

メンテナンスの効率化・高度化のための モニタリング技術開発

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻
教授
長山 智則



1. はじめに

我が国の社会インフラは、高規格施設を中心として十分な資源を投入して着実なメンテナンスが実施されてきた。土木学会の「2020インフラ健康診断書」において鉄道部門は総じて「B：良好」で、新幹線の橋梁や軌道は「A：健全」と診断されている。一方で、地方民鉄や第3セクター等の鉄道事業者の軌道は「D：要警戒」で現状の管理体制が改善されない限り健康状態が悪くなる可能性がある状況と指摘された¹⁾。財政や経営の状況、技術者不足等の諸課題を考慮すると、従来の方法を今後遍く適用していくことは難しい。社会インフラメンテナンスの特徴や求められる要件を理解した上で、近年急速に進化する情報通信技術や計測・シミュレーション技術、機械学習などのデータ駆動型アプローチを活用して、持続可能なメンテナンスの枠組みを考える必要がある(表1)。ここでは、車上計測や

設置型のモニタリングとシミュレーション、機械学習等を組み合わせた社会インフラのモニタリング技術の研究開発について紹介し、メンテナンスの省力化・省人化に加えて、インフラ状態の経時変化の定量的把握や予測を通じた高度化について展望する。

2. 車上計測による軌道・舗装モニタリング

2.1 簡易かつ精緻なモニタリングシステム

我々は車両動揺や路面の画像を位置情報と共にスマートフォンにより取得し分析することにより、道路の状態を簡易にモニタリングするシステムを開発してきた。取得したデータをリサンプリング理論やデータ同化、機械学習などを駆使して厳密に処理することで専用車に近い精緻な評価ができる。これを鉄道分野に応用し、軌道状態を簡易に評価することに、鉄道総合

表1 各種技術の特徴・課題と方向性

	長所	課題	高度化の方向性	主な用途
車上計測 (専用機材)	広域, 高精度	高価, 限定的頻度	自動化, 新たな計測量 (レーダー, 高性能カメラ, Lidar等)	異常検知, 劣化予測, 優先順位付け
車上計測 (スマホ等)	網羅性, 高頻度, 通信・AIとの親和性	精度, 限定的計測量	専用機並高精度化, 複数計測量の統合, クラウドソーシング	
設置型 IoTノード	常時/臨機応変, 省人監視	限定的性能, 電源制約, 精度, セキュリティ	有線機並機能, スマホ並簡易性, ネットワーク性, 処理連携	変化追跡, 劣化予測, イベント監視
シミュレーション	複雑現象の分析的扱い	モデル化誤差	低頻度・極限事象, 相互作用・複雑現象, モニタリング検証	現象解明, 予測, 仮想テストベッド
機械学習	複雑事象・データの自動的扱い	ラベリング, 外挿, 信頼・説明性	多種データやシミュレーションとの連携	判断支援, 省力・自動化

技術研究所との共同研究にて取り組んでいる(図1)。

2.2 振動・音を利用した路面および軌道の評価

普通走行する車両の動揺を逆解析することにより車両のばね剛性や質量を同定した上で、路面縦断形状を精緻に求め、路面管理指標である国際ラフネス指数(IRI)や平坦性を推定するアルゴリズムを開発して、路面評価に展開している²⁾³⁾。加速度、角速度およびGPS情報を利用して、前後輪2軸をもつ4自由度ハーフカーモデルの10個の未知パラメータやセンサ設置角度を自動推定することにより、車両や走行速度の違いを補正して、路面評価するものである(図2)。自動車の動的特性は非線形性を有し自由度も高いため、ハーフカーモデルと比べると実現象は格段に複雑であるものの、データ同化の一種であるカルマンフィルタや平滑化を適切に設計することにより精緻な逆推定を

実現している。この高精度推定により後述の様々な応用が可能となる。本システムを搭載した車両は、路面性状調査の専用車が参加する性能確認試験に合格した実績を持つ。内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」の研究課題「大規模センサ情報統合に基づく舗装・橋梁スクリーニング」(代表: JIPテクノサイエンス株式会社 家入正隆)においては、多数の商用車に本システムを搭載して、広域の路面状態を3年ほどに渡り評価する大規模社会実装実験を行った。多量に集まったデータに対して位置合わせ等を行い分析すると、路面の劣化特性を評価できることが確認できた(図3)⁴⁾。

本システムを営業列車に搭載し、軌道の高低変位の推定を試みた。前後2軸の自動車と異なり営業列車は4軸を有するため、車体動揺に基づく軌道形状逆推定



図1 簡易モニタリングシステム

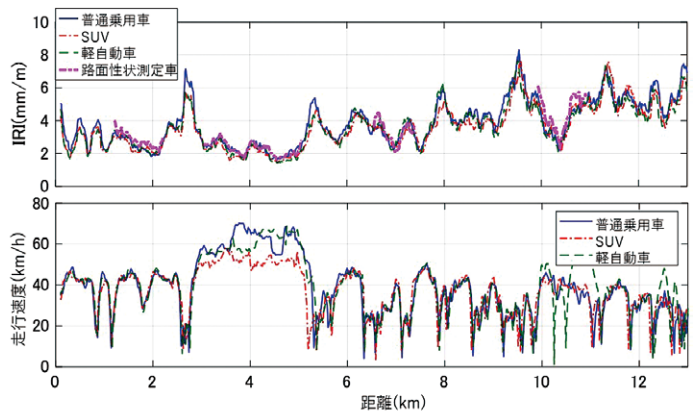


図2 スマートフォンによる精緻な路面IRI評価²⁾³⁾

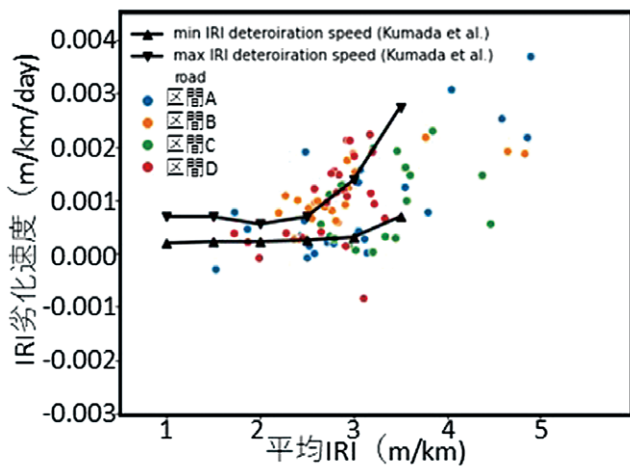


図3 スマートフォンによる大規模収集データに基づく舗装劣化速度の推定⁴⁾

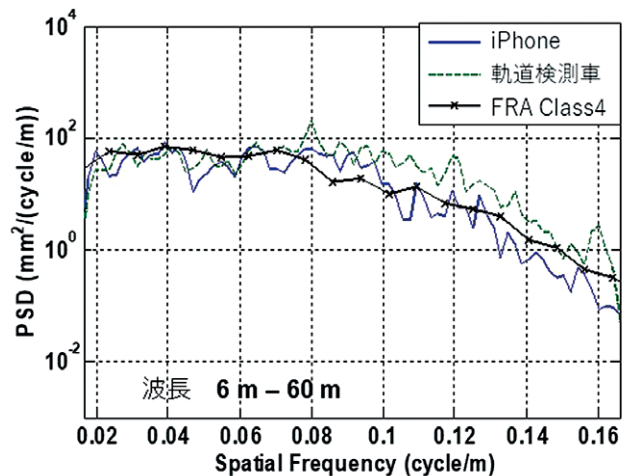


図4 車両動揺による高低変位評価⁵⁾

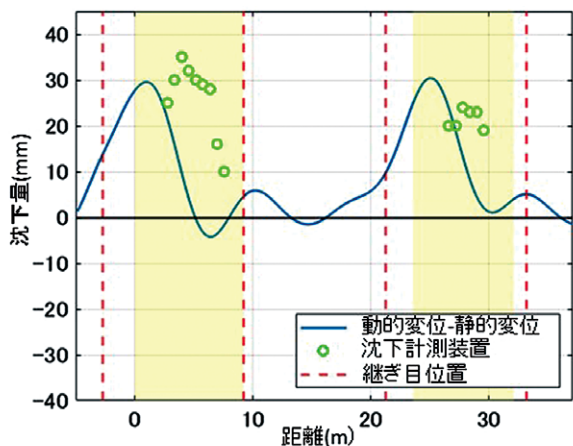


図5 車両動揺による浮きまくらぎ個所の推定⁶⁾

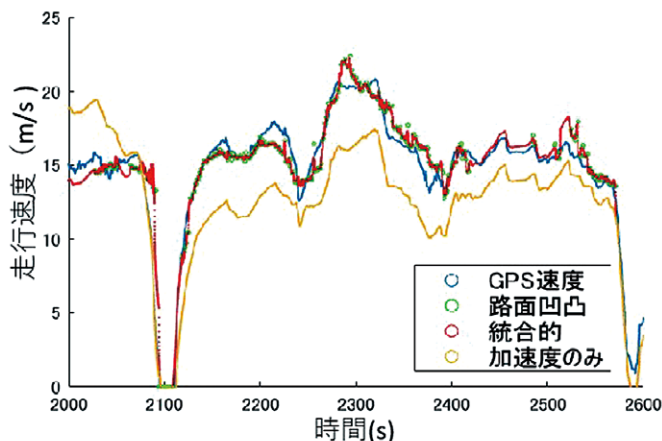


図6 車両動揺による走行速度の推定⁸⁾

は難易度が高い。そこで、軌道形状自体を推定する代わりに、ボギー台車の車軸位置2か所における軌道形状の平均値を推定したところ、軌道検測車による推定値に近いスペクトルが得られた(図4)⁵⁾。推定精度の向上を図るべく車両パラメータの最適化に取り組んでいる。

さらに、浮きまくらぎの検知を試みた。手押しの簡易な軌道検測装置による静的変位と車上計測による動的変位の差分、つまり沈下量の大きな区間として浮きまくらぎを検知する。剛性の低い継ぎ目箇所が混在する場合においても浮きまくらぎ検知が可能であることをマルチボディシミュレーションにより確認したうえで、低速走行するディーゼル機関車の応答を実測し浮きまくらぎの評価を行った。地上設置した沈下計が極大値を示す箇所の近くで浮きまくらぎが検知された(図5)⁶⁾。高速な走行条件における適用性の評価や静的計測を必要としない手法への拡張を検討している。

音を利用してレール波状摩耗区間を特定することにも取り組んでいる。非負値行列因子分解を利用して波状摩耗に特徴的な音声成分を抽出し検知している⁷⁾。

2.3 音・振動を利用した位置同定

検知した高低変位や浮きまくらぎ、レール波状摩耗などの変状を補修や予測に用いるためには、位置同定が重要となる。GPSに依存するシステムはトンネル区間や見通しの悪い区間において位置同定が難しい。そこで、音や振動データを利用した位置同定手法を開発している。

まず、継ぎ目において発生する音の間隔が、軸距と走行速度に依存することを利用して走行速度を推定す

る手法を開発した。通常44.1KHzでサンプリングされる音声データを利用すると、継ぎ目通過タイミングを明瞭に捉えることができる。ただし、継ぎ目通過音以外にも雑音が混入するため、スパース表現を利用して間欠的に発生する継ぎ目音のみを抽出する。継ぎ目音から得られる間欠的な速度推定値を、進行方向加速度の積分として連続的に得られる速度推定値と組み合わせることで、距離推定精度を向上させている。

自動車の位置同定については、さらに車両のピッチング角速度を利用した走行速度推定法を開発した。ピッチング角速度は軸距に等しい波長成分の路面凹凸にほとんど感度を持たない。倍周波数成分についても同様である。このため、車両のピッチング角速度を周波数分析すると軸距と走行速度に対応して極小値を示す時間周波数が存在する。そのため路面凹凸によるピッチング角速度応答を周波数分析することにより走行速度を推定できる(図6)⁸⁾。さらに、このように推定した速度と、進行方向加速度とを観測量としたカルマンフィルタを設計することにより慣性計測のみを利用しながらもGPSにほぼ等しい走行速度を推定可能である。本手法は列車の位置同定にも応用可能と考えられる。

2.4 前方画像を利用した軌道および路面の評価

近年のスマートフォンは年々カメラ性能が向上しており、これを利用した軌道や路面のモニタリングに対する期待は従来になく高い。車内から窓ガラス越しに前方を撮影した画像であっても鮮明に変状を捉えられるようになってきた。図7は鉄道総合技術研究所において提案された列車巡視支援方法であり、スマート

フォンにより取得した前方動画に、車両動揺加速度、列車速度、キロ程情報を重畳して字幕表示している。これにより、目視による軌道状態の確認と、体感による列車動揺の確認を支援しようとするものである。

舗装評価においては、スマートフォンにより取得した前方画像を自動的に鳥瞰変換し、そして詳細な路面展開図を作成した上で、路面評価や変状検知、予防保全へ活用する取り組みを、東大発ベンチャー企業のスマートシティ技術研究所と共同で進めている(図8)⁹⁾¹⁰⁾。

まず、前方画像に映り込む白線などの情報を利用してカメラパラメータを自動推定し、各画像を鳥瞰変換した上で、動画から一定距離間隔で抽出された画像を合成することにより、長い延長に渡りどこでも高分解能の路面展開図を構築できる。道路調査試験法便覧

に定められる定義通りに「ひび割れ率」を算出したり、変状の場所を特定したりできる。このスマートフォンベースの技術を搭載した車両は、2022年度の性能確認試験において「ひび割れ」測定性能の項目に合格し、幅1mm以上のひび割れを認識可能と確認された。スマートフォンベースの技術を搭載した車両として初めてかつ唯一の合格である。さらに同一路線を継続的にモニタリングした結果に、上述の画像処理を施し、毎回の路面展開図が互いに重なるように高精度の位置合わせをすることにより個別の変状の経時的な変化を追跡することが可能である。データを蓄積することにより詳細な劣化モデルを構築したり、劣化予測に基づく予防保全へと展開したりすることが期待される。

ひび割れ率に加えてわだち掘れも路面評価の重要な



図7 車内に設置したスマートフォンにより取得した画像に車両動揺および速度・キロ程情報を重畳表示

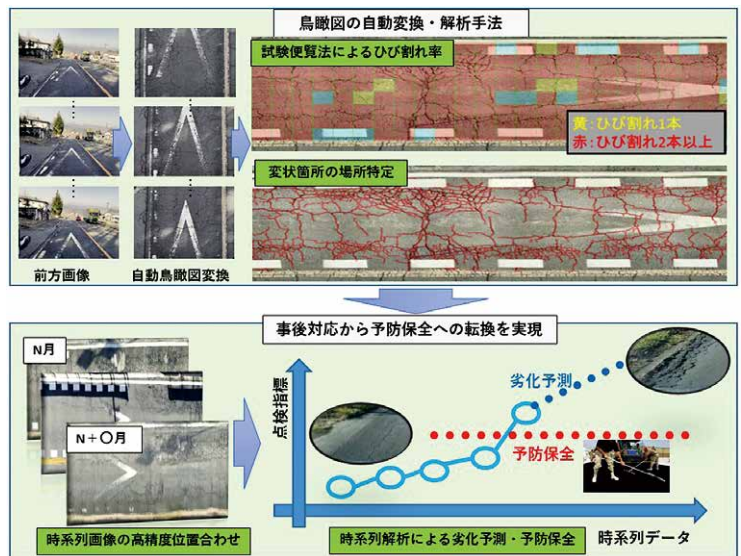


図8 鳥瞰変換画像合成による詳細な路面展開図⁹⁾¹⁰⁾

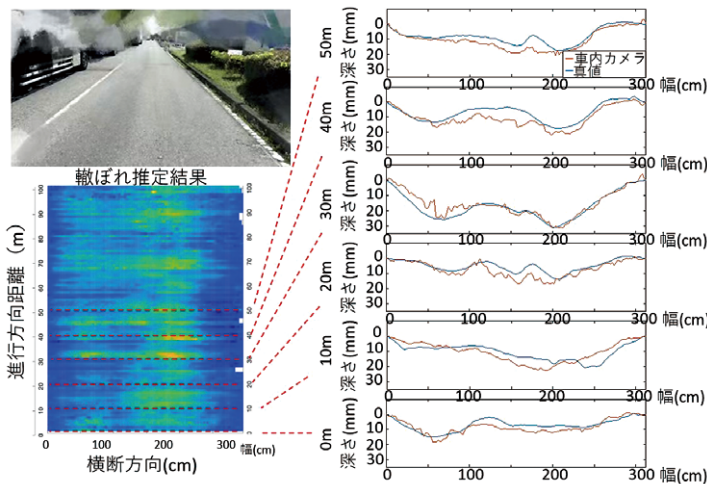


図9 鳥瞰変換の歪み分析に基づくわだち掘れ評価

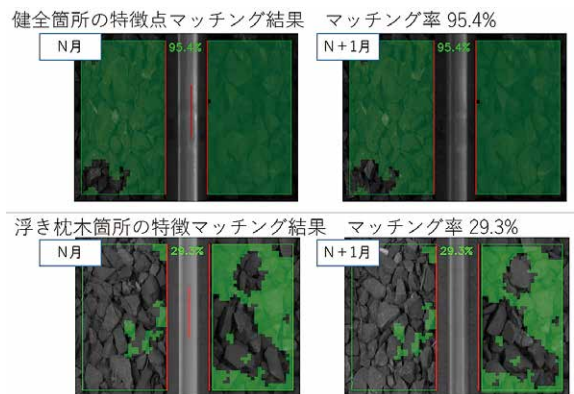


図10 特徴量マッチングを利用した浮まくらぎ評価

(上: 健全箇所, 下: 浮きまくらぎ箇所, 緑色はマッチング成立箇所)

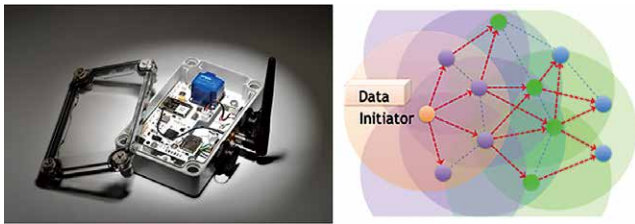


図 11 IoTノードとマルチホップ通信¹²⁾

指標である。鳥瞰変換は路面が平坦であることを仮定しているため、わだち掘れが存在する場合には鳥瞰画像に歪みが生じる。この歪みを逆解析することによりわだち掘れを定量的に評価することができる(図9)。

さらに、重大な事故にもつながるポットホールを検知することは重要であり、機械学習を応用することにより自動的に検知し修繕につなげることができるが、今後は事後対応から予防保全への転換も期待される。鳥瞰変換し位置合わせをした時系列画像からはポットホール発生個所の履歴を定性的および定量的に詳細に評価可能である。IRIやひび割れ率、わだち掘れといった路面管理指標のほか、ひび割れの長さや幅、縦横比、交点数といった舗装表面の状態を詳細に表す指標の経時的な変化を追跡することによりポットホール予測モデルの高度化さらには予防保全の具現化が期待される。

2.5 軌道材料モニタリングシステムを利用した時系列画像解析

近年、線路設備モニタリング装置¹¹⁾が開発され、営業列車に搭載した軌道変位モニタリング装置と軌道材料モニタリング装置から高頻度に得られる軌道状態のデータを保線に活用する線区が増えている。このうち、主に軌道材料モニタリング装置のラインセンサカメラ画像に着目し、異常個所の検出や異常発生早期予測にむけて(株)日本線路技術と共同研究を行っている。ラインセンサカメラ画像の位置合わせを厳密に行うことにより、時系列画像の自動処理が可能となり、変化量に基づいた異常個所の検知や時系列変化量に基づいた劣化進展評価が可能になると考えている。

図10はレールを中心とした道床の時系列画像から、碎石の移動を評価したものである。機械学習を利用した特徴点マッチングにより碎石の移動有無を判断している。健全個所においては碎石のほとんどの部分において特徴点マッチングが成功しており、1か月の間に碎石がほぼ移動していないことが分かる。一方で、浮まくらぎ個所ではマッチング率が29%と低く、碎石

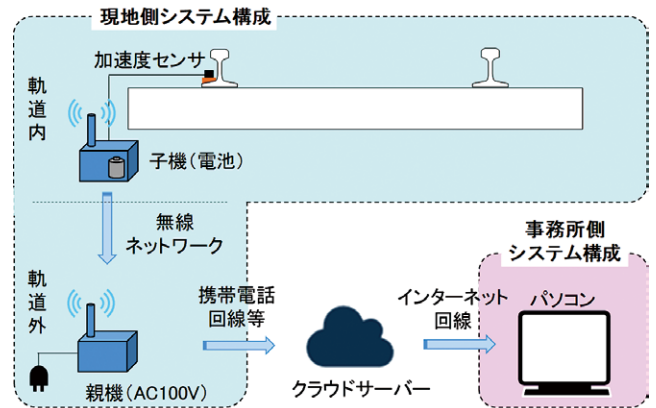


図 12 レール振動加速度による進展把握システム¹⁴⁾¹⁵⁾

が顕著に移動していることが分かる。碎石の移動に着目して浮きまくら木やあおり、噴泥を自動的に検知したり、進行段階を評価したりできると考えている。さらに、プロファイルカメラ画像や軌道変位モニタリング装置のデータと合わせて分析することで異常個所の検出や早期予測が高度化すると期待される。

3. IoTノードを利用した設置型モニタリング

近年の通信技術の進捗やMEMSセンサの高機能化・省電力化により、IoTノードによる設置型のモニタリングは従来になく現実的なものとなっている。先述のSIP研究課題において研究開発に取り組み、その後ベンチャー企業のソナス社¹²⁾が製品化したIoTノード(sonas xシリーズ)は、乾電池を利用しながらも年単位で高サンプリングレートの連続計測が可能で、データはマイクロ秒単位で時刻同期される。マルチホップ通信により広域通信も可能である。電源や通信用の配線が不要なため設置型モニタリングが容易となり、地震応答観測や振動・傾斜計測などに利用されている(図11)。JR東日本では架線張り替え工事の際に、電化柱の傾斜監視にIoTノードを活用することにより、従来と比べ機器の総重量を約90%削減するとともに作業労力が90%軽減された¹³⁾。ここではIoTノードを利用した設置型モニタリングの事例を紹介したい。

3.1 レール波状摩耗の進展把握

レール波状摩耗は騒音、振動の原因となる他、軌道部材の劣化・軌道変位進みの助長となることからレール削正による凹凸除去がなされるが、削正能力は限定的であり、レール波状摩耗の進展を把握して削正作業

を効率化させることが期待される。しかし継続的にレール波状摩耗発生区間のレール凹凸を測定するには多大な労力を要する。先述の車上計測による音声データの分析からレール波状摩耗発生区間を特定する試みはあるものの、その進展を定量的に把握するには至っていない。そこで、鉄道総合技術研究所、ソナス社と共に、IoTノードをレール波状摩耗発生区間の軌道に設置し加速度を継続的にモニタリングすることでレール波状摩耗の進展度合いを把握するシステムを構築した(図12)。親機は駅のホーム下に設置し給電する一方で、子機はまくらぎ端上部に設置、加速度センサは

レール底部に固定した。レール波状摩耗の基本周波数である220Hzの成分や、高調波である440Hzの成分が削正直後に低減しその後徐々に振動レベルが増大することが確認された(図13)。レール凹凸を直接測定しなくともレール波状摩耗の進展度合いを把握できる見込みが得られた¹⁴⁾¹⁵⁾。

3.2 洗堀評価

近年、豪雨災害が激甚化、頻発化して各地で甚大な被害が発生している。河川増水により橋脚の洗堀が進展し橋脚の傾斜や沈下、流失に繋がる事案も発生している。鉄道では衝撃振動試験により得られる固有振動数を指標とした健全度評価が行われているものの、重錘の利用が前提であるため、増水前後に臨機応変に洗堀の状況を把握したり、経時的な変化を追跡して予防保全に向けて劣化予測したりするには限界がある。そこで、常時微動に基づいて橋脚の固有振動数を評価し、継続的に洗堀の状態を把握する試みが進められている。しかし、衝撃振動試験により励起されるモードの振動数ピークが常時微動のスペクトルには明瞭にみられないことがあるため、例えば、天端上の2台の加速度計を用いて地盤の常時微動を推定し、橋脚天端と地盤のフーリエ振幅比から固有振動数を同定することが提案されている¹⁶⁾。様々な条件下の橋脚に対する適用性を明らかにしたり、適用可能性を向上したりすることが期待される。また、観測装置も、電源や通信環境、コストの観点から適した簡易な装置が期待される。

ここでは、ある民営鉄道会社の線区の橋脚にIoTノードを設置して行った常時モニタリングについて紹介する。IoTノードを橋脚、橋台に合計3台設置し、マルチホップ通信を利用して時刻同期のとれた3軸加速度を1時間に1回、5分間にわたり取得している。直近の数か月から1年分のデータがローカルに保存されると共に、セルラ回線を介してクラウド上にも蓄積している。非出水期にはデータ取得間隔を3時間程度に延ばすことで、乾電池を利用しながらも1年以上の継続的な観測を簡易に実現しようとするものである。図14上は、橋脚天端に設置された2台のIoTノードから地盤天端間のフーリエ振幅比を推定したものであり、そのピーク値は衝撃振動試験から得られた固有振動数とほぼ一致する。また、天端上にて観測された橋軸直角方向加速度の常時微動パワースペクトルにも明瞭なピークが確認され、固有振動数を同定できた(図14中)。今後は振動数変化を長期に渡り追跡していく(図14下)。

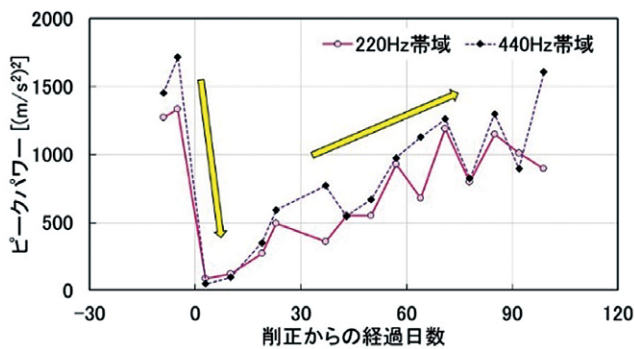


図13 レール振動加速度のピークパワーの推移¹⁴⁾¹⁵⁾

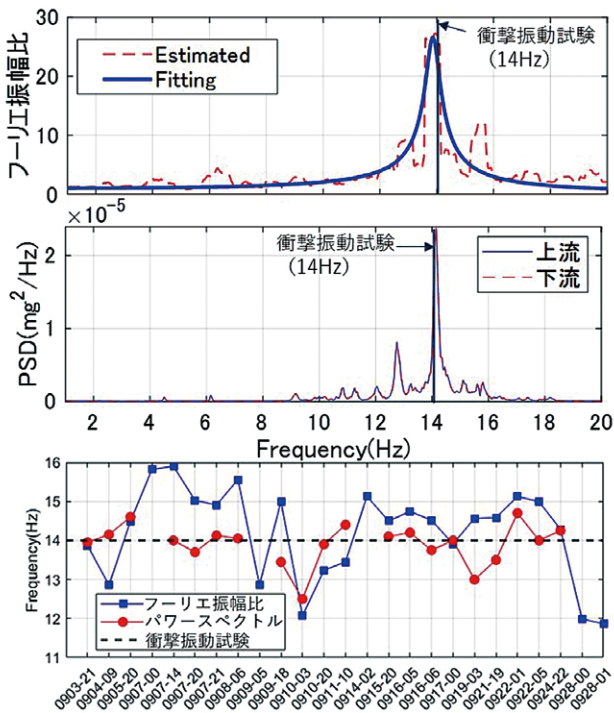


図14 橋脚の常時微動観測

上：フーリエ振幅比，中：橋直方向パワースペクトル，下：経時変化

3.3 活荷重たわみの長期評価

活荷重下での橋梁たわみは、使用性の観点から把握が必要になる他、道路橋ではたわみ計測値に基づいて実態活荷重や疲労環境を評価する目的で把握が試みられている。近年では橋梁の損傷度を評価するためにたわみを指標とする研究も見られる。しかし、橋梁では一般にたわみ計測の参照点を得ることが難しく、継続的にたわみを測定する簡易な方法が存在しない。近年は画像解析に基づいて精緻なたわみ評価する技術も研究開発されているが、カメラや夜間撮影に必要な照明に電源が必要であり、必要に応じて臨機応変にたわみを計測できる状況にはない。

そこで、IoTノードにより継続的に加速度を計測し、データ処理することにより、橋梁たわみを推定することに取り組んでいる。一般に鉛直加速度を数値積分することによりたわみを算出することもできるが、積分誤差が蓄積するため、積分時間が長い場合に非現実的となる。ノイズレベルの小さな高精度加速度計を利用しても積分時間が10秒近くなると積分誤差の影響を無視できない。

そのため、橋軸方向加速度の低周波数成分として取得できる傾斜角を利用して、橋梁たわみを正確に推定する手法を開発した。傾斜角は静的たわみに対しても感度をもつため、橋軸方向加速度と鉛直加速度の双方を観測量とするカルマンフィルタを設計することにより、橋梁上で車両が停車するような極端な場合を含めて適用可能なたわみ評価法を構築した¹⁷⁾。

しかし、橋軸方向加速度は傾斜に感度を持つ一方で、橋軸方向の動的挙動も重畳される。傾斜角成分に動的挙動を重畳した橋軸方向加速度信号から傾斜角成分のみを抽出することは難しい。高速道路や高速鉄道のように車両速度が速い場合には、動的挙動成分が大きく、傾斜計測は不正確となる。このような場合にも適用可能とすべく、機械学習を利用したたわみ推定法を構築した。積分時間が短い場合には鉛直加速度の数値積分としてたわみを正しく推定できることから、1車両が単独で通過する場合など短時間で完結するたわみを数値積分により推定し、教師データとする。機械学習の入力として鉛直加速度に加えて、橋軸方向加速度を用いることにより、多数車両が連続走行し通過時間が長いケースであってもたわみを正確に推定できるようにした(図15)¹⁸⁾。推定されたたわみに基づき、走行車両の軸重も推定している。これまでのところIoTノードを利用して外部電源なしに、約1か月に渡りたわみおよび走行車両の軸重を評価しているが、たわみや軸

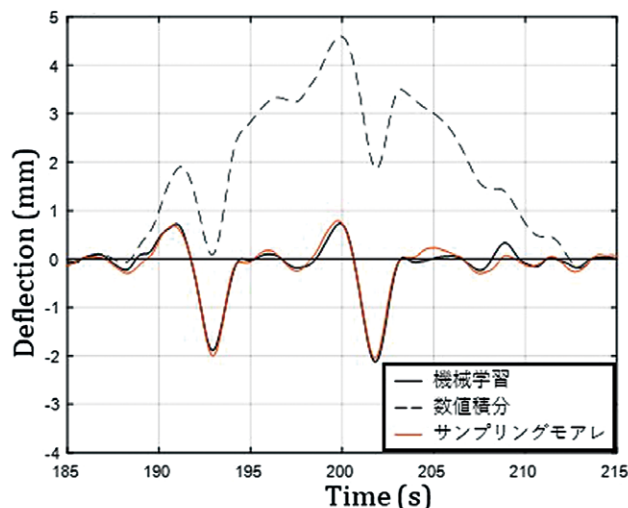


図15 加速度計測に基づき推定した連続桁の橋梁たわみ

重推定の要求精度が低い場合には消費電力の低い加速度計のみを利用することで年単位での連続たわみ評価が可能な見込みである。

4. シミュレーションの高度化とモニタリング

シミュレーション技術および計算機資源の進化が近年著しく、シミュレーションにより評価可能な現象が増えてきている。ここでは汎用ソフトを使った詳細なシミュレーションによるレール摩耗の評価、橋梁部の制動荷重・始動荷重の分配評価、およびモニタリングアルゴリズムの開発について紹介する。

4.1 レール摩耗の評価

車上計測や設置型モニタリングによりレール波状摩耗の検知や進展把握の試みがあるものの、レール摩耗の現象を理解するためには、車両と軌道をモデル化しその相互作用を考慮したシミュレーションが有効と考えられる。そこで、車輪とレールの接触や、それによる車輪、レール側それぞれの摩耗、接触位置の変化、軌道パッドの剛性の違い等を考慮したマルチボディシミュレーションを行った(図16)¹⁹⁾。シミュレーションでは軌道不整や軌道パッドの剛性、走行速度などのパラメータを変更しながら詳細に摩耗現象を評価することができる。走行速度が速いほどレール摩耗の進展が遅いことが示唆された他、軌道状態が悪いほど接触力が大きく、摩耗深さも大きくなること、軌道パッド

の剛性が増加するとレール波状摩耗は減少し波数が増加することも確認された。モニタリングにより得られた実データとシミュレーションを合わせて解釈することにより、レール摩耗進展に関する知見が深まり、合理的なレールメンテナンスに繋がると期待される。

4.2 制動荷重・始動荷重の分配

インド国鉄においては列車の制動荷重や始動荷重が橋梁下部構造に分配されない想定で設計されてきた。近年、列車側の性能の向上と共に年々、制動荷重や始動荷重の実態は増加している。そこで橋軸方向の荷重が橋梁部においてどのように分配されているか、実態を理解することが求められる。現地の橋梁にてひずみ計測が行われ荷重分配率が実験的に推定されたものの、実験可能な条件は制動荷重が小さい場合に限られる。そこで、橋梁や軌道および車輪から作用する荷重を再現した詳細なシミュレーションを実施し、橋軸方向の荷重分配率を評価した(図17)。実験結果を再現するとともに、実験条件には含まれない大きな制動荷重や

始動荷重下での荷重分配率を求めたところ、6割程度の荷重が橋脚に分配されることが確認された²⁰⁾。今後車上計測から制動荷重や始動荷重の実態を把握するなどして、シミュレーション、モニタリングの双方を活用した維持管理の高度化が期待される。

4.3 シミュレーションを活用した変位推定法の開発

従来の構造モニタリングは、実測ベースの研究開発が盛んに行われてきた。IoTノードによる実構造物の臨機応変なモニタリングが現実となった今日、実測ベースの研究開発はさらに加速するであろう。しかし、実測では稀な損傷ケースや極限事象の観測は限られ、十分な検証は行えない。従来の数値計算や室内実験は過度に単純化された検証モデルの利用が多く、実インフラへの適用を想定した検証には不十分であった。近年ではシミュレーション技術の発展により、実構造物に変状が発生した場合の挙動も詳細に再現できるようになってきたため、デジタルツインともいえるリア

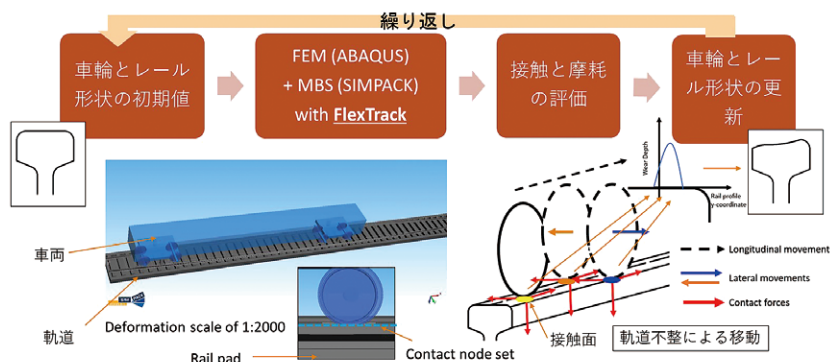


図16 車輪とレールの接触を考慮したマルチボディシミュレーションによるレール摩耗の評価¹⁹⁾

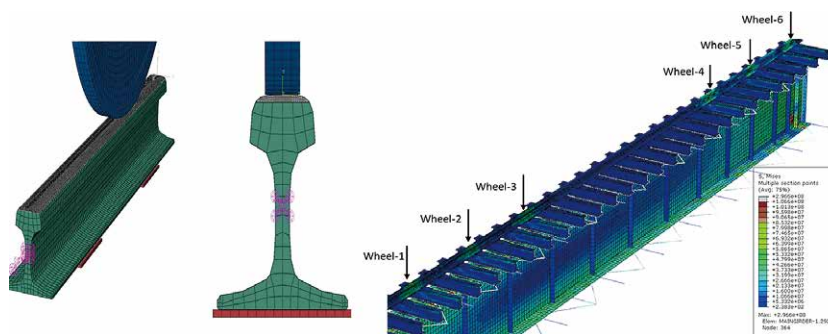


図17 軌道、車輪を考慮した橋梁モデルによる橋軸方向荷重の分配率評価
左：車輪モデル，右：橋梁と軌道²⁰⁾

ルなモデル上で多様な損傷や極限事象をシミュレーションし、構造モニタリングのアルゴリズムを開発することが可能となりつつある。ここでは地震後の迅速な被災度評価を目的として、加速度データから地震時の相対変位応答を推定するアルゴリズムを、詳細な非線形有限要素モデルに基づいて開発した事例を紹介したい。

地震後の構造物の被災度は、相対変位応答が分かれば、設計時の情報とあわせることで評価できると考えられる。建築分野でも層間変位量に基づく建物の被災度評価の研究が盛んに進められている。しかし、残留変位成分も含めて変位を推定することは、単なる加速度の数値積分では難しい。地動加速度が計測されれば非線形有限要素解析により変位を計算することも可能であるが、正確な構造モデルの利用が前提である。対象構造物の非線形履歴特性を正確に構築することは難しい。シミュレーションベースで実変位を推定するには限界がある。

そこで、加速度応答を観測量とするデータ同化手法にパラメータ最適化を合わせることにより、非線形地震応答の変位を推定する手法を開発した。図18に示すRC構造物の非線形有限要素モデルや非線形移動硬化則を有する鋼製橋脚の有限要素モデルをいわば実インフラのデジタルツインとして加速度応答を計算し、これらを真値や観測値として扱う。逆解析のデータ同化モデルは不正確であることを前提として、簡単な1自由度非線形モデルを採用した。これにより対象構造物の非線形特性の詳細は不明であっても、地動加速度と水平方向応答加速度を計測し簡単な1自由度非線形モデルと合わせることにより相対変位応答を、残留変位成分を含めて推定する。入力地震波として様々な地震波を入力したり、順解析モデルのパラメータを変えたりしてアルゴリズムの性能を評価したところ、変位推定性能が高くロバストであることが確認された²¹⁾。

5. おわりに

車上計測による高頻度モニタリングやIoTノードによる密な設置型モニタリング、シミュレーション、機械学習はいずれもコンセプト自体の歴史は長いですが、近年ハードやソフトの関連技術の進展やクラウド環境の普及もあり、急速にメンテナンス諸課題に対する有力なツールになろうとしている。一方、低コストで省力のメンテナンス体系への転換もコロナ禍を経て差し

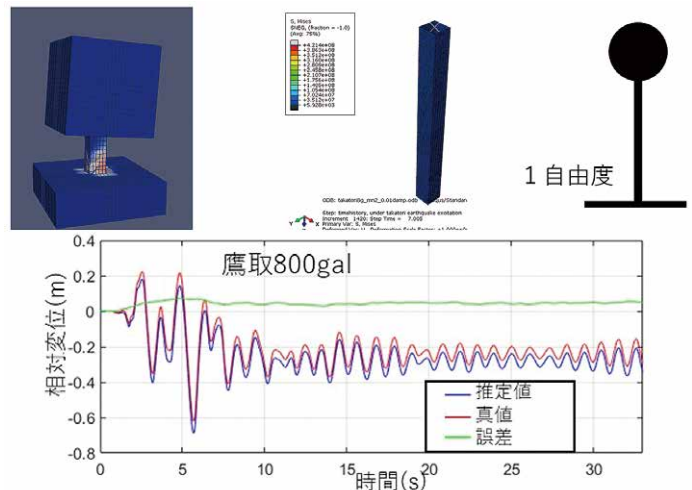


図18 非線形FEMを活用した逆解析アルゴリズムの開発²¹⁾

迫った具体的な課題となってきた。機が熟した今、社会インフラを支える使命感を持った者たちが、社会インフラに関する専門知と、情報通信や計算機科学、データサイエンスなど諸科学の知見と統合し、持続可能なインフラメンテナンスを具現化することが求められている。

参考文献

- 1) 土木学会：2020 インフラ健康診断書，2020
- 2) 長山智則，趙博宇，薛凱：走行時の車体振動を利用したハーフカーモデルの同定と路面縦断形状の推定，土木学会論文集 E1 (舗装工学)，75 (1)，pp.1-16，2019.
- 3) 長山智則，廣瀬安昭，趙博宇：大学発の技術開発とビジネス展開の連携，コンクリート工学，Vo.6，No.1，2022
- 4) 田村峻，長山智則，薛凱，西川貴文：スマートフォンを用いて推定された路面の平坦性とひび割れの経時的分析手法の提案，土木学会第77回年次学術講演会，V-322，2022
- 5) Saravanan, J.T., Su D., Tanaka, H., Zhao, B., and Nagayama, T., "Response based track profile estimation using observable train models with numerical and experimental validations," Smart Structures and Systems, Vol.27, No.2, pp.267-284, 2021
- 6) 中村俊敬，蘇迪，長山智則：継ぎ目を考慮した浮きまくらぎ検知手法の数値的検討，土木学会第77回年次学術講演会，VI-935，2022

- 7) 長瀬航太, 蘇迪, 田中博文, 長山智則: 携帯情報端末を用いた車内音による波状摩耗の検出精度の向上策の検討, 土木学会第73回年次学術講演会, VI-891, 2018
- 8) 垣内優希, 長山智則, 薛凱: 車両動揺解析による路面評価のための軸距・センサ位置および走行速度の推定, 土木学会第76回年次学術講演会, CS9-02, 2021
- 9) 令和2年度 国土交通省関東地方整備局マッチング事業研究成果 https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000835631.pdf
- 10) 薛凱, Geda Jose, 長山智則: 路面評価のための車内設置カメラ画像の自動鳥瞰変換, 土木学会第76回年次学術講演会, CS14-38, 2021
- 11) 線路設備モニタリング: <https://www.kk-nsg.co.jp/business/monitoring.html>
- 12) ソナス社, <https://www.sonas.co.jp/>
- 13) JR東日本: 東大発IoTスタートアップソナスの電化柱傾斜監視システムの運用開始, https://www.jreast.co.jp/press/2021/20211126_ho01.pdf
- 14) 田中博文, 梶原和博, 神野響一, 川西直, 蘇迪, 長山智則: 振動モニタリングによるレール波状摩耗の進展把握システムの開発, 土木学会第75回年次学術講演会, VI-532, 2020
- 15) 田中博文: 鉄道におけるレール波状摩耗の測定・モニタリング技術の開発と効率的な管理手法の提案, 東京大学博士論文, 2020
- 16) 樗健典, 内藤直人, 渡邊諭: 外乱作用下における河川橋脚の常時モニタリング, 土木学会論文集F4, Vol.75, No.1, pp.24-37, 2019
- 17) Nagayama, T, and Zhang C., "A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement," 構造工学論文集A 63, pp.209215, 2017
- 18) Mustafa, A., Nagayama, T., Kawakatsu, T., Takasu, A., Sanada, O., and Suganuma, H., "Estimation of highway bridges' deflection from acceleration measurement by using a machine learning approach," 土木学会第77回年次学術講演会, CS14-14, 2022
- 19) Teng, S.R., and Su, D., "Numerical study of correlation between rail vibration and wear," 土木学会第77回年次学術講演会, VI-434, 2022
- 20) Chaurasia, S. and Su, D., "Experimental and numerical evaluation of longitudinal vehicular forces on bridges of Indian railways," 9th International Conference on Experimental Vibration for Civil Engineering Structures (EVACES2021), Tokyo, Japan, 2021
- 21) 石原佳奈, 楊曜華, 長山智則, 中村俊敬, 蘇迪: 加速度応答計測と非線形履歴特性モデルに基づく変位応答推定, 構造工学論文集A, Vol.68A, pp.275-288, 2022