

「科学的エビデンスに基づく社会インフラの マネジメント政策形成プロセスの研究」

[データサイエンス技術で老朽化した社会インフラを守る]

貝戸 清之

大阪大学大学院工学研究科 准教授

科学的エビデンスに基づく社会インフラの マネジメント政策形成プロセスの研究

データサイエンス技術で老朽化した社会インフラを守る

貝戸清之

Kiyoyuki KAITO

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 准教授

道路、橋梁、トンネルなどに代表される社会インフラの老朽化が顕在化し社会問題化する中で、その補修や更新に関するマネジメント政策の重要性が増している。しかし、現状のマネジメント政策は、技術者の経験と知識に基づいて形成されており、いわゆる前例、経験に基づく政策形成であるという批判を免れず、①高度経済成長期整備された社会インフラの団塊的的老朽化、②日本社会のダウンサイジング、③ベテラン技術者の経験・知識と、センサー・ドローン・ICT・AIなどの革新的技術の混在など、社会インフラおよびその周辺環境の劇的な変化の中で、今後、適切なリソース配分が困難になるという実務的課題がある。本プロジェクトでは、科学的エビデンスに基づくマネジメント政策形成のための方法論を確立させ、老朽化した社会インフラの補修・更新の経済的合理化を図り、同時に社会インフラ利用者の安全・安心を確保させることを目的とする。

1. はじめに

我が国には膨大な数の社会インフラが存在する。本プロジェクトでは確率論を扱うが、社会インフラの老朽化の進行は確定的事象である。しかし、実在する社会インフラの耐用年数（平均寿命）に関しては、これまで定量的な評価がなされることはなかった。米国では世界恐慌後のニューディール政策（1930年代）によって膨大な数の社会インフラ（例えば、橋梁）が建設され、それから50年が経過した1970年代から1980年代にかけて、老朽化を原因とする落橋事故が立て続けに発生した。この事故を契機に米国全土で道路インフラの点検・調査が実施され、大半の道路インフラに深刻な劣化や損傷が認められるに至った。これらの事実は「荒廃するアメリカ」というレポートとして報告された。我が国では、この米国での事例を唯一の根拠に、社会インフラの平均寿命が50年と考えられており、高度経済成長期（1970年代）に団塊的に建設された社会インフラの老朽化が現在顕在化しつつある社会問題として注目されている。実際に、2014年に発生した笹子

トンネル天井版崩落事故を契機に、国内においても社会インフラの老朽化が問題視され、橋梁やトンネルなどに対しては5年に一度の近接目視点検が義務化された。また、Society5.0においても、「社会インフラ維持管理システム」「防災・減災システム」が仮想空間と現実空間とを高度に融合させた新たな未来社会のコンセプトとしてあげられている。本プロジェクトで着目する社会インフラの補修や更新に関するマネジメント政策は、日常の維持管理に関する研究開発であるので「社会インフラ維持管理システム」に直接的に貢献する研究開発でもある。一方で、防災・減災という観点においても、社会インフラの現時点における老朽化を反映した形で大規模災害によるリスク評価を実施しなければ、実害を過小評価することにもなりかねず、そのような意味において、本プロジェクトは「防災・減災システム」に対しても間接的に貢献するものである。

現在の我が国においては、社会インフラの健全性は適切に保たれ、適切な維持管理が実施されている。しかし、上述したように社会インフラの平均寿命でさえ定量的に評価がなされているとはいえない状況

であり、現状のマネジメント政策は、ベテラン技術者の長年の経験、勘と知識（特に、現場で社会インフラの健全性を目視点検によって評価して、投資タイミングを見抜く能力、劣化や寿命を予測する能力）に基づいて形成されている。しかし、これはいわゆる前例、経験に基づく政策形成であるという批判を免れず、①高度経済成長期整備された我が国の社会インフラの団塊の老朽化、②日本社会のダウンサイジング（人的・予算的リソース縮小、既存社会インフラの取捨選択）、③ベテラン技術者の経験・知識と、センサー・ドローン・ICT・AIなどの革新的技術の混在など、社会インフラおよびその周辺環境の劇的な変化の中で、今後、適切なリソース配分が困難になるという実務的課題がある。

本プロジェクトでは、このような実務的課題を解決するという問題意識のもと、実務との整合性の高い目視点検データを活用した統計的劣化予測^{1), 2)}（科学的アプローチ）とその結果である劣化曲線と寿命（科学的エビデンス）を社会インフラの補修や更新に関するマネジメント政策の立案に採用する点に新規性を有する。高度情報化社会と言われる今日において、点検データはビッグデータである。しかし、劣化予測を行うには不完全な情報であり、目視点検データが有する情報の不完全性に対して真正面から取り組んだ研究事例は当該分野においては存在しない。現場で取得できる最もプリミティブなデータをもとに、マネジメント政策立案において最も困難な社会インフラの劣化予測と、それに基づく政策立案に挑む点（科学と政策の共進化）に本プロジェクトの独創性がある。

2. プロジェクトの目的とリサーチ・クエスチョン

ベテラン技術者の経験や知識（劣化予測技術）は無形財産であり、彼らのリタイアとともに喪失される。一方で現場には彼らが蓄積してきた点検ビッグデータが残されている。しかし、これまで点検データは社会インフラの表面状態を目視しただけの多段階の離散的評価（主に5段階評価）であること、点検結果にはヒューマンエラーが混入することなどから、例えばセンサーで計測したデータと比較して「汚

いデータ」として扱われ、学術的にも、実務的にも活用されることはなかった。しかし、こうしたビッグデータの背後には社会インフラの劣化過程が隠されており、近年発展が著しいデータサイエンス技術を駆使することによって、これらを炙り出すことが可能になると考えられる。本プロジェクトではこのような背景を踏まえて、

(1)「点検ビッグデータを用いたデータサイエンス技術によって社会インフラの寿命や、補修・更新に関する需要を予測する（科学的エビデンスを提示することは可能か）」【第4章】

(2)「劣化予測結果をどのように活用することによって老朽化社会インフラに対するマネジメント政策形成プロセスを進化させることができるのか」【第5章】

(3)「劣化予測結果が、補修・更新計画立案を超えたさらなる価値創造を成し得るのか」【第6章】

(4)「本プロジェクトで取り組むデータサイエンス技術が他分野（不完全情報下において意思決定・政策形成が求められる分野）のマネジメント政策形成へ適用可能であるのか」【第7章】

というリサーチ・クエスチョン（RQ）を課す。以下では、社会インフラのマネジメント政策形成プロセスの具体的事例として大阪市が管理する下水道コンクリート管渠の更新施策^{3), 4)}に着目する。

3. 仮説と分析手法/アプローチ

図-1には、大阪市の下水道コンクリート管渠を対象にした実証分析の全体概要を示す。一番上中央の図は大阪市全域におけるコンクリート管渠 115,050 スパン（本）の敷設状況を地図上に散布図で表現したものである。分析手法は大きく4つのステップに分類できる。はじめに、全コンクリート管渠を、調査データが獲得されている調査実施管渠（49,243 スパン）と、獲得されていない調査未実施管渠（65,807 スパン）に分類する。調査実施管渠に対して、混合マルコフ劣化ハザードモデルの推定に使用するデータサンプルを作成し、管渠ごとの異質性パラメータ値（劣化速度）を推定する【ステップ1】。これにより49,342本の劣化曲線を獲得する。つぎに、推定さ

れた異質性パラメータ値と、劣化要因である属性情報を位置情報を介して紐づけ、回帰クリギングを用いることにより、空間的関係性を推定する【ステップ2】。調査実施管渠の劣化異質性と属性情報の空間的関係性を回帰クリギングに基づく空間的マッピングモデルを用いて、調査未実施管渠へ適用させることによって、調査未実施管渠の劣化異質性を定量的に評価する。この操作により、調査実施管渠(49,243)と調査未実施管渠(65,807)を合わせた管渠(115,050)に対する劣化速度の推定が可能になり、推定された劣化速度をもとに健全度を推定する【ステップ3】。さらに、健全度情報を再度位置情報と紐づけデュアルカーネル密度推定を用いて健全性が低いと推定される管渠が密集する区域のスクリーニングを行う【ステップ4】。

4. 分析の結果

下水道コンクリート管渠の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を階層ベイズ法により推定した。階層ベイズ法ではマクロ予測で使用するパラメータに加え、各管渠それぞれに対する異質性パラメータも同時に推定している。異質性パラメータを用いた各管渠に対する期待劣化パスを一括して図-2(a)に示す。異質性パラメータを用いることにより、管渠それぞれの期待劣化パスを求めることが可能となる。本研究では健全度7から1に至る年数を管渠の期待寿命と定義する。これより、同図に示すように、期待寿命が50年以下の管渠から、200年以上の管渠が存在することがわかる。全管渠に対する期待劣化パスの期待寿命が約115.5年(ベンチマーク)であることを踏まえると、各管渠の期待寿命には大きな差異が存在することが理解できる。これらの異質性パラメータ(期待寿命)に基づいて、部分的劣化速度分布を作成する。期待劣化パスを推定した管渠はそれぞれ緯度・経度情報を有している。図-2(b)には、管渠のもつ緯度・経度情報と、推定された劣化速度(異質性パラメータ)を紐づけた結果を示しており、劣化速度は7段階のカラーバーを用いて表されている。当然のことながら、部分的劣化速度分布は調査データが獲得され期待寿命および劣

化速度を推定された管渠のみが着色されている。以上のように、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いることにより、実際の調査データを用いて管渠の期待劣化パスや期待寿命を推定できる。さらに、調査実施管渠に対する部分的劣化速度分布を部分的な解として、これを説明できるような空間マッピングモデルを構築できる点に本研究の優位性がある。

図-3の左上図に、空間補間前の部分的劣化速度分布と、回帰クリギングに基づく空間マッピングモデルにより劣化速度が補間された補間後の劣化速度分布、すなわち大阪市全域におけるコンクリート管渠の劣化速度分布を示す。実際に回帰クリギングに使用したデータ数は、混合マルコフ劣化ハザードモデルにより劣化速度が推定された管渠のうち、緯度・経度情報および属性情報が利用可能な45,509であった。空間的関係性に基づいて推定された調査未実施管渠の数が65,784であったことを考えると、本研究の有用性が理解できる。大阪市全域における全管渠の劣化速度の推定結果を用いて、将来時点におけるコンクリート管渠の健全度シミュレーションを実施する。上記の方法を用いて作成した2020年から2070年までの10年刻みの健全度分布を図-3に示す。海岸付近および淀川北部の管渠の劣化速度が速いため、2020年から2040年にかけて海岸付近の管渠から順に健全度の低下が進み、その後大阪市全域において劣化が進展していくことが理解できる。一方で、敷設されてからの年数が短い、あるいは劣化速度が遅い管渠においては海岸付近であっても健全性の高い管渠が一定数存在することも理解できる。

図-4(a)の健全度分布を利用して、デュアルカーネル密度推定を行う。図-4(b)には、2020年時点の健全度分布に対してデュアルカーネル密度推定を実施した結果を示している。健全度分布上では、管理対象全域において健全性が低いと推定される管渠の密集する区域を判断しにくかったものが、デュアルカーネル密度推定により集積されることにより視覚的に判断することが可能になっている。実際、健全性が低いと推定される管渠が密集している海岸付近を健全度分布と比較して鮮明に表すことができている。スクリーニング技術を用いた可視化により、維持管理業務の効率化を支援することが可能であると考え

られる。さらに、健全度分布自体は、新たな調査記録や改築更新実施記録が反映される都度、更新されることが想定されるため、更新後の健全度分布に対して改築更新の優先箇所を可視化できる点においても本研究の有意性を認めることができる。

5. 考察

コンクリート管渠に対する調査データに基づく劣化予測と、管渠の更新に要する費用を用いて、経済性分析を実施することが可能となる。現在、大阪市建設局では、毎年管渠の総延長に対して 5%の管渠を更新している。これは大阪市が様々な制約条件を勘案した上で決定した実務の数値であるが、この妥当性を客観的に評価することは難しい。図-5にはデュアルカーネル密度推定によりスクリーニングされた更新対象管渠の分布を示す。図-5(a)は 2020 年時点の分布であり、2020 年から 10 年計画で更新を実施した後に、再度デュアルカーネル密度推定を行った結果が図-5(b)である。このように調査データと劣化予測、更新対象のスクリーニング技術を組み合わせることにより、政策を可視化することができる。また、図-5(c)は、更新が必要な管渠の延長を総延長で除した値の年度ごとの推移を表したものである。すなわち、リスクやサービス水準の推移を表現している。前述したように、大阪市の現在の更新施策 5%を継続することにより、現在のサービス水準を今後 100 年間にわたって維持することができる。すなわち、大阪市が専門知によって設定した施策 5%の妥当性が、調査データに基づく科学的プロセスによって証明されたことになる。

さらに、現行施策 5%（現状の予算制約）に対して、予算を少し増加させ 6%の更新を許容すると、サービス水準（更新が必要な管渠の総数）は劇的に改善する。その一方で、その時々々の経済情勢により、近視眼的に予算を少しでも削減する、具体的には 4%の更新の止めると、サービス水準は劇的に悪くなることが理解できる。このように、本提案手法を用いることにより、専門知（暗黙知）の形式知化、さらに比較検証を通した専門知の妥当性・有効性評価が可能である。これによって、現行の施策の妥当性評

価が可能になるとともに、施策の改善策を提案することも可能となる。

6. 政策的含意と提言

本稿では社会インフラの具体的な事例として、大阪市の下水道コンクリート管渠をあげ、点検データに基づく劣化予測結果を科学的根拠とするマネジメント政策（更新施策）の形成プロセスを提案した。対象となる社会インフラが異なったとしても、方法論は普遍であることから、その他の社会インフラへの展開も容易である。例えば、橋梁に関しては、近年大規模修繕が実施されており、損傷や変状が顕在化した構造物に関しては直近 5 年程度の大規模修繕計画が立案され、工事が実施されている。その一方で、喫緊の課題は、現時点では損傷や変状が顕在化していない予備軍（次期修繕対象）の修繕優先順位をどのように決定するかということである。この点に関しても、橋梁の目視点検データを用いた劣化予測結果を科学的根拠とする方法論が構築されている。下水道管渠と異なる点は、橋梁は複数部材で構成される階層構造を有している点であり、フォルト・ツリー分析を援用することによって、部材レベルの劣化予測結果から、橋梁全体のリスク評価を行う方法論を開発済である。その成果は国土交通省近畿地方整備局管内の橋梁を対象に、研究会での検討を経て、実際に業務発注（特記仕様書に明記）されるに至っている。点検データという実務で獲得されるデータからボトムアップ方式で方法論を組み上げる、すなわち現場の業務（流れ）と統合的な方法論を開発している点が、本プロジェクトの特徴である。また、老朽化が進行する社会インフラに対する補修や更新計画を立案するためには、どうしても劣化の速い社会インフラに着目する傾向があるが、本プロジェクトにおいては適切な維持管理を実施することの効果を定量的評価可能な方法論を確率フロンティア分析⁵⁾に基づき構築した。さらに、当初の補修・更新計画と比較して、社会インフラの劣化が急速に進展した場合などに対応するためにインフラ保険⁶⁾の可能性についても分析を行うなど、劣化予測結果が補修・更新計画立案を超えたさらなる価値創造に貢献しえ

るか、という点についても検討を行った。

社会インフラの老朽化は避けて通ることができない。とりわけ財政難に苦しむ地方自治体は、国の予算補助を受けるために今後も長寿命化計画を立案することが重要である。現在は当該自治体から業務を受託したコンサルタントが長寿命化計画を立案しており、計画の質はコンサルタントの技術力に依存する形となっている。国側も長寿命化計画を評価するためには、長寿命化計画立案の標準化手法やそれを記したガイドラインなどを発行する必要がある。今回の研究プロジェクトにおいて数多くの社会インフラ管理者との議論の中で痛感したことは、大学の研究者の役割は、学術的に価値ある論文を書いて終わりではない、ということである。研究成果を熟知した研究者が実用化・実装化のためのプロセスを研究し、ガイドラインや適用マニュアルの作成にも積極的に関与して、社会インフラ管理者に対して提案していくことが重要である。さらに近年では社会インフラのマネジメント分野においてもDXが叫ばれている。DXの本質は、組織間の境界を越えて、サイバー空間上でシームレスにデータを融合し、高度な意思決定を行うことであると考えている。そのような意味において、下水道（国土交通省管轄）のような地下埋設物は、それ以外にも、上水道（厚生労働省）、工業用水、電気・ガス（経済産業省）、通信（総務省）など、似たような環境に似たような構造物が設置されている。それにもかかわらず、これらの社会インフラのマネジメントに関する連携が全く図られていない。現在、他省庁管轄の社会インフラ施設へ水平展開させるべく（図-6は水平展開による統合的マネジメントの対象となる社会インフラ群）、一財）日本アセットマネジメント協会に「アセットマネジメント技術水平展開小委員会（小委員長：貝戸清之）」を設置した。現在、アセットマネジメントに関するEBPMガイドラインの作成を目的とした委員会活動を開始している。

7. おわりに

本プロジェクトへの採択を契機に、社会インフラのマネジメント分野における政策形成プロセスに

EBPM の概念が不可欠であることが認識されてきた。その一方で、採択時点と現時点では、マネジメント分野におけるDX化が大きく異なる。今後、社会インフラのマネジメント分野においては、EBPMとDXを両輪とした研究開発でなければ高度な意思決定を創出することも、それらを実用化・実装化していくことも難しくなる。本章では、そのDX化について触れておきたい。デジタル化技術に支えられたデジタル化社会において、社会インフラの計画・設計・施工・維持管理の各プロセスにおいて作成される情報が包括的に利用されるような環境づくりが求められている。我々の主たる対象となるマネジメントは、このような情報フローの最後の部分を担う活動である。そこでは、計画・設計・施工の段階で作成された情報と維持管理の段階で発生した情報を長期に亘って活用し、マネジメントの高度化を達成することが求められている。情報はフローとして流れて初めて役に立つ。しかし、社会インフラのライフサイクルを通じて発生する情報課程では、情報を作成する事業者と情報を利用する事業者が異なるという本質的な問題が存在する。情報を利用する主体にとって、いくら膨大な情報源が存在していても、役に立たない情報は、結果として役に立たない。情報フローの上流側の事業者がデータをデジタル化しない限り、デジタル化は進展しない。その一方で、あるべきデータ様式やモード、コンテンツの内容や解像度は、データを利用する下流側のニーズにより規定される。このような上流・下流側のデジタル化のモチベーションや全体のデジタル化の進捗を管理することも社会インフラマネジメント分野の重要な課題である。例えば、土木計画学で道路ネットワークの交通流を分析するためのOD表がある。社会インフラのライフサイクルにおける各段階で使用、作成された情報の流れをOD表を用いて分析することによって、情報の流れを可視化することともに、DX化を積極的に推進すべき箇所を明確化していく研究も今後必要になると考える。

また、本プロジェクトは社会インフラを対象としてきたが、離散的な状況評価に関するパネルデータが獲得されている分野であれば、開発した方法論を踏襲することで当該分野においても何らかの意思決

定プロセスに貢献できるものと考えられる。実際に、本プロジェクトの期間中に、教育格差をもたらす要因分析や、携帯電話会社が保有する人口流動統計データを用いた社会インフラ整備計画の立案など、他分野への具体的な展開や連携も検討し始めている。さらに、社会インフラ分野ではカーボンニュートラルレポートの整備や、洋上風力発電施設の整備が急速に進んでおり、それらを核とするGXを推進・実現するためには本プロジェクトのマネジメント手法および政策形成が不可欠となる。さらに、海外の社会インフラ市場を見据える際には、老朽化という視点だけでなく、交通事故リスクの低減など、社会インフラの持続可能性(SX)への具現化策としての役割も期待できる。

参考文献

- 1) 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, 2007.6
- 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, 2012.10

- 3) 貝戸清之, 篠崎秀太, 鎌田敏郎, 前川波奈江, 山中明彦: 下水道管渠の空間的劣化異質性に着目した重点管理区域スクリーニングと改築更新施策, 土木学会論文集 F4, Vol.77, No.1, pp.115-134, 2021.5
- 4) 貝戸清之, 松本圭史, 鎌田敏郎, 北野陽一郎, 山中明彦: 空間マッピングを用いた下水道管渠の状態シミュレーションと改築更新区域の抽出, 土木学会論文集 (掲載決定)
- 5) 貝戸清之, 竹末直樹, 水谷大二郎, 小林潔司: 下水処理施設の包括的民間委託導入効果: 費用効率性に基づく評価, 土木学会論文集 (査読修正中)
- 6) 稲垣博信, 山岸拓歩, 貝戸清之: インフラ維持管理におけるパラメトリック型保険の適用可能性, 土木学会論文集 F4, Vol.78, No.1, pp.1-20, 2022.1

キーワード

社会インフラ, アセットマネジメント, 劣化予測, EBPM, データサイエンス

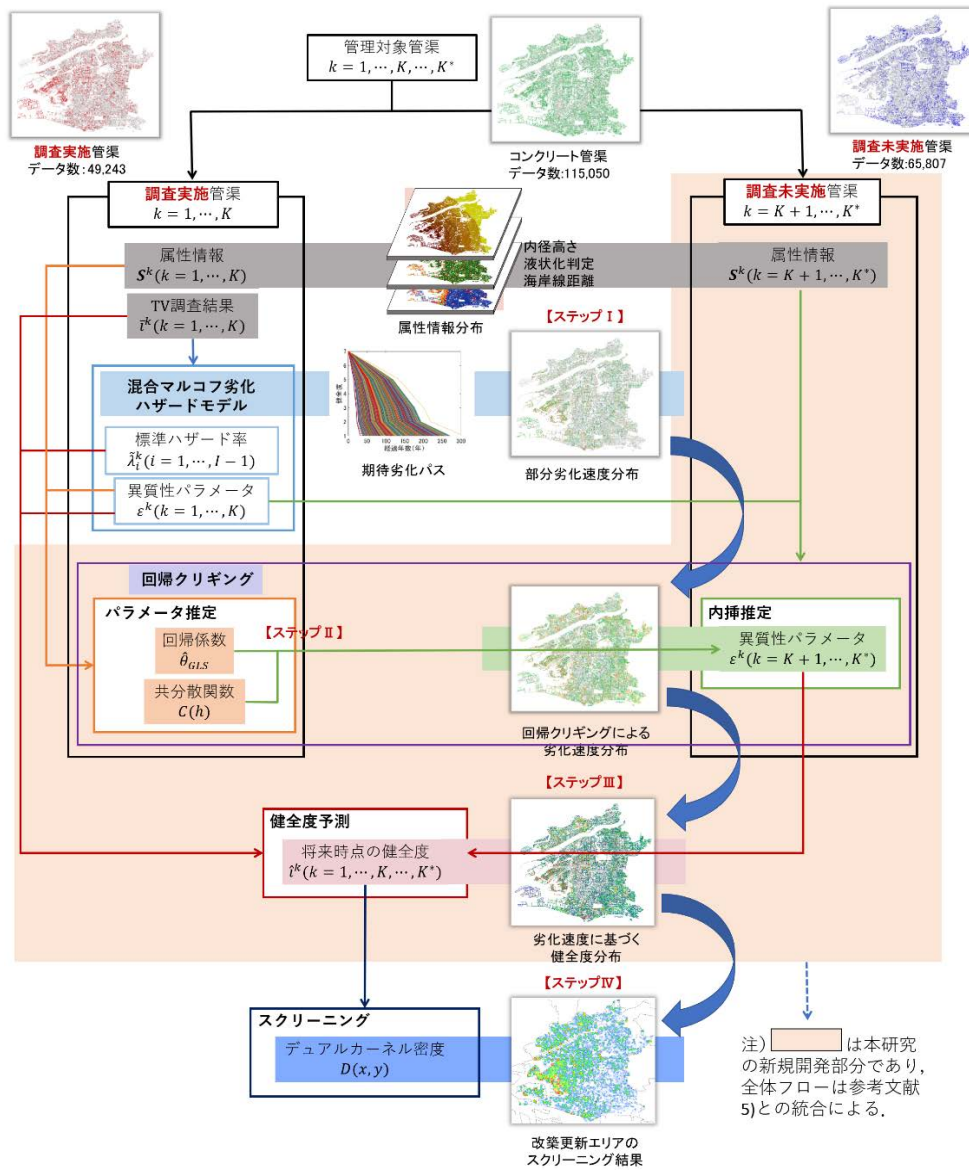


図-1 実証分析（提案手法）の全体フロー

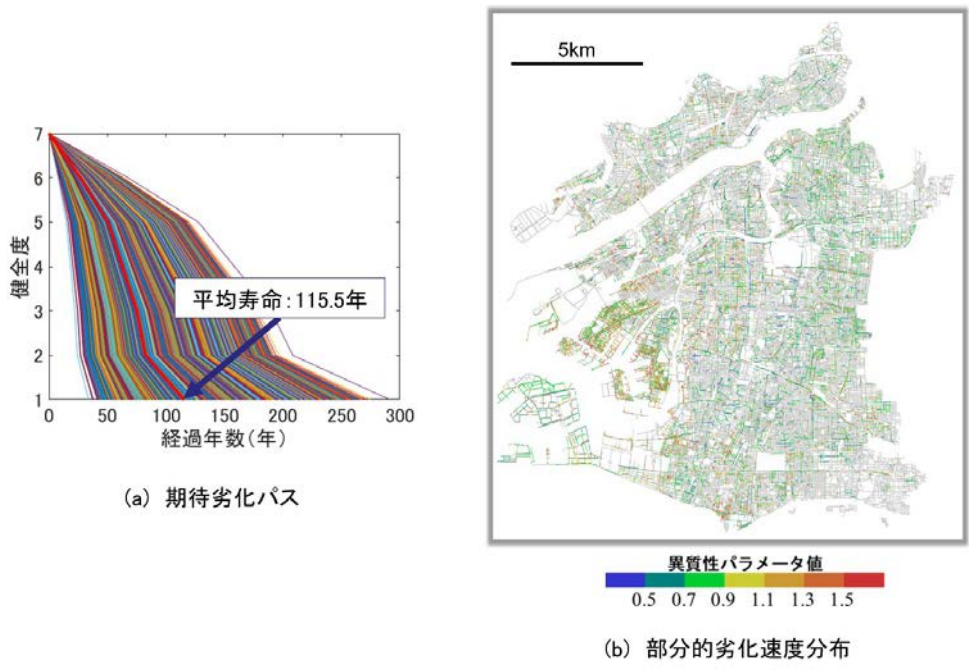


図-2 コンクリート管渠の期待劣化パスおよび部分的劣化速度分布

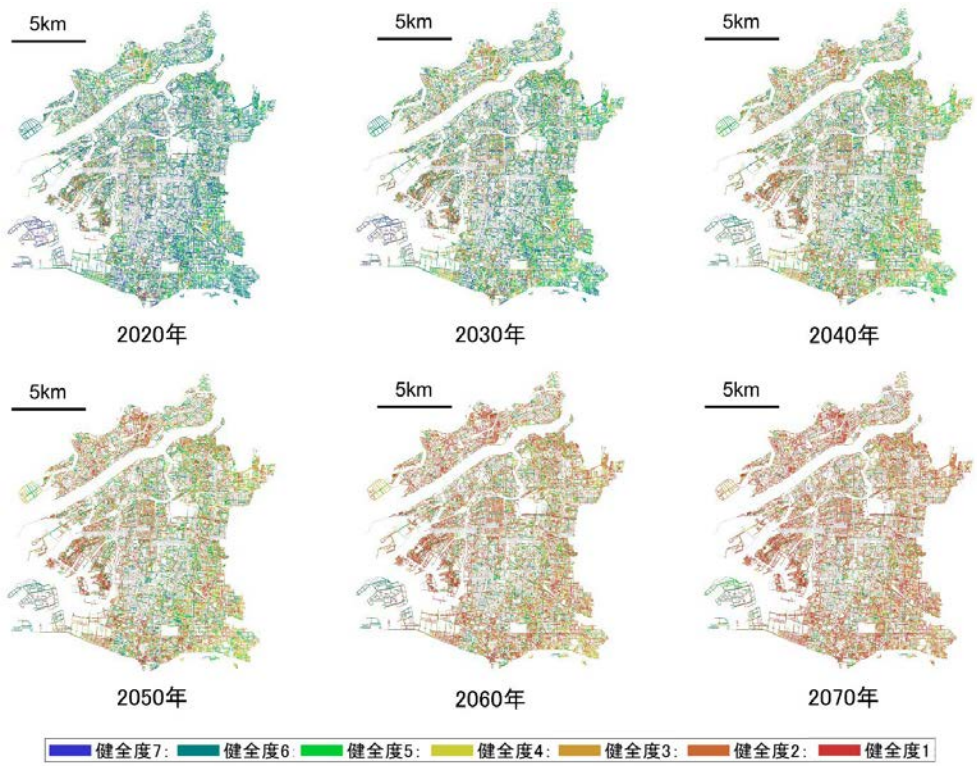


図-3 大阪市全域を対象とした下水道管渠の健全度シミュレーション

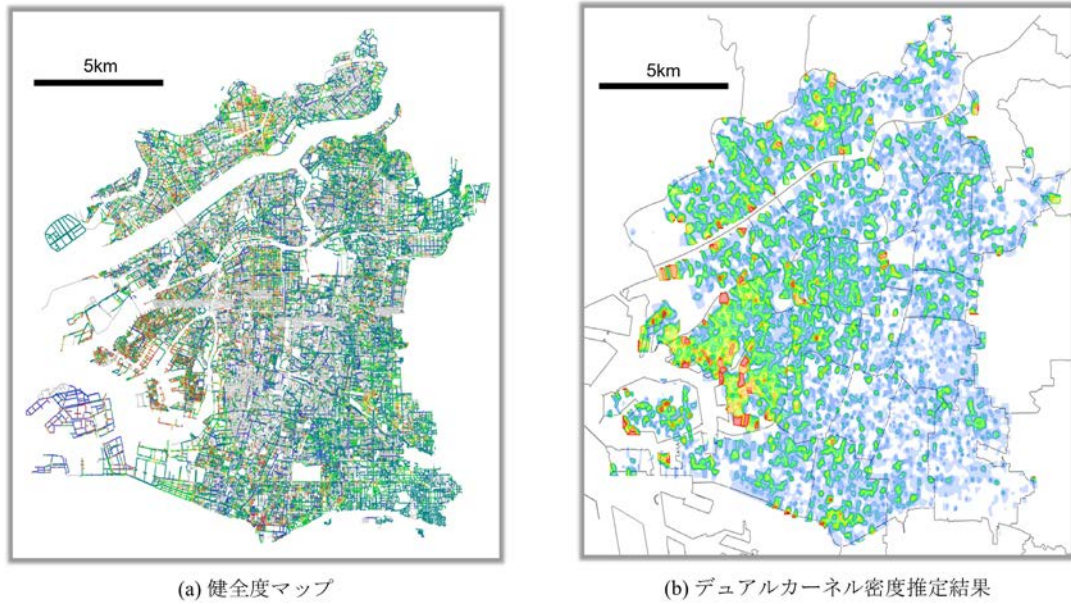


図-4 デュアルカーネル密度推定結果

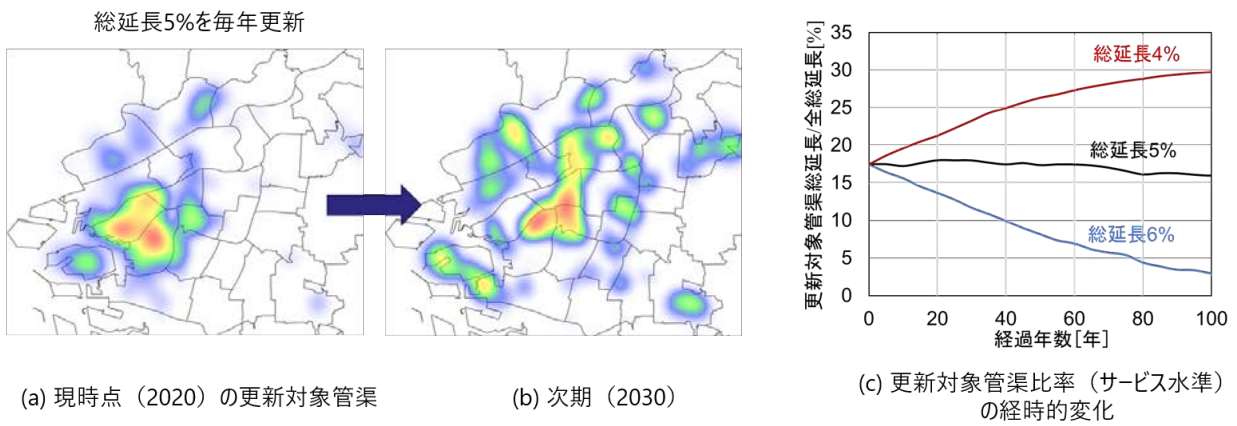


図-5 更新施策の妥当性評価および改善策提案



図-6 水平展開による統合的マネジメントの対象となる社会インフラ群