

空間特異モード角に基づく道路インフラ点検技術の
適用性に関する実験的検証

2019年 3月

高橋 悠太

空間特異モード角に基づく道路インフラ点検技術の
適用性に関する実験的検証

高橋 悠太

システム情報工学研究科
筑波大学

2019年 3月

要旨

現在、我が国は老朽化と高齢化という二つの社会課題に直面している。インフラ構造物の老朽化は、損傷の発生頻度を高めると予測され、インフラ点検・補修分野における需要の高まりが予測される。一方で、技術者が高齢化する中で、人材の確保は益々困難となる。たとえば、既に、地方自治体においては、老朽化橋梁の補修・更新が実施できず、供用停止や廃棄といった形で社会問題化している。

その解決に、限られた人員や資金を合理的に配分するための道路橋のスクリーニング技術が必要になると考えられる。手法には、移動センシング（センサを搭載した車両によるデータ計測）技術が期待されるが、社会実装は難しい。課題は主に二つ挙げられ、一つは計測デバイスの要求精度が高いこと、二つ目は現場で想定している損傷が比較的軽微であるため、評価が難しいことである。そこで本研究では、移動センシングを社会実装する上での技術的課題として、これらの解決方法を提案し、数値計算と実験によって検証する。

まず、計測デバイスが高価な原因は、移動センシングの要求性能が高いことにある。移動センシングでは、橋梁損傷が実測データに及ぼす影響は非常に小さい。また、損傷は局所的に発生するので、影響は高周波成分に卓越する。したがって、分解能とサンプリング・レートの両方で高い性能が求められる。このようなセンサは一般に高価であるので、市販の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 部品を組み合わせることで、低コスト化を試みた。

次に、道路橋に生じる比較的軽微な損傷の検知指標として、SSMA (Spatial Singular Mode Angle : 空間特異モード角度) を採用した。SSMA は損傷感度が高く、ノイズに強い指標であり、MEMS センサとの相性も良い。ただし、速度依存性があるため、SSMA と速度の MD (Mahalanobis Distance : マハラノビス距離) を算出する方法を新たに提案した。軽度損傷としてボルトの緩みや副構造の脱落を想定している。このような損傷を検知できるか確かめるため、本研究では数値実験・類似環境実験・ラボ実験を実施した。まず、数値実験を実施し、VBI (Vehicle-Bridge Interaction : 車両-橋梁相互作用) モデルに基づいて、車両振動を再現した。損傷は要素の剛性低下で表現し、SSMA と走行速度から MD を算出する。健全時を基準とできた場合、剛性低下率 30%以上のデータについてであれば、損傷検知可能とわかった。数値的検証により、提案手法の妥当性が明らかになった。ただし、数値実験では、ディテール部に生じる損傷の再現が難しい。そこで、鋼製模型橋梁を建設し、実車走行実験を実施した。損傷は、横桁と主桁の連結ボルトを緩めることで模擬した。実験結果に提案手法を適用した結果、ボルト脱落の検知に成功した。上記結果に対して、統計データを増やした場合の妥当性・再現性を明らかにするため、小型の模型車両と紙製模型橋梁を用いたラボ実験結果に適用した。損傷として横構および横桁を除去した。軽度損傷とした横構除去の検知に成功し、SSMA と速度の MD は軽度損傷検知への適用性が確認された。

目次

1	緒言.....	pp.1-15
1.1	社会的背景.....	1
1.1.1	道路橋の老朽化と社会の高齢化.....	1
1.1.2	道路橋維持管理の現状.....	3
1.1.3	道路橋スクリーニングによる維持管理の合理化.....	5
1.1.4	高齢化による産業構造の変化.....	6
1.2	工学的提案.....	6
1.2.1	移動センシングを用いた社会問題の解決.....	6
1.2.2	従来の橋梁モニタリング技術との違い.....	8
1.2.3	空間分析の有効性.....	9
1.3	技術的課題.....	10
1.3.1	現行技術の社会実装上の問題点.....	10
1.3.2	要求性能.....	11
1.4	本研究の目的.....	13
1.4.1	研究目的.....	13
1.4.2	論文構成と方法論.....	14
2	基礎数理.....	pp.16-58
2.1	数値実験.....	16
2.1.1	車両-橋梁相互作用システムの定式化.....	16
(1)	車両システム.....	16
(2)	橋梁システム.....	18
(3)	相互作用.....	23
2.1.2	数値シミュレーションのアルゴリズム.....	23
(1)	Newmark- β 法.....	23
(2)	VBIシステムの一括計算スキーム.....	24
(3)	VBIシステムの分離計算スキーム.....	25
2.1.3	数値シミュレーションの結果と考察.....	26
(1)	重量車の数値シミュレーション.....	26
(2)	軽自動車の数値シミュレーション.....	28
2.2	分析手法.....	29
2.2.1	一般的な方法.....	29
2.2.2	SSMAの適用.....	31
(1)	SSMAの導出過程.....	31

(2)	適用事例：紙製橋梁模型での繰り返し走行試験.....	34
(3)	適用事例：連続的な SSMA の算出.....	41
2.2.3	SSMA の限界.....	49
2.2.4	提案手法.....	50
(1)	MD の適用事例と SSMA への適用意義.....	50
(2)	数値シミュレーション結果への適用.....	52
(3)	妥当性検証.....	55
3	センシングデバイスの開発.....	pp.59-69
3.1	数値実験から考えられる必要性能.....	59
3.2	要素技術についての検討.....	59
3.3	システム構成.....	60
3.3.1	MEMS を用いた開発デバイス.....	60
3.3.2	既存の計測デバイスとの比較.....	60
3.4	性能試験.....	61
3.4.1	実車走行実験の結果.....	61
3.4.2	通信ケーブルの引張試験.....	68
4	実験的検証.....	pp.70-89
4.1	鋼製模型橋梁における実車走行実験.....	70
4.1.1	実施背景.....	70
4.1.2	実施概要.....	70
4.1.3	得られた実験データの概要.....	72
4.1.4	提案手法の適用結果と考察.....	74
(1)	提案手法の適用.....	75
(2)	データ群の偏りについての検討.....	77
(3)	橋梁状態が異なるデータ群を含む場合の検討.....	77
(4)	MD の統計分析と損傷検知への適用性.....	78
4.2	ラボ実験による統計的妥当性検証.....	80
4.2.1	実施背景.....	80
4.2.2	実施概要.....	80
4.2.3	得られた実験データの概要.....	82
(1)	SSMA の諸統計量.....	82
(2)	速度による影響.....	85
4.2.4	提案手法の適用結果と考察.....	87
5	結言.....	pp.90-94
5.1	本研究のまとめ.....	90
5.2	成果.....	91

5.3	今後の課題.....	91
5.3.1	物流車両の適用.....	91
5.3.2	分析手法の高度化.....	93
5.3.3	数値実験の高度化.....	94
6	参考文献・謝辞.....	pp.95-100
	参考文献.....	95
	謝辞.....	99

1. 諸言

まず，道路橋の維持管理における問題（老朽化橋の増加と人手不足）について簡潔に説明し，解決策としてスクリーニングを提案する．スクリーニングを実現する工学的な方法として移動センシングを紹介し，既往の研究成果と技術的課題を述べて，本研究目的を示す．

1.1. 社会的背景

1.1.1. 道路橋の老朽化と社会の高齢化

現在，わが国は，インフラ構造物の老朽化と高齢化による人手不足という二つの社会課題に直面している．高度経済成長期以降，集中的に建設されたインフラ構造物が，供用後約 50 年を経過し，一斉に老朽化が始まっている．これらのインフラ構造物を適切に維持管理するには，今後，より多くの人材が点検・補修分野で必要になると考えられる．しかし，高齢化社会の進行に伴う人手不足によって，人材確保は困難になりつつある．よって，限られた人員を効率良く，かつ，効果的に配置する必要がある．ここでは，老朽化が進んでいるインフラ構造物の具体例として，道路橋を考える．

わが国の道路橋整備が本格的に始まったのは 1960 年代の高度経済成長期[1][2]であるとされる．当時，道路橋の構造形式で最も一般的だったのは，鋼製多主桁橋である．これは主構造を複数の鋼製 I 桁として，分配横桁や横構によって互いに連結した構造（図 1.1）である．まだ鉄は高価な輸入資源であったことから，補剛などを組み合わせて，可能な限り薄肉化し，建設コストを低減することが図られた．そのため，この時代の鋼製橋梁はどれも緻密なディテール部を持っており，複雑な力学的挙動を示す．



図 1.1 鋼製多主桁橋の外観図の例（洛南連絡道路，IHI インフラシステム HP より）

ディテール部は、応力集中による疲労破壊が進展しやすく注意を要する箇所である。また、車両の高性能化によって、積載能力が上昇し、建設当時の想定を上回る荷重が作用している場合も考えられる。他にも、交通需要予測が難しいために、橋梁建設後に交通量が予測を大きく上回るといったことはよくある事例である。現在、老朽化が進んでいる鋼製橋梁は、当時の想定とは異なる荷重によって、疲労が進行している可能性がある。一方で、計算機の性能が十分でなかったことから、安全係数を大きく取った過剰安全設計の道路橋も少なくないと思われる。つまり、鋼製橋梁は想定より強い場合も弱い場合もある。

一方、新材料としてコンクリートの普及が進んだのもこの時代である。1950年代以降、AE (Air Entraining : 空気連行) 剤が開発され、コンクリート打設時のワーカビリティが改善された。これにより、水セメント比 w/c の小さなコンクリート構造物が利用しやすくなり、コンクリート橋[3]も多く建造されるようになった。中小スパンの道路橋にコンクリート構造を採用する場合、引張抵抗力を鉄筋やPC (Pre-stressed Concrete : プレストレスト・コンクリート) 鋼材に担当させることが一般的である。コンクリートのアルカリ成分が鋼材腐食を防止することで、メンテナンス・フリーの構造になると考えられてきた。しかし、実際には、酸性雨による中性化や海岸部などの大気中に含まれる塩化物イオンによって腐食・劣化が生じるケースや、当時は知られていなかったASR (Alkali Silica Reaction : アルカリ・シリカ反応) 現象によって鉄筋破断が生じるケースなどがある。

そもそも道路橋は二つとして同じものがなく、その上に最新の技術を取り入れて建設するため、多種多様である。また、さまざまな設計条件、環境変化、劣化現象によって異なるプロセスで老朽化が進行している。したがって、道路橋の点検・補修技術者には、これらに関する多くの知識や経験、技量が要求される。

技術人材の育成には時間がかかるため、道路橋の維持管理が間に合わなくなる可能性が懸念される。1930年代のニューディール政策によって道路橋を集中的に整備した米国では、1980年代以降、一斉老朽化に直面した。すなわち、多くの道路橋で損傷事故が発生している。これは、いわゆる『荒廃するアメリカ』問題[4]と呼ばれ、現在も解決していない。代表的な例として、ミネソタ州メアポリスでの落橋事故が挙げられる[5]。既に我が国においても、木曾川大橋で部材破断が確認されており、この後に緊急の検査が行われたことで、道路橋の維持管理の実態が明らかになった[6][7]。2014年に道路橋は5年に1度の熟練技術者による目視点検が義務付けられた[8]が、高齢化による技術人材の減少に対し、対象となる道路橋の数は増え続けることが予想されるため、そのままでは実施困難になると考えられる。この対策として、道路橋にセンサ類を取り付け、その実測データを分析して、安全性を評価する構造ヘルスマニタリング技術の適用が精力的に検討されている。すなわち、熟練技術者の技能に依存せず、客観的な指標を用いて誰が評価しても同じ結果が得られるようにしようとする試みである。ただし、現状では、熟練技術者による近接目視点検の方が精度、信頼性に優れていると言われる。現在の橋梁モニタリング技術では、たとえば振動データなど、限られた情報しか利用できておらず、損傷の検知精度が低いためである。

1.1.2. 道路橋維持管理の現状

国交省のまとめた所によると、国内には 70 万基以上の中小スパン橋が存在[6],[7]する。建設年代が不明の道路橋 33%を除いた約 47 万基の内、高度経済成長期（1960 年代）に建設された橋長 2m 以上の道路橋は約 71000 基で全体の約 18%である（2013 年）。建設年代が不明の道路橋が仮に全て 1973 年以前に建造されていると仮定すると、2023 年に国内道路橋の約 57%[6]が供用開始から 50 年以上が経過した高齢橋になる。

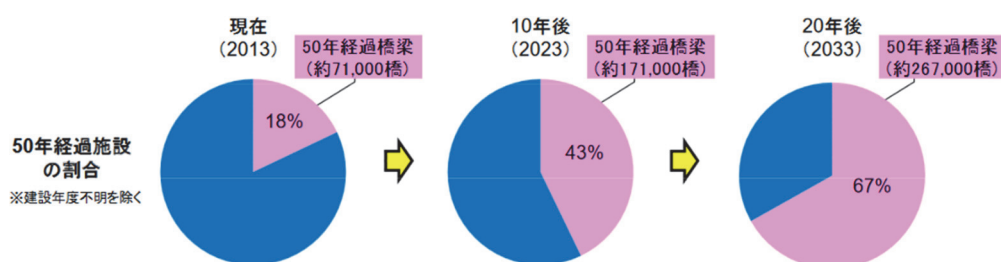


図 1.2 高齢橋の割合の経時変化（[8]より引用）

経年劣化による影響は橋梁の構造形式や環境条件によって様々であるが、一般的には、供用年数が長くなるほど、劣化・損傷の発生確率は高くなるものと考えられる。ここで注意する点に、高齢橋が必ずしも老朽化しているわけではない点である。高齢橋であっても、適切な維持管理によって、必要な性能・機能を保持しているものも多い[8]。また、多くの損傷が、軽度な段階から徐々に進展していくため、発生直後に補修・修繕を施せば、全体の維持管理コストは抑制できる。したがって、老朽化橋梁であっても、適切な対策によって長寿命化できる可能性がある。

しかし、道路橋の主な管理者は地方自治体であり、単年度会計という財政的制約の中から費用を支弁しなければならない。すなわち、たまたま点検・補修のための予算が確保できない年度が生じると、道路橋は供用停止とされ、その間に損傷が進展してしまう。また、財源が見いだせずに廃棄されるケースも懸念される。実際に、既に国内には既に供用停止中の道路橋（図 1.3, 図 1.4 参照）が多く存在しており、廃棄されるケースも存在している。力学的観点からは長寿命化が可能であっても、単年度会計によって生じた一時的予算不足によって対策が遅れ、損傷の進展から廃棄に至る可能性が否定できない。



図 1.3 供用停止中の道路橋の例 ([7]より引用)

■地方公共団体管理橋梁の通行規制等の推移(2m以上)

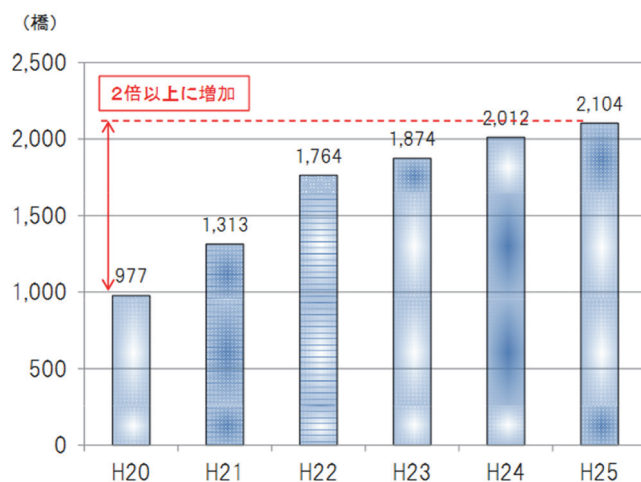


図 1.4 供用停止による通行規制中の道路橋の基数 ([7]より引用)

国・都道府県や高速道路ではなく、道路橋数全体の 75%を占める市町村道が予算不足により、影響を受けやすい。国道や県道が通る経路は、主要な都市を結んでいることが多く、山間部を連続的につなげるような運用はなされていない。また、予算も比較的潤沢であると考えられる。一方、市町村道は、地方での主要な移動手段が自動車であり、道路橋により山間部や険しい土地で断絶された地域が接続されることから、道路橋は文字通り「命の道」になる。その重要性から、相対的に道路橋が増えやすくなることが予想される。加えて、地方の人口減少から、これらの点検に人的資源を投入することが益々困難になっていくと考えられる。また、予算規模も小さいため、道路橋の老朽化が急速に進展すると、供用停止する橋梁が増加し、ほとんどの道路橋が通行規制となって、地域が断絶される可能性を否定できない。

他に予算不足が生じる原因の一つとして、道路橋の構造が挙げられる。高齢化橋梁の建設

時には、輸入資源である高価な鉄を減らして、安価な人件費で賄う手法が想定されていたことが考えられる。このため、橋梁はディテールが細かくても、維持管理にかかる費用が安い
ため、十分機能すると予測できた。しかし、現在の、人件費が材料費を大きく上回る社会に
おいては、細かなディテールが管理の煩雑さを増大させ、コストの増加を招く。また、橋梁
アセットマネジメントにおける橋梁の健全度評価は、構造部材に対して行う検査結果を点
数化して評価し、各部材あるいは橋梁全体の健全評価を行う[9]。そのため、部材点数の増加
がそのまま点検の煩雑さを増大させ、多くの人的資源を必要にしていると考えられる。

そのため、道路橋全てを、更新や補修・修繕といった意思決定を事前に行い、それ以外を
大まかに区別することで、限られた人的資源と予算を集中することが効果的であると考
えられる。このような事前の簡易評価をスクリーニングという。

1.1.3. 道路橋スクリーニングによる維持管理の合理化

限られた人員・予算を効果的に配分するために、多数の高齢橋の中から老朽化橋梁を事前
に抽出する道路橋スクリーニング技術が有効であると期待される。スクリーニング技術は、
詳細点検を実施する前に簡易な検査を行い、大まかに判別する点検技術である。スクリー
ニング結果に基づき、損傷確率が高いと考えられる橋梁から優先的に点検・修繕を施すこと
が可能になる。人手不足や厳しい財政制約下であっても、資源の集中・効率化が可能になる。

具体的な道路橋スクリーニングの方法としては、車両にセンサ類を搭載し、実測した車両
振動データの分析によって通過橋梁の損傷を評価する移動センシング技術の適用が考
えられる。車両が通過するだけでよいため、足場の設置や長時間の通行止めを避けられること
から、詳細点検よりも低いコストで実施可能である。(図 1.5)

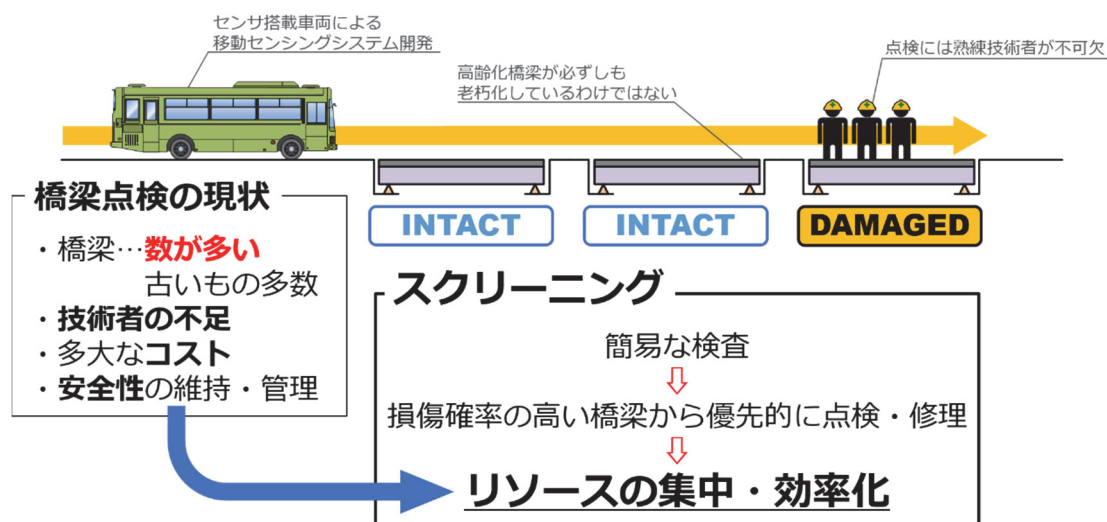


図 1.5 スクリーニングの概念図

1.1.4. 高齢化による産業構造の変化

一方、高齢化による人手不足は、インフラ点検以外の分野にも共通した課題である。たとえば、物流分野では EC (Electronic Commerce : 電子商取引) の普及によって取扱貨物量が急増[10]しているにもかかわらず、供給力は拡大していない[11]。人口減少が続く中、全分野で以前と同規模の人材を確保することは不可能であり、今後、物流分野のサービス維持には多くの困難が予測される。人手不足が深刻化する社会情勢にあっては、複数産業が、共創的に新しい社会価値を創造する仕組みを考え出さなければならない。移動センシング技術はその具体例となりうる。

物流分野は、移動センシングに必要な大量の重量車を運用している。また、物流トラックは、道路インフラの隅々にまで到達しているため、専用車を用いる場合と異なって、道路インフラ全体に関するデータが常に更新された状態になる。大量の実測データに統計的手法を導入して、インフラ維持管理上の意思決定を高精度化することも期待できる。ただし、物流トラックに移動センシング技術を導入するには、多くの車種に対応した汎用的な計測デバイスを開発する必要がある。

1.2. 工学的提案

1.2.1. 移動センシングを用いた社会問題の解決

移動センシング技術は、Yang らが提案した Indirect Approach[12]に元々の着想を得た技術である。文献[13]において、Yang らは走行する車両の加速度振動データのみを用いて、橋梁の固有振動数を間接的に推定する手法を提案した。数値シミュレーションによる検討結果から、車両振動データのフーリエスペクトルには車両と橋梁それぞれの固有振動数付近にピーク(卓越振動数)が現れることが示されている。ただし、この検討で車両および橋梁に用いたモデルは非常にシンプルなものであり、路面凹凸の影響等の不確定要因は考慮されていない。また、推定された橋梁の固有振動数は大まかなものであり、損傷検知が可能な精度は得られていない。しかし、VBI (Vehicle-Bridge Interaction : 車両-橋梁相互作用) システムを解き、それぞれの卓越振動数が速度や重量の影響を受け、変化することを力学的に明らかにした点は大きい。

Chang らは、Yang らの検討をもとに、EMD (Empirical Mode Decomposition : 経験的モード分解) を用いて、精度よく高次固有振動数を推定する手法の開発している[14]。経験的モード分解は固有モード関数と残差信号に分解することで、単純な連続波形では表現できない波形の特徴を、より正確にとらえることが可能な手法である。しかし、損傷による変化と比較して、十分な精度で推定できてはいなかった。本研究の功績により、信号分析技術を VBI システムに導入することで、相互作用による影響を精度よく評価する可能性が示された。

また、Xiang ら[15]は、車両振動の時間周波数領域でのパワースペクトルから、損傷検知のための新たな指標を提案している。短時間フーリエスペクトルの相関係数から車両走行

位置ごとの橋梁振動変化を追跡し、異常点を検出することで損傷を検知した。車両に加振器を搭載することで車両振動を制御した計測結果を用いて、コンクリートのひび割れ検知の可能性が示された。しかし、分解能の制約が厳しく、路面凹凸も考慮していないといった課題が残る。

長山ら[16]は速度が変化した場合でも、車両振動から固有振動数を推定するため、連行する車両振動データを用いた数値計算実験を行った。クロスパワースペクトル密度から共通の振動成分を抽出し、速度を変化させても、1次の固有振動数を特定することに成功した。実験による検討では、連行車両の速度のずれ等によってデータの同期精度が悪化すると、推定精度も悪化することが報告されている。ただし、自動運転技術の実現により同期精度の課題は解決可能であるとも考えられる。また、本研究の大きな功績として、連行車両を用いることによって生じる、推定に用いる計算プロセスの悪条件性を解決している点が挙げられる。

このほかにも、Wang ら[17]は橋梁の固有振動数が路面凹凸の影響で観測が困難であること、また車両は橋梁振動と路面凹凸によって加振されることを考慮し、粒子フィルタ（逐次モンテカルロ法）を用いて固有振動数を推定した。また、長山らが用いた道路橋を対象に、固有振動数を実験的にも推定した。推定精度に関して、橋梁の損傷検知には未だ十分ではないが、統計数理に基づいた分析を用いたことにより、多様な外乱が考えられる移動センシング結果を統計的処理する有効性が明らかになった。

大島らはICAを用いた固有振動数の推定を行っている[18]。本検討では、車両と橋梁の特性が未知でも、橋の特性を推定できることが示されている。しかし、移動点の効果を考慮していない点が課題として残っていた。そこで、橋梁のモード形状を車両振動から推定することで損傷検知が可能か、数値計算によって検証を行った[19]。本研究の成果から、頑健性は低いながらも、モード形状の比較による損傷の検知が可能であることがわかった。また、車両振動の橋梁への振動伝達率を用いて、固有振動数を推定する検討も行われた。実験は普通車に起振器を搭載し、推定精度は低いながらも成功している[20]。この検討では、路面凹凸の変化による影響が固有振動数の推定精度に大きく影響を及ぼすことを明らかにしており、速度変化による路面凹凸の影響変化が必要であることを示唆している。

O'Brien[21]らは、時間周波数領域に対応した手法である STFDD (Short Time Frequency Domain Decomposition: 短時間周波数領域分解) を用いて、路面凹凸がある橋梁においても、健全時と損傷時のモード形状を比較することで、数値計算上で損傷検知および位置同定に成功した。本検討では、速度の変動は考慮しておらず、また模擬された観測ノイズも 0.1% と小さいものだったため、実運用にまでは検討を要する。しかし、現実的な車両速度を想定しての結果は良好であり、計算モデルの高度化や計測システムの進歩によっては、損傷同定が実現可能になると考えられる。これ以外にも EMD を用いた検討も行っており、路面凹凸の変化があっても、損傷検知できる可能性が示されている[22]。

Kong[23]らは車両振動の橋梁振動への伝達率を用いて、固有振動数やモード形状を推定し

た. 数値計算による検討において, 高精度でモード形状を推定できており, 損傷判定にも成功している. 1m の部材が曲げ剛性 50%低下していた場合でも, 提案された検知指標は健全時の 90%程度になるなど, それ以下の軽度な損傷への適用性は明らかでないが, 複数車両が橋梁上にあった場合の検討を行うなど, 実運用時に考えられる状況を考慮した検討がなされている.

これらの検討から, 速度変化による路面凹凸の影響評価に課題は残しながらも, 移動センシングで得られた振動分析によって, 損傷の影響を受ける橋梁の固有振動数推定にある程度成功していることがわかる. しかし, 橋梁の固有振動数は特に局所的な損傷によってほとんど変化しないことが知られており, 高い推定精度が求められる. したがって, 路面凹凸や観測ノイズの影響を受けやすい移動センシング技術では測定が困難であるため, これらの影響を受けても十分に反応する指標を用いる必要とわかる.

1.2.2. 従来の橋梁モニタリング技術との違い

橋梁モニタリングとして, 一般的な方法は, 橋梁側にセンシングデバイスを設置して計測を行う. この方法は, センシングデバイス付近に損傷が発生した場合に, 精度よく検知可能であると考えられる. これは損傷度評価が, 観測情報からモデルを推定する非適切な逆問題で, 観測情報の不足が解の不安定性につながるものが原因である[24]. この課題は, パラメータの取り方を変更する, あるいはセンシングデバイスの設置点数増加による観測情報の増加などで解決可能である.

例えば, Cho ら[25]が行った, 無線センサによるケーブル橋の計測実験が挙げられる. 計測したデータをもとに数値計算を行い, 橋梁の力学的パラメータや状態について推定が可能であることを示した. センサ数は莫大になったが, ケーブル橋のねじりのような, 安全に供用する上で課題となる動的挙動を, 数値計算によって再現できた点は高精度橋梁モニタリング技術の拡張性を示しているといえる.

金ら[26]はラボ実験による検討において, 橋梁に AR モデルを適用し, 橋梁の線形パラメータを推定した. 推定された固有振動数やモード形状に MTS (Mahalanobis Taguchi System : マハラノビス・タグチシステム) を適用することで, 新たな損傷検知指標を提案している. 本研究では, 路面凹凸の影響を考慮しつつ, 速度を変更した場合の影響についても検討を行っている. また, AR モデルは力学的なモデルとの対応が明確であるため, 力学的な反応メカニズムの解明が容易である点が功績として挙げられる. また, 実際に部材破断を行った橋梁での実験データに適用し, 有効性を明らかにしている[27],[28].

五井ら[29]は, 金らの検討を発展させ, MAR モデルを用いて推定されたパラメータにベイズ推論を用いて, 異常値を見ることで損傷検知を行う. 事前に健全状態のパラメータ分布を学習し, 損傷時のデータに適用した結果, 先の検討方法では発見が困難であったケースについて明らかにしている. 橋梁は温度, 風等の環境要因に影響を受けるため, これら統計的な分析が有効である.

そのほか、石澤ら[30]による振動モードに基づく橋梁の洗堀評価システムなど、橋脚の機能不全を評価する方法や、藤原らの橋梁点検ロボット[31]、小山らのドローン撮像によるコンクリート床板のひび割れ検出[32]など、振動データ以外を用いる研究も、現在行われている。

これら従来の橋梁モニタリング技術と移動センシングが異なる点は、橋梁にセンサを設置しない点、あるいは手軽に点検が可能な点である。そのため、推定精度は移動センシングの方が相対的に低くなるが、センサの数も少なく、労力も小さい。デバイスの価格によっては、今後大規模に調達・設置していくことが可能である。このため、コストを圧縮しやすく、スクリーニング技術として有効であるといえる。

ただし、移動点で計測したデータをもとに推定を行うため、移動体位置の特定精度や、移動によるデータの時間的な変化をうまく評価する必要が生じる。

1.2.3. 空間分析の有効性

これらの知見から分かることは、移動センシングによって橋梁損傷を検知するには、周波数分析ではなく、時間周波数分析手法を適用しなければならないということである。時間周波数分析が優れた精度を発揮する理由は、橋梁損傷が局所的に発生するためと考えられる。周波数分析のような処理プロセスでは、時間領域での情報が全て平均化されてしまう。したがって、損傷による影響の判別が難しくなると考えられる。一方、移動センシングにおいて、車両は時間と共に橋梁上を移動しているため、損傷箇所を通過するときに、損傷影響が卓越する。言い換えれば、時刻情報は空間情報と関連付けられており、局所的な損傷が検知しやすいのだと考えられる。もし、橋梁モニタリングにおける多点計測のように、空間領域での振動特性を移動センシングによって把握できれば、橋梁の局所的損傷が精度良く推定できるようになると期待できる。そこで、既往の研究[14][15]から、その有効性が明らかにされている、空間的な指標であるモード形状に着目する。

そこで、山本らは、モード解析理論に基づいて車両振動から橋梁振動を推定し、モード形状を推定する手法を提案した[33]。この手法では、複数の車両が橋梁上を走行し、加速度振動データおよび車体および路面の相対変位データを計測する。加速度振動を数値積分し、相対変位との差を求めれば、車両の強制変位入力に推定できる。この変位入力は、路面凹凸と橋梁振動の和なので、複数の車両で変位入力を推定し、同じ位置での値の差分を取れば、橋梁振動だけを抽出できる。ここで、推定された橋梁振動成分は、移動点における橋梁振動であるから、内挿を用いた空間補間法によって移動点による効果を補正すれば、モード解析理論に基づいてモード形状が推定できる。

山本らが用いたモード形状推定法は、高精度に橋梁モード形状を推定することができる。ただし、複数の車両を等間隔・等速度で走行させる必要があり、実用化は困難である。また、車両数を増やすと、空間補間法が悪条件性を持つようになるため、推定結果がノイズの影響を受けやすくなるといった課題も見出された。

そこで、山本ら[34]は計算と実験において、推定したモード形状を用いた指標が損傷によって変化することを明らかにした。この指標 SSMA (Spatial Singular Mode Angle : 空間特異モード角度) は、モード形状の推定精度自体は低いですが、損傷によってモード形状の推定精度が変化することを利用して、損傷を検知する。モード形状はノイズ体制が高いとされる SVD (Singular Value Decomposition : 特異値分解) を用いて推定されている。SVD は分解した行列間の無相関性を仮定するが、車両振動が完全に無相関性を満たすことはなく、モード形状の推定精度は低下する。損傷によって、この無相関性がより満たされなくなることにより、SSMA は反応すると考えられている。

中釜らは、模型実験で得られた SSMA 分布の統計量を算出し、比較することで損傷検知の可能性を示した[35]。この実験では、橋梁模型の上にレールを設置し、上に乗った車両をワイヤーでけん引して車両を走行させた。本来、走行速度が一定で、路面凹凸が一定であるならば、SSMA は一致するため、一つに定まるはずだが、観測ノイズ等の影響で結果は変化した。

石川ら[36][37]は有限要素法で三次元のトラス橋をモデル化し、数値計算により SSMA の有効性を明らかにした。この検討では、損傷は部材の破断で再現し、速度や路面の粗さを変化させて行った。結果として、車両走行側の部材破断に SSMA はより反応すること、速度が速いと SSMA がよく反応すること、そしてノイズを付与しても、損傷が検知可能であることが明らかになった。

二出川ら[38]は、石川らの検討を発展させ、車両側のパラメータ変更が SSMA の損傷感度にどのような影響を与えるか、検討を行った。結果から、車重や慣性モーメントの変化が損傷感度に影響することを明らかにし、損傷感度の高い車両を提案している。

SSMA の損傷検知指標としての有効性は、これら検討により数値的実験的に示されている。

1.3. 技術的課題

1.3.1. 現行技術の社会実装上の問題点

移動センシングは、大まかに橋梁損傷を検知し、詳細点検の優先度を決定するために用いる技術である。しかし、既往の研究で用いる固有振動数は局所的な損傷による変化をとらえることが不利である。解決方法として局所的な損傷に対する感度が高い高次モードの固有振動数に着目して評価することが考えられる。しかし、高次モードの振動成分は一般に振動数が高く、振幅は小さい。そのため、高性能なセンシングデバイスが必要になる。スクリーニングは一回の走行で得られる情報が限られており、外乱の影響も大きいことから、複数の車両により繰り返し計測することが好ましい。センシングデバイスが高コストだと、スクリーニングの利点である低コスト性を打ち消してしまう懸念があるため、導入が進まないという社会実装の課題になるといえる。すなわち、スクリーニング技術への適用に十分な性能は保持しつつ、安価で量産性が高いセンシングデバイスがないことが課題である。

既往の研究においては、大幅に剛性を低下させた場合や部材を破断した場合の検討がほとんどで、比較的軽微な損傷による指標の変化はほとんどないか、明らかになっていない。現実に発生が想定される橋梁損傷のうち、このような損傷は重度損傷として稀である。そのため、容易に見出されることも考えられ、スクリーニング技術を想定すると、より軽微な損傷の検知手法を開発する必要がある。

1.3.2. 要求性能

まず、スクリーニングに必要なセンシングデバイスの要求性能について整理する。加速度振動を計測する場合、センサはデジタル出力のものか、アナログ出力に AD コンバータを用いてデジタルに変換する 2 つが考えられる。本検討では、後者について整理する。

スクリーニング対象となる橋梁の固有振動数は 1~10Hz 程度[39]とされており、また損傷は高次の振動数に影響を及ぼすことが知られている。既往の研究では、1000Hz 程度[41]のものが使用されている。精度と感度がよく、またノイズ耐性に優れるが、価格も性能に比して上昇するため、最低限の機能を搭載しただけの MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) センサと比較すると、高価格となる。

MEMS 加速度センサの計測メカニズムは主に熱検知型、ピエゾ抵抗型、静電容量型の三つがある。熱検知型はセンサ内部に搭載されたヒーターで暖められた気体が対流を生じる。この時加速度による対流の変化を熱抵抗等で検知する。可動部がないため、衝撃に強いとされている。対流変化を検知することから、高周波数を検知することはできない、計測対象によってはセンササイズが大きくなるなどの問題がある。ピエゾ抵抗型は金属等に機械的なひずみが生じたとき、その抵抗が変化する特性を利用して計測を行う。この特徴から、温度の影響を受けやすい。車両に搭載することを考慮すると、この特性は不利である。静電容量型は、ばねにコンデンサを接続し、コンデンサ位置が変わることで静電容量が変化する。振動によって変化した静電容量から抵抗値を計算し、計測を行う (図 1.6)。温度による影響や計測の安定性、価格等に優れるものが多い。

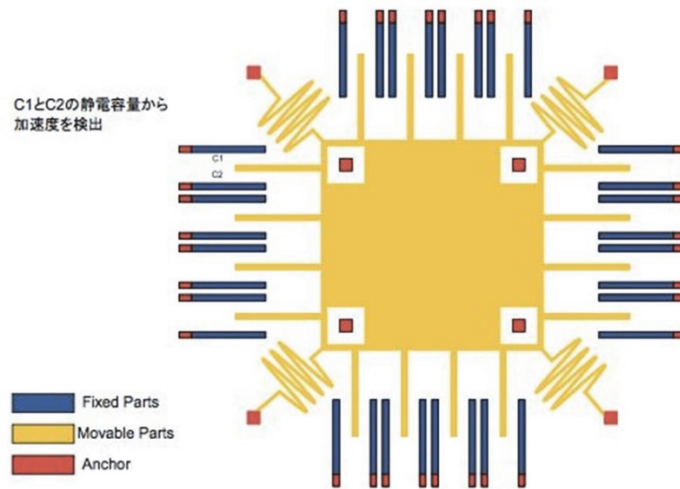


図 1.6 静電容量型の概念図[39]

本研究では、車両に搭載するという条件から、静電容量型を用いる。MEMS センサの性能を考えると、1 次の固有振動数を f とすると、 n 次の固有振動数は $n^2 f$ であることから、3 次程度までを対象とすると、 $90(=3^2 \times 10)$ Hz 程度までは見られることが最低限必要になる。ただし、センサで計測したデータはサンプリングレートの半分程度までが振動成分として観測可能であるため、余裕をもって 300 Hz 程度のサンプリングレートを持つセンサを使用すればよい。また、本検討では考慮していないが、橋梁のたわみは 1 Hz 以下の振動に現れるため、たわみについて分析可能にする場合は、低周波数帯に影響を与えるトレンド効果が小さいものを選択する必要がある。

次に AD コンバータについて整理する。AD コンバータはアナログセンサから送られてきた連続的な電圧データを分割し、離散的なデジタルデータに変換する。この時の分割数を分解能と呼ぶ。既往の研究において、サンプリングレートの高いセンサを用いた計測結果でも、AD コンバータの分解能が低いことから、加速度振幅が精度よく推定できていないケースがあった。車両振動に対して橋梁振動は小さく、損傷による振動の変化はさらに小さいことが明らかであるため、分解能が低いと損傷による変化をとらえられない。また、SSMA はノイズ耐性が高く、車重の変化などの波形を変化させる要因に影響を受けることがわかっているため、高分解能の AD コンバータ使用が有効である。従来使用されていた 8~16 bit [40] より高い分解能で、コストと入手性から 24 bit が適していると考えられる。(図 1.7)

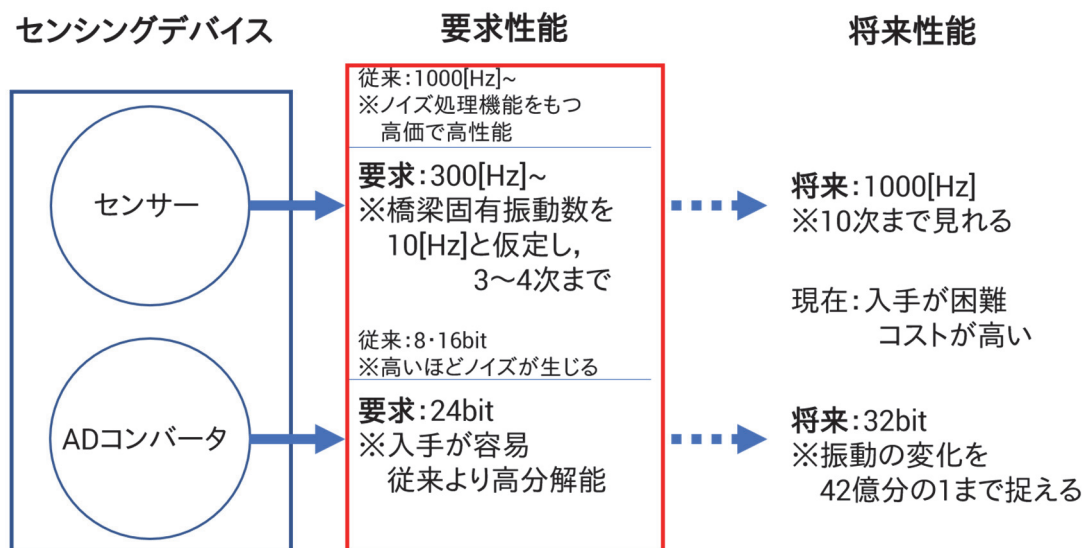


図 1.7 センシングデバイスのロードマップ

1.4. 本研究の目的

1.4.1. 研究目的

本研究の目的は、移動センシング技術を社会実装する上での技術的課題を抽出し、解決法を提案することである。社会実装上の課題は以上の既往の研究成果より 2 点ある。第一に、移動センシングに適した計測デバイスを開発すること、第二に軽度損傷の検知手法を開発することである。

計測デバイスの開発にあたっては、先ず数値実験によって車両と橋梁の振動データを再現し、損傷による影響から要求性能を明らかにした上で、デバイス設計を行う。また、開発したデバイスが安定して動作することを、実車走行実験により確認する。

軽度損傷を検知するために、評価指標として SSMA を採用する。これは、SSMA が損傷に対して敏感に反応し、またノイズ耐性が大きいことが明らかになっているからである。

ただし、SSMA は速度依存性を持っていることから、多変量解析に用いられる MD の速度—SSMA 関係に適用する方法を提案する。提案手法の有効性は、数値計算、類似環境実験によって検証する。実験における軽度損傷は、主構造以外における損傷とし、ボルトの緩みおよび横桁・横構の脱落を与える。現実には、十分重度損傷であるとも考えられるが、現在まで検討されてきた破断や剛性低下による損傷より軽度であるとして、これを本研究では軽度損傷と設定した。

1.4.2. 論文構成と方法論

本論文は、Technology Readiness Level (TRL) に準じ、構成する。まず第 1 章の 1.1 社会的背景において、本研究の背景となる社会課題として、老朽化と高齢化について述べた。これらが複合化してことによって生じる「人的・予算的資源の不足により、橋梁が点検を行え

ない」という状況に対し、スクリーニング技術の提案を行った。スクリーニングは詳細点検の前に行う簡易点検で、本論文では移動センシングを用いたスクリーニング技術に注目する。高齢化に伴う産業構造の変化から、物流業界は苦境に立たされており、新しい付加価値の創造が求められている。このような要請に対して、移動スクリーニングによるデータ収集を提案した。具体的には、物流業界の保有する大量の重量車を用いて、データを計測し、道路橋管理者へ提供することを考える。そのためには、様々な車両に取り付け可能な移動センシングシステムが必要になる。次に **1.2 工学的提案**として TRL1-3 に相当する本研究の基盤である移動センシング技術について整理した。また、移動センシング技術と比較対象である従来の橋梁モニタリング技術についても整理し、その課題と移動センシングとの違いについて論じた。最後に、本研究で評価指標として用いる SSMA と、必要となる計測システムについて述べ、これまでの検討で明らかとなった課題について整理した。これらの課題は **1.3 技術的課題**として提示し、推定される移動センシング用計測デバイスの要求性能について明らかにし、**1.4 本研究の目的**として、移動センシングに必要な計測デバイスを開発すること、現場ニーズの高い軽度損傷を検知する技術を開発検証することとした。

TRL3 に相当する概念モデルの定量的検討を行うために、第2章では車両-橋梁相互作用問題の基礎数理と、本研究で用いる損傷検知指標である SSMA と損傷判定に用いる MD について述べる。ここで、**2.1 数値実験**として、車両橋梁相互作用問題を解くための数値シミュレーション手順についても整理した。実際の物流車両と中小スパン橋、軽自動車と今回実験のために作成した鋼製模型橋梁の諸元に合わせた数値計算によって、センサの必要性能を検証した。次に、**2.2 分析手法**にて、得られたデータの分析手法として、一般的な FFT 等について整理したのち、数値シミュレーションでの結果を用いて、波形や周波数等の比較では損傷検知が難しいことを示した。また、SSMA の限界として、走行速度が変化するとき路面凹凸の影響が変化することで SSMA が変化してしまうため、損傷検知が難しいことを示した。そこで、数値シミュレーションでの結果から得られた速度と SSMA の MD を算出し、剛性低下が比較的小さいケースにおいても、損傷検知が可能か、検証を行った。

第3章として TRL4-5 に相当する要素技術として、センシングデバイスについて整理する。**3.1 数値実験から考えられる必要性能**では、第2章での結果を考慮し、損傷検知に必要なと考えられる性能について、既往の研究を参考に整理した。**3.2 要素技術についての検討**として、本研究で開発したデバイスの開発過程について、過去の研究とその課題を整理した。**3.3 システム構成**では、必要性能に基づいて開発したデバイスの構成と、既存デバイスとの比較を行った。**3.4 性能試験**において、開発したデバイスを実車両に搭載し、計測試験及び GPS の位置同期試験を行い、試験実証を行った。また、通信ケーブルの安全性についても検討した。

第4章では開発したデバイスを用いて、類似環境実験を実施した。現実に近い不確定因子の影響を受ける条件で、提案手法の有効性を明らかにするため、軽度損傷が検知可能か、検証した。検証には、実車両が走行可能な鋼製模型橋梁を用い、軽度損傷はボルトの弛緩によ

って模擬した。4.1 鋼製模型橋梁における実車走行実験は、TRL5 の類似環境実験に相当する。また、SSMA は力学的メカニズムが完全に明らかではないため、統計的な分析を必要とすることから、データ数が多い方がよい。鋼製橋梁では安全上実験数を多くすることが困難であるため、紙製模型橋梁と模型車両を用いて、走行回数を増やしてラボ実験を行った。4.2 ラボ実験による統計的妥当性検証として、ラボ実験のデータに提案手法を適用した結果を整理し、再現性を確認した。これら実験的検討により、速度—SSMA の MD を用いた軽度損傷の検知の可能性が示された。

第 5 章では以上の結果と今後の課題をまとめた。また、TRL6 および TRL7 に相当する、物流車両への適用結果についてもまとめる。また、今後の課題と考えられる分析手法の高度化や数値実験の高度化についても、まとめることとする。

2. 基礎数理

2.1. 数値実験

2.1.1. 車両－橋梁相互作用システムの定式化

移動センシング技術の有効性を検討するために、VBI (Vehicle-Bridge Interaction : 車両－橋梁相互作用) モデルに基づく簡易な数値実験を実施する。本来、車両と橋梁はそれぞれ線形な力学システムでモデル化が可能であるが、VBI システムは、非線形である。そこで、ここでは車両システムと橋梁システムのモデル化過程をそれぞれ説明する。その後、相互作用のモデル化とその計算アルゴリズムについて説明する。また、そのアルゴリズムに基づいて数値実験を行い、結果と考察を示す。

(1) 車両システム

車両システムは、線形な剛体ばねシステムとしてモデル化できる。図 2.1 は HC (Half-Car) モデルといい、質量 m_s の剛体を車体として、ばねと減衰器 (ばね定数 : k_{si} , 減衰 : c_{si}) でモデル化されたサスペンションと、単体のばね (ばね定数 : k_{ui}) でモデル化されたタイヤによって地面と接続されている。ここで添え字の i は車軸を表し、前輪が 1, 後輪が 2 となる。サスペンションとタイヤの間には質量 m_{ui} の質点があり、ばね下と呼び、対して車体をばね上と呼んで区別する。ばね下は車軸部に相当し、本研究ではこの位置に加速度振動センサを取り付ける。車両は前輪と後輪の位置における入力プロファイル (強制変位入力) $u_i(t)$ によって振動する。この入力プロファイルは、路面プロファイル (路面凹凸) と橋梁振動の和によって表される。

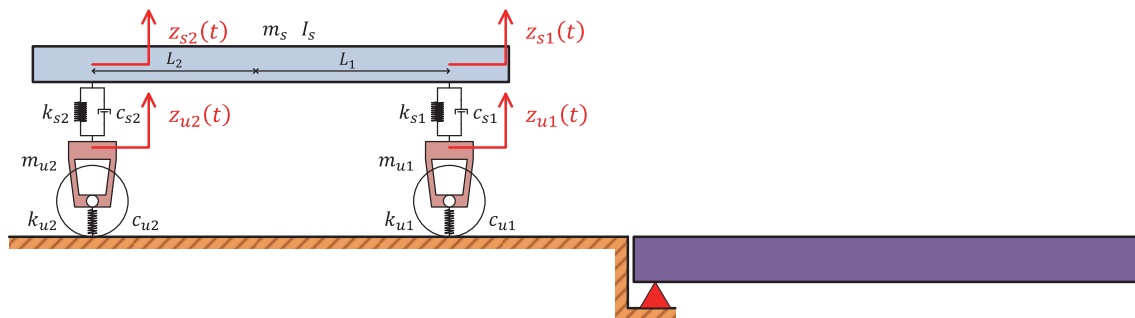


図 2.1 車両システム (Half-Car モデル)

車両 (HC モデル) の運動方程式は 4 自由度で表される。ばね上は剛体であるので、並進の運動方程式と回転の運動方程式の 2 つで表現できる。ここで、ばね上の重心位置における鉛直方向の変位振動を $z_G(t)$, 回転を $\theta_G(t)$, 前輪・後輪位置での変位振動を $z_{si}(t)$, ばね下の変位振動を $z_{ui}(t)$ とおく。ここで、各ばねの自然長位置ではなく、重力によるつりあい位置を基準とされていることに注意する。また、一階の時間微分を ($\dot{\quad}$) で、二階の時間微分を ($\ddot{\quad}$)

で表す. 重心から前輪・後輪までの距離を d_i とすると, 重心を中心に回転するばね上剛体の慣性モーメントは, $I_s = m_s d_1 d_2$ と求められる. 車体 (ばね上剛体) の並進の運動方程式は,

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_G(t) = & -c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) - c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) \\ & -k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) - k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

と表される. また, 回転の運動方程式は,

$$\begin{aligned} I_s \ddot{\theta}_G(t) = & -d_1 \times c_{s1}(\dot{z}_{s1}(t) - \dot{z}_{u1}(t)) + d_2 \times c_{s2}(\dot{z}_{s2}(t) - \dot{z}_{u2}(t)) \\ & -d_1 \times k_{s1}(z_{s1}(t) - z_{u1}(t)) - d_2 \times k_{s2}(z_{s2}(t) - z_{u2}(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

となる. ここで, 剛体の重心位置での変位は, 前輪・後輪位置での変位を用いて,

$$z_G(t) = \frac{d_2 z_1(t) + d_1 z_2(t)}{d_1 + d_2} \quad (3)$$

と表される. 同様に,

$$\theta_G(t) = \tan\left(\frac{z_1(t) - z_2(t)}{d_1 + d_2}\right) \cong \frac{z_1(t) - z_2(t)}{d_1 + d_2} \quad (4)$$

とおける. 前輪・後輪のばね下質点の運動方程式は,

$$m_{ui} \ddot{z}_{ui}(t) = c_{si}(\dot{z}_{si}(t) - \dot{z}_{ui}(t)) + k_{si}(z_{si}(t) - z_{ui}(t)) - k_{ui}(z_{ui}(t) - u_i(t)) \quad (5)$$

となるので, 式(1)から式(5)をまとめて表すと,

$$\mathbf{M}_V \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_V \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_V \mathbf{z}(t) = \mathbf{f}_V(t) \quad (6)$$

と表すことができる. ただし,

$$\mathbf{z}(t) = \begin{Bmatrix} z_{s1}(t) \\ z_{s2}(t) \\ z_{u1}(t) \\ z_{u2}(t) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{f}_V(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_{u1} u_1(t) \\ k_{u2} u_2(t) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_V = \begin{bmatrix} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} & \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} & & & & \\ \frac{I}{d_1 + d_2} & \frac{-I}{d_1 + d_2} & & & & \\ & & m_{u1} & & & \\ & & & m_{u2} & & \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_V = \begin{bmatrix} c_{s1} & c_{s2} & -c_{s1} & -c_{s2} \\ d_1 c_{s1} & -d_2 c_{s2} & -d_1 c_{s1} & d_2 c_{s2} \\ -c_{s1} & & c_{s1} & \\ & -c_{s2} & & c_{s2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_V = \begin{bmatrix} k_{s1} & k_{s2} & -k_{s1} & -k_{s2} \\ d_1 k_{s1} & -d_2 k_{s2} & -d_1 k_{s1} & d_2 k_{s2} \\ -k_{s1} & & k_{s1} + k_{u1} & \\ & -k_{s2} & & k_{s2} + k_{u2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

である．さらに，ばね上剛体の慣性モーメント $I_s = m_s d_1 d_2$ を代入すると，式(6)の質量マトリクス \mathbf{M}_V ，減衰マトリクス \mathbf{C}_V ，剛性マトリクス \mathbf{K}_V は，式(9)～(11)から下記の式(12)～(14)に置き換えることができる．

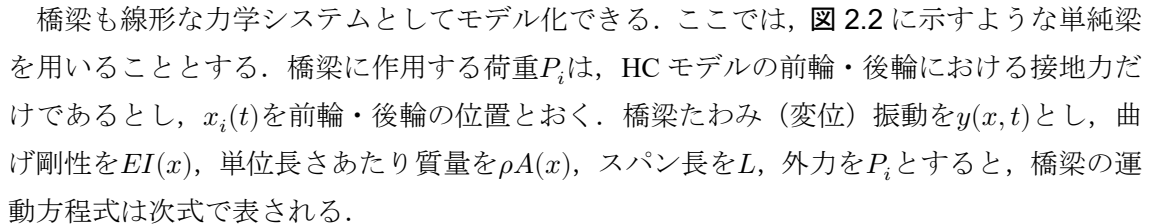
$$\mathbf{M}_V = \begin{bmatrix} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} & & & \\ & \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} & & \\ & & m_{u1} & \\ & & & m_{u2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_V = \begin{bmatrix} c_{s1} & & -c_{s1} & \\ & c_{s2} & & -c_{s2} \\ -c_{s1} & & c_{s1} & \\ & -c_{s2} & & c_{s2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{K}_V = \begin{bmatrix} k_{s1} & & -k_{s1} & \\ & k_{s2} & & -k_{s2} \\ -k_{s1} & & k_{s1} + k_{u1} & \\ & -k_{s2} & & k_{s2} + k_{u2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

これは，1台の HC モデルが，2台の QC (Quarter-Car) モデルと見做すことができることを示している．ただし，2台の QC モデルの距離は $d_1 + d_2$ である．

(2) 橋梁システム

橋梁も線形な力学システムとしてモデル化できる．ここでは， 2.2 に示すような単純梁を用いることとする．橋梁に作用する荷重 P_i は，HC モデルの前輪・後輪における接地力だけであるとし， $x_i(t)$ を前輪・後輪の位置とおく．橋梁たわみ（変位）振動を $y(x, t)$ とし，曲げ剛性を $EI(x)$ ，単位長さあたり質量を $\rho A(x)$ ，スパン長を L ，外力を P_i とすると，橋梁の運動方程式は次式で表される．

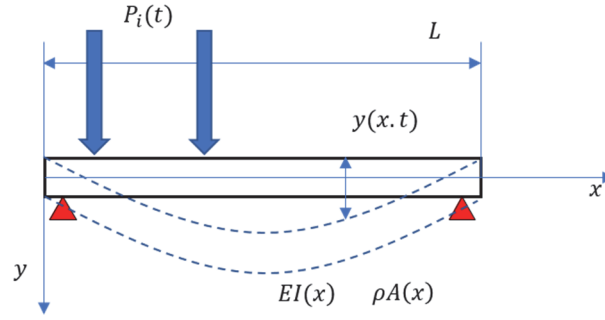


図 2.2 橋梁のモデル化

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = \sum_{i=1}^2 \delta(x - x_i(t)) P_i(t) \quad (15)$$

ここで、 $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数で、以下の条件式を満たす。

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \\ \delta(x) = 0 & (x \neq 0) \end{cases} \quad (16)$$

式(15)で表される橋梁の運動方程式を直接解くのは難しいため、今回は有限要素法を適用し、数値的に解く。式(15)を残差式 $\pi(y)$ に置き換えると、

$$\pi(y) = \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \sum_{i=1}^2 \delta(x - x_i(t)) P_i(t) \quad (17)$$

となる。 y が近似解として与えられる時、残差 π はゼロとならない。重み付き残差法では、残差 π に定義域で重み $w(x)$ を掛けた重み付き残差 Π を最小化する。重み付き残差は、

$$\Pi = \int_0^L w(x) \pi(y) dx \quad (18)$$

である。橋梁区間を n 個の一次元梁要素に分割する。このとき、各要素内では曲げ剛性 EI 、単位長さあたり質量 ρA が一定であると考える。また、全体座標系で表した基底関数が $\mathbf{N}(x)$ で表されるものとする。ガラーキン法では、解 $y(x, t)$ と重み関数 $w(x)$ の離散化に同じ基底関数を用いるので、それぞれ

$$y(x, t) \cong \mathbf{y}(t) \cdot \mathbf{N}(x) \quad (19)$$

$$w(x) \cong \mathbf{w} \cdot \mathbf{N}(x) \quad (20)$$

と表される。ただし、 $\mathbf{N}(x)$ は、要素 e における局所座標系 $X^{(e)}$ を用いて

$$\mathbf{N}(x) = \mathbf{N}^{(1)}(X^{(1)}) + \mathbf{N}^{(2)}(X^{(2)}) + \dots + \mathbf{N}^{(n)}(X^{(n)}) \quad (21)$$

のような形で記述できる。また、節点位置 x_e を要素とするベクトル x を用いると、全体座標

系と局所座標系の関係式が得られる.

$$x \cong \mathbf{x} \cdot \mathbf{N}(x) \quad (22)$$

ここで, 基底関数にエルミート補間関数を用いると

$$\mathbf{y}(t) = \begin{pmatrix} \vdots \\ y(x_e, t) \\ \theta(x_e, t) \\ y(x_{e+1}, t) \\ \theta(x_{e+1}, t) \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (23)$$

となる. ここで, x_e は節点 e の位置を表し, 要素 e は節点 e と節点 $(e+1)$ から成る. また, $\theta(x, t)$ はたわみ角を表し, $\theta = \partial y / \partial x$ である. 各要素の節点 e と節点 $(e+1)$ の位置を局所座標系 $X^{(e)} = -1, 1$ とおくと,

$$N_i(X) = \{1 - 2(X - X^{(e)})L'_i(X^{(e)})\} \{L_i(X)\}^2 \quad (24)$$

ただし, $L_i(X)$ はエルミート補間関数である[42]. 式(24)が第 $4(e-1) + 1$ 要素から第 $4e$ 要素の成分で, 他が全てゼロとなって,

$$\mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ N_1(X^{(e)}) \\ N_2(X^{(e)}) \\ N_3(X^{(e)}) \\ N_4(X^{(e)}) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

が得られる. また, $X^{(e)}$ の定義域が全体座標系では $x_e \sim x_{e+1}$ なので, $N_j(X^{(e)}) \neq 0$ のとき, $N_i(X^{(f)}) = 0$ ($i \neq j, e \neq f$) である.

今, 残差 Π の最小化問題は,

$$\frac{\partial \Pi}{\partial w_j} = 0 \quad (26)$$

である. ただし, w_j は \mathbf{w} の要素である. これは, 重み付き残差 $w(x)\pi(y)$ の和が最小化するように重み $w(x)$ を決定していることに相当する. 式(18)は,

$$\begin{aligned}
\Pi &= \int_0^L w(x)\pi(y)dx \\
&= \int_0^L w \left(\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) - \sum_{i=1}^2 \delta(x - x_i(t)) P_i(t) \right) dx \\
&= \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3
\end{aligned} \tag{27}$$

と変形できる．ここで，積分は慣性項 Π_1 ，発散項 Π_2 ，外力項 Π_3 に分けて，考える．ここで，式(19)，式(20)，式(21)をそれぞれの項に代入していく．慣性項 Π_1 は，

$$\begin{aligned}
\Pi_1 &= \int_0^L w(x)\rho A(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \\
&= \sum_{e=1}^n \int_{x_e}^{x_{e+1}} w(x)\rho A^{(e)} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \\
&= \sum_{e=1}^n \int_{x_e}^{x_{e+1}} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{N}(x)) \rho A^{(e)} \frac{\partial^2 (\mathbf{y}(t) \cdot \mathbf{N}(x))}{\partial t^2} dx \\
&= \sum_{e=1}^n \int_{-1}^1 (\mathbf{w} \cdot \mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)})) \rho A^{(e)} \frac{\partial^2 (\mathbf{y}(t) \cdot \mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}))}{\partial t^2} \frac{dx}{dX^{(e)}} dX^{(e)} \\
&= \mathbf{w}^T \sum_{e=1}^n \left[\rho A^{(e)} \Delta x^{(e)} \int_{-1}^1 \mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}) \mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)})^T dX^{(e)} \right] \ddot{\mathbf{y}}
\end{aligned} \tag{28}$$

と表される．ここで， $\Delta x^{(e)}$ は要素 e の長さ ($= x_{e+1} - x_e$) である．さらに，積分箇所を計算すると，

$$\begin{aligned}
\Pi_1 &= \mathbf{w}^T \sum_{e=1}^n \frac{\rho A^{(e)} \Delta x^{(e)}}{420} \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ & \begin{bmatrix} 156 & 22\Delta x^{(e)} & 54 & -13\Delta x^{(e)} \\ 22\Delta x^{(e)} & 4\Delta x^{(e)2} & 13\Delta x^{(e)} & -3\Delta x^{(e)2} \\ 54 & 13\Delta x^{(e)} & 156 & -22\Delta x^{(e)} \\ -13\Delta x^{(e)} & -3\Delta x^{(e)2} & -22\Delta x^{(e)} & 4\Delta x^{(e)2} \end{bmatrix} & & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{y}} \\
&= \mathbf{w}^T \mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}}
\end{aligned} \tag{29}$$

と表される． \mathbf{M}_B を整合質量マトリクスという．同様に，発散項 Π_2 は

$$\begin{aligned}
\Pi_2 &= \int_0^L w(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) dx \\
&= \sum_{e=1}^n \int_{x_e}^{x_{e+1}} w(x) EI^{(e)} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} dx \\
&= \sum_{e=1}^n EI^{(e)} \int_{x_e}^{x_{e+1}} w(x) \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} dx \\
&= \sum_{e=1}^n EI^{(e)} \left(\left[w \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \right]_{x_e}^{x_{e+1}} - \int_{x_e}^{x_{e+1}} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} dx \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{e=1}^n EI^{(e)} \left(\left[w \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \right]_{x_e}^{x_{e+1}} - \left[\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right]_{x_e}^{x_{e+1}} + \int_{x_e}^{x_{e+1}} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \right) \\
&= \sum_{e=1}^n EI^{(e)} \left(0 - \left[\frac{\partial(\mathbf{w} \cdot \mathbf{N}(x))}{\partial x} \frac{\partial^2(\mathbf{y} \cdot \mathbf{N}(x))}{\partial x^2} \right]_{x_e}^{x_{e+1}} \right. \\
&\quad \left. + \int_{x_e}^{x_{e+1}} \frac{\partial^2(\mathbf{w} \cdot \mathbf{N}(x))}{\partial x^2} \frac{\partial^2(\mathbf{y} \cdot \mathbf{N}(x))}{\partial x^2} dx \right) \\
&= \mathbf{w}^T \sum_{e=1}^n EI^{(e)} \left(\left[\frac{\partial(\mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}))}{\partial X^{(e)}} \frac{\partial^2(\mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}))}{\partial X^{(e)}} \frac{\partial X^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial^2 X^{(e)}}{\partial x^2} \right]_{-1}^1 \right. \\
&\quad \left. + \int_{-1}^1 \frac{\partial^2(\mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}))}{\partial X^{(e)2}} \frac{(\mathbf{N}^{(e)}(X^{(e)}))^T}{\partial X^{(e)2}} \left(\frac{\partial^2 X^{(e)}}{\partial x^2} \right)^2 \frac{dx}{dX^{(e)}} dX^{(e)} \right) \mathbf{y}
\end{aligned} \tag{30}$$

となる．式(29)の第1項は境界条件を表し，無視できる．第2項の積分計算を進めると，

$$\begin{aligned}
\Pi_1 &= \mathbf{w}^T \sum_{e=1}^n \frac{EI^{(e)}}{\Delta x^{(e)3}} \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ & \begin{bmatrix} 12 & 6\Delta x^{(e)} & -12 & 6\Delta x^{(e)} \\ 6\Delta x^{(e)} & 4\Delta x^{(e)2} & -6\Delta x^{(e)} & 2\Delta x^{(e)2} \\ -12 & -6\Delta x^{(e)} & 12 & -6\Delta x^{(e)} \\ 6\Delta x^{(e)} & 2\Delta x^{(e)2} & -6\Delta x^{(e)} & 4\Delta x^{(e)2} \end{bmatrix} & & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \dot{\mathbf{y}} \\
&= \mathbf{w}^T \mathbf{K}_B \mathbf{y}
\end{aligned} \tag{31}$$

が得られる． \mathbf{K}_B を剛性マトリクスという． \mathbf{M}_B と \mathbf{K}_B が橋梁のシステム・パラメータである．減衰を考慮する場合， $\mathbf{C}_B = \alpha \mathbf{M}_B + \beta \mathbf{K}_B$ を用いて， $\mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}}$ の減衰項を加える．

最後に，外力項 Π_3 は，

$$\begin{aligned}
\Pi_3 &= \int_0^L w(x) \sum_{i=1}^2 \delta(x - x_i(t)) P_i(t) dx \\
&= \sum_{i=1}^2 w(x_i(t)) P_i(t) \\
&= \sum_{i=1}^2 (\mathbf{w} \cdot \mathbf{N}(x_i(t))) P_i(t) \\
&= \mathbf{w}^T \sum_{i=1}^2 \sum_{e=1}^n \mathbf{N}(x_i(t)) P_i(t) \\
&= \mathbf{w}^T \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t)
\end{aligned} \tag{32}$$

と表される．ここで， $\mathbf{P}(t)$ は車両の接地力となり， $\mathbf{L}(t)$ は要素内で働く力を，等価な節点力に置き換える作用素である．

以上より，橋梁の有限要素式は

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_B \mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t) \tag{33}$$

と与えられる．

(3) 相互作用

次に、この HC モデル（または、2 台の QC モデル）の接地力を求める。接地力は、自然長を基準として、ばね k_{ui} の復元力 $k_{ui}(z_{ui} - u_i + \Delta l_{ui})$ を求めれば良い。 Δl_i は自然長を基準と下の時のつりあい位置までの伸びを表す。重力加速度 $g (= -9.8\text{m/s}^2 < 0)$ とおくと、静的状態における QC モデルとばね下質点の力のつりあい式は、

$$0 = m_{si}g - k_{si}(\Delta l_{si} - \Delta l_{ui}) \quad (34)$$

$$0 = m_{ui}g + k_{si}(\Delta l_{si} - \Delta l_{ui}) - k_{ui}\Delta l_{ui} \quad (35)$$

である。ただし、 m_{si} は QC モデルにおけるばね上質点の質量であり、 $m_{s1} = d_2m_s/(d_1 + d_2)$ 、 $m_{s2} = d_1m_s/(d_1 + d_2)$ である。接地力 $P_i(t)$ は式(15)~(16)、式(6)、式(12)~(14)を用いて、次式となる。

$$\begin{aligned} P_i(t) &= k_{ui}(z_{ui} - u_i + \Delta l_{ui}) \\ &= k_{ui}(z_{ui} - u_i) + k_{ui}\Delta l_{ui} \\ &= \{-m_{ui}\ddot{z}_{ui}(t) + c_{si}(\dot{z}_{si}(t) - \dot{z}_{ui}(t)) + k_{si}(z_{si}(t) - z_{ui}(t))\} + m_{ui}g + m_{si}g \\ &= -m_{ui}\ddot{z}_{ui}(t) - m_{si}\ddot{z}_{si}(t) + m_{ui}g + m_{si}g \\ &= m_{si}(g - \ddot{z}_{si}(t)) + m_{ui}(g - \ddot{z}_{ui}(t)) \end{aligned} \quad (36)$$

車両システムの外力 $\mathbf{f}_V(t)$ を計算するには、入力プロファイルが必要である。入力プロファイルは路面凹凸と橋梁振動の和である。すなわち、前輪・後輪直下の橋梁振動成分 $y_i(t) = y(x_i(t), t)$ と路面凹凸 $r_i(t) = R(x_i(t))$ を用いれば、

$$u_i(t) = y_i(t) + r_i(t) \quad (37)$$

である。ここで、橋梁振動成分 $y_i(t)$ は、

$$y_i(t) = y(x_i(t), t) = \mathbf{y}(t) \cdot \mathbf{N}(x_i(t)) \quad (38)$$

となる。

2.1.2. 数値シミュレーションのアルゴリズム

(1) Newmark- β 法

Newmark- β 法は運動方程式の時間積分法の一つである[42]。まず、時刻 t における変位を $s(t)$ とし、運動方程式を以下のように表す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{s}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (39)$$

ただし、 $\mathbf{F}(t)$ は外力項とする。

Newmark- β 法を適用し、時刻 $t + \Delta t$ における速度、変位はそれぞれ以下のように表せる。

$$\dot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) = \dot{\mathbf{s}}(t) + (1 - \gamma)\ddot{\mathbf{s}}(t)\Delta t + \gamma\Delta t\ddot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) \quad (40)$$

$$\mathbf{s}(t + \Delta t) = \mathbf{s}(t) + \dot{\mathbf{s}}(t)\Delta t + (\gamma - \beta)\Delta t^2\ddot{\mathbf{s}}(t) + \beta\Delta t^2\ddot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) \quad (41)$$

本研究では、 $\gamma=1/2$ 、 $\beta=1/4$ とし、加速度は時間平均を用いる（平均加速度法）。この時、時刻(t 、 $t + \Delta t$)の間において、加速度は一定であると仮定される。今、グローバル行列 \mathbf{A} および右辺ベクトル \mathbf{b} は以下のように表す。

$$\mathbf{A} = \mathbf{M} + \frac{1}{2}\Delta t\mathbf{C} + \frac{1}{4}\Delta t^2\mathbf{K} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b} = & \mathbf{F}(t) - \mathbf{C} \left\{ \dot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) - \frac{1}{2}\Delta t\ddot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) \right\} \\ & - \mathbf{K} \left\{ \mathbf{s}(t + \Delta t) - \frac{1}{4}\Delta t^2\ddot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) \right\} \end{aligned} \quad (43)$$

これを用いて加速度 $\ddot{\mathbf{s}}(t + \Delta t)$ は以下のように表せる。

$$\ddot{\mathbf{s}}(t + \Delta t) = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (44)$$

上記加速度を用いて、速度と変位を導出する。

(2) VBI システムの一括計算スキーム

車両の運動方程式を表す式(6)～(8)および式(12)～(14)、橋梁の運動方程式を表す式(31)、相互作用を表す式(34)～(36)を連立させると、VBI システムの運動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_V & \\ \mathbf{L}(t)\mathbf{M}_V & \mathbf{M}_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{z}''(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_V & \\ & \mathbf{C}_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{z}'(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_V & \mathbf{K}_P\mathbf{L}(t)^T \\ & \mathbf{K}_B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{z}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{K}_P\mathbf{r}(t) \\ \mathbf{L}(t)\mathbf{M}_V\mathbf{g} \end{Bmatrix} \quad (45)$$

ここで、

$$\mathbf{K}_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ k_{u1} & 0 \\ 0 & k_{u2} \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\mathbf{r}(t) = \begin{Bmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \end{Bmatrix} \quad (47)$$

$$\mathbf{g} = \begin{Bmatrix} g \\ g \end{Bmatrix} \quad (48)$$

である。式(37)の左辺第1項、第3項のマトリクスは、それぞれVBI システムの質量マトリクス、剛性マトリクスといえる。これらは、時間変化する $\mathbf{L}(t)$ を要素に持つため、VBI システムは非線形性を示す。

この非線形性のために、式(37)に Newmark- β 法を適用したアルゴリズムは、各時刻において逆行列計算を繰り返し実施しなければならないため、非常に計算負荷が高くなる。

(3) VBI システムの分離計算スキーム

そこで、高速な計算スキームとして、車両と橋梁を別々に解く方法を採用する。アルゴリズムを図 2.3 に示す。ここでは、まず、車両の入力プロファイルを路面凹凸のみと仮定して車両システムを解き、車両振動を算出する。車両振動から接地力を計算して、橋梁システムを解くと、橋梁振動が得られる。この橋梁振動から車両の前輪・後輪位置での橋梁振動成分を求めて、入力プロファイルを更新する。入力プロファイルが更新されたので、車両システムを再び解き、車両振動を更新する。この車両振動から接地力も更新し、橋梁システムに代入すれば、橋梁振動も更新される。この操作を繰り返して、車両振動を更新し、変化が小さくなったら（収束したら）、数値解とする。この計算方法では、逆行列計算が繰り返し 1 回において、車両と橋梁のシステムを解くときに 1 度ずつの計 2 回しか出てこないで、計算負荷が大幅に節約できる。

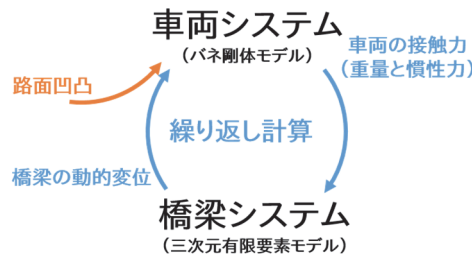


図 2.3 繰り返し計算による VBI システムの数値解法

まず、車両の運動方程式(6)式を変形し、速度と変位は以下のように求まる。

$$\dot{z}(t + \Delta t) = \dot{z}(t) + \frac{1}{2}\ddot{z}(t)\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t\ddot{z}(t + \Delta t) \quad (49)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \dot{z}(t)\Delta t + \frac{1}{4}\Delta t^2\ddot{z}(t) + \frac{1}{4}\Delta t^2\ddot{z}(t + \Delta t) \quad (50)$$

ここで、車両に関するグローバル行列を \mathbf{A}_V 、右辺ベクトルを \mathbf{b}_V とおくと、以下のように表せる。

$$\mathbf{A}_V = \mathbf{M}_V + \frac{1}{2}\Delta t\mathbf{C}_V + \frac{1}{4}\Delta t^2\mathbf{K}_V \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_V = & \mathbf{f}_V(t) - \mathbf{C}_V \left\{ \dot{z}(t + \Delta t) - \frac{1}{2}\Delta t\ddot{z}(t + \Delta t) \right\} \\ & - \mathbf{K}_V \left\{ z(t + \Delta t) - \frac{1}{4}\Delta t^2\ddot{z}(t + \Delta t) \right\} \end{aligned} \quad (52)$$

これを用いて加速度 $\ddot{z}(t + \Delta t)$ は以下のように表せる。

$$\ddot{z}(t + \Delta t) = \mathbf{A}_V^{-1} \mathbf{b}_V \quad (53)$$

次に、橋梁の運動方程式(31)式を変形し、速度と変位を以下のように表す。

$$\dot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) = \dot{\mathbf{y}}(t) + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{y}}(t) \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t \ddot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) \quad (54)$$

$$\mathbf{y}(t + \Delta t) = \mathbf{y}(t) + \dot{\mathbf{y}}(t) \Delta t + \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{y}}(t) + \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) \quad (55)$$

ここで、橋梁に関するグローバル行列を \mathbf{A}_B 、右辺ベクトルを \mathbf{b}_B とおくと、以下のように表せる。

$$\mathbf{A}_B = \mathbf{M}_B + \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{C}_B + \frac{1}{4} \Delta t^2 \mathbf{K}_B \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_B = & \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t) - \mathbf{C}_B \left\{ \dot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) - \frac{1}{2} \Delta t \ddot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) \right\} \\ & - \mathbf{K}_B \left\{ \mathbf{y}(t + \Delta t) - \frac{1}{4} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) \right\} \end{aligned} \quad (57)$$

これを用いて加速度 $\ddot{\mathbf{y}}(t + \Delta t)$ は以下のように表せる。

$$\ddot{\mathbf{y}}(t + \Delta t) = \mathbf{A}_B^{-1} \mathbf{b}_B \quad (58)$$

2.1.3. 数値シミュレーションの結果と考察

(1) 重量車の数値シミュレーション

本研究では、移動センシングを実装する一般車両として、物流車両などの大型車両を想定している。そこで、20t車（HCモデル）が30mの道路橋を通過した場合の数値シミュレーションを行った。表 2.1, 表 2.2 に車両と橋梁のパラメータを示す。また、図 2.4 は路面凹凸を表す。横軸は路面凹凸の橋梁上での位置を示す。なお、損傷として橋梁中央部付近の要素剛性を80%低下させたケースも同時に実施した。表 2.3 に計算条件をまとめた。

表 2.1 橋梁モデル諸元

スパン長 [m]	30
自重 [N/m]	3000
断面二次モーメント [$\times 10^4 \text{mm}^4$]	7428600
ヤング率 [kN/mm ²]	210
要素数	30
レイリー減衰 α	0.7024
レイリー減衰 β	0.0052

表 2.2 車両モデル諸元

ばね上重量 [kg]	18000
車軸間距離 [m]	3.75
前輪・後輪ばね上減衰[kg/s]	10000
前輪・後輪ばね上剛性[kN/m]	1000
前輪・後輪ばねした重量[kg]	1100
前輪・後輪ばね下減衰[kg/s]	30000
前輪・後輪ばね下剛性[kN/m]	3500

表 2.3 計算条件

時間刻み	0.001
収束判定用の差分閾値	0.000001

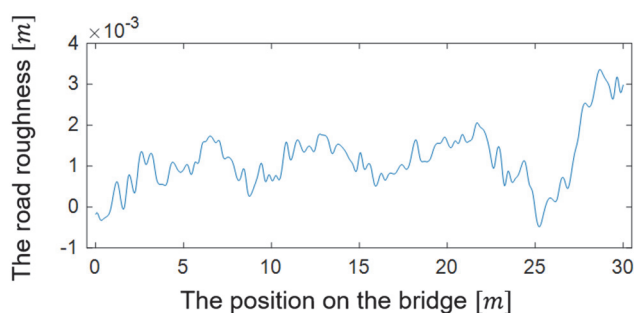


図 2.4 路面凹凸

前輪ばね下の車両振動は図 2.5 のようになった. ここで青線は健全時, 赤線は損傷時を示す. 赤丸は損傷位置付近の加速度を示し, 図 2.6 に示す. わずかに波形に変化が見られるものの, 判別は難しいことが分かる. 図 2.6 で示した加速度の差を求めたところ, 最大振幅に対する比で 3%程度であることがわかった.

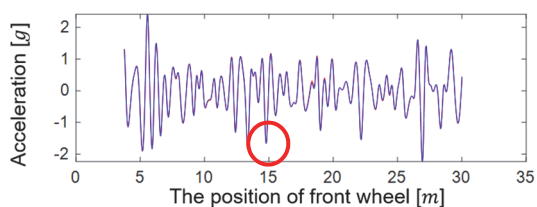


図 2.5 健全時と損傷時の
ばね下前輪加速度

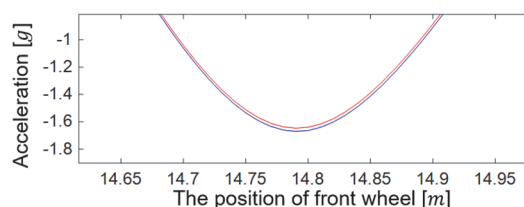


図 2.6 損傷位置でのばね下加速度
の拡大図

また、橋梁スパン中央 ($x = L/2$) における橋梁振動は以下のようになった。車両振動と同様、青が健全時、赤が損傷時を示す。車両振動と比較して、明確に差異があることがわかる。

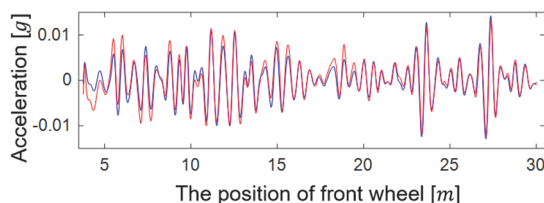


図 2.7 橋梁中央 ($x = L/2$) の振動

以上の結果より、損傷の影響は、加速度波形データの振幅比 3%程度、生じることが分かる。この検討は簡易な検討であって、あくまで目安であることから、これよりも広い帯域でセンサ等の設計を行うべきである。

(2) 軽自動車の数値シミュレーション

本研究では類似環境実験として、鋼製模型橋梁上を軽自動車が行く実験を実施する。そこで、以下に示すような条件でも同様に数値シミュレーションを行った。ここで、走行速度は鋼製橋梁模型実験で得られた最低速度と最高速度付近に合わせて、2.2~3.4m/s について 0.01m/s 刻みで変更することとした。また、最大振幅の 5%または 10%の白色ノイズを加えてばらつきを考慮した。分析については、2.2.1 で整理する。

表 2.4 橋梁モデル諸元

スパン長 [m]	8.32
自重 [N/m]	1328.0
断面二次モーメント [$\times 10^4 \text{mm}^4$]	4720
ヤング率 [kN/mm ²]	210
要素数	30
レイリー減衰 α	0.7024
レイリー減衰 β	0.0052

表 2.5 車両モデル諸元

ばね上重量 [kg]	300
車軸間距離 [m]	1.8
前輪・後輪ばね上減衰[kg/s]	3710.3
前輪・後輪ばね上剛性[kN/m]	29.4
前輪・後輪ばねした重量[kg]	360
前輪・後輪ばね下減衰[kg/s]	31876
前輪・後輪ばね下剛性[kN/m]	352.8

ただし、ばね上のバネレートは一般的な軽自動車の値 3.0kgf/mmを用いる。ばね下ばね定数はタイヤの縦ばね定数を用いることとした。タイヤはタイヤ一つ当たりの静荷重により 10mm 縮むと仮定して、算出した。実際は 4 輪であるので、1 輪当たり 5mm 縮むことに相当する。減衰定数 C は以下の式を用いて算出した。

$$C = 2\sqrt{K \cdot M} \cdot R_c \quad [\text{kg/s}] \quad (59)$$

ただし、 K [N/m]: バネレート, もしくは縦ばね定数, M [kg]: ばね上, もしくはばね下質量, R_c : 減衰率を示す.

ばね上の減衰率は一般的な普通車が 30%, スポーツカーが 40%であることから, 軽自動車であることを考慮し, 中間の 35%を使用した. ばね下の減衰率は試験速度の範囲では十分固いと考え, 減衰率は 100%と仮定した.

2.2. 分析手法

2.2.1. 一般的な方法

振動分析に使われる一般的な技術の一つに, フーリエ変換がある. 今, 時間の関数 $f(t)$ があるとき, そのフーリエ変換 $F(\omega)$ は以下の式で表される.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (60)$$

この時, j は虚数単位, ω は角周波数であり, $F(\omega)$ は角周波数の関数になる. この $f(t)$ を車両振動とすると, 無限時間で時間積分ができないため, そのままではフーリエ変換できない. よって, 離散フーリエ変換 (DFT) を適用する.

今, データ数が N , $x = [0,1,2, \dots, N-1]$ の複素関数 $f(x)$ の離散フーリエ変換 $F(t)$ は以下のように表される.

$$F(t) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x)e^{-2\pi tx} \quad (61)$$

上記はデータ数の増大に伴い, N^2 で計算量が増大する. そのため, さまざまな方法で高速に計算する高速フーリエ変換 (FFT) が開発された. 例えば, Cooley らのバタフライ演算が挙げられる[42]. 本研究では FFT を使用する.

まず, 重量車での結果について, 前輪後輪の加速度を図 2.8 に, その FFT 結果を図 2.9 に示す. 青が健全時, 赤が損傷時を示す. 左から前輪, 後輪データを示す. 横軸はその時の前輪位置を示す. 加速度波形と FFT の結果を見る限り, 明らかな差異はない. 卓越した振動数は 10~15Hz付近に存在している.

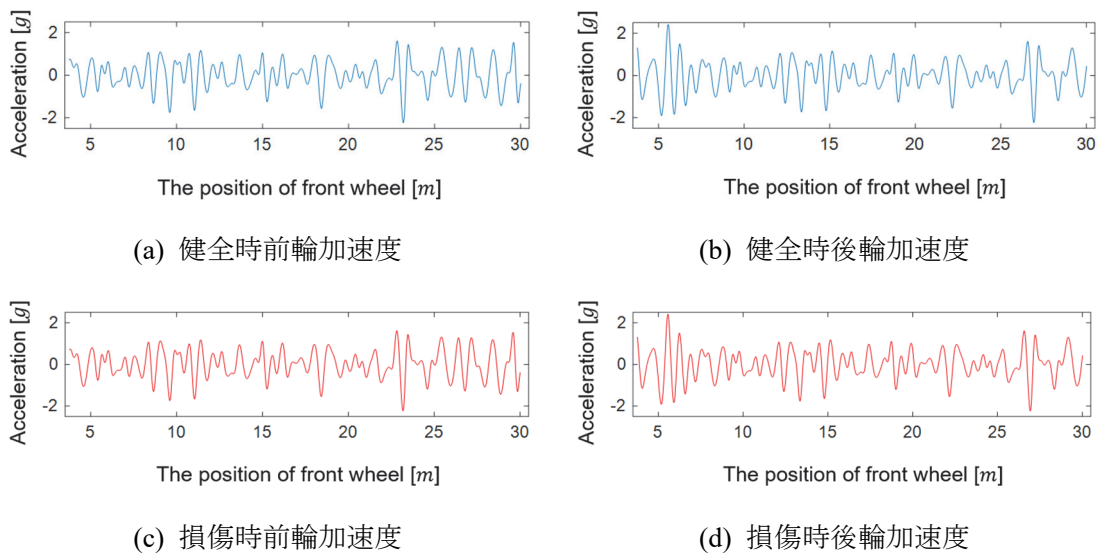


図 2.8 ばね下前輪後輪加速度 (青：健全，赤：損傷)

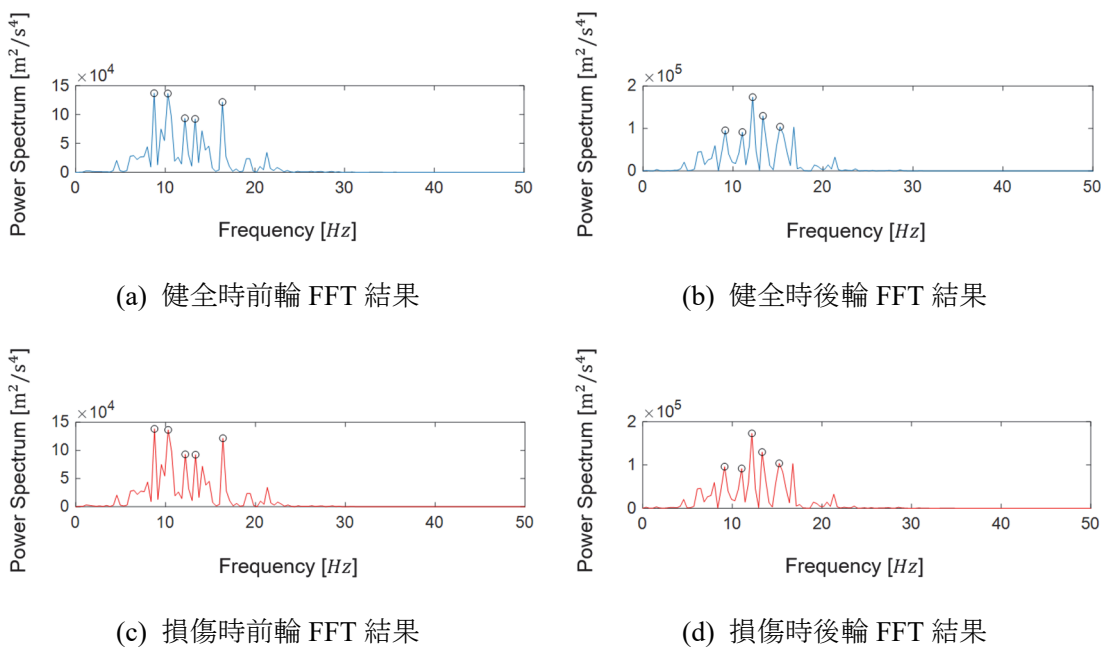


図 2.9 ばね下前後輪 FFT 結果 (青：健全，赤：損傷)

次に、軽自動車を想定した実験での加速度データを図 2.10 に示す。また、FFT の結果についても図 2.11 に示す。加速度波形は、ほとんど区別がつかないことがわかる。FFT 結果から 5~10Hz の間にピークが存在するため、対象となる実験橋梁の 10Hz 前後が出ていることがわかる。

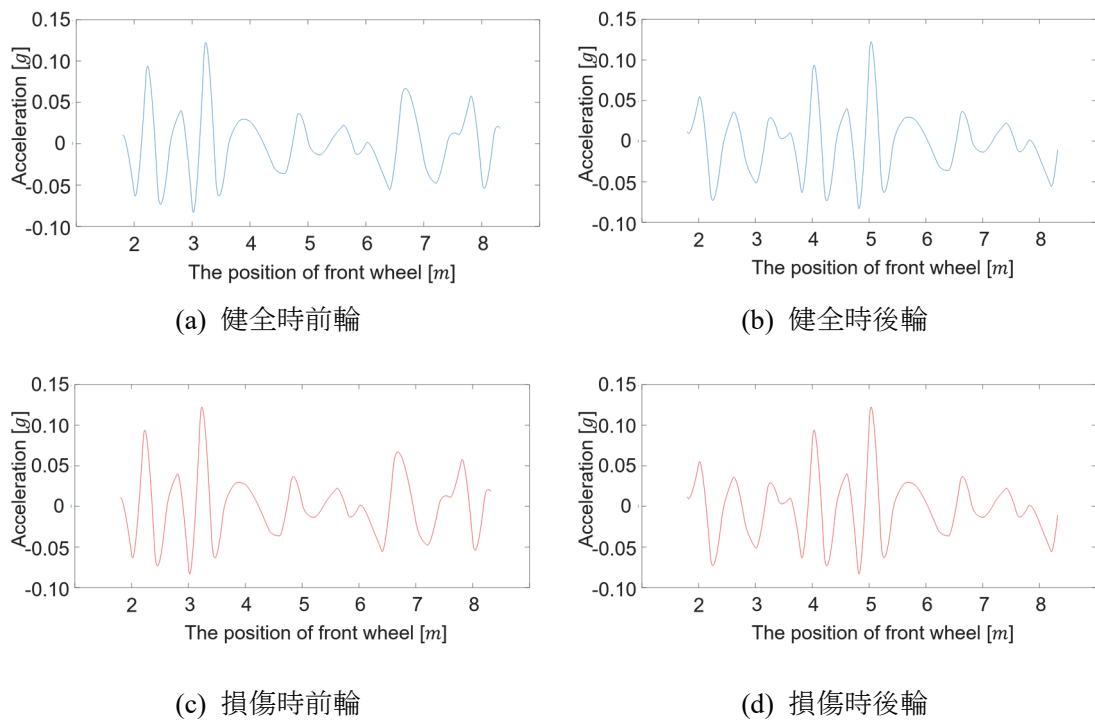


図 2.10 速度 2.20m/s での健全時と損傷時（剛性低下率 80%）の加速度波形

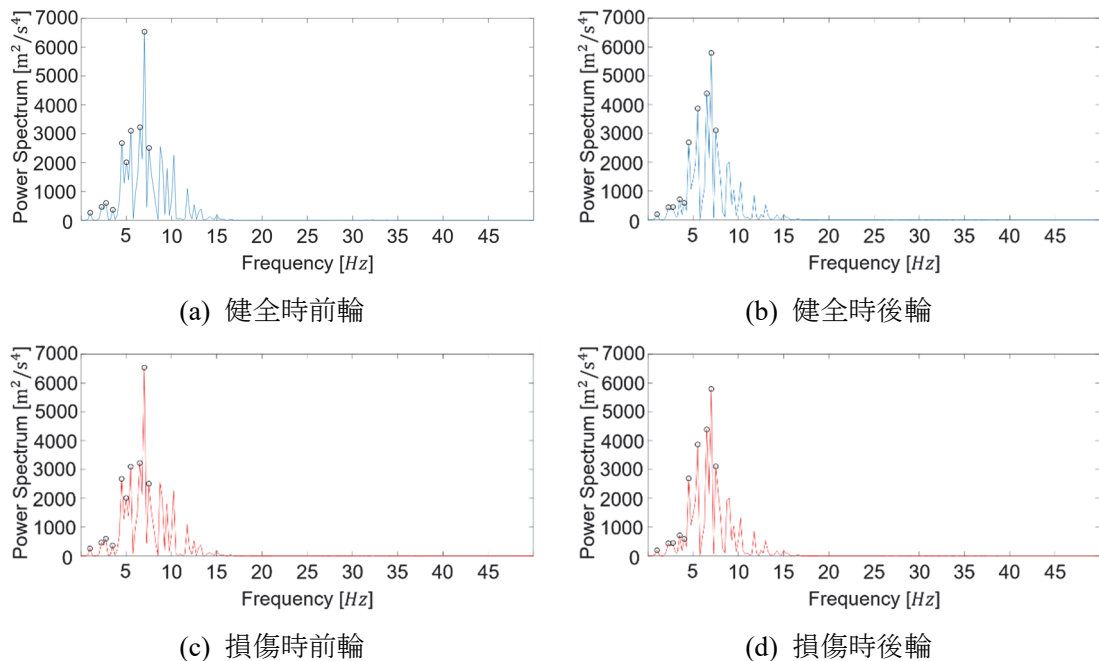


図 2.11 速度 2.20m/s での健全時と損傷時（剛性低下率 80%）の FFT 結果

2.2.2. SSMA の適用

(1) SSMA の導出過程

一般に、モード解析理論で想定される橋梁振動の計測値は、固定点で得られる。一方、車両振動に含まれる橋梁振動は、車両走行に伴い計測位置が時間変化する移動点での計測値

である．そこで，基底関数を導入 (図 2.12) し，移動点 $x = \tilde{x}_i(t)$ での車両振動の計測値 $\tilde{y}_i(t)$ から，仮想した固定点 $x = \hat{x}_i$ での推定値 $\hat{y}_i(t)$ を求める．

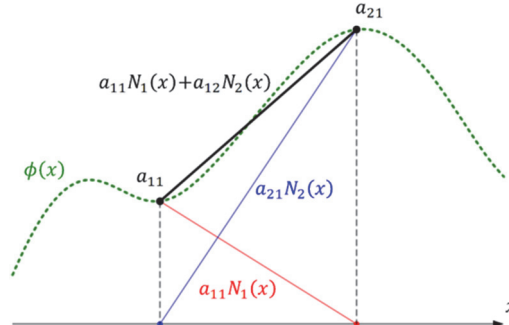


図 2.12 内挿の概念図

k 次のモード形状を $\phi_k(x)$ ，基準座標を $q_k(t)$ とおくと，橋梁振動は(1)式のように求められる．

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (62)$$

ここで， n は考慮する最大モード次数であり，センサ数と一致させる．(1)式より，移動計測点 $x = \tilde{x}_i(t)$ における橋梁変位は，

$$\tilde{y}_i(t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(\tilde{x}_i(t)) q_k(t) \quad (63)$$

と表される．ただし， $\tilde{\mathbf{y}}(t) = [\tilde{y}_1(t) \ \cdots \ \tilde{y}_n(t)]^T$ とおく．車上計測点の数が 2 つのとき，考慮できる最大モード次数も $n = 2$ となる．一方，固定計測点 $x = \hat{x}_j$ における k 次のモード形状を \hat{A}_{jk} とすると，以下のようなになる．

$$\hat{A}_{jk} = \phi_k(\hat{x}_j) \quad (64)$$

つづいて， $\phi_k(x)$ を内挿によって離散化する．すなわち，連続関数であるモード形状 $\phi_k(x)$ を，基底関数と係数の組み合わせによって，近似的に表現する．ここで，基底関数を $N_j(x)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) とすると，

$$\phi_k(x) = \sum_{j=1}^n a_{jk} N_j(x) \quad (65)$$

ここで，基底関数が， $N_j(\hat{x}_j) = 1$ ，かつ， $N_j(\hat{x}_i) = 0$ (ただし， $i \neq j$) となる性質を示すと

き, $a_{jk} = \hat{A}_{jk}$ である. 本研究では, このような条件を満たす基底関数として, ラグランジュ関数を用いた. (5)式にラグランジュ関数 $N_j(x)$ を示す.

$$N_j(x) = \left(\frac{n+1}{L}\right)^{n-1} \prod_{\substack{l=1 \\ (l \neq j)}}^n \frac{x - \hat{x}_l}{j - l} \quad (66)$$

ただし, L は橋長を表す. 固定計測点は, 橋梁内の任意の位置に仮想できるが, モード形状の直交性を保証しやすいため, 本研究では橋梁の三分点とする. このとき, 近似したモード形状 $\phi_k(x)$ は次式のように表せる.

$$\begin{bmatrix} \phi_1(\tilde{x}_1(t)) & \phi_2(\tilde{x}_1(t)) \\ \phi_1(\tilde{x}_2(t)) & \phi_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(\tilde{x}_1(t)) & N_2(\tilde{x}_1(t)) \\ N_1(\tilde{x}_2(t)) & N_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (67)$$

移動計測点の座標を代入して得られる基底行列を $\mathbf{N}(t)$, モード形状行列を $\tilde{\Phi}(t)$ とすると, (6)式は次式のように行列表示できる.

$$\tilde{\Phi}(t) = \mathbf{N}(t)\hat{\mathbf{A}} \quad (68)$$

ここで, $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ を(2)式と(7)式を用いて表すと,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{N}(t)\mathbf{A}\mathbf{q}(t) \quad (69)$$

となる. 内挿の定義領域は, 前後の車輪がいずれも \hat{x}_1 と \hat{x}_2 の間にあるとき, すなわち車両後輪が \hat{x}_1 を通過してから ($t = t_1$), 前輪が \hat{x}_2 を通過するまで ($t = t_m$) とする. (8)式の両辺に $\mathbf{N}^{-1}(t)$ をかけると, 移動計測点での計測値から固定計測点での推定値が求まる.

$$\mathbf{N}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{y}}(t) = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t) \quad (70)$$

この操作 ($\mathbf{N}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{y}}(t)$) を本研究では空間補間という. また, $\mathbf{d}(t) = \mathbf{N}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{y}}(t)$ とおく. そこで, (9)式で求めた固定点での橋梁振動推定値に特異値分解を適用し, モード形状を推定する. 固定点での推定値を時刻 t_1 から t_m まで m 列並べたデータ行列を $\mathbf{M}(\in \mathbf{K}^{n \times m})$ とすると

$$\mathbf{M} = [\mathbf{d}(t_1) \quad \cdots \quad \mathbf{d}(t_m)] = [\hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t_1) \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t_m)] = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{Q} \quad (71)$$

となる. 特異値分解は任意の $n \times m$ 行列に適用できる.

一方で, (10)式のデータ行列 \mathbf{M} の特異値分解は, 以下のように表せる.








$$\mathbf{M} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (72)$$


ゼロとなる部分を省略すると、 \mathbf{U} ($\in R^{n \times n}$)、 \mathbf{V} ($\in R^{n \times m}$) は共に直交行列（ただし、 $\mathbf{V}\mathbf{V}^T = \mathbf{I}$ 、 $\mathbf{I} : n \times n$ の単位行列）、 $\mathbf{\Sigma}$ ($\in R^{n \times n}$) は特異値を対角成分にもつ対角行列である。また、 $\mathbf{\Sigma}$ の対角成分を大きなものから順に並べると、 \mathbf{U} 、 $\mathbf{\Sigma}$ および \mathbf{V} は一意に定まる。 \mathbf{U} は $\hat{\mathbf{A}}$ の、 $\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$ は \mathbf{Q} の推定値となる。ここで、 \mathbf{U} の1列目の成分が推定1次モード形状の値となるが、本研究では、車両の前軸と後軸にセンサがあるため、 $n = 2$ となり、その2点でのモード形状の振幅比を空間特異モード角 (SSMA) として、橋梁の評価指標とする。すなわち、 \mathbf{U} の*i*行*j*列の成分を U_{ij} として、以下のように表す。

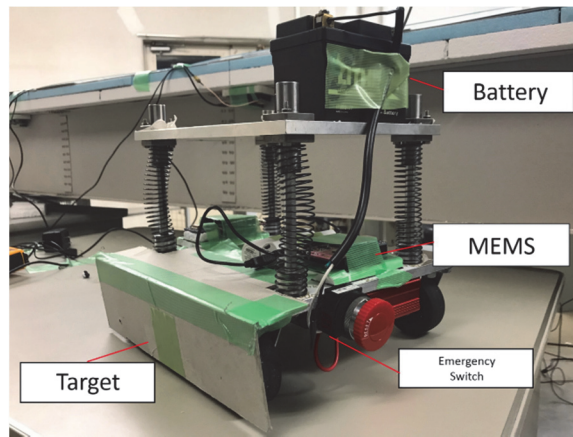
$$SSMA = \tan^{-1} \left(\frac{U_{21}}{U_{11}} \right) = \tan^{-1} \left(-\frac{U_{12}}{U_{22}} \right) \quad (73)$$

橋梁の等分割点において、正確にモード形状が推定されるとき、損傷が発生しても理論的に SSMA は変化しない。これは、損傷によって特異値分解が仮定する無相関性が破れることで、モード形状の推定精度が変化し、SSMA が反応するためである[35]。既往の検討[33]-[38]から、数値的実験的に SSMA の損傷検知指標としての適用性が確認されてきた。

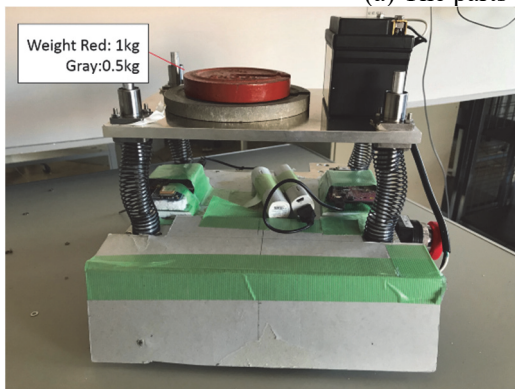
(2) 適用事例：紙製橋梁模型での繰り返し走行試験

橋梁は亀裂、ボルト弛緩、破断、腐蝕など、様々な損傷が発生する。実橋梁実験において、実際に破壊することは困難であり、また不可逆になってしまうため、検討を行ううえでも困難である。そこで、細部と固有振動数が一般的な鋼製橋梁と同様の紙製橋梁模型を作成し、様々な損傷を模擬可能か、また SSMA によって損傷検知可能か、検証を行った。以下に試験に用いた試験車両と紙製橋梁模型の諸元を示す（ 2.13、 2.14、 2.15、 2.6、 2.7）。 2.15 の赤丸部分の部材を除去することで、損傷を模擬した。路面凹凸についても、概念図（ 2.16）を示す。路面凹凸は既往の研究³³⁻³⁷を参考に作成した。また、路面の摩耗を防ぐため、橋梁表面にビニールカバーを設置した。加えて、前章で開発した計測システムを使用し、実証試験を行うこととした。

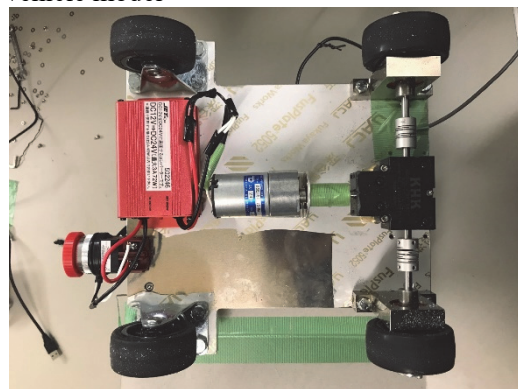
試験はおもりを追加することで車重を変化させ、SSMA の変化を確認する。損傷ケースと重量モデルの対応について、 2.8 にまとめる。固有振動数についても記載する。



(a) The parts of the vehicle model



(b) The vehicle model with the weights



(c) The bottom view

図 2.13 車両モデル



(a) Overview of bridge



(b) Bridge without deck



(c) Lateral bracing



(d) Horizontal girder

図 2.14 橋梁モデル

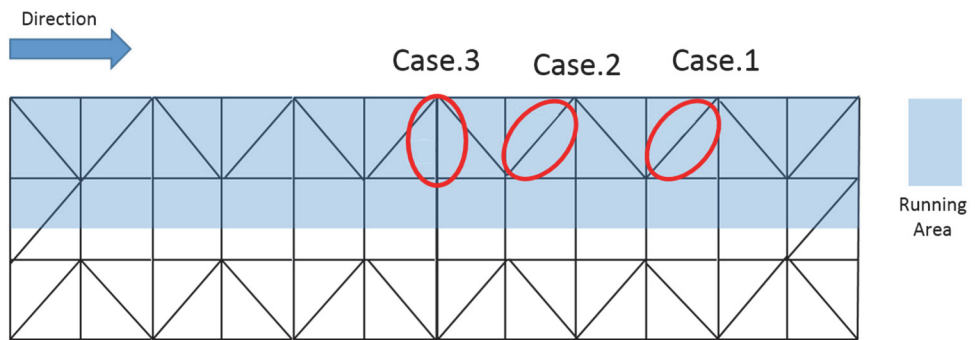


図 2.15 部材取り外し位置

表 2.6 橋梁諸元

Overview	Span Length [m]	4.24
	Natural frequency [Hz]	5.30
Deck	Thickness [mm]	52
Paper Material	Thickness [mm]	1
	Flange span [mm]	70
	Web Height [mm]	260

表 2.7 車両諸元

Overview	Length [mm]	270
	Wide [mm]	280
	Speed [m/s]	1.34
	Weight [kg]	6.92
	Natural Frequency (No weight) [Hz]	2.55

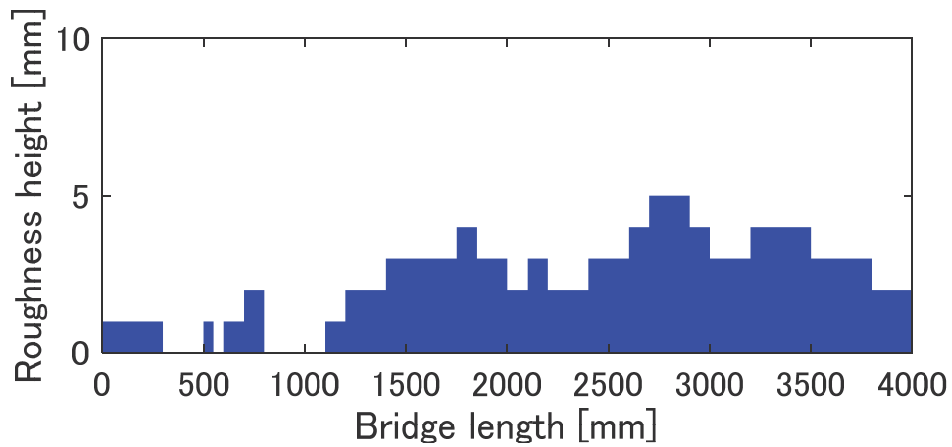
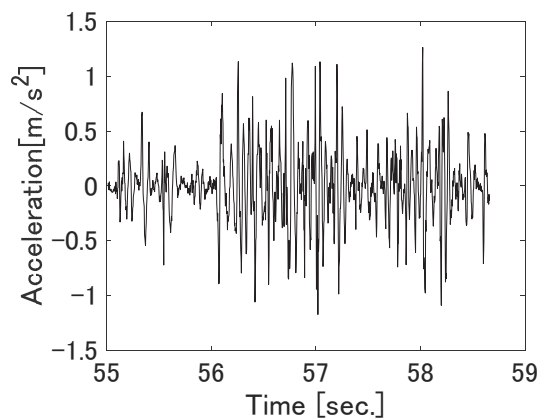


図 2.16 路面凹凸

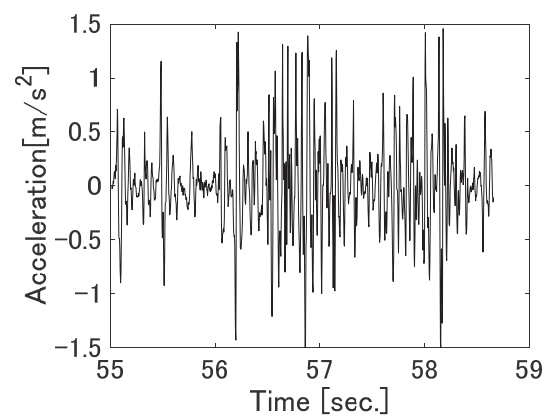
表 2.8 模型車両の実験モデル番号と損傷ケースごとの追加重量および設計固有振動数

Model No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bridge Status (Case No.)	Intact (Case 0)					Damage 1 (Case 1)				
Additional weight [kg]	0	0.5	1.0	1.5	2.0	0	0.5	1.0	1.5	2.0
Natural frequency [Hz]	2.55	2.28	2.07	1.92	1.79	2.55	2.28	2.07	1.92	1.79

Model No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Bridge Status (Case No.)	Damage 2 (Case 2)					Damage 3 (Case 3)				
Additional weight [kg]	0	0.5	1.0	1.5	2.0	0	0.5	1.0	1.5	2.0
Natural frequency [Hz]	2.55	2.28	2.07	1.92	1.79	2.55	2.28	2.07	1.92	1.79



(a) Front



(b) Rear

図 2.17 車両の加速度振動

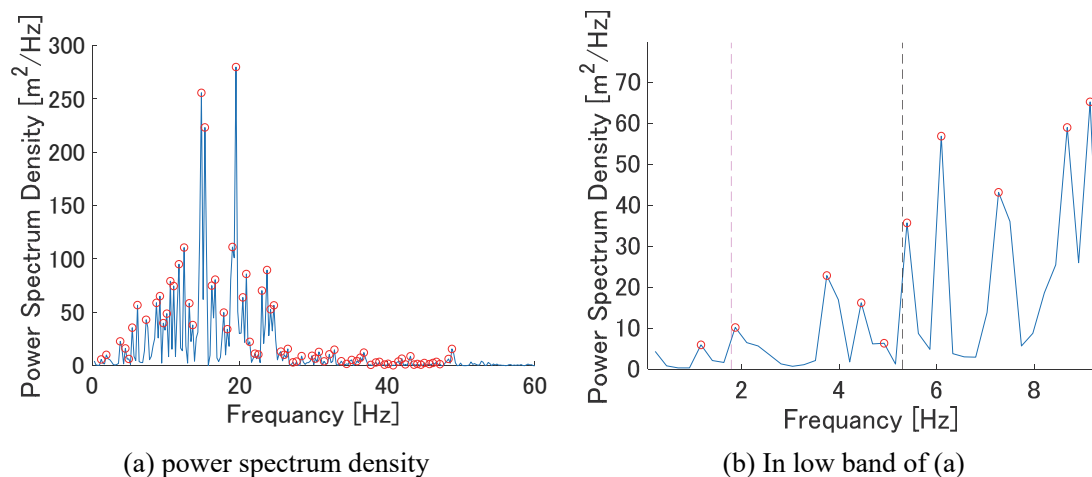


図 2.18 車両振動の FFT 結果

次に各損傷・重量ケースの SSMA について分析を行う。まず、車両および橋梁模型が設計された固有振動数を持つか、検証を行う。健全時で付加重量なし (model 1) のばね下加速度データと FFT の結果について、図 2.17、図 2.18 に示す。推定された橋梁と車両の固有振動数付近にピークを持っていることが確認できる。ただし、想定された周波数帯以外で多くのピークが生じており、高次周波数の影響もしくは橋梁との相互作用による卓越周波数の変化が考えられる。

各ケース・モデルでの SSMA を図 2.19 に示す。分散が大きく、損傷による SSMA の変化を推定することが困難である。これは入退出の時刻同期精度が低かったことが原因であることが分かった。そこで波形の相関を取り、一致させることで SSMA の分散を小さくできるか、検証を行った。結果について、図 2.20 にまとめる。

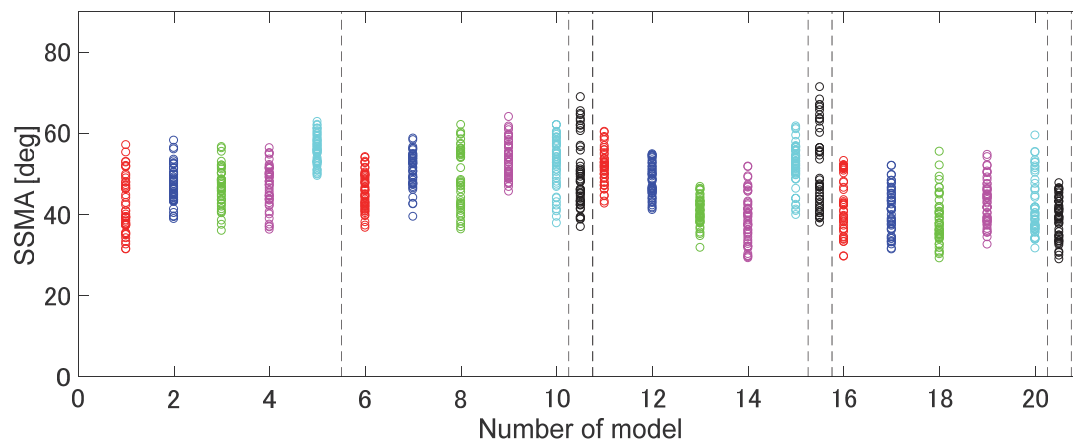


図 2.19 同期補正前の算出された SSMA

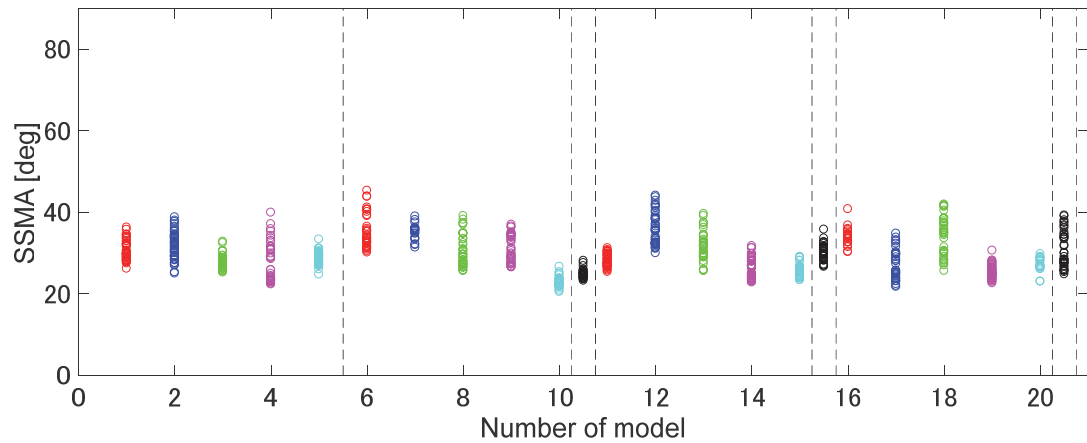


図 2.20 同期補正後の算出された SSMA

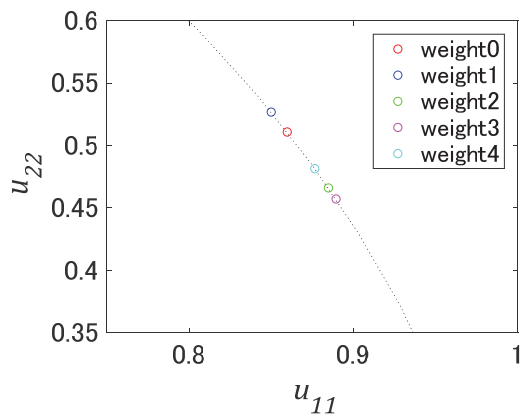
表 2.9 同期補正前後の SSMA の分散

Number of model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Before	47.0	19.7	20.6	26.1	13.0	20.6	18.0	55.1	20.1	38.7
After	6.0	10.9	2.5	23.1	2.6	4.0	15.0	11.1	2.0	2.3

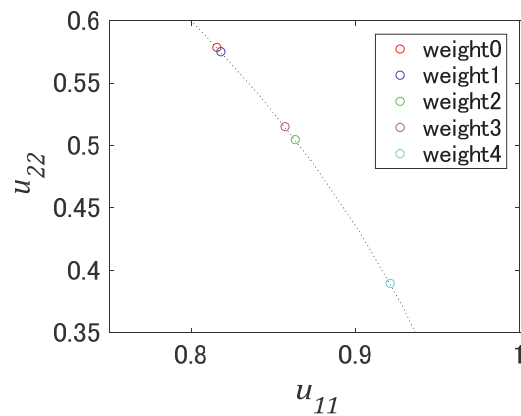
Number of model	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Before	15.8	10.7	36.1	27.2	52.2	7.4	28.9	49.8	71.2	99.0
After	12.8	6.5	2.1	4.9	13.7	2.6	3.1	1.4	3.9	19.9

基準波形を設定し、最も相関の高くなるよう波形を移動させ、算出を行った結果、分散が大きく減少した。以降はこの結果を分析する。(表 2.9)

各ケース内での SSMA の平均について、単位円状に表示したものを図 2.23 に示す。つか重量なしを weight0 とし、2kg 追加した場合を weight4 としている



(a) Case 0 : Intact



(b) Case 1: Damage 1

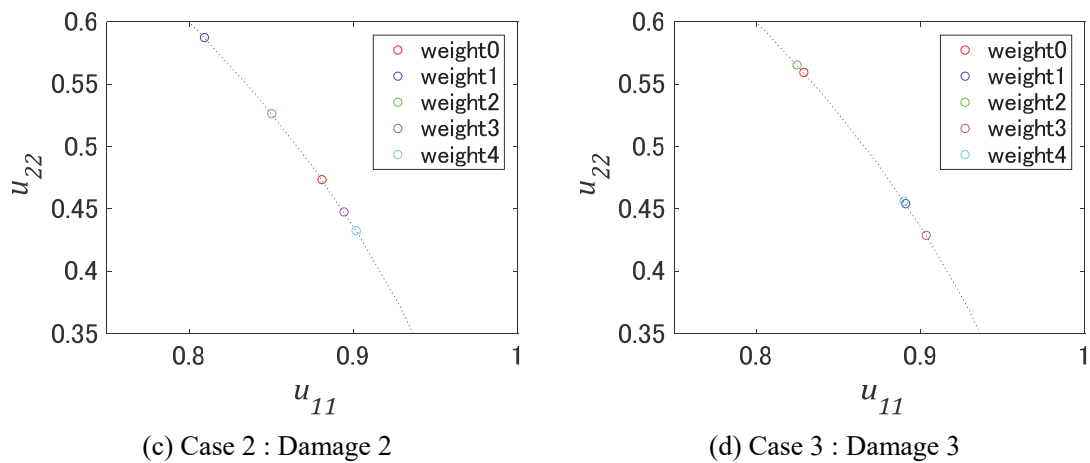


図 2.21 単位円上にプロットした SSMA の平均値

健全時を Intact, 損傷時を Damage とする. $\tan(SSMA) = u_{22}/u_{11}$ である. 健全時の SSMA 平均は, 重量に関わらず, ある程度の範囲にある. 損傷時では, 平均値はばらつくか, あるいは重量によって偏ることがわかる. また, (d)の結果から, (b), (c)と比べて, 最重量時での結果が最軽量時の結果に近づいていることがわかる. これは損傷が重篤化すると, SSMA は健全時の分布に近づくという, 既往の研究結果と一致する. ただし, (b), (c)の結果ではそれぞれ異なる重量で大きく変化することから, SSMA は重量によって変化し, また損傷によっては変化の度合いも異なることが予想できる.

ばらつきの大きな SSMA データから損傷影響を判別するため, 高次統計量を用いた評価を行うことがある. 以下に, 各橋梁状態 (Case 0–Case 3) での SSMA の平均, 分散, 歪度, 尖度についてまとめたものを示す (図 2.22). 横軸は車両重量を示し, 縦軸は各値を示す. また実線は各値から得られた近似直線を示す. 平均値は損傷によって異なる傾向を示していることがわかるが, 分散はそれぞれ大きく異なり, 単純に比較することは困難である. これは基準波形を用いた同期の補正が不十分であったことも考えられるが, 走行経路や微妙な速度低下の影響も考えられる.

尖度の結果に注目すると, 損傷が最大 (Case 3) の場合において, 最軽量時が最も高くなった. これは特定の値に反応して高くなっていることを示している. また, 歪度の正負が逆転していることから, 平均値に対する分布の偏りが変化していることを示し, 重篤な損傷では重量変化によって感度が高められる可能性が示された.

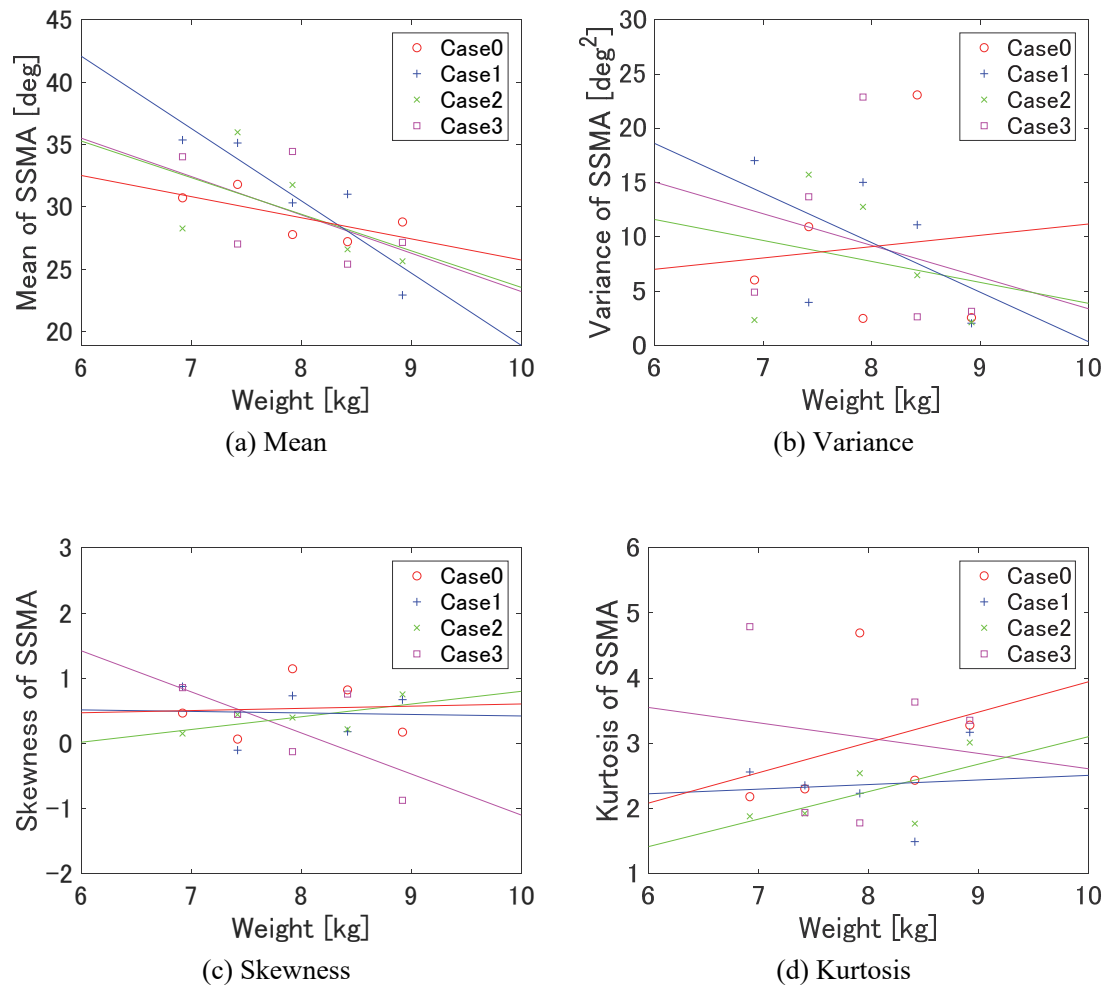


図 2.22 SSMA の諸統計量

(3) 適用事例：連続的な SSMA の算出

前項の試験において、車両位置の特定精度が SSMA の算定結果に影響を与えることが分かった。実運用においても、走行ごとの車両位置を完全に特定することは、現段階においては困難である。一方、SSMA は橋梁の損傷検知指標として用いることを想定して開発されたが、道路下の間隙についても、発見できる可能性が数値計算により明らかとなった。そこで、道路と橋梁、あるいは連続した橋梁を一貫して分析することが可能か、検証をおこなう。分析結果が分析対象の境界で大きく反応する場合、位置同期の誤差修正と同時に、道路下への SSMA 技術の拡張可能性が示される。

そこで、過去の検討で用いられた実験結果に対して、加速度データの範囲をずらしながら SSMA を算出することで、連続データに対し、空間的に連続な SSMA を算出した。以下に旧鳥飼大橋の実験概要を示す（図 2.23, 図 2.24, 図 2.25, 図 2.26, 図 2.27, 表 2.10）。旧鳥飼大橋は全長 540m の旧式ゲールバートラス橋であり、本実験では図 2.23 内赤箱で囲まれたスパンに損傷を加え、走行試験を行った。計測データは 2 スパン前から 1 スパン後ま

で定速で計測されており、途中スパン間のジョイント部分をまたぐ。このようなデータに対して、1スパンに相当するデータサイズをウィンドウサイズとして、ずらしながら SSMA を算出した。

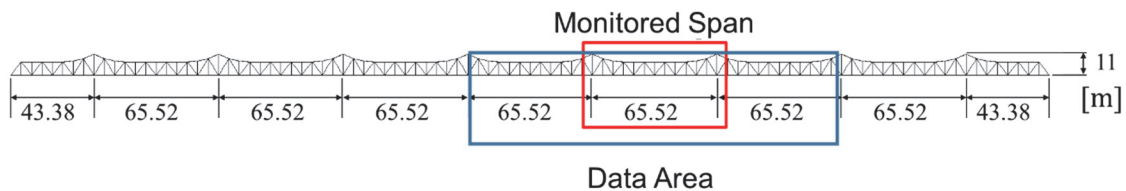


図 2.23 試験橋梁概観

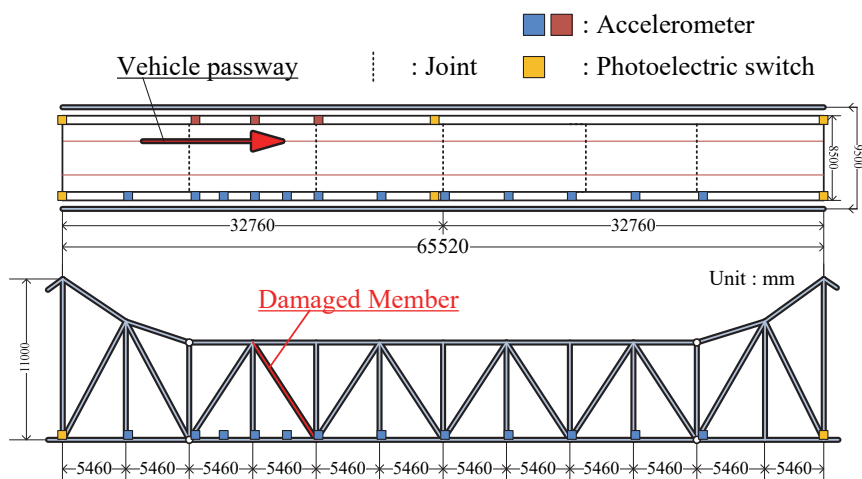


図 2.24 橋梁諸元および損傷・センサー位置

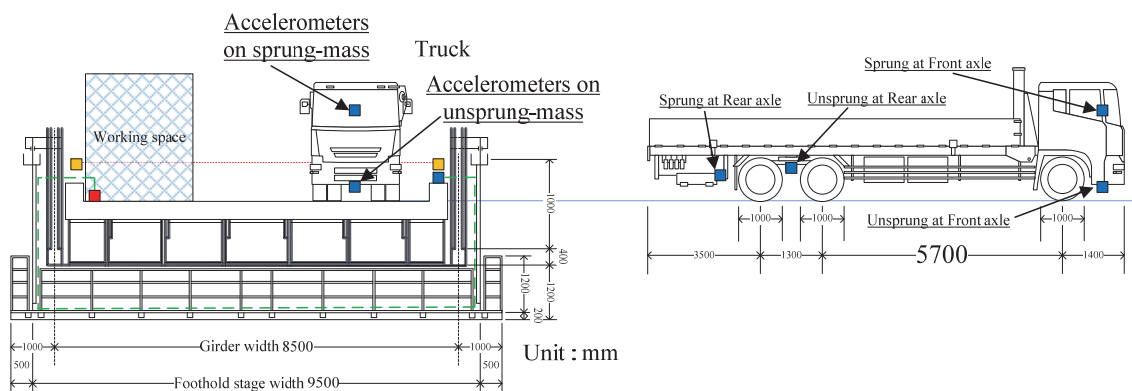


図 2.25 車両諸元

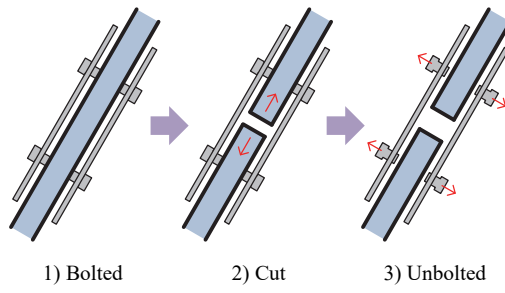


図 2.26 部材の切断方法



図 2.27 実験概要

表 2.10 実験時の重量および速度

Day	Front	Rear	Total	INT	DMG
	weight [kN]	weight [kN]	weight [kN]	Velocity: 40[km/h]	40[km/h]
1	87.4	165.8	253.2	1st	—
2	87.8	170.6	258.4	2nd,3rd	1st,2nd,3rd

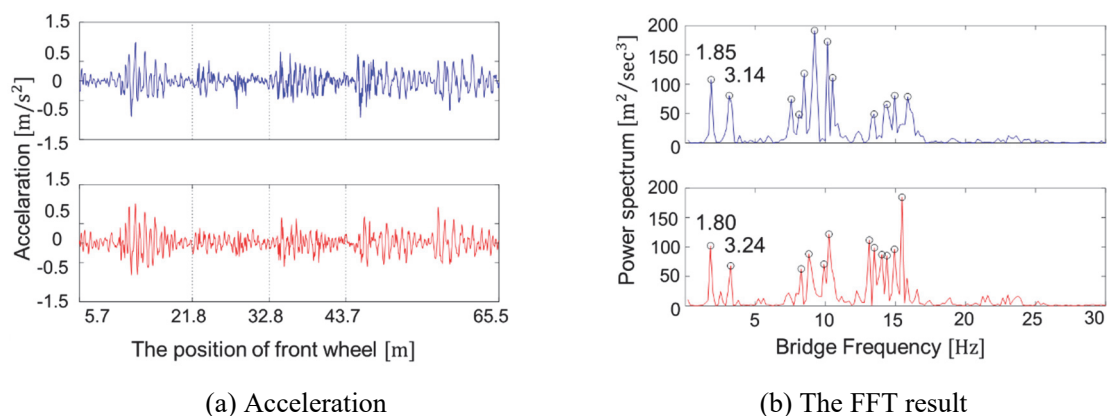


図 2.28 橋梁中点付近での加速度と FFT 結果

表 2.11 FFT 結果のピーク値

Status	Peak1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
INT	1.85	3.14	7.57	8.12	8.49	9.23	10.15	10.52	13.47	14.39	14.95	15.87
DMG	1.80	3.24	8.27	8.81	9.89	10.25	13.13	13.49	14.03	14.39	14.93	15.47

まず、橋梁上で計測された加速度データとその FFT 結果を図 2.28、表 2.11 に示す。データは橋梁中点での結果で、青は健全時、赤は損傷時を示す。加速度波形および固有振動数について、明らかな差異はない。

次に、車両上で計測された加速度データとその FFT 結果について示す(図 2.29, 図 2.30, 図 2.31, 図 2.32, 表 2.12)。健全時と損傷時、それぞれ 3 回ずつ計測したデータについて整理する。青は健全時のデータを示し、赤は損傷時のデータを示す。左が前輪、右が後輪を示す。横軸は損傷がある対象橋梁の開始地点を 0 とし、それぞれの車輪の位置を示す。加速度波形・FFT 結果ともに健全時と損傷時に明確な差を見出すことは困難である。このような明確な差の見られない振動データから何らかの変化を抽出して損傷を評価するためには、SSMA のような感度の高い指標が必要となる。

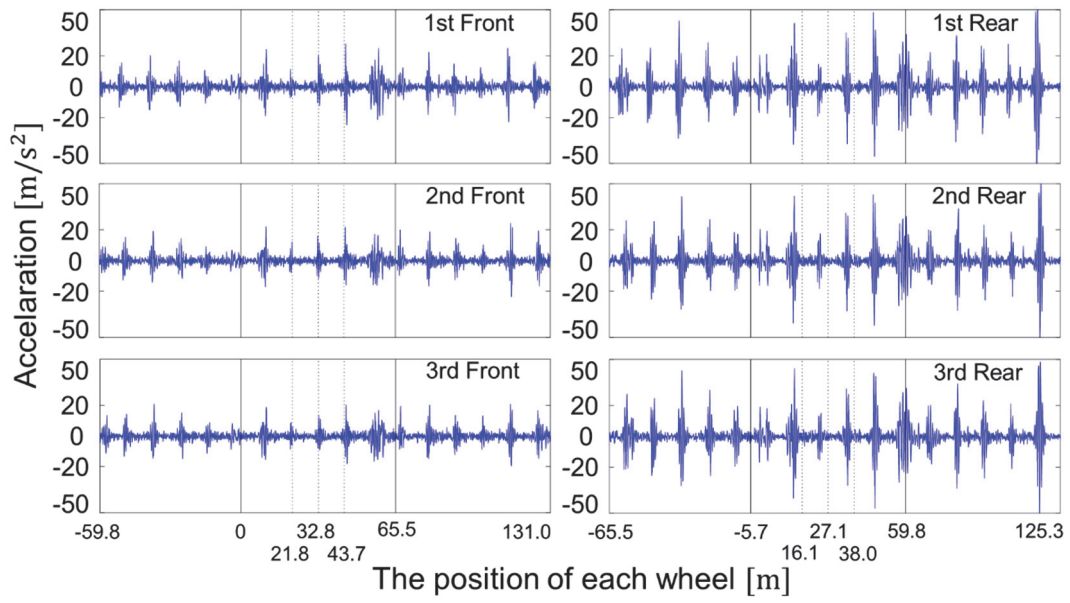


図 2.29 健全時の車両前後輪ばね下の加速度

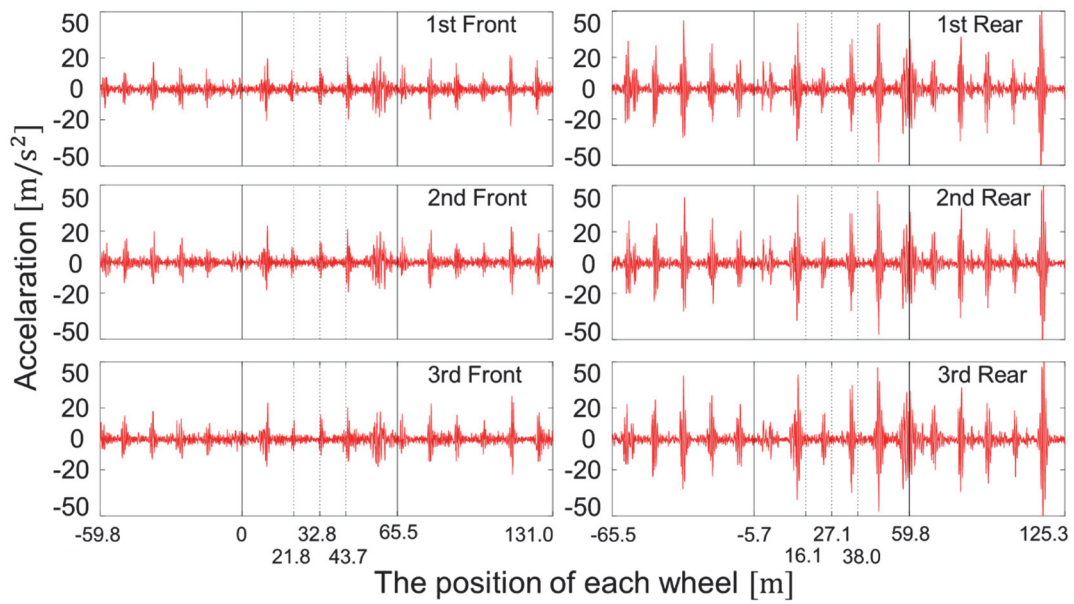


図 2.30 損傷時の車両前後輪ばね下の加速度

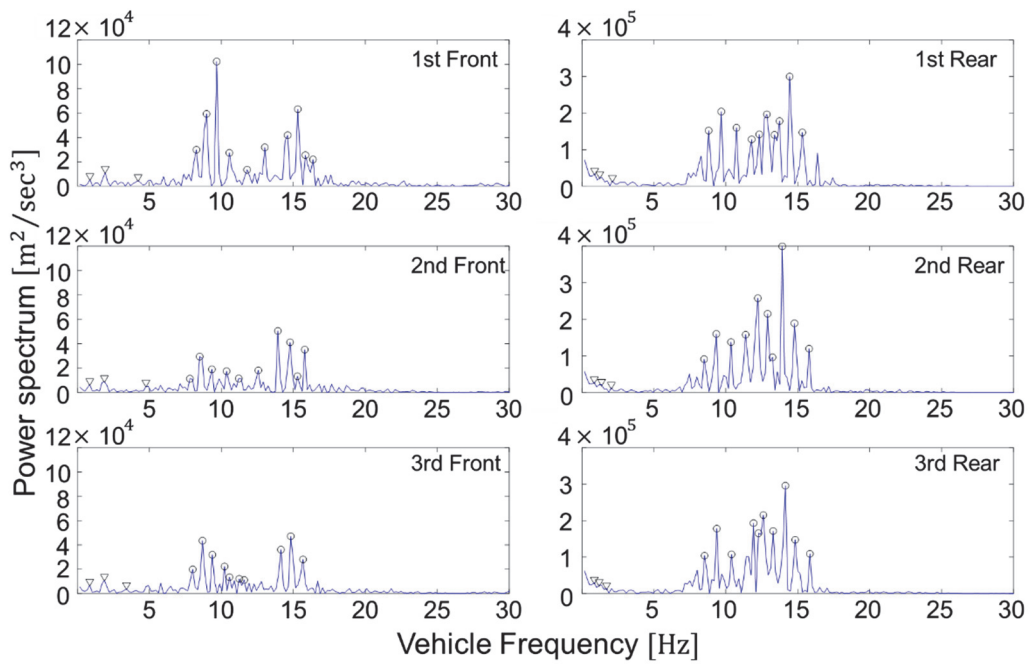


図 2.31 健全時の車両前後輪ばね下加速度の FFT 結果

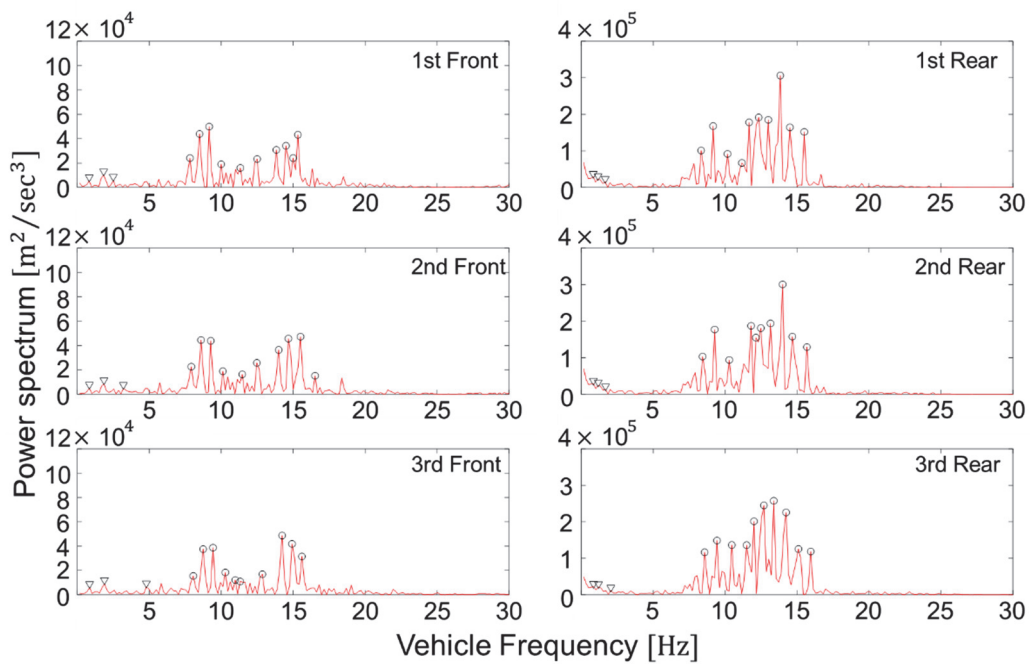


図 2.32 損傷時の車両前後輪ばね下加速度の FFT 結果

表 2.12 それぞれの FFT 結果のピーク値

Status		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
INT	F	0.88	1.94	4.23	8.27	8.98	9.68	10.56	11.80	13.03	14.61	15.32	15.85	16.37
	F	0.85	1.87	4.75	7.81	8.49	9.34	10.36	11.21	12.56	13.92	14.77	15.28	15.79
	F	0.85	1.87	3.41	8.01	8.69	9.37	10.22	10.56	11.24	11.58	14.14	14.82	15.67
	R	0.88	1.23	2.11	8.80	9.68	10.74	11.80	12.32	12.85	13.38	13.73	14.44	15.32
	R	0.85	1.36	2.04	8.49	9.34	10.36	11.38	12.22	12.90	13.24	13.92	14.77	15.79
	R	0.85	1.19	1.70	8.52	9.37	10.39	11.93	12.27	12.61	13.29	14.14	14.82	15.84
DMG	F	0.83	1.83	2.50	7.83	8.50	9.17	10.00	11.33	12.50	13.83	14.50	15.00	15.33
	F	0.84	1.85	3.20	7.93	8.60	9.27	10.12	11.47	12.48	14.00	14.67	15.51	16.53
	F	0.86	1.89	4.80	8.06	8.75	9.43	10.29	10.98	11.32	12.86	14.24	14.92	15.61
	R	0.83	1.17	1.67	8.33	9.17	10.17	11.17	11.67	12.33	13.00	13.83	14.50	15.50
	R	0.84	1.18	1.69	8.43	9.27	10.29	11.80	12.14	12.48	13.15	14.00	14.67	15.68
	R	0.86	1.20	2.06	8.58	9.43	10.46	11.49	12.01	12.69	13.38	14.24	15.09	15.95

SSMA を算出するデータウィンドウをずらしながら SSMA を算出し、連続的な SSMA の軌跡を得る (図 2.33)。結果を図 2.34 に示す。また、損傷前後をデータが含んだ直後のデータ付近を拡大した図 (図 2.35) を示す。横軸は使用したデータ区間の終わりでの前輪位置を示す。すなわち、65.5m 付近の点での SSMA が、損傷のある橋梁上データのみで算出されたものである。橋梁をまたいだデータがある程度生じると、SSMA が反応して急に変化していることがわかる。急激に変化する点については、計測時に橋梁上にあった作業用スペースや橋梁に取り付けられていた点検用足場による影響が考えられる。これは既往の数値検討の結果と一致し、SSMA が持つ感度の高さを示している。これらの結果から、連続的に SSMA を算出し、蓄積することで橋梁位置を特定できる可能性が示された。

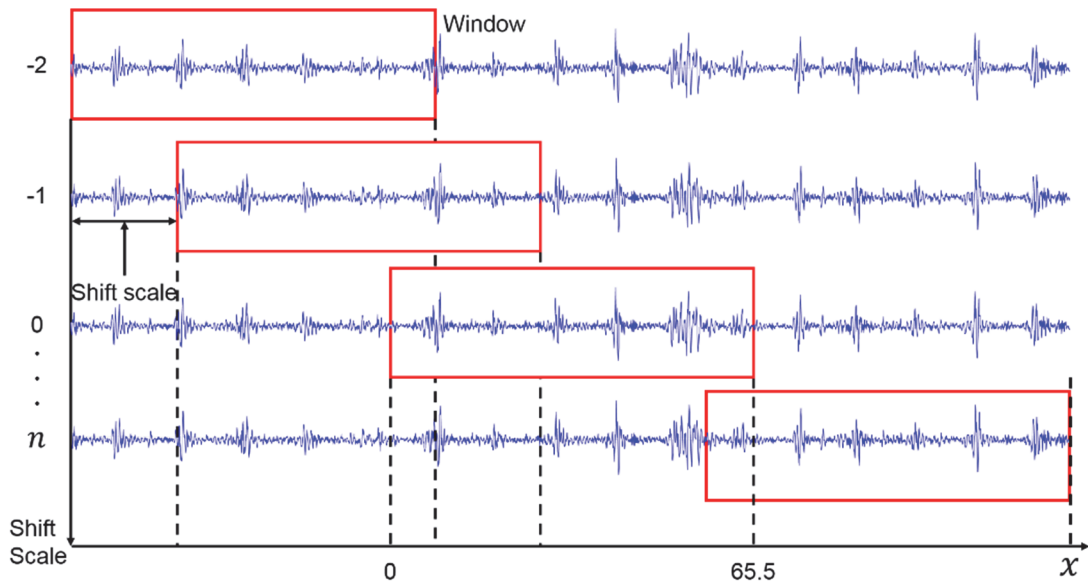


図 2.33 加速度データのシフト方法

このほか、損傷位置同定の可能性についても、検証を行う。損傷がある橋梁上のデータが含まれ始めた場合、あるいは損傷付近を通過する前後で SSMA が変化すれば、損傷位置の同定が可能であると考えられる。しかし、損傷橋梁全体として、損傷部分を含む橋梁データが含まれていても、健全時と損傷時で差異を確認できず、また傾向も同様であった。ただし、損傷付近のデータを含み始めた直後から健全時と損傷時で分布が分かれ始めることから、連続的な SSMA により損傷位置の同定が可能になると考えられる。



図 2.34 連続的な SSMA

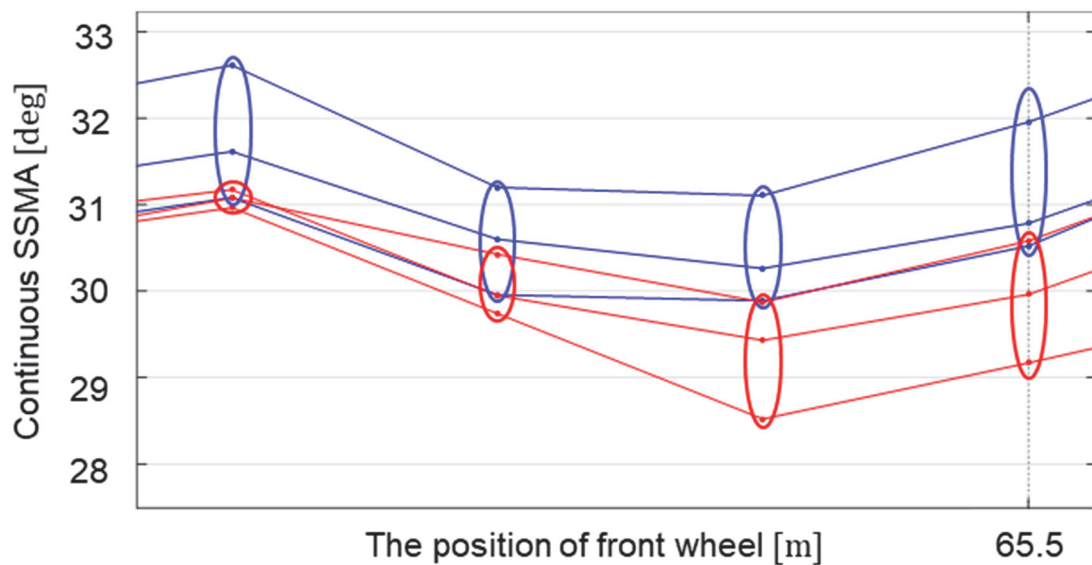


図 2.35 対象橋梁データのみが含まれる前後の連続的な SSMA

2.2.3. SSMA の限界

車両の運動方程式において、車両に入力される外力は車輪に入力される強制変位によるものと橋梁振動である。この時、強制変位は主に路面凹凸となる。路面凹凸は空間的な波形ととらえられるが、車輪の位置や車両速度の違いによって、時間的には異なる振動として車両振動へ入力される。そのため、まったく同じ車両と橋梁であっても、速度の違いにより SSMA が異なることが考えられる。すなわち、SSMA の正解値を算出するためには、車両と橋梁のすべてのパラメータを把握したうえで、完全に正確な路面凹凸の情報を有している必要がある。これは既に詳細点検と分析が完了していることを示し、現実的ではない。また、車両速度の影響は、損傷による影響より大きい。よって、SSMA を損傷指標として用いる場合、速度のばらつきが考慮できる統計的な分析手法が必要である。

中釜らは、模型実験で得られた SSMA 分布の統計量を算出し、比較することで損傷検知の可能性を示した[43]。この実験では、橋梁模型の上にレールを設置し、上に乗った車両をワイヤーでけん引して車両を走行させた。本来、走行速度が一定で、路面凹凸が一定であるならば、SSMA は一致するため、一つに定まるはずだが、観測ノイズ等の影響で結果は大きくばらついた。

以上から、実環境での SSMA の適用を考えると、車両速度の変化や観測ノイズ等の不確定要因による差異はより大きくなると考えられるため、実環境に近い条件で損傷検知の可能性を検証する必要がある。

2.2.4. 提案手法

(1) MD の適用事例と SSMA への適用意義

SSMA の速度依存性を考慮したうえで、損傷検知を可能にするため、統計的な分析指標を適用する。本研究では MD (Mahalanobis Distance : Mahalanobis 距離) を速度と SSMA の関係に適用する手法を提案する。

MD は Prasanta Chandra Mahalanobis により考案された、2つのデータ群 X と Y がどれほど異なるかを表す特徴量である[44]。工学分野における MD の利用については、品質工学分野における MTS (Mahalanobis-Taguchi System : マハラノビス・タグチシステム) [45]等で用いられている。工業製品への適用事例は古くからあり、自動車用クラッチディスクの外観検査技術として適用したケースがある[46]。この検討では、クラッチディスクを回転させ、歯車部分である凹凸を CCD カメラで撮像し、画像素子ごとの濃淡を得ることができる。濃淡は横軸位置の波形となり、この情報を MTS 法の応用のひとつである音声パターン認識技術 [47]を用いて分析することで、外観から不良品を発見することに成功した。

また、その特徴から機械学習等による判別分析やクラスタリングにも用いられている。たとえば、小早川らによるクラスタリング手法である k -means 法への適用である[48]。クラスタリングは複数のデータから類似のもの同士を集めて集合化する。この際、類似度の判定にはユークリッド距離など、さまざまな手法が用いられる。この判定に MD を利用することで、クラスタ性能の向上が確認されている。また、多変量解析に用いられることから、多目的の距離計量学習への適用性を期待して、女鹿野らが採用している[49]。そのほか機械学習分野における適用事例として、Ye らによる k 近傍法での各対象の位置ベクトルの算出に MD を用いることで性能向上がみられるかの検討[50]や、Xiang らにより、ラベルデータを保持しながら MD による次元削減を期待して、 k 近傍法への適用がなされたものもある[51]。

土木・橋梁分野における MTS は、阿曾らにより、橋梁アセットマネジメントの指標として提案されている。橋梁アセットマネジメントでは、劣化予測や補修の優先順位決定時に、橋梁の健全度を評価する必要がある。ここで一般的に、構造部材ごとの検査結果を点数化して評価し、各部材あるいは橋梁全体の健全度評価を行う。橋梁の全体的な健全度評価を行う場合、点検者が行った評価結果をもとに、加重計算法及び減点法によって最終的な評価が決められてきた[9][52]。そこで MTA 法を用いることで、これら項目間の重み係数をそれぞれ求めるのではなく、専門家以外でも橋梁健全度評価を可能にする手法について提案した[52]。

損傷検知そのものに適用を試みた研究では、先にも挙げた金らの検討[27]がある。

これらの検討から、MD を用いた多変量データ分析の有効性は明らかである。また、SSMA は速度以外でどのような因子の影響を受けるか明らかでなく、今後新たな因子を追加することを考慮すると、拡張性の点でも秀でていくことがわかる。

一次元のデータ群の MD について、文献[44][47]を参考に、定義を示す。今、ある正規母集団 N の確率密度関数 $P(x)$ は平均 m 、分散 σ^2 で定義される。ここからサンプル x_1 を取り出す。この時、平均から x_1 まで距離を、 σ で基準化した距離 d_1 は以下のように示せる

$$d_1 = \frac{|x_1 - m|}{\sigma} \quad (74)$$

式(74)から、一次元のデータ群の MD は標準偏差 σ で基準化することで、補正された中心からの距離であることがわかる。(図 2.36)

次に、二次元以上の MD の定義について示す。まず、一次元の正規母集団の確率密度関数を以下に示す。

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x - m)^2}{\sigma^2} \right] \quad (75)$$

式(75)において、自然対数の肩に、一次元 MD の平方距離があることがわかる。このことからわかる通り、 n 次元の MD は n 次の正規分布関数の肩と等しくなる。ここで、式(75)における MD の平方距離部分を D_1^2 として、以下のように表す。

$$D_1^2 = \frac{(x - m)^2}{\sigma^2} = (x - m)\sigma^{-1}(x - m) \quad (76)$$

式(76)を n 次元に拡張した場合の MD を D_n^2 とし、 n 次元変数ベクトルを $\mathbf{X}(\in R^n)$ 、各次元での平均値を $\mathbf{m}(\in R^n)$ とすると、以下のように表せる。

$$D_n^2 = (\mathbf{X} - \mathbf{m})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{m}) \quad (77)$$

ただし、 $\mathbf{C}^{-1}(\in R^{n \times n})$ は分散共分散行列で以下の通り。

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & -\sigma_{12} & \cdots & -\sigma_{1n} \\ -\sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & -\sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\sigma_{n1} & -\sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (78)$$

上記から、MD は n 次元のデータを容易にスカラーに圧縮可能であることがわかる。また、正規分布を仮定していることがわかるが、速度は制限速度の関係で正規分布になると予想できる。また、SSMA が不確定要因によって変動した場合でも、データ数が十分であれば、正規分布に則ると考えられるため影響は少ないと考えられる。本研究では、平均と分散を基準となる速度と SSMA のデータ群の値を使用し、損傷判定を試みるデータ群の MD を算出する。

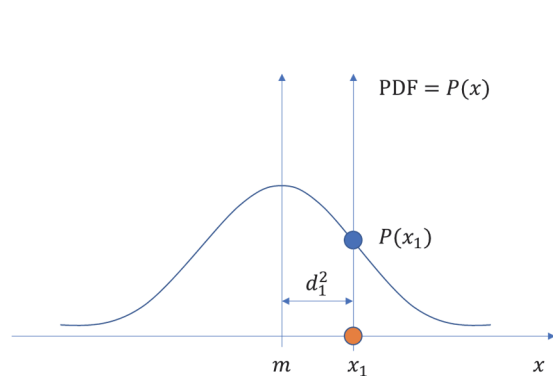


図 2.36 1次元データ群の MD

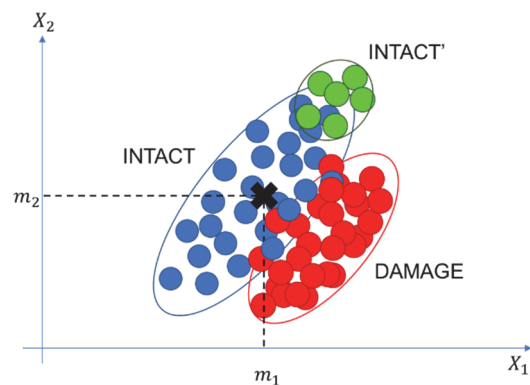


図 2.37 2次元データ群の MD と損傷判定

ここで、本研究で用いる MD について立式する．今、ある橋梁状態での SSMA と速度をデータ群マトリクス \mathbf{x} ($\in R^2$, SSMA と速度) とする． \mathbf{x} の平均 $\boldsymbol{\mu} = E[\mathbf{x}]$ ($\in R^2$), 分散共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma} = \text{Cov}[\mathbf{x}]$ ($\in R^{2 \times 2}$) が求められるので、実測データ \mathbf{y} ($\in R^2$) との MD は、

$$d = \sqrt{(\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})} \quad (79)$$

と表される．

(2) 数値シミュレーション結果への適用

乱数を付与する前の SSMA と速度の関係について、図に示す．健全時と損傷時の SSMA の差をそれぞれ算出し、図 2.38 に示した．横軸は速度を示す．ただし、可視性を高めるため、間隔は 0.05m/s とした．凡例は剛性低下率を表す．5 の時は、5% の剛性低下が生じていることを示す．損傷が大きいほど、速度の上昇に応じて傾きが大きくなっていることがわかる．これは既往の研究[36][37]で行われた数値計算の傾向と一致する．また、各橋梁状態で、速度の変化に応じて、それぞれ異なる傾向を持つことがわかる．ただし、実際には観測ノイズにより SSMA は分布を持つと考えられる．観測ノイズは、得られた加速度データにそれぞれの値の最大 5% (R05), もしくは 10% (R10) の値を加えることで再現することとした．以下に速度と SSMA の関係と、速度の中央値付近での拡大図を、R05 については図 2.39 と図 2.40, R10 については図 2.41 と図 2.42 に、それぞれ示す．凡例は剛性低下率を示す．付与前と同様の傾向を持つが、分布をはっきりと区別できなくなっていることがわかる．また、ノイズの大小による差異は、あまり見られないことがわかる．これら結果の MD を算出し、実験と同様の傾向が確認できるか、検証を行う．

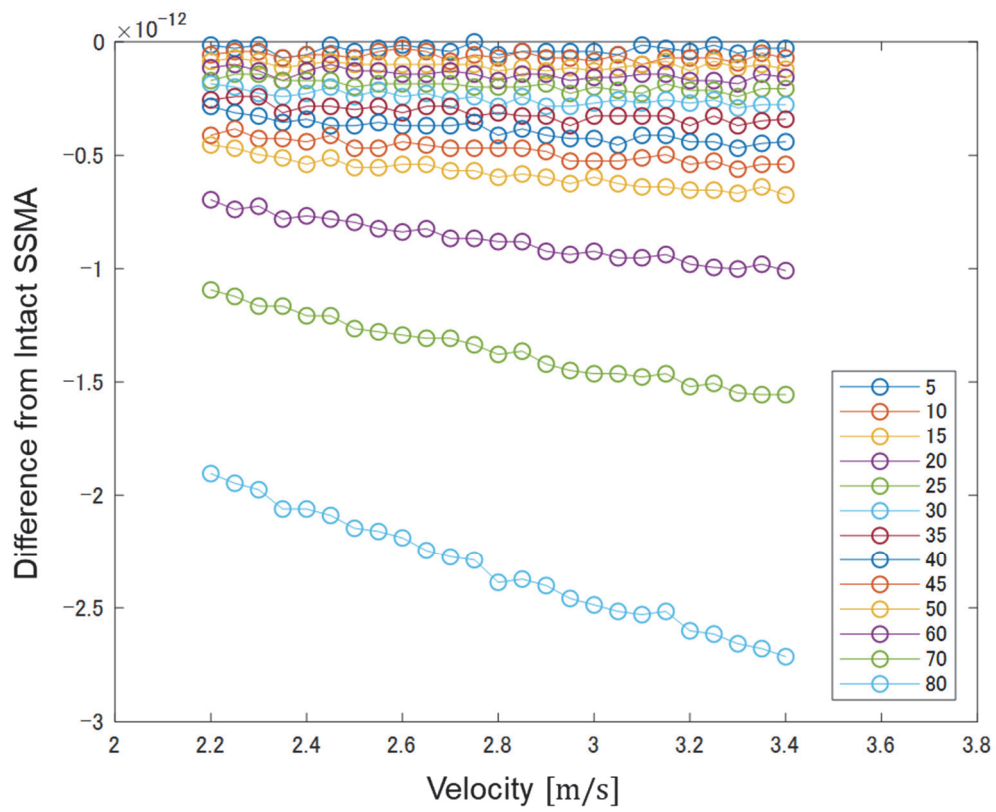


図 2.38 健全時 SSMA との差

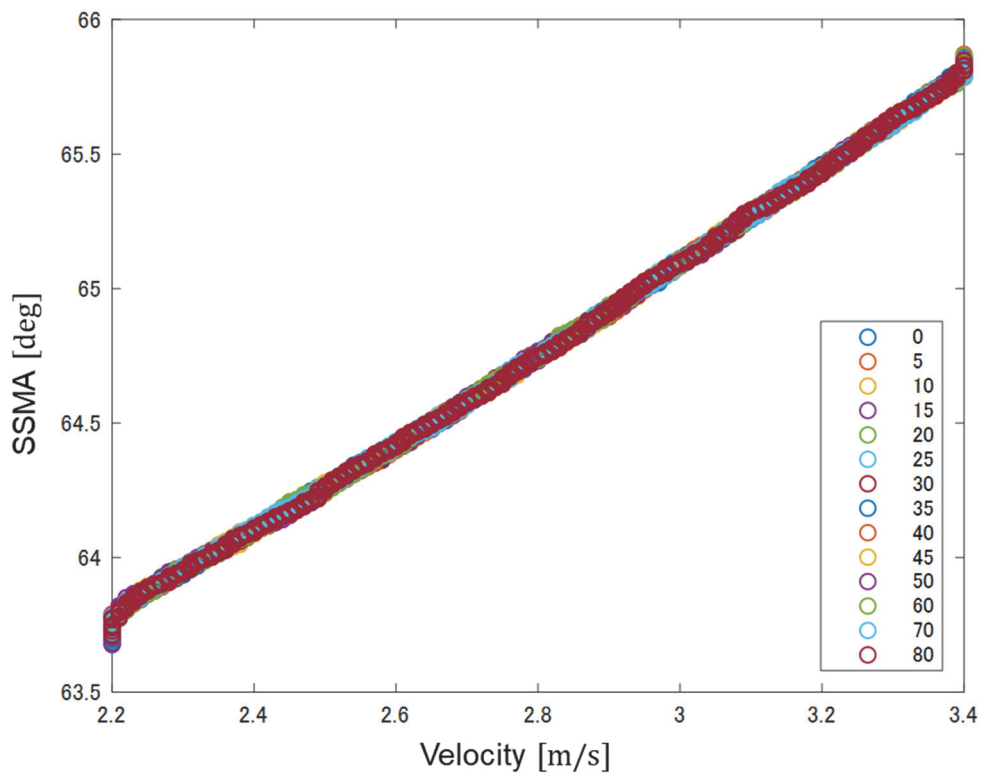


図 2.39 R05 での SSMA の分布

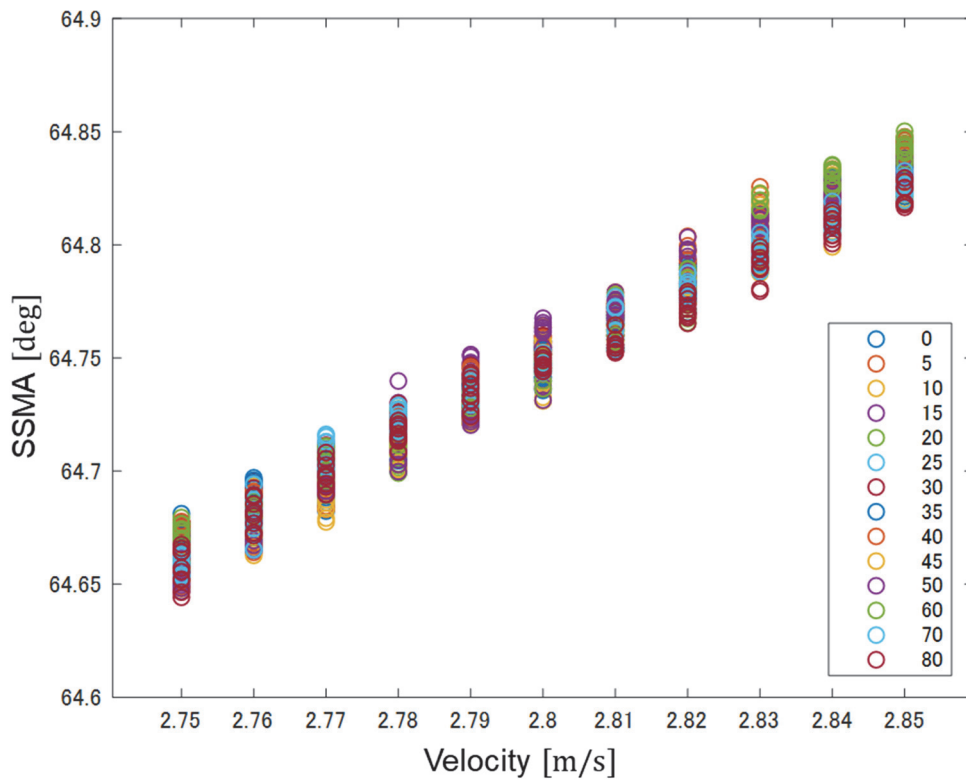


図 2.40 R05 での SSMA 分布の拡大図

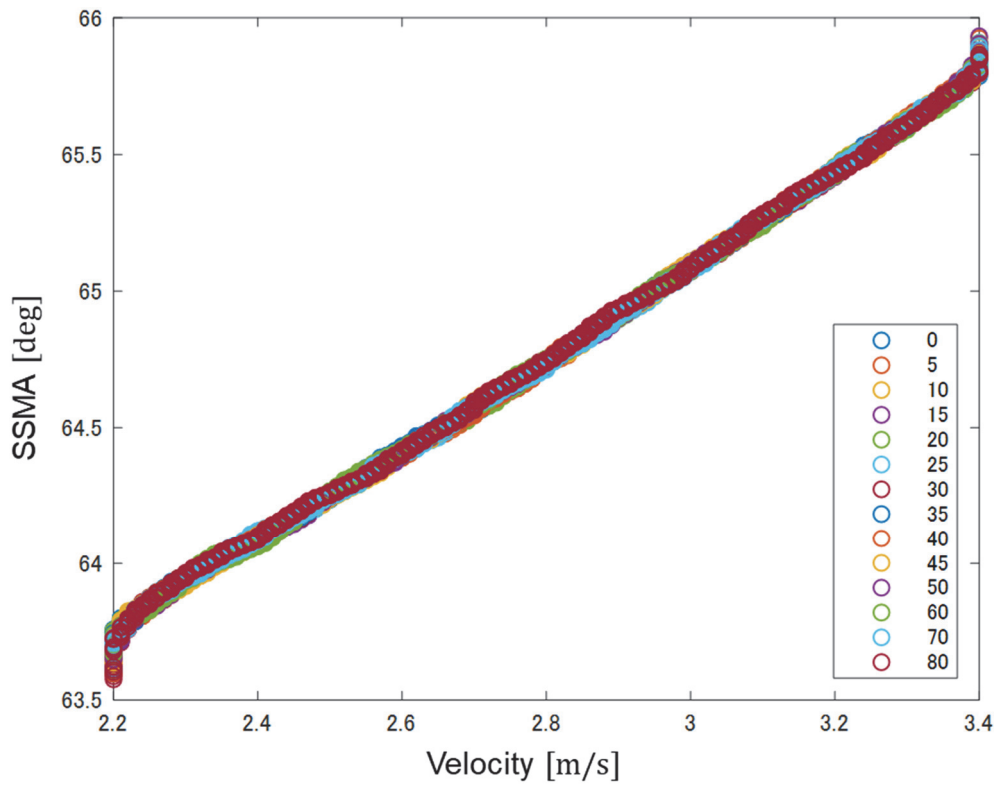


図 2.41 R10 での SSMA の分布

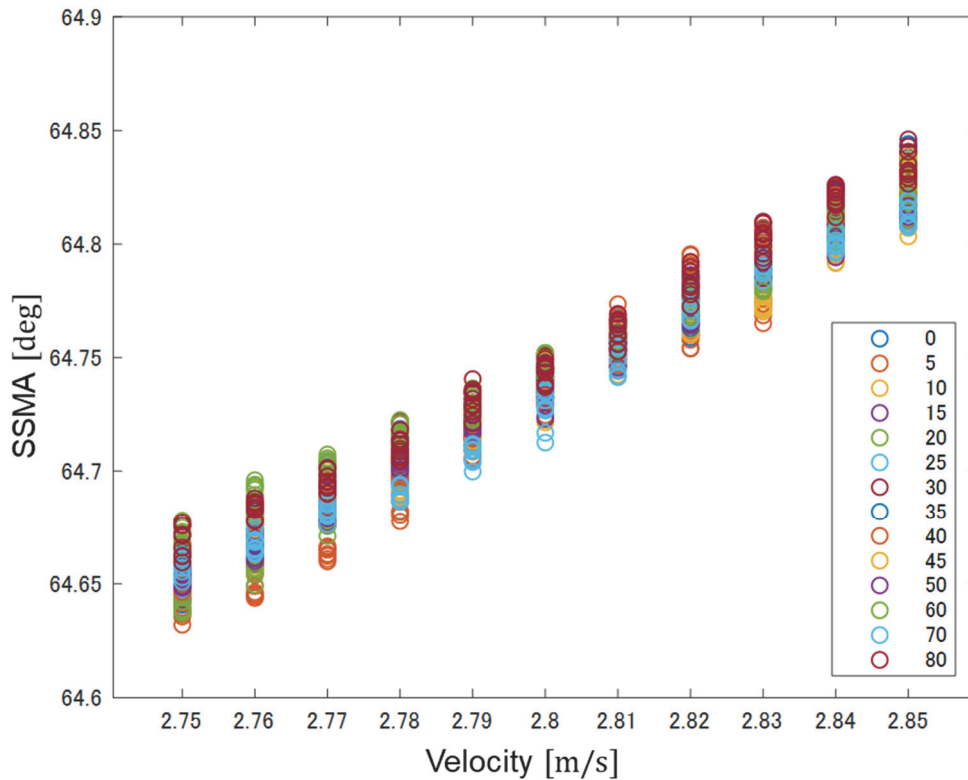


図 2.42 R10 での SSMA 分布の拡大図

(3) 妥当性検証

R05 での MD の平均値について表 2.13 にまとめる。縦軸が基準となるデータ群，横軸が比較対象となるデータ群を示す。剛性低下率 0%は健全時を示す。青枠内がデータ群を半分に分割した場合の MD を示す。得られた MD が，左端と最下部の青枠内の MD より大きい場合，枠内を緑色に塗る。小さい場合，損傷検知に失敗したとして，黄色にする。

基準群が健全時と各橋梁状態での MD について分析する。-5%~-25%まで，損傷検知に失敗していることがわかる。これは損傷が軽微すぎると考えられる。ただし，実験で用いたボルト弛緩による剛性低下を詳細に把握し，比較することは困難であり，また剛性低下による損傷表現の妥当性についても明らかではないため，詳細な評価は今後検討が必要であると考えられる。-30%以上ではおおむね損傷検知に成功しており，既往の数値検討では困難であった-50%程度の剛性低下を検知しており，速度と SSMA の MD による損傷検知手法の有効性が示されていることがわかる。しかし，-60%で検知に失敗していることから，剛性低下によって卓越周波数が変化し，検知精度を低下させている可能性が考えられる。

次に，損傷している場合のデータを基準として，より損傷が大きいデータ群の MD について分析する。全体的に対象群が-25%以上で検知精度が上がっている。ただし，基準群が-25%を超えると急激に精度が悪化していることから，手法の精度を担保する閾値が存在することが考えられる。本検討では，少なくとも剛性低下-25%までのデータ群を得ている

表 2.13 R05 での MD 平均値による損傷検知結果

基準群														
0	2.00	1.89	1.95	1.99	1.90	1.83	2.10	2.09	2.05	2.17	2.29	1.96	2.06	2.09
-5		2.00	2.07	2.11	2.01	1.94	2.23	2.22	2.17	2.33	2.46	2.08	2.20	2.22
-10			2.00	2.05	1.96	1.88	2.17	2.15	2.11	2.27	2.38	2.03	2.14	2.15
-15				2.01	1.92	1.85	2.11	2.10	2.06	2.21	2.33	1.99	2.09	2.10
-20					1.98	1.93	2.23	2.22	2.18	2.30	2.43	2.07	2.18	2.22
-25						1.98	2.34	2.31	2.28	2.43	2.56	2.17	2.29	2.33
-30							2.00	1.99	1.95	2.08	2.19	1.88	1.97	1.99
-35								2.02	1.96	2.10	2.20	1.90	1.99	2.00
-40									2.02	2.16	2.27	1.94	2.04	2.04
-45										1.99	2.10	1.84	1.91	1.97
-50											2.01	1.76	1.83	1.88
-60												2.04	2.09	2.13
-70													2.00	2.05
-80														2.02
剛性低下率[%]	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-60	-70	-80
	対象群													

状態であれば、それ以降の剛性低下を検知できる可能性が示された。また、より多段階の検証が必要ではあるが、剛性低下-60%以上のデータ群であっても、それ以上の剛性低下ケースに対して損傷検知が成功しているため、検査の見逃しなど、明らかになっていない大きな剛性低下が生じている場合でも、損傷検知できる可能性が示された。

次に、R10でのMD平均値についてまとめた表 2.14 を以下に示す。色分けについてはR05と同様に行った。基準群が健全時と各橋梁状態でのMDについては-5%~-25%の間で損傷検知に成功しているが、乱数自体の影響が考えられるため、単純に精度が向上したとは言えない。ただし、R05と同様、-30%以上でおおむね損傷検知に成功していることから、乱数の影響があっても、健全時のデータ群を保有する場合、損傷検知が可能と考えられる。ただし、剛性低下している場合のデータ群を基準にした場合、R10では全体的に検知精度が低

表 2.14 R10 での MD 平均値による損傷検知結果

基準群														
0	2.03	2.05	2.16	2.38	1.85	2.10	2.06	2.75	1.87	2.53	2.16	2.70	2.08	2.03
-5		2.02	1.86	1.71	2.18	1.94	1.92	1.59	2.09	1.65	1.84	1.59	1.89	2.07
-10			2.01	1.82	2.32	2.05	2.03	1.65	2.24	1.72	1.95	1.66	2.01	2.18
-15				2.07	2.60	2.27	2.24	1.77	2.49	1.86	2.14	1.79	2.22	2.40
-20					2.04	1.79	1.80	1.49	1.99	1.57	1.75	1.52	1.81	1.85
-25						2.02	2.01	1.63	2.25	1.73	1.94	1.66	2.02	2.11
-30							2.00	1.60	2.23	1.70	1.93	1.64	2.00	2.06
-35								2.05	3.04	2.16	2.55	2.08	2.67	2.73
-40									1.99	1.57	1.76	1.52	1.81	1.87
-45										2.03	2.33	1.92	2.43	2.53
-50											2.01	1.69	2.07	2.16
-60												1.95	2.56	2.70
-70													1.97	2.08
-80														1.99
剛性低下率[%]	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-60	-70	-80
	対象群													

表 2.15 R10'での MD 平均値による損傷検知結果

基準群														
0	2.03	2.06	2.17	2.40	1.86	2.10	2.06	2.77	1.88	2.55	2.17	2.72	2.10	2.04
-5		2.01	1.86	1.71	2.18	1.95	1.93	1.59	2.10	1.65	1.84	1.59	1.89	2.08
-10			2.02	1.82	2.33	2.07	2.05	1.65	2.25	1.72	1.95	1.65	2.00	2.19
-15				2.07	2.61	2.29	2.26	1.77	2.51	1.86	2.15	1.79	2.21	2.41
-20					2.03	1.80	1.80	1.49	1.99	1.57	1.75	1.52	1.81	1.85
-25						2.02	2.01	1.62	2.24	1.72	1.93	1.65	2.01	2.10
-30							2.00	1.60	2.22	1.69	1.92	1.64	1.99	2.05
-35								2.05	3.05	2.16	2.56	2.07	2.66	2.74
-40									1.99	1.57	1.76	1.52	1.81	1.87
-45										2.02	2.34	1.92	2.42	2.53
-50											2.01	1.69	2.07	2.17
-60												1.94	2.56	2.72
-70													1.98	2.09
-80														1.98
剛性低下率[%]	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-60	-70	-80
	対象群													

くなっている。この結果から、観測ノイズを小さくすることが、速度と SSMA の MD による損傷検知は有効であると考えられる。そこで、R10 の結果に 300Hz のローパスフィルタを施し、同様に SSMA とその MD を算出した結果 (R10') を表 2.15 に示す。R10 の結果と比較して損傷検知が成功した場合には濃緑で色分けした。結果として、ほとんど改善が見られなかった。これは、本検討においては、SSMA は高周波成分の影響によってほとんど変化しないことがわかる。同時に、乱数付与によって生じた対象周波数以下の加速度波面の凹凸が、SSMA に影響を与えていることがわかる。よって、加速度データを平滑化することによって観測ノイズの影響を除去できると考えられる。ただし、本検討は観測ノイズの影響について検証することが目的であるため、平滑化の最適パラメータについては、検討を行わない。

最後に、データ数の増加によって、検知精度がどのように変化するか、検証を行う。基準群と対象群からそれぞれランダムでデータを抽出し、MD を算出する。この時、抽出するデータ数を増やしていった場合の、それぞれのデータ群内での MD は以下のように一定の値に収束する (図 2.43)。青線が健全時内のデータから抽出して算出した平均値を示す。赤線はその上包絡線を示す。これらの結果が大きすぎるとき、それぞれのデータについて損傷を見逃す確率が高くなる。そこで、図 2.43 のようにグラフに上包絡線を引き、その値を判定基準となる MD として、抽出したデータが損傷と判断される確率を正解率として算出した。以下に図示する (図 2.44)。

MD は健全時を基準群として算出した。正解率は平均値を比較する場合でも、損傷検知にほとんどが成功していた -30% から -80% のデータについて算出した。横軸はランダムで抽出したデータ数で、縦軸は正解の割合を示す。いずれもデータ数の増加とともに、正解率も増加傾向にある。-60% での結果は、最終的には最低値を示しており、平均値による損傷検知には失敗している点にも一致する。ただし、-35% での結果が -60% と同程度に低かった

が、平均値による損傷検知に成功していることから、 -60% での結果は、判定に失敗した場合の MD が低いか、成功しても MD があまり高くなかったことが考えられる。この結果から、橋梁状態によって手法の感度が急に低下する場合、全体的に低下することがわかり、特殊な橋梁状態を回避・特定できる可能性を示している。以上までの検討から、速度—SSMA の MD による損傷検知手法の有効性について、数値的に明らかにした。

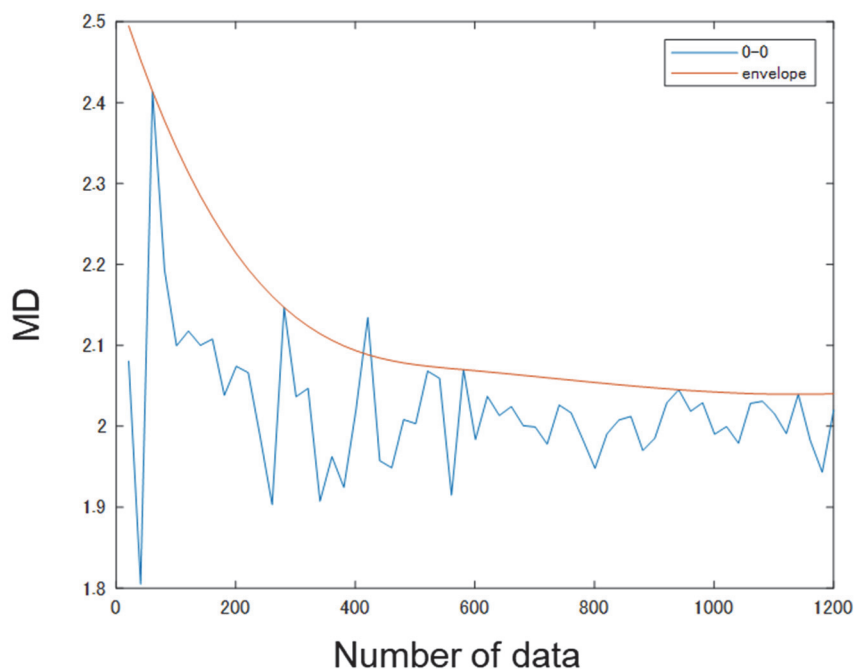


図 2.43 データ数の増加による健全時データ群内 MD の平均値変化と上包絡線

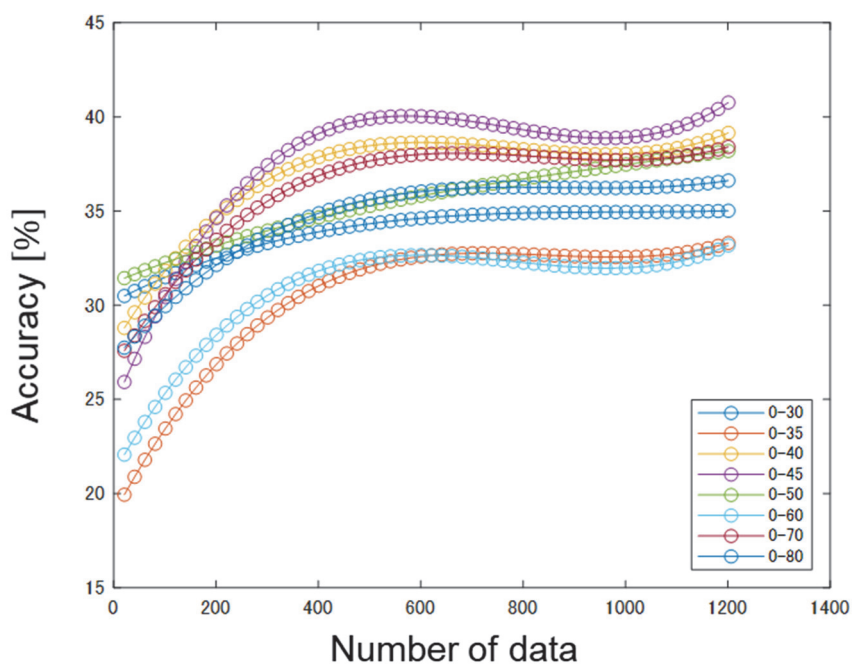


図 2.44 R05 での健全時を基準群とした場合の損傷検知の正解率

3. センシングデバイスの開発

3.1. 数値実験から考えられる必要性能

加速度センサについて整理する。既往の研究や 2.2.1 で得られた FFT 結果から、10m 程度の道路橋であれば、10~15Hz 程度の固有振動数 f を持つと考えられる。 n 次の固有振動数は $n^2 f$ であるため、3 次程度を想定すると 90~105Hz 程度が測定対象となる。一般的に FFT を用いてパワースペクトルを用いる場合、最大周波数の半分を中心に左右対称となるため、対象周波数帯の倍程度をセンサ周波数とする。また、センサ性能についても、使用環境によっては十分に性能が発揮されないことを考慮し、最大性能に対して 0.5~0.7 倍程度で性能を見積もることが多い。そのため、用いる加速度センサは 300Hz 程度の振動が満足にとれるものであればよい。ただし、性能を限定しすぎると陳腐化する可能性が高まるため、本検討ではそれ以上のセンサで得られた電圧データを、300Hz で AD 変換してデジタルデータに変換する。

次に、AD コンバータの性能について整理する。2.2.1 において、簡易検討ではあるが、30m 程度の道路橋が、損傷によって差異が生じる加速度について検討を行った。損傷付近の加速度で、3%程度、最小差異が 1.93×10^{-4} [g]程度であった。この影響を $\pm 3g$ のセンサで考えた場合、12bit では観測条件によっては、精度良く波形を再現するのは困難なことが予想される。よって、16bit 以上の分解能が採用しなければならない。ここでは、AD コンバータの性能向上が急速であることも考慮し、より高分解能を持つ 24bit の AD コンバータを採用した。

3.2. 要素技術についての検討

本研究で開発した計測デバイスは、いくつかの要素技術について、検討がなされてきた。

浅川らは、車両と橋梁両方の振動計測に適用可能なセンシング用 MEMS デバイスを BBM (Bread-Board Model) で試作し、実際橋梁の振動計測に成功している。この時、GPS モジュールを用いた時刻同期についても検討を行っている。また、専用基板についても試作を行っており、車両橋梁両方に適用可能なセンシングデバイスの開発の可能性が示された。しかし、GPS 時刻同期については、精度が不十分であることがわかった[53]。

毛利らは、浅川らの試作機と構想を発展させ、GPS モジュールから送信される 1 秒ごとのパルス信号を用いて、デバイス間を GPS で同期することに成功した[54]。計測に用いるマイコンタイマーの精度は GPS に比べると大きく劣るため、計測開始時に同期を行っても終了時には GPS 時刻とずれが生じるため、高精度の同期に問題があった。毛利らは、パルス信号で同期することでこのずれがどのように発生しているかを記録し、補正を可能にした。また、センサ間タイプスタンプのずれについてはスプライン補間を用いることで一致させる手法を用い、十分な精度があることを確認している。しかし、これは BBM による試作機であることから、今後のデータ保存機能や拡張性を考え、より高い性能を持つマイコンを採

用し、量産用センシングデバイスを開発する。

3.3. システム構成

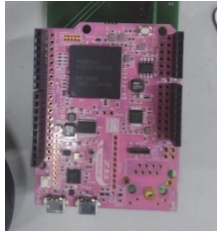

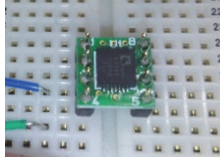

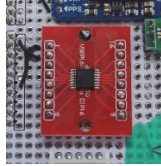
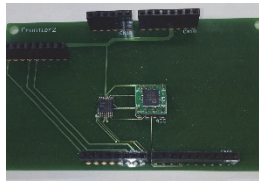
3.3.1. MEMS を用いた開発デバイス

以上の考察をもとに、量産用センシングデバイスの要求仕様を整理する。動作電圧はマイコンから給電することを想定し、3.3V~5Vである。

- 1) 加速度センサは三軸で加速度範囲が $\pm 2g$ 以上、サンプリングレート 300Hz 以上
- 2) AD コンバータは 24bit 以上で、入手性に優れる
- 3) GPS による時刻同期が可能で、拡張性の高いマイコン

以下に要求仕様を満たした使用機器について以下にまとめる。下記で構成されたデバイスは、2.2.2(2)で用いられている。

表 3.1 使用機器

<p>GR-peach</p> 	<p>マイコン：RZ/A1H メモリ： 外部FLASH 8[MB] 内蔵10[MB] 周波数：400[MHz] 動作電圧： 3.3[V]/1.18[V]</p>	<p>Adafruit Ultimate</p> 	<p>GPSモジュール チャンネル数：66 動作周波数：10[Hz] Version 3</p>
<p>KXR94-2050</p> 	<p>軸数：三軸 周波数：1000[Hz] 加速度範囲：$\pm 2g$ 分解能：660[mV/g] 動作電圧：3.3[V]</p>	<p>GPSアンテナ</p> 	<p>GPS捕捉用 28[dB] 5[m] SMAコネクタ型</p>
<p>ADS1220IPW</p> 	<p>分解能：24[bit] 動作電圧：3.3[V] チャンネル数：4 最大SPS：2000</p>	<p>専用基板</p> 	<p>Frontier2.0 (独自基板)</p>

3.3.2. 既存の計測デバイスとの比較

参考文献[41]をもとに、橋梁モニタリングを想定して開発されたデバイスを参考デバイスとして、本研究で開発されたデバイスと比較する。(表 3.2) 比較対象であるデバイスは、無線通信機能を有し、センサノード 1 つを約 1 万円で開発可能であるなど、本開発デバイス

にはない、優れた能力を有する。加速度センサのサンプリングレートは最大有効周波数の範囲が 640Hz で、検討では 200Hz で計測されていた。これは 2010 年に開発されたものであるため、現在でも使用されているセンサの性能と比較すると、優れているとはいいがたい。その他、加速度センサに付属する AD コンバータの分解能が 12bit で、車両振動から損傷を検知するには不安があること、時刻同期はマザーである PC からの一斉送信で行われるため、マイコンごとが持つタイマー精度の違いは考慮されていない点である。またノード自体には計測データ用の記憶装置がないため、送信失敗やデータ以上に影響を受ける。これに対し、本研究で開発したデバイスは、記録は有線で行う制約は受け入れたうえで、分解能が 24bit の AD コンバータを用いること、GPS による時刻補正および位置補正精度を向上している。また、マイコン自体が評価ボードを使用することで、組み立ての容易さと拡張性を有しており、この点は既存デバイスにはない点である。ただし、これらを満たすために比較デバイスより大型化し、コストも 2 万円程度になっている。これに対し、本開発デバイスは車両に搭載すること想定しているため、通常前後輪の車軸上 2 つしか搭載ないことから、この価格でも十分であると考えられる。また、AD コンバータの最大 SPS が大きいものに換装した場合、マイコンの拡張性が高いことから、他の構成をほぼそのままにセンサのみを増設できるため、今後の性能向上にも対応可能な点が挙げられる。

表 3.2 参考デバイスと開発したデバイスの比較表

比較項目	参考デバイス	開発デバイス
加速度測定範囲[g]	±2	±2
最大有効周波数範囲[Hz] (実際の運用周波数範囲)	640 (200)	1000 (300)
AD コンバータの分解能[bit]	12	24

3.4. 性能試験

3.4.1. 実車走行実験の結果

開発した計測システムの道路上実験を行い、検証を行った。搭載したセンサーシステムは最終量産型を使用し、以下の図 3.1、図 3.2 に示す。また、このシステムに改めて追加した機器についても、以下の表 3.3 に示す。

道路上での実験は、筑波大学構内を通るループ道路で行った(図 3.3)。センサを搭載し、制限速度以下で走行し、設計サンプリングレート以上で計測できているか、確認を行う。道路上には速度超過防止用の段差がいくつか存在し、衝撃が加わることがある(図 3.4)。この衝撃データを GPS と紐づけ、段差の位置が特定できるか確認することで、位置同期精度を検証する。

結果を以下にまとめる。加速度はデータ読み込み遅れ防止のため、300Hz 以上に設定した。サンプリングの間隔が 0.036 秒であることから、300Hz 程度となり、設計性能を発揮してい

ることがわかった (図 3.5).

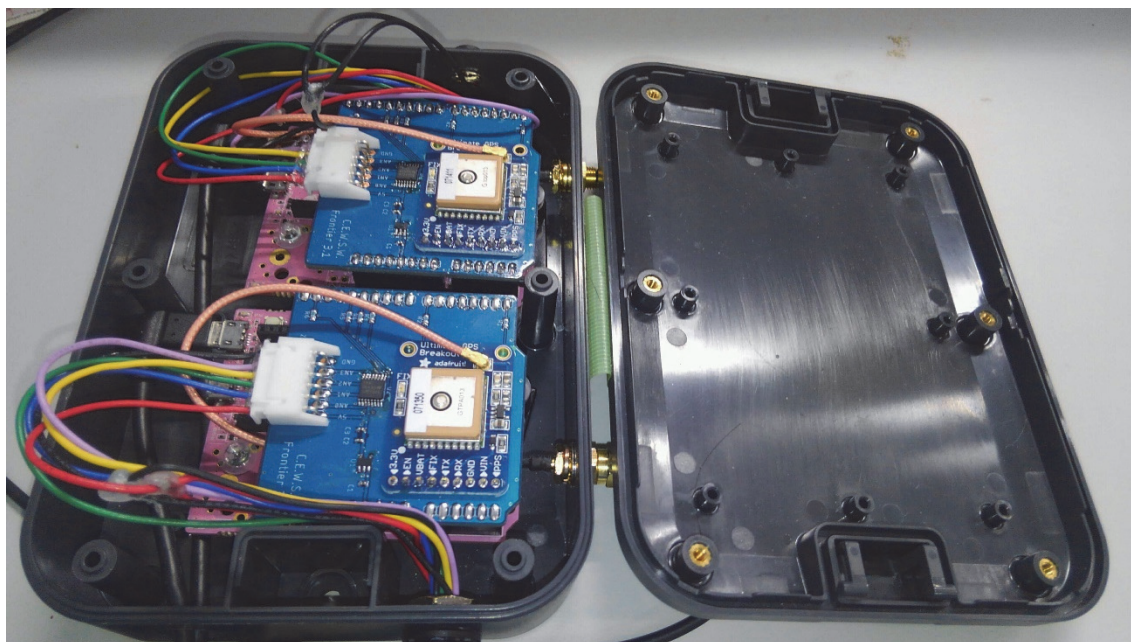


図 3.1 実証試験に用いたデバイス本体



図 3.2 加速度センサ部分

表 3.3 使用機器一覧


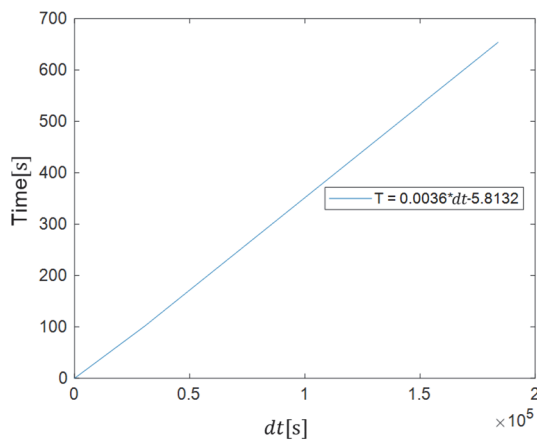
使用機器	基本性能	数	使用機器	基本性能	数
 専用シールド	Frontier 3.1 (独自基板)	2	 WP5-7-3C	WP型耐候性 防水ボックス センサボックス	2
 WP11-15-4C	WP型耐候性 防水ボックス マイコンボックス	2	FCPEV(CU) -0.65MM-3P	耐熱防水同軸 通信ケーブル	2



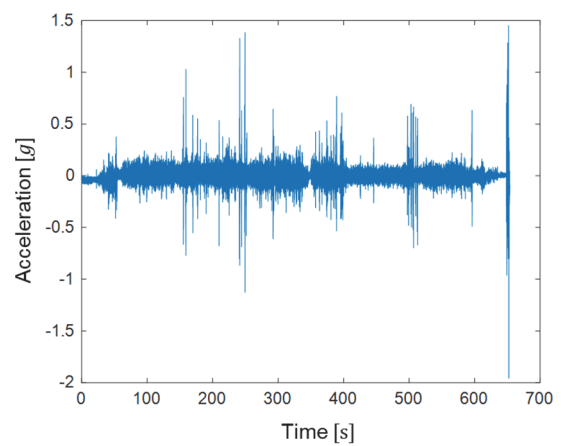
図 3.3 筑波大学内ループ



図 3.4 赤丸内の段差



(a) センサのタイムスタンプ



(b) 計測された加速度

図 3.5 タイムスタンプと計測された加速度

また、GPS 情報との同期による位置同期の結果を、以下の図 3.6 に示す。ある程度の範囲で同期に成功していることがわかる。実用を考慮した場合、この精度では低いことも考えられるが、先に検討された連続的に SSMA を導出する方法や、2019 年以降は GPS モジュールを準天頂衛星「みちびき」に対応することによって、精度の向上が期待できる。

次に、加速度センサと GPS 位置情報の同期によるデータ上の車両位置同期精度について、検証する。GPS より推定された車両位置について、以下の図 3.6 に示す。赤線がマーカを繋いだ線を示す。概ね走行した位置を推定できていることがわかる。青のマーカは 30 秒ごとの GPS 位置を示す。実際は 1 秒ごとに取得できているが、見づらくなるため省略している。橙のマーカは南の段差付近で 1 秒ごとに取得した結果を、緑のマーカは北の段差付近で得られた 10 秒ごとの結果を示している。



図 3.6 GPS 位置情報の地図上プロット (Google Map 上)

まず、南の段差付近についての位置同期結果を検証する。推定された加速度範囲を赤い破線と実線で、それぞれ挟んだ。破線が横断歩道前の段差を降りる部分、実線が横断歩道後の段差を上る部分である。大きく加速度が動く範囲をとらえており、比較的位置同期に関して

も、推定精度が高いことがわかる。前輪側にセンサを設置しており、車両は軽自動車でも前輪側に重量が偏っているため、前輪側が段差を通過する時の方が大きくなっていると考えられる。

次に、北の段差付近について検証する。緑のマーカの前後に多少の余裕をもって範囲を設定し、大まかに範囲を設定できるか検証する。加速度上での結果を、以下に示す。大まかに範囲を設定した場合の方が加速度の大きく変化している部分をとらえているように見られるが、これは SSMA 算出への影響との兼ね合いになるため、今後検討を要する。ただし、段差と思われる範囲をすべて特定はできていなかった。これは計測の後半ほどマイコンタイマーと GPS 時刻のずれが生じていることが原因と考えられる。しかし、計測終了時の GPS 時刻との差分を用いて修正するなどして、補正は可能と考えられる。上記の検討により、開発したデバイスはある程度の位置同期精度を有することがわかった。

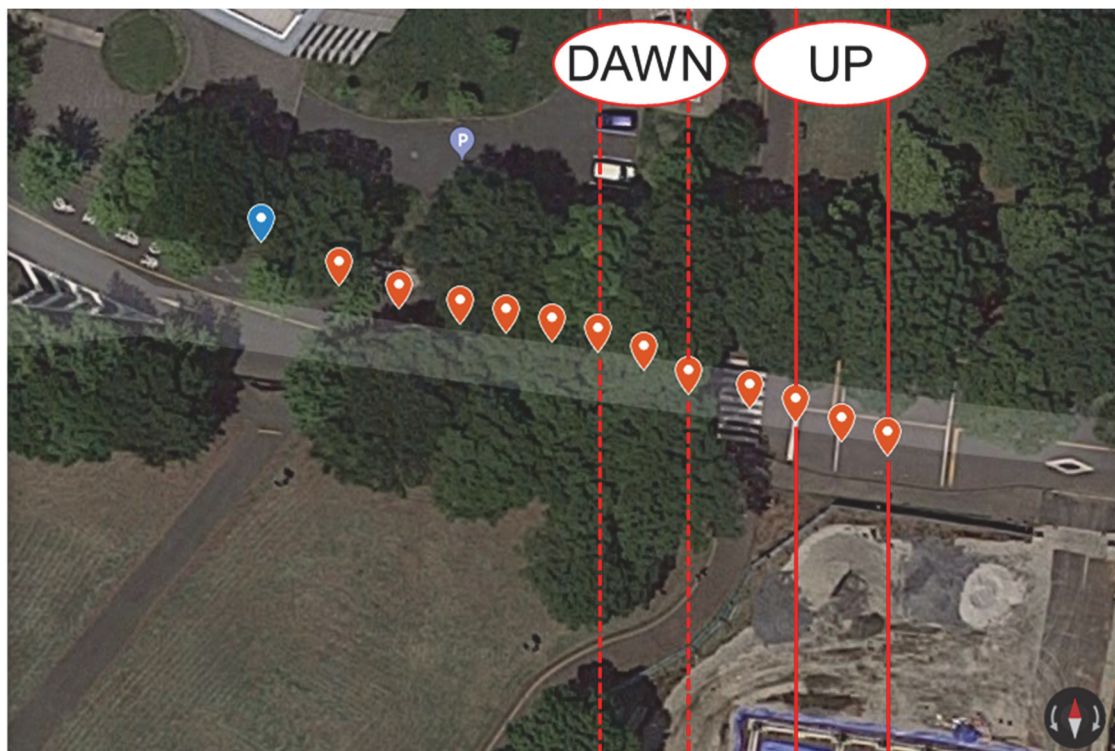


図 3.7 Google Map 上での南の段差付近 (推定範囲)

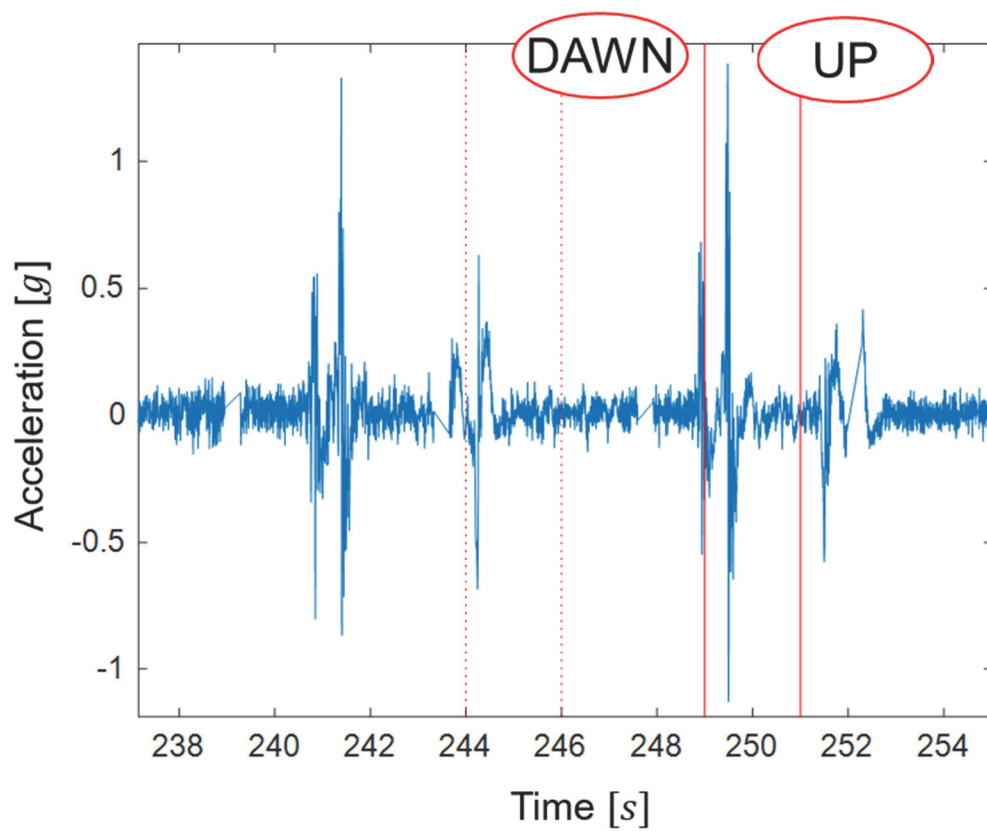


図 3.8 南の段差付近での加速度と位置同期結果

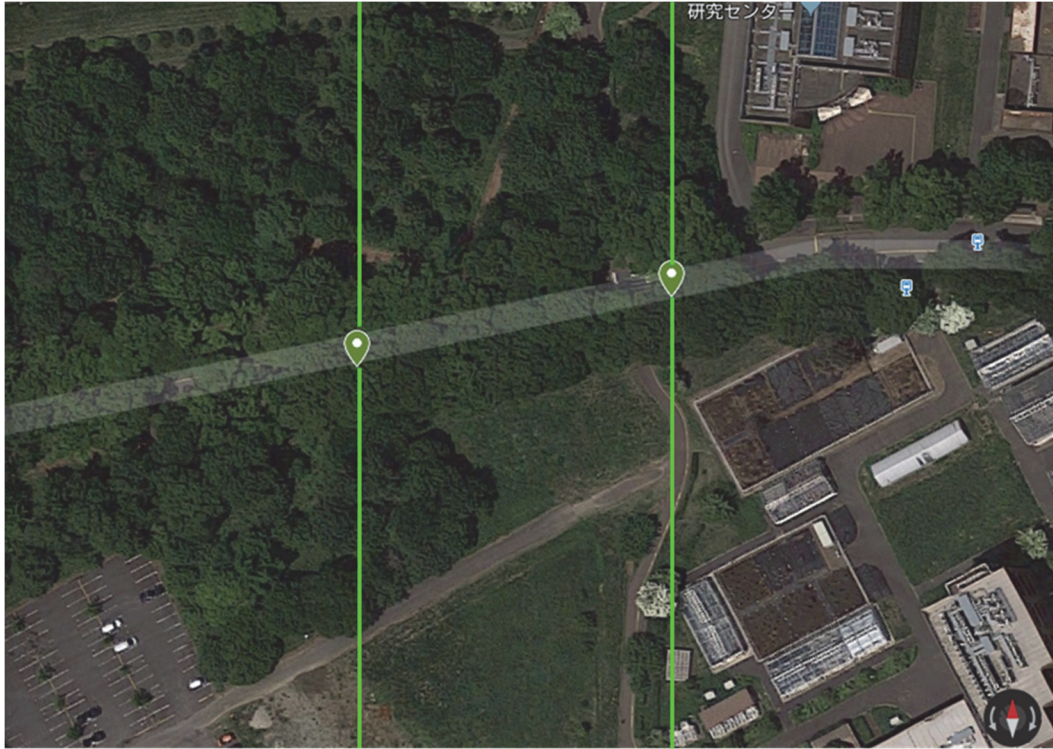


図 3.9 Google Map 上での北の段差付近

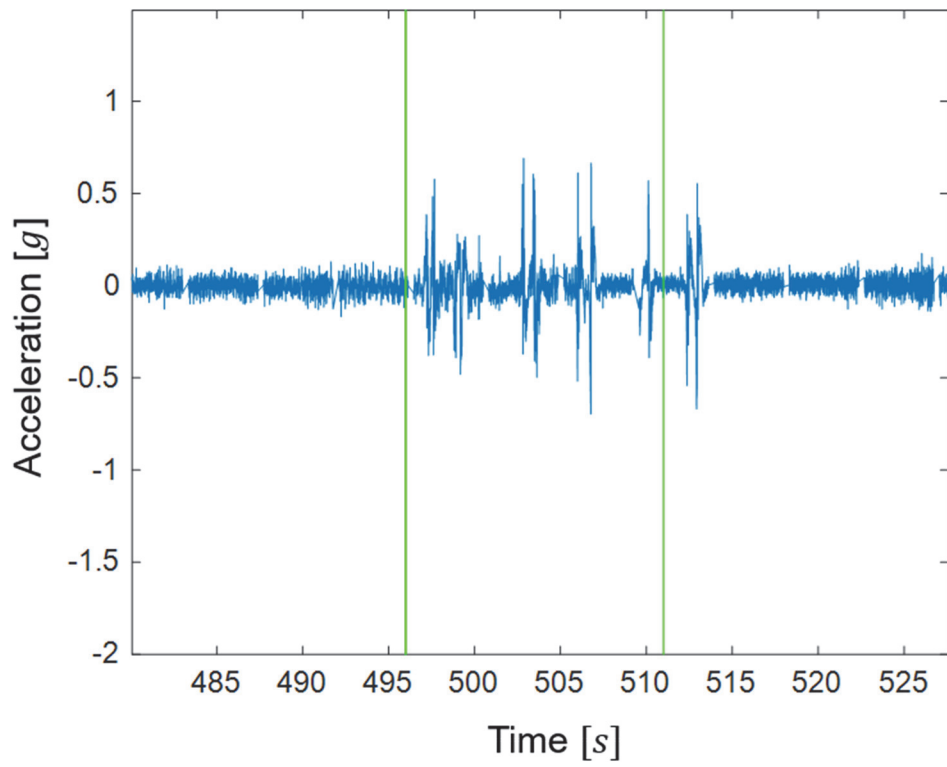


図 3.10 北の段差付近での加速度と位置同期結果

3.4.2. 通信ケーブルの引張試験

通信用ケーブルがタイヤに絡まった場合、強度が高すぎると事故の原因になることが考えられる。そこで、強度試験を行う。引張試験により、引張荷重の計測を行う。ケーブルは外皮膜であるゴム、内皮膜である銅板巻き、内部の 2 本よりケーブル 3 束 6 本の通信ケーブルで構成される (図 3.11)。引張試験機での計測実験は皮膜のずれにより正確に取れないことが予想されるため、各構成部品の引張荷重の中で最大のものをケーブルの最大荷重とする。(表 3.4)

各構成部品の引張荷重は以下のとおりに計測された。上記より、ケーブルの最大引張荷重は銅板巻き 115kgf 程度と予想される。搭載予定の 10t トラック (図 3.12) はタイヤ半径が約 0.5m, 対象車両エンジンの最大トルクが 200kgf・m 程度であることから、最大駆動力は $F = T \cdot r = 1000\text{kgf}$ となり、タイヤに巻き込まれても容易に破断することを予想される。

表 3.4 ケーブル鋼製備品と引張試験での結果

部品名	引張加重[kgf]
ゴム	50~60
銅板巻き	90~115
通信ケーブル 1 束 (3 束)	15 (45)



図 3.11 ケーブルの構成部品



図 3.12 実際の物流車両 (10t)

4. 実験的検証

4.1. 鋼製模型橋梁における実車走行実験

4.1.1. 実施背景

本検討は、TRL5：技術要素の実証試験に相当する。技術要素としてのセンシングデバイスと速度—SSMA に MD を適用する軽度損傷検知手法の実証試験を行う。従来の数値計算では、損傷は剛性低下で表現され、剛性低下率が低くとも、実際の軽度損傷を模擬できていたとは言えなかった。また、実験においても、部材の破断などで模擬されていたため、検討されたことはない。本実験では、自動車が行走可能な鋼製模型橋梁を製作し、実験を行った。

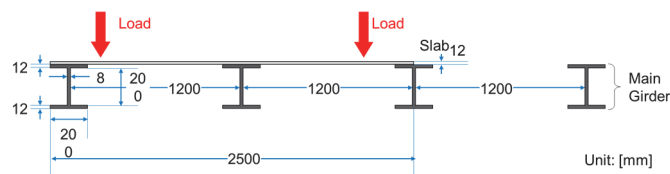
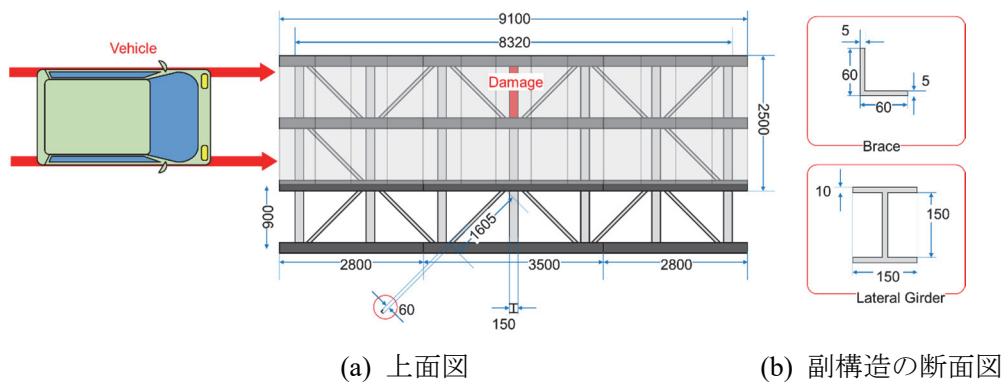
4.1.2. 実験概要

本研究で製作した鋼製橋梁模型の図面と寸法を図 4.1 に示す。模型橋梁は、実際の中小スパン橋と 1 次固有振動数が同程度の 10Hz となるよう文献⁵⁵⁾を参考に設計し、橋長：9.10m（径間長：8.32 m）、橋幅：4.15m の鋼 4 主桁橋で鋼製床版を持つ。主桁間には横桁と横構があり、それぞれ主桁と高力ボルトにより接合されている。なお、主桁は JIS G 3192：200×200、横桁は JIS G 3192：150×150 を使用した。すべてのボルトに M12—10.9T の高力ボルトを使用し、締め付けトルク 110 [N・m] に統一した。図 4.2 にボルトの配置も含めた CAD 図面を示す。橋梁損傷は、図 4.1(a)において赤色で示した横桁を取り外すことで模擬する。具体的には、図 4.2(d)に示した取り外し用横桁のボルトを緩めることで軽度損傷を模擬し、横桁自体を取り外すことで、重度損傷を模擬する。なお、床版に用いた鋼板は 13 枚あり、それぞれ短辺および長辺中心部分は主桁の上フランジに接合した。模型橋梁の諸元を表 4.1 に示す。

次に、実験車両の諸元を表 4.2 に示す。ここで、車両の推定固有振動数 ω_u は、タイヤ弾性率 E_w 、概算タイヤ径 R_w ($=0.8$ [m])、概算ばね下重量 M_u を用いて、以下の式から求めた。

$$\omega_u = \sqrt{E_w \times R_w / M_u} \quad (80)$$

車両の走行位置は、図 4.1 (a) に示した通りで、走行速度は時速 10km で、可能な限り一定の速度で走行した。



(c) 主桁及び床版の断面図
図 4.1 模型橋梁の上面図および寸法

図 4.3 には模型橋梁の写真を掲載する。模型橋梁の前後区間には、車両の加減速のため、鉄パイプ等を用いた助走区間を設けた。橋梁とほとんど接触しておらず、模型橋梁の振動には影響を与えないと考えられる。図 4.4 は車両走行実験時の写真である。床版に誘導用の白線を引き、その上を可能な限り車輪が通過するようにした。鋼板振動との合成による橋梁振動への影響が損傷によって変わらず一定のため、無視できる。

車両加減速のため橋梁前後に助走区間を設けた(図 4.3)。鉄パイプ等で建設し、橋梁に対して十分軽い。また、橋梁とはほとんど接触せず、助走区間での振動は橋梁振動に影響を与えないと考えられる。

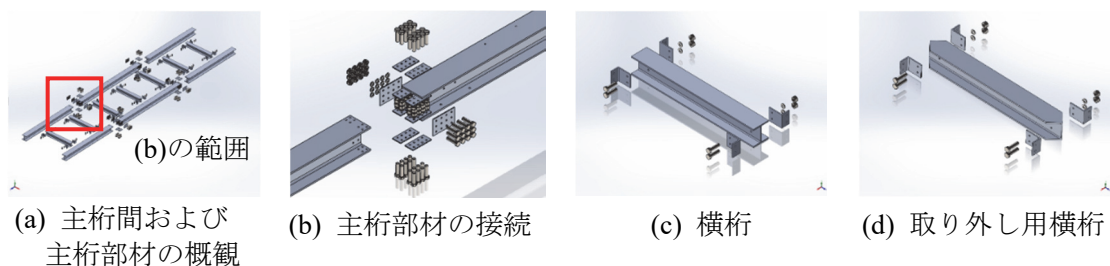


図 4.2 模型橋梁の CAD 分解図面

表 4.1 橋梁性能諸表

鋼材規格	JIS G 3101 : SS400
1 次固有振動数 [Hz]	10
スパン長 [m]	8.32
橋幅 [m]	4.15
主桁本数	4
自重 [N/m]	1328.0

表 4.2 車両性能諸表

車両規格	軽自動車
推定ばね下固有振動数 [Hz]	36
車軸間距離 [m]	1.8
タイヤ弾性率 [MPa]	3
乾燥重量 [kg]	950
概算ばね下重量 [kg]	720



図 4.3 模型橋梁の概観



図 4.4 走行実験の様子

加速度センサを、前輪と後輪のバネ下車軸中心付近に設置した。振動データのサンプリングレートは 300Hz である。車両の進入退出タイミングはレーザーセンサーを用いて記録した。

橋梁状態は、健全時 (INTACT)、軽度損傷時 (LIGHT)、重度損傷時 (HEAVY) の 3 種類を設定した。軽度損傷は、車両通行側中央横桁 (図 4.2(d)参照) のボルト 8 本を完全に緩めることで模擬した。このとき、横桁と主桁はボルト軸のせん断抵抗によって接合されているだけの状態である。重度損傷は、この横桁を除去することで模擬した。計測回数はそれぞれ多めに計測した後、異常値を除いた結果、29 回、24 回、24 回となった。各ケースにおける走行開始時点の燃料タンクは毎回、満槽の状態とし、また運転者を固定したことから、重量の変化はほぼ無視できる。天候は常に晴れで、模型橋梁は日陰にあるため、気温は一定 (約 4°C) に保たれている。周辺では振動を生じる作業等もなく、風もなかったことから、環境影響も無視できる範囲と考えられる。

4.1.3. 得られた実験データの概要

まず、鋼製模型橋梁の固有振動数について図 4.5 で確認する。橋梁を強制加振した後の自由振動部分とその FFT 結果を以下に示す。設計値である 10Hz から 20Hz の間にピークを持っていることがわかる。ピークが二つあるの理由として、床版に鋼板を用いていることが考えられる。ただし、ほぼ橋梁の設計値と差がないことから、損傷による影響には関係ないものと考えられる。

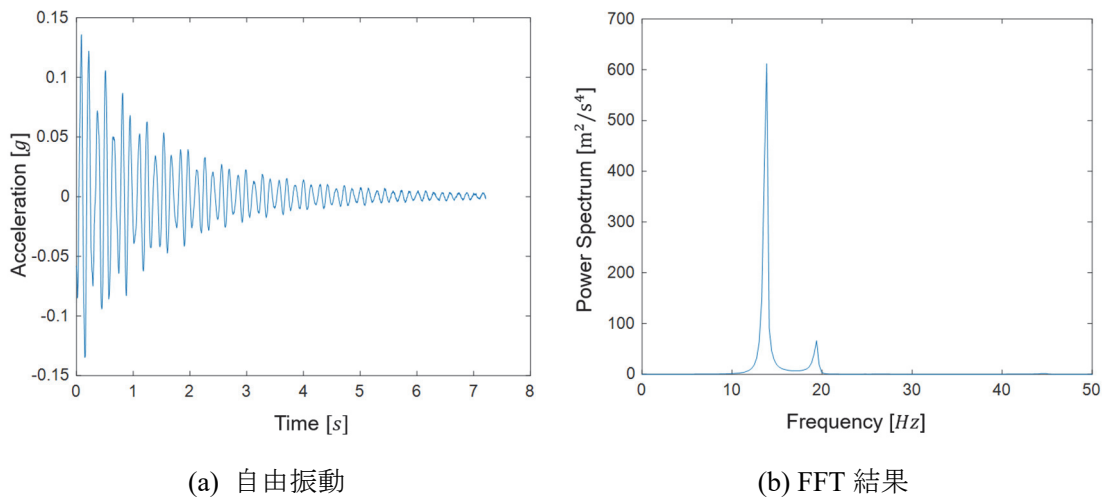


図 4.5 橋梁の振動特性

それぞれの橋梁状態で走行速度が約 2.90m/s だったときの、前輪後輪の加速度振動を図 4.6 に示す。横軸はそのときの前輪位置を表し、 $x = 1.8 \sim 8.32\text{m}$ の範囲を示す。これは後輪が橋梁上に入ってから、前輪が橋梁区間の外へ出るまでの間に相当する。実験車両はエンジンが前輪付近にあり、重量のほとんどを占めるため、車両重心は前輪側にあると考えられる。そのため、回転半径が大きくなり、後輪の振動が大きくなったと考えられる。次に加速度振動データをフーリエ変換し、求めたパワースペクトルを図 4.7 に示す。また、主なピークに対応する振動数を、前輪は 5 個ずつ、後輪は 10 個ずつ表 4.3 に示す。既往の研究同様、橋梁の設計固有振動数や車両の推定固有振動数以外に、ピークが複数発生していることがわかる。それぞれの橋梁状態について、パワースペクトルに明確な差異を見出すことは難しく、周波数分析自体を損傷検知に直接用いるのは困難である。

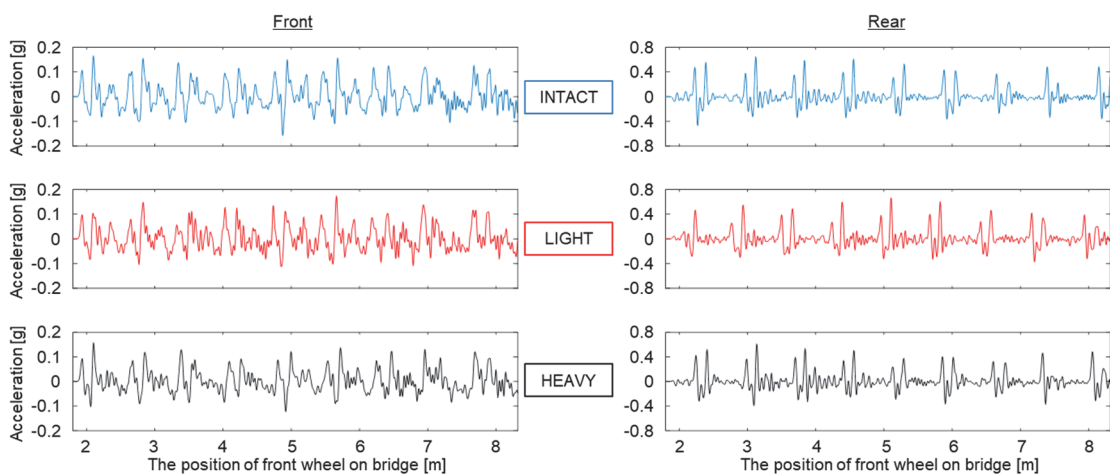


図 4.6 各状態での前輪・後輪加速度(各速度はそれぞれ 2.90m/s 程度)

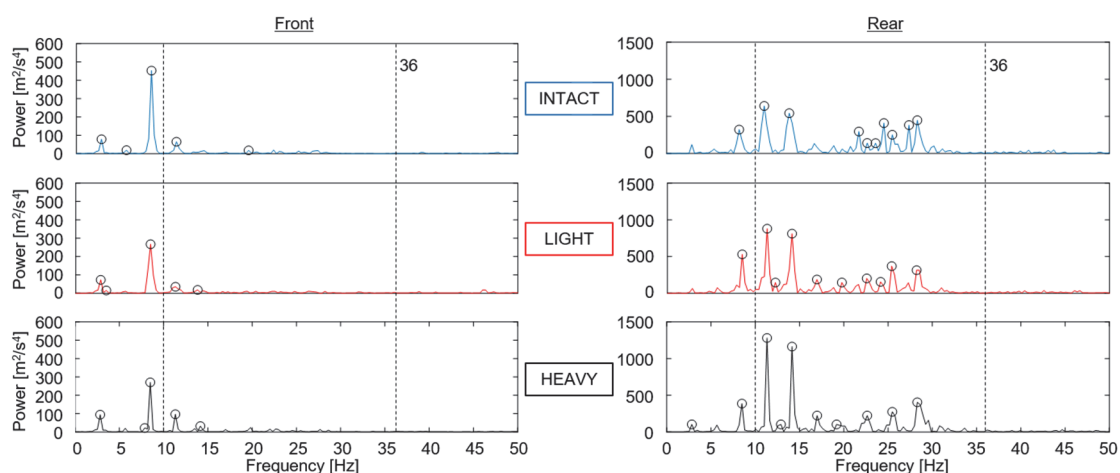


図 4.7 各状態での車両応答パワースペクトル (各速度はそれぞれ 2.90m/s 程度)

表 4.3 前輪・後輪加速度のパワースペクトルにおけるピーク周波数

		Front				
Number	1	2	3	4	5	
INTACT		2.83	5.66	8.49	11.32	19.50
LIGHT		2.82	3.44	8.46	11.27	13.78
HEAVY		2.83	7.86	8.49	11.32	14.15

		Rear									
Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
INTACT	8.18	11.01	13.84	21.70	22.64	23.58	24.53	25.47	27.36	28.30	
LIGHT	8.46	11.27	12.21	14.09	16.91	19.73	22.55	24.11	25.37	28.18	
HEAVY	2.83	8.49	11.32	12.89	14.15	16.98	19.18	22.64	25.47	28.30	

Unit : [Hz]

4.1.4. 提案手法の適用結果と考察

既往の研究によると、SSMA は橋梁状態だけでなく、走行速度の影響を受けることが分かっている。そこで、算出した SSMA と対応する走行速度の関係を図 4.8 に示す。ただし、ここでの走行速度は、走行距離を通過時間で除した平均速度である。図 4.8 より、今回、得られたデータ群はばらつきが大きく、SSMA と速度および橋梁状態の関係は明確でない。そこで、各ケースのデータ群を判別するため、MD を算出し、データ群ごとの平均値を比較する。また、実験で得られたデータ数の有効性とデータ混入があった場合についても、検討を行うことにする。

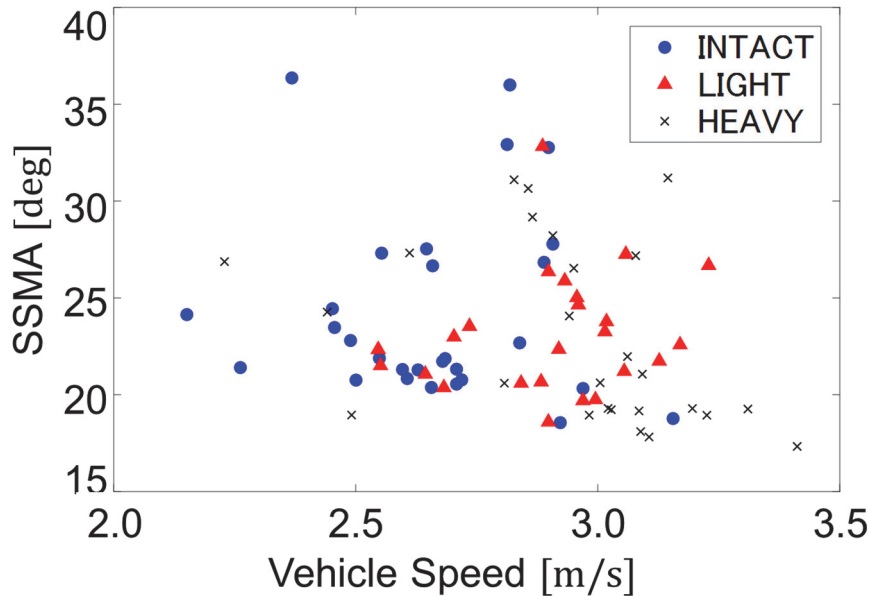


図 4.8 各走行速度と橋梁の状態に対する SSMA

(1) 提案手法の適用

橋梁状態毎に、今回得られた SSMA と車両走行速度の MD を表 4.4 に示す。また、MD はデータ一つにつき、それぞれ得られるため、損傷検知の正解率 $Ar[\%]$ も示す。図 4.9 に、表 4.4 で色がついた枠内の MD を整理した。実線は各値をつないだものを示す。まず、同一データ群内で MD の平均値を算出する。ケース番号は表中の x と y の値 x,y を用いて、ケース $x-y$ と表記する。健全時（ケース 1-1）、軽度損傷時（ケース 2-2）、重度損傷時（ケース 3-3）はそれぞれ 1.81, 1.30, 2.09 である。これらは、図 4.10 の概念図で、円の各半径を示す。一方、健全時を基準データ群として、軽度損傷と比較した場合（ケース 1-2）は 2.25、重度損傷時と比較した場合（ケース 1-3）は 4.06、軽度損傷時を基準データ群として重度損傷時と比較した場合（ケース 2-3）は 4.89 となって、いずれの場合も異常検知が可能である。つまり、異なる橋梁状態間での MD は同一データ群内での MD よりも十分に大きいこと、異なる橋梁状態に対しては異なる MD を持つことがわかった。これは、損傷の有無に応じて、速度範囲が同じでも SSMA が異なる分布を持つことを示している。また、重度損傷時、MD が大きくなる傾向から、SSMA は軽度から重度損傷への進展に高い感度を持つ可能性が示唆される。ただし、ケース 1-3 とケース 2-3 の結果から、剛性低下の程度によって MD が大きくなるわけではないことも分かった。

次に、正解率について考察する。MD の平均値が上昇するにつれて、正解率も上昇していることから、異常値による影響は比較的少ないことがわかる。また、既往の研究[27]等での、30~40%の正解率と比較して、高いことがわかる。また、本提案手法は、社会実装時には安全側に判定を行う必要があるため、判定時の閾値を下げる必要がある。そのため、誤検出の

可能性 (Precision) が低下することに注意すれば、正解率はさらに上昇することが考えられる。

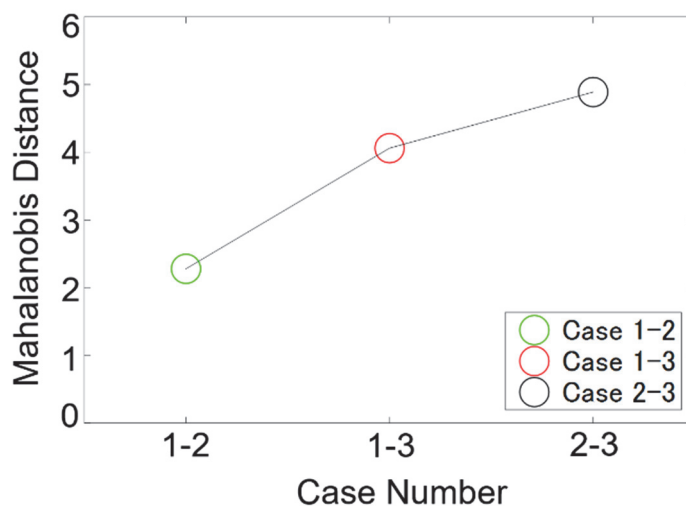


図 4.9 速度—SSMA における各ケースにおける MD

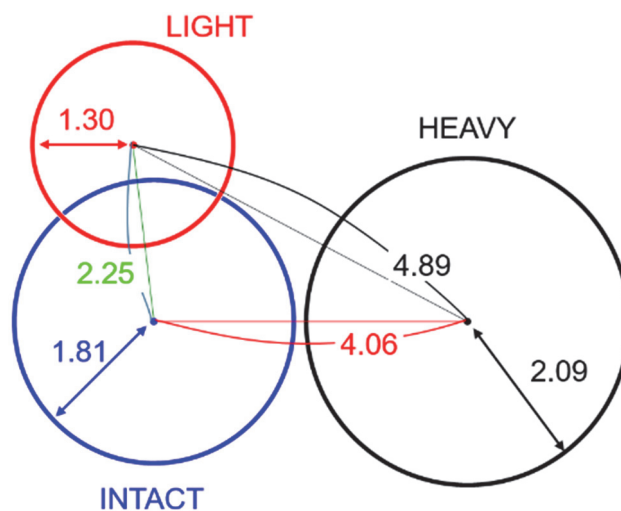
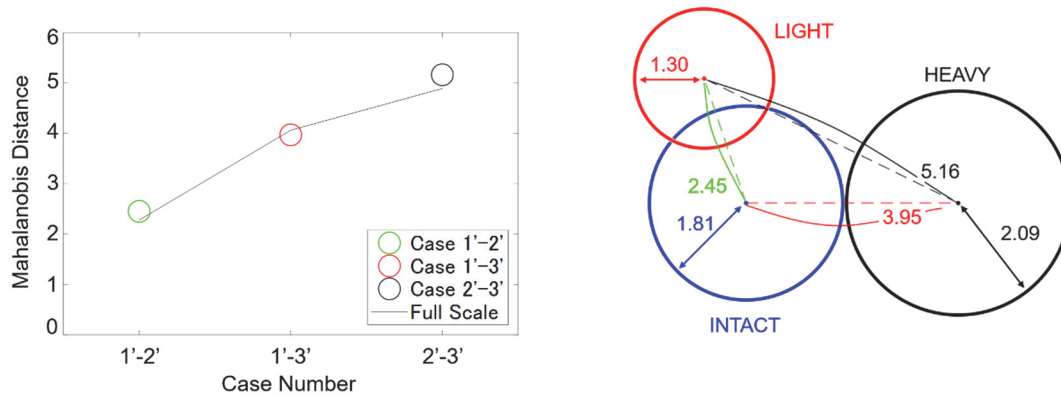


図 4.10 算出された MD の概念図

表 4.4 各橋梁状態間での MD

	1	2	3	1	1	2	1'	1'	2'	1&2	1&2	2&3
x	1	2	3	1	1	2	1'	1'	2'	1&2	1&2	2&3
y	1	2	3	2	3	3	2'	3'	3'	2	3	3
D	1.81	1.30	2.09	2.25	4.06	4.89	2.45	3.95	5.16	1.82	4.25	4.04
Ar [%]	-	-	-	50.0	69.2	76.9	50.0	76.9	76.9	20.0	77.3	68.2

(※ 1...INTACT, 2...LIGHT, 3...HEAVY, n' : a half number of data)



(a) サンプル数を半分とした場合の
MDの大小関係

(b) MDの概念図

図 4.11 サンプル数を半分とした場合の MD

(2) データ群の偏りについての検討

これらの結果は式(73)における μ および Σ の推定精度に依存している。実際には、これらは限られた標本から推定されたものであり、不確実性が残る。そこで、サンプルの偏りを検証するために、データ数を半分にした場合についても、2つの橋梁状態間での MD を求めた。結果を表 4.4 に示す。図 4.11 に、算出した MD について整理した。図 4.11 (a)の実線は、表 4.4 で色がついた枠内の、MD 値の結線を示す。図 4.11 (b)はその概念図を示す。健全時を基準データ群として軽度損傷と比較した場合（ケース 1'-2'）は 2.45、重度損傷時と比較した場合（ケース 1'-3'）は 3.95、軽度損傷時を基準データ群として重度損傷時と比較した場合（2'-3'）は 5.16 となって、同様の傾向が確認できた。ただし、値は多少変動しており、たとえば、健全時と重度損傷時を比較（ケース 1'-3'）した場合については MD が小さくなっている。これは、健全状態の橋梁が短期間で重度損傷を負った場合に、検知するには一定数以上の標本が必要であることを示唆している。重度損傷が急速に進展している場合であっても、検知にはタイムラグが発生する可能性を示しており、常に十分な標本数をモニタリングする必要があるといえる。

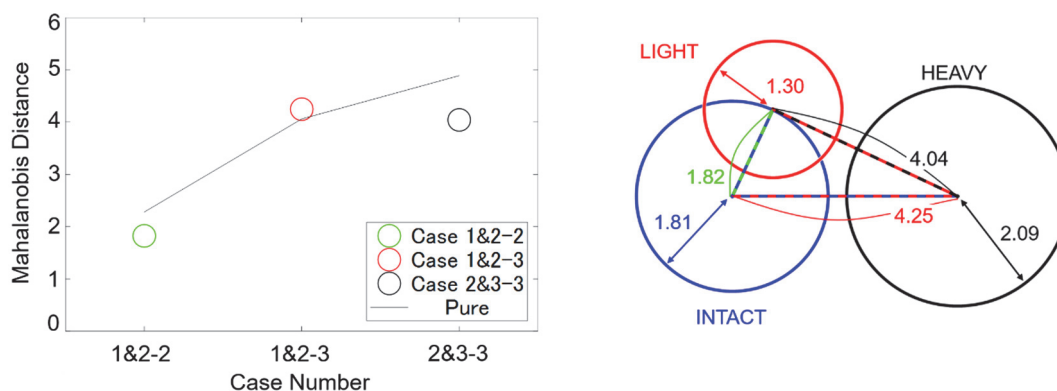
正解率は、MD の平均値が低下しているにもかかわらず、正答率は上昇しているケース（ケース 1'-3'）以外は変わらなかった。上記ケースに注目する。この結果は、閾値より大きいものは多いが、その差が小さいことを示す。標本数が少ない時、データの偏りからこのような現象が発生するため、標本数を十分にとる必要があることがわかる。

(3) 橋梁状態が異なるデータ群を含む場合の検討

橋梁の損傷は急激に発生・進展するもの（ケース 1&2-2, 1&2-3）や、徐々に進展するもの（ケース 2&3-3）があると考えられる。急激に発生・進展した場合、先の検討から SSMA の分布も急激に変化することが考えられる。検討結果について、表 4.4 に示す。図 4.11 に、

算出した MD について整理した。図 4.12 (a)の実線は、図 4.11 (a)同様、表 4.4 で色がついた枠内の、MD 値の結線を示す。また、図 4.12 (b)はその概念図を示す。このとき、継続的な計測により SSMA が時間的に連続して算定できていたとすると、基準データ群に損傷が進展した場合のデータも混在することが考えられる。そこで、基準となるデータ群に対して、比較を行うデータ群の一部を混入し、MD を算出した。一部データが混入することで、差異が小さくなったが、傾向は一致していることがわかる。結果より、データが混在しても、損傷の有無や進展がある程度検知できるとわかった。また、健全時より、軽度損傷をほぼ経過せず、重度損傷に進展した場合（ケース 1&2-3）、徐々に損傷が進展している場合（ケース 2&3-3）よりも値が大きくなった。これは SSMA が重度損傷のように、構造の変化を生じる損傷に対して高い感度を示すことを示唆している。

正解率は、基準となるデータ群に比較対象のデータ群が混入している場合については、低下がみられた。これは、データ分割精度の重要性と、MD を用いた手法の感度が高いことを示している。ケース 1&2-3 では、基準となるデータ群と比較対象は完全に異なるため、正解率は高いまま。わずかながら上昇した。この結果から、急激に損傷が進展した場合に、本提案手法は正解率が高くなる可能性が示唆された。



(a) 異なるデータ群が混入した場合の MD の大小関係

(b) MD の概念図

図 4.12 異なるデータ群が混入した場合の結果

(4) MD の統計分析と損傷検知への適用性

ばらつきやデータの混入が速度と SSMA の関係にどのような影響を及ぼすか明らかにするため、MD の諸統計量を算出した。結果を表 4.4 に示す。歪度は分布の左右対称性を示し、0 に近いほど対称である。尖度は分布の尖りを示す。正規分布では 3 になり、大きいほど尖った分布になる。そのため、尖度が高い時、結果が特定の値に集まっているため、精度が高いといえる。平均については、表 4.4 と同じものを記載している。ほとんどが、尖度が高いほど、平均が高くなった。ただし、ケース 1'-3'では平均が高いにもかかわらず、尖度は低

い。これは一部の高い値に影響を受けていたため、データ数が少ない場合は、単純に平均を比較するだけでは難しいことがわかる。一方、ケース 1&2-2 では平均が低いにもかかわらず、尖度は高い。これは、混入したデータ群の影響が大きく、データ群間の差異が小さくなったことを示す。よって、データ数が少ないと混入したデータ数によっては結果の信頼性が大きく減少するため、データの分割方法について、より正確な手法を検討する必要がある。

次に、今後の精度改善のため、MD を用いた速度 - SSMA 分析の特徴について考察する。損傷検知に有効なデータ群の分析を行うことで、MD が反応するケースについて、検証する。ケース 1, 2, 3 より MD が大きいデータ群を、検知に有効なデータ群として諸統計量を算出し、表 4.6 にまとめた。表 4.5 の結果と同様で、尖度が高くなるほど、特定の値に反応していることを示し、損傷の発生により MD がより大きくなる、また、ある値に収束していくという精度向上の可能性が示唆される。表 4.6 のケース 1-2, 1-3, 2-3 の尖度は、表 4.5 に比べて多少の低下に収まる。これは無効にしたデータ群の影響度が低いことを示し、今回の実験結果においては、MD を用いる手法の頑健性が高かったことを示している。

データ数を半分にしたケース 1'-2', 1'-3', 2'-3'の結果について考察する。ケース 1'-3'の尖度は、分割前のデータ（ケース 1-2）と比べて大きく低下した。MD の平均値も減少していることから、データ数にかかわらず、尖度が大きいほど MD を用いた分析は高精度になる可能性が高い。そのため、連続して得られる実測データ群を分割する際、MD の尖度を基準として用いることも考えられる。ただし、ケース 1'-3'において、ケース 1-3 と比較して大幅に尖度が減少する結果となっても、MD の平均値減少は小さかった。この場合でも、平均を用いて損傷の評価は可能であるが、データ数減少による尖度の変化が大きいため、実際はサンプル数を確保して慎重に適用する必要があると考えられる。

最後に、データが混入した場合のケース 1&2-2, 1&2-3, 2&3-3 の結果について考察する。ケース 1&2-3 は基準となる分布と比較対象の分布が異なるため、MD の平均値は高いままとなっており、尖度も高い。ここから、今回の結果においては、健全と軽度損傷時と比べ、重度損傷時は異なる速度と SSMA の関係を持つ可能性が高いということを示す。これは健全から軽度損傷、重度損傷への段階的な損傷の進展評価に MD が有効であることを示す。ただし、現実にはセンサや環境要因で得られた速度と SSMA が異常値であることも考えられるため、データの異常と橋梁の異常のどちらが原因か、切り分けを行う必要がある。ケース 1&2-2 とケース 2&3-3 では、ケース 1-2, 2-3 と比較して、歪度は 0 に近づき、尖度も小さくなっている。これは一様な分布に近づいていることを示し、データの混入が精度を低下させることがわかる。よって、データ群の分割精度向上が本指標の精度に影響を与えると予想される。ただし、ケース 2&3-3 は比較的平均も尖度も高いため、少なくとも本実験においては、健全時のデータに軽度損傷時のデータが混入した場合より、軽度損傷時のデータに重度損傷時のデータが混入する場合の方が、SSMA は反応することを確認した。

表 4.5 各分析ケースでの MD の諸統計量

Case Number / Statistics	1-2	1-3	2-3	1'-2'	1'-3'	2'-3'	1&2 -2	1&2 -3	2&3 -3
Mean	1.81	1.30	2.09	2.25	4.06	4.89	2.45	3.95	5.16
Standard Deviation	1.76	2.93	4.08	1.91	2.72	4.64	1.89	2.76	3.32
Skewness	0.91	1.47	1.61	1.01	0.66	1.58	1.88	1.29	1.42
Kurtosis	3.35	5.26	5.80	3.67	2.51	5.56	5.80	4.72	4.48

表 4.6 各分析ケースで有効であったデータ群の MD の諸統計量

Case Number / Statistics	1-2	1-3	2-3	1'-2'	1'-3'	2'-3'	1&2 -2	1&2 -3	2&3 -3
Mean	3.62	5.22	6.04	3.80	5.19	6.51	4.81	5.08	5.32
Standard Deviation	1.46	2.80	3.97	1.75	2.34	4.45	2.40	2.57	3.29
Skewness	0.99	1.58	1.71	1.05	0.72	1.80	-0.11	1.55	1.29
Kurtosis	3.22	5.13	5.73	2.69	2.25	5.62	1.47	4.95	3.68

4.2. ラボ実験による統計的妥当性検証

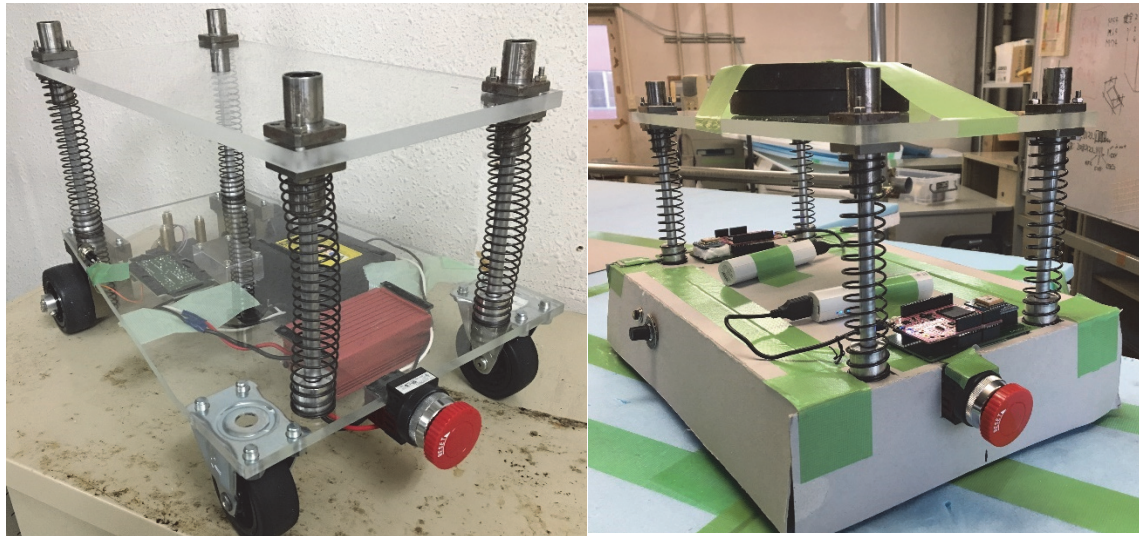
4.2.1. 実施背景

SSMA の力学的メカニズムは未解明の点も多いため、提案手法の有効性は統計的妥当性で論じる必要がある。しかし、実車走行実験では、安全性の観点から、統計的に十分な走行回数を確保することが難しい。また、数値シミュレーションでは不確定性として白色ノイズしか考慮できておらず、実環境における不確定因子の影響が十分に考慮できていない。そこで、十分な走行回数と実環境に近い不確定性の影響を考慮した検討を実施するために、小型模型を用いたラボ実験を実施し、提案手法の有効性を考察する。

4.2.2. 実験概要

車両パラメータを表 4.7 に、橋梁の自由振動から求めたフーリエスペクトルについては図 4.14 に示す。橋梁の固有振動数は 8~10Hz 前後にあると考えられる。また、車両とも異なるため、共振が発生することは考えづらい。

軽度損傷と重度損傷 2 ケースで行う。軽度損傷としては任意の箇所の横構を 1 つずつ取り外すことで模擬する。横構自体は風や地震などの横方向の荷重に抵抗するために、主桁間に斜めに配置された部材である。本実験ではこれらの影響は少ないと考え、軽度損傷とした。



(a) 模型車両（载荷無し，車重 6kg） (b) 模型車両（4kg 载荷，車重 10kg）

図 4.13 模型車両の外観

表 4.7 車両パラメータ

共通パラメータ		重量[kg]		バネ定数[N/m]		バネ上固有振動数 [Hz]	
車長[mm]	車幅[mm]	軽	重	軽	重	軽	重
400	28	6.0	10.0	124.8	374.9	2.77	2.59

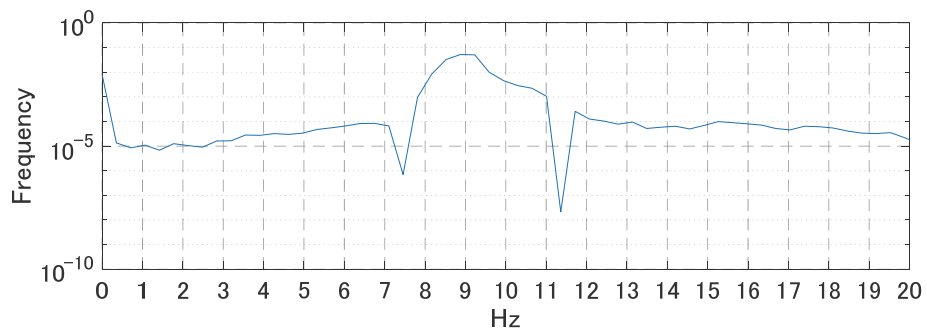
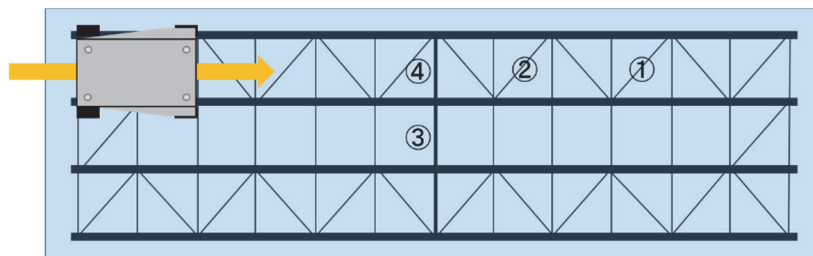


図 4.14 橋梁自由振動のフーリエスペクトル



走行ケース順

健全:I → ①取り外し:D1 → ②取り外し:D2 → ③取り外し:D3 → ③,④取り外し:D4 → チェックケース:C

図 4.15 走行ケースの順序

従来の検討から、損傷が橋梁の中央に近づくほど SSMA の損傷検知率が高い。そのため、横構は取り外す位置を替えて 2 パターン行う。現実同様に車両は 2 車線のうち左側を走行する。よって、部材を取り外す位置はすべて走行位置の真下になる。

損傷の模擬方法は、重度損傷は横桁を取り外すことで模擬する。横桁は副構造であるが、各主桁を連結する比較的重要な部材で、主桁上に載荷された荷重をすべての桁に分配し、1 主桁当たりの荷重を減らす役割を持つ。本実験で用いる紙製橋梁模型は 4 主桁で、車両は左側走行であるため、中 2 主桁の間をつなぐ、橋梁中心の横桁を取り外す。さらなる重度損傷を模擬する場合は、これに加えて隣にある、車線真下の横桁も取り外す。これは実際の損傷を模擬するためではなく、構造の変化が SSMA に与える影響を分析するためであることに注意する。以下に走行ケースの順番について示す。橋梁健全状態を”I”，軽度損傷は図の横構①、横構②で D1, D2 とする。重度損傷は横桁③を取り外す場合と、横桁③と④を取り外す場合をそれぞれ D3, D4 とする。また、損傷ケース計測後は健全状態の再現性を確認するため、修復後に、重量状態で計測を行ったこれをチェックケース C とする。

今回使用する MEMS センサは連続して 13 分間計測するように設定した。この 13 分間に 15 回走行したものを 1 ピリオドとし、各ケースについて 2 ピリオド計測する。これを軽量時と重量時で計測するため、各ケース約 60 回程度走行する。

4.2.3. 得られた実験データの概要

(1) SSMA の諸統計量

図 4.16 に本実験で得られた各ケースの SSMA を示す。縦軸が SSMA、横軸は時系列順に走行ケースを並べている。健全・損傷については図中の通り、青・赤で示す。軽量車両時は○、重量車両時は×をマーカーに使用する。また、図 4.17 に各ケースのヒストグラム、図 4.18 に各ケースの各種統計量を示す。ヒストグラムは縦軸が頻度、横軸が SSMA を示しており、点線は平均値を表している。13 分間に 15 回走行できなかったピリオドも存在するため、データが合計 60 回に満たないケースがある。また、重度損傷の D3 と D4 は分散が大きく、SSMA の値が大きく変化する結果があった。これは損傷の影響が大きすぎたことで、振動が走行するたびに不規則に変化していることが原因と考えられる。そこで、軽量時と重量時で各 3 ピリオド計 45 回計測し、データ点数を確保することで、対応した。

まず、図 4.16 において、重量車両の結果がばらついていることがわかる。この結果は車両が橋梁に対して過剰な車重となったため、橋梁振動を強く励起していることが考えられる。石川らの検討[36][37]では、重い車両であれば、より SSMA が反応することがわかっていたが、実際に運用するに至っては、安全性を考慮したうえで、ばらつきの少ない重量を選択する必要があると示唆される。また、D3, D4 では、健全時や D1, D2 に比べてばらつきが大きいことがわかる。本来、横桁は荷重を複数の桁に分配するため、主桁間を連結している部材で、直接剛性に寄与する部材ではない。そのため、横桁がないため、主桁が独立していることで、走行ごとにそれぞれの主桁群が不規則な挙動をしている可能性が考えられる。重量

の増加と横桁の除去によるばらつきの増加は、既往の研究で明らかになっている SSMA の変化原因のうち、重量と構造の変化に対応すると考えられる。しかし、ばらつきが大きいと、損傷検知が難しくなるため、統計的な手法の適用が有効である。

最後にチェックケースのばらつきが大きくなっている点に注目する。これは、損傷ケースの実験を行っている間に、想定外の損傷が発生し、部材を取り付けた後も影響が残っている可能性が考えられる。実環境を考慮すると、ばらつきは車重や速度の影響によって変化するため、損傷検知に用いるのは難しい。ただし、自動運転の実用化や、これに伴い車両の詳細パラメータが明らかになることで、既知の点検条件が多くなれば、通常の営業運用中ではない、移動センシングによる詳細な点検への利用が期待できる。

次に、**図 4.17** のヒストグラムと平均値に注目する。**図 4.16** と同様、重量車両でばらつきが増加していることがわかる。また、平均値付近で頻度が高いため、特定の値に集合していることが考えられ、SSMA の反応精度についても確認できる。ただし、全体的に重量車両の検討では頻度分布が平らになっているため、ばらつきの発生原因は不確定因子によるものである可能性が高い。

平均値は重量変化に応じて変化しているが、同じ重量状態でも損傷によって変化していることがわかり、損傷に対する SSMA の感度が確認された。本検討では、軽量車両の方が損傷による平均値の変化が大きいが、これは重量車両が重すぎたことが原因の可能性があるので、今後は過剰重量での数値実験を行い、再現性を確認することで、適切な重量と SSM あいの反応メカニズムについて、分析できると考えられる。

最後に、I と C の変化に注目する。重量車両では、I と C は近い値を示しているのに対し、軽量時は大きく異なった。これは想定外の損傷発生以外に、紙製模型橋梁が橋梁状態を問わず、重量車両の荷重で一部塑性変形し、最初に軽量車両が走行した健全時と異なっている可能性が考えられる。実際の橋梁でも、過積載などでこのような現象が発生することも考えられるため、この結果から、SSMA を用いた監視システムへの応用可能性が期待される。

次に、**図 4.18** の諸統計量に注目する。平均値は上記考察と同様、重量や損傷の有無によって変化している。分散は、走行位置の微妙な違いやその他の不確定因子による影響が考えられるため、重量や損傷の有無による優位な変化があるとは言えない。次に、歪度と尖度について評価する。歪度は、損傷程度が変化することで正から負になっており、分布の変化が確認された。これは SSMA の感度を示すものと考えられる。ただし、最後のチェックケースについても、当初と変化したため、損傷程度の変化のみが影響を及ぼしたとは言えない。尖度は、全体的に 2 を超えている。尖度が高い場合、平均値付近の特定の値に集中して分布し、分布の裾は長く続くことを意味する。SSMA は不確定要因によっても変化するが、影響が小さければ、SSMA の正解値が算出されるはずである。この結果は、SSMA の不確定因子に対する耐性を示していると考えられる。そのため、損傷が大きければ、不確定因子への耐性を超えて SSMA を変化させるため、尖度は 0 に近づく。しかし、ケースによっては増加するものもあるため、単純比較による損傷検知は難しいことがわかる。

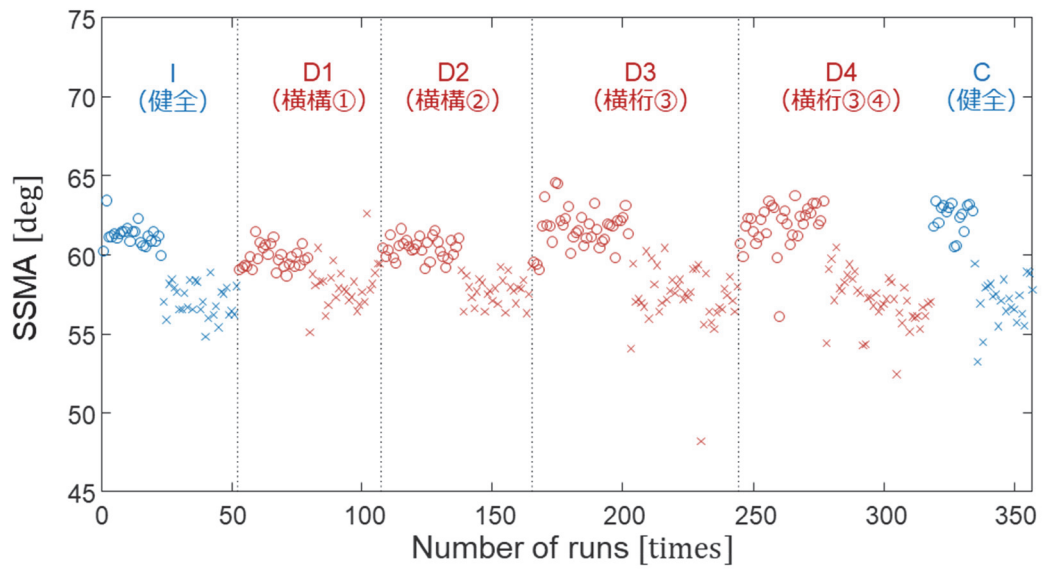


図 4.16 全ケースの SSMA

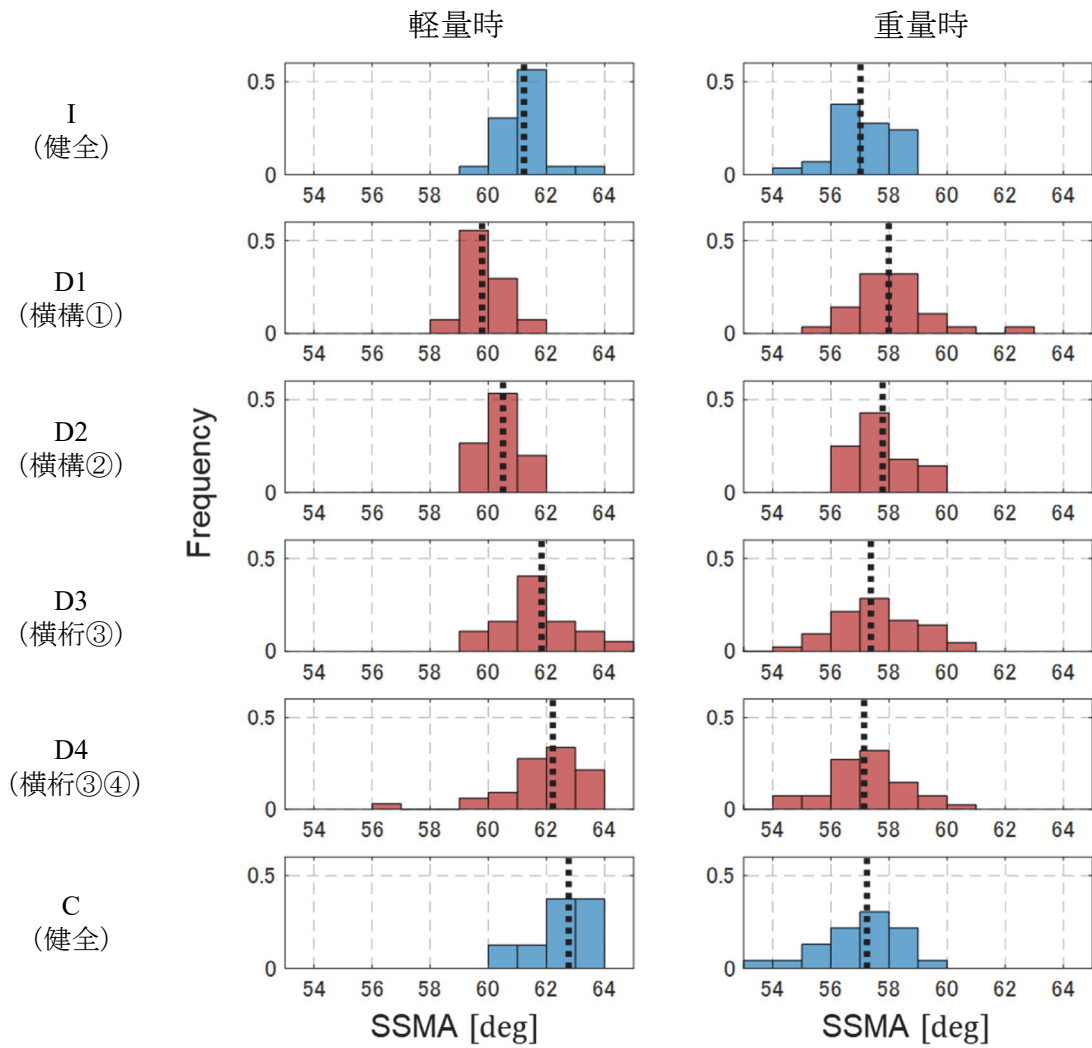


図 4.17 全ケースでの SSMA のヒストグラム

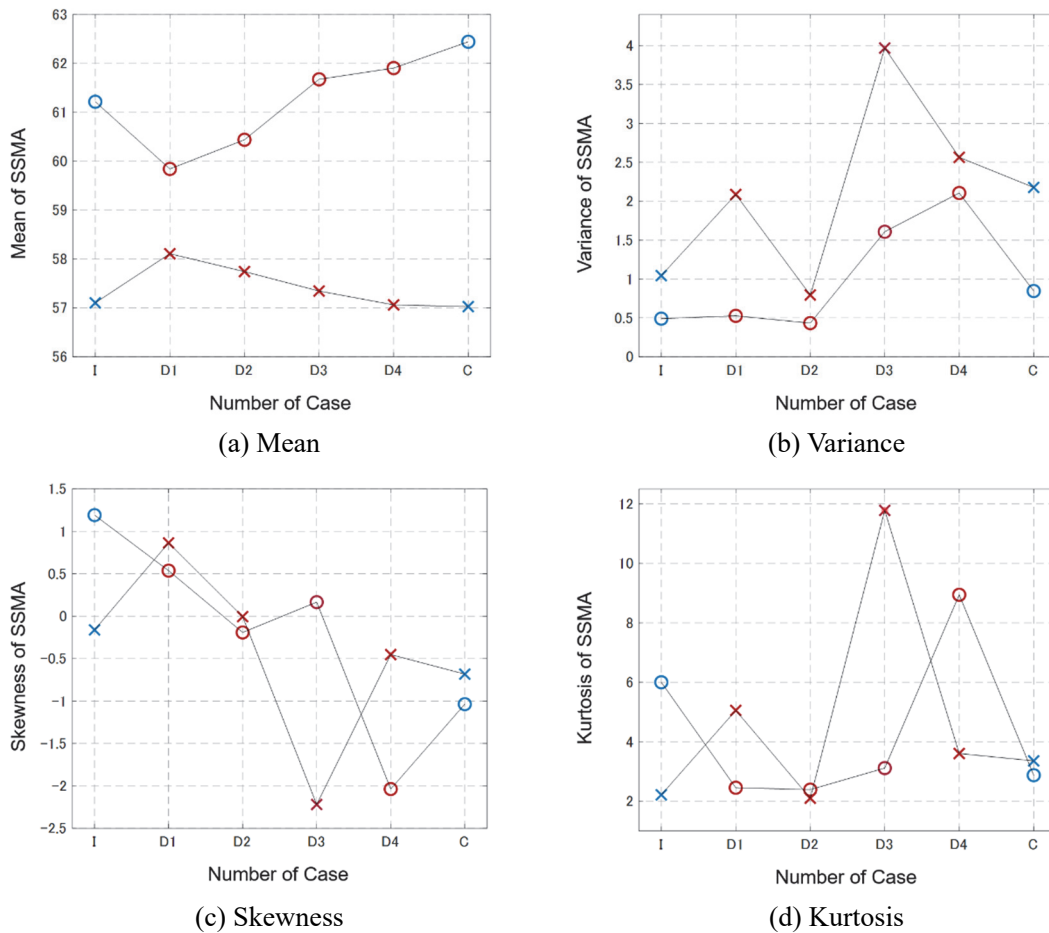


図 4.18 全ケースの SSMA の高次統計量

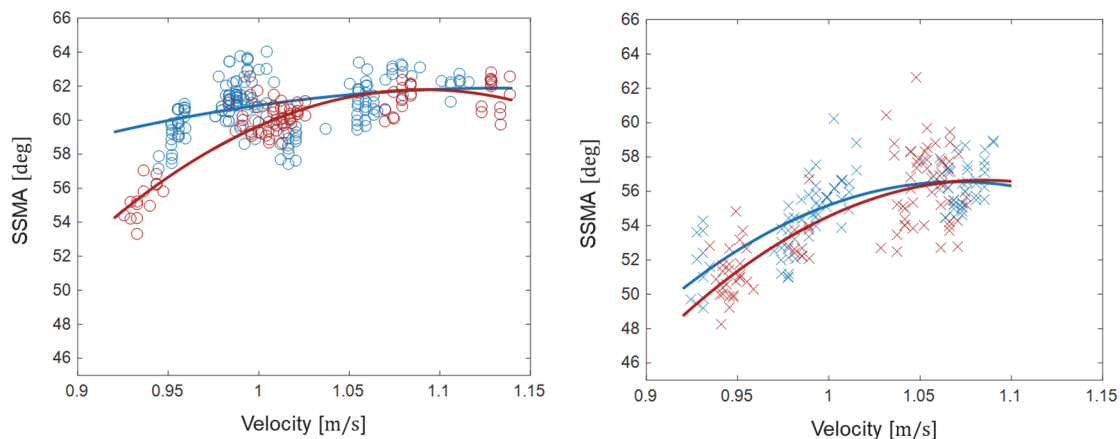
(2) 速度による影響

速度変化の影響を確認するため、最も軽度な損傷である D1 と最も重度な損傷である D4 の結果について、速度と SSMA の関係を図 4.19 に示す。青色が健全時 I、赤色が損傷時を示す。D1 を軽度損傷、D4 を重度損傷とする。(a), (c)は軽量時、(b), (d)は重量時について、それぞれ結果を示す。それぞれ健全時と損傷時の近似曲線を、2次関数で示している。近似曲線から、速度と SSMA は石川らの検討[36][37]同様、滑らかな曲線が確認できる。

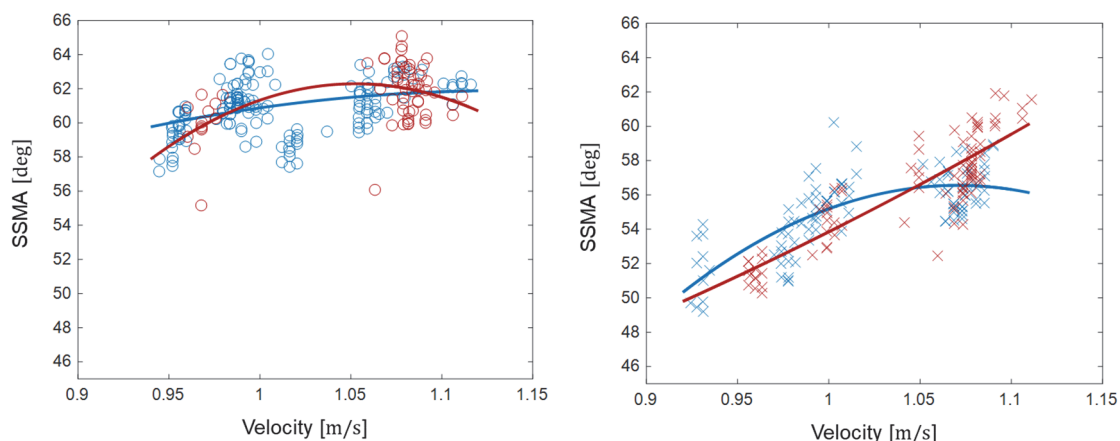
以下の結果より、ほぼすべての速度帯において、軽量時と重量時のそれぞれの健全状態での SSMA は、異なる分布を持つことが確認された。この結果は軽量時と重量時で SSMA の反応が異なることを示しており、分析によっては健全時のデータなしに損傷を判定可能であることを示している。また、速度分布が重なっている速度帯は狭いが、軽量時と重量時の双方において健全時 I と損傷時 D1 を比較すると石川らの検討結果[36][37]とは異なり、速度上昇による反応は軽量車両の方がよいことがわかる。これは重量車両が重すぎた可能性が考えられる。結果から、横構 1 を取り外したことで、SSMA が変化していると考えられる。また、軽量時のほうが反応したことから、数値計算結果[36][37]を考慮すると、より軽量の

模型での試行が考えられる。加えて、数値計算によって、過剰な車両重量での SSMA の挙動を検証することで、今回の実験で得られた知見の再現性と重量変化による SSMA の反応メカニズムについて、明らかになることが期待される。

次に、それぞれの損傷状態での SSMA を比較する。健全時 I と損傷時 D4 を比較すると、軽量時に比べて重量時のほうが健全・損傷で SSMA の差が大きいことが確認できる。よって、D4 の損傷では重量時のほうが、SSMA は変化することがわかる。また、速度の変化に対して、SSMA の変化が 10 程度と大きいこともわかる。この結果は石川らの数値計算結果 [36][37] と同様である。D1 における結果では、軽量車両の方で反応が良好だったが、D4 では重量車両の結果で良好だった。これは損傷の程度によって重量・速度の変化に対して SSMA の反応が異なることを示す。SSMA の正解値を算出することは困難であるため、損傷検知指標としての SSMA は重量や速度をパラメータとして加えた上で、多変量の統計的分析を用いて損傷検知を行う必要があるとわかる。



(a) 軽量車両での健全 (青) と軽度損傷 (赤) (b) 重量車両での健全 (青) と軽度損傷 (赤)



(c) 軽量車両での健全 (青) と重度損傷 (赤) (d) 重量車両での健全 (青) と重度損傷 (赤)

図 4.19 重量別健全時と D1 もしくは D4 の速度—SSMA 関係

4.2.4. 提案手法の適用結果と考察

以上の検討から、速度—SSMA の分布や単純な統計量の比較では、損傷検知が難しいことがわかった。これは、SSMA の力学的特性である、走行ごとに異なるランダム性が存在することが原因である。しかし、数値計算と実験的検討により、損傷に反応することは明らかであるため、ランダム性を考慮して統計的な手法を用いることが有効であるといえる。本研究の提案する軽度損傷検知手法である速度—SSMA の MD を用いた手法を上記結果に適用する。適用結果を以下に示す。適用した速度—SSMA のデータ群はケース I, D1, D4 の軽量車両時、重量車両である。I が健全、D1 が比較的軽度損傷、D4 が重度損傷であると設定する。また、速度と SSMA の関係について注目するため、今回の検討では同じ重量内で比較することとした。

まず、軽量車両時における I, D1, D4 の速度—SSMA データから MD を算出した結果の概念図を以下に示す。青円が健全、赤円が軽度、黒円が重度のデータ群を半分にして MD の平均値を算出したものである。この円の半径より、各円の中心間距離が大きければ損傷検知に試行していることを示す。緑線が健全を基準に、軽度を判別した場合、赤線が健全を基準に重度を判別した場合、黒線は軽度を基準に重度を判別した場合の MD の平均値を示す。また、値の一覧については表にまとめる。

結果として、鋼製模型橋梁の結果と同様にすべての比較ケースで損傷検知に成功していることがわかる。鋼製模型橋梁での検討と比較して、データ数も多く、速度の分散も小さいため、より速度変化による影響の差異をとらえられていると考えられる。ただし、同じデータ群内での MD の平均値は鋼製模型橋梁での結果とほとんど変わらないことから、鋼製橋梁模型での結果も、データが十分にあった可能性が再度示唆された。また、本検討では健全と軽度を比較した MD の平均値（緑線）や健全と重度を比較した MD の平均値（赤線）が、軽度と重度を比較した MD の平均値（黒線）より明確に大きい点が挙げられる。今回、軽度として設定した損傷は、実際においては重度損傷に分類される。また、今回、重度と設定した損傷は実際に発生した場合、即供用停止となるような損傷である。これと比較して、鋼製模型橋梁で設定した軽度損傷は、実際に起こりうる範囲の軽度損傷であると考えられる。鋼製模型橋梁での結果と、紙製模型橋梁での結果を比較すると、健全時のデータを有する場合、速度能性は SSMA の力学的特性から、今回の実験ケースのみで適用可能である可能性も考えられるが、今後の追加検討により適用範囲が明らかにすることで、SSMA を用いた、より定量的な損傷検知が可能になると考えられる。

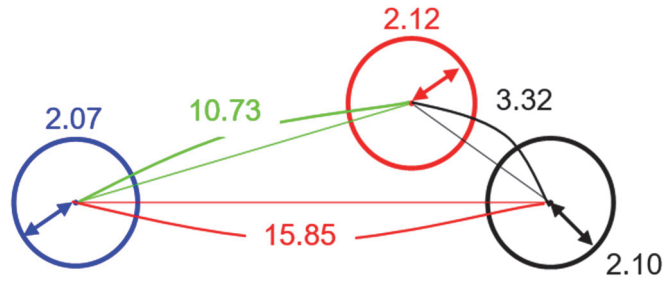


図 4.20 軽量車両での MD 結果の概念図

次に、重量車両での結果を示す。色の設定については軽量車両と同様である。すべて損傷検知には成功しているが、すべての円の中心間距離が減少していることがわかる。これは SSMA の分散が大きいが考えられる。そのため、データの重複する部分が増え、MD が減少することになったと考えられる。MD は分布を楕円型に近似し、速度の変化をより反映する長径側には緩く、SSMA の変化をより反映する短径にはより厳しくとすることで分類を行っている。そのため、SSMA の分散が速度の変化以上に大きくなってしまえば MD は小さくなる。よって、数値計算で明らかになった重量車両での検討は、SSMA の分散が大きくなる程度の重量範囲で行う必要があることが示唆される。ただし、本検討でのみ適用可能な知見であるため、数値計算を用いて、過剰な重量における SSMA の分布変化等を確認する必要があると考えられる。

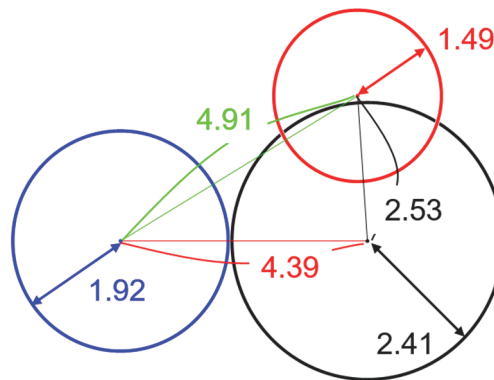


図 4.21 重量車両での MD の概念図

最後に、各ケースでの損傷検知の正解率 A_r を算出した。表 4.8 にまとめる。鋼製模型橋梁と同様、正解率は比較的高くなった。ケース 2-3 やケース 2''-3''において、正解率が低下している。これは軽度損傷と重度損傷は比較的似た分布を持つことを示す。軽度損傷として除去した横構は、実際発生した場合は重度の損傷であるが、紙製模型橋梁においては、ほとんど剛性に寄与していない。すなわち、この程度の変化であっても、速度—SSMA の分布は変化していることを示す。この結果から、より軽微な損傷、例えば紙製模型橋梁のボルト弛

緩などを検知できる可能性が考えられる。また、ケース 1-2 よりケース 1-3 の MD も正解率も大きいことから、軽量車両時で健全時のデータを保有していた場合、正解率の上昇から損傷の規模を推定できる可能性が示唆されている。

今回のラボ実験では、サンプル数を増やして統計的に妥当性を確認することが目的である。しかし、鋼製模型橋梁の結果と比較して、サンプル数が増加しても、正解率は同程度で、ほとんど変化しなかった。したがって、鋼製模型橋梁での実験もサンプル数は十分であったと考えられる。数値計算での結果は、モデルが簡単であったため、付与した乱数の影響を受けて、サンプル数増加による正解率上昇が顕著であったことが考えられるため、モデルの高精度化などによって、より詳細な反応メカニズムの解明が期待できる。

表 4.8 各橋梁状態間での MD

x	1	2	3	1	1	2	1''	2''	3''	1''	1''	2''
y	1	2	3	2	3	3	1''	2''	3''	2''	3''	3''
D	2.07	2.12	2.10	10.73	15.85	3.32	1.92	1.49	2.41	4.91	4.39	2.53
Ar [%]	-	-	-	62.9	85.1	35.1	-	-	-	53.9	52.8	43.8

(※ 1...INTACT, 2...LIGHT, 3...HEAVY, n'' : data in the heavy vehicle)

最後に、得られた知見から、社会実装後の運用に関して注意すべき点について考える。橋梁の損傷検知は、損傷を見逃した場合の社会的リスクから、閾値を安全側に設定する必要がある。本研究で提示した MD による概念図（例えば図 4.21）を参考にすると、図内にあるすべての円の半径を小さく見積もることで、安全側に閾値を設定したことになる。また、今回の検討では閾値を境に検知の可否を決定したが、今後は閾値自体に範囲を持たせ、機械学習等を利用した判定基準の最適化などで、より高精度な判定が可能になると考えられる。

5. 結言

5.1. 本研究のまとめ

本研究では、移動センシング技術を社会実装する上での技術的課題として、橋梁損傷の影響を評価可能なセンシングデバイスの開発と分析手法の提案を行い、数値実験、類似環境実験、ラボ実験により検証を行った。

まず、既往の研究を参考に、移動センシングの対象となる中小スパン橋を計測するセンサの性能として、16bit以上のADコンバータとサンプリングレート300Hz以上に設定可能な加速度センサが必要と推定した。また、数値実験により、橋梁損傷によって剛性低下が80%も低下していた場合でも、損傷周辺で健全時と損傷時の振幅比が3%程度、その最小差異で 1.93×10^{-4} [g]程度であることを確認し、推定したセンサ性能の妥当性を確認した。数値計算の結果から、12bit程度のADコンバータを用いると、損傷による影響を見逃すことが考えられる。よって、今後の拡張性を考慮し、分解能24bitのADコンバータとサンプリングレート300Hz以上の加速度センサを用いたセンシングデバイスを設計した。

設計したデバイスは、実車両に搭載し、性能試験を行った。性能試験は、筑波大学内のループ道路を走行中のデータを計測し、加速度センサのサンプリングレートの確認と、加速度とGPSの位置同期精度を確認した。加速度データは約0.0033秒ごとに計測され、300Hz程度であることが確認された。また、GPSを用いた位置同期結果は、対象とした段差での衝撃を捉えることができ、位置同期精度は対象範囲の特定に十分であることを確認した。

次に、現場ニーズの高い軽度損傷の検知のため、損傷検知指標であるSSMAと速度のデータからMDを算出する、提案手法の有効性について検証を行った。数値計算は、軽自動車に類似の物理パラメータと、実験に用いる鋼製模型橋梁に類似の物理パラメータを導入して行った。走行速度も、実験で得られたデータ範囲を参考に設定し、再現性が確認した。数値実験では、現実の不確定因子を考慮できないため、振動データに乱数を付与することで、SSMAの分布を得た。乱数は実環境を考慮し、既往の研究より大きい、計測値の5~10%与えることとした。検討により、健全時のデータを基準とすることで、-30%以上の剛性低下であれば検知可能であることが明らかになった。また、剛性低下-30%以下の比較的軽度損傷の段階のデータを基準とできれば、それ以上の剛性低下も検知できる可能性も示された。これは健全時のデータがない場合の損傷検知可能性を示唆している。これら検討により、提案手法の妥当性を数値的に確認することができた。

提案手法は数値計算で有効性が確認されたため、実環境に近い不確定因子を考慮できる、類似環境での実証試験を行う。類似環境実験では、実車両が走行可能な鋼製模型橋梁を製作し、軽度損傷として、主桁と横桁を接合するボルトを弛緩させた。結果は速度がばらつき、SSMAは変化していたが、提案手法を用いることで軽度損傷の検知に成功した。

類似環境実験の結果から、提案手法による軽度損傷検知の可能性が示されたが、鋼製模型橋梁では繰り返し走行回数を増やすことが難しいため、ラボ実験を行った。ラボ実験では、

サンプル数の増加による検知精度の変化や、数値計算と類似環境実験結果の再現性を確認した。損傷は横構除去を軽度、横桁除去を重度と定義して、損傷検知を行った。提案手法によって損傷検知に成功した他、提案手法を用いることで正解率と損傷規模の相関関係についても知見を得た。以上のラボ実験結果に対する検討により、提案手法の妥当性と有効性が確認された。

5.2. 成果

本研究では、以下の成果を得た。

- 1) 橋梁の損傷検知に必要な量子分解能 24bit を持つ AD コンバータと、有効周波数 1000Hz の加速度センサを 300Hz で運用するセンシングデバイスを設計し、安価で量産性の高い移動センシング用デバイスを開発した。開発したデバイスの計測性能および GPS の位置同期精度については、実車両を用いた計測試験によって確認・実証した。実証試験の結果、開発したセンシングデバイスは設計性能を満足することを確認した。
- 2) 移動センシングの社会実装を目指し、現場ニーズの高い、橋梁の軽度損傷を検知可能な手法として、速度と SSMA の MD を用いる手法を提案した。また、提案手法の有効性を 1次元梁でモデル化した橋梁モデルと HC でモデル化した車両モデルを用いた数値計算、実車両が走行可能な鋼製模型橋梁を用いた類似環境実験、繰り返し試験と複数の橋梁損傷を導入可能な紙製模型橋梁を用いたラボ実験によって実証した。実証試験の結果、提案手法による軽度損傷検知手法の妥当性と有効性が確認された。

5.3. 今後の課題

5.3.1. 物流車両の適用

TRL8 相当の実環境での実証試験を行うため、物流トラックを有する企業に協力を得て、物流車両に計測システムを搭載、長距離の計測試験を行う。改めて計測システムに追加した構成デバイスについて、以下に示す。また、計測システムの起動停止がドライバの負担にならないよう、車両の起動停止に同期するインターフェースを開発した。

安全対策として、企業側からの要請により、通信用ケーブルは耐熱・防水・防塵に優れたものを採用し、タイヤに巻き込まれた際、容易に切断されるか、試験を行った。

開発した計測システムを物流車両に搭載し、長距離計測を実施した。搭載した車両および搭載場所とシステムの設置位置を図に示す。

物流車両は 17:00 ごろに物流センターを出発し、途中付近の物流センターに立ち寄って積み込みを行い、高速道路を走行して明朝、県外の目的地に到着する。計測システムがエンジンに同期して起動し、計測を開始するか確認した。計測結果に Google Map 上で GPS の軌跡を示す。アイコンは GPS を取得した場所を示す。GPS 情報から、ある程度車両の移動ル

ートが推測できることがわかる。本結果では橋梁上のデータを得られなかったため、分析は行っていない。

下記結果では、一般道路上のデータのみで、高速道路上のデータを計測できなかった。高速道路への進入時、システムが毎回起動しないことが原因であった。当初、エンジンからの給電を要する他の電子機器の影響が考えられた。その後の聞き取り調査により、これら機器は常時起動していることが分かった。この結果から、車両の給電能力に応じた調整を要する可能性が明らかになった。社会実装時には、計測システムがこれら給電能力を調整する機能が必要になることが分かった。



(a) 計測システムを搭載した物流車両（各丸内にそれぞれ設置）



(b) 前輪ばね下センサ



(c) 後輪ばね下センサ



(d) 計測システム本体

図 5.1 搭載車両とセンサ位置

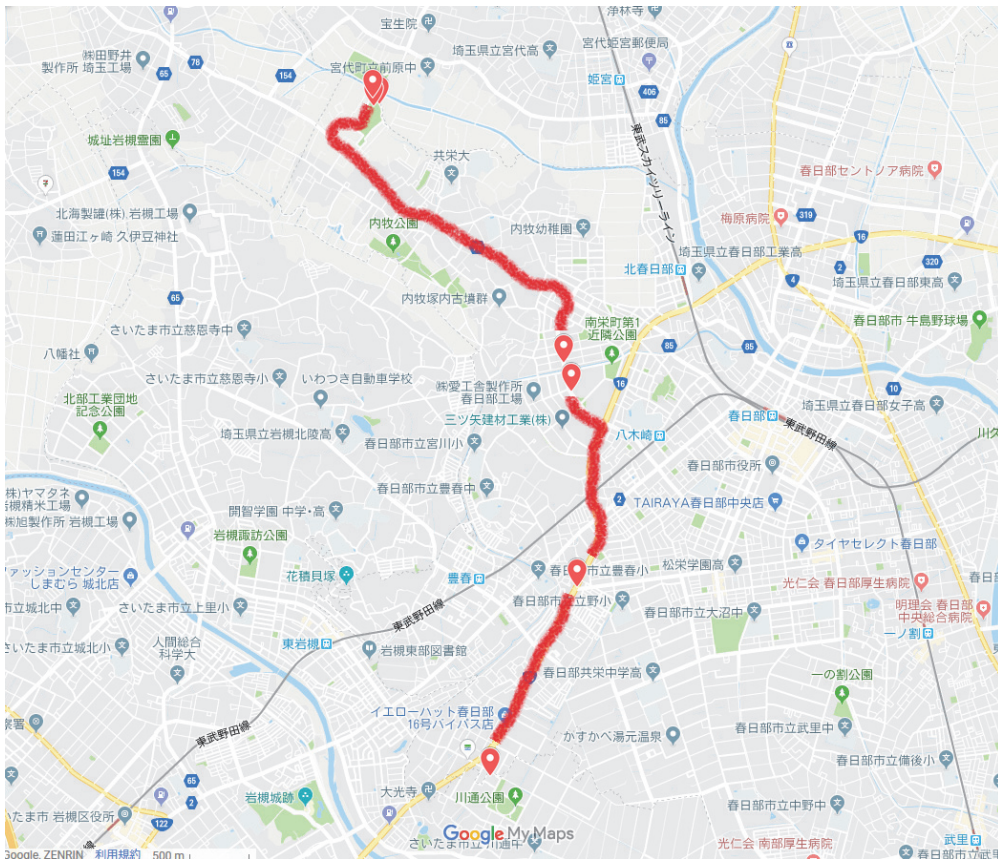


図 5.2 GPS から得られた搭載車両の移動軌跡予想の一部 (Google Map)

5.3.2. 分析手法の高度化

本検討では、移動センシング用のデバイスを開発したが、デバイスは橋梁モニタリングにも使用可能である。将来、IoT や IoA が進展した社会では、すべてのものがセンサを搭載し、計測データを共有すると考えられる。移動センシングはスクリーニング技術であるため、そのままでは適用できなくなることも考えられるが、橋梁モニタリングによって得られたデータとの連携により、橋梁モニタリング精度の向上が挙げられる。橋梁振動を生じる最も多い要因は、交通振動である。そのため、車両に搭載したセンサと同期することによって、正確に移動体の位置を推定可能であれば、より詳細な点検を可能にすると考えられる。また、GPS による位置同期精度、時刻同期精度はモジュールの性能上昇とともに向上することが考えられる。具体的には、準天頂衛星「みちびき」に対応したデバイスを使用するなどである。これらの同期精度が向上すると、先に述べた移動センシングと橋梁モニタリングの連携による詳細な点検が可能になると考えられる。

また、今回 SSMA 以外のパラメータとして、速度を用いた。速度以外に、SSMA に変化させるパラメータとして、温度などがあげられる。それ以外にも、風や水流などが橋梁振動に影響することが考えられるが、影響は明らかではないため、今後検討範囲を広げていくことでその影響について評価する必要があると考えられる。

5.3.3. 数値実験の高度化

今後の課題として、軽度損傷に対する SSMA の反応メカニズムを明らかにすることが挙げられる。数値シミュレーションによって軽度損傷を模擬するには、ディテール部も再現した詳細な数値モデルを用いる必要がある。石川らの用いた三次元トラスモデルをはじめ、ボルトの接触解析が可能な FEM モデルの作成などが考えられる。これら新たな数値検討により、SSMA の力学的な反応メカニズムが明らかになると考えられる。また、今回提案した MD を用いる方法を適用し、適用範囲を明らかにすることで、より精度の高い損傷検知が可能になると考えられる。

6. 参考文献

参考文献

- [1] 道路橋の予防保全に向けた有識者会議：道路橋の予防保全に向けた提言，5月16日，2008.
- [2] 国土交通省：道路構造物の現状（橋梁）
- [3] 渡辺明：技術展望 プレストレストコンクリートの歴史（道路構造物），土木学会論文集，V-17，No.451，pp.1-5，1992.
- [4] 国土交通省：国土交通白書2014，第1部第1章第3節2，2014.
- [5] 米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査団：米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告，2007
- [6] 山田健太郎：木曾川大橋の謝罪の破断から見えるもの，土木学会誌 93(1)，29-30，2008.
- [7] 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，pp.1，6月，2014.
- [8] 国土交通省：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言（案）参考資料，4月，2014.
- [9] 建設省土木研究所：橋梁マネージメントの開発に関する調査研究報告書，土木研究所資料，第3633号，1999年
- [10] 国土交通省：物流を取り巻く現状について，2月，2017.
- [11] 国土交通省：物流を取り巻く現状について，10月11日，2018.
- [12] Yang, Y. B., Lin, C. W. and Yau, J. D.: Extracting bridge frequency from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.272, pp.471-493, 2004.
- [13] Yang, Y.B., and Chang, K.C.: Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle : Parametric study, *Engineering Structure*, Vol.31, pp.2448-2459, 2009
- [14] Yang, Y.B., and Chang, K.C.: Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique, *Journal of Sound and Vibration*, 322, pp.718-739, 2009.
- [15] Zhihai Xiang, Xiaowei Dai, Yao Zhang and Quihai Lu : The Tap-Scan Damage Detection Method for Beam Structures, *Advances Interaction & Multiscale Mechanics*, pp.541-553, 2010.
- [16] T. Nagayama, A.P. Reksowardojo, D. Su, T. Mizutani: Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles, *Engineering Structures* 150, pp.821–829, 2017.
- [17] H. Wang, T. Nagayama, J. Nakasuka, B. Zhao, D, Su : Extraction of bridge fundamental frequency from estimated vehicle excitation through a particle filter approach", *Journal of Sound and Vibration*, Volume 428, Pages 44-58, 18 August 2018.
- [18] Y. Oshima, K. Yamamoto, K. Sugiura, and T. Yamaguchi, : Estimation of bridge eigenfrequencies based on vehicle responses using ICA, in *Proceedings of the 10th International Conference on*

Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '09), Osaka, Japan, September 2009

- [19] Y. Oshima, K. Yamamoto, and K. Sugiura, Damage assessment of a bridge based on mode shapes estimated by responses of passing vehicles, *Smart Structures and Systems*, vol. 13, no. 5, pp. 731–753, 2014.
- [20] 大島義信, 小林義和, 山口隆司, 杉浦邦征: 走行車両と橋梁の振動伝達に関する基礎的研究, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, Vol. 68, No. 2, 384-397, 2012.
- [21] E. J. O'Brien, A. Malekjafarian : A mode shape - based damage detection approach using laser measurement from a vehicle crossing a simply supported bridge, *Structural Control Health Monitoring*, February, 2016
- [22] E. J. O'Brien, A. Malekjafarian, A. González : Application of empirical mode decomposition to drive-by bridge damage detection, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Volume 61, pp. 151-163, September 2016.
- [23] X. Kong, C. S. Cai; and B. Kong, : Damage Detection Based on Transmissibility of a Vehicle and Bridge Coupled System, *J. Eng. Mech.*, 141(1), 2015.
- [24] 吉田郁政, 我妻克明, 天野由華, 金哲佑, 川谷充郎: 損傷度推定のための逆問題の非適切性と正則化, *応用力学論文集*, Vol.10, pp.69-76, 2007.
- [25] Soojin Cho, Hongki Jo, Shinae Jang, Jongwoong Park, Hyung-Jo Jung, Chung-Bang Yun, Billie F. Spencer, Jr. and Ju-Won Seo : Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: data analyses, *Smart Structures and Systems*, Vol. 6, No. 5-6 , pp.461-48, 2010.
- [26] Chul-Woo KIM, Ryo ISEMOTO, Kunitomo SUGIURA and Mitsuo KAWATANI: STRUCTURAL FAULT DETECTION OF BRIDGES BASED ON LINEAR SYSTEM PARAMETER AND MTS METHOD, *Journal of JSCE*, Vol.1, pp.32-43, 2013
- [27] 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, pp.557-571, 2013.
- [28] C.W. Kim, K-C. Chang, S. Kitauchi1, P. J McGetrick : A field experiment on a steel Gerber-truss bridge for damage detection utilizing vehicle-induced vibrations, Vol.15, Issue.2, pp.174-192, 2016
- [29] 五井良直, 金哲佑: 橋梁振動の多変量自己回帰モデルのベイズ推論に基づく異常検知, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 67, No. 2, pp. 143-150, Feb. 2018
- [30] 石澤雅隆, 川合忠雄, 松村政秀, 山口隆司: 振動モード解析を用いた橋梁の洗掘評価手法に関する研究, *鋼構造論文集*, Vol.25 (98), pp.67-791, 2018.
- [31] 藤原保久, 梅津健司, 丹野浩二, 千葉嘉隆: 橋梁等構造物の点検ロボットカメラ, *本ロボット学会誌*, Vol. 34, No. 9, pp.581-582, 2016.
- [32] 小山哲, 丸屋 剛, 堀口 賢一, 澤 健男: ガボールウェーブレット変換を用いたコンク

- リートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 3, pp.178-194, 2012.
- [33] 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 河野広隆: 車両応答分析に基づく橋梁モード形状推定手法の開発, 土木学会論文集, 土木学会論文集 A1, Vol.67, pp.242-257, 2011.
- [34] 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征: 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.320-331, 2013.
- [35] 中釜裕太: 模型桁実験による車両応答を用いたモード形状推定法の桁損傷検知への適用性に関する検討, 筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文, 2013.
- [36] 石川幹生, 山本亨輔: 車両応答分析によるトラス橋部材破断検知手法の数値的検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.23, pp.160-167, 2015.
- [37] 石川幹生, 山本亨輔: トラス橋部材破断が SSMA 分析結果に及ぼす影響の数値的検討, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.204-211, 2016.
- [38] 二出川真, 石川幹生, 高橋悠太, 山本亨輔: 車両応答分析を用いた橋梁損傷検知手法における車両特性の影響, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 73, No. 2, I_831-I_841, 2017
- [39] 矢部明人, 宮本文穂, 磯田聡史, 谷信幸: 路線バスによる中小橋梁モニタリング手法の開発, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント) , Vol. 69, No. 2, pp.102-120, 2013.
- [40] Tomoaki Tsuzuki: アプリケーション・ノート, ANALOG DEVICES, ANJ-0005, 2008.
- [41] 川谷充郎, 金哲佑, 尾崎隆弥, 利波立秋, 塚本昌彦, 藤田直生, 南靖彦: 橋梁振動モニタリングのための MEMS 無線センサノード開発と実橋適用性検討, 応用力学論文集 Vol.13, pp.1009-1016, 2010.
- [42] 日本機械学会: 計算力学ハンドブック I 有限要素法 (構造編), pp.79-81, 丸善, 2010.
- [43] J.W.Cooley, J.W.Tukey: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Mathematics of Computation, Vol.19 1965.
- [44] P.C. Mahalanobis: On the generalised distance in statistics, Proceedings of the National Institute of Sciences of India, pp.49-55, 1936
- [45] 田口玄一: パターン認識のための品質工学(3), 品質工学, vol.3, No.4, pp.2-5, 1995.
- [46] 手島昌一, 坂東友則, 金丹: マハラノビス・タグチ・システム法を適用した外観検査技術の研究, 品質工学, Vol.5, No.5, October, 1997.
- [47] 田口玄一: 音声のパターン認識, 品質工学, vol.3, No.5, pp.3-7, 1995.
- [48] 小早川健, 木下明德, 熊野正, 加藤直人, 田中英輝, 松崎拓也, 宮尾祐介, 辻井潤一: k-means クラスタリングに用いるマハラノビス距離の非反復的推定法, 言語処理学会第 15 回年次大会発表論文集, 3 月, 2009.
- [49] 女鹿野大志, 福井健一, 小野智司: 進化的距離計量学習への多目的最適化アルゴリズムの適用, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 10-2P-04, 2014.
- [50] Han Jia Ye, De Chuan Zhan, Xue Min Si, Yuan Jiang: Learning Mahalanobis Distance Metric:

Considering Instance Disturbance Helps, Proceedings of the Twenty-Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-17), 2017.

- [51] Shiming Xiang, Feiping Nie, Changshui Zhang : Learning a Mahalanobis distance metric for data clustering and classification, Pattern Recognition, Vol.41, pp.3600—3612, 2008.
- [52] 阿曾克司, 近田康夫 : 拡張したマハラノビス距離の橋梁総合健全度への適用, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.151-162, 2006年3月
- [53] 浅川一樹 : MEMS 利用による交通振動計測の可能性検証, 筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文, 2014.
- [54] 毛利宏輔 : GPS 時刻同期型 MEMS センサの橋梁モニタリングへの適用, 筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文, 2015.
- [55] 原隆, 山口隆司, 北原武嗣, 和多田康男 : 鋼構造学, 環境・都市システム系教科書シリーズ 15, コロナ社, pp197-202, 2007.

謝辞

本研究は、松島亘志教授、山本亨助教のご指導により完成することができた。不出来な学生に対して粘り強くご指導下さり、本当にありがとうございました。フロンティア工学研究グループの定例ゼミでは、構造力学だけでなく、地盤工学や流体力学も起点として、幅広い分野の議論が活発に行われ、多くのことを学ばせて頂きました。松島先生には粒子のメカニズムの面白さについて、大変熱心に教えていただきました。私が橋梁だけでなく、地盤や土について興味を持ち続けていられるのは松島先生のおかげだと思います。山本先生とはほぼ研究室立ち上げからご指導いただきました。さまざまな困難や課題がありましたが、それらすべてが私の成長につながったと今は思います。また、山田恭央先生にも、前期課程在学中には大変お世話になりました。先人の先生方・諸先輩方が素晴らしい研究環境を作り上げて下さった基礎の上に、今回の成果があったと思います。ここに心より感謝を表します。

また、境有紀教授には学部生時代から多くのご指導を賜りました。構造動力学研究室で、動力学の基礎を学ばせて頂いただけでなく、境先生の、力学的背景を如何に突き止め、分析するかという研究への姿勢は、研究者としての私の根幹になっているように思います。本当にありがとうございました。

岡田幸彦准教授は「物流サービスの労働環境改善と付加価値向上のためのサービス工学×AIに関する研究開発」プロジェクトに参加するチャンスを下さいました。本プロジェクトに参加したことで、今回の成果に繋がりました。貴重な機会を頂いたことに感謝申し上げます。善甫啓一助教、Phang Doc Tuan 准教授にも同プロジェクトで大変お世話になりました。先生方から、研究者に必要な意識、姿勢、技量を教えて頂きました。

本研究に用いた鋼製橋梁模型は(株)角田製作所、本学技術職員の小島篤志氏、金久保利之教授、八十島章助教、フロンティア工学研究グループ学生(千野隆之介氏、松浦大志氏、二出川真氏、阿部智成氏、宮本陸氏)とプロジェクト学生(佐藤開氏、大村怜氏)の協力により製作されました。ここに記して感謝を示します。また、二出川真氏、阿部智成氏、宮本陸氏は、ラボ実験で使用した紙製模型橋梁・模型車両の製作にも多大な貢献をして下さいました。ラボ実験では遅くまで何度も走行実験を繰り返す過酷な作業をお願いしました。最後までやり遂げてくれて、本当にありがとう。

毎週開催された岡田研・善甫研・山本研・トゥアン研合同ゼミでは、村井諒氏、村江優奈氏、吉澤貴拓氏、荒井大河氏に大変お世話になりました。皆さんとご一緒できたからこそ、この1年半のさまざまな困難を乗り越えてこれたと思います。ありがとうございました。

なお、本研究における成果の多くは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構出資金の受託研究『物流サービスの労働環境改善と付加価値向上のためのサービス工学×AIに関する研究開発』の結果得られたことをここに記し、深く謝意を示します。また、平成28年度のIHI共同研究『車両震動分析に基づく橋梁損傷検知技術の基礎開発』によって、模型橋梁を製作した経験が、今回の模型製作にも活かされています。IHI株式会社の畠

中宏明氏，田村尚之氏，菱田寛之をはじめとして，多くの方から技術的アドバイスを頂きました。ありがとうございました。今回の困難な実験を遂行するチームに恵まれたのは，これらの貴重な資金提供に拠る所が大きく，深く感謝御礼申し上げます。

本研究に用いた計測デバイスとシステムはフロンティア工学研究グループ修了生の浅川一樹氏，毛利宏輔氏，学部生の大村怜氏，CYBERDYNE 株式会社の亙理大樹氏の協力がありました。センサ開発の期間は5年の歳月をかけており，彼らが膨大な時間を費やした創意工夫と不断の努力に対し，深く敬意と謝意を示します。

本研究で実車両長距離計測試験を行うにあたって，ウエルシア薬局株式会社の小沼健一氏，株式会社ハマキョウレックス春日部センター長川原千紀氏の大変なご尽力がありました。ここに深く謝意を示します。

最後に，長期間の研究と論文作成を支えてくれた妻に感謝を記します。