した．加えて，FWD調査を行うべき場所を推定するために，FWD調査実施箇所のスクリーニング手法を開発した．

2. 分析の理論

2.1. マルコフ決定過程

2.1.1. 基本概念

意思決定者があるシステムに対して意思決定と報酬の受領を繰り返す場合に，総報酬を最大化する行動の定式化にマルコフ決定過程の理論が用いられる．マルコフ決定過程はシステムの状態の集合S，意思決定者が取る行動の集合A，システムの状態間の推移確率p，意思決定者が得る報酬rの4 要素から構成される意思決定者は離散的時間軸$t = 0, 1, 2, \cdots$の各期tでシステムの状態$s_t \in S$を観測し，それを基に行動$a_t \in A$ を取る．そしてシステムは状態$s' \in S$に確率$p(s' \mid s_t, a_t)$ で推移し，意思決定者は報酬の期待値$r(s_t, a_t)$ を得る．この一連の流れを繰り返して意思決定を行う最終期までに得られる総報酬を最大化することおよび，これを実現する行動を状態観測時に返す関数(政策)πを策定することがマルコフ決定過程の目的である．

政策の性質として斉時あるいは非斉時が挙げられる．斉時はある状態s_iが観測された場合に期に依らず必ず行動$a(s_i)$ を取る．非斉時は状態s_iが観測された場合にあるt 期ならば行動$a(s_i, t)$ を取るが，t' 期では別の行動$a(s_i, t')$ を取る可能性がある．つまり行動が時間に依存するならば斉時的，依存しないならば非斉時的である．意思決定を行う期間が無限の場合は斉時的，有限の場合は非斉時的な政策が基本的に最適であることが分かっている．本研究が対象とするPFI事業化された道路は民間企業による管理期間が定められているため有限期間問題として取り扱う．

2.1.2. 値反復法

マルコフ決定過程の有限期間問題を解く方法は複数存在するが，本研究では値反復法を用いる．離散的時間軸0,1,…,Tを期と呼ぶ．各t 期に観測される状態と取る行動をそれぞれ

$s_t \in S$, $a_t \in A$とする．t 期において状態s_tで行動a_tを取った結果，$t+1$ 期の状態がs_{t+1}となる確率を$p(s_{t+1}/s_t, a_t)$，その際に得る期待報酬を$r(s_t, a_t)$ とする．初期状態がsの場合に得られる報酬の条件付き期待値を$E[\cdot/s]$，社会的割引率をγと置く．t 期からT 期までに得る報酬の条件付き期待値$v(s_t,t)$は，行動$a_k \in A(k=1,2,\cdots,\mathrm{K})$ ごとに異なる値を取り，

$$v(s_t,t) = r(s_t,a_t) + \gamma \sum_{s \in S} p(s_{t+1}|s_t,a_t)V(s_{t+1},t+1) \tag{1}$$

と表される．$V(s_t,t)$は$t=T$においてはシステムの状態がs^iにおける残存価値を表す．また，t=0,1,⋯,T-1においては$v(s_t,t)$の最大値を表すため，次式で定義できる．

$$V(s_t,t) = \max_{\{a_k \in A\}} v(s_t,t) \tag{2}$$

社会基盤施設の補修費用にマルコフ決定過程の理論を適用する際は，報酬を負として，負の報酬の最大化=補修費用の最小化問題と帰着できる．

2.1.3. 健全度に閾値を設けた値反復法

2.1.2.で述べた値反復法は費用の最小化のみを目的としており，健全度の良し悪しは考慮されない．つまり，補修費用が最小になる，補修を全く行わない政策が最適であると導かれる．そこで本研究では，有限期間の全期間に渡り全健全度のうち最も悪い健全度Ｉの占める割合が任意の閾値を超過しない政策群の中から，LCC が最小の政策を最適補修政策$\pi*$として策定する手法を提案する．ある1 期において健全度i が占める割合の期待値を$E[O_i]$，$E[O_I]$ が満たすべき閾値を$risk$ と置き，この手法のアルゴリズムを以下に示す．

ステップ**1**　$E[O_I]$に閾値を設けずに値反復法を行い，結果の政策を暫定的な最適補修政策π'とする．カウンタ変数(補修上限値)m の初期値を1 とする．

ステップ**2**　π' において，0～T 期間中に$E[O_I] \geq risk$ となる期が存在するならばその最小の期をt'と置く．全期間に渡って$E[O_I] < risk$ ならばπ'を最適補修政策$\pi*$と置き換えて手順を終了する．

ステップ**3**　0～$t'-1$ 期間に各状態候補s_iごとに補修を0～m 回行う政策パターンを生成し，全パターンで$E[O_I]$とLCCを算出する．0～t' 期間に渡って$E[O_I] < risk$となる政策群の中からLCC 最小のものをπ'とする．

ステップ**4**　$m = m+1$ とし，ステップ**2** に戻る．

2.2. ロジスティック分析

ロジスティック回帰分析は2値の結果（あり/なし）を取る事象が起こる確率を推定する手法である．説明変数と回帰変数の線形結合をシグモイド関数によって確率値に変換し，この確率が閾値より大きければ事象が起こり，小さければ起こらないと判定する．説明変数を$x_1, x_2, \ldots x_n$，回帰変数を$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \ldots \beta_n$とすると，目的変数である事象発生の確率$P$は，

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n)}} \tag{3}$$

と表され，回帰変数は最尤法により算出する．また，説明変数が目的変数に与える影響の大きさをオッズ比により定量化する．説明変数x_mのオッズ比はその回帰変数β_mを用いて$e^{-\beta_m}$と表され，1より大きければこの説明変数の増加が事象発生の確率を高めることを意味する．そして，AUCと呼ばれる指標によりロジスティックモデルの精度を評価する．

3. 実証分析

3.1. LCCと最適補修政策

3.1.1. 分析の概要

点検が行われた100mの1区間ごとに，提案手法を用いてLCCと最適補修政策を求めた．MCIを表**3.1.1**の健全度評価基準に従って区分した．補修コストとして愛知有料道路を管理している民間企業が実際に用いている費用を参照した．補修パターンは2 種類あり，1）表層のみの補修または2）表層と基層を同時に補修するパターンである．昨年度は，実際にPFI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混合マルコフ劣化ハザードモデルを適用し，道路の健全度が推移する確率を推定した．そして，これを状態の推移確率として用いた．2021 年から5 年に1 度行う点検の直後に補修の有無の決定し，補修を実施するのであれば直ちに健全度がⅣに回復するという仮定を置いた．直近の目視点検で健全度Ⅰと観測された区間については次回5 年後の点検までに補修するという実際の委託条件に従い，最大価値に限らず健全度Ⅰでは補修を行う設定とした．初期健全度は2021年の最新点検時における健全度を用い，社会的割引率をγ= 4%とし，閾値$risk$=0.1とした．

3.1.2. 提案手法と従来方式の比較

提案手法を用いて，愛知有料道路のある一区間を対象に，非斉時的な最適補修政策，LCC，健全度占有率の推移およびコンセッション終了までの1 年ごとに発生する費用を導出した．一方，社会基盤施設は通常，半永久的に供用する前提が置かれるため無限期間問題である．そこで愛知有料道路を無限期間問題と仮定し，先と同じ区間で従来方式の斉時的な補修政策に準拠した場合のLCCなどを導出した．そして各種結果を非斉時政策と斉時政策間で比較し，提案手法の優位性を示す．

表**3.1.2.a**と表**3.1.2.b**に各問題とした場合の最適補修政策を，図**3.1.1**に各々に従った場合の健全度占有率の推移を示している．この表では，点検時に観測された健全度によって補修の有無を○(補修実施)と×(補修無実施)で示している．例えば，非斉時的な最適補修政策において，3期目の点検時に健全度Ⅳ，Ⅱならば補修を行わず，Ⅲ，Ⅰならば行うと読み取る．また，値反復法では行動を決定する期にのみ報酬が発生するが，その報酬を点検間隔にあたる向こう5 年間で平準化して支払うという仮定を置き，報酬を5 で除すことで委託終了までの1 年ごとに発生する費用を算出した．これを図**3.1.2** に示す．LCCは非斉時的な政策の場合は斉時的な政策に比べて1.3%小さく，非斉時的な政策の方が有利になることが確認できた．これは，斉時的な政策では委託終了間近の5期にも健全度Ⅱに対して補修を行うことや，マルコフ連鎖の平衡状態に近付くと$E[OI] = 0.047$ となり閾値0.1 より過剰に良好な状態を保っていることに起因すると考えられる．また，斉時的な政策においては最終期であ

表3.1.1　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

表-3.1.2.a　非斉時的な最適補修政策

		点検期					
		1	2	3	4	5	6
健全度	IV	×	×	×	×	×	×
	III	×	×	○	×	×	×
	II	×	×	×	○	×	×
	I	×	○	○	○	○	×

表-3.1.2.b　斉時的な最適補修政策

		点検期					
		1	2	3	4	5	6
健全度	IV	×	×	×	×	×	×
	III	×	×	×	×	×	×
	II	○	○	○	○	○	○
	I	○	○	○	○	○	○

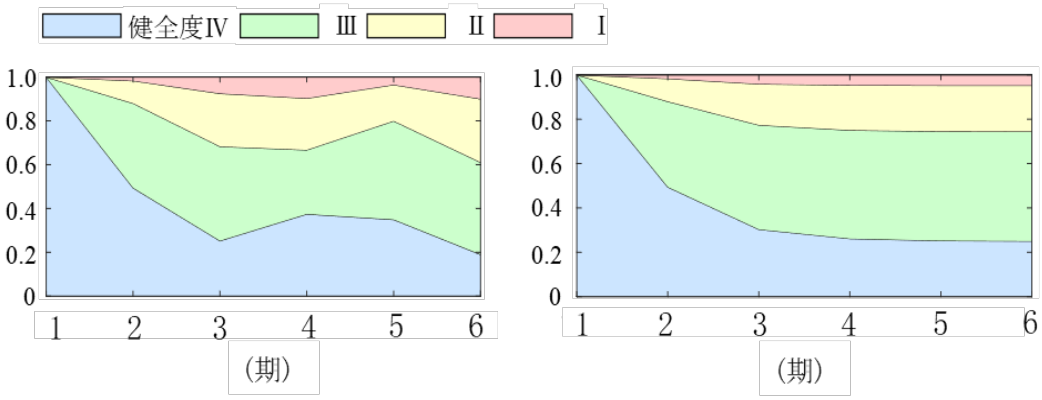


図3.1.1　非斉時的な政策(左）と斉時的な政策(右）に従った場合の健全度占有率の推移

る6期に費用が他の期と比べて著しく大きくなっている．コスト縮減と予算平準化の両面で提案手法を用いた最適補修政策の優位性が確認できた．次に，愛知有料道路全体のLCCを(A)非斉時と(B)斉時政策間で比較する．最適補修政策を策定する一区間ごとのLCCを全て合計して，愛知有料道路全体のLCCとしている．各政策における単期費用と累積費用を図3.1.3に示す．LCC は非斉時的な政策の場合は斉時的な政策に比べて6.0%小さくなった．1~3期は非斉時政策の単期費用が斉時政策のものを上回るが4~5期で逆転し，LCCとしては非斉時政策の方が有利ということが読み取れる．

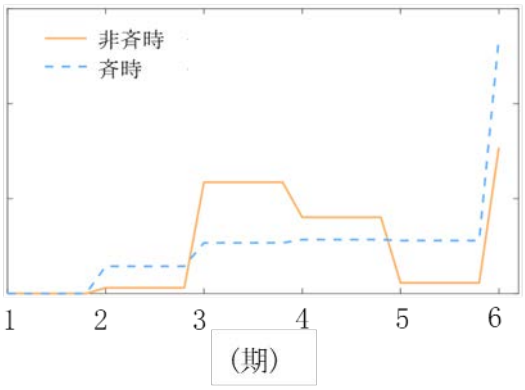


図3.1.2　政策間における1年ごとの費用の比較

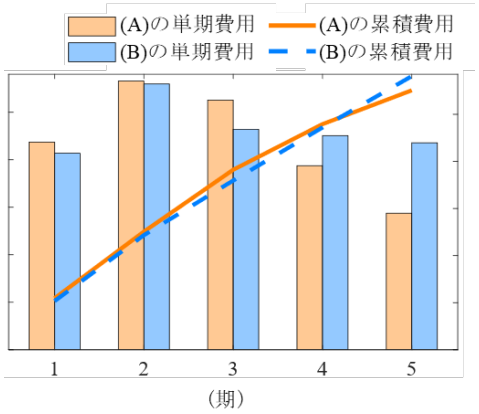


図3.1.3　各政策の単期費用と累積費用

表-3.2.1　ロジスティック分析の結果

	係数	p値	オッズ比
定数項	0.890	0.0177	2.44
IRI	0.698	0.0484	2.01
期待寿命	−4.45	$\lvert p \rvert < 0.01$	0.0117

3.2.FWD調査実施のスクリーニング

3.2.1.　分析の概要

実際にFWD調査を行ったデータを用いて，FWD調査実施の要否を推定するロジスティックモデルを構築した．FWD調査は2024年に南知多道路の一部を対象に行われた．ロジスティック分析を行うにあたって，目的変数はFWD調査が行われる確率，説明変数は舗装の期待寿命とIRIを正規化した値とした．モデルの精度を評価するための教師データ(実際にFWD調査を実施して得られたデータに対して，必要性があったかどうか)は，交通量と設計CBRに基づく必要T_Aと残存T_Aを比較して作成した．ロジスティック分析の説明変数の一つである期待寿命は混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて推定した．

3.2.2.　ロジスティックモデルの構築

ロジスティック分析を行った際の，各説明変数に対する係数，p値，オッズ比を**表3.2.1**にまとめて示す．x_1をIRI，x_2を期待寿命とするとFWD調査を行う必要がある確率Pは，

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(0.89+0.698x_1-4.45\beta_2 x_2)}}$$

と算出される．モデルの精度を評価するAUCは0.809である．また，FWD調査が必要な確率について，オッズ比からIRIが1mm/m増加すると1.46倍，期待寿命が1年減少すると1.39倍増加すると推定された．

4. おわりに

本研究では，実際にPFI事業化されている道路に対して非斉時的な最適補修政策を策定するモデルを開発し，LCCを算出した．そして，この結果と従来方式の斉時的な政策に従った場合のLCCを比較した．その結果，提案手法を用いた最適補修政策が予算平準化と予算低減の両面で有利であることが示された．また，一つの路線に対するFWD調査データを用いてFWD調査を実施する箇所の選定手法を構築した．

（４）当該年度の成果の総括・次年度に向けた課題

2024年度の研究開発は当初計画に沿って順調に進展し，愛知有料道路を対象とした統計的劣化予測および最適維持管理計画に関する実証分析で重要な成果を得た．

大項目Aでは，過年度に構築した路面性状データベースを用いて混合マルコフ劣化ハザードモデルによる舗装の状態推移の確率的推定を行い，舗装の期待寿命を定量的に把握した．特に，劣化予測結果に基づき損傷が大きいと推定された区間に対してFWD調査を実施し，予測モデルの妥当性を実地データで検証することができた．

大項目Bでは，契約終端条件を踏まえた非斉時的な最適補修政策の意思決定モデルを構築し，従来の斉時政策との比較を通じて，LCC（ライフサイクルコスト）の削減および予算の平準化の両面で優位性を確認した．また，健全度Ｉの占有率を閾値以下に抑える制約付きの政策設計を行うことで，現実的な品質維持水準を確保しつつ，最適政策の導出が可能であることを示した．

大項目Cでは，FWD調査結果をもとにした予測モデルの検証とLCC分析に着手しており，現在も進行中である．特にC-2においては，当初予定していたCO_2排出量削減効果の評価については，十分なデータが得られていないため見送ることとし，代わりにFWD試験を活用して得られたデータと予測結果との整合性検証，およびそれに基づくLCC分析に重点を置いている．

最終年度である次年度（9 月までの 6 ヶ月間）は，これらの実証成果を基に，PPP/PFI契約の標準化, アプリケーション開発, 実運用への適用性評価をさらに進めるとともに，国土交通省が主導する官民連携モデリング事業などの支援制度との連携を深化させ，自治体での実証結果を起点とした全国展開への戦略を具体化していく．

また，地方自治体が抱える財政制約・人材不足等に対応した持続可能なインフラマネジメント手法の開発と普及を目的として，政策決定支援ツールの開発と多様なステークホルダーとの連携強化が不可欠である．これにより，本プロジェクトの研究成果が自治体実務に根ざした形で定着し，PPP/PFIを軸とした持続可能な社会基盤整備への貢献が期待される．

２－３．会議等の活動

年月日	名称	場所	概要
2024/4/19	年度キックオフ	大阪大学	年度キックオフ
2024/5/10	社会実装WG	大阪大学	社会実装に関する開発内容の打合せ
2024/6/18	劣化予測WG	大阪大学	劣化予測に関する開発内容の打合せ
2024/7/23	最適補修政策WG	大阪大学	最適補修政策に関する開発内容の打合せ
2024/7/31	劣化予測WG	Web会議	劣化予測に関する開発内容の打合せ
2024/9/17	サイトビジット	愛知有料道路	愛知有料道路で現場見学 総括，プログラムアドバイザーらと打合せ
2024/10/10	全体会議	中之島	RISTEX・SOLVE全体会議
2024/10/18	最適補修政策WG	大阪大学	最適補修政策に関する開発内容の打合せ
2024/11/18	戦略会議	Web会議	貝戸PJ戦略会議
2024/12/26	さいたま市と打合せ	Web会議	研究開発成果の展開可能性に関する打合せ
2025/1/9	最適補修政策WG	Web会議	最適補修政策に関する開発内容の打合せ
2025/1/23	さいたま市と打合せ	Web会議	研究開発成果の展開可能性に関する打合せ
2025/2/21	最適補修政策WG	大阪大学	最適補修政策に関する開発内容の打合せ
2025/3/5	劣化予測WG	大阪大学	劣化予測に関する開発内容の打合せ
2025/3/17	さいたま市と打合せ	さいたま市	研究開発成果の展開可能性に関する打合せ
2025/3/19	戦略会議	Web会議	貝戸PJ戦略会議

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求している．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した．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，インフロニア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．

多地域展開に向けたシナリオ開発，とりわけ，対象地域を特定したシナリオ開発については，官民連携モデリング事業終了後も継続してさいたま市と協働関係を築いている．2024年10月には，さいたま市，インフロニア・ホールディングス，大阪大学大学院工学研究科の3者で包括連携協定を締結した．本協定では，インフロニア・ホールディングスのグループ会社である前田道路・三浦建設工業特定共同企業体が取り組むさいたま市岩槻区における包括的道路パトロール業務や，大阪大学が目指す研究シーズの社会実装を目指して，さいたま市における地域・暮らしの安心・安全の実現，公共施設及びインフラに係る市民サービスの更なる向上に向けて包括的に取り組むこととした．連携協定締結後は，対面打合せをベースに2～3か月間隔で協議を行っている．その中で（1）舗装の劣化予測技術の高度化と効果的な活用方法の実践，（2）商用車プローブデータを活用したIRI換算と業務の効率化効果の測定，（3）官民連携手法を活用した将来の持続的なインフラ維持管理体制の構築に向けた勉強会の3テーマに取り組んでいる．

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，信託銀行などの金融機関や保険，自動車メーカー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く予定である．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．

研究代表者を中心とする阪大グループは，本プロジェクトの基盤となる理論モデルの構築および統計的データ分析を担う中核的な役割を果たす．混合マルコフモデルや最適意思決定モデルなどの数理的手法を駆使して，PPP/PFI事業における科学的根拠に基づく劣化予測と最適維持管理計画の策定を主導するとともに，事業導入効果の定量的評価を通じた成果の汎用化と展開性の確保を担当する．

協働実施者を中心とするインフロニアグループと前田建設グループは自治体とのパイプライン構築およびPPP/PFIの導入に向けた具体的な事業スキームの策定と実務支援を担当する．前田建設グループは，愛知道路コンセッションにおいて得た舗装マネジメント実務のノウハウをもとに，他地域展開に必要な標準化された業務手順と仕様の構築を進める．さらに，NTTドコモおよびNTTコムウェアから成るNTTグループは，全国的なプロジェクト認知の拡大を担当し，国土交通省が推進する施策と密接に連携しながら，自治体に対する積極的な情報発信と政策的支援を実施する役割を担う．

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　キヨユキ	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	特任助教

インフロニアグループ（リーダー氏名：松尾健二）

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職（身分）
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	
青木　一也	アオキ　カズヤ	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：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	前田建設工業株式会社	経営革新本部参事役	参事役
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
・「4次元デジタルアセットマネジメントのためのシステム構想」，貝戸清之，建設マネジメント技術12月号，2024.12

（２）ウェブメディアの開設・運営
・なし

（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
・なし

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　1　件）
・貝戸清之，The 3rd International Transportation Conference，2025年4月11日，カトマンズ，ネパール
・

（２）**口頭発表**（国内会議　2　件、国際会議　0　件）
・阿部寿子，笹井晃太郎，貝戸清之，川井晴至：道路コンセッションにおける非斉時型意思決定モデルの提案，第69回土木計画学研究・講演集，土木学会，CD-ROM，A13-3，北海道大学，2024.5
・阿部寿子，笹井晃太郎，貝戸清之，川井晴至：コンセッション方式の特徴を考慮した補修政策策定モデルの提案，令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会講演概要集，土木学会，IV-60，東北大学，2024.9

（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**（　0　件）

（２）**受賞**（　0　件）
・
・

（３）**その他**（　2　件）
・貝戸清之，BS-TBS「報道1930」，2025年2月7日
・貝戸清之，NHK「かんさい熱視線」，2025年4月4日

６－６．知財出願

（１）**国内出願**（　0　件）
・“発明の名称、発明者、出願人、出願日、出願番号”
・・・

（２）**海外出願**（　0　件）
・“発明の名称、発明者、出願人、出願日、出願番号”
・・・