

社会インフラの維持管理システムの社会実装

—持続可能でレジリエンスな社会を目指して—

概要

道路・トンネル、河川施設、上・下水道、エネルギー・通信などの社会インフラは、近い将来に劣化損傷が増大するとともに、クライメートチェンジによって頻発する自然災害が機能不全を引き起こすなど、多くの社会課題が予想されます。そのため、社会インフラが担っている、持続的に経済活動を維持しかつ国民生活の安全を守ることに危機感を覚えます。

その解決のためには、社会インフラにおいて計測したデジタルデータを用いて状態を診断するとともに、将来の劣化損傷を予知し、災害時をシミュレートする予測技術を持った、発展的かつ強靱な社会インフラの維持管理システムの実現が必要不可欠です。さらに、社会インフラ管理のデジタルデータは、高度流通システム、自動運転システムなどの他の社会システムとデータを共有し、大胆な「パラダイムシフト」によって現存する社会課題の解決につながることを目指しています。

その第1段階として、橋梁などの道路構造物における計測データによる構造物の機能異常を検知する技術を開発し、社会実装化を進めています。さらに、法定点検時に収集した写真や目視調査結果などのアナログ情報も活用した構造物の寿命診断、さらには防災シミュレーションとも連携した「予測診断保全技術による社会システム」の構築を目指し、維持管理技術における「デジタルシフト」を図ります。

研究グループの構成員

京都大学大学院工学研究科 杉浦邦征教授、金哲佑教授、五井助教

京都大学大学院地球環境学堂 高瀬和男客員教授、河邊大剛研究員

成果発表

・令和3年12月10日 持続可能な社会の実現に向けてエコプロ2021、JST セミナー「ローカル SDGs と科学技術」にて発表

・令和4年10月6日 イノベーションジャパン 2022 にて発表

社会インフラの医者となり、社会インフラに**生じる変形、ひずみや振動**などのデジタルデータからインフラの健康状態（健全度）を診断し、病気の要因を示すとともに、治療方法や手術方法を示すようなインフラにおける医療的行為を全世界に向けて示し、維持管理の世界で「パラダイムシフト」を巻き起こしたいと考えています。



1. 背景

●背景

道路・トンネル、河川施設、上・下水道、エネルギー・通信などの日本の社会インフラは、明治中期から建設が進み、高度成長期以降に急速的に整備され、2030年頃には建設後50年を超える割合が50%以上となる超高齢化を迎えます。

その中で2012年2月の笹子トンネルにおいて痛ましい事故が発生しました。それを受けて、2014年2月に道路法の改訂により、道路などの構造物は5年に1度、近接目視や打音検査による定期点検が義務化されました。以後、社会インフラは技術者によって定期的に点検が行われるようになりました。しかし、その点検には、ベテランあるいは専門的技術者が必要ですが、少子高齢化の時代において、高い能力を有する技術者を確保することに限界がきていますし、専門的技術者においても、その経験に基づく損傷判定結果にばらつきを生じていることもあります。さらに、点検結果は、ひび割れ、剥落、き裂、錆など構造物表面の変状などの定性的観察によって損傷を評価しています。これでは、ビッグデータ解析やAI技術などの新しい技術を適用するには、問題があります。

また、昨今はクライメートチェンジにより自然災害は頻発しています。毎年のように大きな災害が発生し、多くの命や生活基盤が失われ、社会的損失は非常に大きなものになっています。現在はコンピュータや気象衛星の進歩により異常気象の発生予測技術はかなり進んできたようですが、災害対策としては、災害を予測して、住民を避難させることが中心であり、「災害を起こさない」、または「災害を最小限に抑える」といった積極的な対策は、これからではないかと思っています。つまり、従来技術による社会インフラの維持管理の施策や災害対応の対応施策を鑑みると、近い将来に爆発的に増加する社会インフラの劣化損傷、さらにクライメートチェンジによる頻発する自然災害および少子高齢化など社会課題に対して、現在の技術的施策では持続的に産業基盤を維持しかつ国民の安全を守ることに危機感を覚えます。

●プロジェクトの設立理由など

(持続可能な社会を作りたい)

持続可能でレジリエンスに富む維持管理を実現するためには、社会インフラにセンサなどを組み込んでスマート化し、社会インフラの状態データ(以下、デジタルデータ)に基づき、社会インフラの損傷を予知し、診断し、供用状態を予測する技術を有した、社会インフラの管理システムの実現が必要不可欠だと考えます。

さらに、積極的な防災減災対策として社会インフラの現実の劣化状態を考慮した高度なシミュレーションにより、災害時に発生する被害を予測し、最小限の被害に留め、かつ回復性の高い強靱な社会インフラを作っていく必要があると考えます。そのため、センサなどを用いて取得したデジタルデータに基づく定量的な状態評価技術、高精度な防災シミュレーション技術が必要となります。これらにより、上記背景に示した課題の解決を図りたいと考えています。

(構造物の医者になる)

将来の構造物の劣化診断技術の進歩を展望するには、医療技術の進歩が参考例となります。

現在の医学は、過去の長い臨床研究の歴史の中で多くのデータを得て、病気の要因とその症状を結び付け、将来の予測を示しています。さらに、多くの研究者により、臨床から得られたデータから病院内(フィジカル空間)での臨床的研究、実験室(サイバー空間)にて理科学的な試験・分析を行い、その結果としてより精緻に現象確認と対策を検討し、病気の予測技術や薬剤の技術開発へと向上させています。社会インフラの維持管理の課題に対する根本的解決の方向性は、このような医学と同じ機能を有するシステムを構築することだと考えています。

2. 研究手法・成果

●研究手法・成果

本学では、本研究について2010年頃より開発を進めてきています。その後、2012年の笹子トンネル事故を契機に国内では盛んに研究開発が進められました。本学でも継続して多くの基礎的研究を行いました^{1),2)}。

基礎的研究が進んだことから社会実装を目指し、2020年度の京都大学インキュベーションプログラムにおいて「京都大学のインフラ健全度評価技術を用いた新しいメンテナンスマネジメントの事業化」として応募し、採択をいただきました。2年間の活動の中で、研究開発技術の社会実装に向けて技術の信頼性検証とシステム化を図り、また、事業規模などを検討してきました。その結果、インキュベーションプログラム終了後の2022年5月に、事業の受け皿として「株式会社日本構造分析舎」を起業しています。

また、本事業においては、自治体、道路会社、鉄道会社などの施設維持管理を行う実務者、技術者に理解者を広げ、その上で管理システムの実務上の運用について協議することが重要です。そのために、科学技術振興機構（JST）の未来社会創造事業「顕在化する社会課題の解決」領域に応募を行い、2021年10月に採用をいただき、その活動の中で多くの施設管理者のJST未来の研究会へ参加をいただいています。

JSTの研究では、図-1に示すように、既存技術である「人（専門家、技術者）による定性的な近接目視・打音検査」による事後保全、予防保全ではなく、「社会インフラ構造物が発する情報（応答値：加速度、ひずみ、変位などのデジタルデータ、および画像情報・観察データを含む）」により、その構造物の健全度を評価する「モニタリング技術」の実装化を目標として研究開発を進めています。さらに、デジタルデータを保管したデジタル空間上に写真や目視検査の結果および気象情報なども活用し、構造物の余寿命診断、予測診断、さらには防災シミュレーションと連携し、想定を超える災害においても最小限の被災となり、かつ地域社会のレジリエンス（回復力）を十分に確保した「予測診断技術による保全活動による社会システム」の構築を目標としています。

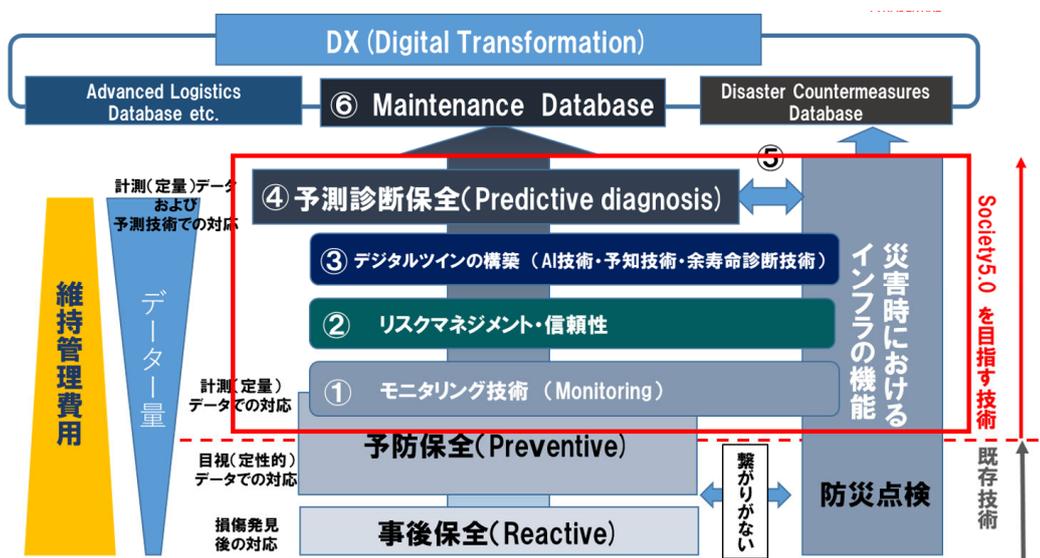


図-1 維持管理・防災減災マネジメントの将来像

JST 研究会参加機関（2022年11月時点）

（研究参画機関）

京都大学、九州大学、熊本大学、阪神高速先進技術研究所、パシフィックコンサルタンツ株式会社、株式会社ニュージェック、大日本コンサルタント株式会社、株式会社ダイヤコンサルタント

(研究会ヒアリング参加機関：施設管理者)

大阪府、京都府、兵庫県、奈良県、熊本県、京都市、関西電力株式会社、株式会社 Dshift、株式会社ユーラスエナジーホールディングス、NEXCO 西日本イノベーションズ株式会社、西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社

参考文献

- 1) 金哲佑, 伊勢本遼, 川谷充郎, 杉浦邦征: 模型桁車両走行実験における異常診断可能性の検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 14), I_833-I_842, 2011.
- 2) 金哲佑, 北内壮太郎, 杉浦邦征, 川谷充郎, 甲斐正義: 多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 69, No. 3, 557-571, 2013.

●研究成果

研究開発を進めている健全度診断技術の中核技術である「特徴量抽出による健全度評価法: Structural integrity evaluation based on Feature Extraction (SAFE)」は、構造物が発する振動などの定量的計測データに健全時と異なる変化が生じた場合、その変化を定量的に評価する技術です。

今までは、構造物の振動データから、構造物の特徴を表す振動成分(例えば振動数, 音程で言えば周波数)を抽出し, 各々の振動成分(健康診断の聴力テストの 1000Hz と 4000Hz のような周波数)の変化に着目し, 異常を検知しようとしてきました。例えば, 健康診断の聴力テストで 4000Hz が聞こえない場合は, 耳に異常があることとなります。橋梁のような構造物も同様なアプローチが可能です。モニタリング対象橋の通行止めをし, ノイズなどの不確定要因をなるべく少なくした環境で, 橋梁の振動成分(例えば 2Hz, 8Hz, 18Hz など)を抽出し, 過去の健全時の振動成分との違いから異常検知を行います。ただし, 抽出した振動成分がどのような損傷に反応するかは未知であり, 多数の振動成分を抽出する必要があります。

しかし, モニタリングをするたびに橋梁の通行止めをするのは非現実的であり, 供用中の振動データに着目する場合は, ノイズなど不確定要因をたくさん含む振動データから異常を検知する技術が必要です。さらに, 供用中の振動データに検討したい振動成分が含まれていても, ノイズなどの影響で必ず狙いの振動成分を抽出できる保証はありません。うまく抽出したとしても, ばらつきの多い振動成分から異常を判断する必要があります。すなわち, 実践的な振動モニタリングのためには, いろんな振動成分を含む指標(特徴量といいます)と, ばらつきまでを考慮した評価方法の開発が必要になります。

提案する技術は, 構造物の振動を音のように一つの特徴量と表現し, ばらつきも取り扱う異常検知方法になります。同じ人が同じ歌を歌うとき, その人の喉の調子が悪いと, その歌声が変であることに気づきます。つまりどこの音程に異常がありその結果歌声が変に感じるのです。歌声つまり音は色んな音程(振動成分)が合わさった特徴量といえます。構造物全体の揺れは周波数が低く聞こえないですが, 音のように構造物の振動特性を多く合わせる(色んな音程が合わさった)特徴量を開発できれば異常検知がしやすくなると思いました。また, その特徴量のばらつきを統計的に分析して, 基準になる特徴量の統計的な特性から外れる程度を異常指標とすれば, 通行止めなしで供用中のノイズなど不確定要因をたくさん含む振動データからも異常検知ができると思います。技術開発を進めてきました。それが, 今回提案している「特徴量抽出による健全度評価法 (SAFE)」になります。その有用性は, 実橋や実物の構造物への適用で検証しつつあります。

詳細については, 金教授よりご説明いただきます。

3. 波及効果、今後の予定

●波及効果

(経済的効果)

実環境（フィジカル空間）でデータを計測・収集、通信し、計算機上の仮想空間（サイバー空間）において、解析、診断を行い、再度フィジカル空間での措置、管理、記録へ結びつけるといったシステムの中で導かれた結果が、維持管理上重要なデータとなります。特に社会インフラの資産価値を考慮した場合、そのストックマネジメント、アセットマネジメント、プロジェクトマネジメントへのデータの適用とその事業サイクルの循環による資産価値の維持向上は、維持管理費用の削減などの財政的観点から非常に重要であると考えられます。

具体的な数値として、国土交通省の試算においては、2018年の「事後保全」による国土交通省の事業予算は約5.2兆円程度です。現在の「事後保全」の方法では、30年後には現在の約2.4倍、12.3兆円/年の事業予算が必要となると予測されています。そのために、「新しい技術を用いた予防保全」の考え方が必要となっています。その「新しい技術を用いた予防保全」の考え方とは、図-2に示す維持管理・防災震災のマネジメントシステムの考え方を持ったものであると考えています。このシステムの構築により、30年後には事業予算を12.3兆円から6.5兆円/年に削減することが可能になると予測されている（2018/1/24 地方自治体の取り組み支援とインフラメンテナンス国民会議（国土交通省総合政策局講演資料）より）。つまり、言い換えれば、30年後には約5.8兆円の新たな財源を創出する価値があることを示しています。

さらに、国土交通省としては、その「新しい技術を用いた予防保全」の実現のために、ロボットやIoT技術などの新技術の導入割合を2030年度にはすべての工事契約で適用するとしています（未来投資戦略2018）。つまり、維持管理、防災減災の活動を進めていくために、新技術へのサプライチェーンを含む新たな投資が必要になります。上記の5.8兆円の削減を進めていくための新技術への投資額は30年後には、大学における試算では約2000億円/年と見込んでいます。さらに、エネルギー分野など民間事業を加えた投資額は約1兆円になると予測されます。

(新たな産業の創造)

社会インフラのデータがフィジカル空間からサイバー空間へ、さらにフィジカル空間へといったサイクルの循環により、クラウド上のデータベースに蓄積されるデータに対して、AIや機械学習を活用した高度な分析が可能となり、評価精度がより高まり、他の社会システムにおいても必要なデータとなってきます。例えば、防災、減災システムにおけるシミュレーションはもちろんのこと、高速交通システム、生産システムの物流や交通管制などの社会システム、エネルギー供給システムなどへ、社会インフラの耐荷力や耐久性のデータは、その各々の事業の継続性からも重要かつ価値のあるデータとなります。

本研究の成果により、世界各国で進められている高度流通システム、自動運転システムなど、大胆なデジタルシフトによって再構築される社会システムとデータを共有するとともに、自然災害にも安全・安心な環境が確保された持続可能なレジリエンスに富む社会インフラの維持管理システムの構築を目指しています。

(世界市場での技術リーダー)

本システムのように、事後保全(Reactive)から予測診断(Predictive Cognitive)へと段階的に進化する考え方は、世界道路会議(PIARC)など、多くの国の研究者や技術者の中で議論をされている研究課題です。

図-2に示すように、現在確立されている技術は、「現データの中に「何」かが事象として発生しているのかを知る技術(diagnostic)」と位置づけられています。今後は、「データの中に「何」が隠されているかを解析する技術(analysis)、今後「何」が発生する可能性があるか予測する技術(predictive)、そして「何」

が起こるかを分析する技術（prescriptive）、さらに、積極的に事前の対策を示す技術（cognitive）」と研究開発が段階的に発展することが求められており、さらにそれらをシステムとして組織化する技術開発も求められています。しかし、我々が開発を進めている「diagnostic」の範囲は、世界での技術競争の中での熾烈を極めています。現時点で、提案者らが開発しているデジタルデータによる構造物の健全度を評価する（損傷による異常を示す）技術の先見性、優位性を明確に世界に示すことが必要であると考えてプロジェクトを進行させています。

世界には、非常に多くの社会インフラがあり、それは日々劣化が進行し、災害によって被災する可能性を持っています。社会インフラ構造物の状態を評価する技術は、世界で大きなマーケットとなるとともにその主導権をとり、世界をリードしていくことが我国の土木分野でのインフラシステム海外展開などの経済活動において大きな強みになると考えています。

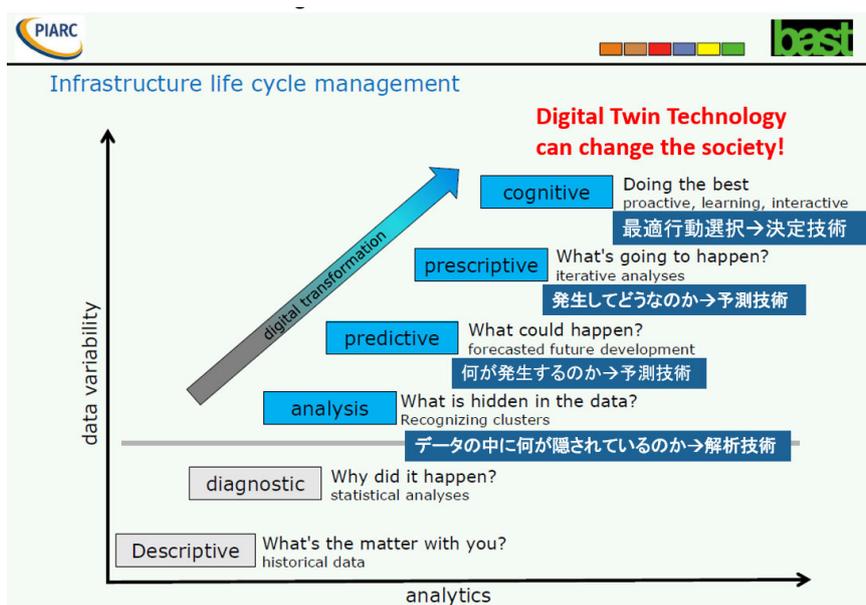


図-2 世界道路会議資料(2019)

●プロジェクトに関する倫理的な議論や今後社会的な議論

本事業分野においても、倫理的、法的、社会的課題（ELSI）が存在します。またその存在は、本事業の拡大に対して非常に大きな障害となっているように感じています。

2013年に国土交通省において「メンテナンス元年」が設定されて、9年が経過しました。それ以前は、自治体においては道路橋などの社会インフラの点検は、十分なされてはいませんでした。そこに、2014年度の法改正と予算措置が加わり、定期点検の義務化がされ、定期点検の活動が動き出したように感じています。しかし、公共事業における工事・業務発注はシステム化されており、デジタルデータを用いた新しい技術を適用した評価方法や考え方を、ある程度のスピード感も持って導入するには、法規制・倫理規範・社会的受容性の観点からは難しいように感じています。

具体的な ELSI と感じる例を以下に示す。

- ① 点検などの予算の措置：自治体においては、2013年の道路法の改訂により、維持管理更新費に事業費の55%の交付金が設定されました。それにより、各自治体では、修繕費などの建設を伴う更新費には事業費の55%の交付金と共に、約40%の地方債（起債）の適用を行い、自治体の自主財源を事業費全体の5%程度の負担で行っています。つまり、現在の国の維持管理に関する予算設定では、新しい技術の導入より、

まずは損傷した構造物を治すことに主力を置いています。

しかし、国も予算にも限りがあります。国の予算が削減してきた段階では、我々が提案するような技術が近い将来に必要なと考えています。その準備を今進めていかななくてはならないと思っています。

- ② 技術の信頼度：自治体の維持管理を担当している職員では独自に新技術の適用に対する妥当性、信頼性の判断が困難であるようです。そのためには、国が示した方向性で技術を活用したいとの思いが強いようです。