

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（FS研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属	役職
	長山智則（ながやまともりのり）		東京大学	准教授
②研究 テーマ	名称	IoT と画像機械学習を活用した自動車荷重実態の簡易把握技術の開発		
	政策 領域	[主領域]	8道路資産の保全	公募 タイプ 実行可能性調査
		[副領域]		
③研究経費（単位：万円） ※受託額を記入。	令和元年度 9,988,000			
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）			
氏名		所属・役職		
長山智則		東京大学大学院工学系研究科・准教授		
蘇迪		東京大学大学院工学系研究科・特任准教授		
藤野陽三		横浜国立大学先端科学高等研究院・上席特別教授		
Dionysius Siringoringo		横浜国立大学先端科学高等研究院・特任准教授		
西尾真由子		筑波大学システム情報系・准教授		
高須淳宏		国立情報学研究所コンテンツ科学研究系・教授		
川勝孝也		国立情報学研究所コンテンツ科学研究系・特任研究員		

⑤研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入。）

IoT と画像機械学習を活用して、路面・ジョイント・床版に作用する静的および動的な自動車荷重を、広域かつ簡易に評価する技術を開発し、高速道路や一般道路の橋梁・路線で実証することを目的に、Bridge Weigh in Motion（以下、「BWIM」という）および衝撃荷重推定の活用目的と重量推定誤差影響の整理、加速度・傾斜計測に基づくBWIMの基礎検討、接地力推定精度の基礎検討を行う。

⑥ F S 研究の結果

要約： 主なFS研究の成果は以下の通りである。

1. 文献調査およびヒアリングを通してBWIMおよび衝撃荷重推定の活用目的や精度を整理し、本課題で提案する簡易BWIMや衝撃荷重推定の主なターゲットを明確にした。具体的には、BWIMはその精度や特性を考慮すると、取り締まりのための精緻な計測等よりも、取り締まりのための事前検討や、道路ネットワーク内のローカルな疲労環境を評価するために採用するニーズが高い。これらの目的においては、精度に対する要求は必ずしも高くない。寧ろ適用可能な橋梁の形式などの条件が厳しくなく、適用性が高いことや、従来のBWIMと比較して安価で簡易であることが求められる。伸縮装置における衝撃荷重やそれにより生じる応力は疲労損傷の原因となる。伸縮装置の損傷原因は、腐食など他にも挙げられるが、疲労は重交通路線における損傷原因の1つであり、段差や擦り付け舗装の不陸に起因する衝撃荷重の影響には未解明の点が多い。衝撃係数100%で設計がなされているものの海外の調査では130%を超えるとの報告もあった。衝撃荷重の影響の実態を明らかにすることに加えて、伸縮装置やその周辺に発生した損傷をモニタリング等の技術を用いて早期に発見するニーズも高い。
2. 無線加速度計を利用した簡易なBWIMを一般国道にかかる2径間連続鋼箱桁橋の計測データに適用し、車重を推定した。本橋梁では10%程度の推定精度を達成できた。キャリブレーションが不要で、かつ外部電源も不要な簡易なBWIMである。高速道路にかかる2径間連続鋼版桁橋においてもデータを取得しBWIMを適用した。さらに、機械学習を利用したBWIMについて、2径間連続鋼版桁橋に適用性も検討した。今後は、適用可能な橋梁形式、条件を明らかにするとともに、適用可能性や簡易性を向上させる研究開発を進める。
3. 伸縮装置における衝撃荷重の大きさを推定するために、小型自動車の動的応答を逆解析し、伸縮装置周辺において衝撃荷重が大きいことが明らかになった。今後は、同様の仕組みを大型車にも適用して、大型車走行時における衝撃荷重の大きさを評価する。さらに、伸縮装置側での歪計測や、有限要素解析、さらに、BWIMから得られる静的な活荷重情報とあわせることで、伸縮装置の実態荷重・応力を詳細に検討する。

6.1 BWIM および衝撃荷重推定の活用目的及び必要精度

6.1.1 BWIM のレビュー

a) WIMとBWIMのこれまでの発展

米国においては、2007年からFHWA（連邦道路局）がLTBP(Long Term Bridge Performance) プログラムを開始した。我が国のSIPインフラ（2014年—2019年）に内容的には近い。このプログラムの中でWIMのレビュー解説（図 1）が報告書として2014年にまとめられており、本文もそれを大いに参考としている。

WIMは舗装の下に埋め込んだセンサーから車重、速度、軸重、軸間距離を計測することを目的に1950年代に初めて開発され、以後発展し、1990年代にはASTMのガイドラインとしてまとめられた。2000年代はじめに、センサーの精度向上とともに、WIMの計測精度も大幅に向上した。一番安価なピエゾタイプ（およそ9000\$、寿命4年）で精度が15%程度、高価なロードセルタイプ（およそ5万\$、寿命12年）で6%程度と言われている。（後述するように、近年は、本レビュー解説発行時と比べて精度と寿命が改善されている。）WIMは2004年にAASHTOの重点技術に認定され、以来、ミネソタやミズーリなど多くの州で採用されるようになった。走行大型車の重量、頻度などの情報は勿論であるが、過積載車のスクリーニングにも使われている。精度の面から違反車の取締りには使うことが許されていない。

なお、最近のWIMではカメラによる画像（ナンバープレートからの車種などの自動判定）、スキャニングレーザー（車体の3次元寸法）、ビジョンセンサー（軸数、軸間距離、車種などの自動判定）などを組み合わせて、機能を高めているものもある。

BWIMは走行自動車の曲げによるひずみ応答から影響線を使って逆計算により車重、軸重などを求める方式で、1979年にF. Moses¹⁾が提案した方式である。我が国でも1980年代後半から2000年代はじめにかけ、三木ら（当時、東工大）、小塩・山田（当時、名大）らはひずみゲージを設置位置を工夫することで精度の向上を試みた。国総研もBWIMを2003年から2004年にかけて20の橋梁にBWIMを設置している。

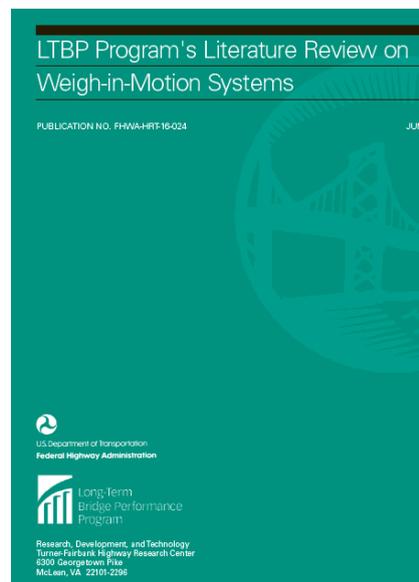


図 1 LTBP レビュー報告書

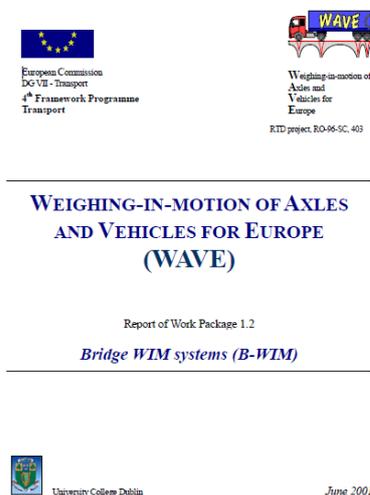


図 2 WAVE 報告書

国総研も BWIM を 2003 年から 2004 年にかけて 20 の橋梁に BWIM を設置している。

BWIMは車両の動的応答の影響、車両位置（橋軸直角方向）の不確かさ、路面凹凸の影響などを受け、精度上の限界があり（軸重で20-40%程度、車重で10%程度）、米国ではあまり使われていない。

ヨーロッパではEurocodeの活荷重評価のために1980年代後半から数年にわたりWIMによる測定が行われたが、WIMの耐久性の低さが問題となった。これを踏まえ、1996年から2001年までWeigh-In-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE)（リーダーはアイルランドのO'Brien教授、図2）というプロジェクトがEUで行われ、WIM、BWIMの開発研究が行われた。2002年以後、スロベニア、スウェーデン、オランダには80のBWIMが設置されたとの報告がある。2014年からも同じようなEUプロジェクトが行われ、SiWIM（開発者ZAG&CESTEL 遠隔操作が可能で自動化が進んだBWIMシステム）が開発された。逆計算のアルゴリズムの改良も行われ、BWIMでも誤差が10%以内になったとの報告がある。フランス、オランダ、ドイツでもいろいろなことが行われているが、WIMが主流である。

オセアニアのオーストラリアでも、自動車荷重の把握と違反車の洗い出しにWIMが使われている。

b)BWIMおよびWIMの方式

土木学会「鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリング」²⁾には活荷重の推定手法として主要なBWIMやWIMの方式がレビューされている。これに基づいて代表的なBWIMを以下に示す。

1) 自動重量計測装置

WIMの一種であり、インターチェンジなどに設置されている。西日本高速道路ファシリティーズによると、計測可能最高速度は80km/h、検出規格はフルスケール軸重20tに対して重量測定精度は±5%以内、荷重検出器の寿命は1000万軸または10年である。

2) ピエゾクォーツ方式センサを利用したWIM

ピエゾクォーツ方式の重量計測センサを適切な間隔で道路上に配置し、重量計測するものである。多点にて重量計測することで軸重の動的変動成分を考慮して計測精度の向上を図っている。4点計測の場合総重量の推定誤差は2%程度である。本線上に設置でき、全車両を補足できる。近年は製品寿命が10年以上になっている。

3) 桁の歪応答を利用したBWIM

Mosesら¹⁾によって1979年に提案された手法で主桁の歪計測を利用する。活荷重応答レベルが比較的大きい、車両の車線内走行位置の変動に対する感度が低いことが特徴として挙げられる。軸重基地の車両によりキャリブレーションを行う。車両重量に対する推定誤差は2%程度であることも報告されている。

4) 鋼床版の歪応答を利用した車重・軸重算出法

縦リブの歪応答を用い車軸通過検知を行い、横リブの歪応答を利用して車両重量の計算をする方法である。影響線の算出は、桁応答を利用するBWIMと同様であり、キャリブレーションが必要になる。

5) RC床版を利用したBWIM

RC床版のひび割れ開閉幅が弾性的であることを利用して軸重を算出する方法である。

6) 支点反力を利用したBWIM

支点部の部材が弾性的に応答することを利用して、軸重を算出する。支点反力の不連続変化量が軸重に対応しているため推定方法が簡便である。一方で、軸重の動的成分の影響が大きい場合には推定誤差となり得る。

7) 支承変位を利用したBWIM

ゴム支承の変位量に基づいて軸重を推定する手法である。原理は支点反力を利用したBWIMと同じである。

8) 部材加速度応答を利用した方法

加速度計測に基づいてたわみ量を推定し、たわみ量に対する影響線を考慮することで、桁の歪応答を利用したBWIMと同じ原理により車重を推定するものである。研究代表者らによる研究では標本数652台に対して、平均誤差0.4kN、標準偏差10.4kNになることが報告されている。無線加速度計を利用すると設置の手間・コスト低減の可能性がある。キャリブレーションを省略する方法も提案されており、その手間・コスト低減も考えられる。

総じて、WIMは軸重推定精度が高いものの、設置や維持管理において交通規制が必要になるといったデメリットが挙げられる。精度が求められる用途においてはBWIMではなく、WIMが用いられる傾向がある。

一方で、BWIMは精度が限定的であるものの設置には交通規制が必要にならないことがメリットである。精度が必要とされないプリスクリーニングなどの用途ではBWIMが利用される傾向にある。 WIMと比べると一般に導入は簡易であるものの、利用するセンサにも依存する。桁端部にのみ歪ゲージを設置するものは足場の準備はほぼ不要である一方で、桁や床版裏面に歪ゲージを設置する場合は、新たに足場を準備する必要が生じることがある。その他、外部電源を用意したり、歪ゲージとデータロガー等を結ぶ配線の手間や、歪ゲージ貼り付けの手間が生じる。さらに、既存BWIMはいずれも軸重既知の荷重車によるキャリブレーション走行を必要とする。 さらに、適用対象の橋梁形式が単純支持構造のみ、直橋のみ、といった制約を受けることが多い。

c) ADTT (Average Daily Truck Traffic) の簡易推定

橋梁の設計では交通量、特に大型車交通量が荷重に関するパラメータとして用いられている。AASHTOでは鋼橋の自動車荷重の評価に車線別日平均大型車交通量 (ADTT: Average Daily Truck Traffic) を用いている。また、道路橋示方書同解説³⁾における疲労設計でもADTTが交通荷重に関するパラメータとして用いられている。既存橋の疲労環境を把握する際や、既設橋の性能照査の際には実際のADTTを利用することも考えられる。ADTTを推定・計測するには近年は様々なトラフィックカウンタが提案されている。一方で、BWIMの仕組みがあればそれを援用して簡易にADTTを推定・計測することも考えられる。BWIMでは正確な重量推定のために荷重車走行を利用したキャリブレーション等が必要になるが、ADTTのカウントのためには、キャリブレーションを経ずして簡易に実施することも本課題研究担当者らにより提案されている。

6.1.2 伸縮装置における衝撃荷重推定に関するレビュー

橋梁は桁、床版、支承、橋種によってはケーブルなど様々な要素から構成されており、直接荷重を受けない桁などは特殊な例を除いて100年以上優にもつが、直接輪荷重を受けるRC床版や鋼床版の損傷は広く知られるようになったが、最も破損が多く、寿命が短いのが伸縮装置と言われている。その理由として、1) 設置の際の初期不整、2) 目詰まり、汚染有害物質、3) 桁端部の劣化損傷、4) 交通荷重、5) 伸縮部の段差、不陸などによる交通荷重の増幅効果などが挙げられているが、主要な原因の1つと考えられるトラックなどの重荷重による過大な繰り返し応力については、実測例も極めて少なく、実態が把握できていないのが現状である。

伸縮装置の自動車走行による応力を測定したのは米国ミズーリ交通局による報告⁴⁾が挙げられる。フィンガータイプと平鋼板タイプを対象に、実橋梁の伸縮装置において大型トラックの走行時のひずみとたわみを計測した。高い応力が発生する箇所を同定し、併せてFEモデルによる検討も行い、その妥当性を示した。これらの知見に基づき、各々の伸縮装置に対する設計変更の提案を行っている。この報告は既存の伸縮装置を1例ずつ計測したに過ぎず、段差、伸縮装置の橋軸方向の間隔、あるいは車種、高速度走行の影響などが実交通の中で調べられていない。

オランダにおいてモジュラー式伸縮装置の衝撃荷重を評価した事例では衝撃係数130% (30%ではなく) 相当を超える動的軸重が作用していることを示すものもある⁵⁾。

国内では、設計活荷重が静的に作用する下で伸縮装置に生じる応力を、損傷の過程を考慮して詳細に調べた研究がある⁶⁾。伸縮装置のうち最も一般的に使用される鋼製フィンガージョイントの数値解析により、亀裂・破断等の損傷過程が明らかにされている。

モジュラー式伸縮装置を対象にして疲労耐久性を検討した事例⁷⁾もある。軸重が通過する際、衝撃係数、横方向分布率、荷重分担率、リバウンド係数などが疲労耐久性に影響するが、精度の良い耐久性評価には、実橋における計測が不可欠であることが述べられている。構造が特殊なモジュラー式伸縮装置を対象にされている。

本課題が提案する、簡易かつ高精度なBWIMを援用し、かつ、伸縮装置のひずみ等の計測をいくつかの実橋梁で行うことにより、上記した様々な状況での実荷重下での伸縮装置の挙動についての系統的なデータを世界で初めて得ることができ、その要因分析から長寿命の伸縮装置の合理的な設計や舗装不陸の適切な管理が可能となると考えられる。

6.2 想定される活用目的及び必要精度

ヒアリングを通して活用目的および必要精度について整理した。

BWIM :

a) 疲労設計のための頻度補正係数の検討、車種構成比率や応力頻度の計測

床版を除く鋼製の上部構造の自動車荷重に対する疲労設計では、T荷重を基本とし、活荷重補正係数により補正する。次に疲労設計荷重の載荷回数を決定するためには載荷頻度を算出する⁸⁾。

$$nt_i = ADTT_{SL_i} \cdot \gamma_n \cdot 365 \cdot Y$$

ここで、 nt_i : 設計で考慮する期間に考慮する疲労設計荷重の載荷回数、 $ADTT_{SL_i}$: 一方向一車線当りの日大型車交通量、 $ADTT_{SL_i} = ADTT/n_L \times \gamma_L$ 、 γ_n : 頻度補正係数 (標準的には0.03)、 Y : 設計で考慮

する期間、ADTT：一方向当りの日大型車交通量、 n_L ：車線数、 γ_L ：車線交通量の偏りを考慮する係数である。大型車交通量として考慮される車両は必ずしも満載状態で走行しているわけではないため、頻度補正係数を乗じることで影響を考慮している。頻度補正係数の標準値である0.03は、対象橋梁の大型車交通について十分に把握・検討した上で、標準値を用いることが適切でないとは判断できる場合には別途頻度補正係数を設定できる。

BWIMを簡易に実施できれば、対象橋梁の大型車交通量と車重分布に基づいて頻度補正係数を算出することができる。交通実態を踏まえて、合理的な設計ができると考えられる。頻度補正係数の検討において必要なものは統計量であり、車重、軸重に求められる精度は高くはないと考えられる。

一方で、道路会社等にヒアリングを実施した結果、BWIMを疲労設計に利活用するニーズは大きくなかった。設計荷重の検討よりも実態荷重の把握にニーズがあった。

b) 交通量把握のための大型車混入率や車種構成比率の計測

台数や大型車交通量は近年、様々な種類のトラフィックカウンタにより比較的容易に取得できるようになってきており、高速道路等に設置されている。そのため、新たにBWIMを設置して大型車混入率や車種構成比率を推定するニーズは大きくはない。ただし、BWIMから得られる情報の利活用方法としては考えられる。また、トラフィックカウンタでは大型車は判別できるが、その重量が分からないことが課題である。

c) 活荷重把握のための橋の荷重効果の計測

橋梁の通行止めの判断をする際に、実態の活荷重が許容応力度を超過していないかを把握、許容応力度を超過していない場合は監視しながら供用するといった使い方が考えられる。

橋梁の補修・補強を行う際には設計活荷重を従前どおりとするか、グレードアップするかの判断が必要になる。BWIMにより実態活荷重を計測し、設計活荷重を設定する判断に活用できる。

ヒアリングを実施した道路会社においては管理レベルが高いこともあり、上記のような実態活荷重把握のニーズは現状では大きくない。

d) 重量超過車両の取り締まりのための車両重量の計測

車両総重量は通常20トン（最大で25トン）が上限となっており、軸重では10トン、輪荷重では5トンを超えてはならないこととなっている。橋梁の設計もこれに基づいており、これらの上限を超える過積載車の走行は橋梁の疲労寿命を縮める恐れがある。

過積載車両の取り締まりは、現状では、高速道路料金所においてなされる場合が多い。料金所の走行レーンには軸重計が設置されており軸数情報を得ている。特に過積載が疑われる車両については台貫に引き込み計測をし、取り締まりをしている。取り締まりに求められる精度は軸重にして1-2%程度で、精度保証が必要なこともある。しかし、台貫を設置する料金所には限りがあり、網羅性にも欠ける。台貫を設置していない料金所において取り締まりをする場合は、ポータブル型重量計が利用されるが、その数にも限りがあり網羅性は高くない。近年では、平成30年11月9日に、国土交通省、警察、高速道路会社が合同で、首都圏の過積載車両の一斉取り締まりが行われ、料金所を中心として計18か所で89台を計測し30台の違反車両が判明した。過積載車を取り締まる仕組みは存在するものの、その数や実施される頻度は必ずしも高くない。

道路上に設置されたWIMと画像やETC等の記録照合により網羅性のある過積載車取り締まり体系も考えられ、道路会社でも検討されている。しかし、埋め込み式のWIMは導入コストが高価で、本線上の車線規制を伴う上（1箇所あたり数千万円から1億円とも見積もられる）、従来は埋め込み式WIMの耐用年数が短く数年にも満たないこともあったため、採用は極めて限定的であった。セ

ンサの補修・修理の度に、車線規制の手間と費用が生じることになる。近年になってピエゾクォーツ方式のWIMが開発され、舗装の打ち替え工事と同等程度の耐用年数が実現するようになってきたことから、システムの維持管理の手間・費用の観点から改善された。軸重推定精度においても、従来は軸重の動的成分の変動により精度が限定的であったが、複数のセンサを埋め込み計測値に処理を施すことで1-2%の推定精度が実現するようになってきた。導入コストは依然として高いものの、導入事例が国内外で増えてきている。米国ニューヨーク市においても同方式のWIMを多数導入しているし、国内道路事業者でも導入数を増やす事例がある。

課題としては、耐用年数が大きく改善してきているものの、一旦故障が発生すれば、システム修理のためには交通規制が必要となることである。

BWIMの軸重推定精度はWIMにおける推定精度である1-2%には及ばず取り締まりに直接用いることは難しいが、設置や維持管理のために交通規制が必要ないこと、システムが比較的安価であることから、WIMを補い、空間、時間的に頻度を上げて、過積載車両の通行実態を把握し、取り締まりの事前検討に利用することが期待される。

その他にも、特殊車両通行許可を受けた車両が、許可経路以外を抜け道として通行していないか把握するという観点からの取り締まり、重量計測も今後考えられる。実際の取り締まりにはマット式のWIMなどの利用が想定されるが、事前検討においては簡易なBWIMに対するニーズがあると考えられる。

e) 疲労寿命予測・疲労環境アセスメント

舗装、床版、桁、2次部材等の対象に、疲労による損傷が少なからず生じている。劣損傷の進行を大きく規定するのが活荷重であるがその実態、疲労環境が分かっている路線は少ない。重交通の多い高速道路会社

等では、活荷重実態を道路ネットワーク上で網羅的に把握して、疲労の観点から劣化予測と補修の優先順位付けをするニーズがある。例えば右図はある自動車専用道の走行車線、追越し車線の車両重量の分布である²⁾が、車線によっても疲労環境が大きく異なる。維持管理においては外乱となる活荷重モニタリングを行い、路線別、車線別に疲労環境アセスメントを進めることで維持管理が効率化すると考えられる。例えば、活荷重実態に基づいて、路線毎の優先順位付けをつけた上で、点検結果に基づいて個別の優先順位をつける、といった使い方が考えられる。現状では、塩分量や大型車軸数を基準に優先順位を決めるが、重さ(軸重)の情報が欠けており、推定値を使わざるを得ない。これを計測することで疲労劣化予測と補修の優先順位付けを高度化するニーズがある。重車両の走行が想定される第1走行車線だけでなく第2走行車線にも同様に多数の床版の疲労亀裂が多数発生する箇所があり、そのような路線における劣化予測や維持管理優先付けにおいて、車線毎の活荷重情報が重要となる。

現状では少ないながらも本線上にWIMが導入されているケースもあるが、網羅性は極めて低い。IC間に1つ程度のWIMあるいはBWIMを設置できればネットワーク全体の活荷重実態が

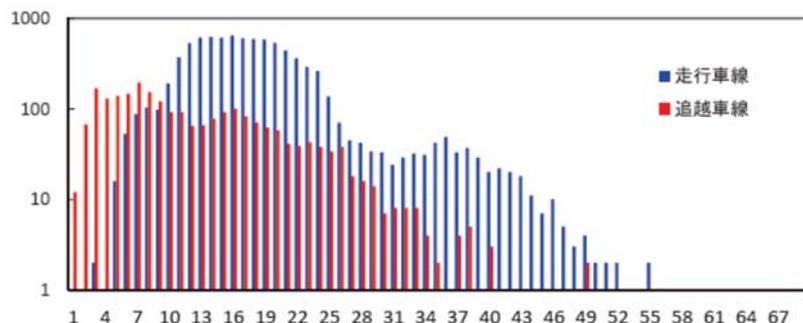


図 3 自動車専用道の車両重量頻度分布例

(土木学会「鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリング」より)

判明する。WIMでは導入費用と手間、運用コストが高いため、安価なBWIMを導入するニーズがある。疲労損傷を推定するためには、軸重が必要であるが、必要とされる精度としては、取り締まりと比較すると高くはないと考えられる。ヒアリングにおいては、設計上10トンの軸重を想定しており、その1割程度の誤差を許容できるのではないかと、という意見があった。

衝撃荷重推定

- a) 疲労寿命予測・疲労環境アセスメント、伸縮装置の合理的な推定、舗装不陸の適切な管理
- ・米国ニューヨーク市における伸縮装置損傷に対する問題意識

米国ニューヨーク市交通局で橋梁技師を務めたBojidar Yanev氏にインタビューを行ったところ、NY市では伸縮装置のうち特にArmor jointと呼ばれる簡易形式の伸縮装置（日本における突き合わせジョイントの一種と考えられる。荷重を支持しない形式）の損傷事例が多く、それに作用する荷重や発生する応力の評価が課題であった。必要な遊間量が小さい場合には、作用力、抵抗に基づいた設計を経ることなく、Armor Jointを適用しており、頻発する伸縮装置損傷に繋がっている恐れがある。設計上は荷重を支持しない形式の伸縮装置であるが、実際には荷重が作用し損傷の原因となっている恐れがある。他の形式の伸縮装置はArmor jointと比較して損傷が少なく、ニューヨーク市においては優先度が低い。ただ、設計上想定される荷重とは異なる実態荷重を考慮しないことに起因して損傷が発生しており、実態荷重の考慮が必要であるとの問題意識は本課題と共通している。

- ・国内道路会社における伸縮装置損傷に対する問題意識

伸縮装置損傷は、腐食や、伸縮装置周辺部との境界で生じる損傷など多岐にわたり、疲労など荷重に起因する損傷はその一部である。疲労損傷としては、モジュラー式ビーム型伸縮装置に生じた疲労亀裂が挙げられる（図4）。このため、フィンガージョイント等に順次取り換えている。近年のフィンガージョイントは疲労設計がなされており、疲労破断の事例は少ないが、疲労設計導入前のフィンガージョイントは疲労破断の事例が現在でも発生している。同じ路線においても破断の発生する場所、発生しない場所があることから、各伸縮装置に発生する衝撃荷重の大きさや応力を評価して、劣化予測や維持管理の優先順位付けに利用したいニーズがある。フィンガージョイントの段差量は3mm以内と規定されている一方で、その前後の擦り付け部分の形状は様々であり、擦り付け部分の形状、段差量と、伸縮装置に発生する応力、疲労損傷の関係が必要である。

さらに、伸縮装置の境界部のコンクリートとの接合部から損傷が始まることもあり、現状では打音検査により把握している。この損傷の発生や進展をモニタリング等により簡易に把握したいというニーズがあった。



図4 中日本高速道路株式会社 HP
伊勢湾岸道 昼夜連続・車線規制

6.3 安価で簡易な BWIM の基礎検討

加速度・傾斜計測に基づくBWIM を鋼道路橋に試験的に適用し、車両重量を推定した。車両が橋梁に入退出する時間、車速、走行車線などの情報を加速度データのみから効率的に推定するアルゴリズムについて、機械学習等を利用して構築するための基礎検討を行った。なお、計測自体は本研究課題実施前に行ったものであるが、そのデータ解析や改善をFSの中で行った。

6.3.1 加速度計測に基づく車両重量推定

複数車両走行時にも適用可能なカルマンフィルタによる積分誤差の生じないたわみ推定法⁹⁾を利用し、速度変化を考慮した、時間誤差、速度変化に対応した重量推定法を2径間連続鋼箱桁橋に適用した。次に、波形特徴を考慮できる畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network : CNN)を利用することで車両検知精度向上を試みた。最後に提案BWIM手法の一般交通への適用からその重量推定性能を明らかにする。

計測対象橋梁は片側一車線、二径間連続鋼箱桁橋である。図-5に各センサの配置を示している。教師データ作成、車両検知精度評価のために約4時間のビデオカメラ計測、重量推定精度比較のため約1時間の応力聴診器でのひずみ計測を行った。図-6に示す無線加速度計は計18箇所に設置し12日間の100Hz連続計測を行った。

支間中央部における計測たわみ $D_m(t)$ は、加速度橋軸方向成分から得られる傾斜角と鉛直加速度を観測量とするカルマンフィルタを利用することで推定する⁹⁾。解析たわみ $D_p(t)$ は計測モードパラメータに基づくモーダルモデルにより算出する。計測—解析たわみの差分で表される目的関数 $F(\mathbf{p}) = \int_{t_1}^{t_2} \sum_n |D_m^n(t) - D_p^n(t, \mathbf{p})|^2 dt$ (n : センサー位置, \mathbf{p} : 未知パラメータ)の最小化により重量推定を行うが、以下の二通りの方法で行った。一つは車両速度一定と仮定した場合であり($\mathbf{p}=\mathbf{m}$)、条件は線形行列方程式に帰着される。もう一つは車両速度に線形変化を仮定し速度補正する場合であり($\mathbf{p}=\mathbf{m}, \boldsymbol{\alpha}$; $\boldsymbol{\alpha}$ は速度変化パラメータ)、条件は非線形問題となるため遺伝的アルゴリズムを利用する。この手法を用いて 2t 程度の重量既知試験車両走行に対する重量推定を行った。図-7に示すたわみ波形では、特に速度補正をした場合は計測値とよく一致している。図-8の重量推定結果では複数車両走行時で特に速度補正による改善がみられ、その精度は11%以内であった。

図-9に示した位置における桁端部加速度応答 $R_n(t)(n=1, 2, 3, 4)$ (図-10)から車軸通過時間、通過位置(J_1-J_4)を自動判定する。ビデオカメラから抽出した 90 分間、590 台の車両通過時間真値から対応する時間の加速度応答波形を教師データとして CNN により学習を行った。表-1に1時間、403台の車両走行に対する車両検知精度を示す。F値に着目すれば、応答振幅の閾値処理による検知手法と比べ、波形全体を考慮したCNNでは30%程度改善した。

1時間の車両走行についてBWIMを実施した。図-11から5t以上の車両に着目すれば、ひずみ計測での重量推定結果と比べ速度補正をした場合には誤差は9.1%となることがわかった。図-12から従来手法であるケースCと比べ、提案手法であるケースBでは頻度分布の精度は121台分改善した。図-13はある平日における推定重量分布である。10t程度の路線バスによるピークがみられること、明らかに25tを超える過積載車両がなかったことが読み取れる。

今後は他形式橋梁における適用性評価，車重の軸重への分解，センサ数の削減による簡易化，キャリブレーションレス BWIM とキャリブレーション利用 BWIM の比較などの検討が必要である。

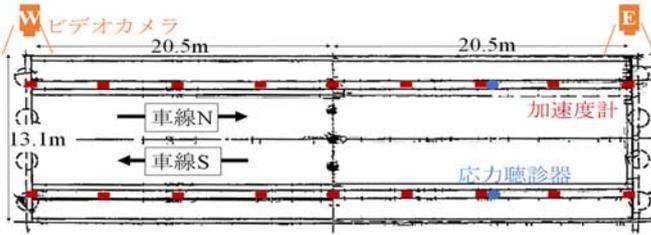


図-5 橋梁一般図，センサー位置



図-6 無線加速度計

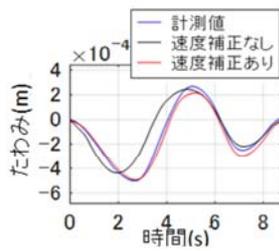


図-7 たわみ波形例

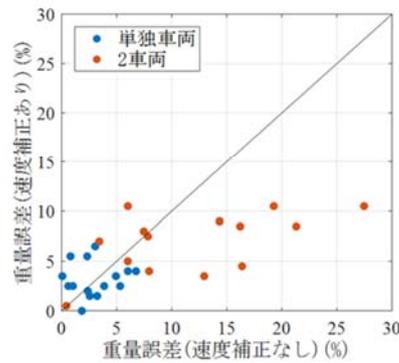


図-8 重量推定結果



図-9 車両検知センサー

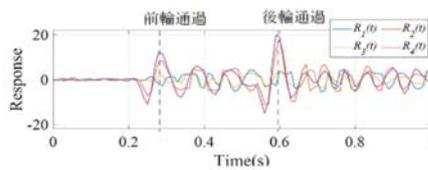


図-10 車両検知応答例

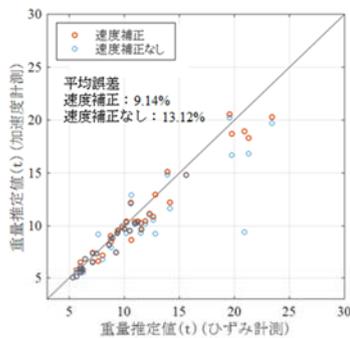


図-11 ひずみ計測との比較

	計測	車両検知	速度補正
A	ひずみ	真値	あり
B	加速度	CNN	あり
C	加速度	閾値	なし

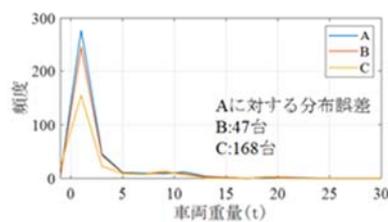


図-12 従来手法との比較

表-1 車両検知精度

	再現率 (Recall)	適合率 (Precision)	F 値
CNN	77.9	82.9	80.3
閾値	41.4	65.0	50.6

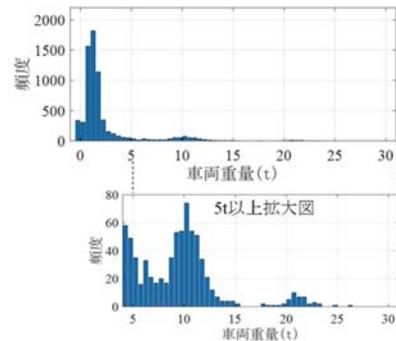


図-13 1日分の重量分布

6.3.2 機械学習に基づく車両重量・軸重の推定

開発技術の概要

本技術は、機械学習を利用して BWIM を簡易化しようとするものである。主に 2 通りの利用を想定しており、1) 最小構成案：軸数、軸距、速度、通過時刻などの諸元をカメラ映像を教師データにして、加速度・歪などから判別させる。軸重・車重は従来の BWIM 手法同様に推定する。BWIM 橋梁にカメラと、加速度計あるいは歪ゲージの設置が必要となるものである。2) 最大構成：上記最小構成に加えて軸重、車重も機械学習により推定するもので、近隣の WIM における軸重推定値を教師データとして、対象橋梁の BWIM を機械学習させるものである。機械学習を利用することで、BWIM に用いるセンサを少数に絞ったり、設置のしやすい位置の加速度計に絞ったりして、簡易・安価な BWIM を実現できる可能性がある。本課題の中では WIM に極めて近い位置の橋梁で検証をするが、将来は WIM を通過した車両の一定割合が通過すると考えられる、より遠方の橋梁に設置された BWIM を機械学習させることを想定している。

対象橋梁とその直近の WIM の監視カメラ映像を解析して、両地点の通過車両の諸元収集と追尾同定を実施した。収集した 4 万台の諸元 (車線・速度・軌跡・軸数・軸距・軸重) と、その際のセンサ波形を学習して、車両検知器を構築した。使用するセンサひずみ・加速度の両方に適用できる。センサはひとつで十分だが、複数設置による高精度化も可能。測定精度の向上訓練データを収集できれば、橋軸・橋軸直角方向の平面的な荷重配置や車両の加減速に対応できる。

システム概略図

対象橋梁にセンサを設置する。また、付近の路上を動画撮影するカメラを設置する。対象橋梁から少し離れていても対応できる。また、対象橋梁への経路・料金所に軸重計を設置する。軸重計には、被測車の正面外観を静止画撮影するカメラを併設する。

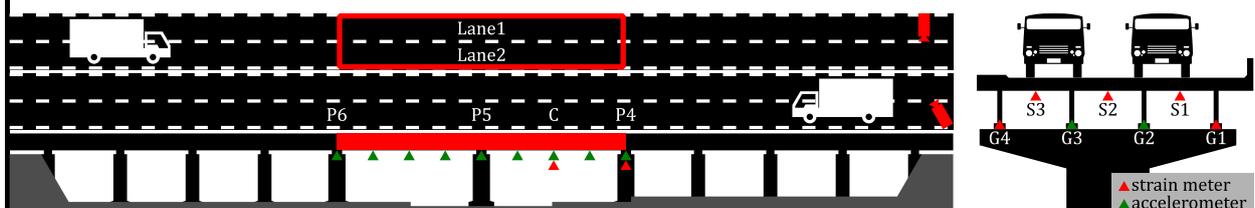


図 14: 対象橋梁・付近の設置機材

両地点の映像データは、車両検知器の調整時にのみ使用する。最終的に構築される車両検知器のダイアグラムを図 15 に示す。(AIS: Automobile Identification System, AWS: Automobile Weighing System) なお、図 15 は後述する最小構成案を示しており、最大構成案では、軸重推定は AIS が推定する車両諸元に含まれる。

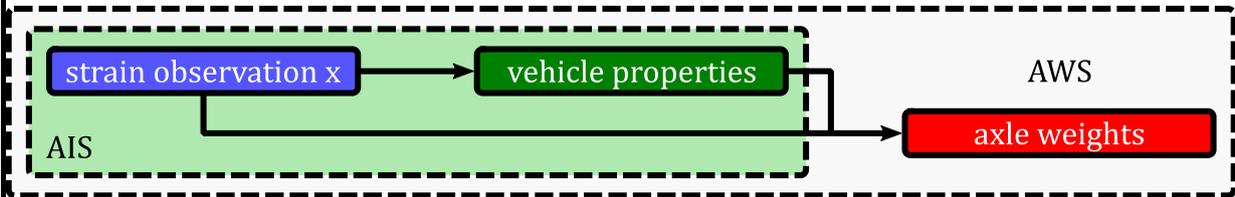


図 15: 車両検知器のダイアグラム

検知器は、センサ波形を入力として、その時点での通過車両の有無や諸元を推定し、その諸元を使って軸重推定を行う。

(a) 最小構成 従来型の軸重推定の前処理用途に徹する。車両検知器は、軸重推定を行わず、軸重以外の諸元推定を行う。

(b) 最大構成 車両検知器が軸重推定まで担当する。この構成では、軸重推定タスクを訓練するための正解データが必要。

想定する活用場面

最大構成案 (長期的監視)

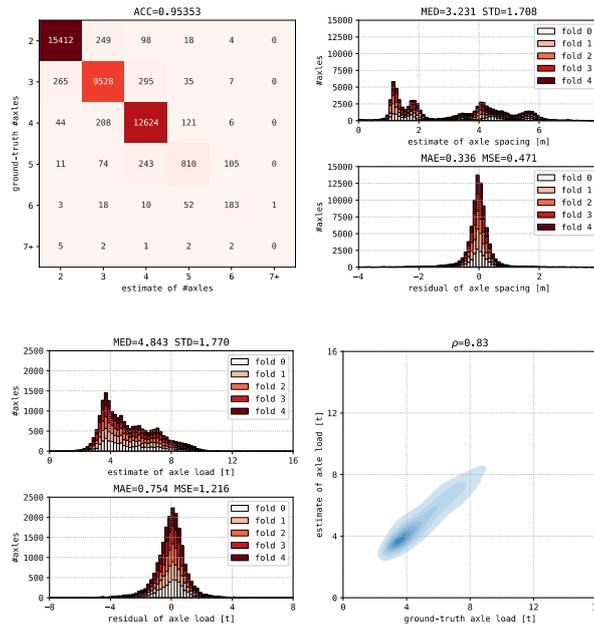
高速道路網の数カ所に軸重計が設置されており、そこを通過する車両の登録番号を収集する監視カメラが終日稼働している。軸重計がない経路を通過した過積載車を図 15 の検知器で検知する。橋梁にも監視カメラを設置する。通過車両の何割かは軸重計も通過するので、橋梁のセンサ波形と軸重がリンクされた状態にある。監視カメラは検知した過積載車の登録番号を収集できる程度に、対象橋梁から近い場所に設置する必要がある。監視カメラは軸重データの収集段階でも使う。必ずしも橋梁上を監視する必要はなく、上記要件を満たす位置で十分である。

最小構成案 (簡易型計測システム)

従来型の軸重推定システムの設置と維持の低コスト化を目指す。具体的には、少数センサでの車両検知と軸重推定を実現する。従来技術では、車両検知のために複数の床版センサが必要だが、図 15 は、1 個のセンサで諸元推定から軸重推定まで賄える。影響線は従来通り試験走行で収集する。他の測定点のデータとの突合が不要で、対象橋梁で完結できる。カメラの設置位置は最大構成案と同様だが、特に速度・軌跡・軸数・軸距を収集するため車体側面を映す必要がある。

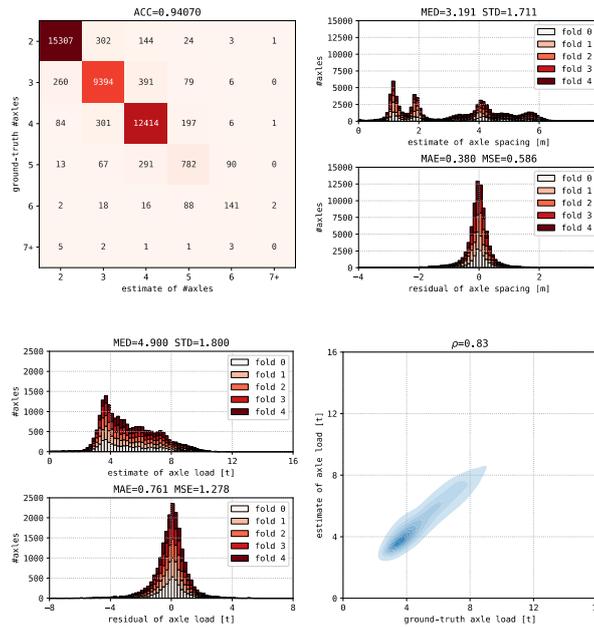
実験結果 (ひずみセンサ)

1 か月間の通過車両 (昼間、最遠軸距 3 m 以上、走行車線、4 万台強) に対し、軸数・軸距・軸重等の学習と推定を実施した。軸数や軸距の推定精度は、センサ 1 個使用時でも複数使用時に匹敵する精度が出る。



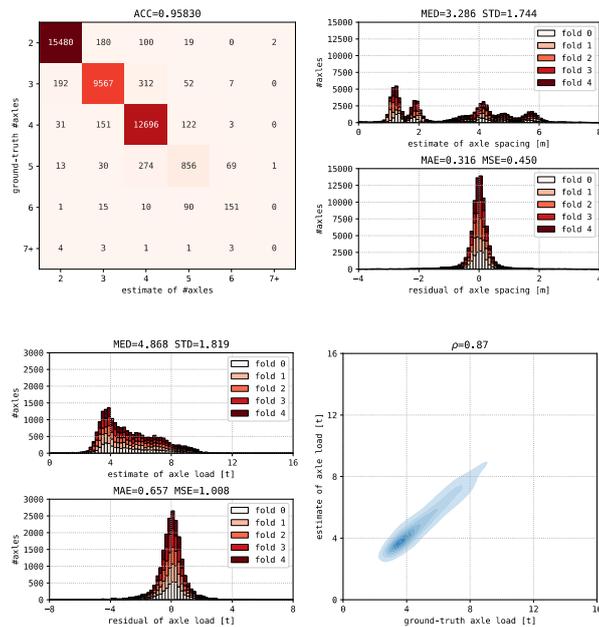
(a) 軸数 (b) 軸距 (c) 軸重 (d) 軸重相関

図 16: 径間中央部床版ひずみセンサ (C_S2_IN) のみを使用して推定した結果



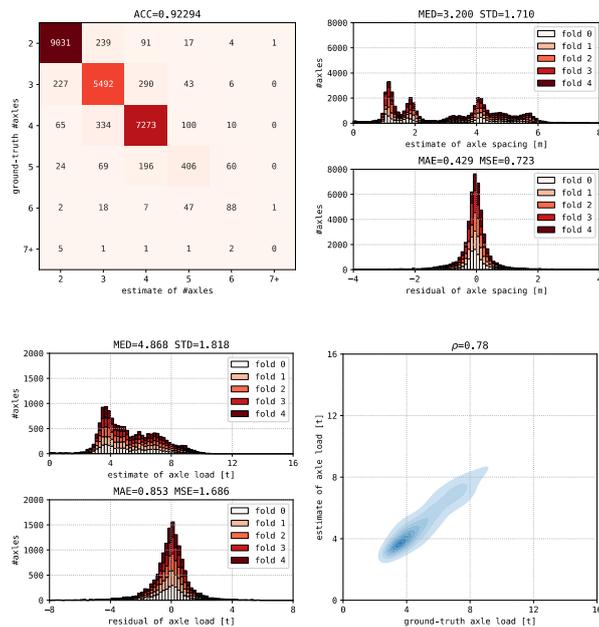
(a) 軸数 (b) 軸距 (c) 軸重 (d) 軸重相関

図 17: 支点垂直補剛材ひずみセンサ (P4_G2_R) のみを使用して推定した結果



(a) 軸数 (b) 軸距 (c) 軸重 (d) 軸重相関

図 18: 11 個のひずみセンサ全てを使用して推定した結果



(a) 軸数 (b) 軸距 (c) 軸重 (d) 軸重相関

図 19: 加速度計 Z 軸 18 箇所を使用して推定した結果

推定の原理は本データ解析により確認できた。今後はより桁端部付近など設置が容易な個所に簡易に設置できる加速度計データを少数用いた場合の検知・重量推定性能を明らかにしたり、他形式橋梁への適用性を明らかにする必要がある。

6.3.3 加速度計測に基づく ADTT の推定

橋梁を通過する車両数の推定は Weight-in-Motion で可能であるが、車両重量や軸重を推定する技術なので、載荷車でのキャリブレーションが必要であったり、推定アルゴリズムが複雑となったりする。ADTT の推定に特化すれば、アルゴリズムは簡易にできる可能性がある。また、カメラを用いる交通量カウントのシステムがあるが、画質や撮影角度の影響も大きく、また夜間の通過車両を認識するのも困難になる。そこで、橋梁振動データを活用して簡便なアルゴリズムで橋梁を通過する交通量 ADTT を推定するために、機械学習を利用した。車両通過時のする際の橋梁振動は橋梁毎に異なることを用いて、振動波形特徴量を入力として交通量を出力とするニューラルネットワーク (NN : Neural Network) 構築による交通量推定を行った。

鋼橋を対象とした車線別 ADTT の推定と疲労照査への検討

橋梁の諸元とデータ取得

対象とした鋼橋は、橋長 172.9m、幅員 10.25m の 1 方向 2 車線を有する下路式単純鋼床版鋼 3 箱桁橋である。桁下の様子を図 20 に示す。無線加速度センサを支間中央の箱主桁下フランジ上に設置し 14 日間常時データ取得した。大型車交通量を車線別に推定するため、図 21 のように左右車線を挟む 2 つの主桁にそれぞれセンサを設置した。NN の学習データとなる交通量データは、10 分間あたり大型車交通量を左右車線別に計 38 時間、現地でカウントした。ここで、大型車は軽トラックを除く荷台を有する車両、バス、救急車等の特殊車両と定義した。



図 20 対象橋梁の桁下の外観



図 21 センサの設置個所

橋梁振動波形からの包絡線特徴量の抽出

車両が通過する橋梁の振動波形は、常時微動を含むランダム振動に車両通過による減衰振動が重ね合わされていると考える。そこで、加速度センサで得られる振動データを交通量データに対応する時刻で 10 分毎に分割し、加速度振動波形の車両通過時の振幅や減衰挙動を捉える特徴量を抽出した。例えば、波形振幅の RMS や最大値、また正規分布を示すランダム微動からの逸脱サンプルが車両通過時のサンプルであると考え、逸脱サンプルの数と中央値、そして波形包絡線のピーク値などを特徴量とした。図 22 と図 23 に、車両通過時の振動波形と特徴量抽出に用いた波形包絡線の例を示す。

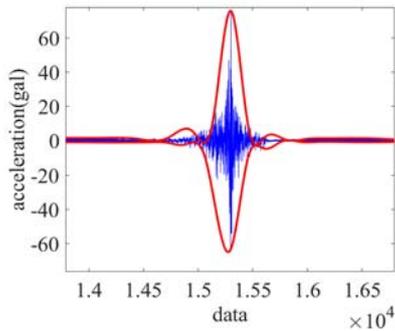


図 22 大型車の単独通過時の加速度波形

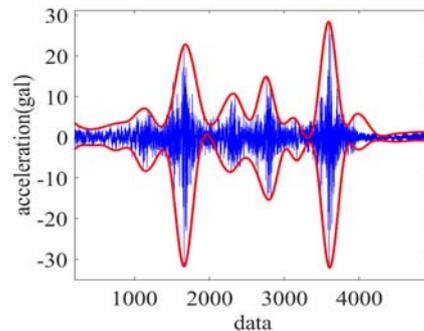


図 23 車両連行時の加速度波形

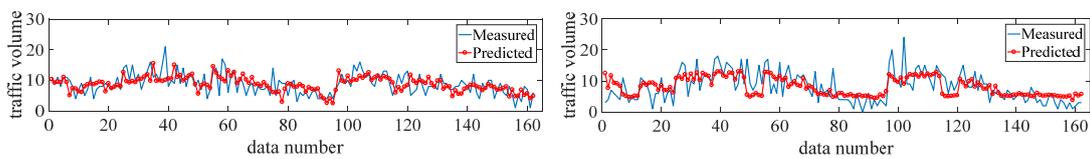


図 24 大型車交通量実測値と推定値の比較(左：左車線，右：右車線)

ニューラルネットワークによる ADTT 推定

ニューラルネットワークによる ADTT 推定モデルの構築には MATLAB Neural Network toolbox を用い、特徴量の他に NN の隠れ層の層数と学習に用いるアルゴリズムを Levenberg Marquardt 法 (LM 法)、Bayesian 正則化法の 2 種類から選択した。最適な推定モデルは推定値と実測値の平均二乗平方根誤差(RMSE : Root Mean Square Error)が最小になるものとし、計算を繰り返すことで特徴量等の最適な組み合わせを導いた。学習に用いたデータを除く 26 時間分 (およそ 1 日あたり) の車線別大型車交通量の実測値と推定値の誤差が左車線は 4.08%、右車線は 0.15% となった。図 24 に左右各車線における 10 分間大型車交通量の実測値と推定値を示す。構築した NN に用いた特徴量のうち、各車線でその直下の主桁に設置したセンサで得た振動波形の特徴量が含まれたことから、多主桁の場合、各桁で振動計測を行うことで車線分離ができる可能性が示された。

鋼橋疲労照査への適用の検討

橋梁の性能照査では ADTT が入力交通荷重に関するパラメータとして用いられる。現行の鋼橋疲労照査³⁾では式(1)、式(2)のように累積損傷度の算出に車線別 ADTT を用いる²⁾。

$$n_{ti} = \gamma_n \times 365 \times Y \times (ADTT)_{SL}$$

$$D = \sum_i \frac{n_{ti}}{N_{i,j}} \leq 1.0$$

ここで n_{ti} は载荷回数、 γ_n は頻度補正係数、 Y は設計供用年数、 $N_{i,j}$ は疲労寿命、 D は累積損傷度、 $(ADTT)_{SL}$ は車線あたりの ADTT である。累積損傷度は疲労の蓄積度合いを表し、 $D=1$ に達した時に疲労破壊に至る。対象橋梁の累積損傷度を概算すると、ADTT の誤差が 100 台の場合、損傷度の誤差はわずか 0.01 である。誤差の大きい左車線での大型車交通量を車線別 ADTT に換算し

た場合、実測値約 1310 台に対して誤差は約 54 台であったため、本研究での交通量推定は鋼橋疲労照査に十分適用可能と考えられる。

今後は他形式橋梁への適用性検討や設置が簡易な場所における計測値への適用性検討が考えられる。

6.4 接地力推定の基礎検討（蘇）

まず、データ同化を用いて、車両振動応答から接触力を推定する。次に、路面画像の自動認識により伸縮装置位置を特定する。最後に、両者の結果をあわせて、伸縮装置部の接地力評価を行った。

推定手法の数値検討として、車両をバウンスとピッチング運動を表現可能なハーフカーでモデル化した。運動方程式を基にした状態方程式をカルマンフィルタにより時系列的に解くことで、接触力の推定を行う。状態変数は車体の変位 x 、ピッチング角度 θ 、前後輪の変位 x_f , x_r 、前後輪のプロファイル y_f , y_r およびそれらの時間微分である。初めに、車両モデルは実測路面上を一定速度で走行した場合の車両応答及び接触力をNewmark Beta法により算出し、参考値とする。続いて、計算で得られた車両応答を観測値としてカルマンフィルタを適用し、接触力を推定する。

ノイズが無い時は、車両の全固有振動数15Hzまでの推定精度はタイヤの応答情報の有無に関わらず良好であるが、ノイズを付与した場合には、車体応答だけの情報による推定には誤差が見られる結果となった。一方、タイヤを含め全車両応答を利用した場合には、ノイズの大きさに関わらず推定対象である~15Hzを優に超えて精度良く接触力を推定でき、一般の車両のばね下の固有振動数（8~12 Hz）も精度よく適用できる。

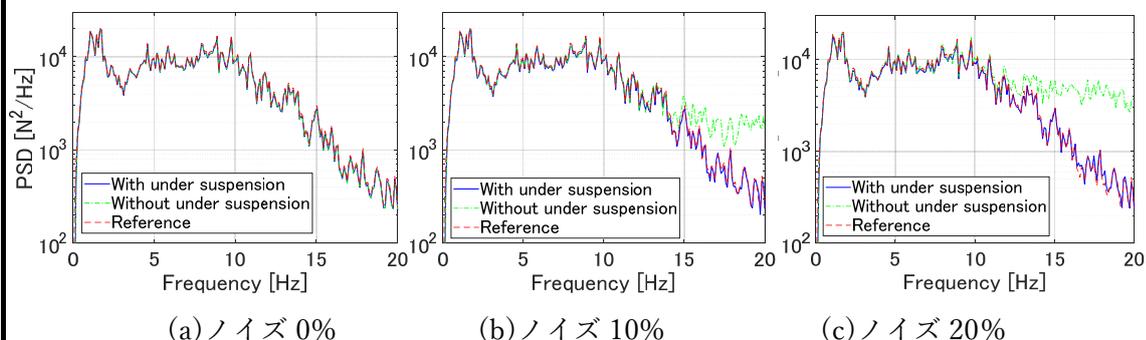
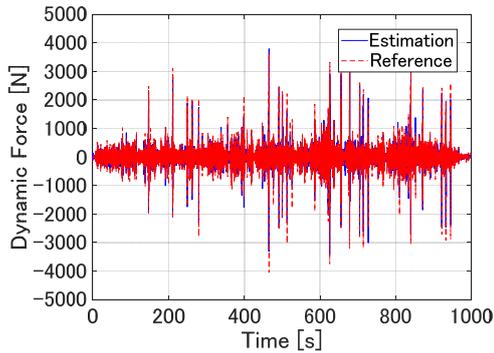


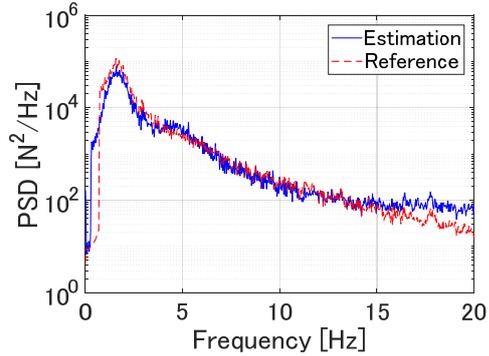
図-25 シミュレーションによる接触力の推定値と参考値の比較

次に、構内の実車走行実験を実施し、接触力の実測値を用いた手法の検証を行う。図-26に示すように、タイヤ応答を利用してデータ同化手法から推定した接触力は実測値とよく一致し、推定の精度が検証されることが明らかとなった。

伸縮装置部を特定するために、車内に搭載したドライブレコーダーの動画から、画像認識による伸縮装置を抽出し、通過した時刻の推定を行った(図-27)。画像認識の機械学習はSingle Shot MultiBox Detector (SSD)モデルを採用し、教師データは Google Street Viewから用意した。教師データを収集する際に、地方による偏りが生じないように、全国各所から伸縮装置の映る路面の画像を取得した。教師データに対する精度と、首都高速道路を走行した際に得られたデータに対する精度を算出した。また、計測に使用した車両は日産マーチである。結果を表-2に掲載する。約7割の精度で伸縮装置部を識別できるが、光の反射より誤識別や陰に同化した伸縮装置を識別漏れは誤差の原因と認識した。今後精度の向上を目指すには、実計測の教師データを



(a) 時間領域



(b) 周波数領域

図-26 シミュレーションによる接触力の推定



図-27 伸縮装置を検知した様子

表-2 教師データと実測データに対するジョイント部の識別精度

データの種類	Precision	Recall	Accuracy
教師データ同種	0.87	0.9	0.88
実計測データ	0.62	0.70	0.83

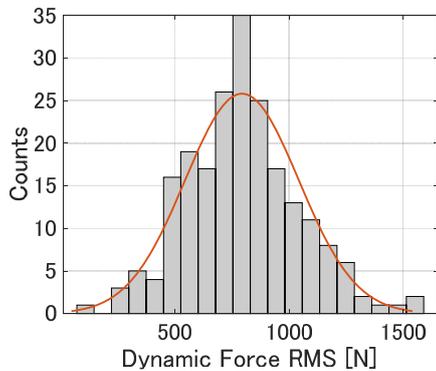


図-28 動的接触力 1 秒 RMS の分布

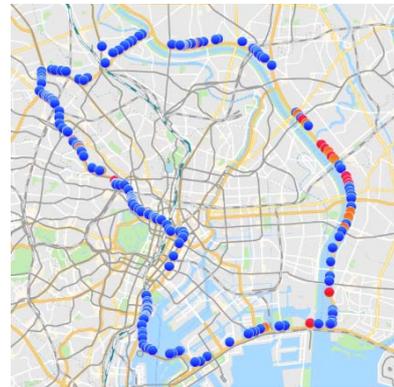


図-29 作用する接触力の相対比較

増やすべきであると言える。

最後に、これまでの手法を組み合わせ、伸縮装置部に作用する接触力の評価及び劣化リスクの相対比較を行った。首都高速道路で計測した車両応答と路面動画から路面に作用する接触力と伸縮装置通過時刻を推定し、時間同期を行うことで、伸縮装置に作用する力の抽出を行った。伸縮装置周辺部に作用する動的接触力を考えるために1秒の幅を持たせそのRMSを分布にしたものが図-28である。これに正規分布を仮定し、上位5%を赤、10%をオレンジ、その他を青で色分けし走行ルート上にプロットした図を図-29に示す。これにより、相対的に大きな接触力が作用する伸縮装置

を把握することが出来た。

衝撃荷重の大きな伸縮装置部を、マーチによる走行実験により抽出することができたが、重車両においては分布が異なると考えられるため、今後は、本仕組みを重車両に適用して同様に動的荷重の大きな箇所を抽出することが必要である。さらに、荷重が作用した場合に伸縮装置内でどのような応力分布となっているのか、実験的な解明が期待される。

- 1) Moses, F. (1979). "Weigh-in-motion system using instrumented bridges." J. Transp. Eng., 105(3), 233-249.
- 2) 土木学会：鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリング，2019.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.
- 4) Missouri DOT 2016, Evaluation of Finger Plate and Flat Plate Connection Design, Final Report Prepared for Missouri Department of Transportation, January 2016 Project TR201506 Report cmr16-008 Project.
- 5) Maljaars, J., Waarts, P.H., Leenderts, J.S., Hoogvelt, R.B.J.: Dynamic increment factor in modular expansion joints of bridges under heavy traffic loading, 7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights & Dimensions, 2002.
 - 6) 酒井 修平, 小野 秀一, 舘石 和雄：道路橋の鋼製フィンガージョイントの損傷メカニズム, 鋼構造論文集, 21(84), 2014.
 - 7) 八木貴之, 山田健太郎, 小塩達也：道路橋伸縮装置の疲労耐久性評価法の検討, 土木学会論文集A/63 巻 (2007) 3 号.
 - 8) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
 - 9) T. Nagayama, C. Zhang : A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 209-215, 2017

⑦本格研究の見通し

FS 研究の結果を踏まえた実用化に向けた本研究の研究成果の見通しは以下のとおりである

①BWIM は高精度化を図るよりも、取り締まりの事前検討や疲労環境アセスメントの観点から、適用性の向上、簡易化を図ることの重要性が明らかになった。無線加速度計のみを利用して設置が容易な簡易 BWIM、機械学習により少数のセンサによる実現可能性が高い BWIM、ADTT のみを簡易に推定する BWIM について、これまで特定の形式、条件における橋梁で適用されたのみであった。今後連続桁橋、斜橋、ランプ橋といった諸条件における適用可能性を実験的に明らかにしていく。利用するセンサ数を減らす、センサ位置を支承周辺のみにする、といった検討を通じて更なる簡易化が図れないか検討する。さらに、キャリブレーションを省略した BWIM の適用性についても明らかにする。

②衝撃荷重については伸縮装置における衝撃荷重やそれによる応力について未解明な点が明らかになると共に、損傷を早期に検知するニーズがあることも明らかになった。そこで、代表的なフィンガージョイントや鋼製伸縮装置を主な対象として、実測と詳細な有限要素解析により実荷重下および荷重車通行下において伸縮装置に発生する応力を明らかにする。さらに、損傷が発生して取替を控えている伸縮装置も対象として実測を行い、損傷した伸縮装置を早期に確実に検知するための手法の構築を図る。

成果の活用方法および今後の展開等

BWIM については主に重交通路線を有する高速道路事業者において疲労環境アセスメントをするニーズが高いため、これらの事業者の路線において実証実験を行い、簡易性や適用が期待される橋梁の条件等についてフィードバックを得ながら研究開発を進める。

さらに、開発途上国においても、近年我が国等から援助を受けて建設された重要橋梁が重交通下で利用され疲労損傷が生じているケースも見受けられる。JICA の技術プロジェクトを通じた技術支援、展開を想定して国際開発コンサル等と意見交換をしてニーズを把握しながら進める。

衝撃荷重評価についても、重交通路線を有する高速道路事業者の路線において実証実験を行い、個別の伸縮装置について疲労環境アセスメントを進める。支承前後の不陸の調整方法について知見を共有し、フィードバックを受けながら研究開発を進める。

⑧特記事項

本 F S 研究から得られた知見、

前述の通り、取り締まりについては極めて高精度な WIM が求められる一方で、精度に対する要求の低い用途が明らかになった。簡易で安価な仕組みで、また、適用対象に関する条件（橋梁形式など）が厳しくなく適用性の高い BWIM が求められる。

学内外等へのインパクト：

機械学習を利用した BWIM は既設の WIM を利用して、周辺の橋梁に設置したセンサをキャリブレーションすることで、BWIM として機能させようとするもので、これを順次適用

していくことで、道路ネットワーク全体に BWIM 網を構築できるようにするものである。個別に BWIM を増設していくのとは異なり、安価なコストで加速度的に道路ネットワーク全体の疲労環境が把握できる可能性をもっており、実現した際のインパクトは極めて大きい。一方で、WIM が近隣には存在しない橋梁等で臨機応変にプリスクリーニングをする目的では、無線加速度計を利用した簡易 BWIM や簡易 ADTT 推定を適用できる。両者を補完的に用いることで、広域の活荷重実態把握が現実的となる。

進捗の達成度についての自己評価

FS を通じて、文献調査とヒアリングを通じた活用目的を整理できた。簡易 BWIM を試験的に適用した計測結果を解析し、原理的には実現できることを確認できた。今後は、これを異なる形式や条件の橋梁に適用し、適用性を評価することで目的を達成できると考える。伸縮装置の衝撃荷重評価については FS を通じて未解明な点を明らかにするとともに、小型車両による計測データから高速道路伸縮装置の衝撃荷重の大きさを把握することができた。