

センシング技術を用いた 構造評価に関する研究部会 報告書

Japan Steel Bridge Engineering Association

TECHNICAL REPORT /No.082

平成30年7月



鋼橋技術研究会

はじめに

関連する前部会「最新センシング技術の適用に関する研究部会」での研究成果を踏まえて、本部会ではセンシング技術を活用した構造評価に関する調査・研究活動を行ってきた。

センシング技術，IT・通信技術の飛躍的な進歩により，振動，応力，歪など構造物の挙動に関する多くの情報を高精度で容易に取得することが可能となってきた。構造物の評価においてこれらのセンシング技術が活用される機会も増えているものの，新設や既存構造物の性能評価，補修等の措置における監視においてセンシング技術の利用が整理・認知されるには至っていない。本部会では3つのワーキンググループを構成し，構造物の性能評価とセンシング技術に関する研究（WG1），活荷重評価とセンシング技術に関する研究（WG2），大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術に関する研究（WG3），というテーマで活動を行ってきた。

まず，WG1 では国内外における構造物性能評価の枠組みをレビューした上で，センシング技術を活用した維持管理における性能評価の可能性を検討した。実橋梁における計測も実施し主に支承機能の観点から評価を試みた。WG2 では，実荷重と設計荷重の違いを Bridge-Weigh-In-Motion（B-WIM）などのセンシング技術を利用して評価するための調査研究を行った。従来技術をレビューした上で，簡易な計測による B-WIM 技術の確立のため，加速度計測に基づく B-WIM 技術について具体的に実験により検討を実施すると共に，さらなる簡易化に向けた検討も行った。WG3 では，大量のデータを効率的に取り扱うためにデータを貯蔵・管理するデータ貯蔵システムと大量のデータを効果的に取り扱う可視化技術が必要であるとの立場から，レビューを通して必要な機能や課題を明らかにするとともに，橋梁センシングに適用可能なシステムを試作し提案した。さらに関連するニーズ・シーズ，課題，解決策の展望についての考えを整理した。なお，全ワーキンググループが連携して実橋梁における計測を実施し，ワーキンググループ毎の観点からデータを扱い取りまとめている。

センシング技術の様々な利活用がはじまりつつある中で，本部会では，鋼橋の構造評価におけるセンシング技術の利活用を，ニーズとシーズのそれぞれに近い部会員が議論を重ね，調査研究した。多角的に模索・検討した成果を意欲的に取りまとめられたと考えている。

本報告書を取りまとめるにあたりご尽力いただきました幹事の古川聖氏（株式会社横河ブリッジ），技術幹事の石原彰子氏（宮地エンジニアリング株式会社），田代大樹氏（大日本コンサルタント株式会社），ワーキンググループ長の蘇迪氏（東京大学特任講師），佐々木栄一氏（東京工業大学准教授），宮森保紀氏（北見工業大学准教授），データ処理プログラム構築を通じて本部会の成果を広く利用できるように貢献いただいた大迫章平氏（JIP テクノサイエンス株式会社）の各位に感謝の意を表します。また，本報告書の取りまとめにご協力いただきました部会各位および本部会の活動に際しまして貴重なご助言をいただきました鋼橋技術研究会の関係各位に感謝いたします。

鋼橋技術研究会センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会

部会長 長山智則

副部会長 宮下 剛

鋼橋技術研究会 センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会 会員名簿

部会長	長山 智則	東京大学
副部会長	宮下 剛	長岡技術科学大学
幹 事	古川 聖	(株) 横河ブリッジ
〃	石原 彰子	宮地エンジニアリング (株)
〃	田代 大樹	大日本コンサルタント (株)
部会員	佐々木栄一	東京工業大学
〃	蘇 迪	東京大学
〃	宮森 保紀	北見工業大学
〃	西尾 真由子	横浜国立大学
〃	飯田 哲也	瀧上工業 (株)
〃	石山 昌幸	日本鑄造 (株)
〃	岩井 学	川田工業 (株)
〃	大迫 章平	JIP テクノサイエンス (株)
〃	川端 将太郎	日本ファブテック (株)
〃	佐藤 豪	JFE エンジニアリング (株)
〃	戸田 勝哉	(株) IHI インフラシステム
〃	豊田 純教	川田テクノシステム (株)
〃	中澤 治郎	パシフィックコンサルタンツ (株)
〃	増田 和裕	川田テクノシステム (株)
〃	吉岡 勉	大日本コンサルタント (株)

鋼橋技術研究会
センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会
調査研究報告書

1. 性能評価とセンシング技術に関する研究
2. 活荷重評価とセンシング技術に関する研究
3. 大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術に関する研究

1. 性能評価WG 調査研究報告書

性能評価とセンシング技術に関する研究

性能評価 WG メンバー

WG 長	蘇 迪	東京大学
部会員	西尾 真由子	横浜国立大学
〃	岩井 学	川田工業（株）
〃	川端 将太郎	日本ファブテック（株）
〃	中澤 治郎	パンフィックコンサルタンツ（株）
〃	吉岡 勉	大日本コンサルタント（株）
〃	石山 昌幸	日本鑄造（株）

目次

§ 1. はじめに	1-1
1-1. 国内外橋梁維持管理における性能評価の必要性	1-1
1-2. 既存構造物の性能評価に関する国内外の動向	1-1
1-2-1. 国際基準 ISO の動向	1-1
1-2-2. 米国の動向	1-3
1-2-3. カナダの動向	1-4
1-2-4. オーストラリアの動向	1-4
1-2-5. 我が国の経緯	1-4
1-3. 性能評価に関するセンシング技術の進歩	1-5
§ 2. Load Rating の概要と方法論	1-6
2-1. AASHTO 橋梁定期点検と評価	1-6
2-1-1. 歴史	1-6
2-1-2. LRFR の概要と方法論	1-6
2-1-3. 抵抗と抵抗係数	1-8
2-1-4. 荷重と荷重係数	1-10
2-1-4. MBE に記載された評価例の紹介	1-11
2-2. Canadian Highway Bridge Evaluation の LLRF について	1-12
2-2-1. LLFR について	1-13
2-2-2. 目標の信頼性指標	1-13
2-3. WG2 が同定した交通荷重の Load Rating への反映	1-15
2-4. Load Rating は日本導入時の問題点と課題	1-15
§ 3. センシング技術を用いた維持管理における性能評価	1-17
3-1. 性能評価におけるセンシング技術の可能性	1-17
3-2. 性能要求レベル	1-17
3-3. センシングより性能評価手法に関する基準調査	1-18
§ 4. センシングを活用する既存橋梁の保有性能評価 の試み	1-36
4-1. 構造信頼性指標 β の概要	1-36
4-2. 対象橋梁での振動データ取得と固有振動特性同定	1-37
4-3. 対象橋梁の有限要素モデルの構築	1-38
4-4. 既存状態のモデルパラメータ不確定性の表現と事前分布の設定	1-38
4-5. モデルパラメータ事後分布の推定	1-39
4-5-1. 固有振動数に対するモデルパラメータの寄与度解析	1-39
4-5-2. 事後分布推定結果	1-40
4-6. 対象橋梁の構造信頼性指標 β の導出	1-41
4-7. 評価性能への感度に基づくセンシングデータの取得	1-43
§ 5. 横浜橋梁計測での計測概要	1-45

5-1. 計測目的	1-45
5-2. 対象橋梁と計測概要.....	1-45
5-3. 計測結果と考察.....	1-48
参考文献	1-50

§ 1. はじめに

1-1. 国内外橋梁維持管理における性能評価の必要性

橋梁構造物の寿命・劣化度を推定し効率的に維持管理をするために、また、地震・台風などの自然災害発生時の安全性を評価するために、現有性能の把握が欠かせない。維持管理の体系であるべき本来の姿としては、構造評価者が構造物の性能を十分に把握し、構造物の性能に関する情報を定量的に提供できることであると言えよう。ただし、従来の点検手法や維持管理の方法論において、明確かつ定量的に構造物の性能を評価することは簡単ではない。例えば、橋梁構造物に対して、最も重要な耐荷性能、すなわち、さまざまな荷重作用下での構造物の挙動も必ずしも明確ではない。理由としては、既存の構造物の大半は既に長期間支障が生ずることなく供用に耐えてきており、ある程度の安全性等が担保されていると考えられる一方、老朽化による構造材料の不確定性の増加や、交通量の増加や交通荷重の変化などが生じている可能性があり、安全性や使用性のレベルを定量的に把握することは容易でない。さらに、設計時に採用されている各安全係数がどの程度評価においても適用できるか明確に検討されていないこともこれに拍車をかけている。

一方、近年のセンシング技術の発展は目覚ましく、MEMS 技術を利用した無線センサにより構造物の挙動が詳細に把握できるようになりつつある。しかし、センシング技術を有効活用して社会基盤の安全の実現に近づいているかと問われると、イエスとは言い切れない。膨大な社会基盤構造物における現象やメカニズム、少数のセンサで簡単に捉えられないことを簡単に想像ができる。そのために、社会基盤分野では時間と手間をかけてセンシングの「研究」や「実証」をしていると思われることもある。

性能評価 WG では、先ず、既存構造物の性能評価に関する国内外の動向を整理し、特に米国 LRFR の概要と方法論整理を行った。センシング技術の適用の参考とするとともに、データの分析方法の整理を行った。

次に、維持管理へセンシング技術の活用を明らかにすること、計測データによる構造パラメータの信頼性分析を行った。数値モデルパラメータの事後分布推定による不確定性の定量化を行うとともに、不確定性の事後分布から確率論による既存橋梁の性能評価へ利用を試みた。

最後に、安全性能と使用性能両者からの性能要求レベルを着目し、既存の設計・施工・維持管理に関わる各示方書から、センシング技術から性能評価手法に関する手法を概括した。

以上の研究により、橋梁振動に関する最新センシング技術の適用性についてまとめるとともに、既存構造物の性能評価に関する今後の課題を示した。

1-2. 既存構造物の性能評価に関する国内外の動向

橋梁構造物の性能評価の概念を導入しようとする試みが国内外で開始しており、評価すべき性能などを含めて方法論を確立しつつある。

1-2-1. 国際基準 ISO の動向

構造物の設計に関する国際基準には ISO2394: General principles on reliability for structures がある¹⁾。最新版は 2015 年の第 4 版であるが、1998 年の第 3 版から構造信頼性 structural reliability に基づく性

能設計への指針となっており、Eurocode や AASHTO は既にこの基準に基づいている。第 4 版でよりリスクへの対応に関する概念が強調されており、不確定性 *uncertainty* を取り扱って構造物の作用と抵抗に関する照査を行うことが示されている。次項より示すように、各国の設計基準が性能設計となっていっている点は、この基準の方向に合致している動向といえる。

そしてこの ISO2394 に基づいて特に既存構造物の性能評価に関する基準が、2010 年度版の ISO13822: Bases for design of structures - Assessment of existing structures として発行されている²⁾。既存構造物において、その供用形態が設計当初と異なっている場合、地震などへのリスク評価を行う場合、経年的に進展する劣化が認められた場合、そして何らかの *accidental action* によって構造物に損傷が発生した場合に、性能を評価するための原則的な基準とされている。

ここでの“Assessment”の定義は、「既存構造物を将来供用していくために求められる構造信頼性を検証する活動」である。その基本的なフローは Annex B に示されている（図 1-2-1）。このフローではじめに特筆すべき点は、最上流で「評価の目的を明確にすること」が記されている点である。将来確保しなければいけない性能は何であるのかを Client（構造物所有者や市民、構造物の種類によっては保険会社など）と合意形成することがもとめられる。その上で、Assessment は Preliminary と Detail の 2 段階からなる。Preliminary assessment は目視や簡便な非破壊検査にて劣化損傷の有無や状態を把握し損傷度レベルを判定する、いわゆる点検作業である。Detail assessment が必要となるのは、この Preliminary でその後の供用における要求性能の確保に信頼性が得られなかった場合、言い換えると Uncertainty が認められた場合とされる。例えば、Preliminary でみつけた損傷が目的とする性能にどのような影響を与えるか不確定な場合がこれにあたる。Detail assessment は図 1-2-1 中にある 6 つの実施項目からなるが、これらは ISO2394 とも対応する要求性能に対する構造信頼性を評価することが目的となっている。Annex E には劣化による部材の強度変化や荷重の変化を考慮して経時的な構造信頼性を導出する概念が示されている。また Annex F では構造信頼性理論に触れられており、使用限界状態・疲労限界状態・終局限界状態それぞれについて、既存構造物で目的とすべき構造信頼性指標がまとめられている。Preliminary assessment または Detail assessment を合わせて得られた将来性能への Reliability 信頼性に基づいて、その後の対応を意思決定する。

一連の assessment プロセスでは各種のデータを用いることとされており、荷重や環境因子の計測値、物性値のデータ、図面など設計時のデータ、材料試験で得るデータ、そしてその時点での構造特性（*properties of structure*）と明記されている。この構造特性データを得るために、載荷試験などで静的や動的な応答への性能を把握する現場計測の実施が明記されており、センシングに関わる記述みられる。Annex D には“Testing for static and dynamic properties of structures”があり、既存構造物の性能評価のためのデータ取得基準が示されている。ここでは構造解析を合わせて実施すること、取得データは確率論的に取り扱うことが示されている点が、特筆に値する。

ISO13822 は汎用的な国際基準であるのでその記述は具体的なものではないが、ISO2394 とともに構造物の性能を構造信頼性に基づいて評価すること、データを確率論的に取り扱い構造信頼性指標の把握を行うことを示している。次項から示す米国やカナダなどでの動向はこの流れに沿っている。

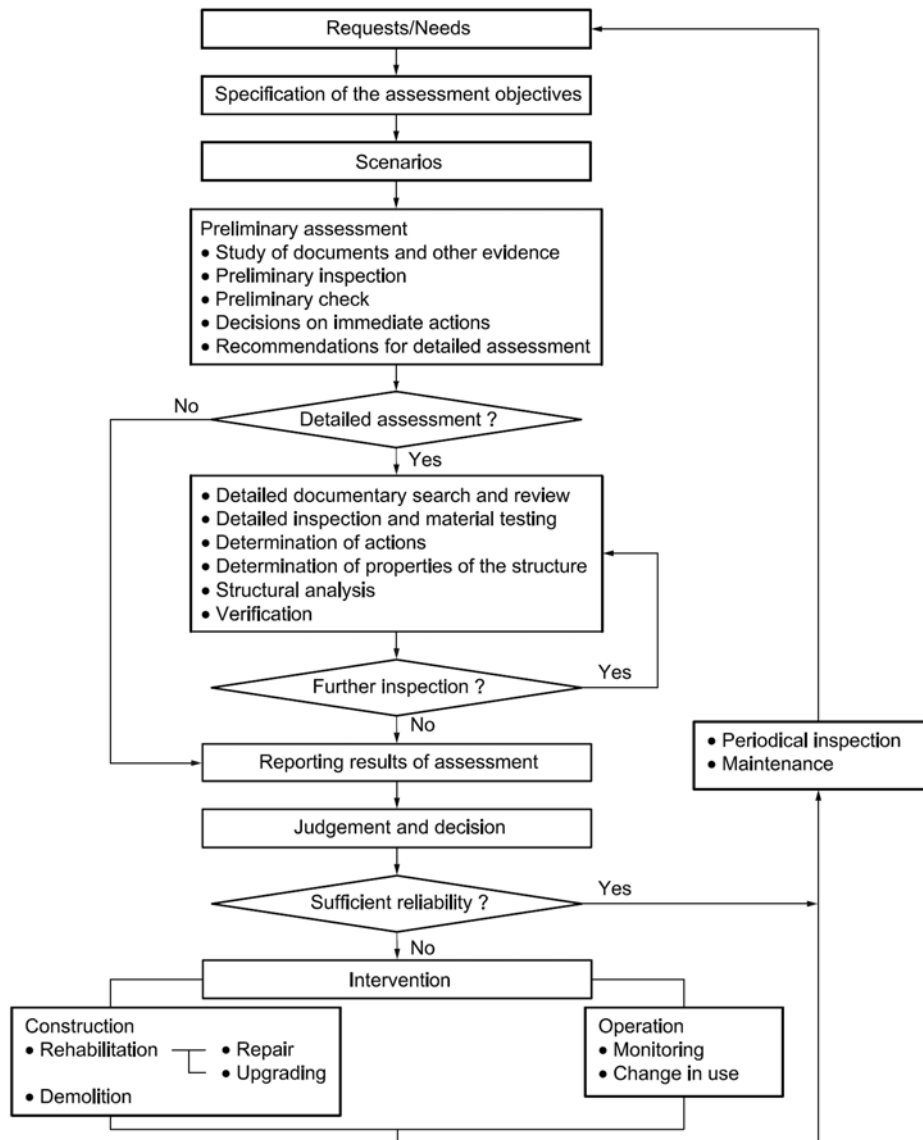


図 2-1-1. ISO13822 (Annex B)に示される Assessment of existing structures のフロー²⁾

1-2-2. 米国の動向

米国では、1971年に制定された全国橋梁点検基準 NBIS (National Bridge Inspection Standards)³⁾に基づき、道路橋の点検が2年に一度の頻度で実施されているが、この点検基準は、目視点検を基本とした全般的かつ主観的な情報に依存したものであり、部材ごとの定量的な性能の評価や、点検の客観性の確保に課題が残っていた。

こうした背景を受け、1994年に“AASHTO Manual for Condition Evaluation of Bridges”という既設橋の状態評価が規定された⁴⁾。その後、2003年に“AASHTO Guide Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges”に改定され、荷重係数及び抵抗係数評価法 (Load and Resistance Factor Rating, 以下、LRFR という) が規定された⁵⁾。また、2006年10月30日 FHWA Policy Memorandum を発行し、2010年10月1日以降に設計された新しい橋梁および完全

交換された橋梁は、LRFR 方式の性能評価が必要となっており⁶⁾。現在はほぼ全州で実施しつつある。2011 年 9 月から米国での調査結果より、92%の州で LRFD で設計された橋は LRFR で評価する方針を採用、40%の州で LFD または ASD で設計された橋は LRFR で評価する方針を採用、52%の州で MBE に基づく独自の LRFR による評価手順、方針を作成している⁷⁾。このように LRFR がすでに実務に浸透しつつある点で米国の状況は重要であり、詳細を 2-1 項にまとめている。

1-2-3. カナダの動向

1980 年に、カナダの設計基準 Canadian Highway Bridge Evaluation の CAN3-S6-M78「道路橋の設計」(Design of highway bridges) の第 11 節に対して、より正確に橋の耐荷力を評価するために、第 12 節「既存橋の評価」(Existing bridge evaluation) が追加された。1990 年には第 12 節の内容を改定し、1988 年版の設計基準 S6 (Canadian Standards Association 1988, 1990) に補足番号 1-1990 として出版された⁸⁾。ここで Live Load Rating Factor (以下、LLRF という) の概念を確立して、設計とともに、既存構造物に対しても目視点検と連動した Rating での意思決定を行う指針が示されている。ここでは特に荷重のレベルと構造部材の特性、さらに点検のレベルも考慮して、細かく Rating を実施する方法となっている。詳細は 2-2 項にまとめている。

1-2-4. オーストラリアの動向

オーストラリアでは、全体的な国家改革の一環として、道路網の大型車両アクセシビリティの改善を目標として挙げている。この目標にとって、橋梁の性能評価は、重要であると認識されている。Australian Standard Bridge Design AS 5100.7: Rating of existing bridges (2004) は既に Load Rating 方法を提案しており、交通荷重など活荷重に対して構造安全性を評価している。2014 年に、既存橋梁の性能評価に関する基準である AS 5100.7 と BAG (Bridge Assessment Group) Guidelines for bridge load capacity assessment (1997) の内容を精査する Review を公開した⁹⁾。このプロジェクトの成果は、現行の基準 AS 5100.7 (2004) の改訂のため、新しい AS 5100.7 標準の草案の詳細条項の文言が提示された。提案された条項は、付録 C に記載されている。改訂された重点は基準の透明性を向上させるために、橋梁評価に関わる様々な影響要因の明確化や正確化を改善することに焦点を当て、橋梁評価のための全国的に一貫したアプローチの実施を促進することであった。

1-2-5. 我が国の経緯

我が国では、2014 年に 5 年に一度の定期点検が法定化されたことに伴い、長寿命化の取り組みが本格化し、道路橋の設計においても、適切な維持管理を行うことも含めて、確実かつ合理的に長寿命化を図るための対応が求められている。また、長寿命化を合理的に実現するため、設計供用期間 100 年を標準とし、耐久性確保の具体的方法が規定された。2017 年 7 月には、道路橋示方書の改定が通知され、長年慣れ親しんできた許容応力度設計法から部分係数設計法に移行することとなった¹⁰⁾。今回の改定では、橋全体系、上部構造、下部構造、部材、材料などの単位で、求められる性能を階層化して規定するという性能の階層化が行われた。さらに、各階層にて外力と抵抗の関係における安全性や荷重支持機能の信頼性を設計時点で明確化することが求められており、これらすべての性能規定化が一連となって構成された。

1-3. 性能評価に関するセンシング技術の進歩

近年センシング技術の進歩は著しく、点検や詳細調査、また活荷重推定、経過観察等においてそれらを利活用するケースが報告されている。ここでは比較的近年進捗の著しい技術で性能評価に利用される可能性の高いと考えられるものを中心に紹介する。

耐荷力評価、安全性評価、疲労評価等の観点から、センシングによる把握が期待される物理量として応力が挙げられる。一般には応力を直接計測するかわりに歪を計測し、応力-歪関係から応力を求めることが多い。歪ゲージが従来から広く用いられているものの、ゲージ設置が煩雑であり、歪計測箇所が限定的といった課題がある。これに対し近年は、光ファイバを利用した空間的に密な歪計測、サーモグラフィを利用した熱弾性応力測定、応力発光体による動的歪の可視化も研究されている¹¹⁾。実橋梁の交通荷重による応力を赤外線カメラで面的に捉えた例も報告されている¹²⁾。これらの方法ではいずれも、ゲージ設置後の歪あるいは応力の変化分しか把握できず、死荷重等の永久荷重に起因する応力や残留応力までは分らない。磁歪法を利用して残留応力等まで含めた全応力の直接的な計測方法も開発されている¹¹⁾。

一方、変位も使用性の観点から性能評価に直接的に使われたり、間接的に利用されたりする。しかし、リニア可変変位トランスデューサ (LVDT) やリング式変位計など、参照点が必要な変位計測方式は橋梁への適用が難しい¹¹⁾。そこで、様々な非接触変位計測手法が開発されている。サンプリングモアレ法はモアレ縞を利用することで 1 画素と比べて微小な変位量も計測が可能な方法であり、近年土木構造物への適用例が増えている。ターゲットを設置する必要がある、夜間や雨天時の適用性に限界はあるが、正確な変位を簡易に計測する技術として近年着目されている¹³⁾。レーダーを利用して遠隔から対象物の変位を多点で同時に把握する技術も開発が進められている。多数のケーブルの変位を遠隔から同時に捉え振動数推定することで、張力を一括推定したり、橋梁の変位応答を面的に捉えたりする応用が報告されている¹⁴⁾¹⁵⁾。

無線通信技術を利用することで、簡易にセンシングを実現する技術も開発が進む。外部電源や通信ケーブルが不要な無線センサは設置が容易なため、恒久的でない詳細調査や措置前後での経過観察、施工中の監視などの際に、低コストで臨機応変なセンシングが可能となる。数ヶ月から年単位にわたって連続した動的計測も現実的なものとなってきた。加速度計測のみならず、歪、変位計測やカメラ撮影等に対応した無線センサノードも開発されている¹⁶⁾。

その他、鋼橋のさび厚を簡易に評価する技術¹⁷⁾や RC 床版のひび割れを高速走行する車両からレーダーを照射することで推定する技術¹⁸⁾など、構造物内部の状態を推定する技術も開発されている。

近年のセンシング技術は現状では実務において性能評価に直接的に用いられているものばかりではないが、そのセンシングの性能・仕様・信頼性・適用性が明確になれば、前節でのべた国内外における性能評価の枠組みのなかで利活用が進むと期待される。

§ 2. Load Rating の概要と方法論

橋の維持管理における性能評価について、現状は定性的な評価が基本になっていた。本章では、海外においてすでに実用化されている具体的な手法として米国とカナダの事例を調査した結果を報告する。なお、翻訳すると微妙なニュアンスの違いが生じることから、本章における橋の定量的な性能評価を原書に合わせて“Rating”と呼び、特に活荷重等の荷重に対する性能評価を“Load Rating”と呼ぶ。

2-1. AASHTO 橋梁定期点検と評価

本節では、性能照査型維持管理に向けた取り組みとして、AASHTO で基準化された橋の性能評価手法としての Load Rating を紹介する。

2-1-1. 歴史

米国全州道路交通運輸行政官協会（American Association of State Highway and Transportation Officials, 以下、AASHTO という）は、高速道路の規格に関する基準設定機関であり、米国の高速道路はすべてこの協会が設定する規格に則って設計及び建設されている。橋の設計示方書においては、1971 年から荷重係数設計法（Load Factor Design, 以下、LFD という）を採用し、1994 年から荷重係数及び抵抗係数設計法（Load and Resistance Factor Design, 以下、LRFD という）になっており¹⁹⁾、信頼性理論に基づいた各供用限界状態を設定し、均一の信頼性指標のもとに設計できることとなっている。この LRFD と整合が取れて連動した橋の性能評価手法が基準化され、実用化されている。

米国において、既設橋の耐荷力評価は 1967 年シルバー・ブリッジ崩壊事故を契機として発展してきた。近年では、1994 年に“AASHTO Manual for Condition Evaluation of Bridges”という既設橋の状態評価が規定された⁴⁾。その後、2003 年に“AASHTO Guide Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges”に改定され、荷重係数及び抵抗係数評価法 Load and Resistance Factor Rating (LRFR) が規定された⁵⁾。その後、2008 年に“AASHTO Manual for Bridge Evaluation”（以下、MBE という）に改定され²⁰⁾、新設橋の設計基準である LRFD に対応する Load Rating 手法としての LRFR が Part A に、それまでの許容応力度評価法（Allowable Stress Rating, 以下、ASR という）および荷重係数評価法（Load Factor Rating, 以下、LFR という）が Part B にそれぞれ記載されている。これら 3 つの手法に優先順位はなく、また新設時の設計手法にも関係なく、どの手法でも同等に橋の状態評価を行うことができるとされている。

2-1-2. LRFR の概要と方法論

MBE の Load Rating とは、ある荷重作用下における橋の安全性を評価するものである。主な対象は活荷重に対する耐荷性能の評価である。全国橋梁点検基準（National Bridge Inspection Standards）³⁾では、橋の定期点検は別途規定されている最大点検間隔（基本的には 24 か月）を超えずに実施されなければならない。Load Rating は定期点検と同時に義務付けられている。具体的には、基準とする設計活荷重に対し、その何倍耐荷力があるかを表す Rating Factor (以下、RF という)で表される。

$$RF = \frac{C - DL}{LL} \quad (2-1-1)$$

ここで、 C は部材耐荷力、 DL は死荷重効果（死荷重によって生じる断面力もしくは応力）、 LL は活荷重効果（活荷重によって生じる断面力もしくは応力）を表す。したがって、 RF が1以上であれば、基準とした活荷重に対して十分に安全であることを意味する。一方、 RF が1より小さい場合、基準とした活荷重に対して安全とは言えず、NBISより、この橋の補強、閉鎖、もしくは荷重制限を実施しなければならない。

式 (2-1-1) は耐荷力評価の方法によって、計算方法は異なる。ASRとLFRを用いて評価する場合、式 (2-1-1) で示す。

$$RF = \frac{C - A_1 D}{A_2 L(1 + I)} \quad (2-1-2)$$

ここで、 D と L は部材に作用する各種の死荷重と活荷重による荷重効果（軸力、せん断力、曲げモーメント等）である。 A_1 と A_2 は死荷重と活荷重の係数であり、 I は活荷重の衝撃係数を表している。設計と同様に、ASRで評価する場合、作用応力度が許容応力度を超えないという判定方法で評価する。許容応力度は材料の降伏点、コンクリートの破壊または座屈などの不安定現象が生じる耐荷力を応力で示して安全率で除して求められる。LFRの場合、特に活荷重は死荷重に比べて大きく変動するという観点から、活荷重には死荷重よりも大きい荷重係数を用いる。評価の抵抗力は部材寸法精度、材料強度のばらつき及び計算手法を考慮した強度低減係数を乗じて、計算抵抗力を低減する。ASRとLFRでは、同時に発生する予測以上の荷重あるいは予測以下の部材強度の確率について明確に考慮されていない。

LRFRを用いて橋の耐荷力を評価する場合、式 (2-1-3) で示す。

$$RF = \frac{C - \gamma_{DC} DC - \gamma_{DW} DW \pm \gamma_P P}{\gamma_L LL(1 + IM)} \quad (2-1-3)$$

ここで、 DC は構造部材による死荷重効果、 DW は表面摩耗する部材による死荷重効果、 P は死荷重以外の永久負荷（ポストテンション負荷など）、 LL は活荷重効果をそれぞれ表す。 γ_{DC} 、 γ_{DW} 、 γ_P は死荷重係数、 γ_L は活荷重係数、 IM は衝撃係数である。

部材耐荷力 C は、次式で評価して良いとしている。

$$C = \phi_c \phi_s \phi R_n \quad (\phi_c \phi_s \geq 0.85) \quad (2-1-4)$$

R は公称部材耐荷力である。 ϕ_c はCondition Factor（状態係数）と呼ばれ、橋の点検の結果を受けて決定される係数で、無損傷の状態が1.0で、腐食による断面欠損等の損傷がある場合は、最大0.85まで減じられる。 ϕ_s はSystem Factor（構造システム係数）と呼ばれ、リダンダンシー（冗長性）のある橋（例えば4本主桁橋など）の場合は1.0で、リダンダンシーが無い橋では、0.85に減じられる。また、 ϕ は抵抗側の安全係数で、設計と同様に鋼桁の場合は1.0、RC部材の場合は0.9等に設定されている。一方、死荷重効果は構造本体の死荷重による荷重効果 DC と、舗装など将来変動する可能性が大きい死荷重効果 DW とに分けて、異なる荷重係数を設定している。

図 2-1-1 に LRFR の評価手順をフローとして示す。

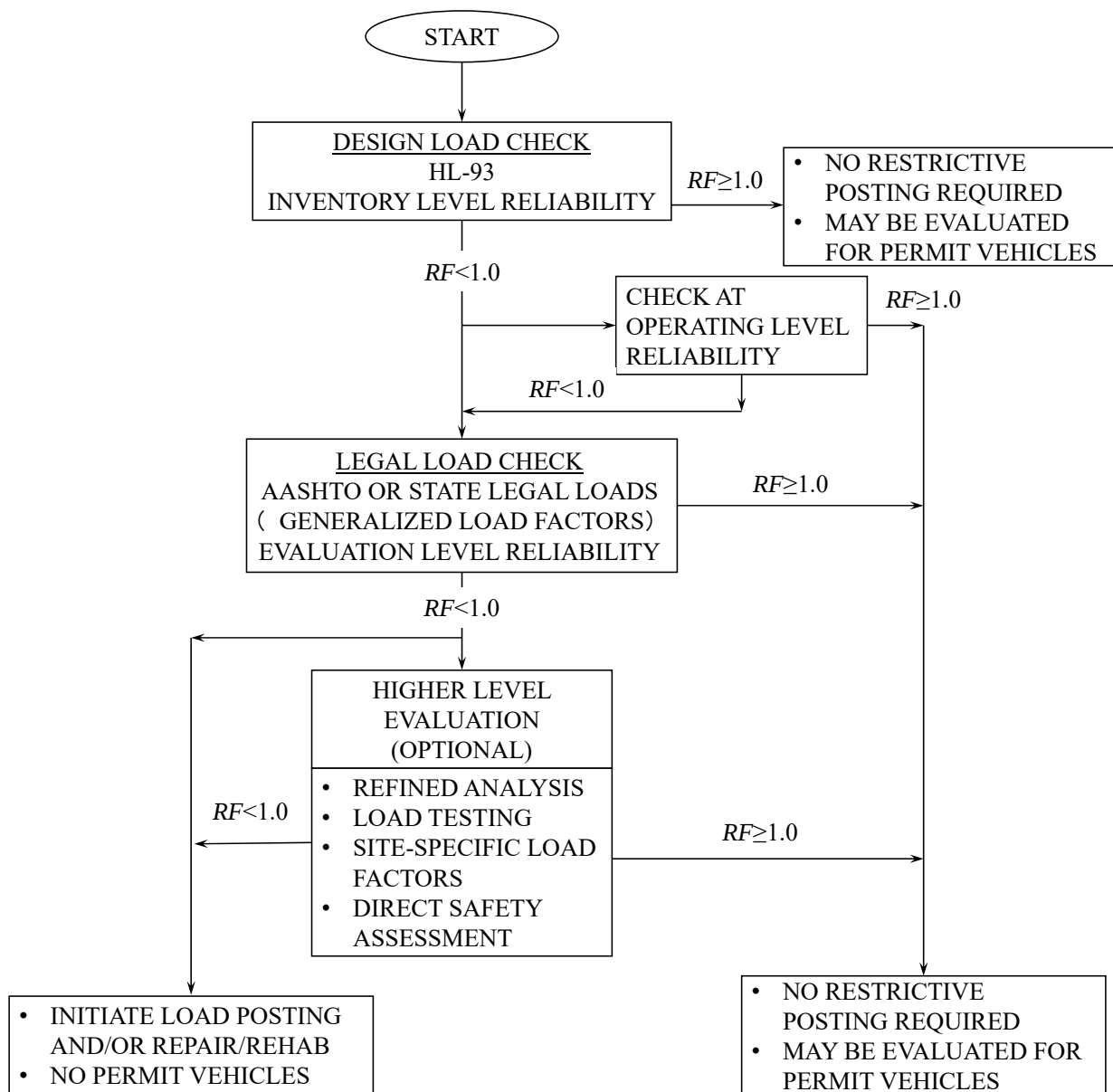


図2-1-1. LRFRのLoad Ratingに関する評価手順フロー²⁰⁾

2-1-3. 抵抗と抵抗係数

MBEにおいて、 ϕ はLRFD 抵抗係数であり、新規構造設計と同じ値を採用する。また、すべての非強度限界状態では、 ϕ は1.0とする。

Condition Factor（状態係数） ϕ_c と点検結果の関連。定性的な点検結果しか利用していない。表2-1-1に橋梁点検結果を示している。MBEでの ϕ_c 規定は、表2-1-2にまとめている。およその対応関係を示しているが、橋梁状態による状態係数の変化としては小さいともいえる。さらなる細かい対応関係を期待される。

表 2-1-1. 米国橋梁点検結果³⁾

Rating	Description
9	Excellent Condition
8	Very Good Condition - no problems noted
7	Good Condition - some minor problems
6	Satisfactory Condition - some minor deterioration of structural elements
5	Fair Condition - minor section loss of primary structural elements
4	Poor Condition - advance section loss of primary structural elements
3	Serious Condition - seriously deteriorated primary structural elements
2	Critical Condition - facility should be closed until repairs are made
1	Imminent Failure Condition - facility closed. Study of repairs is feasible
0	Failed Condition - facility is closed and beyond repair

表 2-1-2. 状態係数 ϕ_c と橋梁点検結果の関係²⁰⁾

点検結果	橋梁状態	状態係数 ϕ_c
6 以上	Good or Satisfactory	1.00
5	Fair	0.95
4 以下	Poor	0.85

文献 21)は蓄積された道路橋点検結果から、橋梁劣化と橋梁点検結果を、建設後の年数との関係
を分析し、橋梁劣化と点検結果間の関係のモデリングを試みるものである。それに基づいて、図 2-
1-2 のように道路橋の点検結果と状態係数の最適対応関係を明らかにしている。表 2-1-3 の詳細な状
態係数 ϕ_c を提案した。MBE で採用された表 2-1-2 の結果より、 ϕ_c は大きい傾向をしている。

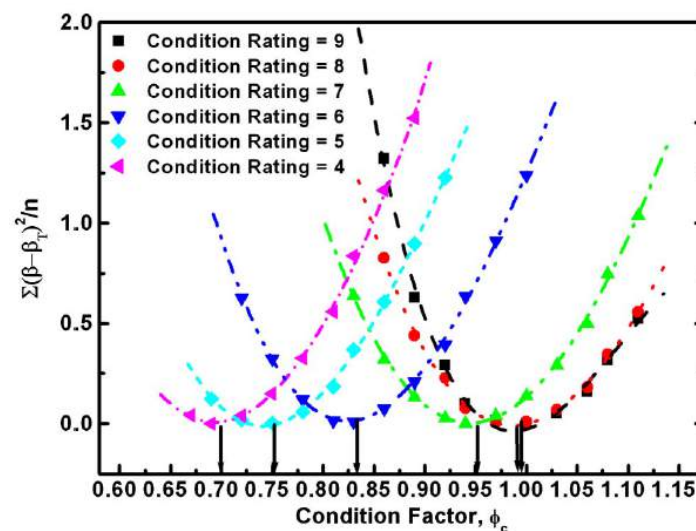
図 2-1-2. 点検結果に対する最適な状態係数²¹⁾

表 2-1-3. 提案する状態係数 ϕ_c と橋梁点検結果の関係²¹⁾

点検結果	状態係数 ϕ_c
≥ 8	1.00
7	0.95
6	0.85
5	0.75
≤ 4	0.70

リダンダンシーの概念を AASHTO MBE では “the capability of a bridge structural system to carry loads after damage to or the failure of one or more of its members.” と定義されている。ここでのリダンダンシー定義は部材の損傷もしくは破壊後でも構造全体系の耐荷力もしくは機能を維持する能力と定義しており、その意味で after-fracture redundancy と呼ばれることがある。AASHTO MBE は機能の内、耐荷力にのみに限定している。一例だが、表 2-1-4 に曲げ方向と軸方向部材の構造システム係数を示している。

表 2-1-4. 曲げ方向と軸方向部材の構造システム係数²⁰⁾

Superstructure Type	ϕ_s
Welded Members in Two-Girder/Truss/Arch Bridges	0.85
Riveted Members in Two-Girder/Truss/Arch Bridges	0.90
Multiple Eyebars in Truss Bridges	0.90
Three-Girder Bridges with Girder Spacing 6 ft	0.85
Four-Girder Bridges with Girder Spacing ≤ 4 ft	0.95
All Other Girder Bridges and Slab Bridges	1.00
Floorbeams with Spacing >12 ft and Noncontinuous Stringers	0.85
Redundant Stringer Subsystems between Floorbeams	1.00

2-1-4. 荷重と荷重係数

MBEによるLoading Ratingは、Design load rating (設計荷重評価段階)、Legal load rating (法定荷重評価段階)、Permit load rating (許容荷重評価段階)の順番に行う。各々の評価段階の荷重レベルは異なるものの、均一な信頼性指標で評価できることが特徴となっている。

実際の手順として、まず、設計荷重評価を行う。この段階では、AASHTO LRFDに定めているHL-93設計荷重を用いて評価する。具体的にInventory level (設計時レベル)とOperating Level (供用時レベル)の2つにレベルを分けている。多数の橋に対して、設計時 (Inventory level) の部分係数はLRFDと同じ数値を適用する。すなわち、目標信頼性指標 β を3.5と設定して、活荷重係数1.75を用いて設計されることと、荷重係数1.75に対する $RF \geq 1.0$ の評価は同等である。一方、Operating Levelは供用時のLoad Ratingであり、既設橋の耐荷力評価 (RF値の算定) には目標信頼性指標 β を2.5と設定し、活荷重係数を1.35に減じている。このため、活荷重による効果を $1.35/1.75=0.77$ (=1/1.3) で、23%小さいことから、既設橋の耐荷力評価には有利な条件となる。これは、既設橋はすでに供用されていて、

架橋地点における状況がある程度明確になっており、新設の設計段階より不確定要素が少なくなっていること、Load Ratingは次回点検までの措置を決めるための行為であること等を踏まえたものである。目標信頼性指標 $\beta=2.5$ は、文献4)におけるRating Factor=1.0（活荷重HS-20）の平均値とも整合している。

Operating Levelの設計荷重評価でもRFが1を下回る場合、引き続き法定荷重評価、許容荷重評価を順番に行う。これら2つの段階では、実際に走行する荷重の実態に合わせて活荷重を設定できる、法定荷重評価段階はこの地方において走行可能な最大交通荷重、許容荷重評価段階は特定の橋に走行可能な最大交通荷重（荷重制限を含め）に対してそれぞれ評価する。また、特定の橋に対して、載荷試験、交通量調査や詳細数値解析など、橋の耐荷力や荷重の状況をより正確的に把握できる事前確認を行って、Load Ratingに反映することができる。

なお、使用限界状態に対するLoad Rating手法も規定されているものの、強度限界状態に対するLoad Ratingのような一定の目標信頼性指標が設定されているわけではなく、従来の評価手法等の実状を踏まえた評価となっている。そのほか、鋼橋については疲労限界状態に対するLoad Rating手法も規定されており、各限界状態と荷重係数を整理すると表2-1-5のようになる。

表 2-1-5. LRFR の Load Rating に関する各限界状態と荷重係数²⁰⁾

Bridge Type	Limit State*	Dead Load γ_{DC}	Dead Load γ_{DW}	Design Load		Legal Load γ_{LL}	Permit Load γ_{PL}
				Inventory γ_{IL}	Operating γ_{OL}		
Steel	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tables 6A.4.4.2.3a-1 and 6A.4.4.2.3b-1	
	Strength II	1.25	1.50				Table 6A.4.5.4.2a-1
	Service II	1.00	1.00	1.30	1.00	1.30	1.00
	Fatigue	0.00	0.00	0.75			
Reinforced Concrete	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tables 6A.4.4.2.3a-1 and 6A.4.4.2.3b-1	—
	Strength II	1.25	1.50	—	—	—	Table 6A.4.5.4.2a-1
	Service I	1.00	1.00				1.00
Prestressed Concrete	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tables 6A.4.4.2.3a-1 and 6A.4.4.2.3b-1	—
	Strength II	1.25	1.50				Table 6A.4.5.4.2a-1
	Service III	1.00	1.00	0.80	—	1.00	—
	Service I	1.00	1.00				1.00
Wood	Strength I	1.25	1.50	1.75	1.35	Tables 6A.4.4.2.3a-1 and 6A.4.4.2.3b-1	—
	Strength II	1.25	1.50	—	—	—	Table 6A.4.5.4.2a-1

2-1-4. MBE に記載された評価例の紹介

MBE の付録 A では、鋼橋、RC 橋、PC 橋、木橋等の橋梁形式に対して、Load Rating の例題を収録している。本報告書は A1 の単純支持合成鋼桁橋の評価例の一部を紹介する（単位系は例題のヤード・ポンド法のまま）。

評価対象は 1964 年架設された全長 65 ft の単純支持合成鋼桁橋である。NBI 点検記録よりレベル 7 に評価し、構造部材は健全状態と判定した。ADTT は 1000 となり、A36 鋼材を用いた。主桁の断面は図 2-1-3 に示す。これから Interior Stringer（内側主桁）の評価についてを紹介する。

まずは各極限状態下、主桁の公称耐荷力（Nominal Capacity）、死荷重や活荷重の効果を計算する。例題において、抵抗と荷重は設計値を採用しており、表 2-1-6 に計算結果を示す。

表 2-1-6. Interior Stringer (内側主桁) の公称耐荷力の計算結果

	Dead Load DC_1	Dead Load DC_2	Live Load Distribution Factor	Dist. Live Load + Impac	Nominal Capacity
Moment, kip-ft	439.0	129.0	$gm=0.626$	952.6	2873.0
Shear, kips	27.0	8.0	$gv=78.9$	78.9	380.15

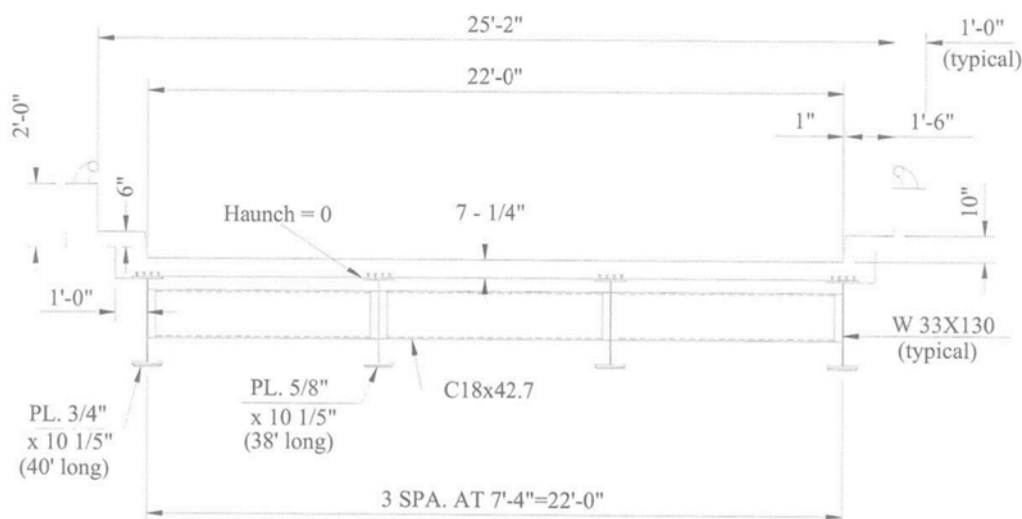


図 2-1-3. 評価対象橋の断面図

次に各抵抗係数と荷重係数を決まっておく。曲げとせん断極限状態下，LRFD 抵抗係数 ϕ は 1.0 を採用する。点検レベルは 7 ので，状態係数 ϕ_e は 1.0 になる。リダンダンシーの観点から，主桁間隔は 4 ft 以上の 4 主桁鋼橋のため，システム係数 ϕ_s は 1.0 を選んだ。

設計荷重評価（Design Load Rating）の段階で，各荷重係数 γ_{DC} ， γ_{DW} ， γ_{LL} はそれぞれ 1.25，1.50，1.75 を採用された。曲げやせん断極限状態の RF は式(2-1-5)と(2-1-6)に示しており，いずれも 1.0 より大きいので，活荷重に対して安全の Rating になった。

$$RF = \frac{(1.0)(1.0)(1.0)(2873) - (1.25)(439 + 129) - (1.50)(0)}{(1.75)(952.6)} = 1.2975 \quad (2-1-5)$$

$$RF = \frac{(1.0)(1.0)(1.0)(360.3) - (1.25)(27 + 8)}{(1.75)(78.9)} = 2.29 \quad (2-1-6)$$

2-2. Canadian Highway Bridge Evaluation の LLRF について

本節ではカナダの Load Rating について紹介する。1980 年に，カナダの設計基準 Canadian Highway Bridge Evaluation の CAN3-S6-M78「道路橋の設計」（Design of highway bridges）の第 11 節に対して，より正確的に橋の耐荷力を評価するために，第 12 節「既存橋の評価」（Existing bridge evaluation）が追加された。1990 年には第 12 節の内容を改定し，1988 年版の設計基準 S6（Canadian Standards Association 1988，1990）に補足番号 1-1990 として出版された²²⁾。本設で紹介するのは，1990 年版の第 12 項に示されている Live Load Rating Factor（以下，LLRF という）の内容である。

2-2-1. LLRF について

カナダの設計基準に示されているLLRFでは、MBEと同様に、信頼性理論に基づいて橋の耐荷力を評価する。評価における制限値は、構造の挙動、損傷発生時の警告情報、損傷の影響程度を考慮し、実際の交通荷重を把握できれば、新設の設計時の値より大きくとることが可能となる。即ち安全係数を低減させても、目標の信頼性指標あるいは実際の安全性は同等を確保できることに着目したものである。

橋の評価では、荷重と活荷重のみを考慮する場合、評価式は式(3.2.1)となる。基本的に死荷重と活荷重だけを適用するが、ほかの荷重形式、例えば風荷重や地震荷重にも適用が可能である。

$$U\phi R \geq \alpha_L L(1+I) + \alpha_{D1}D_1 + \alpha_{D2}D_2 \quad (2-2-1)$$

実用段階では、式(3.2.1)は式(3.2.2)のように、評価指標の形で表現される。

$$LLRF = \frac{U\phi R - (\alpha_{D1}D_1 + \alpha_{D2}D_2)}{\alpha_L L(1+I)} \quad (2-2-2)$$

ここで、 R は公称部材耐荷力、 D_1 と D_2 は死荷重効果、 L は活荷重効果を表す。 U 、 ϕ 、 α_{D1} 、 α_{D2} 、 α_L は耐荷力、死荷重及び活荷重の部分係数であり、 I は衝撃係数である。LRFRのRFと同様に、LLRF ≥ 1 であれば、基準とする活荷重に対して安全であるが、LLRF < 1 の場合、基準とする活荷重に対して安全とは言えず、補強、閉鎖、荷重制限を実施する必要がある。

2-2-2. 目標の信頼性指標

LLRF の最大の特徴は、評価時に基準とする活荷重と部分係数について、設計基準と異なるものを適用していることである。限界状態に対応する信頼性指標の設定に当たっては、特に以下の4点の影響要因を考慮する。

- ・ 事故の脅威人数：リスクの波及する人数が減少する場合、目標信頼性指標を低減できる
- ・ 構造特性：部材の破壊による構造物全体の破壊への影響が低減される場合、目標信頼性指標を低減できる
- ・ 部材特性：部材の延性破壊により損傷の警告情報を提供できる場合、目標信頼性指標を低減できる
- ・ 点検レベル：点検レベルが上がる場合、目標信頼性指標を低減できる

以上の要因を考慮した目標信頼性指標の設定を表 2-2-2 に示す。構造特性 (System behaviour) の欄において、S1:部材の損傷は完全な崩壊につながる、S2:部材の故障完全な崩壊を引き起こさない、S3: 局部損傷のみをそれぞれ示している。部材特性 (Element behaviour) の欄において、E1: 警告なしで耐荷力の突然喪失、E2: 警告なしで突然破壊であるものの若干耐荷力が残る、E3: 段階的な耐荷力低下をそれぞれ示す。点検レベル (Inspection level) の欄において、INSP1: 個別の部材は点検不可能、INSP2: 評価者が検査記録を確認可能、INSP3: 評価者は重要と規格外の部材検査可能をそれぞれ示す。

橋梁管理者がコントロールできる荷重として、Clause 12 では交通荷重を扱っている。NP, PS, PM, PC の4つの荷重を設定している。それぞれの意味は表 2-2-1 に示している。

legal を超えているか、不確定性の度合い、通常供用下かどうか、確率分布でいう平均と分散に関わる。自動車の総重量より輪重のほうがばらつく、このばらつきを考慮すると safety factor は小さくなってしまい、または同じ safety factor を確保するために平均値を離さないといけない。また、死荷重は 4 つに分類されていた。D1 鋼桁、D2 コンクリート桁、D3 コンクリート床版（コンクリート舗装）、D4 アスファルト舗装を示す。アスファルト舗装の不確定性が高い、設計通りの厚さではないケースが多いので、D4 に分類した。

表 2-2-2 で示している信頼性指標は 1 年間のものであるが、評価周期は 1 年間で良いことや、1 年後に再評価されるべきであるという示唆は基準には見られない。年間またはライフタイムに基づく評価は、橋の状態または交通量が変化するまで有効である。表 2-2-3 に示されているいくつかの例のように、目標信頼性指標 β によって、各荷重係数が決まる（死荷重 D_1 、 D_2 、 D_3 は床版の想定した状況によって変化する）。

表 2-2-1. 交通荷重の定義

種類	意味
NP (non-permit)	通常の法定交通であり、最大荷重の数値が曖昧の可能性がある
PS (permit, single-trip)	特別な許可が必要な過載荷、不可分な法定基準を超える軸重、荷重の数値が未知可能性がある
PM (permit, multiple-trip)	特別な許可の一連の過載荷車両（例：鉱山から大量輸送）、個別軸重は法定荷重を超えず、総荷重をよく把握している
PC (permit, control)	異常に重い荷重、他の並走車両なし、荷重は正確に把握

表 2-2-2. 目標信頼性指標

System behavior	Element behavior	Inspection level		
		INSP1	INSP2	INSP3
S1	E1	4.00	3.75	3.75
	E2	3.75	3.50	3.25
	E3	3.50	3.25	3.00
S2	E1	3.75	3.50	3.50
	E2	3.50	3.25	3.00
	E3	3.25	3.00	2.75
S3	E1	3.50	3.25	3.25
	E2	3.25	3.00	2.75
	E3	3.00	2.75	2.50

表 2-2-3 目標信頼性指標により決まる荷重係数の例

Load category	symbol	Target reliability index β						
		2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4
Permanent loads D1	α_{D1}	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.1	1.11
Permanent loads D2	α_{D2}	1.1	1.12	1.14	1.16	1.18	1.2	1.22
Permanent loads D3	α_{D3}	1.25	1.3	1.35	1.4	1.45	1.5	1.55
Traffic loads	α_L	1.35	1.42	1.49	1.56	1.63	1.7	1.77

2-3. WG2 が同定した交通荷重の Load Rating への反映

第 2 章の紹介中、抵抗や荷重はいずれも設計値あるいは推定値を利用することが多いが、より正確的に Load Rating で構造物を評価する上で、荷重の実態を明らかにする必要がある。死荷重に関しては、設計段階においても比較的正しく評価が行えるが、活荷重には動的効果が含まれるため、モニタリング等によりこの動的効果を正しく評価する必要がある。そのために、MBE の Section 8 は Nondestructive Load Testing を掲載し、Weigh-In-Motion Testing から交通荷重を測ることを紹介した。本研究部会の WG2 は Bridge Weigh-In-Motion システムを取り込むっており、評価する対象橋梁の交通荷重は簡単に把握でき、Load Rating はもっと正確的に行うことを期待される。

2-4. Load Rating は日本導入時の問題点と課題

2-4-1. 地震の影響

我が国の設計体系では、地震の影響が橋の設計に必ず考慮され、橋種や部材においては、しばしば支配的となる。一方で、Load Rating は、主として死荷重及び活荷重の作用を考慮しているため、例えば、橋種ではラーメン橋やアーチ橋など、部材では支承部や上下部工の接合部など、Load Rating を適用する橋種や部材について留意が必要である。

地震の影響は、昭和 55 年の道路橋方書から、たびたび要求水準が引き上げられており、例えば、地方自治体が管理する橋梁などで、すべての橋梁が現行の道路橋示方書と同等の耐荷性能を保有するに至り、偶発的な地震の影響が一律無視できるレベルとなり、Load Rating による評価の着目で維持管理の指標化ができるようになるには、時間を要すると推察される。

以上より、現状においては、Load Rating を活用した場合でも、地震の影響に対する耐荷性能を別途、対応とすることが望ましい。

2-4-2. 特殊な荷重載荷の影響

我が国では近年、物流の国際化、輸送の効率化などによる燃料消費量の削減のため、トレーラなどの特殊車両の大型化が図られてきている。特車による荷重が橋梁に与えるダメージが深刻にならないよう審査された許可限度重量以下で走行する規則となっているが、これらの作用に対し、先に米国での既設橋の耐荷力評価（RF 値の算定）には目標信頼性指標 β を 2.5 のような設定と同様な目標信頼性指標について、我が国の運輸・輸送実態を鑑みた設定が行なえるかの課題がある。

今後、データの集積と分析により精緻に至るまでの課題はあるものの、特車申請に係る審査につ

いては、効率化が求められており、後述するセンシングと Load Rating を組み合わせることで、社会的課題の解決が期待される。

§ 3. センシング技術を用いた維持管理における性能評価

3-1. 性能評価におけるセンシング技術の可能性

性能評価（performance-based evaluation）の定義は、現時点では必ずしも確立しているわけではないが、「評価された構造物の保有する性能が、要求性能さえ満足していれば、どのような構造形式や構造材料、構造解析手法、検知手法を用いてもよい評価法」と言えよう。より具体的には、構造物の目的とそれに適合する機能を明示し、機能を備えるために必要とされる性能を規定し、規定された性能を構造物の供用期間中確保することにより機能を満足させる評価方法。

性能評価が導入されると、実際に設計され架設された構造物がどのような性能を保有しているのかを、評価者はもちろんのこと発注者側も、構造物のライフサイクルを通してどのような性能を確保するのが最適かをコストや環境負荷等の観点から考慮しながら選択することができるという長所がある。

ただし、要求性能水準をどのような方法で算出し、どのような値にすればよいのか、設計された構造物の保有する性能を如何に検証するか、ライフサイクルコストの評価やライフサイクルアナリシスを如何に合理的に実施するか、は極めて難しい問題であり、性能評価の定義も含め、今後の研究成果を待たねばならない。いずれにせよ、技術力の適切な評価システムを確立することが性能評価導入の大前提であろう。

人手に頼って測定や目視点検したものをセンサ等により自動化、省力化するのは単純であるが、コストに見合った付加価値を持つ仕組みを作り出すことは難しい。センシングの特徴を活かして付加価値を創出することが肝要である。ここではまず、インフラの状態や作用外力を把握するための現状の枠組みと、その中でセンシングにより期待される付加価値を整理する。

インフラの状態や作用外力を把握するものは次の 3 種類に大別できる。①膨大な量のインフラを定期的に診断し、変状や詳細調査が必要なものを抽出（スクリーニング）する点検、②変状が確認された構造物に対して実施する詳細調査、③劣化進展の程度や交通荷重を把握したり、地震や台風など稀に生じるイベントに対する応答やその外力を捉えたりする目的で常時センサを設置して行われるモニタリングである²³⁾。このように性能評価におけるセンシング技術の可能性を模索する。

3-2. 性能要求レベル

橋に要求される一般的な性能と、その性能を満足させるために設計段階で考慮される限界状態や検討項目を表 3-2-1 に示す。なお、同表に示す性能は主として個々の部材としての性能であり、橋全体としてみた場合の性能については、さらに議論を深めていく必要がある。

維持管理段階の性能評価では、初期建設後の定期点検時、診断時、補修時等の性能さえ満足すれば、各ステップで性能を満足することを確認し、どのようなことに留意しながら維持管理・補修等を行っていく。ことである。ただし、点検・診断時において、近接目視や触視だけで部材や橋全体の健全性を評価することは困難且つ恣意的であり、所定の安全性や使用性を満足・維持出来ているかをセンシングにより定量的に評価できる技術が求められる。例えば、振動計測は部材の剛性変化を定量的に捉える手段として有効となる得るが、例えば橋全体モードの固有振動数に部材の局部損

傷が与える影響はごく小さく、性能低下を簡易に精度良く評価できるセンシング手法の開発が期待される。

表 3-2-1. 橋に要求される性能と、設計段階で考慮される限界状態や検討項目 ²⁴⁾

要求される性能	考慮される限界状態や検討項目
安全性	剛体的安定限界，破断限界，降伏限界，塑性崩壊，座屈限界，動的安定限界，疲労限界
使用性	ひびわれ限界，変形限界，局部損傷，振動限界，外観劣化
経済性	ライフサイクルコスト（＝建設費[設計費用等を含む]＋維持管理費＋補修費＋破壊時の損失費用の期待値）最小
環境適合性	景観，遮光性，排出物質，生態系への影響
耐久性	（安全性或使用性の時間関数）
維持管理性	維持管理の難易度
復旧性(修復性)	復旧までに要する時間，復旧工事の難易度
施工性	架設期間，架設場所，気象条件
付加性能	シンボル性，芸術性，観光資源性 etc.

3-3. センシングより性能評価手法に関する基準調査

示方書に記載されている橋に要求される性能・機能には，桁の剛性や回転機構や伸縮機構などが維持され，確実に荷重を支持することが求められている．性能・機能が，維持できているか確認するために，活荷重の変動や温度変化による桁の回転機構や伸縮機構・たわみなどの変化を利用したセンシングによる評価が行われている事例がある．そこで，性能評価のセンシングの応用として実務の事例や基準を文献調査等行い，により整理し，「センシング」や「性能」に関わる内容を各自基準類から調査して整理した．文献調査・整理した表を表 3-3-1～表 3-3-9 に示す．表は，主に評価部材・性能，評価対象の概要，評価する挙動・変状評価指標，センシング手段，センサ設置位置，センシングデータ分析方法，評価基準，根拠基準・文献の項目に分けて整理した．桁の回転機構や伸縮機構などの上部工の支持機能は，支承部に着目し，桁の剛性などその他の項目は，上部工各部に着目した評価部材とし，各項目の記入を行った．性能評価において重要な評価基準の項目については，設計時の値以外に比較する値がなく，劣化や損傷の閾値となりそうな技術資料はなかった．

表 3-3-1. 支承・鉛直支持機能

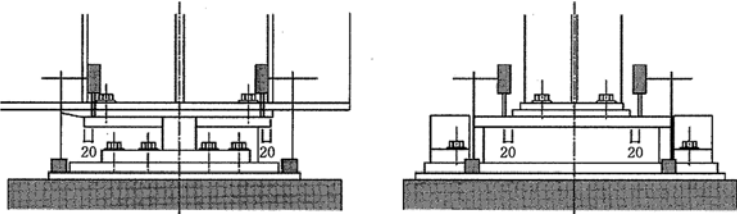
評価部材・性能	支承・鉛直支持機能			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	変形量	伸縮性	漏水	
評価対象の概要	<対象> 鉛直支持性能 <目的> 支承の鉛直支持機能が消失していることにより、支点条件が変わり、橋桁に設計外の影響を与えると考えられる。道路橋示方書では、上部構造に作用する荷重を确实の支持して下部構造に伝達しなければならない。			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 鉛直変位、鉛直荷重 <理由> 支承部の鉛直変位を測定し、支点変位を算出する。 支承部の荷重を測定し、荷重の評価指標である支点荷重を算出する。			
評価指標	<指標> 鉛直変位、荷重 <理由> 設計値の鉛直変位・鉛直荷重と比較し検証を行う。			
センシング手段	変位計	油圧ジャッキ	ロードセル	支承に内蔵した荷重計
センサ設置位置	ベースプレートと上沓の鉛直方向の相対変位を4隅で測定	ジャッキ位置	ジャッキ位置	ゴム支承内に設置
センシングデータ分析方法	設計値の鉛直変位・鉛直荷重と比較し検証を行う。  ベースプレートと上沓の鉛直方向の相対変位を4隅で測定する。 1) 鉛直変位及び回転変位測定の例			

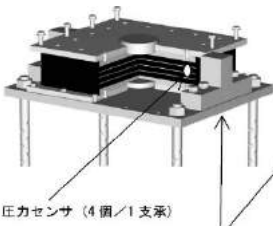
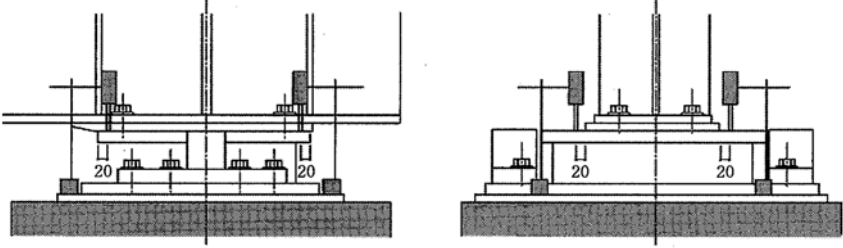
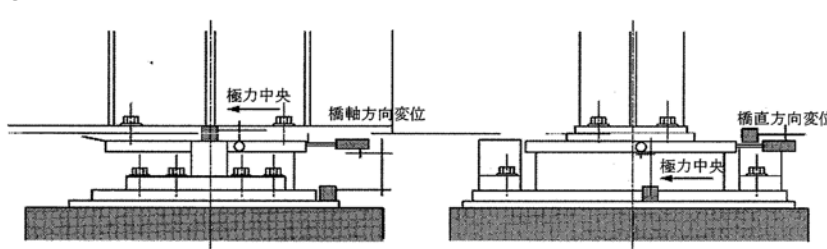
	 写真5.9 油圧ジャッキを用いた反力計測  圧力センサ (4個/1支承) 反力測定ゴム支承  RFID データロガ (走行車両や遠隔地へ測定データを無線発信) 写真7.1 支承部の鉛直荷重の変動をセンサで検出するシステムの例
評価基準	橋梁設計時の照査項目計算による
根拠基準・文献	道路橋支承便覧 平成 16 年 4 月 p283-p287 道路橋支承部の点検・診断・維持管理技術 p154-p155 p236-p238 道路橋示方書・同解説 II鋼橋編 平成 16 年 4 月 p90
課題	閾値の設定方法を統一的に整理した技術資料は無い
参考文献	—
その他メモ	—

表 3-3-2. 支承・回転機能

評価部材・性能	支承・回転機能			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	変形量	伸縮性	漏水	
評価対象の概要	<対象> 回転支持性能 <目的> 支承の回転機能が消失していることにより、支点条件が変わり、橋桁に設計外の影響を与えと考えられる。 道路橋示方書では、上部構造のたわみによる回転変位に対して、適切に作動しなければならない。			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 鉛直変位 <理由> 橋軸方向の支承前後の変位を測定し、回転の評価指標である回転角を算出する。			
評価指標	<指標> 回転角 <理由> 動作していることを確認。 定量的に測定を行う場合には、支承部に変位計などを設置して、支承の変位を測定する。			
センシング手段	変位計			
センサ設置位置	ベースプレートと上沓の鉛直方向の相対変位を4隅で測定			
センシングデータ分析方法	橋軸方向の支承前後の変位から、回転角を算出して評価を行う。 評価基準を設定することが困難なため、回転の有無の評価となる。  ベースプレートと上沓の鉛直方向の相対変位を4隅で測定する。 1) 鉛直変位及び回転変位測定の例			

	  (a) BP支承の場合 (b) ローラー支承の場合 写真5.8 変位計を利用した計測
評価基準	橋梁設計時の照査項目計算による
根拠基準・文献	道路橋支承便覧 平成 16 年 4 月 p283-p287 道路橋支承部の点検・診断・維持管理技術 p236-p238 道路橋示方書・同解説 II鋼橋編 平成 16 年 4 月 p90
課題	閾値の設定方法を統一的に整理した技術資料は無い
参考文献	—
その他メモ	—

表 3-3-3. 支承・移動機能

評価部材・性能	支承・移動機能			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	変形量	伸縮性	漏水	
評価対象の概要	<対象> 可動部移動性能 <目的> 支承の移動機能が消失していることにより、支点条件が変わり、橋桁に設計外の影響を与えられとされる。 道路橋示方書では、上部構造の温度変化による水平変形に対して、適切に作動しなければならない。			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 水平変位 <理由> 橋軸方向の移動変位を測定し、評価指標である温度変化による移動量を算出する。			
評価指標	<指標> 移動量 <理由> 温度変化による移動量の検証。			
センシング手段	変位計			
センサ設置位置	ベースプレートと上沓の水平方向の相対変位を橋軸方向及び橋直方向で測定			
センシングデータ分析方法	支承の水平変位を測定し、温度変化による桁伸縮分を移動しているかどうか検証する。  ベースプレートと上沓の水平方向の相対変位を橋軸方向、橋直方向で測定する。 回転成分を取り除くため、極力支承の中央よりの変位を測定する。 2) 橋軸方向及び橋直方向変位測定の例 図-6.3.2 変位計による測定の例			
評価基準	橋梁設計時の照査項目計算による			
根拠基準・文献	道路橋支承便覧 平成 16 年 4 月 p 283-p287 道路橋支承部の点検・診断・維持管理技術 p236-p238			

	道路橋示方書・同解説 II鋼橋編 平成 16 年 4 月 p 90
課題	閾値の設定方法を統一的に整理した技術資料は無い
参考文献	－
その他メモ	－

表 3-3-4. 上部工桁・活荷重たわみによる鉛直剛性

評価部材・性能	上部工桁・活荷重たわみによる鉛直剛性																														
性能分類	安全性	使用性	回復性																												
キーワード	たわみ																														
評価対象の概要	<対象> 変形性能 <目的> 構造各部の応力が許容応力度以内であっても、橋全体としての剛性が低い場合には、二次応力による損傷が生じたり、過大なたわみや振動によって走行安全性に問題が生じる。																														
評価する挙動・変状	<挙動・変状> ひずみ、たわみ <理由> たわみは直接の変形評価指標である。また、計測の便利性によっては、ひずみ計測も考える。																														
評価指標	<指標> たわみの許容値（道示 P127 および P418） <理由> 桁のたわみによってコンクリート床版に付加される曲げ応力度が許容値を超えないために必要なたわみ制限値を算出して規定したものである。																														
センシング手段	変位計																														
センサ設置位置	床版支間中央	橋梁支間中央																													
センシングデータ分析方法	支間中央はレーザー変位計，ピアノ線を利用した LVDT など																														
評価基準	表-2.3.1 たわみの許容値 (m) <table><tr><th colspan="2">橋の形式</th><th>単純桁及び連続桁</th><th>ゲルバー桁の片持部</th></tr><tr><td rowspan="4">鋼桁形式</td><td rowspan="3">コンクリート床版を有する鋼桁</td><td>$L \leq 10$</td><td>$L/2,000$</td></tr><tr><td>$10 < L \leq 40$</td><td>$\frac{L}{20,000/L}$</td></tr><tr><td>$40 < L$</td><td>$L/300$</td></tr><tr><td colspan="2">その他の床版を有する鋼桁</td><td>$L/300$</td></tr><tr><td colspan="2">吊橋形式</td><td colspan="2">$L/350$</td></tr><tr><td colspan="2">斜張橋形式</td><td colspan="2">$L/400$</td></tr><tr><td colspan="2">その他の形式</td><td>$L/600$</td><td>$L/400$</td></tr></table> L：支間長(m)				橋の形式		単純桁及び連続桁	ゲルバー桁の片持部	鋼桁形式	コンクリート床版を有する鋼桁	$L \leq 10$	$L/2,000$	$10 < L \leq 40$	$\frac{L}{20,000/L}$	$40 < L$	$L/300$	その他の床版を有する鋼桁		$L/300$	吊橋形式		$L/350$		斜張橋形式		$L/400$		その他の形式		$L/600$	$L/400$
橋の形式		単純桁及び連続桁	ゲルバー桁の片持部																												
鋼桁形式	コンクリート床版を有する鋼桁	$L \leq 10$	$L/2,000$																												
		$10 < L \leq 40$	$\frac{L}{20,000/L}$																												
		$40 < L$	$L/300$																												
	その他の床版を有する鋼桁		$L/300$																												
吊橋形式		$L/350$																													
斜張橋形式		$L/400$																													
その他の形式		$L/600$	$L/400$																												

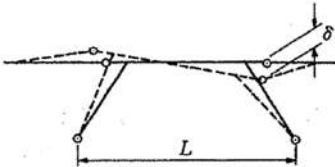
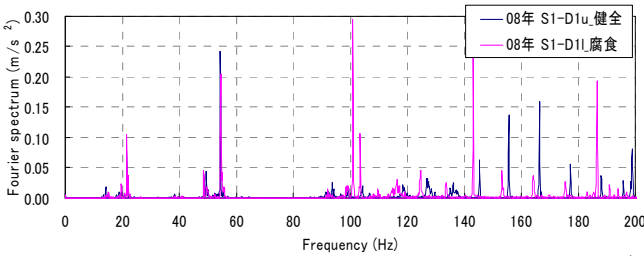
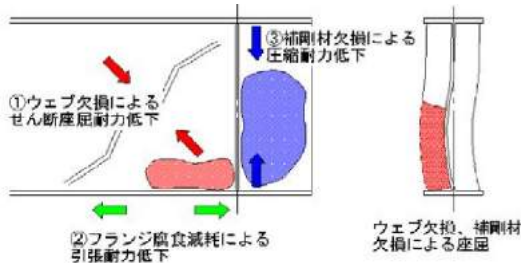
	ラーメン橋の活荷重（衝撃を含まない）による最大たわみは，式（16.7.1）を満たさなければならない。 $\delta \leq \frac{L}{500} \quad \dots\dots\dots (16.7.1)$ ここに，δ：活荷重（衝撃を含まない）による最大たわみ(m) L：支間長（m）（図-16.7.1 参照）  図-16.7.1 ラーメン橋のたわみ
根拠基準・文献	道路橋示方書・同解説II.2.3 および 16.7
課題	閾値の設定方法を統一的に整理した技術資料は無い
参考文献	—
その他メモ	—

表 3-3-5. 上部工細長部材・連結度低下

評価部材・性能	上部工細長部材（トラス斜材，アーチ垂直材）・連結度低下			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	疲労亀裂	腐食	リダンダンシー	
評価対象の概要	<対象> 細長い部材の材端部の状態 <目的> 腐食や疲労により部材端部（ガセット PL との境界部やリベット連結部）の連結度が低下し，力(M, N) の伝達性能が低下する．   健全斜材 腐食斜材			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 部材端部の連結度 <理由> 部材端部の健全性（連結度）により，橋全体の力の伝達性能に影響するため．			
評価指標	<指標> 細長部材の高次モード振動数 <理由> 連結度が低下し，半剛結やピン結合の状態に近づくると高次モードの振動数が変化することが研究的に確認されている．  健全度の違いによる高次モード振動数の相違²⁾			
センシング手段	加速度計	打撃ハンマ		
センサ設置位置	細長部材中央	フランジ，ウェブ面など複数		
センシングデータ分析方法	H 断面などの細長部材に，加速度計を複数設置して，打撃加振により面外振動，面内振動，板振動をフーリエスペクトル分析し，高次モード振動数の変化を捉える．			

	リダンダンシー解析による FCM候補部材の特定 ↓ FCM候補部材の打撃試験 ↓ 断面内3点の加速度計測 ↓ 高次のねじれモードや 振動モードを同定 ↓ 高次モード振動数の 定期モニタリング ↓ 振動数変化より鋼部材の機 能性を診断 打撃加振試験のイメージ
評価基準	5年に1度の定期点検毎、もしくは見た目の変状が確認された場合に、打撃加振による振動計測を行い、前回振動データより顕著な低下が見られた場合に力の伝達性能の低下と認識する。
根拠基準・文献	1)国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領，平成26年6月 2)吉岡勉，山口宏樹，高橋眞，松本泰尚：打撃試験によるトラス斜材の振動数変化の検出とFEM解析による分析，土木学会第65回年次学術講演会，2010.9. 3)永谷秀樹，明石直光，松田岳憲，安田昌宏，石井博典，宮森雅之，小幡泰弘，平山博，奥井義昭：我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討，土木学会論文集A，Vol.65，No2，pp.410-425，2009.5.
課題	高次振動数の低下と部材連結度（力の伝達性能）との相関性が不明であり，閾値設定が研究課題である．
参考文献	—
その他メモ	—

表 3-3-6. 上部工鋼桁橋・の桁端部・腐食による剛性低下

評価部材・性能	上部工鋼桁の桁端部・腐食による剛性低下			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	腐食	座屈	漏水	
評価対象の概要	<対象> 鋼桁橋の桁端部 <目的> 鋼橋桁端部は伸縮装置からの漏水等により腐食しやすい部位であり，腐食が進行した場合の座屈耐荷性を定量的に評価する手法が求められている．  桁端部の腐食による変形例⁴⁾			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 桁端ウェブのX方向座屈や，支承前面位置での桁の鉛直変位 <理由> 座屈や桁の変形（鉛直変位）を直接的にセンシングすることが有効である．  桁端腐食により想定される終局状態⁵⁾			
評価指標	<指標> 1. 桁端ウェブのX方向のひずみ変化 2. 支承前面位置での桁の鉛直変位 <理由> 腐食により座屈する場合の挙動が研究されている．			
センシング手段	ひずみ計	変位計	リモート機器	
センサ設置位置	桁端ウェブ	支承前面位置		

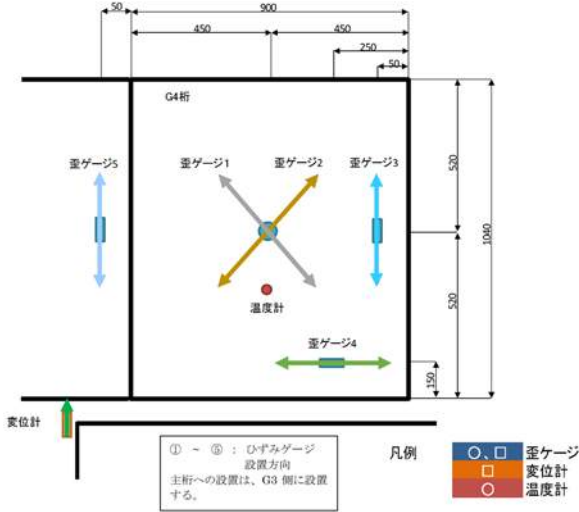
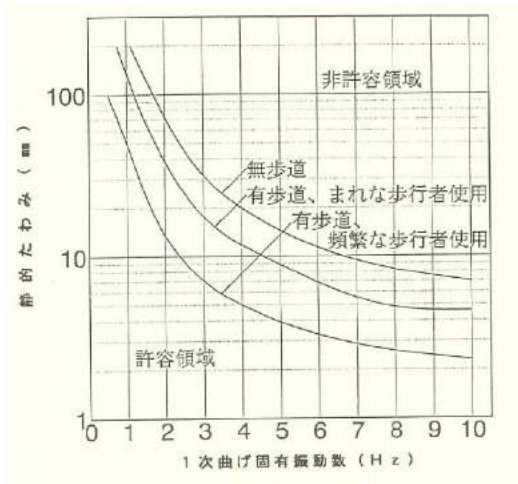
センシングデータ分析方法	① ひずみ及び鉛直変位を 10 分に 1 回程度の間隔でインターバル計測する。 ② 事前に設定した閾値を超えた場合に管理者にアラームメールを配信する。 ③ 上記について常時遠隔モニタリングを実施する。  凡例 - 歪ゲージ (歪みゲージ) - 変位計 - 温度計 ① ~ ⑥ : ひずみゲージ 設置方向 主桁への設置は、G3 側に設置する。
評価基準	主桁の降伏限界状態に至る閾値を事前に設定する。
根拠基準・文献	1)国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領，平成 26 年 6 月 2)土木学会 鋼構造委員会：鋼構造シリーズ 18 腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，2009.3. 3)玉越，中州ほか：鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究，国総研資料第 294 号，平成 18 年 1 月
課題	計測方法や閾値の設定方法を統一的に整理した技術資料は無い。
参考文献	4)田井,下里ほか：腐食により崩落に至った鋼プレートガーダー橋の崩落メカニズムと桁端部の損傷回復評価に関する解析的検討，構造工学論文集 Vol.61A, 2015.3. 5)小宮，濱地ほか：腐食損傷が生じた上八橋の補修・補強対策，土木技術資料 51-8，2009.
その他メモ	—

表 3-3-7. 上部工道路橋・振動使用性

評価部材・性能	上部工道路橋・振動使用性			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	変形量	伸縮性	漏水	
評価対象の概要	<対象> 上部構造の振動使用性 <目的> 道路橋の振動使用性に対する照査方法 歩行使用状態を3タイプに分けて考えている			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 1次曲げ固有振動数 (Hz) に対する静的たわみ計算値 <理由> 代表的な車両が移動する際に、路面不整を有する上部構造の振動加速度を計算することは容易ではないため、振動加速度のじょ限度（一定の確率の人間がある振動感覚【不快感】を生じる基準値）を上部構造の1次曲げ固有振動数 (Hz) に対する静的たわみ計算値として表している。			
評価指標	<指標> 1次曲げ固有振動数 (Hz) に対する静的たわみ計算値を3タイプで区分して評価 1. 歩道を有しない橋梁で歩行者が臨時的にしか使用しない 2. 歩道を有する橋梁であるが歩行者はほとんど使用せず、使用しても一般的に歩くだけである 3. 一般的に都市内の歩道を有する橋梁で、歩行者が歩いたり立ち止まったりして頻繁に使用する。 <理由> カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準により定められている。 			
センシング手段	加速度計			

センサ設置位置				
センシングデータ分析方法				
評価基準	橋梁設計時の照査項目計算による			
根拠基準・文献	橋梁振動モニタリングのガイドライン p160-161 (カナダ・オンタナ州道路橋設計基準)			
課題	橋梁の上部工形式には様々な形式が採用されており，それらの中には揺れやすい形式もあり，このようなすべての上部工形式における統一的理解に問題がないわけではない．			
参考文献				
その他メモ	設計時の照査項目のため，架設後の橋梁について適応できるかは不明． 設計との比較として使用は可能と考える．			

表 3-3-8. 上部工歩道橋・振動

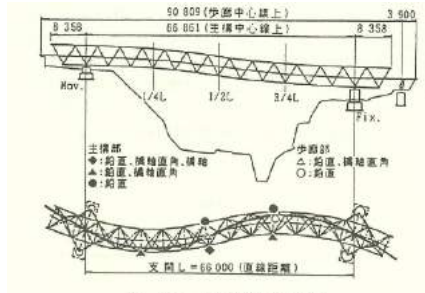
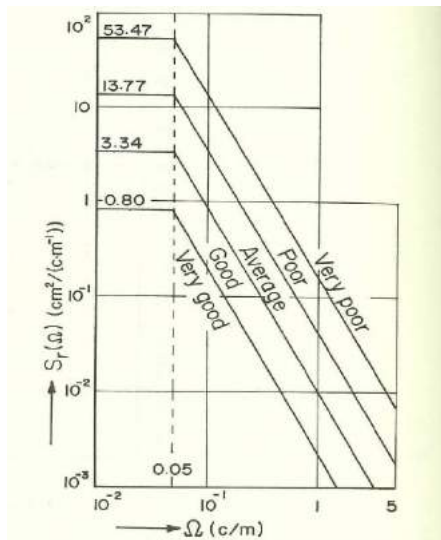
評価部材・性能	上部工歩道橋・振動			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	変形量	伸縮性	漏水	
評価対象の概要	<対象> 歩道橋の振動と使用性 <目的> 歩行者の最頻歩調による応答速度の実効値により歩道橋のゆれに対する歩行者の感じ方が計れ使用性を評価できる。			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 歩行者の最頻歩調による応答速度の実効値 <理由>			
評価指標	<指標> 歩行者の最頻歩調による応答速度の実効値 0.85cm/s を超えるとよく振動を感じる 1.7cm/s を超えると多くの人が歩きづらいつと感じる 2.7cm/s を超えるとほとんどの人がおおいに歩きづらいつと感じる <理由>			
センシング手段	加速度計			
センサ設置位置				
センシングデータ分析方法	加速度計設置位置 あやとり橋での測定例  図-7.15 加速度測定位置図			
評価基準	—			
根拠基準・文献	橋梁振動モニタリングのガイドライン p194-195 小堀為雄, 梶川康男: 橋梁振動の人間工学的評価法, 土木学会論文報告集, No.230, pp23-31, 1974.10			
課題	—			
参考文献	—			
その他メモ	—			

表 3-3-9. 上部工路面・凹凸の状態

評価部材・性能	上部工路面・凹凸の状態			
性能分類	安全性	使用性	回復性	
キーワード	変形量	伸縮性	漏水	
評価対象の概要	<対象> 路面の凹凸の状態 <目的> ISO では、路面周波数が $\Omega=1/2\pi$ のときの PSD の値でもって、路面状態のカテゴリに区分しているが、自動車の振動の乗り心地問題から作成されている。そこで、路面状態を定性的に把握するため、路面凹凸の PSD モデルのスペクトル形状から各路面状態を分類する。			
評価する挙動・変状	<挙動・変状> 路面凹凸 <理由> 路面凹凸の周波数とその凹凸振動強度による情報を得るため			
評価指標	<指標> 路面凹凸のパワースペクトル密度(PSD) <理由> 得られた路面凹凸のスペクトル形状がどのカテゴリに入るかによって、路面状態を視覚的に評価できる  図- 5.23 スペクトルによる路面凹凸状態の分類			
センシング手段	測量用レベル			
センサ設置位置	橋面全体			
センシングデータ分析方法	測量用レベルで測定された路面凹凸を最大エントロピー法でスペクトル解析して路面 PSD を求める。			

	また，路面 PSD $S_{\gamma}(\Omega)$ は以下に示す指数関数に近似したモデル化が一般的である． $S_{\gamma}(\Omega) = a / \Omega^n$ Ω は路面周波数，a は路面の平坦性を表す平滑度パラメータ，n は周波数によるパワーの分布（近似関数の勾配）を示す．
評価基準	—
根拠基準・文献	橋梁振動モニタリングのガイドライン p116-p120
課題	車両の振動系は橋梁と同様，3次元モデル化がなされていることから，路面凹凸モデルも3次元モデル化が必要となる．しかしながら，わだち掘れを含む横断方向路面凹凸の PSD モデルが提示されていないが提示されていない現状では，3次元的路面凹凸状態の評価は困難である．
参考文献	—
その他メモ	—

§ 4. センシングを活用する既存橋梁の保有性能評価 の試み

第2章では、各国の設計基準で性能設計が進められており、海外では維持管理においても性能照査型の手法である Load Rating が示されていることをまとめた。特に米国 LRFR およびカナダ LLFR では性能を議論する際に構造信頼性指標 β が用いられ、この β 値に基づく意思決定の流れが示されている。実際の荷重状況や構造特性などによって目標とする信頼性指標 β を示すことで確保すべき性能を示している。このように構造信頼性理論に基づく性能の議論は今後ますます進むものと考えられる。そこで本章ではまず、この構造信頼性指標 β について概略を説明する。その上で、加速度計によるセンシングデータを用いて実橋梁で保有性能の評価を試みた一例を示す²⁵⁾。ここでは、センシングデータは構造状態に関する有限要素モデルパラメータの不確定性低減に利用し、そのモデルで活荷重耐荷性能に対する β 値を計算して保有性能の評価を試みた。

大まかな流れは以下の通りである。ここでは、対象橋梁でセンシングデータを取得すると同時に数値モデルを構築する。材料特性値や寸法、境界条件といったモデルパラメータに対して、それらの不確定性を表す事前確率分布を与える。特に劣化や損傷がみられている場合に、これに関わるモデルパラメータでは不確定性が大きくなる。これにセンシングデータをベイズの方法に適用して事後分布推定を行う。事後分布とはセンシングデータの情報でアップデートされたモデルパラメータの確率分布である。これを構造信頼性 β の計算に用いることで、センシングデータの情報を考慮した性能評価を行う。

4-1. 構造信頼性指標 β の概要

構造信頼性理論²⁶⁾では構造物の性能を、荷重の不確定性と構造物の強度あるいは抵抗に関する不確定性を考慮して確率論的に検討する。ある性能に関する構造信頼性をもとめるとき、荷重作用 S とその性能に関する耐力 R について次式に表す性能関数 Z を考える。

$$Z = R - S \quad (4-1-1)$$

この性能関数 Z に対して、 $Z \leq 0$ であるときに構造物は性能を満たさないこととなる。耐力 R および荷重作用 S が確率分布を有するとき Z の分布は図 4-1-1 の概念図のように表せる。破壊確率 P_f とは、 Z の全事象に対する $Z \leq 0$ の確率である。この破壊確率 P_f は、図 4-1-1 中に示すように全体の性能関数 Z の分布が $Z=0$ に対してどの程度の余裕があるかということと対応する。特に Z の分布特性を平均値 μ_Z で表せるときにはこの余裕は平均値と $Z=0$ の距離と対応し、これが構造信頼性指標 β である。荷重作用 S と耐力 R の確率分布は全ての影響パラメータの不確定性を確率変数として取り扱い厳密に算出するのが望ましいが実務上は困難であるため、多くの場合近似解法等によって算出する。例えば、耐力 R および荷重作用 S が互いに独立で共に正規分布に従う場合には1次近似2次モーメント(FOSM)法といった簡便な手法で β 値を得ることができる。本章で示す例でも、このFOSM法を用いている。

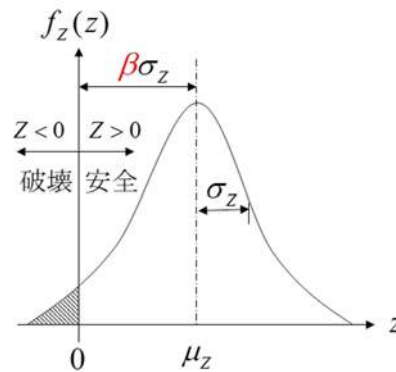


図 4-1-1. 性能関数 Z の確率分布に対する破壊確率と構造信頼性指標 β の概念図

4-2. 対象橋梁での振動データ取得と固有振動特性同定

検証の対象橋梁は鋼鈑桁橋（1963 年完成）で、6 主桁の RC 非合成床版で橋長は 11.7m、幅員は 7.2m、図 4-2-1(a)の断面図に示すように単線の車道 3.5m、歩道 2.6m の構成である。支点には鋼製支承が設置されており、新設時の設計計算書では図 4-2-1(b)中に示す P1 橋脚側で橋軸方向の並進のみ可動、P2 橋脚側で全方向固定の境界条件が与えられていた。この橋梁は 2014 年の定期点検で、コンクリート床版のひび割れ、鋼桁の腐食、鋼支承の腐食が確認されていた。

本検証のセンシングデータは、加速度計測から同定した橋梁の低次モードの固有振動数とした。一般車両が通過する通常供用時の交通振動データを 6 個の加速度計を用いて 5 分間連続で 19 セット取得し、各セットでクロスパワースペクトルにより 3 つの固有振動モードを同定した。図 4-2-2 に同定された各モード形と、19 セットの計測より得られた固有振動数の平均と変動係数を示す。

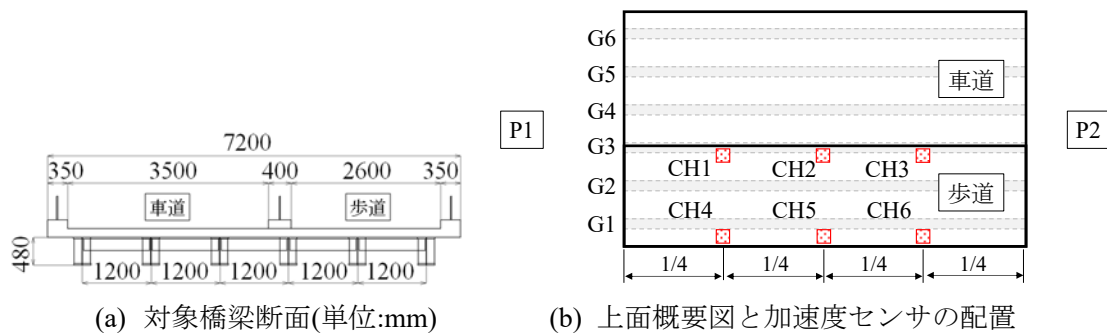


図 4-2-1. 対象橋梁と振動計測の概要

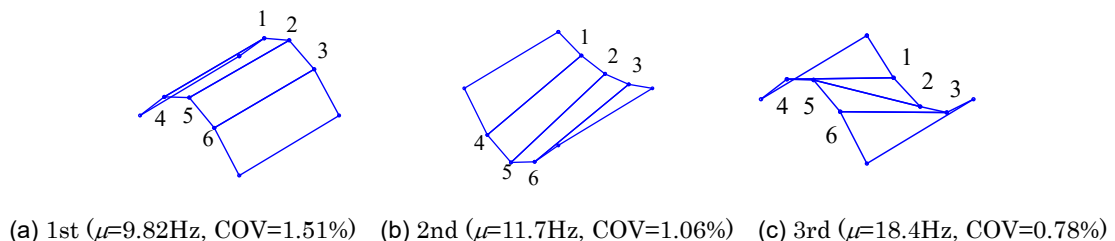


図 4-2-2. モード形と固有振動数の平均と変動係数

4-3. 対象橋梁の有限要素モデルの構築

対象橋梁の数値モデルは汎用有限要素解析プログラム ABAQUS6.14-1 により、鋼桁の全部材と床版を 4 節点 1 次シェル要素にて作成した。各主桁の両端にはシェル要素でソールプレートを設け、その中央点に鋼製支承の可動機能に対応する境界条件を与えた。すなわち可動支承側 P1 で橋軸方向並進のみ自由とし、他の全方向、すなわち固定支承側 P2 の橋軸方向並進、両側の鉛直・橋軸直角方向並進、および各方向回転はすべて拘束とした。その上で、メッシュ構成について対象とする 1-3 次固有振動数の収束を調べて全要素数 124,108 とした。

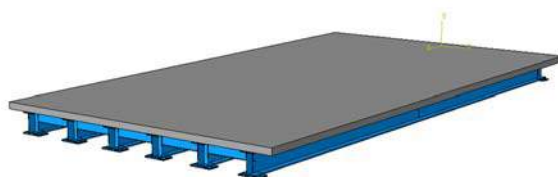


図 4-3-1. 対象橋梁の有限要素モデル全体図

4-4. 既存状態のモデルパラメータ不確定性の表現と事前分布の設定

モデルパラメータの事前分布は初期の不確定性を表すが、ここでは材料物性値や形状寸法のばらつきが取り扱われることが多く統計データも示されている。例えば、新設鋼橋の設計に構造信頼性に基づく部分係数の適用を検証した既往研究²⁷⁾では、過去の統計データ等に基づいて各構造特性値の不確定性が考慮されている。しかし既存橋梁においては個別の劣化や損傷による不確定性が相対的に大きく、目的とする解析出力へ与える影響も大きくなると考えられる。この既存状態に関する不確定性をどのようにモデルの中で表現するかという点が既存構造物を取り扱う際に重要となる。

本検証の対象橋梁では桁端部腐食や床版のひび割れがみられており、特にこれらに関するモデルパラメータの不確定性を取り扱う事前分布設定とした。このとき、橋梁管理者がもつ対象橋梁の定期点検データをできる限り活用して特に不確定性の高いパラメータの抽出を行った。主にウェブ下側や下フランジ下面に見られた鋼主桁の腐食は図 4-4-1(a)に示すようにシェル要素の減厚で、RC 床版のひび割れを床版シェル要素全体のヤング率低減で、支承の腐食は図 4-4-1(b)に示すように主桁端部ソールプレート下面に仮想線形バネを付与して表すこととし、それらのパラメータについて事後分布推定のための事前分布を決定した。

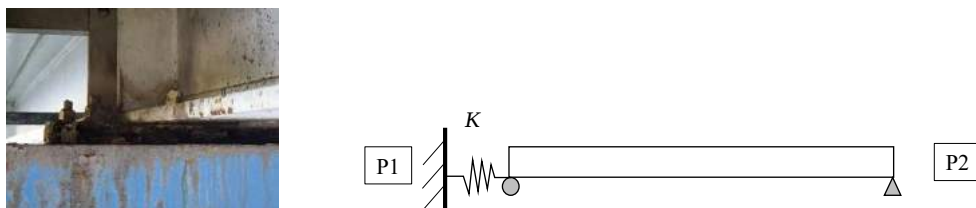
事前分布推定では、扱うモデルパラメータ数すなわち次元が大きすぎたり、事前分布範囲を大きくしすぎたりすると、推定問題としての不適切性が高くなってしまい適切な結果が得られない。センシングデータを有効に用いるには、既往研究での知見や統計データを有効に用いて事前分布に反映することが必要となる。主桁の減厚量に関しては既往文献²⁸⁾などをもとにウェブ下側全面の減厚量が下フランジ下面減厚量の 50%になるようにした。RC 床版のひび割れは曲げ剛性に影響を与えられ、ヤング率の低減で表すことができると考えた。ただしこのパラメータに関しては、具体的に値がどの程度低減するかは、既往研究などで知見を得ることができなかった。これは知識の欠如 (lack-of-knowledge) からの不確定性であり、比較的大きい不確定性、ここでは初期モデル値を上限値として-10%を下限値とする範囲の一様分布を事前分布とした。各可動側支承で与えた仮想線形バネではバネ定数を大きくすると固着傾向を表すことができるが、このバネはモデルの中で仮

想的に与えられた構造要素であり支承の状態とバネ定数値に物理的な対応を与えることはできない。そこで事前に、固着が全く無い状態から完全に固着するまでのバネ定数が取り得る値の範囲を調べたうえで、各桁 G1, G2, G3, G4, G5, G6 のバネ定数 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ について、 $K=1 \times 10^6 \text{N/m}$ から $1 \times 10^{10} \text{N/m}$ の対数変換値に対する一様分布を、バネ定数の事前分布とした。

以上で検討したパラメータ事前分布は経年変化による不確定性であり、(2)-a)で述べたとおり、初期物性値のばらつきに由来する不確定性（鋼材の物性値など）に対して相対的に大きいものとして取り扱った。しかし床版シェル要素に関するパラメータ E_c と D_c の不確定性は、実際には RC 床版だけでなく舗装、縁石等の特性を合わせて考慮するため無視できないと考えた。そこで既往文献²⁷⁾に示されていた鋼鉄桁橋 RC 床版の各部材の物性値、寸法と舗装や付属物死荷重の統計量から、床版シェル要素ヤング率 E_c と密度 D_c に初期値に対して-10%から+10%の一様分布を事前分布に設定し、検証に含めることとした。



(a) G4 桁のウェブ下側・下フランジ下面での腐食とモデル主桁断面での減厚箇所



(b) G2 可動側支承の腐食と可動機能を表す仮想バネ導入の概念図

図 4-4-1. 梁点検台帳で把握された劣化損傷状態と数値モデルでの表現

4-5. モデルパラメータ事後分布の推定

4-5-1. 固有振動数に対するモデルパラメータの寄与度解析

事後分布推定を行う際には、比較特徴量すなわちセンシングデータで取得している固有振動数に対する寄与度が低いパラメータを省くことで、推定問題としての不適切性を回避することが重要である。これはすなわち、センシングデータに寄与しないモデルパラメータはそもそも適切に事後分布推定を行うことができず、検討することができないということになる。これは性能とセンシングの関係を考えるうえでも重要なポイントとなり、後の項に別途考察する。

多変量入力の不確定性が目的とする出力に相対的にどのように寄与するかを調べるには、Global Sensitivity Analysis (GSA)を実施することが有効である。各入力の相関を考慮せずに簡便に実施する方法に分散分析 (Analysis of Variance (ANOVA)) がある。ANOVA はある確率変数 y (解析出力である固有振動数) に対する各影響因子 (各モデルパラメータ) の上下限值変動 (水準 j で表す) が、

全影響因子の変動の中でどの程度寄与するのかを、次式に示す決定係数 R^2 値により調べる。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2} \quad (4-5-1)$$

ここで、 y_{ij} は水準 j ($j=1-m$) での i 番目 ($i=1-n$) のデータ、 $\bar{y}_j$ は水準 j であるデータでの平均、 $\bar{y}$ は全てのデータでの平均を示す。解析応答 y_{ij} は、設定したパラメータの事前分布空間において実験計画法によるサンプリングを行い、各サンプリングに対して求めた 3 次までの固有振動数である。サンプリング法には 2 水準全因子計画法を適用し、前項に示した各モデルパラメータ事前一様分布の上限値と下限値を水準 j とした。

図 4-5-1 に ANOVA の結果を示す。はじめに、床版シェル要素密度 D_c の各固有振動数への R^2 値が相対的に非常に高く、主桁板厚 $Tb_1 - Tb_6$ の固有振動数への寄与度は相対的に小さいことがわかった。床版シェル要素ヤング率 E_c の固有振動数への寄与度も D_c に対して小さかった。次に支承バネ定数 $K_1 - K_6$ について調べると、床版シェル要素密度 D_c から相対的にみて各固有振動数への寄与度が比較的高いことがわかった。以上より 4-4 項に示した事前分布の不確定性のもとでは、床版シェル要素密度 D_c と支承のバネ定数 $K_1 - K_6$ がセンシングデータである固有振動数に相対的に高い寄与度を示すことがわかった。そこで事後分布推定ではこれら 7 つのパラメータを扱うこととした。

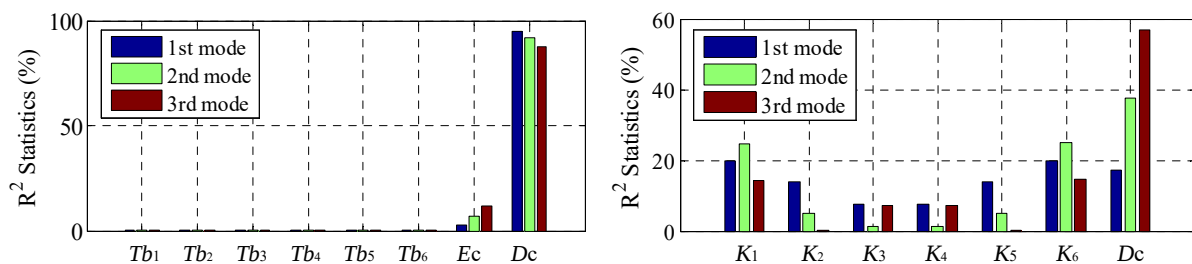


図 4-5-1. ANOVA による感度解析結果

4-5-2. 事後分布推定結果

事後分布推定には、代替モデルを用いるマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法²⁹⁾を適用した。MCMC サンプリングの burn-in は 5000 ステップとして、5 ステップ間隔で 50000 ステップを事後分布として採択した。支承バネ定数 $K_1 - K_6$ と床版密度 D_c の事後分布推定結果を図 4-5-2 に示す。ここで各図の横軸の範囲は、事前一様分布の上下限值範囲としている。この結果では、特に支承バネ定数 $K_1 - K_6$ の事後分布で頻度に偏りのある分布形状となっている。各桁についてみると、両外側の桁である G1, G6 のバネ定数 K_1, K_6 の確率分布は支承がほぼ固着している状態にあたる $1 \times 10^9 \text{ N/m}$ より大きい値の範囲で頻度が小さい。その上で、最頻値は並進機能がほとんど低下していない 1×10^6 から $1 \times 10^7 \text{ N/m}$ の範囲に表れているが、固着状態への遷移区間である 1×10^6 から $1 \times 10^9 \text{ N/m}$ にも頻度が分布していることから、固着傾向の可能性も示している。一方、内側の桁のバネ定数 $K_2 - K_5$ では、支承の並進機能が固定されている状態である $1 \times 10^{13} \text{ N/m}$ に頻度が偏っており、特に最も内側に位置する K_3, K_4 でその傾向が大きかった。点検データからは両外側の桁端部で最も腐食が少なく、

内側の桁ほど腐食がみられ固着の可能性が高いと把握されており，推定された事後分布はこのことと整合するものとなっている．このように一様分布であった事前分布から，頻度に偏りをもつ事後分布へとセンシングデータで不確実性が低減されることで，構造状態に関する考察を行うこともできる．一方，床版密度 D_c では事後分布でも事前分布範囲にほぼ一様に頻度が分布しており，不確実性のあまり低減されなかった．この構造パラメータ事後分布を用いて，次に対象橋梁への構造信頼性指標 β を導出する．

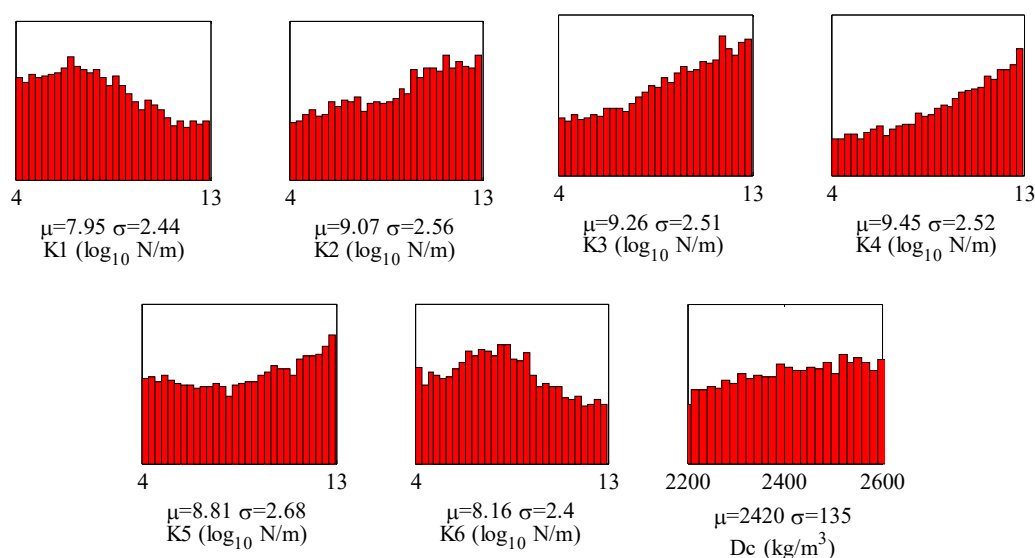


図 4-5-2. 事後分布推定結果

4-6. 対象橋梁の構造信頼性指標 β の導出

新設橋梁の設計時には設計基準に示されている項目に従って照査を実施するが，既存橋梁においてはその構造状態に応じて照査すべき性能を検討しなければならない．本検証の対象橋梁では支承部の腐食による固着傾向をセンシングデータである低次モードの固有振動数で捉え，その挙動を表すバネ定数について事後分布が得られ不確実性が低減できている．このときに考えられる活荷重応答への影響は桁端部付近での応力分布であり，限界状態として考えられるは鋼の降伏応力である．そこで本検証で照査する性能関数 Z では，設計活荷重に対する主桁端部領域における最大ミーゼス応力を作用 S とし，限界状態 R を鋼材の降伏応力とした．図 4-6-1 に，活荷重載荷時に示した全体変形と桁端部での応力分布を示す．

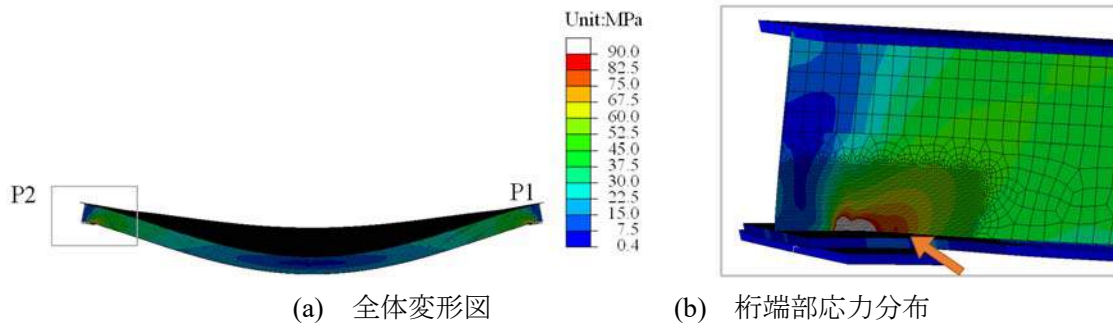


図 4-6-1. 活荷重載荷時のミーゼス応力分布

検証では比較のため、構造モデルパラメータの事前分布を用いた場合と、センシングデータで不確定性が低減している事後分布を用いた場合で、作用 S である最大応力分布をもとめた。支承バネ定数 K_1 – K_6 および床版密度 Dc の確率空間に対してラテン超方格法で 500 サンプルを作成し、各サンプルの構造パラメータを与えた数値モデルに道路橋示方書¹²⁾に示される活荷重分布（B 活荷重・L 荷重）を載荷して 6 主桁の桁端部に生じるミーゼス応力の最大値を抽出した。すると事前分布からのサンプルと事後分布からのサンプルでそれぞれ最大ミーゼス応力の分布が図 4-6-2(a)(b) のように得られた。これらの分布に 1 標本コルモゴロフ・スミルノフ検定を適用した結果、いずれの場合でも有意水準 1% で対数正規分布が適合すると判定できた。そこで事前分布、事後分布いずれのケースでもミーゼス応力分布の対数平均と対数標準偏差を荷重作用 S として、そして鋼材 SS400 の降伏応力の対数正規分布による統計データ³⁰⁾を耐力 R として、FOSM 法にて構造信頼性指標 β を導出した。対数正規分布での性能関数は次式(4-6-1)のように表せる。

$$Z = \ln \frac{R}{S} \quad (4-6-1)$$

ここで R と S が対数正規分布を示すとき、対数平均と対数標準偏差は平均と標準偏差を用いて次式のように表される。 X は R または S である。

$$\mu_{X(L)} = \ln \frac{\mu_X^2}{\sqrt{\sigma_X^2 + \mu_X^2}}, \quad \sigma_{X(L)} = \sqrt{\ln \left(\frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} \right) + 1} \quad (4-6-2)$$

ここで、 $\mu_{X(L)}$ と $\sigma_{X(L)}$ はそれぞれ $\ln X$ の平均と標準偏差であり、 μ_X と σ_X は X の平均と標準偏差である。そして性能関数 Z の平均と標準偏差は次のようになる。

$$\mu_Z = \mu_{R(L)} - \mu_{S(L)}, \quad \sigma_Z = \sigma_{R(L)} - \sigma_{S(L)} \quad (4-6-3)$$

そして、構造信頼性指標 β は次式(4-6-3)でもとめられる。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (4-6-4)$$

構造パラメータの確率分布に事前分布および事後分布を用いて得られた最大ミーゼス応力分布の対数平均と対数標準偏差はそれぞれ、 $\mu_S^{\text{Prior}}=18.79$ と $\mu_S^{\text{Post}}=18.80$ 、 $\sigma_S^{\text{Prior}}=0.20$ と $\sigma_S^{\text{Post}}=0.16$ であった。センシングデータを用いた不確定性の低減によって事後分布での標準偏差が小さくなったといえる。これらと耐力 R である鋼材降伏応力の対数平均 $\mu_R=19.52$ と対数標準偏差 $\sigma_R=0.081$ を式(4-

6-2)から式(4-6-4)に代入して β 値をもとめた。

その結果、事前分布で $\beta^{\text{Prior}}=3.44$ 、事後分布では $\beta^{\text{Post}}=3.94$ と得られた。これは、事後分布を用いて導出した性能のほうに限界状態に対して余裕があり、安全側の評価を示したこととなる。図 4-6-3 には、事前分布と事後分布それぞれのケースで求めたミーゼス応力の対数正規分布と限界状態である降伏応力の対数正規分布²⁰⁾を重ねて示した。事後分布のケースでは事前分布のケースに比べて対数平均値が若干降伏応力分布側に寄っているものの、分布形状の幅は若干小さくなっている。これは事後分布で標準偏差が小さくなっていることである。すると式(4-6-4)においても、事後分布の場合での標準偏差 σ_z が小さくなり、活荷重性能に対する β 値が向上したといえる。センシングデータを用いない事前分布の場合は、構造状態に関する情報が不確定で構造信頼性を危険側に見積もっていることになる。事前分布と事後分布での比較で後者が高い β 値を示したことは、既存橋梁の性能評価へのセンシングデータの貢献の 1 つの形を示せたと考えられる。

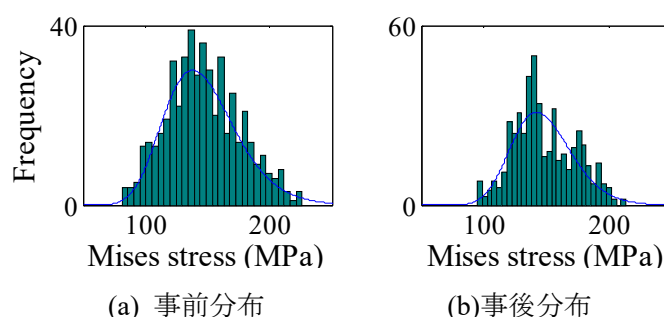


図 4-6-2. 桁端部の最大ミーゼス応力分布

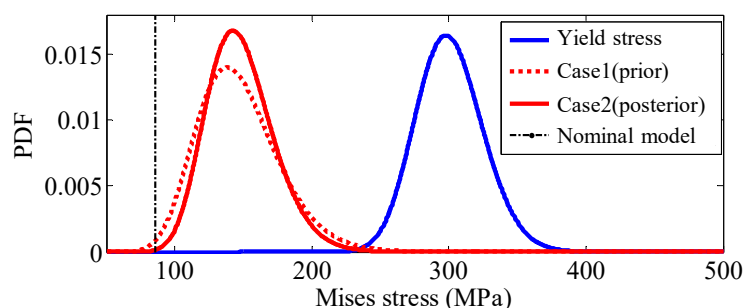


図 4-6-3. 確率密度関数の関係

4-7. 評価性能への感度に基づくセンシングデータの取得

以上に示したのは、対象とした橋梁に対する構造信頼性指標 β の個別の導出結果である。別の橋梁で同様のことを実施しても、事後分布の場合で β 値が高くなるとは限らないであろう。例えば、部材耐力が大きく低下するほどの損傷を有しており、それを構造パラメータの事後分布で適切に捉えられれば、 β 値は小さくなり性能低下を捉えることができる。このときに重要となるのが、4-4 項に述べた構造状態を表すモデルパラメータを考慮した既存橋梁のモデル化ができていないか、そして 4-5-1 項に述べたモデルパラメータのセンシングデータへの寄与度が高いか、という点である。

第 3 章では既存橋梁でもとめられる「性能」「機能」をまとめ、それらに対して適用できるセンシング手段をまとめた。本検証の対象橋梁は鋼鉄桁橋で、鋼製支承や主桁に腐食がみられたことか、桁

端部の耐荷機能（表 4-3-1）や支承の移動（表 4-3-2）機能に対する性能の評価を試みた。この場合は表に示されたように、主桁ウェブにひずみ計を貼り付けたり支承に変位計を設置したりして、挙動をセンシングすることが考えられる。一方で、加速度計測はセンサの設置が比較的容易であることもあり、本検証では固有振動数をセンシングデータとして用いた。すると図 4-5-1 に示した ANOVA の結果で、固有振動数に対して桁の境界条件である支承バネ定数の寄与度が高いが桁端部の部材板厚には寄与が低いことがわかり、主桁の腐食の影響を考慮した性能評価は行えていないことになる。構造状態と照査する応答に関連のあるモデルパラメータを把握したモデル化を行い、それに寄与するセンシングデータ取得しなければならないが、実橋梁計測作業ではさまざまな制約もある。桁端部の挙動については、次章で大綱橋の計測でそのデータ取得について検討を行っている。

§ 5. 横浜橋梁計測での計測概要

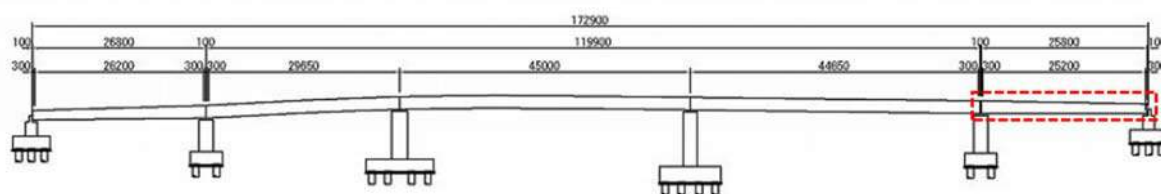
5-1. 計測目的

第3章で、支承等を対象して性能評価についてを提案した。本章は支承性能評価及びエクspansションジョイントのための実橋試験を紹介する。具体的な計測目的は以下に示している。

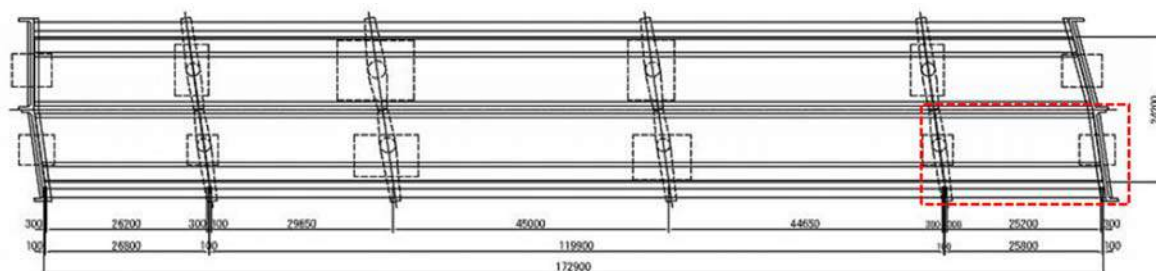
- ・ 金属支承の挙動を加速度計、変位計などによる計測と目視、モデル解析から明確にする。
- ・ エクspansションジョイントのクリアランスと段差による衝撃応答の同定。
- ・ 加速度計測に基づく変位ベースの簡易な通行車両重量分析方法について実験的に検討する

5-2. 対象橋梁と計測概要

対象橋梁は横浜市港北区鶴見川に設置している。1970年架設され、5径間下路式鋼床版鋼箱桁橋である（図5-2-1）。橋長172.9mで、幅員は10.25mである。点検記録より損傷度はcに判定され、主部材である橋台にひび割れ、橋脚に遊離石灰、沓座モルタルに剥離、欠損及びひび割れが認められるが、いずれの損傷も、直ちに橋梁の耐荷力に影響を及ぼす恐れはない。また、計測対象径間の一つ鋼製支承に脱落およびゆるみが認められた。損傷の原因は地震と推測しており、支承機能に障害が発生している。伸縮装置に支障機能の障害による段差等が発生していない為通行車両に支障はないが、応急補修として、橋軸方向に支承の過大变位を防ぐために木塊を差し込んでいた（図5-2-2、以下補修支承と呼ぶ）。



(a) 側面図（赤線枠は計測径間）



(b) 平面図（赤線枠は計測径間）



(c) 計測径間の写真

図 5-2-1. 対象橋梁



図 5-2-2. 補修した脱落鋼製支承

平成 28 年 9 月 5 日-21 日振動計測を行った。計測に使用する機器について、表 5-2-1 に示す。計測センサの設置レイアウトは図 5-2-4 に示す。加速度計は両面テープを用いて、主桁の下フランジに設置し、レーザー変位計と傾斜計はマグネットスタンドを使って、支承部に固定した(図 5-2-5)。

レーザー変位計と傾斜計は半日程度で計測され、下フランジ上および支承周辺の加速度計は 2 週間にわたり連続計測した。また、当日キャリブレーションのために 20 トン荷重車を走行させる。

表 5-2-1. 計測機器一覧表

No.	機器名称	サイズ	台数
1	無線加速度計ノード	100x80x50mm	16
2	レーザー変位計	100x80x80mm	6
3	傾斜計		4
4	応力聴診器		2

※、養生テープ、万力を利用する。



図 5-2-3. 無線加速度計ノード

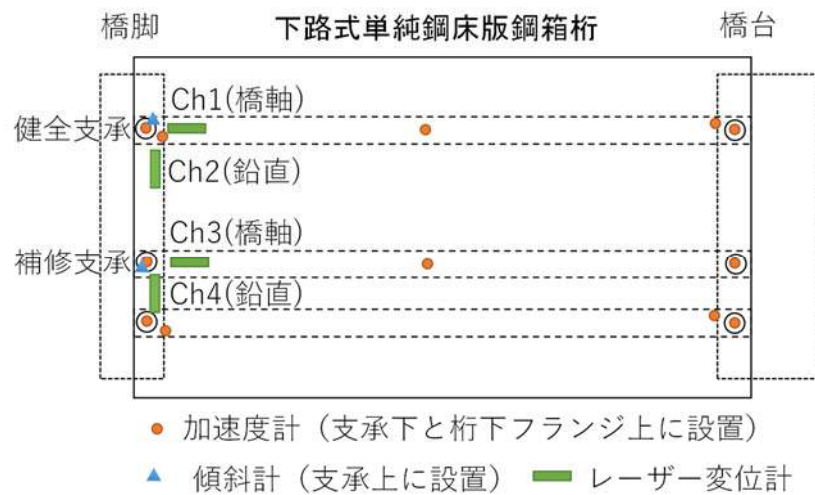


図 5-2-4. 計測センサ設置レイアウト

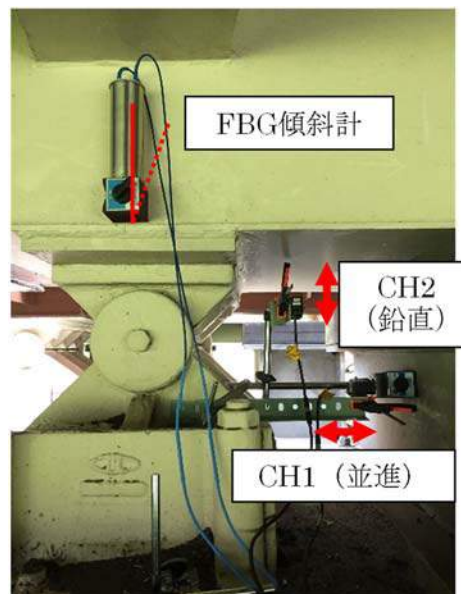


図 5-2-5. 支承部レーザー変位計と傾斜計の設置状況

5-3. 計測結果と考察

図 5-2-6 と図 5-2-7 に支承部設置された加速度計と変位計の結果一例を示している．変位計測において，橋軸の延ばす方向や鉛直の下向く方向は正方向である．

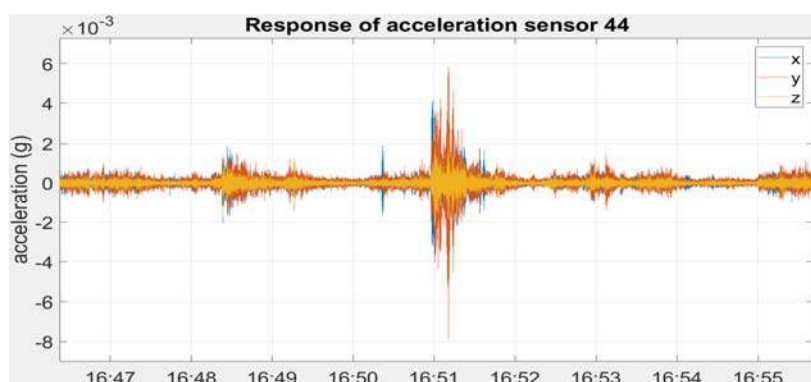


図 5-2-6. 支承部主桁の加速度計結果

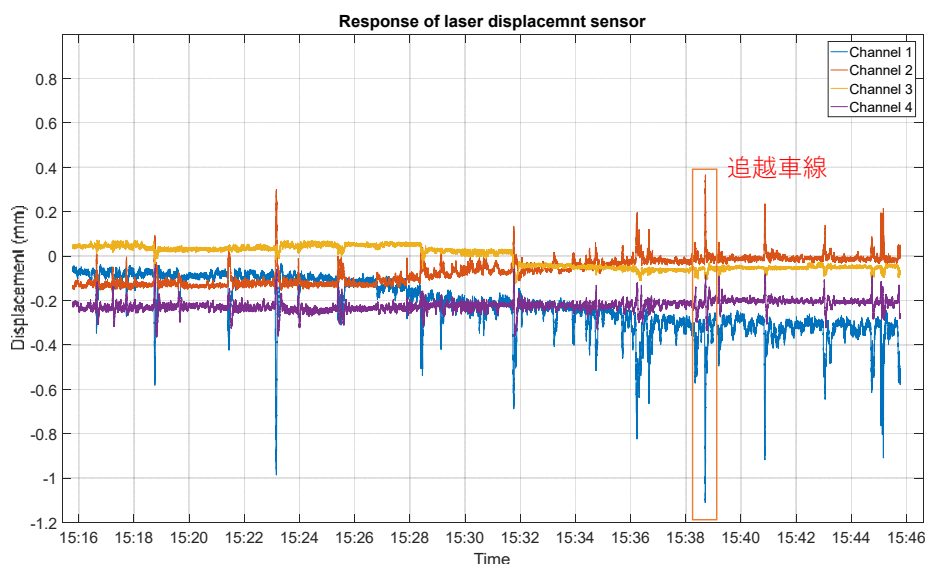


図 5-2-7. 支承部主桁の変位計結果

同じ橋脚に設置されている健全支承と補修支承を比較する．まず温度変化によって支承部の主桁変位を考察する．カットオフ周波数は 1×10^{-3} Hz のローパスフィルタリングによって分離され，図 5-2-8 に環境温度と両支承の橋軸変位応答を示している．温度が低下したら，主桁は収縮する傾向が見える．また，健全支承の方は温度変化に追従しているが，応急補修用の木塊は支承のすべりを防ぐため，補修支承はほぼ変位が発生しない．

次に荷重車通過時の応答を考察する．補修支承が支持している主桁は上下方向に変位する対して，他の主桁は下向きにのみ変位する（図 5-2-9(a)）．このような挙動は主桁端部の回転性能と関連する．図 5-2-9 (b) に示すように，補修支承の橋軸方向の変位がゼロに近い，すべり機能を制限している．通常時車両が単点支持の橋梁を通過する際，支承は撓動する．主桁が合わせて回転しており，下向き変位応答を観測される．一方，補修支承の場合，撓動できず，エネルギーは回転の

みによって消散され、上方及び下方の両方変位応答を観測され、平衡に達するまで継続する。両者の摺動メカニズムの差による、主桁端部の回転要求の増加が認識される。

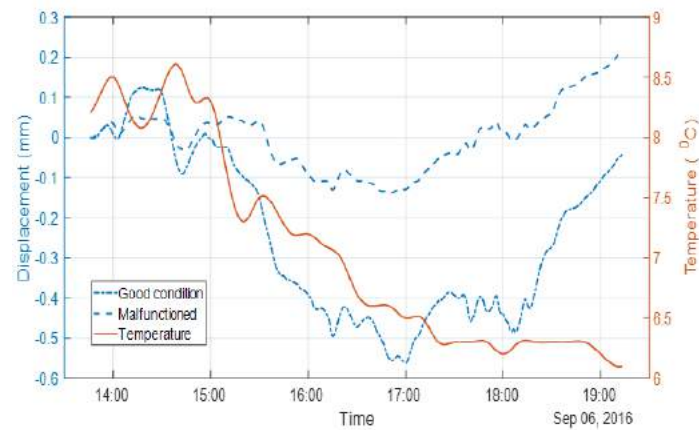
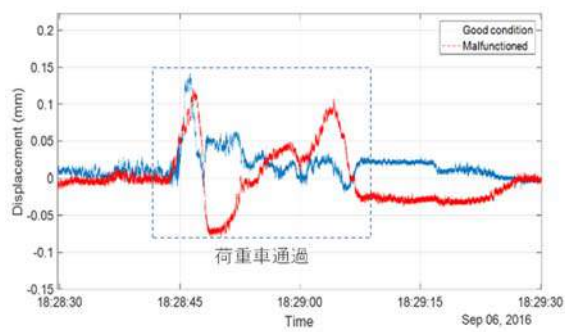
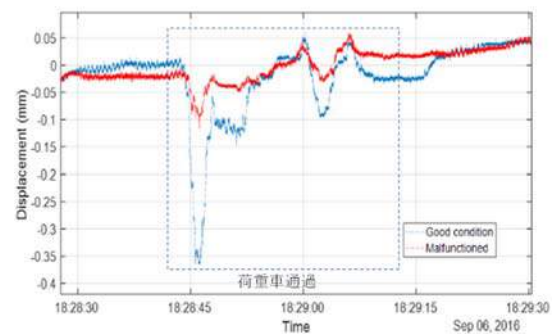


図 5-2-8. 支承部主桁の温度変位結果



(a) 鉛直方向



(b) 橋軸方向

図 5-2-9. 荷重車通過時の支承部の変位結果

参考文献

- 1) ISO 2394:2015, General principles on reliability for structures, 2015.
- 2) ISO 13822:2010, Bases for design of structures -- Assessment of existing structures, 2010.
- 3) Federal Highway Administration: National Bridge Inspection Standards, 2009.
- 4) AASHTO: Manual for Condition Evaluation of Bridges, 1994.
- 5) AASHTO: Guide Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Factor Rating (LRFR) of Highway Bridges, 2005.
- 6) Federal Highway Administration Policy Memorandum: Bridge Load Ratings for the National Bridge Inventory, 2006.
- 7) Gao Lubin: Load Rating Highway Bridges in the United States: The State of Practice, Structural Engineering International, 23(3), 2013.
- 8) Canadian Standards Association: CAN/CSA-S6-06, Canadian Highway Bridge Design Code, 2006.
- 9) Asutroads: Review of AS 5100.7 Rating of Existing Bridges and the Bridge Assessment Group Guidelines, 2014.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017.
- 11) 鋼橋技術研究会：最新センシング技術の適用に関する研究部会報告書，2014.
- 12) 藤林美早，西岡 勉，渡邊 武，入江康介：赤外線応力測定システムによる鋼道路橋に発生する応力測定，土木学会第 72 回年次学術講演会，I-358,2017.
- 13) 藤垣元治，原卓也，生駒昇，村田頼信：列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用，実験力学 12(3), 179-184, 2012.
- 14) 蘇迪，長山智則，孫震，藤野陽三：An interferometric radar for displacement test and its application in bridges，土木学会第 67 回年次学術講演会，CS8-003，2012.
- 15) M. F. Afzal, Y. Matsumoto, H. Nohmi, S. Sakai, D. Su., T. Nagayama: Comparison of Radar Based Displacement Measurement Systems with Conventional Systems in Vibration Measurements at a Cable Stayed Bridge, Proc. 11th German-Japan Bridge Symposium, Osaka, Japan, 2016.
- 16) 鈴木誠，長山智則，大原壮太郎，森川博之：同時送信型フラッドィングを利用した構造モニタリング，電子情報通信学会論文誌 B 100 (12), 952-960
- 17) 阿久津 絢子，佐々木 栄一，蛭沢 佑紀，田村 洋：低周波渦電流による鋼部材の腐食損傷状態分析，土木学会論文集 A1，73 (2) p. 387-398, 2017.
- 18) T. Mizutani, N. Nakamura, T. Yamaguchi, M. Tarumi, Y. Ando, and I. Hara : Bridge Slab Damage Detection by Signal Processing of UHF-Band Ground Penetrating Radar Data, JDR Vol.12 No.3 pp. 415-421, 2017.
- 19) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, 5th Edition, 2010.
- 20) AASHTO: Manual for Bridge Evaluation, Second Edition, 2011.
- 21) Naiyu Wang, Bruce R. Ellingwood, and Abdul-Hamid Zureick: Bridge Rating Using System Reliability Assessment. II: Improvements to Bridge Rating Practices, Journal of Bridge Engineering, 16(6), 863-871, 2011.
- 22) CAN/CSA-S6-06, Canadian Highway Bridge Design Code, Canadian Standards Association, 2006.

- 23) 長山智則:維持管理ニーズを踏まえたセンシング技術利用と開発, コンクリート工学, 52(9), pp. 802-806, 2014.
- 24) 杉山俊幸: 性能照査型設計法に基づく 橋梁設計の基礎知識と応用, civil-eye.com web セミナー.
- 25) 黒田璃紗, 西尾真由子, “既存鋼鉄桁橋のモデルパラメータ事後分布を用いた信頼性評価,” 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.3, pp.380-392, 2016.
- 26) P.トフークリステンセン, M.J.ベーカー, 室津義定 (監訳): 構造信頼性—理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1986.
- 27) 村越潤, 清水英樹, 有馬敬育: 鋼 I 桁橋の信頼性指標 β の評価と部分係数に関する基礎検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.914-925, 2007.
- 28) 下里哲弘, 有住康則, 押川渡, 小野秀一, 玉城喜章: 鋼橋の腐食劣化メカニズムの解明と耐久性診断に関する研究, 道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート, No.21-5, 2012.
- 29) Higdon, D., Gattiker, J., Williams, B., Rightley, M.: Computer Model Calibration Using High-Dimensional Output, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 103, pp. 570-583, 2008.
- 30) 奈良敬, 中村聖三, 安波博通, 川端文丸, 塩飽豊明: 橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp. 299-310, 2004.

2. 荷重評価WG 調査研究報告書

活荷重評価とセンシング技術に関する研究

荷重評価 WG メンバー

WG 長	佐々木 栄一	東京工業大学
部会員	佐藤 豪	JFE エンジニアリング (株)
〃	田代 大樹	大日本コンサルタント (株)
〃	増田 和裕	川田テクノシステム (株)
〃	古川 聖	(株) 横河ブリッジ

荷重評価 WG 目次

はじめに	2-1
§ 1 活荷重評価に関するレビュー	2-2
§ 2 活荷重分析の考え方、ばらつきの要因	2-31
2-1 活荷重の分析方法	2-31
2-2 影響線ベースによる分析方法のフロー	2-35
2-3 ばらつきの要因	2-40
§ 3 加速度計測に基づく変位ベースの B-WIM 手法に関する実験的検討	2-42
3-1 実験の概要	2-42
3-2 加速度計測結果からの変位への変換手法の検討	2-47
3-3 変位挙動に関するまとめ	2-52
3-4 変位ベースの B-WIM に関する検討	2-55
3-5 Excel による B-WIM	2-60
§ 4 簡易な B-WIM に関する検討	2-77
4-1 キャリブレーションフリーの B-WIM	2-77
4-2 発電に着目した荷重評価の可能性	2-80

はじめに

WG2（荷重評価 WG）においては、実荷重と設計荷重の違いを Bridge - Weigh - In - Motion（B-WIM）などのセンシング技術を利用して評価することを目標として、以下のような活動を行った。すなわち、これまでの B-WIM 技術のレビューを行い、現状や課題、ばらつきの要因等について整理するとともに、簡易な計測による B-WIM 技術の確立のため、加速度計測に基づく B-WIM 技術について具体的に実験により検討を実施した。また、より B-WIM 技術における計測を簡易にするためのキャリブレーションフリーに向けた検討や、発電デバイス適用による発電量ベースの方法等に関しても議論を行った。ここでは、検討の結果を報告書としてまとめる。

【WG2（荷重評価 WG）の活動内容】

- 1) 既往の B-WIM 技術・適用事例に基づき、センシングを利用した活荷重分析の考え方を整理する。
- 2) センシングに基づく活荷重評価結果の精度・ばらつきについて要因と影響の程度を検討する。
- 3) 加速度計などの計測データに基づく、B-WIM の手法を提案し、適用性について検討する。
- 4) 簡易な活荷重評価方法について考え方を整理するとともに、手法について提案を行う。

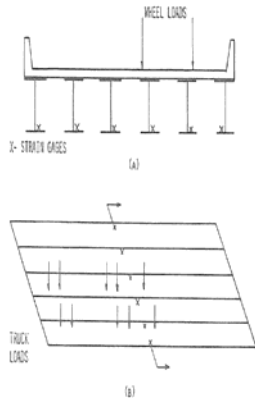
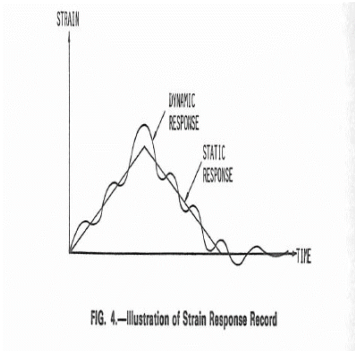
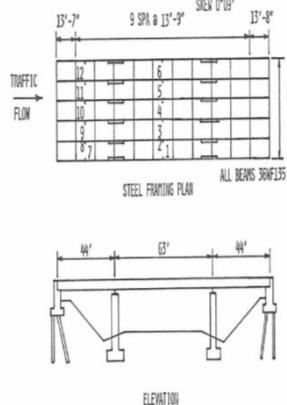
§ 1 活荷重評価に関するレビュー

既往の B・WIM 技術・適用事例について，活荷重分析の考え方等を整理するため，我が国での検討を中心にレビューを実施した．表 1-1-1 にレビュー対象とした文献等の一覧を示す．各文献についてレビューフォーマットを用いて，概要をまとめることを行った．

表 1-1-1 レビュー対象文献等リスト

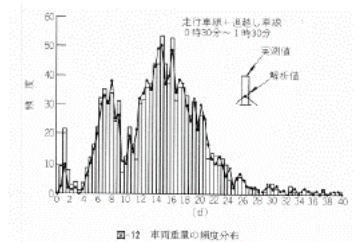
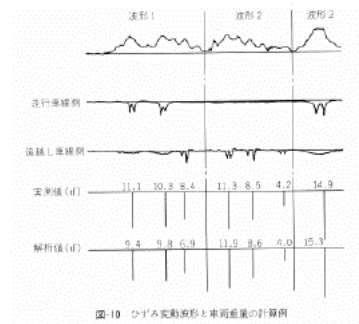
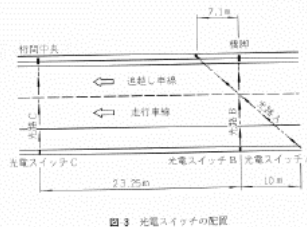
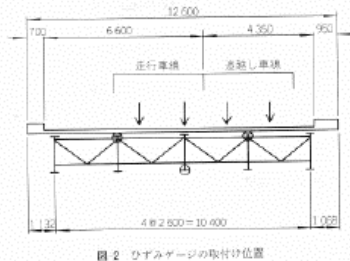
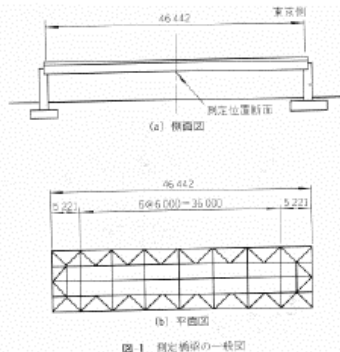
文献 番号	論文名	著者							発表年 登録年	掲載誌
		1	2	3	4	5	6	7		
1	Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridges	F. Moses							1979	ASCE Transportation Engineering Journal, pp. 233-249
2	走行車両の重量測定	三木 千壽	村越 潤	米田 利博	吉村 洋司				1987.4.	橋梁と基礎, Vol.21, No.4, pp.41-45
3	RC床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究	松井 繁之	Ahmed EL-HAKIM						1989	構造工学論文集, Vol.35-2, pp. 407-418
4	鋼床版部材を用いた走行車輛の輪重推定	小塩 達也	山田 健太郎	貝沼 重信	小幡 敏幸	古市 亨			1998	構造工学論文集, Vol.44A, pp. 1141-1151
5	鋼桁橋の縦荷を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発	小塩 達也	山田 健太郎	小林 直人	水野 良浩				2001	構造工学論文集, Vol.47, pp.1083-1091
6	BWIMによる大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価	小塩 達也	山田 健太郎	深津 伸					2002	構造工学論文集, Vol.48A, pp. 1055-1062
7	支点反力によるBWIMを用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析	小塩 達也	山田 健太郎	若尾 政克	因田 智博				2003	構造工学論文集, Vol.49A, pp.743-753
8	橋梁部材の影響面積を用いた走行車両の重量推定に関する研究	小塩 達也	山田 健太郎	新海 英昌	矢島 正美	水野 良浩			1999	土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.54, pp. 456-457
9	光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発	三木 千壽	水ノ上 俊雄	小林 裕介					2001.9.	土木学会論文集, No.686/VI-52, pp. 31-40
10	リアルタイム全自動処理Weigh-In-Motionによる長期交通荷重モニタリング	小林 裕介	三木 千壽	田辺 篤史					2004	土木学会論文集 第772号/I-69, pp.99-111
11	2径間連続鋼桁橋を用いたBWIMの精度	山口 栄輝	松尾 一志	河村 進一	小林 裕介	森 昌文	百田 国廣	西之原 達志	2004	応用力学論文集, Vol.7, pp.1135-1140
12	FBG光ファイバセンサによるWeigh-In-Motionシステムの構築	小林 裕介	三木 千壽	佐々木 栄一					2003	応用力学論文集, Vol.6, pp.1009-1016
13	鋼床版の疲労へのSFRC舗装による予防補強とその健全性モニタリング	三木 千壽	鈴木 啓悟	加納 隆史	佐々木 栄一	石田 稔	高森 博之		2006	土木学会論文集A, Vol. 62, No. 4, pp.950-963
14	影響線の重ね合わせを用いたWIMシステムについて	石尾 真理	中谷 昌一	玉越 隆史	中洲 啓太				2002	土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.57, pp. 1447-1448
15	多様な橋梁条件に対するWIMの適用性に関する調査	石尾 真理	中谷 昌一	玉越 隆史	中洲 啓太				2003	土木学会年次学術講演会講演概要集第1部, Vol.58, pp. 799-800
16	GAを適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究	米田 昌弘	枝元 勝哉						2003	構造工学論文集II, Vol.49, pp.755-765
17	遺伝的アルゴリズムを適用したBridge Weigh-in-Motionシステム	米田 昌弘	枝元 勝哉						2004	構造工学論文集II, Vol.50, pp.707-718
18	影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用	坂柳 皓文	佐々木 栄一	チャンベン・ティーラボン	鈴木 啓悟	石川 裕治	山田 均	勝地 弘	2008	構造工学論文集, pp.582-589
19	大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察	石尾 真理	中谷 昌一	玉越 隆史	中洲 啓太				2004	土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.59, 1-562, pp1121-1122
20	鋼桁橋の垂直補剛材ひずみを用いたBWIM	山口 栄輝	内藤 靖	松尾 一志	松木 勇太	高木 良久	河村 進一		2010	土木学会論文集F, Vol.66, No.2, pp.251-260
21	鋼床版における通行車両軸重算出手法	鈴木 啓悟	吉川 将大						2013	土木学会論文集A2, Vol. 69, No. 2, pp.1761-1768
22	交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム	鈴木 啓悟	佐々木 栄一	三木 千壽	山田 均	高岡 愛	宮崎 早苗		2008	応用力学論文集, Vol.11, pp.997-1004
23	道路橋の交通特性評価手法に関する研究	玉越 隆史	中洲 啓太	石尾 真理	中谷 昌一				2004	国土技術政策総合研究所資料 第188号
24	制御理論を用いたWeigh-In-Motionに関する基礎的検討	鈴木 健吾	丸山 収	関屋 英彦	小西 拓洋	三木 千壽			2016	土木学会論文集A2, Vol. 72, No. 2, pp.145-151
25	橋梁の活荷重応答計測に必要なS/N比に関する研究	関屋 英彦	木村 健太郎	丸山 収	三木 千壽				2016	構造工学論文集, Vol.62A pp.174-184
26	橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案	関屋 英彦	横関 耕一	木村 健太郎	小西 拓洋	三木 千壽			2016	土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 1, pp.61-74
27	MEMS加速度センサを用いた変位計測に基づくPortable-Weigh-In-Motionシステムの提案	関屋 英彦	小西 拓洋	木ノ本 剛	三木 千壽				2016	土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 3, pp.364-379

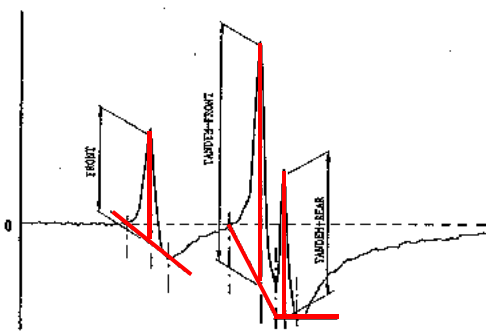
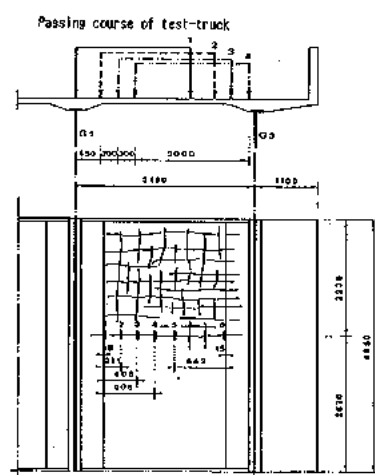
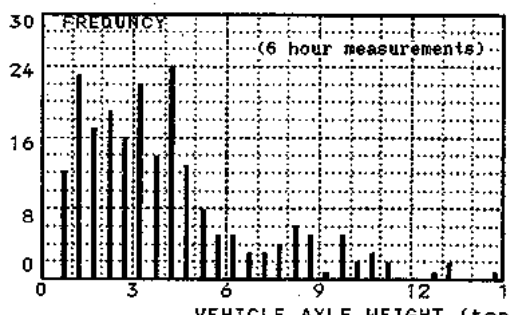
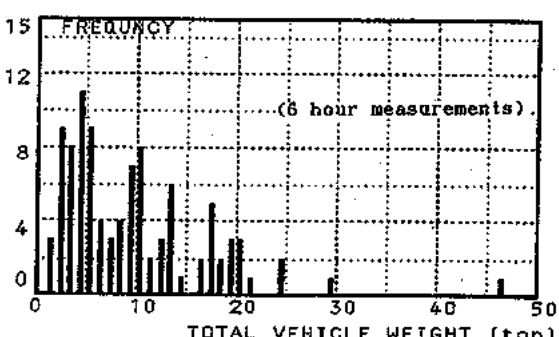
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

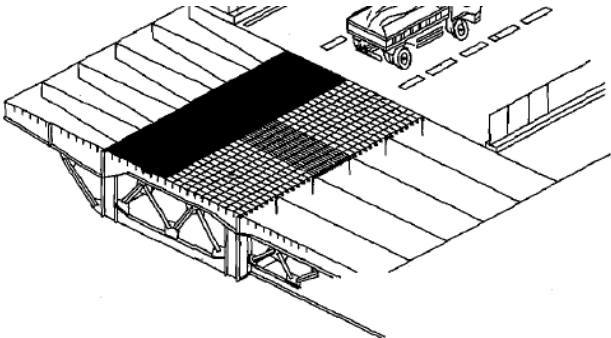
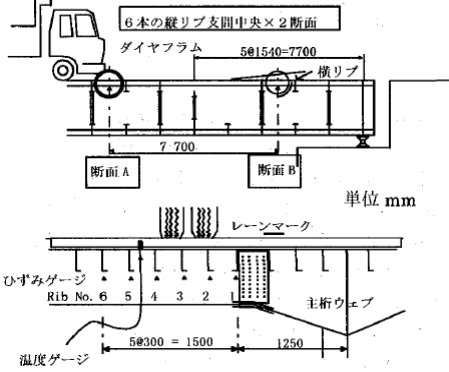
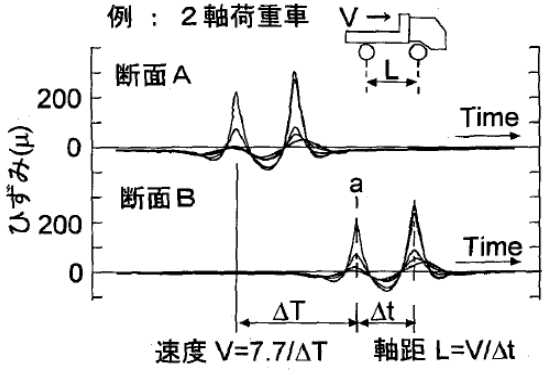
文献番号	1	発表年	1979			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	車両重量推定	軸重	車重	ひずみ	Trafficセンサ	
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridges, ASCE Transportation Engineering Journal, pp. 233-249					
著者名	F. Moses					
概要	橋梁や舗装のメンテナンスのため、トラック軸重および車重は重要な情報である。本論文では、道路橋梁に設置された交通センサとひずみゲージを用いて軸重および車重を取得するシステムについて述べている。結果として、キャリブレーション用のトラックや任意交通を対象として分析したところ、トラック総重量および軸重はよく推定できているという報告である。					
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	ひずみゲージ	Trafficセンサ				
センサ設置位置	下フランジ上面					
分析方法	本論文では、重量推定アルゴリズムが記述されている。橋梁応答の動的成分をフィルターにより除去し、最小二乗法により等価な静的輪重を得る。ここでは、システムに自己平衡型信号処理装置、磁気テープ装置、AD変換機、および現場データを磁気テープに記録するためのミニコンピュータを利用している。出力はそのあとデジタルコンピュータに移される。3径間連続のケースについても示している。 この論文では、さらに、継続的なWeigh-in-Motionデータの取得や現地での荷重データ取得のための改善点についても述べている。    FIG. 3.—Arrangement of Strain Gages in Typical Instrumented Bridge: (a) Midspan Elevation; (b) Plan View FIG. 4.—Illustration of Strain Response Record FIG. 8.—Schematic of Bridge Layout and Strain Gage Locations on Test Span 1-271 near Cleveland, Ohio					
特長	WIMの概念を最初に提案した内容である。					
課題						
その他メモ						

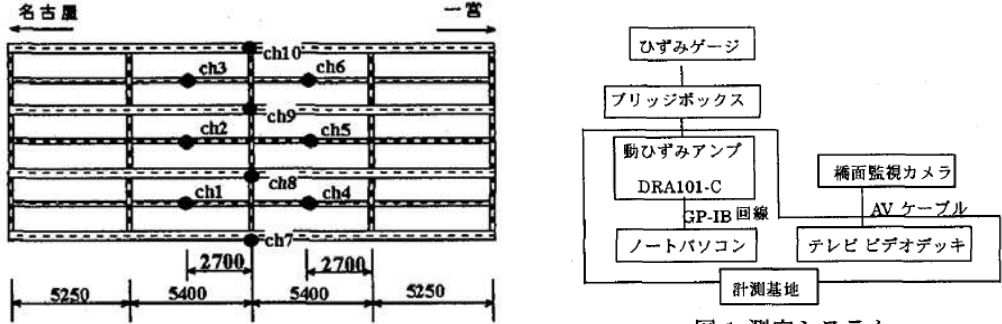
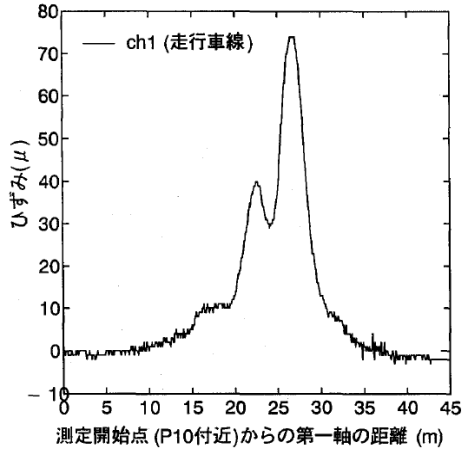
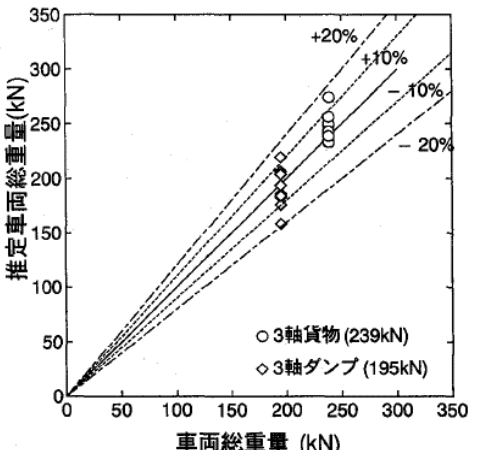
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

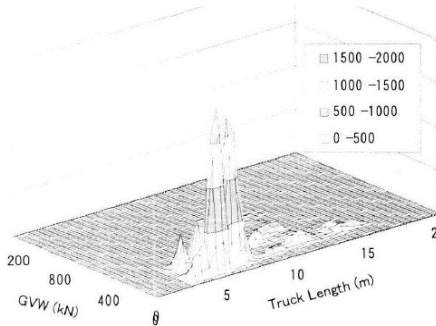
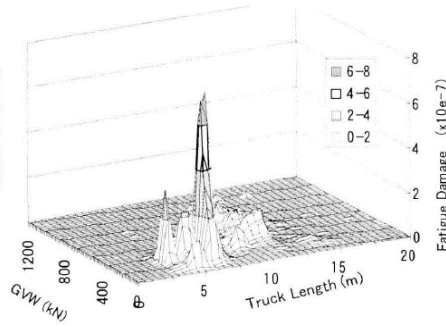
文献番号	2	発表年	1987			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	車両重量測定	ひずみゲージ	光電スイッチ	車両重量頻度分布		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	走行車両の重量測定, 橋梁と基礎, Vol. 21, pp. 41-45					
著者名	三木千壽, 米田利博, 村越潤, 吉村洋司					
概要	本論文は、ひずみゲージによる応力測定と、簡便な走行車判別装置（光電スイッチ）から得られる交通流のデータを元にして、走行車両の重量解析を試みている。 測定橋梁は東名高速道路の片山高架橋であり、ひずみゲージの取り付け位置を図1, 2, 光電スイッチの設置位置を図3に示す。各計測データは図7のように使用している。 図10はひずみ変動波形と車両重量の計算例であるが、実測値（軸重計）と解析値を比較すると、本解析法が実用上十分な精度を持つことを確認している。波形1は走行車線および追越し車線に複数台の車両が同時に橋上を走行しているが、妥当な結果が得られている。 車両重量頻度分布（図12）について、実測値と解析値とで、車両数2.0%、重量の平均値2.3%、重量の3乗平均値0.6%の誤差が見られたが、本線軸重計の精度から考えて十分に良好な値である。					
対象橋梁	RC床版桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ	光電スイッチ				
センサ設置位置	下フランジ下面	垂直補剛材上端部				
分析方法	重量測定の基本原理はMosesによって提案されている方法とほぼ同じである。					
特長	各種の目的でしばしば実施されるような通常の応力測定に若干工夫をすることにより車両重量を得ようとするもの。測定箇所近傍に軸重計があり、それと比較して、妥当性を示している。					
課題	本論文では桁橋で実験したが、測定されるひずみは構造形式によって異なる。ほかの構造形式でも車両重量の測定に適しているか、調査する必要がある。 影響線の計算は対象とする橋梁の構造解析から求めることができるが、種々の計算上の仮定から実際の橋梁の影響線と必ずしも一致しない。さらに車両が高速で走行しながら通過するので、ひずみの変更には動的な効果が含まれる。よって、試験車から影響線をキャリブレーションしている。構造解析で得られる影響線の形状との違い、動的効果の取り扱いおよび解析への影響について調べる必要がある。					
その他メモ						



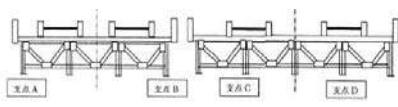
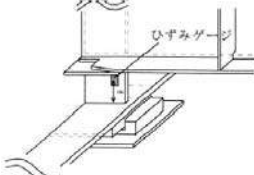
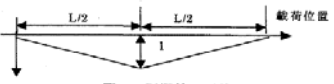
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	3	発表年	1989			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	輪荷重	RC床版	ひびわれ開閉量			
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	RC床版のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 407-418, 1989. 3					
著者名	松井 繁之, Ahmed EL-HAKIM					
概要	本論文はRC床版の主鉄筋方向のひびわれ開閉量に着目し, 軸重の算出方法を提案するものである. 実橋での現場計測結果についても報告されている. RC床版下面の主鉄筋方向のひびわれ開閉量は, 影響を受ける範囲が非常に狭いため, タンデム軸の2軸に対応したほぼ独立した応答が得られる. この応答は, 床版作用による板曲げひずみと, 桁の上フランジとしての軸圧縮ひずみの成分からなるが, 測定した応答波形から板曲げひずみのみを取り出す簡便な方法が提示されている. 現場計測: 谷町高架橋(大阪市内の主要幹線道路上) 橋梁諸元: 単純合成3主鉄桁, 支間長20m, 主桁間隔3.15m, 2車線					
対象橋梁	鉄桁	RC床版				
使用センサ	ひずみゲージ(パイゲージ)					
センサ設置位置	床版下面					
分析方法	1) 橋軸直角方向に6箇所パイゲージを設置し, ひびわれ開閉量を測定する (Fig. (5)). 2) 測定値から板曲げ成分だけを取り出す方法はFig(12)の通り. タンデム軸が1.3m程度(後輪タンデム車の標準)の場合, 軸に対応した読みとり方を工夫している. 3) 橋軸直角方向の走行位置を推定するため, あらかじめ試験車で走行位置を変えた測定をしておき, 影響線を算出しておく. 4) 走行位置と軸重をパラメータにし, 6箇所の測定位置に対応する推定値を算出する. 5) 最小自乗法により測定値との誤差を小さくする走行位置と軸重の値を算出する. 6) 走行車両の形式(何軸車か?など)はビデオで確認していると思われる.					
						
						
特長	タンデム軸の分離に成功している.					
課題	現行設計荷重より大きい軸重を持つトラックが測定されており, 今後とも自動車荷重の測定を進めていく必要がある.					
その他メモ						

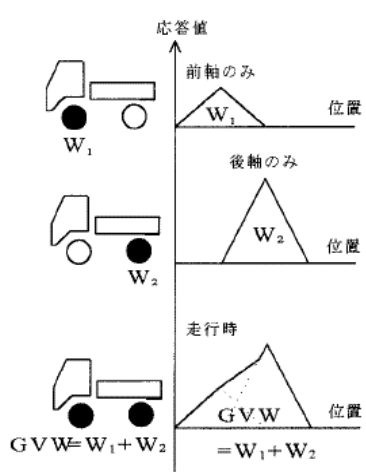
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	4	発表年	1998			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	鋼床版	温度補正	軸重計測			
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼床版部材を用いた走行車両の輪重推定, 構造工学論文集 Vol. 44A, pp. 1141-1151, 1998. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/1998/44-A3-1141.pdf					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 貝沼重信, 小幡敏幸, 古市亨					
概要	<目的> 鋼床版の縦リブに着目し, 自動車走行時のひずみ波形を測定, これを解析することで走行車両の速度, 輪重, 軸距などの荷重状態を測定し, 交通荷重の実態を把握するシステムの構築を行った. <測定位置> 主桁系応力成分を除去するために, 主桁曲げモーメントの小さい桁端部に近い床版パネルとし, 車両のジョイント通過による衝撃が少ないと考えられる橋梁の出口側端部とした. また測定を離れた2断面で行い, ピーク発生の時間差により走行速度を推定した.  図 4 有限要素モデルと実構造					
対象橋梁	鋼床版					
使用センサ	溶接ひずみゲージ	温度ゲージ (アスファルト舗装)				
センサ設置位置	縦リブ下面					
分析方法	縦リブ曲げ応力の影響面を求めるため, 鋼床版主桁ウェブ間5.5m, ダイアフラム間7.7mの鋼床版パネルを有限要素法プログラム上でモデル化し, デッキプレート上の各節点に単位荷重を載荷し, 着目するリブの応力影響面を作成した. 測定した2断面の時間差から軸間距離を測定, 大型自動車のカタログ値を参考にして車種を推定した. 輪重値は, 計測した6本のリブのうち最も大きいピークを示したリブでの測定値と, 推定した走行位置, タイヤ形状で輪重が1tonfとしたときの解析応力値との比を基に推定する.  図 2 ひずみゲージ貼付位置  図 6 2 軸荷重車による波形の例					
特長	鋼床版縦リブのひずみを計測することで軸重を計算している. 荷重車による動的載荷試験, 静的載荷試験を行うことで, キャリブレーションの精度を向上させている.					
課題	荷重車の測定結果に基づくキャリブレーションを一般車両の測定と平行して多数行うことで, 載荷速度やアスファルト温度などに応じた補正も可能である.					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	5	発表年	2001			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	応答波形積分	車両総重量				
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1083-1091, 2001. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2001/47-A3-1083.pdf					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 小林直人, 水野良浩					
概要	<目的> 重量検出部材を鋼プレートガーダー橋とし, 簡易に設置・計測ができる交通荷重のモニタリング手法を開発した. また, 複数橋梁で荷重車によるキャリブレーションを行い, 推定の精度を把握した.					
	 図 1 測定システム					
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ					
センサ設置位置	増設縦桁下フランジ	主桁支間中央下フランジ (参考)				
分析方法	部材応答波形の積分値を用いて車両総重量を推定する. 増設縦桁を重量検出部材とする. 縦桁が主として真上を走行する荷重にのみ応答するため, 橋面上の同時載荷による影響が少ないと考えられるため. 荷重車を走行させ, 各測定点の応答波形を測定して単位重量当たりの影響面積を求める. 荷重車で求めた単位車両総重量当たりの影響面積を平均してキャリブレーション値とする.					
	 図 5 ひずみ波形の例 (枇杷島高架橋, 3 軸ダンプ走行時)  図 6 車両総重量の推定精度 (亀山大橋 : 大阪行き)					
特長	増設縦桁をはかりとして, ひずみ応答の積分値を用いて, 車両総重量, 通過速度, 最速軸距を求めている.					
課題	測定点を出口側端部の縦桁として実証実験を行い, 推定精度を向上させる.					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	6	発表年	2002			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	疲労損傷度分析					
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	BWIMによる大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1055-1062, 2002. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2002/48A-2-1055.pdf					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 深津伸					
概要	鋼 I 桁橋の縦桁を利用したBWIMシステムを用いて, 実橋梁で荷重モニタリングを実施. 車両毎の縦桁の疲労損傷度を計算し, 車両の種類や積載状態が道路橋の疲労損傷にどのような影響を与えるか分析した. (分析方法は, 「鋼 I 桁橋の縦桁を用いたBridge Weigh-in-Motionシステムの開発」で用いたもの) 車両総重量, 最遠軸距と疲労損傷度の分布から予想し, 疲労損傷への寄与率が高い自動車の形態と, その車種に対応するおおよその制限値を割り出した. 制限値以上に積載した過積載の車両群が疲労損傷のおよそ半分をもたらしていると考えられる.					
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ					
センサ設置位置	下フランジ下面					
分析方法	変動応力を受ける継手の疲労損傷度は次式で表される. $D = \sum (n_i / N_i)$ ここに, n_i : 構造物が受けた応力範囲 σ_i の頻度 N_i : 疲労設計曲線より与えられる σ_i に対応する一定振幅応力での疲労寿命 縦桁の疲労強度として, 縦桁のウェブとフランジの溶接部分の損傷を想定し, 日本鋼構造協会の疲労設計指針に設定されているD等級 (200万回疲労強度:100MPa) を用いた.   図 18 最遠軸距, 車両総重量と台数分布 図 19 最遠軸距, 車両総重量と疲労損傷度分布					
特長	BWIMで測定した車両総重量から, 橋梁に与える疲労損傷度を分析している.					
課題						
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	7	発表年	2003																			
分類	WIM分析方法	WIM事例																				
キーワード	疲労損傷度分析	支点反力																				
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他																
特許等	特許申請	特許番号	実用新案																			
文献名	支点反力によるBWIMを用いた自動車軸重調査と荷重特性の分析, 構造力学論文集, Vol. 49A, pp. 743-753, 2003. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00127/2003/49-A2-0743.pdf																					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 若尾政克, 因田智博																					
概要	本研究は、プレートガーダー橋の支点反力に着目し、単一の測定点から軸重の通過の検出と軸重の推定を行う。また、一般車両の軸重測定結果から、車両荷重の統計と構造物の疲労を考慮した加重特性の分析を行う。支点反力を直接計測するのは困難であるため、端部垂直補剛材に生じるひずみを測定する。既知荷重を持つ荷重車の軸重とひずみ量を比較し、橋梁上の軸重とひずみの関係を求めてキャリブレーションを行う。また、荷重特性と疲労損傷度の影響をマイナーの累積被害則に基づいて分析している。  4主桁橋 5主桁橋 図3 4主桁, 5主桁の橋梁の測定例  図4 端部垂直補剛材へのひずみゲージ貼付位置																					
対象橋梁	桁橋																					
使用センサ	溶接ひずみゲージ																					
センサ設置位置	桁端垂直補剛材																					
分析方法	マイナーの示した累積被害則によれば、変動応力を受ける継手の疲労損傷度は次式で与えられる¹⁾。 $D = \sum (n_i / N_i) \quad (1)$ ここに、 n_i: 構造物が受けた応力範囲 σ_i の頻度 N_i: 疲労設計曲線より与えられる σ_i に対応する一定振幅応力での疲労寿命 また、作用応力範囲と破断回数の関係は、 $\Delta\sigma^m \cdot N_f = \text{一定} \quad (2)$ であたえられることが多い¹⁴⁾。応力範囲の m 乗に反比例して破断回数が決まるということは、(1)式の各項の疲労損傷度は、応力の m 乗に比例する。このことから、疲労損傷と荷重の関係は、鋼部材の場合は3乗則($m=3$)、アスファルト舗装の場合は4乗則($m=4$)などと呼ばれている¹⁴⁾。 橋梁上の走行荷重と部材への繰り返し荷重の関係は、影響線の長さ、形状が大きく関連し、部材によっては軸重ごとの繰り返しを受けるもの、隣接軸重群(タンデム軸など)ごとに繰り返しを受けるもの、車両ごとに繰り返しを受けるものなどがある。 本研究では、影響線の長ささと損傷の「べき乗則」のみを考慮した車両ごとの相対的な疲労損傷度を計算し、車種、積載状態などで分類した車両群がトータルの疲労損傷度に対してどのような寄与率を持つかを比較する。 まず、縦距の最大値を1とした無次元量の影響線を仮定する。測定された荷重群を影響線に載荷して荷重の変動波形を求め、波形に対してレインフロー計数法により荷重範囲を計数する。荷重範囲から次式で定義される疲労損傷指標を計算する。 $\text{疲労損傷指標 } DI = \sum W^m n \quad (3)$ W: 荷重範囲 n: 繰り返し数 m: べき指数 m は式(2)における m で、作用繰り返し荷重 (S) と破断回数 (N) の関係を示す S-N 線図の片対数紙上の傾きである。疲労損傷指標 DI に対し、影響線縦距(応力/荷重)および疲労強度(S-N 線図)が得られれば、マイナー則により DI から疲労損傷度 D が次式(4)で計算できる。なお、ここでは影響線上への複数車両の同時載荷は考慮していない。 $D = \frac{DI \cdot \left(\frac{\sigma}{W'} \right)^m}{\sigma^m N} \quad (4)$ 影響線の形状は図25のように単純桁のスパン中央曲げモーメントの影響線を仮定した。 照査対象とした部材と影響線長等を表1に示す。べき指数3を用いる鋼部材の疲労について、フィンガージョイント、床版部材(縦桁等)に対応する短い影響線から、主桁など長いものまでを対象とした。また、鋼部材のほか、アスファルト舗装、鉄筋コンクリート床版¹⁰⁾も想定し、べき指数を設定した。 <table><caption>表1 照査の対象部材と影響線長, 重み指数</caption><thead><tr><th>べき指数 m</th><th>影響線長 L(m)</th><th>対象部材</th></tr></thead><tbody><tr><td rowspan="3">3</td><td>0.4</td><td>フィンガージョイント</td></tr><tr><td>2, 5</td><td>床版部材(縦桁等)</td></tr><tr><td>10, 20 30, 60</td><td>主桁など</td></tr><tr><td>4</td><td>0.4, 2.0</td><td>アスファルト舗装</td></tr><tr><td>12</td><td>0.4, 2.0</td><td>鉄筋コンクリート床版</td></tr></tbody></table>  図25 影響線の形状						べき指数 m	影響線長 L(m)	対象部材	3	0.4	フィンガージョイント	2, 5	床版部材(縦桁等)	10, 20 30, 60	主桁など	4	0.4, 2.0	アスファルト舗装	12	0.4, 2.0	鉄筋コンクリート床版
べき指数 m	影響線長 L(m)	対象部材																				
3	0.4	フィンガージョイント																				
	2, 5	床版部材(縦桁等)																				
	10, 20 30, 60	主桁など																				
4	0.4, 2.0	アスファルト舗装																				
12	0.4, 2.0	鉄筋コンクリート床版																				
特長	通過時刻の検出と軸重推定をひとつの測定点で同時にでき、分離計算も必要なく、測定が簡便である。主桁の配置によっては、隣り合う車線の影響を無視でき、各々の車線の軸重に対して独立した軸重の測定が可能である。																					
課題	極端に荷重の大きい車両の有無によって疲労損傷の大きさが影響を受けるため、疲労劣化予測を行うには、発生確率の少ない特殊な荷重についても考慮する必要がある。																					
その他メモ																						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	8	発表年	1999			
分類	WIM分析方法					
キーワード	応答波形積分	車両総重量				
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	橋梁部材の影響面積を用いた走行車両の重量推定に関する研究, 土木学会第54回年次学術講演会, 1999. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/1999/54-1A/54-1A-0456.pdf					
著者名	小塩達也, 山田健太郎, 新海英昌, 矢島正美, 水野良浩					
概要	No.6「鋼I桁橋の縦桁を用いたBridge Weigh-in-Motionシステムの開発」で用いられている理論の紹介. 部材応答波形の積分値を用いて車両総重量を推定する.					
対象橋梁	下路ワーレントラス					
使用センサ						
センサ設置位置	垂直材	縦桁				
分析方法	2. 推定理論 橋面上を走行する荷重によって橋梁部材に生じる応答波形 R は、影響線 $y = f(x)$ の線形和で表示できる。 N 軸のトラックが橋面上を走行する場合、先頭軸の位置を x、先頭軸から各軸までの距離を X_n、各軸の軸重を W_n とすれば、載荷位置の関数で表示した応答波形は各軸による影響線の和として以下のように表される。 $R = \sum_{n=1}^N W_n \cdot f(x - X_n) \quad (1)$ R の積分値を応答波形の影響面積 A と定義する。 $A = \int_{-\infty}^{+\infty} R \, dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\sum_{n=1}^N W_n \cdot f(x - X_n) \right] dx \quad (2)$ この式は次式のように変形できる。 $A = \sum_{n=1}^N \left[W_n \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x - X_n) \, dx \right]$ $= \sum_{n=1}^N W_n \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \, dx = GVW \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \, dx \quad (3)$  図1 影響面積と総重量					
特長	部材の応答波形の積分値を用いて、車両総重量を推定している。 逆解析的な他の手法と比較して、測定、キャリブレーション、解析の手法が単純である。					
課題	車両速度が重量の推定値に直接的に影響するため、試験車両を用いて速度の影響を現地で検証する必要がある。 推定精度と走行位置の関係を試験車両を用いて検証する必要がある。					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	9	発表年	2001			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	光通信網	動態観測	リアルタイム	疲労損傷度評価		
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集 F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	光通信網を使用した鋼橋梁の健全度評価モニタリングシステムの開発, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp. 31-40 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2001/686/2001_686_31/_pdf					
著者名	三木千壽, 水ノ上俊雄, 小林 裕介					
概要	全国の一般国道に約10,000km整備されている道路管理用光通信網を利用し, 鋼橋の健全度評価を目的とした動態観測データをリアルタイムに専門家のいる遠隔地へ転送できるシステムを構築した. モニタリングシステムの概要を図-7に示す. 橋梁上を通過する大型車の重量をWIMのコンセプトを用いてリアルタイムに算定するとともに, 疲労損傷度評価を行うシステムを構築した. 計測対象は大坂橋であり, 同橋梁におけるセンサの位置を図-8に, データ処理方法を図-13に示す. トリガーを掛けて, 20tf超の大型車通過時のデータのみ保存しているが, サンプル周波数を1kHzとしているため, データ容量が大きくなってしまふ. そのため, WIMの結果のみを保存している. 長期遠隔モニタリングを開始した結果, ・動態観測により大型車重量の大坂橋における通行特性(曜日別・重量別・車線別通過台数など), 主桁の大型車重量による疲労損傷度を確認できた. 例を図-17, 図-18に示す. ・ピーク記憶型ひずみセンサにより, 今回の計測中に橋梁に地震等の大きな外力の作用が無かったことが確認できた(図-20). ・ひずみゲージおよび物体温度計によるモニタリングでは, 温度上昇に伴って主桁が橋軸方向に圧縮力を受けていることが確認できた(図-21).					
対象橋梁	RC床版鉄桁橋					
使用センサ	溶接ひずみゲージ	ピーク記憶型ひずみセンサ	物体温度計	加速度計		
センサ設置位置	下フランジ上面	垂直補剛材上端部				
分析方法	重量測定の基本原理はMosesによって提案されている方法とほぼ同じである.					
特長	道路管理用光通信網を利用し, 大量の測定データを遠隔地へリアルタイムに転送できる. ひずみの生データの保存は大容量となるため, WIMより重量算定を行い, 結果のみを保存している.					
課題	論文の計測結果は3週間の計測データを使用している. 本システムの5年間のメンテナンスフリーを目的としており, センサ, 機器, システムのメンテナンスについては今後の計測の中で明らかにしていく, としている.					
その他メモ						

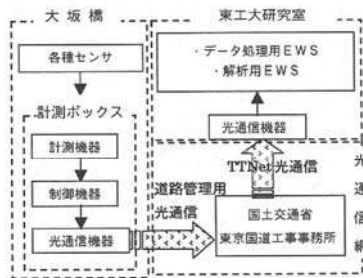


図-7 モニタリングシステムの概要



図-8 センサの位置

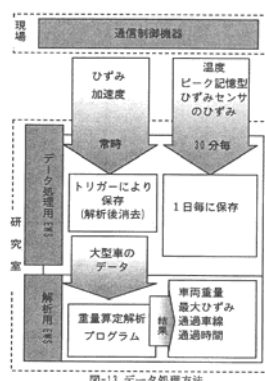


図-13 データ処理方法

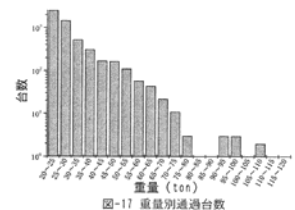


図-17 重量別通過台数

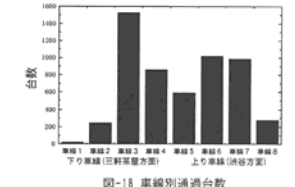


図-18 車線別通過台数

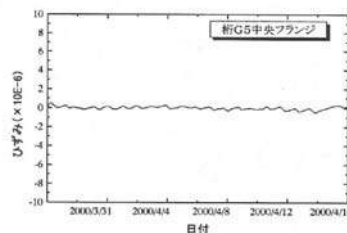


図-20 ピーク記憶型ひずみセンサ

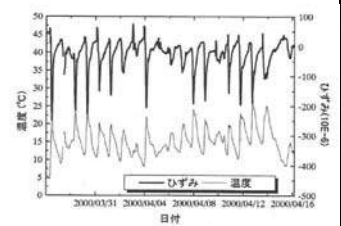


図-21 温度とひずみの関係

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	10	発表年	2004			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	全自動	リアルタイム	温度ひずみ	長期モニタリング		
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	リアルタイム全自動処理Weigh-In-Motionによる長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集 第772号/I-69, pp. 99-111 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2004/773/2004_773_99/_pdf					
著者名	小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史					
概要	長期にわたって継続的に交通荷重をモニタリングするために、全自動かつリアルタイムのWIMシステム（図-5）を構築した。このシステムでは、以下の新しい技術を用いた。 ・測定ひずみに含まれる温度変動によって生じるひずみを算出し、測定ひずみから温度ひずみを差し引くことで、活荷重によるひずみ変動を常時得ることのできるシステムとした。温度ひずみの算出に、測定ひずみにおける頻度分布の最頻値を利用することによって、処理の高速化を図った（図-7）。 ・WIMの解析に必要な橋梁上における車両の走行位置を、鉸桁橋では主桁の鉛直スティフナにおける応答ひずみから、鋼床版箱桁橋では床版下面のトラフリップにおける応答ひずみから算出することを可能にした。また、その算出過程では、車両が通過した際のひずみ波形のピークを、波形の2階微分を利用して検知し、橋軸方向に離れている2箇所の測定点を通過した時間差を、相関関数を用いて検知したことにより、その過程を自動化することができた（図-13）。 構築したWIMのシステムを一般国道にある大坂橋、玉川高架橋、荒川河口橋に適用し、交通荷重を長期にわたってモニタリングした。その結果、1) 長期間にわたり、交通量、重量頻度分布、荷重損傷度に大きな変動の傾向がないこと、2) 同一路線でも、2橋の間で交差する幹線道路からの交通の流入・流出により20tf以上の大型車の割合が異なること、3) 100tf付近の荷重を検出し、トラッククレーンが旋回体およびブームを載せたまま走行していることの推定（図-19）、4) 20tf以上の大型車は通勤時間を避けて走行すること、5) 一般国道246号（大坂橋・玉川高架橋）より、一般国道357号（荒川河口橋）の方が疲労にとって厳しい環境にあること（図-21）などが示された。					
対象橋梁	RC床版鉸桁橋	鋼床版箱桁橋				
使用センサ	溶接ひずみゲージ					
センサ設置位置	下フランジ（鉸桁）	垂直補剛材上端部（鉸桁）	トラフリップ下面（鋼床版）	横リブ下面（鋼床版）		
分析方法	重量測定の基本原理はMosesによって提案されている方法とほぼ同じである。					
特長	全自動かつリアルタイムに車両重量を算出することによって、長期にわたって継続的に交通荷重を遠隔モニタリングすることができる。					
課題	温度ひずみは測定ひずみの最頻値とし、活荷重によるひずみ＝測定ひずみ－温度ひずみとして算出している。車軸位置の算出のために必要な車両速度について、2箇所の測定点の直上を通過した時間差を相関関数により、算出し、その時間差と2箇所の距離から速度を算出している。					
その他メモ	論文では触れていない。 走行車線の特定および走行速度を求めるために、ひずみゲージの数が車線数×2箇所と多くなっている。長期モニタリングによるゲージのメンテナンスを考えると、もっと少なくできないか。					

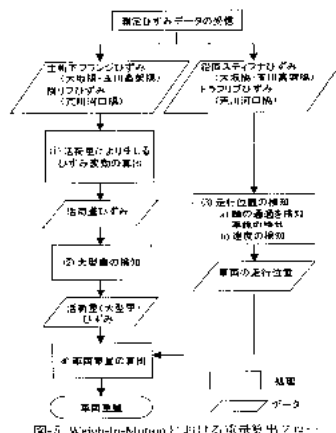


図-5 WIMシステムの構成図

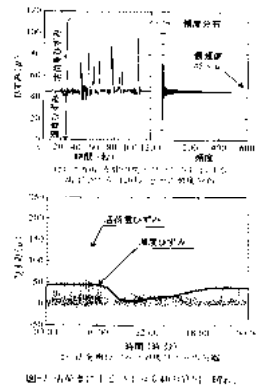


図-19 トリプルトラッククレーンの走行位置の算出結果

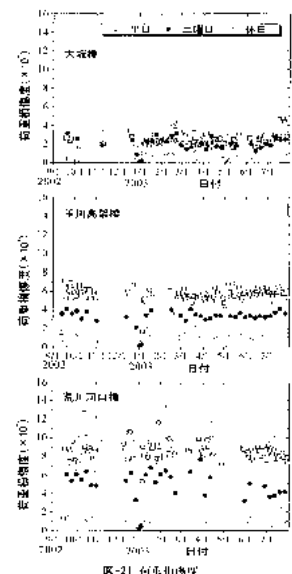


図-21 交通荷重モニタリング結果

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	11	発表年	2004			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	BWIM	交通荷重	連続鋼桁	斜橋		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	2径間連続鋼桁橋を用いたBWIMの精度, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 1135-1140, 2004. 8 https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/7/0/7_0_1135/_pdf					
著者名	山口 栄輝, 松尾 一志, 河村 進一, 小林 裕介, 森 昌文, 百田 国廣, 西之原 達志					
概要	本論分は、斜角を持つ2径間連続鋼桁橋にBWIMを適用し、車両総重量の推定精度を検討するものである。 現場計測：篠栗橋(九州北部地方の主要幹線道路) 橋梁諸元：2径間連続5主桁橋、橋長68.5m、主桁間隔2.3m、2車線(片側歩道あり)、斜橋 下フランジ下面と垂直補剛材に設置したひずみゲージの値を用いて、車両総重量を推定している(文献-2、文献-9のBWIM手法と同じ)。下フランジ下面のひずみゲージでは橋軸方向の直ひずみを測定しており、この値を用いて車両総重量を推定している。垂直補剛材のひずみゲージでは鉛直方向の直ひずみを測定しており、この値を用いて車軸数、走行車線、走行速度を推定している。 単独走行時の車両総重量の推定誤差は走行速度に関わらず5%以内であった。連行走行時やすれ違い走行時の場合は最大で11%程度であった。論文では推定時に2つの断面位置での測定値を用いると精度が落ちると報告されている。また車両速度の推定には、ばらつきが見られた。					
対象橋梁	鋼桁	RC床版				
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	垂直補剛材	下フランジ下面				
分析方法	1) ある時間tに橋梁上の地点x_nに車軸が位置している時、測定点iに生じるひずみ$\varepsilon_i(t)$は次式で表せる。 $\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_A} A_n I_i(x_n(t)) \quad (1)$ NA: 橋梁上にある車軸数, A_n: 車軸nの重量, I_i: 測定点iのひずみ影響関数 2) 算出された$\varepsilon_i(t)$と実測値$\varepsilon_i^*(t)$との差の自乗和は次のようになる。 $E = \sum_{i=1}^{N_M} \sum_{j=1}^{N_y} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (2)$ 3) 式(2)の停留条件(微分が0)を満たすA_nが車軸nの推定重となる(A_nを未知数とする連立1次方程となる)。 4) 影響線関数はd次の多項式を用いて表現できる。係数a_j 重量が既知の車両を用いた走行試験の結果得られるひずみ$\varepsilon_i^*(t)$から最小自乗法により求められる。 $I_i(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_d x^d \quad (3)$ $F = \sum_{j=1}^{N_S} [\varepsilon_i(j\Delta t) - \varepsilon_i^*(j\Delta t)]^2 \quad (4)$					
特長	変形挙動が複雑な斜橋でBWIMの精度を検討している。					
課題	大量のデータにも対応できるようにシステムの自動化が課題である。					
その他メモ	- 推定時に2箇所断面を使用した場合に精度がなぜ落ちるか良く分からなかった。 - この論文では、影響線関数を車両重量が既知である車両の実測データから求めている。 - 車線内での車両の走行位置も精度に影響を及ぼすと思われる。 - 車軸重量については特に述べられていない。					

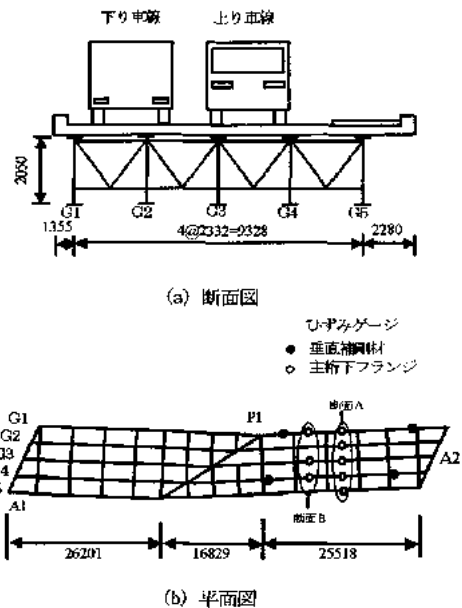
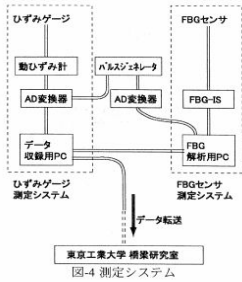
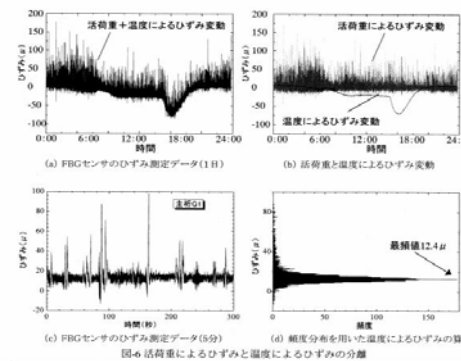
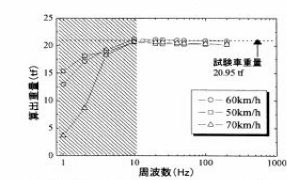
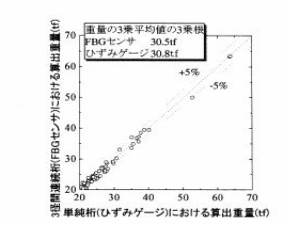
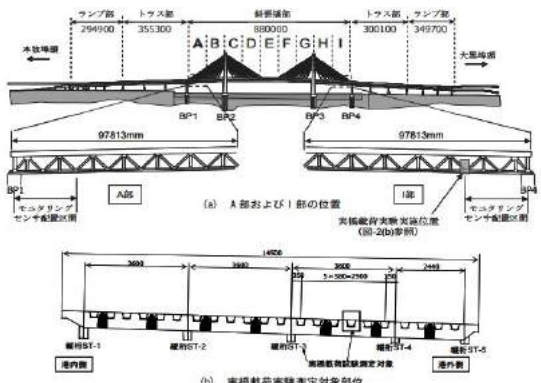
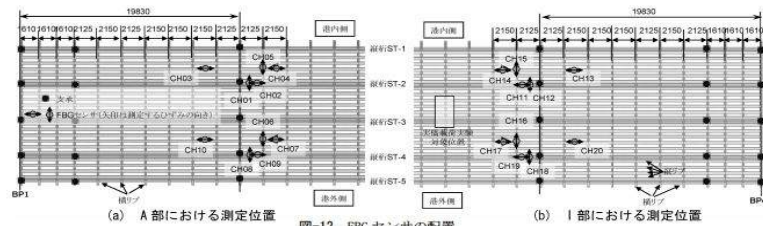
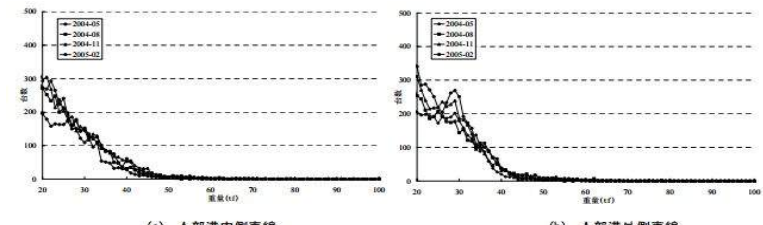


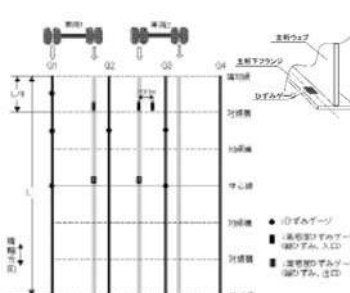
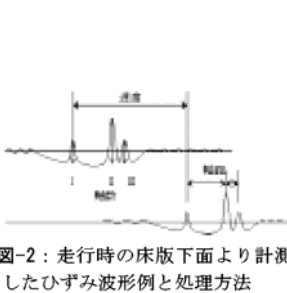
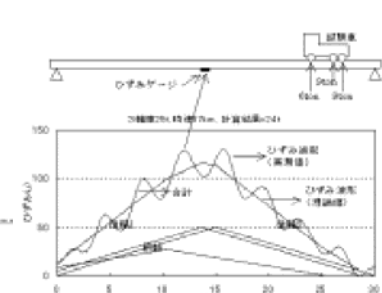
図-2 篠栗橋 (単位:mm)

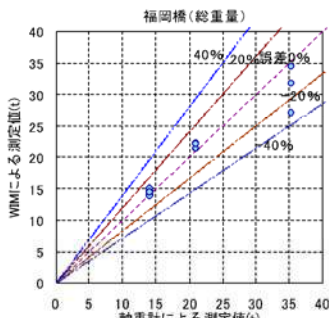
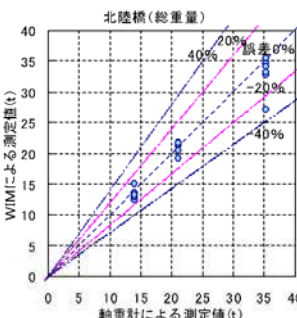
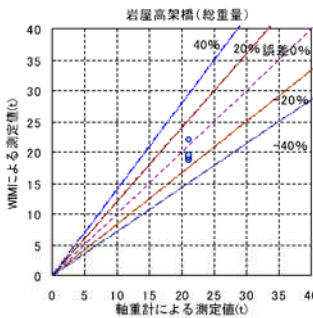
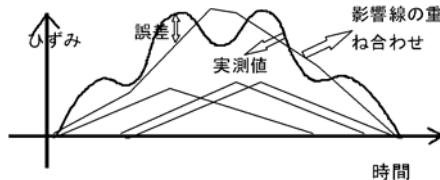
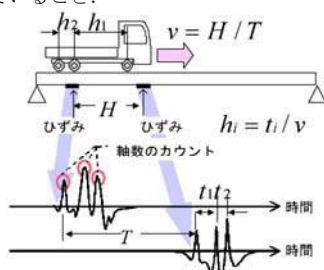
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

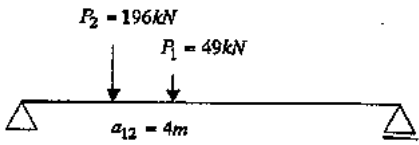
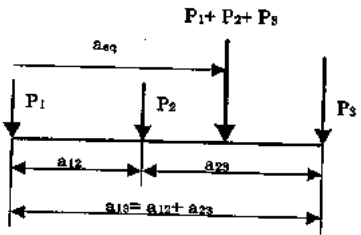
文献番号	12	発表年	2003			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	光ファイバセンサ	ひずみ	温度	サンプリングレート		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	FBG光ファイバセンサによるWeigh-In-Motionシステムの構築, 応用力学論文集, Vol. 6, pp. 1009-1016 https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/6/0/6_0_1009/_article/-char/ja/					
著者名	小林裕介, 三木千壽, 佐々木栄一					
概要	本論文は, 光ファイバセンサ (FBGセンサ) を利用して, 橋梁を対象としたWeigh-in-Motionの構築を試みた論文である。実橋梁にFBGセンサを設置して, データの特性やデータ処理方法について検討したものであり, 比較のために従来のひずみゲージでのWeigh-in-Motion結果との比較を行っている (図-12)。					
対象橋梁	桁橋					
使用センサ	光ファイバひずみセンサ (FBG)					
センサ設置位置	下フランジ下面					
分析方法	本論文で用いているデータ分析手法は, 三木ら (文献2) のものと同様である。しかしながら, 光ファイバを用いていることから, 温度補償の影響の観点からの取得したひずみデータの特性などを確認して, 分析を行っている。本論文においては, 図-4のようなシステムを新たに構築して計測を行っている。ひずみデータには, 活荷重によるひずみと温度によりひずみが重なっており, それを分離してWeigh-in-Motionに用いている (図-6)。また本論文では, サンプリングレートのについても言及しており, 10Hz以上であれば問題ないとしている。     図-4 測定システム 図-6 活荷重によるひずみと温度によるひずみの分離 図-11 サンプリング周波数と算出重量 図-12 供用下における WIM 結果比較 (一台通過時)					
特長	FBGセンサを用いてWeigh-in-Motionシステムを構築した。					
課題	FBGセンサを設置する際に用いる接着剤の耐久性。					
その他メモ						

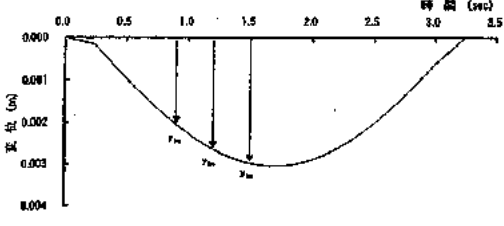
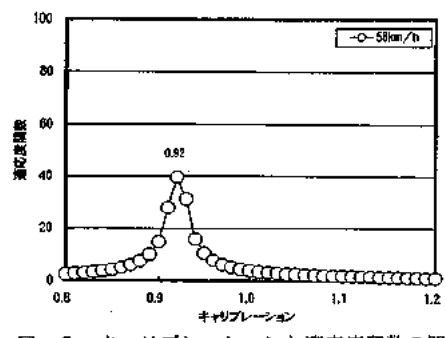
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

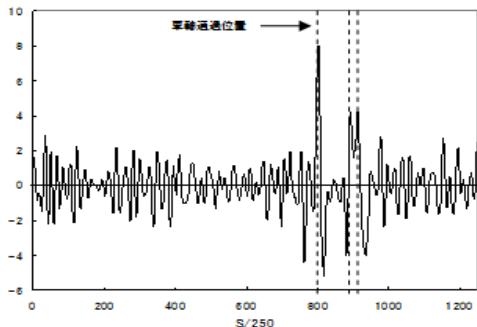
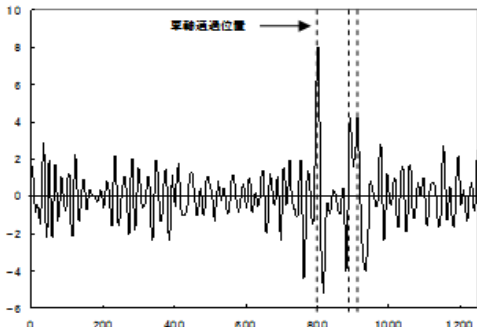
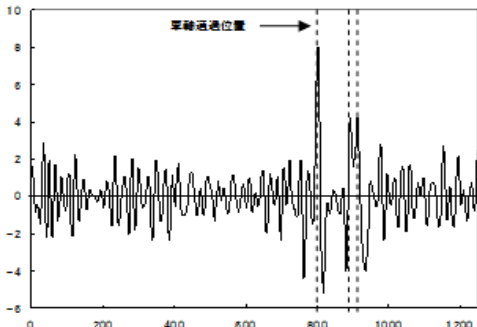
文献番号	13	発表年	2006			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	鋼床版	SFRC舗装	光ファイバセンサ	ひずみ		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼床版の疲労へのSFRC舗装による予防補強とその健全性モニタリング, 土木学会論文集A, Vol. 62, No. 4, pp.950-963 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceja/62/4/62_4_950/_article/-char/ja/					
著者名	三木 千壽, 鈴木 啓悟, 加納 隆史, 佐々木 栄一, 石田 稔, 高森 博之					
概要	本論文では、鋼床版構造の疲労損傷への予防的な補強対策として、鋼繊維補強コンクリート（SFRC）舗装による合成鋼床版化を考え、その効果についてFEM解析および実地応力測定により検証したものである。実地応力測定は、実際にSFRC舗装鋼床版構造が採用された横浜ベイブリッジ下層部（国道357号線、平成16年4月開通）を対象として実施している（図-2）。合成鋼床版構造では、SFRC舗装のひび割れやデッキプレートとの接着切れにより合成効果が低下する可能性が懸念されることから、継続的に合成効果の機能健全性を評価することを目的として、光ファイバセンサを用いたモニタリングシステムを構築している。					
対象橋梁	鋼床版					
使用センサ	光ファイバーひずみセンサ（FBG）					
センサ設置位置	縦リブ下面	横リブ下面				
分析方法	本論文で構築しているWeigh-in-Motionは、SFRC舗装による鋼床版構造の合成化の長期安定性を監視するためのものであり（図-20）、直接荷重を求めるために構築されたものではないが、すべてのセンサを光ファイバとし、システム統一している点に特徴がある。本論文で用いているデータ分析手法は、三木ら（文献2）、小林ら（文献11）のものと同様である。センサ位置は、車両重量分析用として横リブ下面、車両通過検知および速度検知用に縦リブ下面を利用している。  図-2 横浜ベイブリッジにおける測定対象位置  図-12 FBG センサの配置  図-20 各月の第4週目の車両重量分布の比較					
特長	全てFBGセンサで計測システムを統一した。					
課題						
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	14	発表年	2002			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	Weigh-in-motion	車両重量計測	自動車荷重	維持管理		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	影響線の重ね合わせを用いたWIMシステムについて，土木学会第57回年次学術講演会，Vol. 57，I-724，pp. 1447-1448，2002. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2002/57-1/57-1-0724.pdf					
著者名	石尾真理，中谷昌一，玉越隆史，中洲啓太					
概要	<目的> 本研究は，既往のWIMシステムにおいて課題であった対応可能な走行パターンが限定的であることや，併走走行時の精度，多車線への応用等の限界に対して，併走走行状態や軸重計測共に精度よく計算できる新システムを構築したものである． <国総研橋梁研究室WIMの変遷> 開発当初，多主桁のひずみから車両の重量を逆算するための影響線を補間する多項式を仮定して，計算プログラムを作成したが，他車線の各主桁の影響線からの逐次処理は，当時のパソコンの計算能力からみて困難であり，解析処置上，軸重値が確定できない等の問題があった．そこで，軸重の特定と現地での逐次処理を可能にするために，一車線ごとの影響線を用いて計算する方法を開発し，隣接する車線の影響については，車両の位置と諸元による幾つかの走行パターンによる影響線の係数を用意した．しかし，対応できるパターン数や併走走行時の精度，多車線への応用等に限界があったことから，併走走行状態および軸重計測の精度向上を目指した新システムを構築している． <試験橋梁への適用> 国総研構内の試験橋梁（鋼単純桁橋）にて検証試験を実施し，単独走行および連行走行においては，車両重量や軸重を精度良く計算できることが確認された．					
対象橋梁	コンクリート床版・鋼単純桁橋					
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	RC床版下面	下フランジ上面				
分析方法	<車両の判定> 本システムでは，車両の判別のために床版下面のひずみ応答から軸数・軸距・走行速度を計算し，現存する車両から判別する「1台判別ロジック」を構築した． <車両重量の計算方法> 車両重量の計算方法には，主桁のひずみ応答を用いることとし，車両が走行することによって生じる主桁の影響線にあらわに求めた係数を乗じることでひずみ応答の理論値を計算し，計測されたひずみ応答との誤差が最少となる総重量を計算する．総重量は車両の判定ロジックにより求めた軸距，軸数で分離して軸重量を算出する．併走走行の場合については，試験車両を異なる車線で走行させた影響線を求めておき，総重量から各軸重を分離して算出する．    図-1：ひずみゲージの取付位置 図-2：走行時の床版下面より計測したひずみ波形例と処理方法 図-3：車両重量の計算概要					
特長	「1台判別ロジック」による軸間距離から判別するアルゴリズムを構築することで精度向上を図っている．					
課題	併走走行状態（連行併走，併走50％，併走走行）については，併走する車両同士の距離が近いいため，2台を1台として計算した後の分離において誤差が大きくなっている．最適化法によって誤差を最少にする条件の算出方法をさらに合理的にさせることで，より精度の高い軸重および総重量の計測を可能にすることが課題である．さらに，WIM共通の課題である渋滞時や車線変更，橋梁上での速度変化等への対応について検討する必要がある．					
その他メモ						

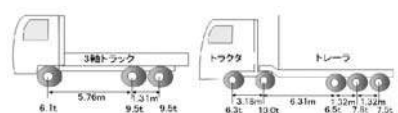
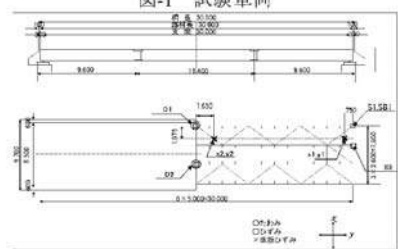
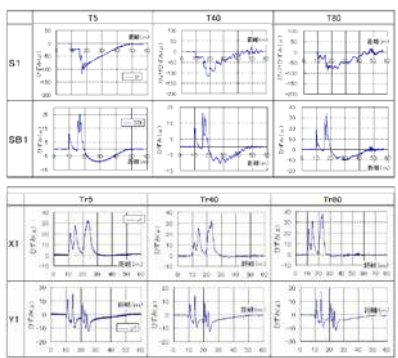
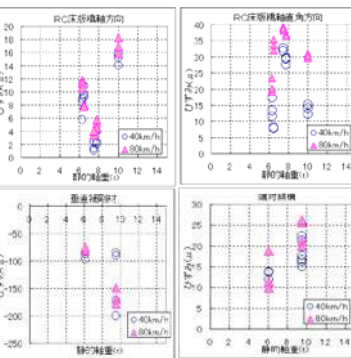
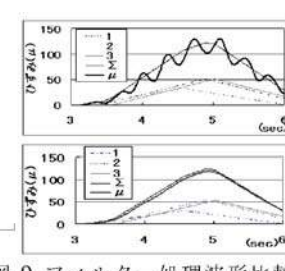
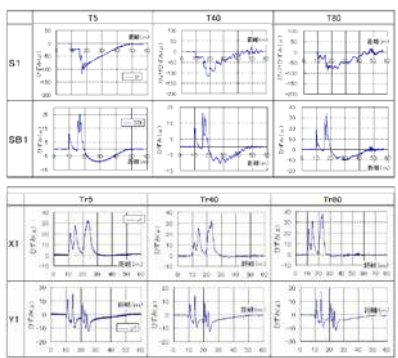
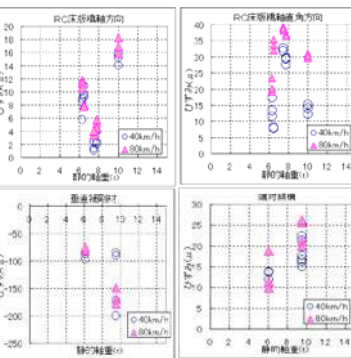
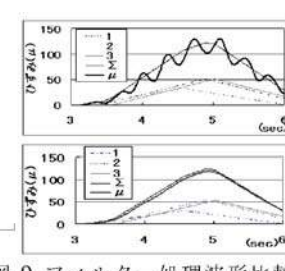
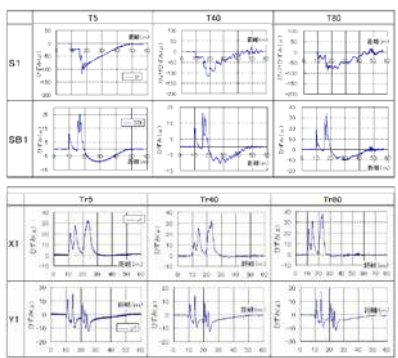
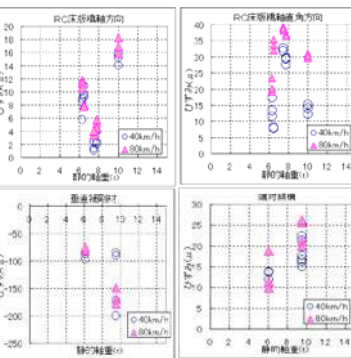
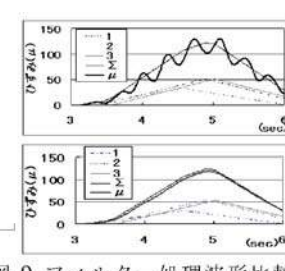
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート																										
文献番号	15	発表年	2003																							
分類	WIM分析方法	WIM事例																								
キーワード	Weigh-in-motion	車両重量計測	自動車荷重	維持管理																						
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他																				
特許等	特許申請	特許番号	実用新案																							
文献名	多様な橋梁条件に対するWIMの適用性に関する調査, 土木学会第58回年次学術講演会, Vol. 58, I-400, pp. 799-800, 2003. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2003/58-1/58-1-0400.pdf																									
著者名	石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太																									
概要	<目的> 国総研が開発したWIMについて, 鋼連続鈑桁橋, 鋼単純箱桁橋, 単純PCT桁橋に対する適用性を調査した結果報告である。 <鋼連続鈑桁橋> 連続桁の場合, 影響線において隣接支間を走行する車両の影響を受けることから, 影響線を一次式で近似する本システムにおいては誤差の要因となるが, 総重量の算定精度に及ぼす影響は必ずしも大きくない。 <鋼単純箱桁橋> 輪荷重通過位置が箱桁部に位置する場合, 直接RC床版下面にセンサーを設置することができないため, 主桁上フランジにおいてひずみ計測を実施している。上フランジのひずみはRC床版下面と比べて応答が小さいものの, 各軸の影響は独立しており, 車軸の判別に支障はなく, 総重量も十分な精度で算定されている。 <連続PCT桁橋> コンクリート橋の場合, 鋼桁と比較して一般に応答振幅が小さくなるが, 床版, 主桁ともにひずみゲージで十分検知可能な大きさの応答振幅が得られ, 総重量の算出精度にも大きな影響はなかった。																									
	 図-9 連続鈑桁橋																									
	 図-10 単純箱桁橋																									
	 図-11 連続 PCT 桁橋																									
	<table><tr><td>対象橋梁</td><td colspan="2">RC床版・鋼連続鈑桁橋</td><td colspan="2">RC床版・高単純箱桁橋</td><td colspan="2">連続PCT桁橋</td></tr><tr><td>使用センサ</td><td colspan="2">ひずみゲージ</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>センサ設置位置</td><td colspan="2">RC床版下面 (不可の場合, 上フランジ下面)</td><td colspan="2">下フランジ上面</td><td></td><td></td></tr></table>						対象橋梁	RC床版・鋼連続鈑桁橋		RC床版・高単純箱桁橋		連続PCT桁橋		使用センサ	ひずみゲージ						センサ設置位置	RC床版下面 (不可の場合, 上フランジ下面)		下フランジ上面		
対象橋梁	RC床版・鋼連続鈑桁橋		RC床版・高単純箱桁橋		連続PCT桁橋																					
使用センサ	ひずみゲージ																									
センサ設置位置	RC床版下面 (不可の場合, 上フランジ下面)		下フランジ上面																							
分析方法	<分析方法> あらかじめ重量等の諸元が既知である車両を用いて, 主桁 (支間中央部) のひずみの影響線を一次式で求めておき, 測定対象となる車両の各車軸分の影響線を重ね合わせたものと実測されたひずみとの誤差が最少となるように軸重および総重量を求めるものである (図-1参照)。また, 重量算出にあたって, 車軸の判定はひずみ応答が鋭敏なRC床版下面の波形を利用して行う (図-2参照)。 <本システムの採用に適した橋梁条件> ①ひずみ応答を安価なセンサーで検知できるよう十分な大きさの応答振幅を有していること。 ②車軸に対する応答が鋭敏で各軸の影響が独立して生じる部材が存在すること。 ③主桁のひずみ応答を一次式の影響線の重ね合わせにより表現できること。																									
	 図-1 システムの概要 (重量算出)  図-2 システムの概要 (車軸の判別)																									
特長	「1台判別ロジック」による軸間距離から判別するアルゴリズムを構築することで精度向上を図っている。																									
課題	特に記載なし																									
その他メモ	本プログラムを配布し, 全国規模の通行実態調査を実施する予定。																									

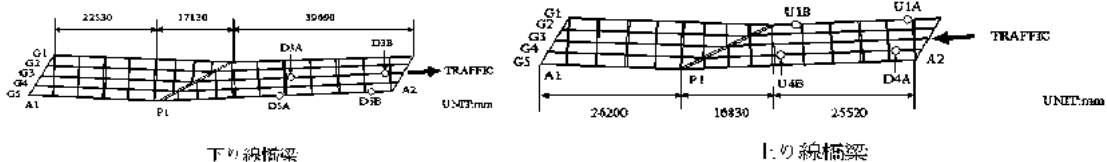
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	16	発表年	2003			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	維持管理	遺伝的アルゴリズム	モニタリングシステム	同定		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	GAを適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 755-765, 2003. 3					
著者名	米田 昌弘, 枝元 勝哉					
概要	本論分は交通荷重の推定に遺伝的アルゴリズム(以下GAと表記する)を適用する手法を報告するものである。車両が橋梁に進入してから退出するまでの時刻歴応答(加速度を電氣的に積分した変位波形,あるいはひずみから算出したモーメント波形)から交通荷重をGAを用いて推定している。GAの詳細については述べられていないが,GAを適用することで少ないデータ数で車両速度や車両総重量,等価軸距(図-5)を推定できる可能性がある,としている。検討は全て解析的に行われている。  図-1 2軸車を対象とした予備検討モデル  図-5 等価軸距の定義					
対象橋梁	特に想定せず					
使用センサ	特に想定せず					
センサ設置位置	支間中央					
分析方法	遺伝的アルゴリズム(文献17より) : 遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化の過程で起こる自然淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的仕組みを模倣した手順のことで、具体的には、仮想生物(個体)を想定し、コンピュータ内でその遺伝子(染色体)を0と1の2進数列で表示(本研究では一つの未知量を24ビットで表示)する。そして、遺伝的仕組みを模倣したプログラムで仮想生物(個体)を何世代にもわたって進化させ、環境に最も適合する個体を探索し、その遺伝子(染色体)から最適解を求めようとするものである。 遺伝的アルゴリズムを適用して橋梁交通荷重を推定する場合、軸重と軸間距離(たとえば、2軸車であれば、前輪と後輪の軸重P_1、P_2および軸間距離a_{12})から構成された一つの個体(P_1、P_2およびa_{12}はそれぞれ24ビットで表示されていることから、この場合の一つの個体は24+24+24ビットで構成されている)が環境に適合する程度(a_{12}だけ離れた軸重P_1、P_2によって生じる応答の解析値と実測値が一致する程度)は、次式で定義した目的関数J_{GA}の逆数(適応度関数)で評価される。 $J_{GA} = \sum_{i=1}^n CAL \times R_{c,i} / R_{m,i} - 1.0 \quad (1)$ ここに、CALはキャリブレーション値、$R_{c,i}$は解析値、$R_{m,i}$は計測され、nはデータの個数である。なお、先の論文では単純桁形式のみ					
特長	パラメータを全て振って最適値を算出するより、GAを用いた方が少ない労力で最適値が求められる(と思われる)。					
課題	実橋への適用。					
その他メモ	GAを用いれば、軸重や軸間距離の推定が困難であるものの総重量は十分な精度で推定できる、と述べられているが、軸重や軸間距離の推定が困難であるのは測定しているパラメータ(支間中央の変位と曲げモーメント)のためということはないか?					

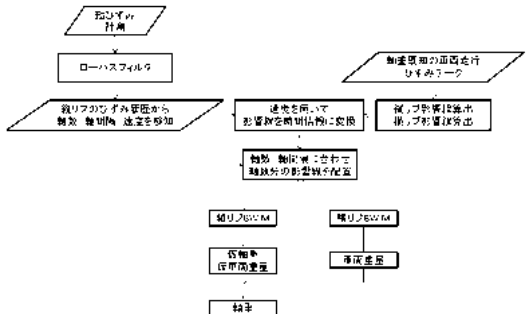
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	17	発表年	2004			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	維持管理	遺伝的アルゴリズム	モニタリングシステム	同定		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	遺伝的アルゴリズムを適用したBridge Weigh-in-Motionシステム, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.707-718, 2004.3					
著者名	米田 昌弘, 枝元 勝哉					
概要	本論分は交通荷重の推定に遺伝的アルゴリズム(以下GAと表記する)を適用する手法を報告するものである。文献16に続く論文である。解析上の剛性と実際の剛性の違いから、変位の実測値は解析値より小さくなることが多い。このときの比率をキャリブレーション値(CAL, 補正係数)とし、その推定誤差の影響を検討している。3径間連続橋に対する数値解析例も示している。 $\left. \begin{aligned} y_{1m} &= CAL \times y_{1c} \\ y_{2m} &= CAL \times y_{2c} \\ y_{3m} &= CAL \times y_{3c} \end{aligned} \right\}$					
対象橋梁	特に想定せず					
使用センサ	特に想定せず					
センサ設置位置	支間中央					
分析方法	1) 実際のCALが0.9のとき、60km/hで走行させたつむりの試験車量が、実際には58km/hで走行した場合などのCALの推定値を算出している。   図-4 静的変位応答波形 (TYPE-1 車両が走行した場合) 図-5 キャリブレーションと速度関数の関係 (TYPE-1 車両, 単純桁, 58km/h) 遺伝的アルゴリズム: 遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化の過程で起こる自然淘汰、交叉、突然変異などの遺伝的仕組みを模倣した手順のことで、具体的には、仮想生物(個体)を想定し、コンピュータ内でその遺伝子(染色体)を0と1の2進数列で表示(本研究では一つの未知量を24ビットで表示)する。そして、遺伝的仕組みを模倣したプログラムで仮想生物(個体)を何世代にもわたって進化させ、環境に最も適合する個体を探索し、その遺伝子(染色体)から最適解を求めようとするものである。 遺伝的アルゴリズムを適用して橋梁交通荷重を推定する場合、軸重と軸間距離(たとえば、2軸車であれば、前輪と後輪の軸重R_1、R_2および軸間距離a_{12})から構成された一つの個体(R_1、R_2およびa_{12}はそれぞれ24ビットで表示されていることから、この場合の一つの個体は24+24+24ビットで構成されている)が環境に適合する程度(a_{12}だけ離れた軸重R_1、R_2によって生じる応答の解析値と実測値が一致する程度)は、次式で定義した目的関数J_{GA}の逆数(適応度関数)で評価される。 $J_{GA} = \sum_{i=1}^n CAL \times R_{c,i} / R_{m,i} - 1.0 \quad (1)$ ここに、CALはキャリブレーション値、$R_{c,i}$は解析値、$R_{m,i}$は計測された応答、nはGAで利用する計測データの個数である。					
特長	パラメータを全て振って最適値を算出するより、GAを用いた方が少ない労力で最適値が求められる(と思われる)。					
課題	実橋への適用。					
その他メモ	60km/hで走行させたつむりの試験車量が、実際には58km/hで走行した場合を考える。先頭軸が15m、20m、25mの位置に達したと思った時刻には実際の車両はその少し手間にいることになる。計測される変位は、解析値より、さらに小さくなると思われる。よってCALの値は0.9より小さく推定されるのでは(本論分では0.92と推定されている)?					

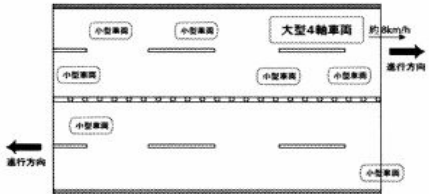
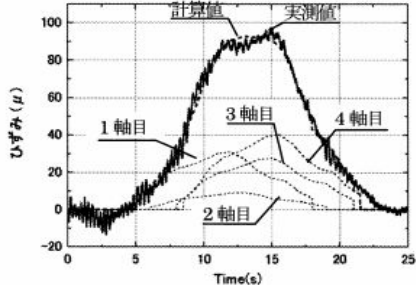
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート																																					
文献番号	18	発表年	2008																																		
分類	WIM分析方法	WIM事例																																			
キーワード	影響線	車軸位置情報	Wavelet変換																																		
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他																															
特許等	特許申請	特許番号	実用新案																																		
文献名	影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用, 構造工学論文集, pp. 582-589 https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/54A/0/54A_0_582/_article/-char/ja/																																				
著者名	坂柳皓文, 佐々木栄一, チャンペン・ティーラポン, 鈴木啓悟, 石川裕治, 山田均, 勝地弘																																				
概要	本論文は、影響線を利用したWeigh-in-Motionのデータ分析手法の精度向上を目的として、影響線長の長いセンサ位置での情報から直接車両通過時間等の車両情報を取得する手法を提案した内容である。従来の方法では、影響線長の短いセンサ位置での情報を用いて車両の平均的な速度を取得して、影響線長の長いセンサ位置でのデータで車両の重量を分析するが、平均的な速度を用いているために、影響線長の長いセンサ位置における車両通過時間がずれてしまうため、Weigh-in-Motion分析結果の精度を低下させる恐れがある。本論文では、Wavelet変換を利用している。																																				
対象橋梁	鋼床版																																				
使用センサ	光ファイバーひずみセンサ (FBG)																																				
センサ設置位置	縦リブ下面	横リブ下面																																			
分析方法	鋼床版構造では、横リブ下面のひずみを用いて車両重量を分析するが、比較的影響線長が長く、車軸の影響が重なり合い、そのひずみ情報から、直接車軸の通過時間を取得することが困難であったが、Wavelet変換を行うことにより、その時間を取得して、車両重量分析の精度を向上させる提案である。																																				
			<table><caption>表-1 軸間隔比の比較</caption><thead><tr><th></th><th>1軸-2軸目</th><th>2軸-3軸目</th><th>1軸-3軸目</th></tr></thead><tbody><tr><td>軸間隔計測値</td><td>0.816</td><td>0.184</td><td>1</td></tr><tr><td>本研究手法</td><td>0.805</td><td>0.195</td><td>1</td></tr><tr><td>縦リブ</td><td>0.838</td><td>0.162</td><td>1</td></tr></tbody></table>				1軸-2軸目	2軸-3軸目	1軸-3軸目	軸間隔計測値	0.816	0.184	1	本研究手法	0.805	0.195	1	縦リブ	0.838	0.162	1																
	1軸-2軸目	2軸-3軸目	1軸-3軸目																																		
軸間隔計測値	0.816	0.184	1																																		
本研究手法	0.805	0.195	1																																		
縦リブ	0.838	0.162	1																																		
分析方法			<table><caption>表-2 軸重算出結果</caption><thead><tr><th></th><th>1軸目</th><th>2軸目</th><th>3軸目</th><th>総重量</th></tr></thead><tbody><tr><td>停止時</td><td>6.25</td><td>7.205</td><td>7.205</td><td rowspan="2">20.76(t)</td></tr><tr><td>重量計測値</td><td>6.25</td><td colspan="2">14.41</td></tr><tr><td>Weigh-In-Motion</td><td>7.259</td><td>9.198</td><td>4.284</td><td rowspan="2">20.74(t)</td></tr><tr><td>本研究手法</td><td>7.259</td><td colspan="2">13.48</td></tr><tr><td>Weigh-In-Motion</td><td>7.16</td><td>5.270</td><td>5.510</td><td rowspan="2">17.94(t)</td></tr><tr><td>従来手法</td><td>7.16</td><td colspan="2">10.78</td></tr></tbody></table>				1軸目	2軸目	3軸目	総重量	停止時	6.25	7.205	7.205	20.76(t)	重量計測値	6.25	14.41		Weigh-In-Motion	7.259	9.198	4.284	20.74(t)	本研究手法	7.259	13.48		Weigh-In-Motion	7.16	5.270	5.510	17.94(t)	従来手法	7.16	10.78	
		1軸目	2軸目	3軸目	総重量																																
停止時	6.25	7.205	7.205	20.76(t)																																	
重量計測値	6.25	14.41																																			
Weigh-In-Motion	7.259	9.198	4.284	20.74(t)																																	
本研究手法	7.259	13.48																																			
Weigh-In-Motion	7.16	5.270	5.510	17.94(t)																																	
従来手法	7.16	10.78																																			
分析方法			<table><caption>表-3 車両辞書データベース例</caption><thead><tr><th></th><th>1-2軸間</th><th>1-3軸間</th><th>1-4軸間</th></tr></thead><tbody><tr><td>3軸車 大型トラック</td><td>5870 (mm)</td><td>7070 (mm)</td><td></td></tr><tr><td>3軸車 大型ダンプ</td><td>3200 (mm)</td><td>4520 (mm)</td><td></td></tr><tr><td>4軸車 大型トラック</td><td>1850 (mm)</td><td>6230 (mm)</td><td>7430 (mm)</td></tr></tbody></table>				1-2軸間	1-3軸間	1-4軸間	3軸車 大型トラック	5870 (mm)	7070 (mm)		3軸車 大型ダンプ	3200 (mm)	4520 (mm)		4軸車 大型トラック	1850 (mm)	6230 (mm)	7430 (mm)																
		1-2軸間	1-3軸間	1-4軸間																																	
3軸車 大型トラック	5870 (mm)	7070 (mm)																																			
3軸車 大型ダンプ	3200 (mm)	4520 (mm)																																			
4軸車 大型トラック	1850 (mm)	6230 (mm)	7430 (mm)																																		
特長	Wavelet変換を用いて新しいひずみデータ処理手法を提案している。																																				
課題																																					
その他メモ																																					

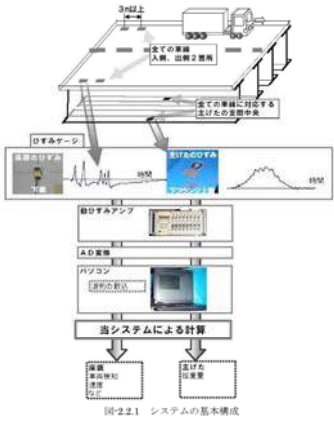
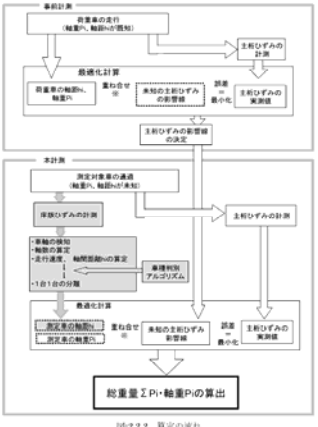
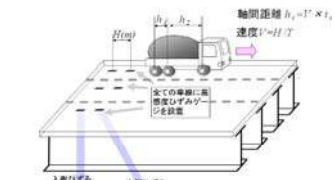
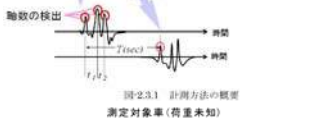
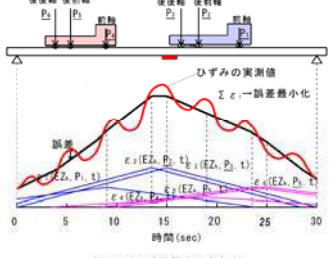
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート

文献番号	19	発表年	2004																																																																																																	
分類	WIM分析方法	WIM事例																																																																																																		
キーワード	自動車荷重	車両重量計測	維持管理																																																																																																	
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他																																																																																														
特許等	特許申請	特許番号	実用新案																																																																																																	
文献名	大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察, 土木学会第59回年次学術講演会, Vol. 59, 1-562, pp. 1121-1122, 2004. http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00035/2004/59-1/59-1-0562.pdf																																																																																																			
著者名	石尾真理, 中谷昌一, 玉越隆史, 中洲啓太																																																																																																			
概要	<目的> 国総研が開発したWIMを用いて, 30mの単純桁橋を試験対象に, 3軸車および5軸トレーラの走行速度を変化させた場合の軸重と部材応答特性について検討している。  図-1 試験車両  図-2 試験橋梁計測位置 <table><caption>表-1 計測記号</caption><thead><tr><th>測点記号</th><th>種類</th><th>単位</th></tr></thead><tbody><tr><td>D1</td><td>G1 桁たわみ</td><td>mm</td></tr><tr><td>D2</td><td>G2 桁中央たわみ</td><td>mm</td></tr><tr><td>X1</td><td>床版ひずみ(橋軸直角方向)</td><td>μ</td></tr><tr><td>X2</td><td>支間中央床版ひずみ(橋軸直角方向)</td><td>μ</td></tr><tr><td>Y1</td><td>床版ひずみ(橋軸方向)</td><td>μ</td></tr><tr><td>Y2</td><td>支間中央床版ひずみ(橋軸方向)</td><td>μ</td></tr><tr><td>S1</td><td>G1 支承部補剛材ひずみ</td><td>μ</td></tr><tr><td>S2</td><td>G2 支承部補剛材ひずみ</td><td>μ</td></tr><tr><td>SB1</td><td>端対傾構ひずみ</td><td>μ</td></tr></tbody></table><table><caption>表-2 計測ケース</caption><thead><tr><th rowspan="2">車両</th><th colspan="3">走行速度</th></tr><tr><th>5km/h</th><th>40km/h</th><th>80km/h</th></tr></thead><tbody><tr><td>3軸トラック</td><td>T-5</td><td>T-40</td><td>T-80</td></tr><tr><td>5軸トレーラ</td><td>TR-5</td><td>TR-40</td><td>TR-80</td></tr></tbody></table> <tr><td>対象橋梁</td><td>RC床版・鋼単純鉄桁橋</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>使用センサ</td><td>ひずみゲージ</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>センサ設置位置</td><td>RC床版下面</td><td>垂直補剛材</td><td>端対傾構</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td rowspan="4">分析方法</td><td colspan="6"> <車軸の位置を特定する部材の検討> 車両重量(軸重)を推定する部材の選定について, 床版ひずみ(X1, Y1), 支承部補剛材ひずみ(S1), 端対傾構ひずみ(SB1)を比較したところ, 床版の橋軸方向ひずみが各車軸に対して最も精度良く検出できることがわかった。(図-3参照) <重量算出に用いる部材の検討> 影響範囲が短い部材を用いて, 軸重等の諸元が既知の荷重車による応答との相関から車両重量を求める方法について検討している。本手法の場合, 処理速度が早く, 他車線の影響などの制約が少ないと考えられるが, 直接的に軸重を算出する部材応答値が車両振動や, 路面凹凸等の動的軸重の影響を受けることから, 静的軸重値を精度良く推定することは困難であった。(図-7参照)また, 主桁のひずみ応答による方法では, 振動の影響を受けにくく, 顕著な振動成分が現れた場合でも適切なフィルター処理を行うことで振動成分を除去して重量を算出できることがわかった。(図-9参照)  図-3 各種部材の波形  図-7 部材応答のばらつき  図-9 フィルター処理波形比較 </td></tr> <tr><td>特長</td><td colspan="6">計測位置に影響範囲の短い部材を数箇所選定して比較・検討している。 動的な振動成分に対するフィルター処理の有効性について検討している。</td></tr> <tr><td>課題</td><td colspan="6">車軸位置の特定においては, 床版の橋軸方向ひずみ以外に着目する場合は注意が必要。 影響範囲が短い部材を用いた重量算出では, ばらつきが大きく, 静的軸重値の推定精度は悪い。 動的な振動成分が顕著な部材を用いる場合は, 適切なフィルター処理を実施する必要がある。</td></tr> <tr><td>その他メモ</td><td colspan="6">大型車の通行実態について, 全国多数地点で統一的手法によって簡便に得ることを目的として開発しており, 計測時の誤差の影響がなるべく少ない波形を得ることを目標としている。</td></tr>						測点記号	種類	単位	D1	G1 桁たわみ	mm	D2	G2 桁中央たわみ	mm	X1	床版ひずみ(橋軸直角方向)	μ	X2	支間中央床版ひずみ(橋軸直角方向)	μ	Y1	床版ひずみ(橋軸方向)	μ	Y2	支間中央床版ひずみ(橋軸方向)	μ	S1	G1 支承部補剛材ひずみ	μ	S2	G2 支承部補剛材ひずみ	μ	SB1	端対傾構ひずみ	μ	車両	走行速度			5km/h	40km/h	80km/h	3軸トラック	T-5	T-40	T-80	5軸トレーラ	TR-5	TR-40	TR-80	対象橋梁	RC床版・鋼単純鉄桁橋						使用センサ	ひずみゲージ						センサ設置位置	RC床版下面	垂直補剛材	端対傾構				分析方法	<車軸の位置を特定する部材の検討> 車両重量(軸重)を推定する部材の選定について, 床版ひずみ(X1, Y1), 支承部補剛材ひずみ(S1), 端対傾構ひずみ(SB1)を比較したところ, 床版の橋軸方向ひずみが各車軸に対して最も精度良く検出できることがわかった。(図-3参照) <重量算出に用いる部材の検討> 影響範囲が短い部材を用いて, 軸重等の諸元が既知の荷重車による応答との相関から車両重量を求める方法について検討している。本手法の場合, 処理速度が早く, 他車線の影響などの制約が少ないと考えられるが, 直接的に軸重を算出する部材応答値が車両振動や, 路面凹凸等の動的軸重の影響を受けることから, 静的軸重値を精度良く推定することは困難であった。(図-7参照)また, 主桁のひずみ応答による方法では, 振動の影響を受けにくく, 顕著な振動成分が現れた場合でも適切なフィルター処理を行うことで振動成分を除去して重量を算出できることがわかった。(図-9参照)  図-3 各種部材の波形  図-7 部材応答のばらつき  図-9 フィルター処理波形比較						特長	計測位置に影響範囲の短い部材を数箇所選定して比較・検討している。 動的な振動成分に対するフィルター処理の有効性について検討している。						課題	車軸位置の特定においては, 床版の橋軸方向ひずみ以外に着目する場合は注意が必要。 影響範囲が短い部材を用いた重量算出では, ばらつきが大きく, 静的軸重値の推定精度は悪い。 動的な振動成分が顕著な部材を用いる場合は, 適切なフィルター処理を実施する必要がある。						その他メモ	大型車の通行実態について, 全国多数地点で統一的手法によって簡便に得ることを目的として開発しており, 計測時の誤差の影響がなるべく少ない波形を得ることを目標としている。					
	測点記号	種類	単位																																																																																																	
	D1	G1 桁たわみ	mm																																																																																																	
	D2	G2 桁中央たわみ	mm																																																																																																	
X1	床版ひずみ(橋軸直角方向)	μ																																																																																																		
X2	支間中央床版ひずみ(橋軸直角方向)	μ																																																																																																		
Y1	床版ひずみ(橋軸方向)	μ																																																																																																		
Y2	支間中央床版ひずみ(橋軸方向)	μ																																																																																																		
S1	G1 支承部補剛材ひずみ	μ																																																																																																		
S2	G2 支承部補剛材ひずみ	μ																																																																																																		
SB1	端対傾構ひずみ	μ																																																																																																		
車両	走行速度																																																																																																			
	5km/h	40km/h	80km/h																																																																																																	
3軸トラック	T-5	T-40	T-80																																																																																																	
5軸トレーラ	TR-5	TR-40	TR-80																																																																																																	
対象橋梁	RC床版・鋼単純鉄桁橋																																																																																																			
使用センサ	ひずみゲージ																																																																																																			
センサ設置位置	RC床版下面	垂直補剛材	端対傾構																																																																																																	
分析方法	<車軸の位置を特定する部材の検討> 車両重量(軸重)を推定する部材の選定について, 床版ひずみ(X1, Y1), 支承部補剛材ひずみ(S1), 端対傾構ひずみ(SB1)を比較したところ, 床版の橋軸方向ひずみが各車軸に対して最も精度良く検出できることがわかった。(図-3参照) <重量算出に用いる部材の検討> 影響範囲が短い部材を用いて, 軸重等の諸元が既知の荷重車による応答との相関から車両重量を求める方法について検討している。本手法の場合, 処理速度が早く, 他車線の影響などの制約が少ないと考えられるが, 直接的に軸重を算出する部材応答値が車両振動や, 路面凹凸等の動的軸重の影響を受けることから, 静的軸重値を精度良く推定することは困難であった。(図-7参照)また, 主桁のひずみ応答による方法では, 振動の影響を受けにくく, 顕著な振動成分が現れた場合でも適切なフィルター処理を行うことで振動成分を除去して重量を算出できることがわかった。(図-9参照)  図-3 各種部材の波形  図-7 部材応答のばらつき  図-9 フィルター処理波形比較																																																																																																			
	特長	計測位置に影響範囲の短い部材を数箇所選定して比較・検討している。 動的な振動成分に対するフィルター処理の有効性について検討している。																																																																																																		
	課題	車軸位置の特定においては, 床版の橋軸方向ひずみ以外に着目する場合は注意が必要。 影響範囲が短い部材を用いた重量算出では, ばらつきが大きく, 静的軸重値の推定精度は悪い。 動的な振動成分が顕著な部材を用いる場合は, 適切なフィルター処理を実施する必要がある。																																																																																																		
	その他メモ	大型車の通行実態について, 全国多数地点で統一的手法によって簡便に得ることを目的として開発しており, 計測時の誤差の影響がなるべく少ない波形を得ることを目標としている。																																																																																																		

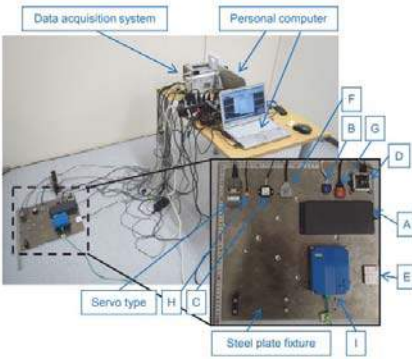
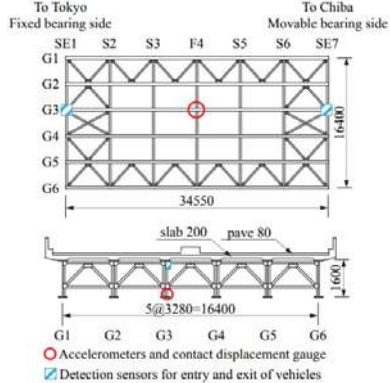
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	20	発表年	2010			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	BWIM	交通荷重	垂直補剛材	積分法	3次元FEM	
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼桁橋の垂直補剛材ひずみを用いたBWIM, 土木学会論文集F, Vol. 66, pp. 251-260, 2010. 5 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejf/66/2/66_2_251/_pdf					
著者名	山口 栄輝, 内藤 靖, 松尾 一志, 松木 勇太, 高木 良久, 河村 進一					
概要	本論分は、斜角を持つ2径間連続鋼桁橋にBWIMを適用し、車両総重量の推定精度を検討するものである。対象とした橋梁は文献-11と同じであるが、文献-11の後に下り線が施工され、上下分離の各2車線の橋梁となった。 現場計測：篠栗橋（九州北部地方の主要幹線道路） 橋梁諸元（上り線）：2径間連続5主桁桁、橋長68.5m、主桁間隔2.3m、2車線（片側歩道あり） 橋梁諸元（下り線）：2径間連続5主桁桁、橋長79.3m、主桁間隔2.4m～2.6m、2車線（片側歩道あり） 文献-11では、下フランジ下面と垂直補剛材にひずみゲージを設置していた。本論分では垂直補剛材のひずみゲージのみを用いて車両総重量を推定している。同時に文献-5に示された、積分法BWIMの手法も採用しており、本論分でのBWIMをBWIM-IT (BWIM by Integration Method with Transverse Stiffeners) と呼んでいる。 検討の結果、併走走行時に車両総重量の推定精度が低下することがあることが判明した。これは、横桁や対傾構により隣接車線の車重が垂直補剛材のひずみに影響することに起因する。3次元FEMで垂直補剛材に作用するひずみを算定すれば、BWIM-ITに使用する最適な垂直補剛材を選ぶことが可能になり、実用十分な精度で車両総重量が推定できるようになる。					
	 下の線橋梁 上の線橋梁					
対象橋梁	鋼桁	RC床版				
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	垂直補剛材					
分析方法	n 軸の車両が走行する際、着目点に発生するひずみ $g(x)$ は一般に次式で与えられる。 $g(x) = \sum_{k=1}^n W_k \cdot f(x - l_k) \quad (1)$ ここに、xは車両の第1軸（先頭車軸）の位置、W_kは車両の第k軸（k番目車軸）の軸重、$f(x)$は影響線関数、l_kは車両の第1軸と第k軸の距離である。$g(x)$を次のように積分して得られるAの値は、$x - g(x)$において、x軸と$g(x)$に囲まれた領域の面積であり、影響面積と呼ばれる。 $A = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx = \sum_{k=1}^n W_k \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = W \cdot \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx \quad (2)$ ここに、Wは車両重量であり、上式より、影響面積は車両重に比例することが理解される。したがって、車両重が既知である車両の影響面積Aを測定しておけば、任意の車両は、その影響面積Aを算出することにより、次式で求めることができる。 $W = \frac{A}{A_c} \cdot W_c \quad (3)$ 通常、走行車両によって橋梁部材に発生するひずみの測定結果は、時刻に応答として記録される。そのため、車両が速度Vで走行している場合、式(2)の影響面積Aは一般に次のように計算される。 $A = V \int_{-\infty}^{\infty} r(t) dt \quad (4)$ ここに、$r(t)$はひずみの測定値（時刻に応答）である。式(4)から理解されるように、積分法BWIMでも、車両走行速度を把握する必要がある。					
特長	変形挙動が複雑な斜橋でBWIMの精度を検討している。また、1車線当たり2本の垂直補剛材でひずみ測定を行えばよく、多元連立1次方程式を解くといった演算も不要となる。					
課題						
その他メモ	- この論文では、影響線関数を車両重量が既知である車両の実測データから求めている。 - 車線内での車両の走行位置も精度に影響を及ぼすと思われる。 - 車軸重量については特に述べられていない。					

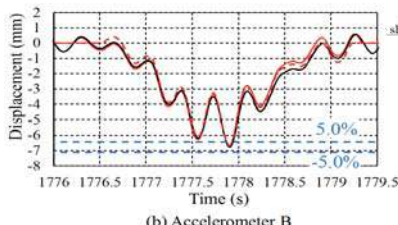
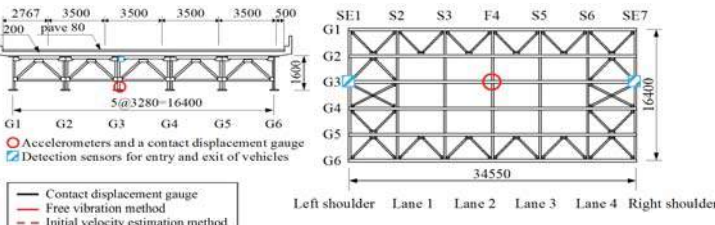
WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	21	発表年	2013			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	bridge weigh-in-motion	axle weight	orthotropic steel deck	fatigue damage		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	鋼床版における通行車両軸重算出手法，土木学会論文集A2（応用力学），Vol. 69, No. 2（応用力学論文集Vol. 16），pp. I_761-I_768, 2013. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/69/2/69_I_761/_pdf					
著者名	鈴木啓悟，吉川将大					
概要	<目的> 重量車両の軸重把握を目的として，Uリブ型の縦リブを有する鋼床版のひずみ応答を利用した軸重算出用BWIMを構築し，停止時軸重が既知である車両3種を走行させた精度検証を実施した。 <解析手法> Mosesの手法をベースとして，影響線を最少二乗法によって誤差二乗和が最少となるように再構成ひずみを測定ひずみ履歴にカーブフィッティングさせる計算であり，縦リブ2箇所，横リブ1箇所の1レーンあたり計3箇所での動的なひずみ測定を行いデータ処理に用いる．具体的には，軸重が既知の車両を走行させて算出できる影響線を利用し，鋼床版縦リブの活荷重ひずみ応答から軸重を算出し，横リブのひずみ応答を用いて算出軸重を補正する手法としている．なお，横リブの活荷重ひずみが20μ以上を記録した車両に対して軸重算出計算を実施。 <精度検証> 鋼床版橋において，本研究の開発手法である縦リブ2箇所，横リブ1箇所のセンサ群を設置し，縦リブ停止状態で軸重を計測した車両を用いた走行試験を行い，本手法の算出精度を検証している。 <実働荷重下の軸重算出> 実際の鋼床版橋において，本研究の開発手法を適用した1週間の動的ひずみ計測を実施し，重量車両を対象として軸重頻度分布，特徴的な車両の軸重などを明らかにした。					
対象橋梁	鋼床版橋					
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	縦リブ	横リブ				
分析方法	予め軸重が既知の車両を走行させ，縦リブと横リブの影響線を算出しておく．動ひずみ計測で得られた生データについては，館石らの提案したFFTを利用する手法を用いて，縦リブを8Hz以下のローパス，横リブを4Hz以下のローパスフィルタをかけ，縦リブデータから軸数，軸間隔，速度を検知し，求めた軸数・軸間隔に合わせて軸数分の影響線を配置する．次に縦リブでBWIMを行い，仮軸重を算出し，仮軸重を合計して仮車両重量を算出する．一方で，横リブBWIMにより，車両重量を算出し，縦リブBWIMによって求めた仮車両重量で割った係数を補正係数として，仮軸重に掛け合わせて軸重を算出する．なお，横リブBWIMにおいては，他車線の影響が入りやすいため，対向車線を通過したときの影響線も求め，計算処理により対向車線車両の影響分を分離する．また，動ひずみ計測の生データには温度変化に伴うひずみ値の変動量が含まれていることから，5分毎にデータを区切り，生データの最頻値（モード値）を求めて活荷重ひずみを抽出している。  <pre> graph TD A[動ひずみ計測] --> B[ローパスフィルタ] B --> C[縦リブのひずみ履歴から軸数・軸間隔・速度を検知] C --> D[速度を用いて影響線を横リブに反映] C --> E[縦リブの影響線に仮軸重を乗じて仮車両重量を算出] D --> F[縦リブと横リブの仮軸重を比較] F --> G[補正係数を算出] G --> H[縦リブの仮軸重に補正係数を乗じて最終軸重を算出] H --> I[軸重] </pre> 図-4 軸重算出フロー					
特長	鋼床版（Uリブ型）における軸重算出用BWIMとして，1レーンあたりのひずみ計測箇所を3に抑えたこと．小林らの手法による横リブ軸重BWIMに比べて，標準偏差が小さく，誤差のばらつきが小さい（概ね20%以内）．95%信頼係数の基づく，検証実験85回による母集団誤差標準偏差の信頼限界について，誤差平均は-3.53～-0.66%，誤差の標準偏差が5.82～7.87%程度となり，標本の標準偏差の小ささが本手法の信頼区間を狭めることに貢献している．					
課題	誤差が20%を超えた時のデータについて，横リブBWIMの算出車両重量において，すれ違い走行による逆車線車両が影響していると考えられる．また，縦リブのひずみ応答においても，近接する各軸の影響が混在しており，走行に伴う動的な効果により，同じ車両でも走行回によって各軸の及ぼす影響が異なることも要因の一つである．つまり，重量車両同士のすれ違いの状況によっては誤差が大きくなる場合がある．					
その他メモ	実働荷重下における1週間の軸重算定結果によると，道路運送車両法の定める100kNをこえる軸重が多数記録され，1793回の違反軸重の通過が認められた．さらに，床版設計用のT荷重200kNを超える軸重（最大293.1kN）も31回の通過が認められた．					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート																		
文献番号	22 発表年		2008															
分類	WIM分析方法	WIM事例																
キーワード	交通状況分析	低速	画像解析															
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他												
特許等	特許申請	特許番号	実用新案															
文献名	交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム, 応用力学論文集, Vol. 11, pp. 997-1004 https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalam1998/11/0/11_0_997/_article/-char/ja/																	
著者名	鈴木啓悟, 佐々木栄一, 三木千壽, 山田均, 高岡愛, 宮崎早苗																	
概要	渋滞時などの低速走行状態にある車両の重量を分析する方法が確立されていないという状況を踏まえ, 本論文では, 低速走行状態と高速走行状態のひずみ履歴の差から交通状態を自動判別する方法を提案するとともに, 低速走行状態でのWeigh-in-Motionの方法として画像処理による車両位置検出を利用したものを開発している. また, どのような車種であるのかについても車両辞書を利用して特定できるようにしている.																	
対象橋梁	桁橋																	
使用センサ	溶接ひずみゲージ	光ファイバーひずみセンサ (FBG)																
センサ設置位置	主桁下フランジ																	
分析方法	   図-7 車両有無判別 (画像処理法)  図-13 対象車両と通行状況  比較  【推定方法】 抽出画像・辞書画像ともに画素値を値とする行列ベクトルとみなし $\frac{A \cdot B}{ A B } = \cos \theta$ を類似度とする。 <table><tr><th>車種</th><th>cosθ</th></tr><tr><td>トレーラー</td><td>0.71</td></tr><tr><td>大型トラック</td><td>0.57</td></tr><tr><td>タンクローリー</td><td>0.51</td></tr><tr><td>大型ダンプ</td><td>0.47</td></tr><tr><td>ミキサー車</td><td>0.35</td></tr></table> 図-8 車種判別処理  図-14 BWIM カーブフィッティング (データ補間)						車種	cosθ	トレーラー	0.71	大型トラック	0.57	タンクローリー	0.51	大型ダンプ	0.47	ミキサー車	0.35
車種	cosθ																	
トレーラー	0.71																	
大型トラック	0.57																	
タンクローリー	0.51																	
大型ダンプ	0.47																	
ミキサー車	0.35																	
特長																		
課題	画像処理の条件設定, タイムインターパスなど.																	
その他メモ																		

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	23	発表年	2004			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	Weigh-in-motion	車両重量計測	自動車荷重	維持管理		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	道路橋の交通特性評価手法に関する研究—橋梁部材を用いた車両重量計測システム (Bridge Weigh-in-Motion System) —, 国士技術政策総合研究所資料 第188号 平成16年7月 http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0188pdf/ks0188.pdf					
著者名	玉越 隆史, 中洲 啓太, 石尾 真理, 中谷 昌一					
概要	<目的> 全国レベルで大型車の通行実態の傾向を把握するため、橋梁部材の応答特性を実測データに基づいて分析し、簡便に均質なデータを取得できる通行車両の重量計測システムの提案。 <システムの基本構成> 測定に用いる機器は、ひずみゲージ、同ひずみアンプ、パソコンなど汎用的を使用し、安価で手軽に測定ができるシステム構成である。 <算定の流れ> 軸重、軸距等の諸元が既知である車両を用いて、主桁のひずみの影響線を求める事前計測を行う。それに続いて、通過が確認された車軸の軸重（未知量）と事前計測で求めた影響線（既知量）との線形和が、主桁のひずみの実応答に等しくなるとして、互いの差が最少となるように連立方程式を作成し、各車両の軸重、総重量などを求める本計測を行う。なお、車両通過の有無の検出、走行速度、軸距等の算定は、車軸の通過に対して鋭くとがった影響線形状となる床版のひずみ実応答を利用し、軸重列から一台一台の車両への分離は別途作成した車両判別アルゴリズムを使用する。  					
対象橋梁	コンクリート系床版・鋼単純鉄桁橋	(連続でも可)		(箱桁形式、PCT桁形式でも可)		
使用センサ	ひずみゲージ					
センサ設置位置	床版下面	上フランジ下面	下フランジ上面			
分析方法	<車軸の検知> 車両の検知は、図-2.3.1に示すような車軸の通過に対し、各軸毎に独立した応答変化を示す部材を用いることとし、走行方向に間隔において2カ所測定すれば、センサ間の距離と通過時間の差から走行速度や軸間距離を算出できる。 <車両重量の算出> ①事前計測（影響線の算出） 橋梁を両端単純支持の一本梁とし、荷重車による主桁ひずみの影響線をあらかじめ算出する。当システムでは、主桁断面係数Z、曲げ剛性EIといった諸量は構造条件やゲージ位置等の条件に応じて固有の値が定まることとなり、荷重車の軸数がn、橋梁の車線数をmとすると、k車線に設置したひずみゲージ位置に生じるひずみε_kは、各軸重P_{ik}により生じるひずみ$\varepsilon_i(x)$の計算値の重ね合わせで(式3)のように表すことができる。 そして、(式4)に示すように各車線毎に荷重車の各軸分を重ね合わせたひずみの計算値ε_kと荷重車走行時のひずみの実測値d_kとの差が最少となるように連立方程式を作成し、ひずみの影響線を設定する。 ②本計測（一般車両の重量算出） 未知の重量P_{ik}を荷重車を用いて求めた主桁のひずみの計算値$\varepsilon_k(x)$との誤差$s_k(x)$が最少となるように車線毎の道の軸重P_{ik}を計算する。なお、計算においては、位置xの代わりに時間tを用いて行う。 <各種の処理> ・ノイズの処理→不感帯により一定の値に達しない応答は対象外とする。 ・温度変化に対する処理→極大点間の中点の前後0.5秒の平均値を無載荷状態として自動0点シフトとする。 ・隣接軸の処理→隣接する車軸の重量比率は1.0～1.1の車両が90%近いことから、軸間距離1.6m以内は同一として仮定する。   					
特長	床版ひずみ計測結果に基づく「車両判別アルゴリズム」により車種特定し、車両毎の重量の算出精度を向上させている。ただし、次ページに示す本システムの適用条件内における算出精度の向上であることに留意する必要がある。					
課題	一般交通条件下での実測結果から、各橋梁で3%のエラーが生じている。エラー内容としては、総重量において負の値を算出しているもので、交通量の多い橋梁などにおいて、橋梁上の他の車両の影響を受けてRC床版下面で計測した波形に乱れが生じたことが原因であった。そのため留意点として、同一床版内に複数車線の高感度ひずみ計を設置しないこと、可能な限り両サイドの車輪直下に高感度ひずみ計を設置することが示されている。また、感度が良すぎるひずみ計を設置することについても、他車線の影響が大きくなり、小さすぎると車両軸を取りこぼしてしまう可能性があるため、感度の設定においては細心の注意が必要とのこと。					
その他メモ	付属資料として、国総研BWIM(2004.4版 Ver1.1)のプログラム本体がCD-Rで配布されている。					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	24	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	Moving Load	Weigh-In-Motion	Structural Health monitoring	Control Theory		
調査文献	土木学会論文集A, A1, A2	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	制御理論を用いたWeigh-In-Motionに関する基礎的検討, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 72, No. 2 (応用力学論文集Vol. 19), I_45-I_54, 2016 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejam/72/2/72_I_45/_pdf					
著者名	鈴木 健吾, 丸山 収, 関屋 英彦, 小西 拓洋, 三木 千壽					
概要	<目的> BWIMの省力化を目的として, 制御理論を用いて1自由度移動荷重-梁系における梁の応答から移動荷重の梁に対する荷重効果および車両重量を同定する手法の基礎的検討を行う。 <試案結果> (1) 路面凹凸なし ・荷重効果推定結果と梁の変位応答結果の比較より, 荷重外力については精度良く推定できた。 ・車両重量推定結果と梁の変位応答結果の比較より, 測定地点を支間中央とすれば2次振動の影響を受けることなく, 梁に対して1次振動のみで荷重効果・車両重量の推定が可能であるといえる。 (2) 路面凹凸あり ・実橋梁における舗装面に生じる凹凸や伸縮接手付近に生じる段差などが生じているため, 梁に路面凹凸を考慮して同様の試算を行い, 荷重推定が有効であるか検討した。 ・路面凹凸は既往の研究を踏まえて, 比較的良好な路面凹凸を表す$n=2.0$としたパワースペクトル密度で与えた。 ・荷重効果推定結果と車両重量推定結果ともに, 路面凹凸のない場合に比べて波形の乱れが大きい様子から, 路面凹凸が梁の表面応答に影響を及ぼしていることが読み取れる。しかし, 車両重量に関しては自己ノイズの少ない区間では平均5.0%の誤差で収まっていることから, 車両重量の解析は十分可能であるといえる。					
対象橋梁	梁による基礎検討段階であることから, 特に指定なし。					
使用センサ	変位計, 速度計を想定					
センサ設置位置	支間中央					
分析方法	<移動荷重および梁の振動方程式> 1自由度振動系としてモデル化した移動荷重の梁との連成振動を図-1のような対象モデルを考える。1自由度移動荷重の鉛直変位を$u(t)$とし, 梁のn次振動モードによる観測点z_1での動的たわみを$y_n(z_1, t)$とすると, 移動荷重の振動方程式は式(1)で与えられる。また, 観測点z_1での梁の動的たわみを$y(z_1, t)$とすると, n次振動モードに対する梁の振動方程式は式(2)~(4)で与えられる。 <移動荷重-梁系振動方程式の状態空間表示> ここでは, 梁の3次振動モード成分までを考慮して応答計算を行い, それを観測データとして用いる。また, 移動荷重による荷重効果を推定する際に, 梁に対しては1次振動まで考慮した定式化とした。 <同定問題の定式化> ・式(10)において, 荷重効果の時間関数$d(t)$を精度良く同定するために式(13)のような定式化を行う。 ・式(13)に, 式(10)より与えられる拘束条件を考慮して時間方向の積分値を最小とする問題を考える。 ・式(15), (16)について, 境界条件および未定の2点境界値問題より等価な荷重効果(式(18))及び車両重量(式(19))を求める。 $\begin{bmatrix} \dot{r}_1(t) \\ \dot{z}_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega_1^2 & 2\beta_1\omega_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1(t) \\ z_1(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d_1(z_1, t) \quad (9)$ $\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{X}(t) - \mathbf{G} \mathbf{d}(t) \quad (15)$ $\mathbf{X}(t) = \Phi(t) \mathbf{X}(0) - \Gamma(t) \mathbf{d}(t) \quad (10)$ $\mathbf{d}(t) = \frac{1}{2} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G}^T \dot{\mathbf{z}}(t) \quad (16)$ $\mathbf{L}(\mathbf{X}(t), \mathbf{d}(t)) = \{\mathbf{Y}(t) - \mathbf{C}\mathbf{X}(t)\}^T \mathbf{R}^{-1} \{\mathbf{Y}(t) - \mathbf{C}\mathbf{X}(t) - \mathbf{d}(t)\}^T \mathbf{B} \mathbf{d}(t) \quad (13)$ $\dot{\mathbf{z}}(t) = -\mathbf{A}^T \dot{\mathbf{z}}(t) + 2\mathbf{C}^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{Y}(t) - \mathbf{C} \mathbf{X}(t)] \quad (17)$ $W_c = m_v \{g - \ddot{u}(t)\} \varphi_1(vt) \varphi_1(z) \quad (18)$ $W_v = m_v \{g - \ddot{u}(t)\} \quad (19)$					
特長	1自由度移動荷重-梁系において, 梁の変位・速度応答を観測データとした, 梁に対する移動荷重の荷重効果および車両重量の同定を制御理論により実施している。					
課題	・等価な車両重量の推定において, 3次振動までの観測データに対し1次振動のみの考慮で推定したため, 2次振動による推定値のずれが生じた。 ・路面凹凸なしの結果について, 荷重効果推定結果(W_e)および車両重量推定結果(W_v)の曲線に細かな上下動が見られるが, これは式(13)で与えた重みRとWの設定によるものであり, 最適な重みについての検討が不十分である。 →あくまで断面が均一な単純梁を対象とした研究段階の検討であり, 高次振動や車両連成振動等の種々のノイズを含んだ実測値による推定制度の検証は未実施であることから, 実用段階には至っていない。					
その他メモ						

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	25	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	MEMS加速度センサ	S/N比	パワースペクトル密度			
調査文献	土木学会論文集 A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	橋梁の活荷重応答計測に必要なS/N比に関する研究, 構造工学論文集 Vol. 62A, pp. 174-184, 2016. https://www.jstage.jst.go.jp/article/structcivil/62A/0/62A_174/_pdf/-char/ja					
著者名	関屋英彦, 木村健太郎, 丸山收, 三木千壽					
概要	外力に対する応答を計測するには一般的に変位計やひずみゲージが用いられているが, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の進歩に伴い, 新たに MEMS加速度センサを用いた計測手法が提案されている. MEMS加速度センサは磁石等を用いることによって, 塗膜の上から取り付けが可能であり, 施工性に優れている. さらに, MEMS加速度センサは安価で小型なことから構造物のヘルスマニタリングへの活用が期待されている. 本研究では, まず 10 種類の加速度センサを用いて静置試験を行うことによって, 同一条件下における各加速度センサの自己ノイズレベルを評価し, さらに, 各加速度センサの自己ノイズが二階積分結果に与える影響について評価を行った. 次に, 9 種類の加速度センサを用いて実橋梁実験を行い, その加速度応答を比較・検証することによって, 各加速度センサの計測精度の検証を行った. 最後に, 加振入力振動数および振幅をパラメトリックに変化させた定常加振実験を実施し, 低振動数域を精度良く測定するために必要なS/N比を明らかにした.					
対象橋梁	鋼単純合成I桁橋	加振器				
使用センサ	MEMS加速度センサ					
センサ設置位置	主桁下フランジ					
分析方法	本研究では, まず10種類の加速度センサを用いて同時に静置試験を行うことによって, 同一条件下における各加速度センサの自己ノイズレベルの把握を行った. 鋼板にそれぞれの加速度センサを螺子で固定し, 建物1階の床の上に静置する方法で行った. また, 供用中の橋梁に9種類のMEMS加速度センサと1種類のサーボ式加速度センサを主桁橋軸中央下フランジに L 型鋼製治具を用いて設置した. 本橋梁は土工部から高架橋に移す箇所に位置しており, 土工部に三脚を置くことによって, 接触式変位計を用いた変位計測が可能であった. そのため, 加速度応答と変位応答の関係を検討することを目的とし, 複数の加速度センサを固定したL型鋼製治具の真下に接触式変位計を設置した. 次に加振器を用いて, 振動数と振幅をパラメトリックに変えていき, 異なるS/N比における定常加振実験を行うことによって, MEMS 加速度センサを用いて低振動数域の変位応答を精度良く測定するために必要なS/N比を明らかにする. 静置試験の結果より, サーボ式加速度センサも一定の自己ノイズを有しており, サーボ式加速度センサの計測結果が真値になるとは限らない. し たがって, 本研究では, 各加速度センサの計測結果を二階積分することによって, 変位波形を算出し, その変位波形とレーザー変位計結果の比較することで精度良く計測を行うために必要なS/N比の検証を行った. それぞれの加速度センサによって得られた変位応答算出結果より, 1.0Hz以下の低振動数域において, S/N比が概ね11[dB]を上回った加速度センサA, B, Hとサーボ式加速度センサの変位応答算出結果は接触式変位計結果と良い一致を示した. しかしながら, 加速度センサDは, 1.0Hz以下の低振動数域において, S/N比が概ね11[dB]を上回っているが, 変位応答算出結果は接触式変位計結果と大きく異なる結果となった. この理由は, 加速度センサ D の分解能 (745 [$\mu\text{m/s}^2$]) が低周波数帯の加速度計測 (全振幅 0.1 [mm], 周波数 0.1 [Hz]) の場合, 発生する加速度は 19.7 [$\mu\text{m/s}^2$]である.) に対して, 大き過ぎたためだと考えられる. し たがって, 橋梁の加速度記録から変位応答の算出を目的とした場合, 十分小さい分解能を有する加速度センサを選定する必要がある.					
特長	 					
課題	複数のMEMS加速度センサを同一条件で比較し, 低振動数域を精度良く測定するために必要なS/N比を明らかにし, 実橋梁における加速度記録を二階積分することによって変位応答を算出することで, その性能を評価している.					
その他メモ	橋梁の活荷重に対する計測を長期間にわたって継続的に精度良く行なうためには, 自己ノイズや分解能の仕様に加えて, 温度変化に伴う感度特性の変化や加速度センサの姿勢等によって生じるゼロ点不均衡といった長期安定性に優れた加速度センサを使用することも重要である.					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	26	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例				
キーワード	加速度から変位	加速度	自由振動仮定法	測定誤差	車軸検知	
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案, 土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 1, pp61-74 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/72/1/72_61/_pdf					
著者名	関屋 英彦, 横関 耕一, 木村 健太郎, 小西 拓洋, 三木 千尋					
概要	本論分は、加速度記録を数値積分して変位を算出する手法を提案し、センサの測定誤差が変位応答算出結果に及ぼす影響を数式的に明らかにしたものである。 論文では、8種類のMEMS加速度センサと、1種類のサーボ式加速度センサの静置した状態でのノイズレベルを測定している。ノイズレベルはセンサによって大きく異なり、それが加速度を数値積分して算出した変位応答の精度に大きく影響する。 また、測定誤差の影響をより小さくする変位算出方法として自由振動仮定法を用いた手法を提案している。 さらに実橋梁において実証試験を行い、提案した手法の有効性を示している。					
対象橋梁	板桁	RC床版				
使用センサ	MEMS加速度計	サーボ式加速度計	接触式変位計			
センサ設置位置	主桁下フランジ	主桁端部垂直補剛材上部				
分析方法	1) センサのノイズレベル 静置した状態でMEMS加速度センサ(A~H)とサーボ式加速度センサのノイズレベルを測定し、ノイズレベルの小さい加速度センサを特定している。 ノイズレベルの小さい(200[μG/√Hz]以下)加速度センサ: センサA, B, Cとサーボ式センサ 2) 測定誤差が変位応答算出結果に及ぼす影響 加速度波形を積分して変位応答を算出する際、初期速度推定法(別論文で提案されている手法)と自由振動仮定法を用いた場合で、測定誤差がどの程度影響するかを数式的に導いている。 初期速度推定法: $\sqrt{T^3 / (48 \times fs)}$ ここに T: 積分時間[s] 自由振動仮定法: $\sqrt{T^3 / (192 \times fs)}$ fs: サンプリング周波数[Hz] 自由振動仮定法の方が誤差の影響を小さく抑えることができるが、一方で速度の初期/末期条件に含まれる誤差、変位の末期条件に含まれる誤差が新たな誤差要因として加わる。 3) 実橋梁における実証試験 MEMS加速度センサ(A~H)とサーボ式加速度センサを同一橋梁に設置し、初期速度推定法と自由振動仮定法で変位応答を算出している。またその結果を、接触式変位計の測定結果と比較し、精度を検証している。1)でノイズレベルの小さかったセンサの場合、接触式変位計の最大変位6.8[mm]に対して誤差が0.34[mm] (5.0%)以内に収まることが示されている。 自由振動仮定法を用いた変位算出方法 (1) 加速度を計測する。 (2) 加速度応答のフーリエ変換結果から1.0Hz以下の成分を取り除く(活荷重による影響と直流成分を取り除く)。 (3) (2)の結果を積分する。 (4) (3)の結果を積分する。 (5) (3)、(4)を逆フーリエ変換し、活荷重の影響を除去した自由振動の速度波形と変位波形を算出する。 (6) (1)の加速度波形から、車両が進入して退出するまでを取り出し、積分して速度波形を算出する。 (7) (6)の速度波形の最初と最後の速度が、(5)の速度波形の車両進入時、退出時の速度となるように(6)の波形を調整する(線形成分を加減算する)。 (8) (7)で調整した速度波形を積分して変位波形を算出する。 (9) (8)の変位波形の最初と最後の変位が、(5)の変位波形の車両進入時、退出時の変位となるように(8)の波形を調整する(線形成分を加減算する)。  					
特長	9個のセンサを同一条件で静置試験することにより、カタログ値ではないノイズレベルの比較を行っている。 - 加速度波形を積分して変位応答を算出する場合の測定誤差の与える影響について考察している。 - 測定誤差が小さい場合、手法の違いによる誤差の影響も小さくなる。 1.0Hz以下の静的たわみ成分と1.0Hz以上の動的たわみ成分についても変位応答算出結果が示されている。					
課題	自由振動仮定法は、車両通過前後における橋梁の自由振動の速度および変位の時間平均が0になるという仮定を用いている。しかし通常の道路橋では偏心走行の影響を受け、必ずしもこの仮定が成り立たないと考えられる。今後は車線ごとに変位を計測しこの問題を解決する手法を確立することを目指す。					
その他メモ	- 車両の進入、退出は加速度記録に25Hzのハイパスフィルタを通した波形により求めている。 - 対象橋梁は支間長35m、総幅員18.3mの単純合成6種1桁橋。固有振動数は2.0Hz～4.0Hz。					

WG2 荷重評価に関する検討レビューシート						
文献番号	27	発表年	2016			
分類	WIM分析方法	WIM事例	その他			
キーワード	MEMS加速度センサ	変位計測	Portable-Weigh-In-Motion			
調査文献	土木学会論文集A, A1	土木学会論文集F	構造工学論文集	応用力学論文集	海外	その他
特許等	特許申請	特許番号	実用新案			
文献名	MEMS加速度センサを用いた変位計測に基づくPortable-Weigh-In-Motionシステムの提案, 土木学会論文集A1, Vol. 72, No. 3, 364-379, 2016 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejseee/72/3/72_364/_pdf					
著者名	関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽					
概要	MEMSセンサによるモニタリングシステムの1つとして, 可搬型車両重量推定システム (Portable-Weigh-In-Motionシステム) の開発を行った。具体的には, まず自由振動仮定法において重要となる車両検知の精度向上を目的とし, 車両通過時の応答の鮮鋭化の検討を行った。その上で, その鮮鋭化された応答から, 車両が橋梁に進入した瞬間および退出した瞬間の検知, 車軸数の特定, 走行車線の特定を行い, その精度について検証した。次に, 車両検知応答を用いることによって, 全自動にて, 加速度記録から車両通過時の変位応答を算出し, 車両の種類や走行速度の違いによる変位応答算出結果の精度について検証を行った。最後に, 加速度記録から算出した変位応答を用いたPWMシステムを構築し, 実橋梁実験において, ひずみゲージによるWIM結果と本システムの結果を比較検証することにより, 本システムの実用性を示した。					
対象橋梁	RC床版桁橋					
使用センサ	MEMS加速度センサ					
センサ設置位置	文向中央主桁トランジ (変位応答算出用)	端補剛材 (車両検知用)				
分析方法	1) 車両通過時の応答の鮮鋭化 加速度の2乗の二次微分フィルタ (下式) を適用することによって, 車両通過時の応答の鮮鋭化を行っている。 $A_{dd} = (A_{(i)} - A_{(i-1)}) - (A_{(i+1)} - A_{(i)})$ $= -A_{(i-1)} + 2A_{(i)} - A_{(i+1)}$ ここで, A_{dd}: 加速度応答の差分の変化量 $A_{(i)}$: i番目の加速度応答値 二次微分フィルタは応答の差分の変化量を算出しており, 車両通過時の応答のように鋭敏な応答を鮮鋭化する際に有効なため, これにより, 車両通過時の応答を検知できる (図-6)。 2) 車両走行車線の特定 複数主桁の端補剛材に設置したMEMS加速度センサ (車両検知センサ) の応答は, 走行車線によって応答が異なるため, 複数主桁の応答を一括に処理することにより, 複数車線における走行車線の特定を行うことができる (図-9)。 3) 車軸数の判定 デザインデータブックの車両軸間距離および車両走行速度を基に, 車軸検知区間と車軸非検知区間を設定することで, 車軸の判定を可能とした (図-11)。 4) 変位応答算出 上記で構築した車両検知システムと自由振動仮定法を用いて, 全自動にて加速度記録から変位応答を算出する (図-16)。 5) 試験車両重量の推定 Mosesの手法をベースとし, 各軸の影響線を軸重倍し, 足し合わせたものと, 実測値の誤差二乗和が最小となるように計算することで, 各軸重を算出している。各軸重の総和が車両重量となる。影響線は変位の影響線を使用している (図-16)。					
特長	MEMS加速度センサを用いて, 車両検知の精度向上策を適用することにより, 精度の高いWIMを実現している。					
課題	本論文の車両検知システムは, 一定の閾値を用いて車両通過時の応答を検知していることから, 渋滞時や低速車両走行時は, 車両通過時の応答が小さくなり, 車両検知の精度が低下することが考えられる。また, 車両が並走した場合, 車両が走行していない車線において, 車両が走行したと判定する誤検知が14台 (5%) あった。今後, 渋滞時や低速車両走行時の車両検知精度向上および, 車両並走時の誤検知率の減少が課題である。					
その他メモ						

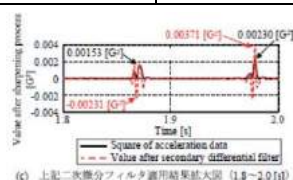


図-6 二次微分フィルタ適用結果

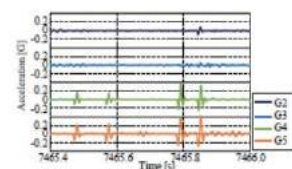


図-9 第3車走行時加速度応答

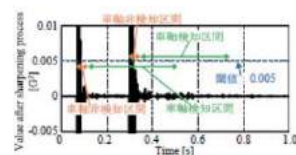


図-11 車軸数判定アルゴリズム



図-16 MEMS加速度センサによるWIMフロー

§2 活荷重分析の考え方、ばらつきの要因

2-1 活荷重の分析方法

橋梁構造物の損傷において、設計荷重を上回る過大な車両の走行による疲労が大きく関わっていると考えられている。構造物を管理する上で、走行する自動車荷重を把握することが重要となっている。

走行中の車両荷重を計測するシステムは **Weigh-in-Motion(WIM)** と呼ばれ、従来は路面に軸重計を埋め込んで直接車両重量を計測していたが、装置自体が高価であり、設置やメンテナンスに多大なコストを必要とする。それに対し、橋梁を秤に見立てて、車両走行により橋梁部材に生じるひずみや変位を測定し、その応答値により間接的に荷重を推定する **Bridge Weigh-in-Motion(B-WIM)** が提案されている。

B-WIM による荷重推定には、**Moses¹⁾**によって提案された手法がよく用いられる。**Moses** の解析法は、車両通過時に橋梁部材に生じるひずみと影響線を利用する。

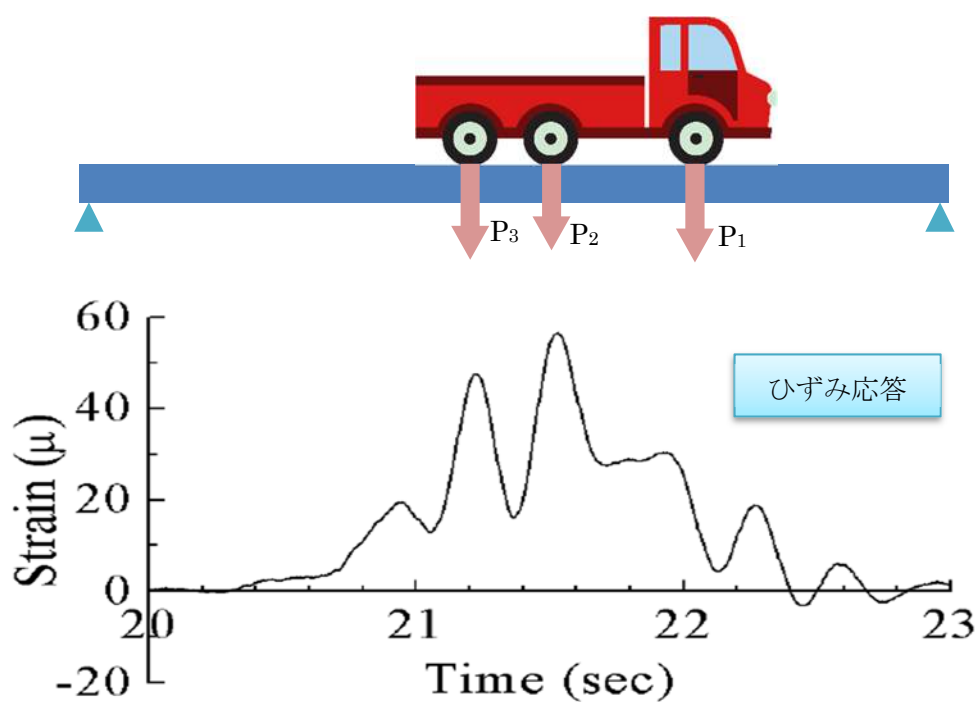


図 2-1-1 B-WIM のイメージ

影響線を利用する B-WIM の解析手順は以下のようなフローになる．ここでは，ひずみを計測する場合について説明する．

(1) 影響線の算出

対象橋梁において，軸重と軸間隔が既知の車両を走行させ，ひずみを計測する．計測データを元に影響線を求める．

(2) 速度検知

車両の速度を測定するために，対象橋梁の 2 箇所にゲージを設置する．測定データを微分することで，車軸の通過時刻を求める．

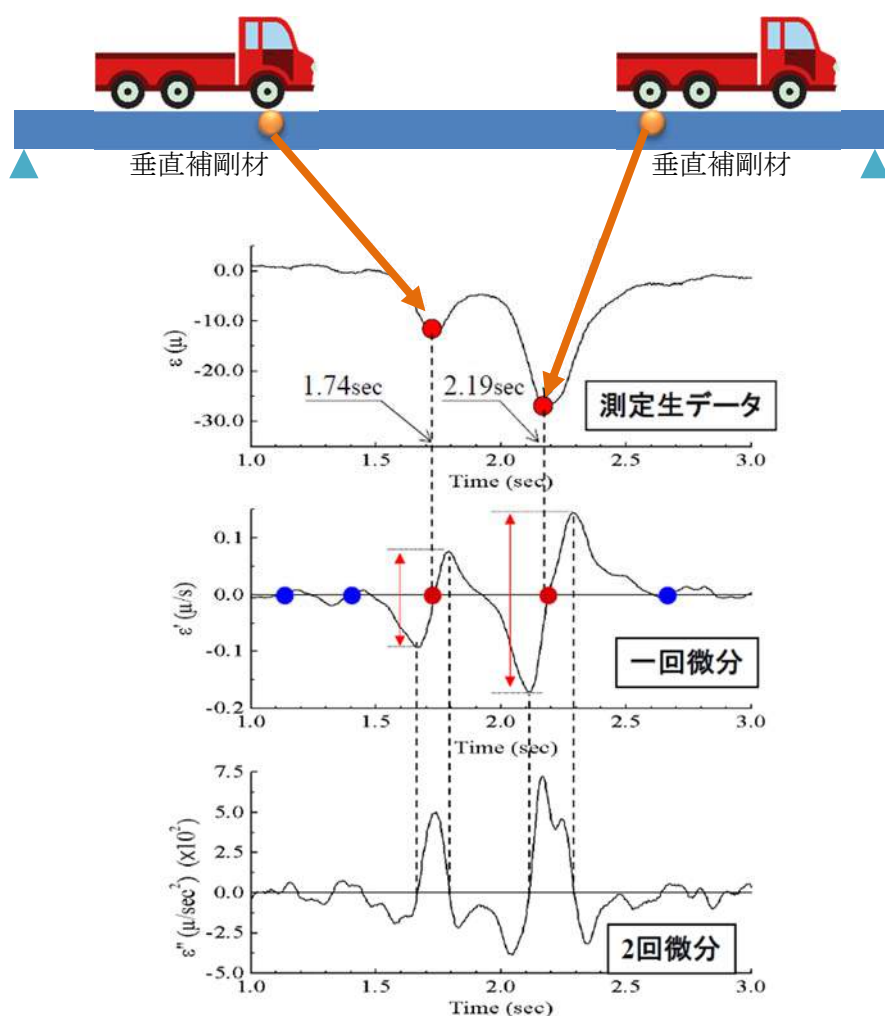


図 2-1-2 車両速度の測定方法

車両の速度は次式で求められる.

$$V = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

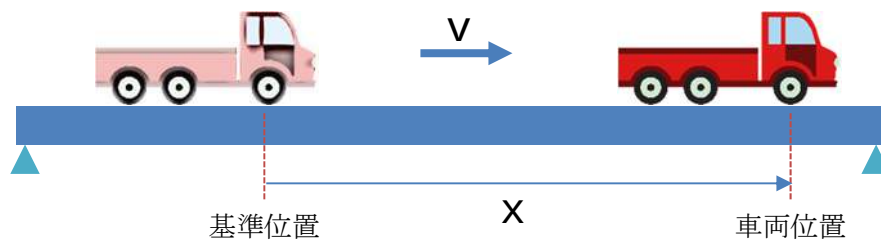
ΔL : ゲージ間隔

Δt : 時間ずれ

(3) 任意時刻の位置を特定

指定時刻の車両位置は次式で求められる.

t_B



$$x = v \times (t - t_B)$$

x : 車両位置 (m)

v : 車両速度 (m/s)

t_B : 基準位置を通過した時刻 (s)

t : 時刻 (s)

(4) 軸重を決定

影響線から推定されるひずみと実測値との誤差が最小になるように, 未知の軸重を決定する.

$$\varepsilon_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{ax}} A_n \cdot I_{ni}$$

$$E = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{j=1}^{N_T} [\underbrace{\varepsilon_i(j\Delta t)}_{\text{推定値}} - \underbrace{\varepsilon_i^*(j\Delta t)}_{\text{実測値}}]^2 \rightarrow \text{最小化}$$

i : position

j : data number

N_G : 測定点数

N_T : データセット数

B-WIM による解析の利点には以下のものが挙げられる.

- ・ 運転者が走行中に気付きにくい.
- ・ 路面を傷付けない.
- ・ 軸重計に比べ安価である.
- ・ 高速走行中の車両重量を計測可能である.

一方で以下のような欠点も存在するため, 利用に際しては留意する必要がある.

- ・ キャリブレーション試験が必要.
- ・ 渋滞時の測定に向いていない.
- ・ 車両が連行あるいは並走している場合に精度が落ちる.
- ・ 影響線を利用する場合、影響線が変化する状況（アスファルト剛性が変化するなど）に対応できない.

【参考文献】

- 1) Moses, F. : Instrumentation for Weighting Trucks-In-Motion for Highway Bridge Loads, FGWA/OH-83/001

2-2 影響線ベースによる分析方法のフロー

B-WIM の一般的な方法として、影響線を用いた分析方法がある。ここでは、影響線を用いた一般的なデータ分析手法のフローを概説するとともに、その手法の課題を解決するための Wavelet 変換を用いた影響線ベースのデータ分析方法について紹介する。

(1) 一般的なデータ分析方法

影響線を用いた Weigh-in-Motion には、以下に示す 2 つのタイプのひずみデータを組み合わせて利用しているのが一般的である¹⁾。

＜影響線ベースの Weigh-in-Motion に用いられるひずみデータ＞

タイプ①：影響線長の長いひずみ波形データ

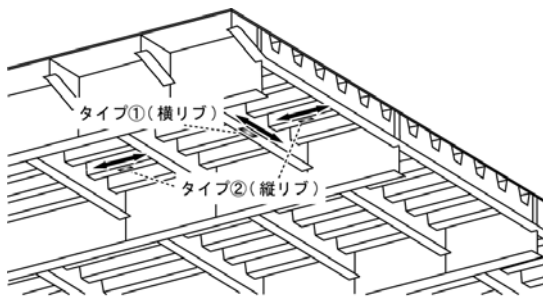
(鋼桁橋では桁下フランジ、鋼床版構造では横リブ)

タイプ②：影響線長の短いひずみ波形データ

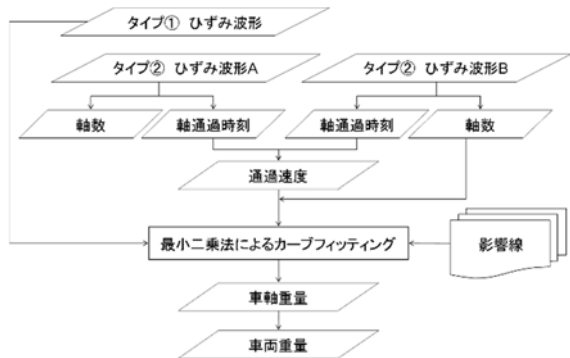
(鋼桁橋では鉛直スティフナー、鋼床版構造では縦リブ)

一般的な影響線ベースによる Weigh-in-Motion の事例として、鋼床版を有する鋼道路橋を対象とした場合のセンサ配置、データ分析の流れ等を図 2-2-1 に示す。タイプ①のデータは、橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けにくいことから、車両軸重量の逆解析に用いられているデータであるが、このタイプのデータでは、図 2-2-1 (c) に示すように車軸の通過によるひずみ波形のピークが明瞭に見られないため、車両軸重量分析に必要な車軸通過時刻をタイプ②のデータから推定している。タイプ②の方のデータでは、車軸通過に伴うひずみ波形のピークが明瞭に顕れるため(図 2-2-1 (d))、車軸数や各車軸のセンサ直上の通過時刻といった情報が取得できる。そのため、同一車線上の複数個所で計測すればデータの相関分析により測定区間内の平均的な車両速度を算出することができ、各車軸位置の通過時刻歴を推定することができる。そのうえで、推定した各車軸の位置に速度補正した影響線を配置し(図 2-2-1 (e))、実ひずみとの誤差二乗和が最小になるように、最小二乗法を用いてカーブフィッティングを行う(図 2-2-1 (f))。このカーブフィッティングは軸毎の時刻歴上に配置された影響線を軸重倍し、計算値ひずみを導いている。

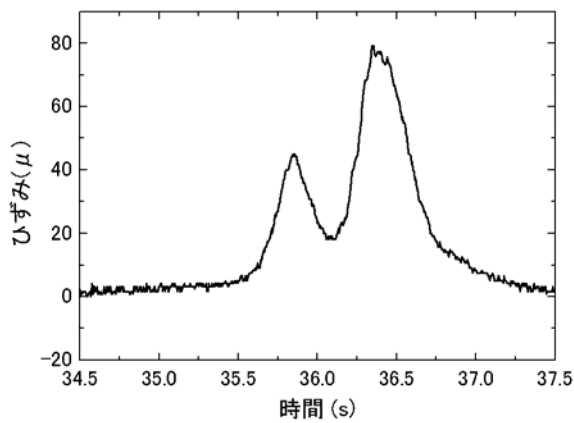
従って、上記のような当該データ分析プロセスを適用する場合、センサ配置としては、各車線について、車軸数、平均車両速度、車軸位置推定のため、タイプ②のデータ測定点が 2 箇所、車軸重量逆解析のためのタイプ①のデータ 1 箇所の最低計 3 箇所 (3 チャンネル) のひずみデータを取得することが必要である。また、この際、車軸位置の推定誤差を最小限に抑えるため、タイプ②のデータ測定点間距離が短く設定するのが望ましいとされている。これは、影響線がピークを有する形状であるため、車両重量を分析する際の車軸位置推定のわずかな誤差が車軸重量推定精度を大きく低下させる原因ともなり得ることに起因するが、根本的に走行中の速度変化には対応が難しい等の課題が指摘されているので留意が必要である。



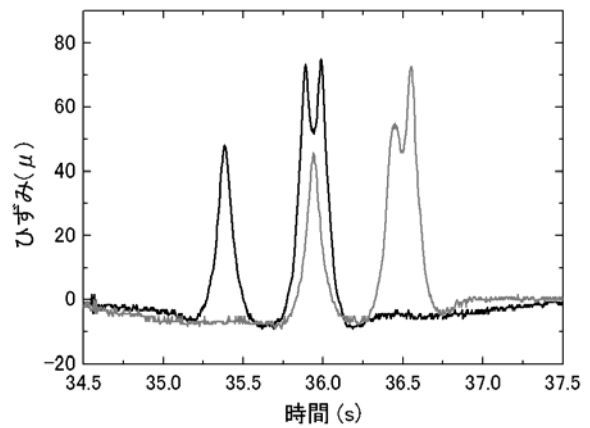
(a) センサ配置



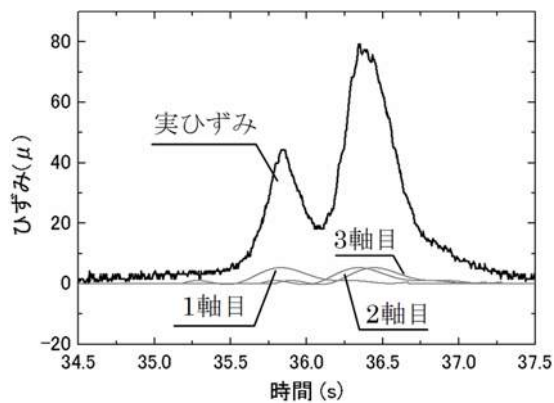
(b) 処理フロー



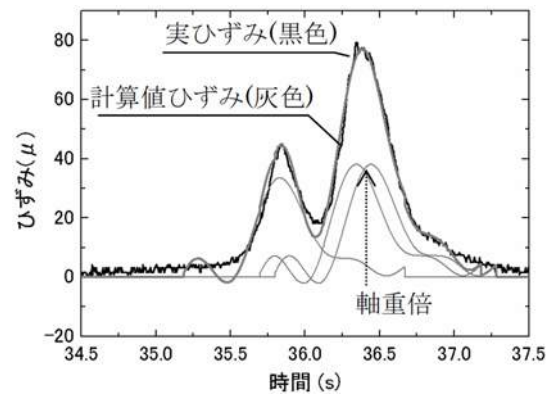
(c) タイプ①のひずみ波形(3 軸車両)



(d) タイプ②のひずみ波形(3 軸車両)



(e) 軸時刻歴に対する影響線の配置



(f) 最小二乗法を用いたカーブフィッティング

図 2-2-1 鋼床版を対象とした Weigh-in-Motion データプロセス

(2) Wavelet 変換によるデータ分析手法

正確な車軸位置情報分析を目的として、従来、タイプ②のデータから得ていた車軸位置、車軸数、車軸間隔、車両速度等の車両情報を、影響線長の長いデータ（タイプ①のデータ）から Wavelet 変換により直接的に取得するプロセスを導入する手法²⁾が提案されている。本手法は、橋軸直角方向の車両の走行位置の影響を受けにくく、かつ、速度検出による車両軸位置の推定を行う必要もなくなるため、車軸重量分析の安定的な精度確保を図るとともに、システム上必要となるセンサ数の減少を実現することができるとしている。

図 2-2-2 に本手法のデータ分析の流れを示す。図 2-2-2 は最小チャンネル数となる 1 チャンネルでシステムを構成した場合のセンサ配置、データ分析手法を示している。

タイプ①のデータである、横リブフランジの橋軸直角方向（横リブの軸方向）でのデータに対して、Wavelet変換を行うと軸通過情報を示すピークを有する波形が得られる。例えば、図2-2-3(a)は、前1軸後2軸の3軸車両通過時の横リブフランジで得られたひずみ波形の例であるが、その波形に対して、文献20)に示したWavelet変換適用条件（逆双直交Wavelet: rbio2.4, サンプリングレート250Hzに対してスケール15に着目）を適用すると、図2-2-3(b)に示す波形が得られる。

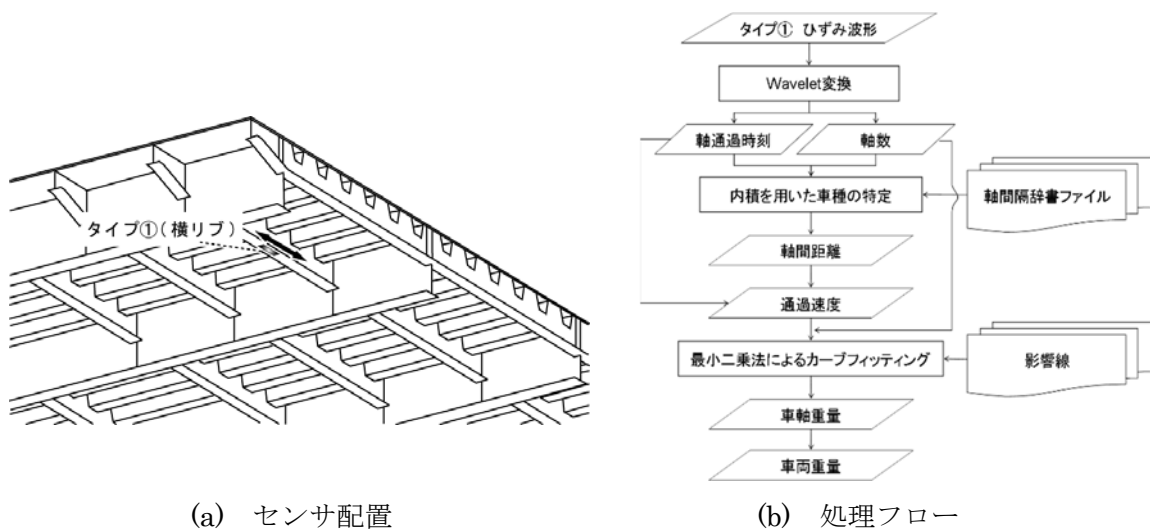


図 2-2-2 Wavelet 変換を用いた Weigh-in-Motion

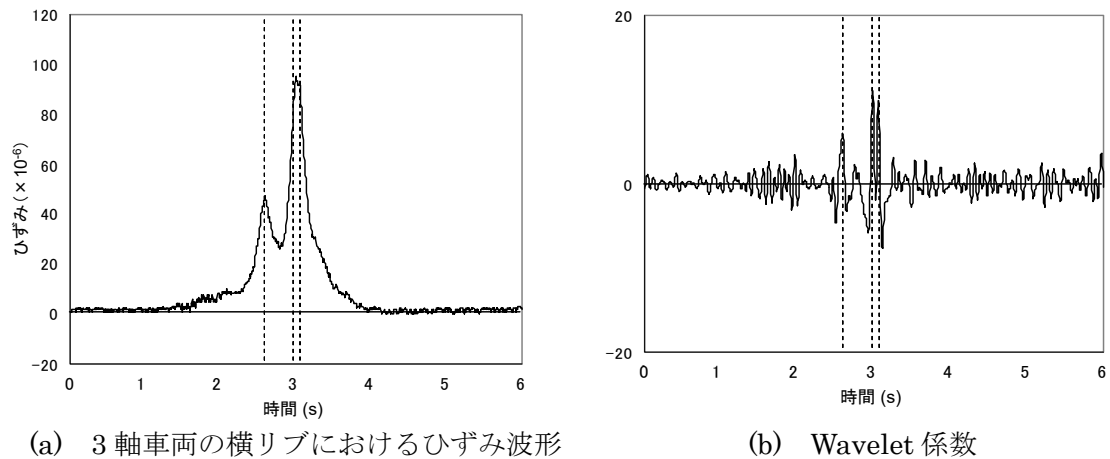


図 2-2-3 Wavelet 変換による軸通過時刻の取得

次に、図 2-2-3 (b) に示すような Wavelet 変換後の波形のピークの発生時刻を各軸の通過時刻とし、この情報から、車種、車両軸間隔、車両速度を分析する。車種判別では、タンクローリーなど我が国で走行している殆どの車種について、車軸間隔等のデータを格納した車両辞書データベース³⁾を利用し、さらにそのデータベースに格納された軸間距離のデータから車両軸間隔、さらには、速度を分析する。表 2-2-1 にデータベースに格納されている軸間隔情報の例を示す。データベースには 1 軸目の車軸を起点とした時の各車軸までの距離が格納されている。本事例の車両データとしては、3 軸車と 4 軸車のものとして、それぞれ 96 種、28 種の車種を格納したデータベースを利用した。横リブの実測ひずみ波形を Wavelet 変換することによって得られた各軸の通過時間から車軸間の時間の比を求め、車軸間隔の比、例えば、1 軸・2 軸間の距離と 2 軸・3 軸間の距離の比を求めている。その比は、ベクトルとして、(1 軸・2 軸間の距離、1 軸・3 軸間の距離) というベクトルで表し、これを正規化し、単位ベクトルとする (ベクトル A) (図 2-2-4)。一方、車両辞書データベースから得られる全ての車種の軸間隔の比も同様に正規化した単位ベクトル (ベクトル B) で表す。その上で、これら 2 つのベクトルの内積を取り、その値から車種の判別を行う。求めた内積値は 2 つのベクトルのなす角 θ のコサイン値となり ((1)式)、軸位置情報と車両データベースの車軸間隔が似ていれば、0 から 1 の範囲でより 1 に近い値を示す。車両辞書ファイルに格納されている車種のうち、このコサイン値が最も大きいものを該当車種とした³⁾。

$$\cos\theta = \frac{A \cdot B}{|A||B|} \quad (1)$$

表 2-2-1 車両辞書データベース例

	1 - 2 軸間	1 - 3 軸間	1 - 4 軸間
A 社製 3 軸大型トラック	5870	7070	-
B 社製 3 軸大型ダンプ	3200	4520	-
B 社製 4 軸大型トラック	1850	6230	7430
C 社製 4 軸タンクローリー	3160	10650	12050

(軸間単位：mm)

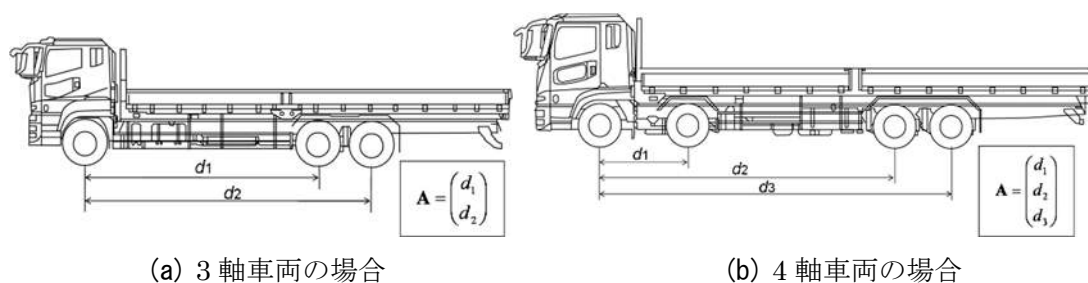


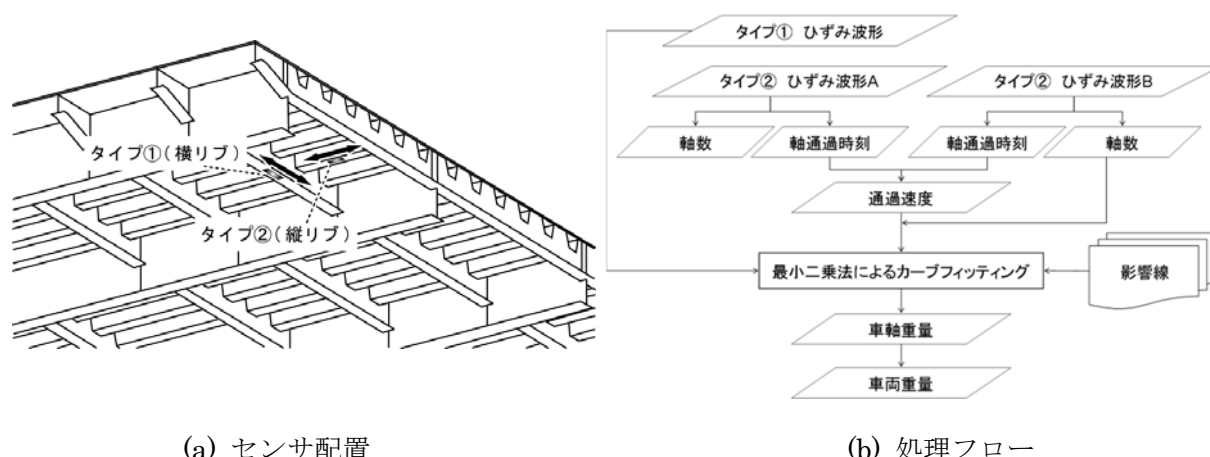
図 2-2-4 ベクトル A

さらに、このような車種判別によって車種を特定することができれば車軸間隔の距離情報を得ることができることから、横リブにおける実測ひずみ波形を Wavelet することによって得られた車軸

間距離を横リブ実測波形上での車軸の時間間隔を除すことにより車両の速度を検知することが可能になる。

従って、タイプ①のデータである、横リブフランジにおけるひずみ波形を Wavelet 変換し車両辞書ファイルとの照合を行うことにより、車軸重量を分析するために必要な情報である、車軸通過時刻（車軸位置）、影響線補正のための速度を取得することができ、すなわち、1 チャンネルの情報で車軸重量、その合計である車両重量を分析することが可能である。

さらには、車両辞書ファイルを用いない場合として、図 2-2-5(a)に示すように縦リブのひずみセンサを 1 つ追加し、図 2-2-5(b)のようなデータ処理を行うことにより、2 チャンネルで車軸重量、車両重量を分析可能である。すなわち、縦リブのひずみ波形に見られるピークと、横リブのひずみ波形を Wavelet 変換した波形のピークの通過時間から、速度を検出する方法である。この場合も、速度は、車両重量分析の際の影響線補正に用いるもので、横リブでの計測波形における車軸通過時刻は、Wavelet 変換した波形から得られることから、従来よりも精度向上を期待でき、かつ、チャンネル数は 3 チャンネルから 2 チャンネルに低減できると考えられている。



(a) センサ配置

(b) 処理フロー

図 2-2-5 車両辞書ファイルを利用しない 2 チャンネルシステム

以上、これまで多く適用例のあるケースとして、ひずみ情報を用いた手法について説明しているが、Weigh-in-Motion は荷重に対する応答を用いたものであり、変位等の情報からも分析可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史: リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集 第 772 号/I-69, pp.99-111, 2004.
- 2) 坂柳皓文, 佐々木栄一, 山田均, 勝地弘: 影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.582-589, 2008.
- 3) 竹本健一, 石川裕治, 宮崎早苗, 佐々木栄一, 三木千壽: ひずみセンサと定点カメラによる車種判別手法, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), 2006.7.

2-3 ばらつきの要因

影響線ベースの B-WIM の精度のばらつきの要因としては、車両走行速度の評価、低速走行、走行車線の特定、車両の並走走行、センサ設置位置などが挙げられる。以下に、詳細を述べる。

2-3-1 車両走行速度の評価

影響線がピークを有する形状であるため、車両重量を分析する際の車軸位置推定のわずかな誤差が車軸重量推定精度を大きく低下させる原因となり得る。車軸位置推定のためには車両走行速度を適切に評価する必要がある。

影響線長の短いセンサ位置での情報を用いて車両の平均的な速度を取得して、影響線長の長いセンサ位置でのデータで車両の重量を分析する方法が一般的であるが、平均的な速度を用いているために、影響線長の長いセンサ位置における車両通過時間がずれてしまい、B-WIM 分析結果の精度を低下させる恐れがある。

この問題の解決策として、Wavelet 変換を導入して速度を適切に評価するという方法¹⁾がある。

2-3-2 低速走行

渋滞時や低速車両走行時は、車両通過時の応答が小さくなり、B-WIM の精度が低下することが報告されている²⁾。低速走行状態での B-WIM の方法として、画像処理による車両位置検出を利用したものが開発されている³⁾。

2-3-3 車両重量

車両重量が軽いと、車両通過時の応答が小さくなり、B-WIM の精度が低下する。B-WIM は大型車を対象にすることが多いが、乗用車等の軽い車両に対しては不向きであると考ええる。

2-3-4 走行車線の特定

B-WIM を行うには、走行車線を特定する必要がある。一定の閾値を用いた車両通過時の応答を検知する車両検知システムでは、車両が並走した場合や、車両が走行していない車線において、車両が走行したと判定する誤検知が報告されている²⁾。また、車線変更を行った場合、走行車線の特定が困難であり、B-WIM の結果のばらつきに影響を与えられられる。

2-3-5 車両の併走走行

車両が併走して走行した場合、単独で走行した場合と応答が異なるため、B-WIM の結果のばらつきに影響を与える。この問題の解決策として、試験車両を異なる車線で走行させた影響線を求めておき、総重量から各軸重を分離して算出するなどの方法がとられている^{3,4)}。

2-3-6 センサの設置位置

車両重量算出用のセンサの設置位置について、影響線長の短い部材にセンサを設置した場合、処理速度が速く、他車線の影響などの制約が少ないと考えられるが、直接的に軸重を算出する部材応答値が車両振動や、路面凹凸等の動的軸重の影響を受けることから、静的軸重値を精度よく推定すること

が困難である．影響線長の長い部材にセンサを設置した場合は，振動の影響を受けにくく，顕著な振動成分が現れた場合でも適切なフィルタ処理を行うことで，振動成分を除去して重量を算出できる
5)．

【参考文献】

- 1) 坂柳皓文，佐々木栄一，チャンペン・ティーラボン，鈴木啓悟，石川裕治，山田均，勝地弘：影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用，構造工学論文集，Vol.54A，pp.582-589，2008.
- 2) 関屋英彦，小西拓洋，木ノ本剛，三木千壽：MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案，土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 3, pp.364-379, 2016.
- 3) 鈴木啓悟，佐々木栄一，三木千壽，山田均，高岡愛，宮崎早苗：交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム，応用力学論文集，Vol.11, pp.997-1004，2008.
- 4) 石尾真理，中谷昌一，玉越隆史，中洲啓太：影響線の重ね合わせを用いた WIM システムについて，土木学会年次学術講演会講演概要集第 1 部，Vol.57，pp. 1447-1448，2002.
- 5) 石尾真理，中谷昌一，玉越隆史，中洲啓太：大型車の動的軸重と橋梁部材の応答に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.59，1-562，pp1121-1122，2004.

§3 加速度計測に基づく変位ベースのB-WIM手法に関する実験的検討

ここでは、簡易な計測によるB-WIM手法として、加速度計測に基づく変位ベースのB-WIM手法の構築のため、実橋梁における計測を行い、実験的な検討を行った。これまでも加速度計測に基づく変位ベースのB-WIM手法の検討がなされている¹⁾が、低速走行が主となる一般道であり、かつ、連続橋梁というこれまでもB-WIMでは精度確保が容易でなかったケースを対象に検討を行うこととした。

以下に、その検討内容を述べる。まず、実験の概要を述べるとともに加速度計測結果（データ）からの変位への変換手法に関する検討を行い、求められた変位挙動の特徴を述べるとともに、変位ベースのB-WIM手法の構築について述べる。また、これまで基本的にMATLABによるコーディングを主としてきたが、分析をより汎用的にするため、加速度計測後の一連の計算プロセスをエクセルで行うことができるようエクセルでの分析を試みた。

3-1 実験の概要

3-1-1 対象橋梁

対象橋梁は、横浜市内の鋼道路橋であり、1973年に完成した2径間連続鋼床版箱桁中路式の橋梁である。片側1車線の計2車線の対面交通となっている。図3-1-1から3-1-3に対象橋梁の図面を示す。対象橋梁は両サイドエクспанションジョイント、支承部は両端がそれぞれ可動、固定となり、中間支点は回転自由の状況であった。図3-1-4に対象橋梁の全体写真、図3-1-5にエクспанションジョイントの状況、図3-1-6に支承の状況を示す。

3-1-2 現場計測

対象橋梁を対象とした現場計測は、平成28年9月6日11:12~20:06に実施した。計測に当たって外形100×80×50mmの無線加速度計を片側11台ずつ計22台桁の上面に設置した。またビデオカメラを1台設置し、通行車両の確認のため、撮影を行った。加速度計はMEMS加速度計であり、サンプリング周波数100Hzでの計測となっている。使用した加速度計の写真を図3-1-7に、仕様を表3-1-1に示す。また図3-1-8にセンサ設置位置を示す。

現場計測においては、キャリブレーションのため、図3-1-9に示す軸重(表3-1-2)が既知の試験車両の走行試験を行った。走行試験の状況を図3-1-10に示す。

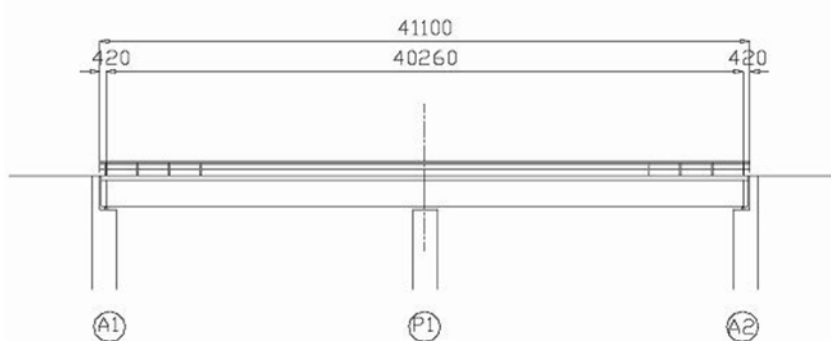


図3-1-1 対象橋梁側面図

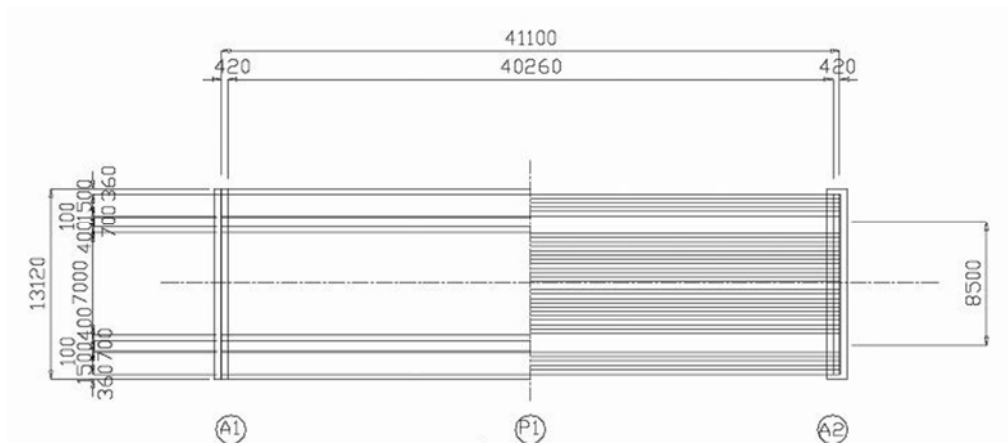


図 3-1-2 対象橋梁平面図

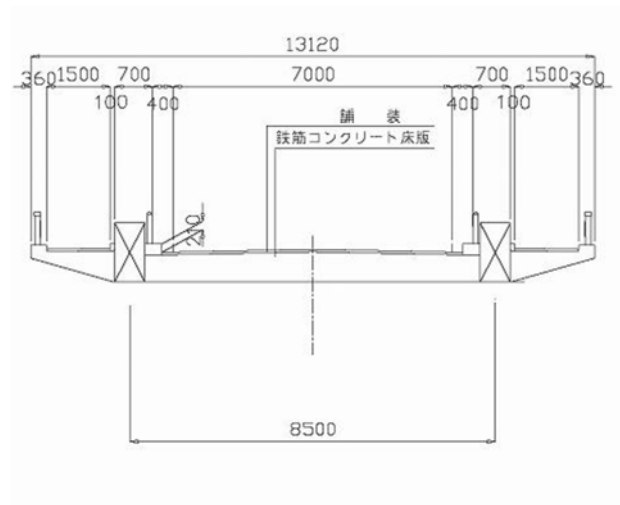


図 3-1-3 対象橋梁断面図



図 3-1-4 対象橋梁の外観写真



図 3-1-5 対象橋梁のエキスパンジョイントの状況



(a) 固定支承



(b) 可動支承



(c) 中間支点

図 3-1-6 対象橋梁の支承の状況

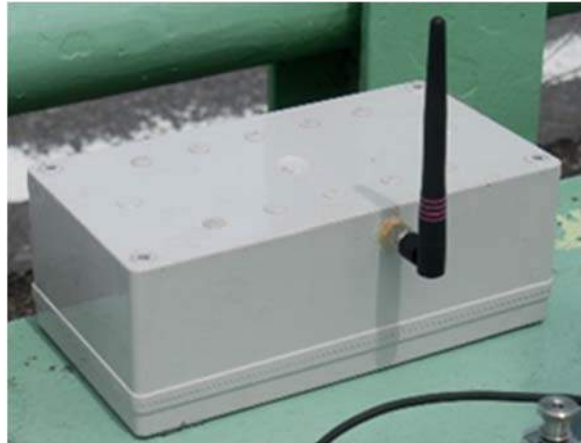


図 3-1-7 加速度計（加速度センサノード）

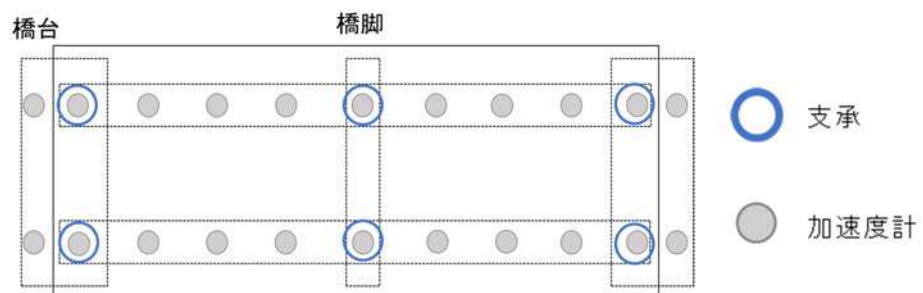


図 3-1-8 加速度計設置位置

表 3-1-1 加速度センサの仕様

センサタイプ	型番	検出範囲 [G]	周波数帯域 [Hz]	サンプリング 周波数[Hz]	分解能 [μ G/LSB]	ノイズレベル [μ G/ $\sqrt{\text{Hz}}$]
MEMS	m-a351	± 5.0	10	100	0.06	0.5

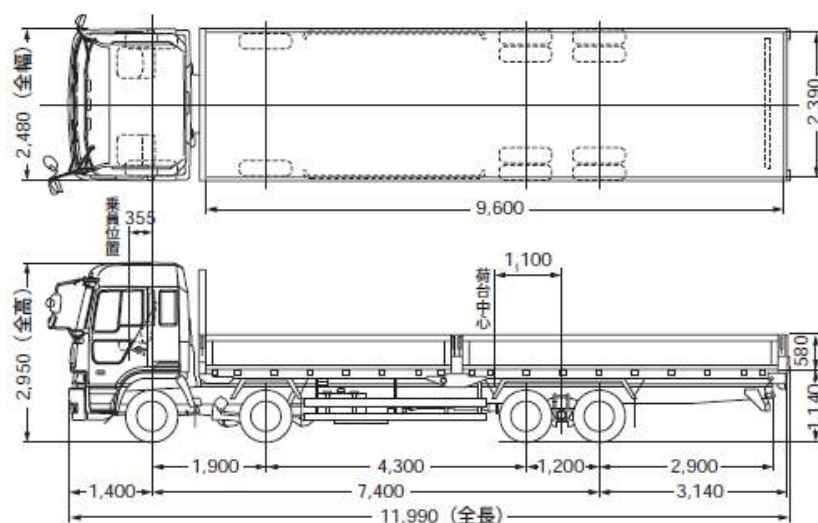


図 3-1-9 使用した試験車両



図 3-1-10 試験車両による走行試験の状況の例

表 3-1-2 試験車重量

前2軸重量(tonf)	8040
後2軸重量(tonf)	10910
総重量(tonf)	19710

3-2 加速度計測結果からの変位への変換手法の検討

橋梁に設置した加速度計から変位を算出するためには、加速度計で得られた加速度データを積分する必要がある。しかしながら加速度データを積分する際にノイズが含まれている場合、そのまま積分するだけでは正しい変位の値を求めることができない。また、橋梁における変位には車両が通過した際の活荷重によって生じる強制振動による変位と、橋梁の自由振動による変位がある。本研究では車両重量分析を目的としており、ノイズを取り除き、活荷重によって生じる強制振動を抽出する必要がある。ここでは、加速度パワースペクトルに着目したノイズ除去周波数帯の評価、強制振動による変位算出の概要について記述する。

3-2-1 加速度パワースペクトルによるノイズ除去周波数帯の評価

加速度データを積分し変位を算出する方法として主に、数値積分、周波数積分、ウェーブレット変換²⁾を用いたものなどがある。また、橋梁の挙動における境界条件を利用した変位分析方法^{3),4)}や傾斜情報を利用した変位分析方法も提案されている⁵⁾。本検討ではセンサの性能を考慮して、計算が容易な数値積分を用いて変位算出を行うこととした。数値積分を行う際には、低周波数の影響が大きく出るためデータをフィルタリングする必要がある。

図 3-2-1 に試験車両が通過した際の支間中央部(図 3-2-2)の加速度データの例を示す。このデータの変位を求めるにあたり、フィルタリングを行わず数値積分を行うと、図 3-2-3 のように発散してしまい正しい変位の値を求められない。そこで、図 3-2-4 に示す計測全時間の加速度のパワースペクトルの低周波数帯を拡大した図 3-2-5 に基づき、ノイズ除去のための低周波数を決定することとした。ここで、加速度のパワースペクトルを算出する際、本検討では窓関数としてハン窓を用い、データ長を 1000 秒、オーバーラップ長を 900 秒とした。低周波領域を拡大した図 3-2-5 から、0.1Hz 以下の周波数帯でハイパスを用いることが適当であると考えられたため、ここでは、0.03Hz, 0.05Hz, 0.1Hz の 3 つの周波数帯でハイパスフィルタを用いたときの変位の値を比較し、フィルタリングをする周波数を決定することとした。フィルタの種類は時間的な位相差が生じない FIR フィルタ⁶⁾を採用した。表 3-2-1 に各周波数のフィルタ次数、図 3-2-6 に上記の 3 つの周波数帯でフィルタリングを用いたときの変位結果を示す。図 3-2-6 から 0.1Hz でハイパスを用いると 0.1Hz の波の影響が強くなるのがわかる。0.03Hz と 0.05Hz でハイパスを用いたときの結果は大きくは変わらないが、切り取る周波数帯は可能な限り少ないほうが真値に近づくと考えられるため、本検討では、0.03Hz のハイパスを用いることとした。

3-2-2 強制振動変位の算出

上記により、橋梁における変位を算出したが、橋梁における変位には活荷重によって生じる強制振動による変位と、橋梁の自由振動による変位があるが、本検討は、B-WIM 手法による車両重量分析を目的としているため、強制振動による変位を対象としており、その抽出が必要となる。強制振動の抽出はノイズの除去と同様、加速度のパワースペクトルから行うこととした。図 3-2-7 に 0Hz~3Hz を拡大したパワースペクトルを示す。図 3-2-7 から 0~1Hz 付近にパワースペクトルの山があり、この周波数帯が走行車両による強制振動による成分であると考えられる。そこで、ノイズ除去と強制振動の抽出を考慮して 0.03Hz~1.0Hz のバンドパスを用いることによって強制振動の変位の算出を

行った．図 3-2-8 に 0.03Hz のハイパスを用いた変位，0.03Hz~1.0Hz のバンドパスを用いた変位を重ね合わせた結果，表 3-2-2 にフィルタ次数，図 3-2-9 にフィルタリングを示す．図 3-2-9 から橋梁の自由振動の成分が取り除かれ，強制振動の成分が抽出できていることがわかる．このバンドパスを用いた，試験車が通過した付近の 5 分間の変位波形を図 3-2-10 に示す．150 秒付近で試験車両が通過しており，110 秒付近で試験車通過時と同じような小さな波形が確認できる．これは普通乗用車が単独で橋を通過したときの波形であり，試験車以外の車両が通過した場合でも橋梁の鉛直変位の時刻歴波形を確認できていることを示す．このバンドパスをすべての加速度センサから得られた計測データに用い，変位を算出することとした．

以上，ここでは加速度パワースペクトルに注目したノイズ除去周波数帯の評価，強制振動による変位算出の概要について記述した．加速度パワースペクトルから，ノイズ除去のために 0.1Hz 以下でハイパスを用いることが適当だと考えられた．0.03Hz，0.05Hz，0.1Hz の 3 つのハイパスを用い，変位を算出した結果，0.03Hz のハイパスを用い変位を算出することでノイズが除去できると考えられた．また，加速度のパワースペクトルから 0~1.0Hz 付近にパワースペクトルの山があり，この周波数帯が走行車両による強制振動だと考えられるため，ノイズ除去も考慮して，0.03Hz~1.0Hz のバンドパスを用いることでノイズを除去し，強制振動による変位を算出できることを示した．

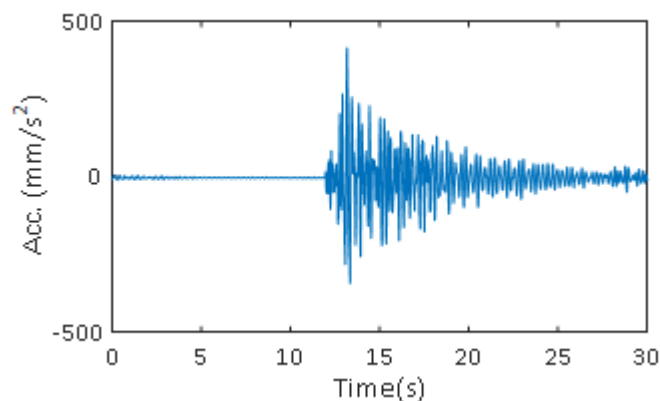


図 3-2-1 試験車両が通過時の加速度波形

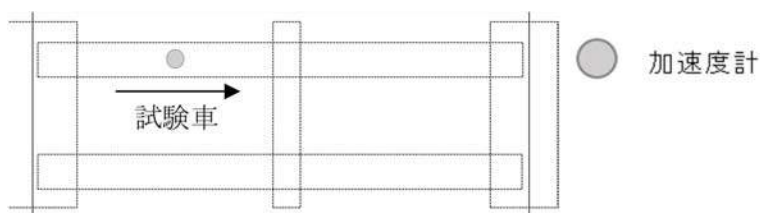


図 3-1-2 加速度パワースペクトル算出対象とした加速度計位置

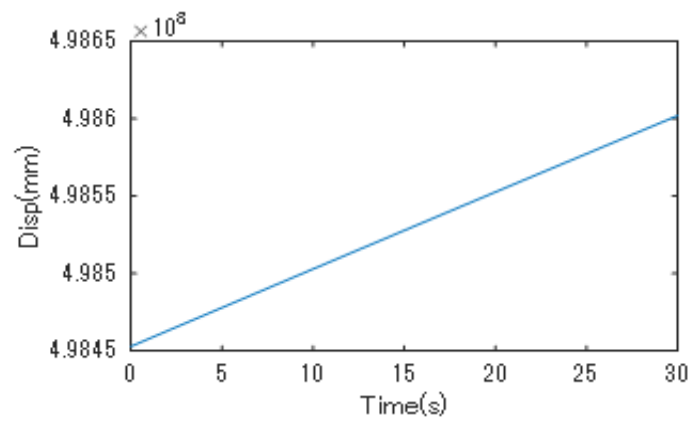


図 3-2-3 フィルタを適用せず算出した変位履歴の例

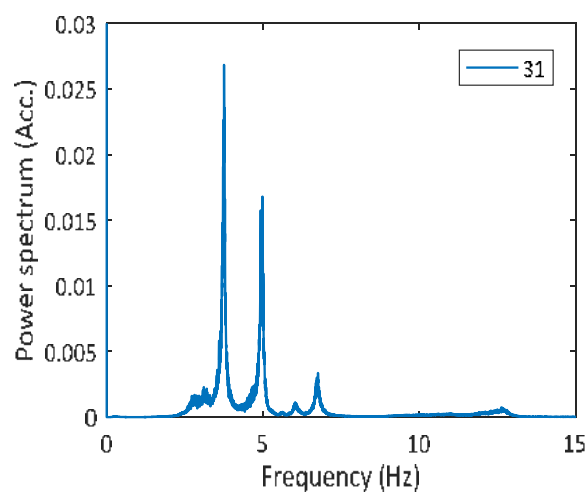


図 3-2-4 計測全時間のパワースペクトル

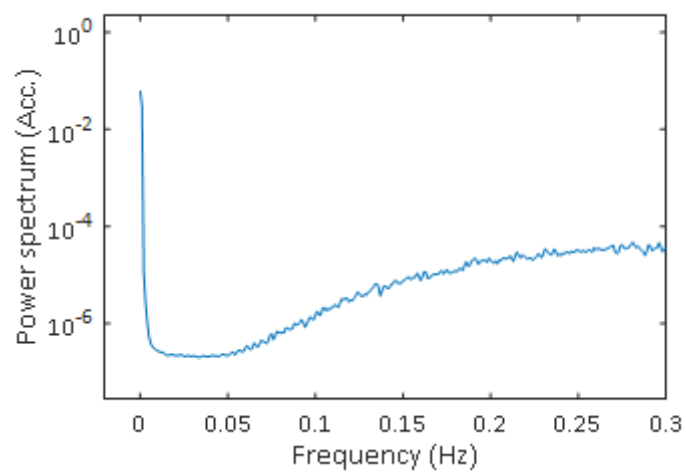


図 3-2-5 計測全時間のパワースペクトル (0.3Hz 以下)

表 3-2-1 フィルタ次数

Cut Frequency [Hz]	Filter Type	Filter Order [Times]
0.03	FIR high pass	50000
0.05		50000
0.1		10000

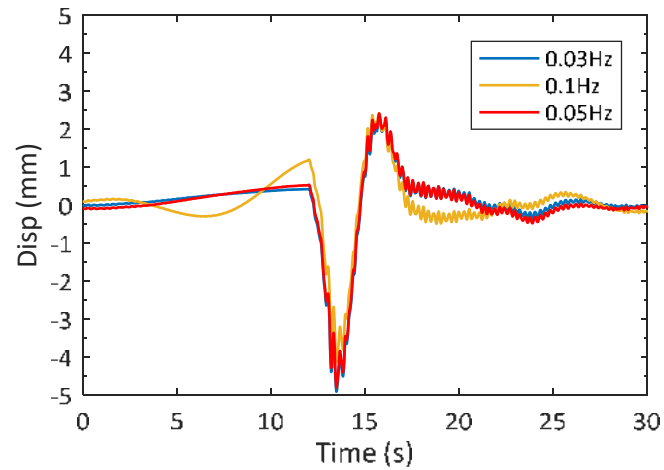


図 3-2-6 フィルタを適用して算出した変位履歴の例

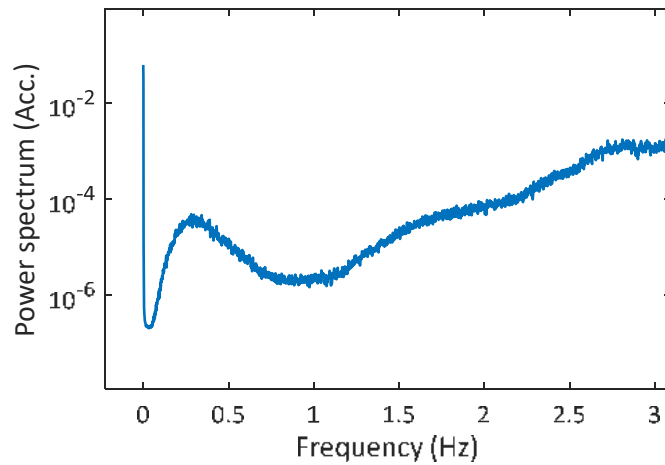


図 3-2-7 計測全時間のパワースペクトル (3Hz 以下)

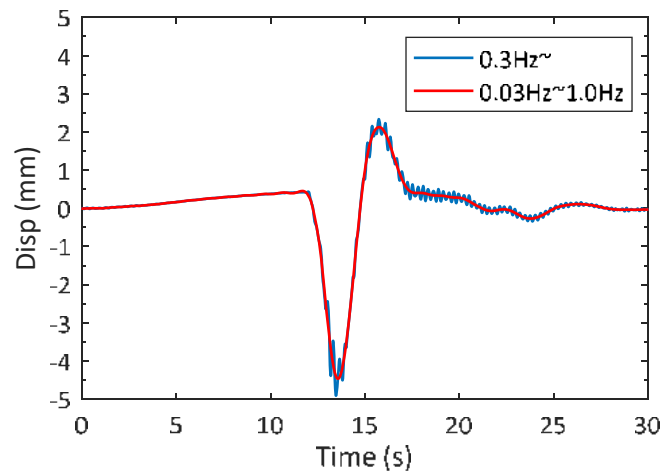


図 3-2-8 バンドパスフィルタを用いて算出した変位履歴の例

表 3-2-2 フィルタ次数

Pass Frequency [Hz]	Filter Type	Filter Order [Times]
0.03-0.1	FIR high pass	50000

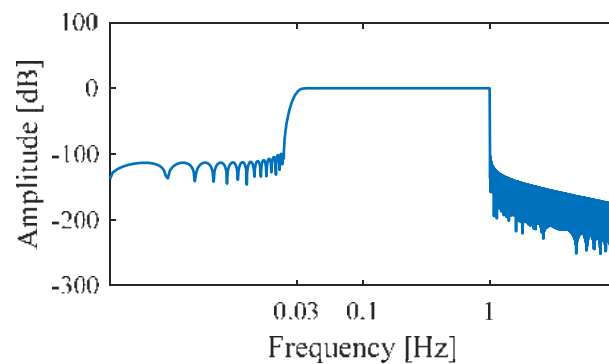


図 3-2-9 フィルタリング

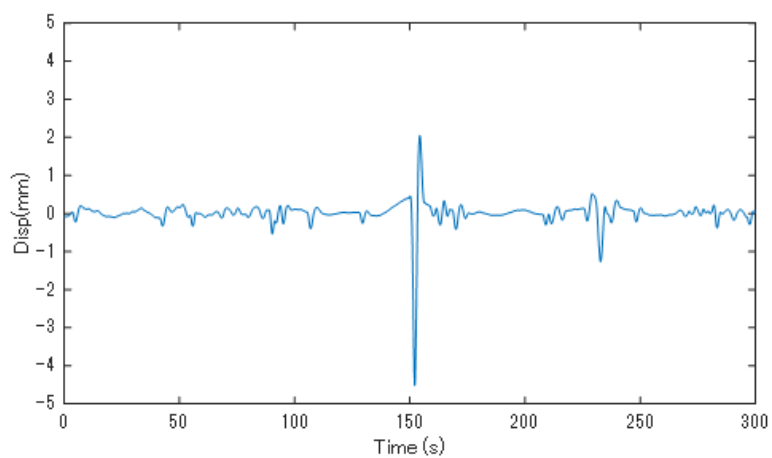


図 3-2-10 連続的な変位算出結果の例（5 分間）

3-3 変位挙動に関するまとめ

3-2 で示した 2 階積分による加速度計測データからの変位分析を，設置した複数の加速度計の計測データに適用し，車両通行に伴う橋梁の変位挙動について検討した．計測は一般車が走行している状態も含めて連続的に行っているが，ここでは，重量既知の試験車両が通過した際の各加速度計位置での変位算出結果の例を示し，橋梁の変位挙動について示す．なお，ここで示す時刻歴は，いずれも縦軸が変位（mm），横軸が時間（秒）で示されている．

図 3-3-1 は，試験車両が通過した側の桁に設置された加速度計のデータを用いて算出した変位履歴の例である．連続桁であり，変位が正（上方），負（下方）に入れ替わっている様子がいずれの変位履歴にも見ることができる．最初に通過する側の径間に設置した加速度計位置ではまず下方に変位が生じ，2 つ目の径間を試験車両が通過した際に，逆に上方に変位が生じている．逆に，2 つ目の径間に設置された加速度計位置では，当然ながらその逆の挙動となっている．このように，連続橋の挙動を加速度計から算出した変位履歴からも確認することができる．なお，図 3-3-1 においては，図中の②と③位置の間にも加速度計が設置されていたが，計測の不具合によりデータが取得できていないため，この図からその位置の結果が抜けている．

図 3-3-2 に図 3-3-1 と同じ時間帯で，反対車線側のセンサで取得した変位履歴を示すが，図 3-3-1 同様の変位挙動を確認できる．また，図 3-3-1 及び図 3-3-2 のケースで試験車両が走行した車線とは異なるもう一方の車線を通過した際の変位挙動を図 3-3-3 及び図 3-3-4 に示す．他方の車線を通過した場合も連続桁における変位挙動を捉えられていることがわかる．変位履歴を用いた B-WIM 手法の構築においては，どの位置の加速度計のデータも活用可能である．

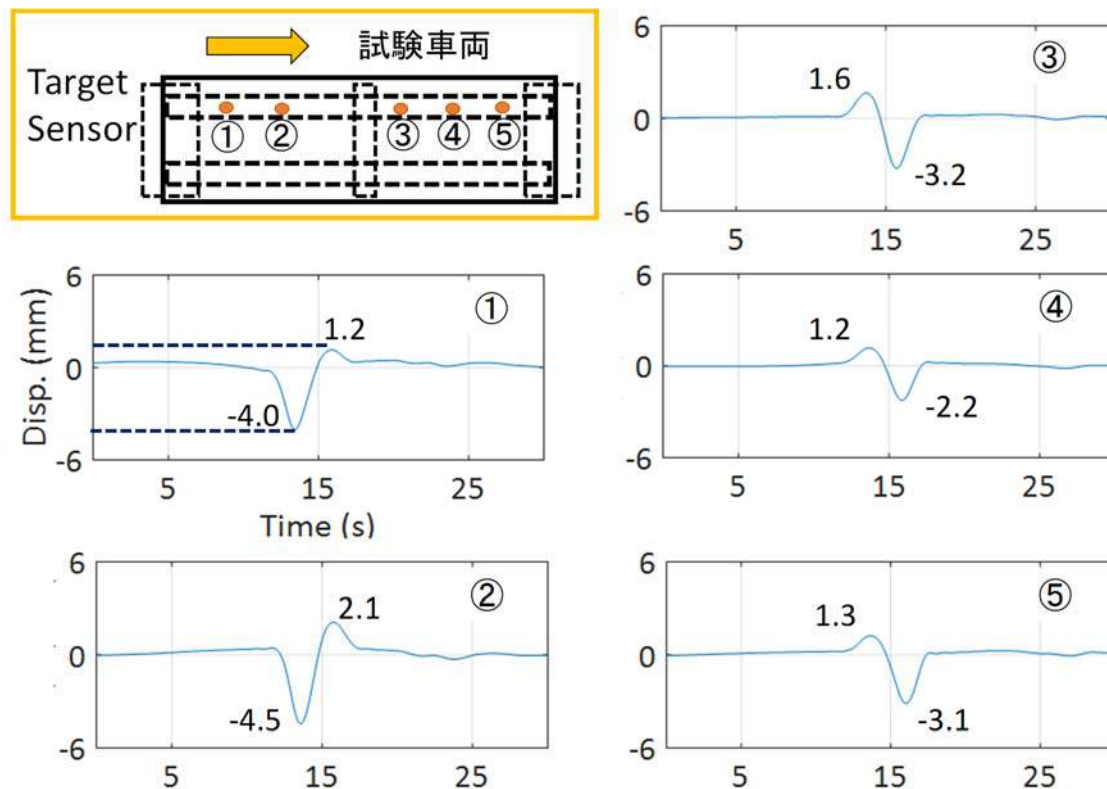


図 3-3-1 試験車両が通過した際の変位挙動の例（車両通過側センサ）

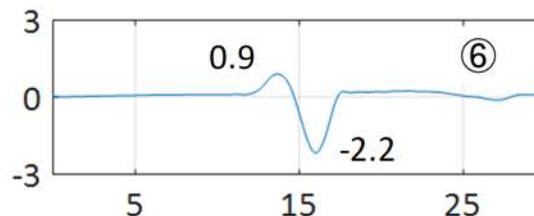
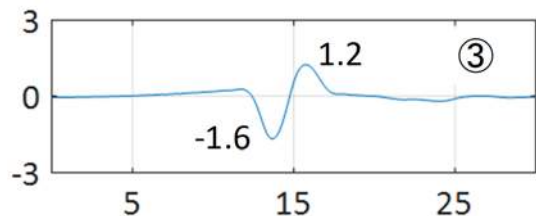
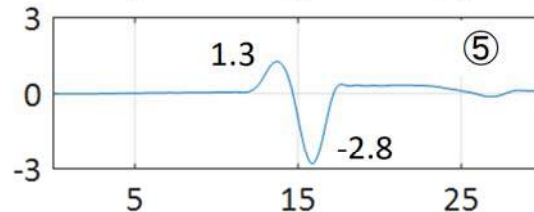
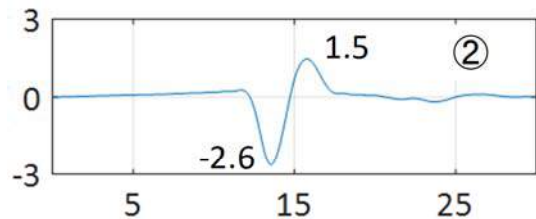
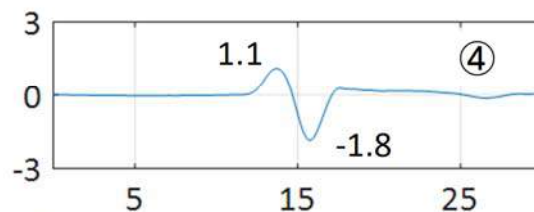
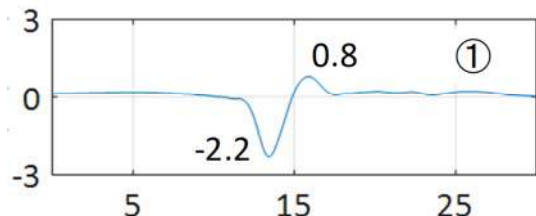
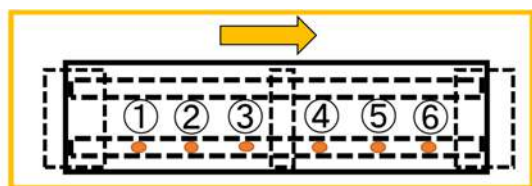


図 3-3-2 試験車両が通過した際の変位挙動の例（車両通過の反対車線側センサ）

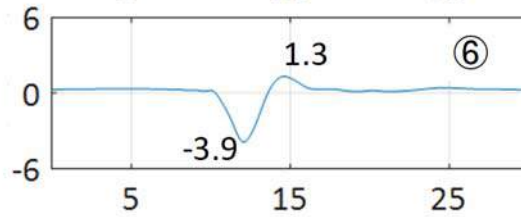
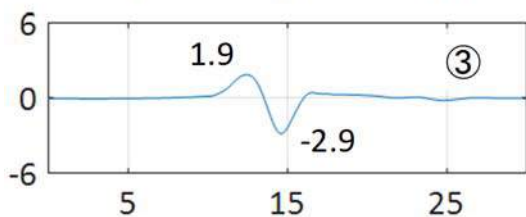
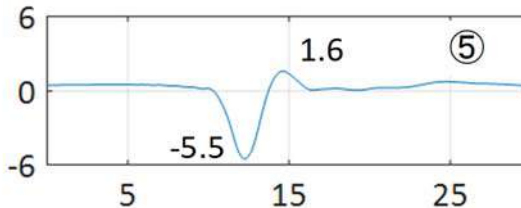
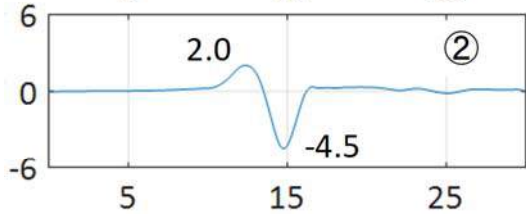
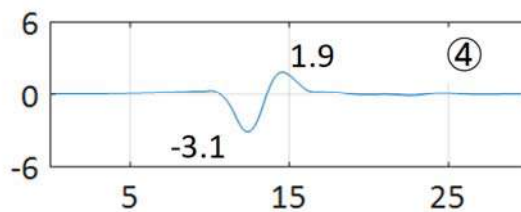
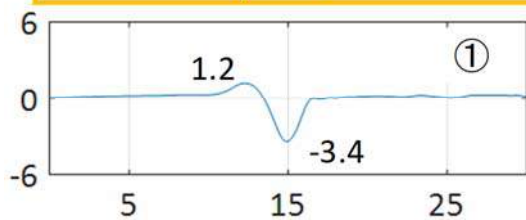
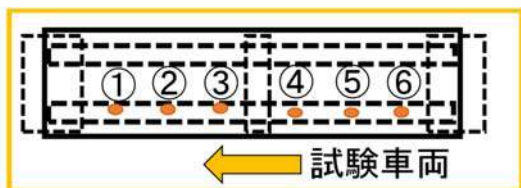


図 3-3-3 試験車両が通過した際の変位挙動の例（他方の車線通過時，走行車線側センサ）

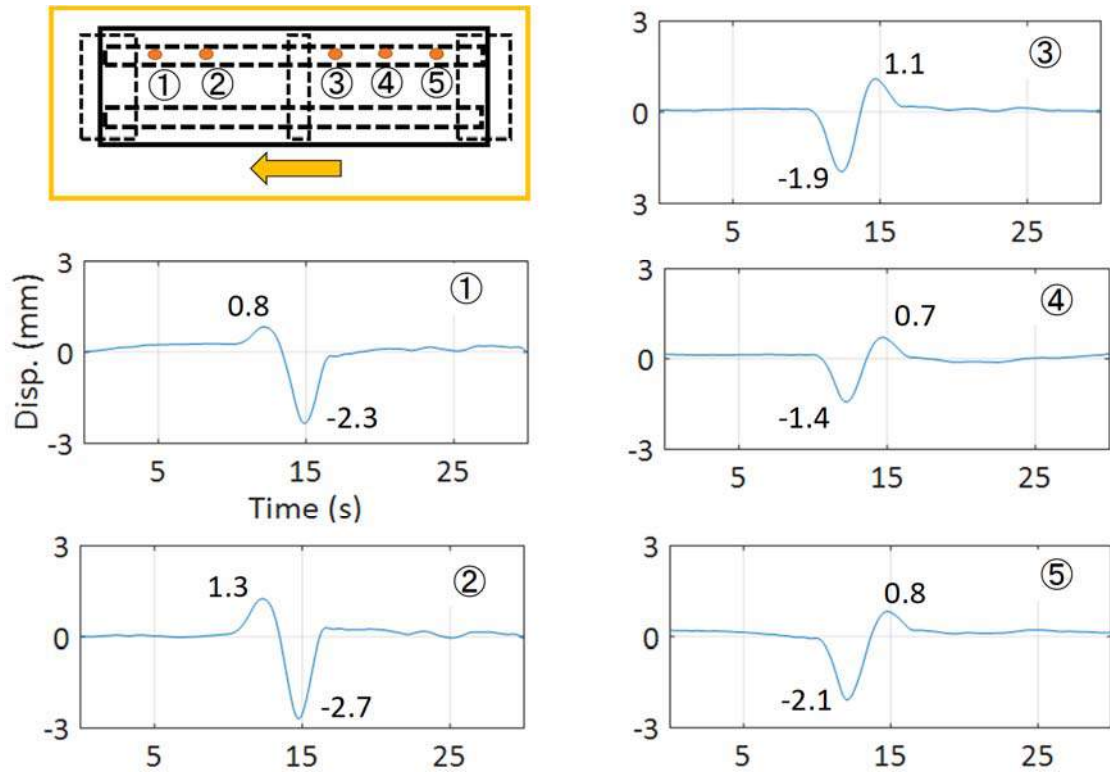


図 3-3-4 試験車両が通過した際の変位挙動の例（他方の車線通過時，反対車線側センサ）

3-4 変位ベースの B-WIM に関する検討

ここでは、3-2 に示した変位算出方法により加速度計のデータから求めた変位に基づき、車両の重量を分析する B-WIM について検討する。ここでは、影響線を用いた手法について示す。対象橋梁は、これまでの B-WIM 手法で精度確保が容易でないとされてきた連続橋であり、3-3 に示したように、変位が正負入れ替わる挙動を示す。連続桁においても影響線を適切に同定し、分析に適用することにより安定した精度で B-WIM 手法を実現できると考えられる。

3-4-1 影響線の同定

影響線を用いた B-WIM の基本となる影響線の同定をまず行う。影響線の同定方法としては、舘石ら⁷が示した FFT を用いる手法を用いることとした。以下のその手法の概要を示す。

車両走行速度が既知の場合、着目位置での変位の影響線は時間の関数として表すことができ、これを $i_d(t)$ とする。試験車両の軸重を P_j 、各軸間の間隔 τ_j とする。このとき、着目位置の変位は各車軸によって生じる変位波形の重ね合わせにより、次式で表すことができる。

$$disp(t) = \sum_{j=1}^n P_j \cdot i_d(t - \tau_j)$$

n : 車軸数

これをフーリエ変換し次式を得る。

$$\begin{aligned} Disp(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} disp(t) e^{-i2\pi f t} dt \\ &= \sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-i2\pi f \tau_j} \int_{-\infty}^{\infty} i_d(t) e^{-i2\pi f t} dt \\ &= \sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-i2\pi f \tau_j} I_d(f) \end{aligned}$$

ここに

$$I_d(f) = \frac{Disp(f)}{\sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-i2\pi f \tau_j}}$$

すなわち、変位の影響線は $I_d(f)$ を逆フーリエ変換することにより、変位の影響線 $i_d(t)$ を求めることができる。本手法では車軸数 n は試験車両の詳細図から 4 とする。軸間間隔 τ_j は図 3-4-1 に示す支承部 B 上に加速度計データを用いて取得することとした。図 3-4-2 に支承部 B の加速度計で取得したデータの例を示す。影響線を用いた B-WIM の一般的な手法を適用し、上記で得られた影響線を速度に応じて伸縮し、時間軸を支承部の加速度データから時間軸をあわせ、影響線を最小二乗法によりカーブフィッティングさせることで車両重量を算出することとした。またその際用いる速度は図 3-

4-1 に示す支承部 A と支承部 B の加速度計のデータから一軸目の通過時間をそれぞれ取得し，その時間差を用いて，橋梁を通過している間等速と仮定することにより算出した．

実際に，上記の方法により影響線の同定を行った．図 3-4-3 に影響線同定を行ったセンサの設置位置，図 3-4-4 に影響線同定に用いた変位-時間グラフ，図 3-4-5 に同定された影響線を示す．また，表 3-4-1 に影響線同定に用いた軸間隔 τ_j を示す．速度は上記の通り，図 3-4-1 に示す A と B の加速度データから橋梁を通過している区間は等速と仮定し，一軸目の通過時間をそれぞれ取得することで算出し，その結果，速度 7.90 (m/s) が得られた．

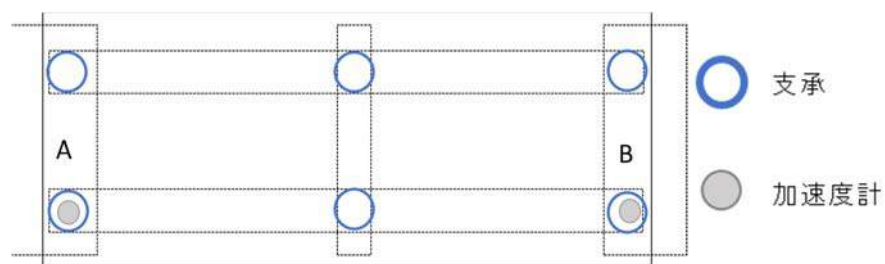


図 3-4-1 軸間隔，速度算出に用いた加速度計の位置

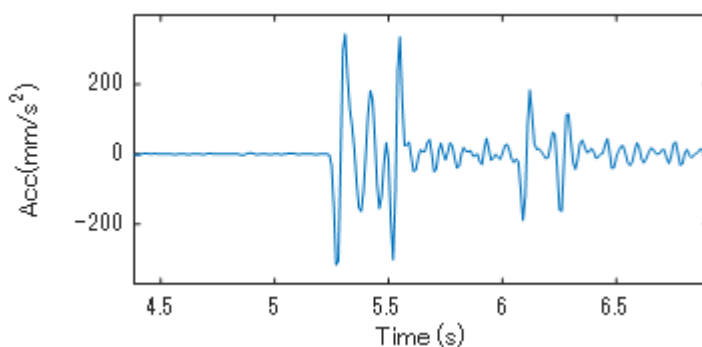


図 3-4-2 支承部 B における加速度計データの例

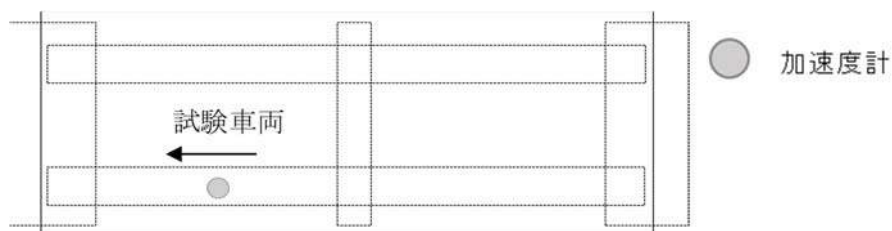


図 3-4-3 影響線同定に用いた加速度計の位置

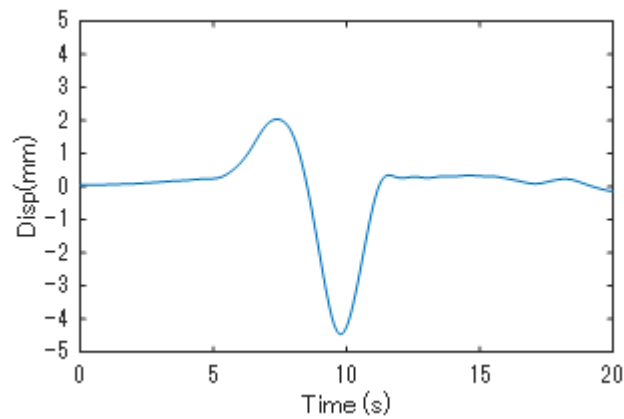


図 3-4-4 影響線同定に用いた変位履歴

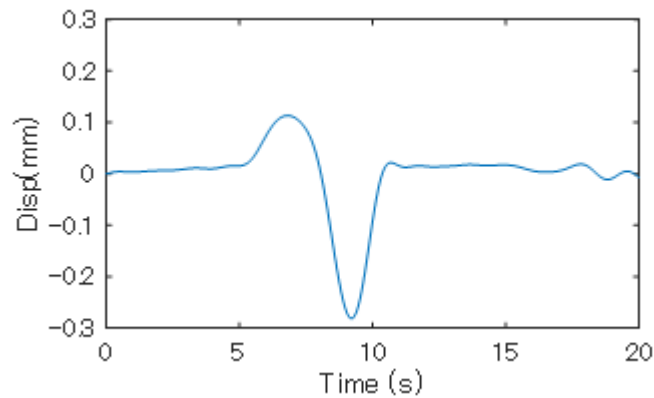


図 3-4-5 同定された影響線

表 3-4-1 軸間間隔

τ_2	0.25[s]
τ_3	0.82[s]
τ_4	0.99[s]

3-4-2 変位ベースの B-WIM 手法による車両重量分析結果

変位履歴を用いた車両重量分析の精度を確かめるため、試験車両が単独で走行した際の 3 ケースデータを用いた重量分析結果を表 3-4-2、図 3-4-6~8 に示す。重量算出車両の速度を表 3-4-3 に示す。なお、図中の **real** は測定された試験車が走行したときの変位データ、**layered** は最小二乗法によって算出された軸重と影響線を掛け合わせて足したものを示している。表 3-4-2 に示すように総重量の誤差はそれぞれ 2.3%, 4.4%, 3.9% となり、総重量の誤差は 3 ケースとも 5% 以内に抑えられていることがわかる。また、3 ケースの平均値をとると、20.40(tonf) となり、誤差は 3.5% と精度が高い結果が得ることができている。一般的に B-WIM の誤差は 10% 以内に収まればよいとされており、十分な精度の結果が得られたといえる。また Case1 は影響線算出車両よりも遅い速度、Case2,

Case3 は影響線算出車両より早い速度で走行していたが、どちらのケースも高い精度が得られており、車両重量分析精度は速度によらず高精度を達成できることが確認された。

表 3-4-2 車両重量分析結果

	Case 1	Case 2	Case 3	Real
P ₁	7.14	2.69	5.69	
P ₂	1.69	9.30	4.35	
P ₃	3.99	-6.44	1.31	
P ₄	7.33	15.02	9.12	
Total [tonf]	20.16 (+2.3%)	20.57 (+4.4%)	20.47 (+3.9%)	19.71

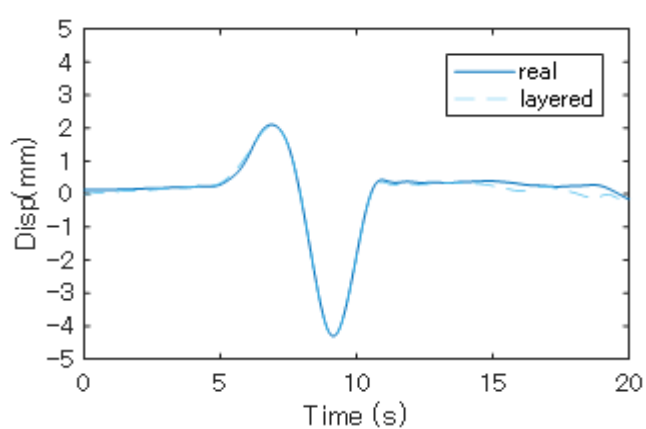


図 3-4-6 B-WIM 手法適用結果 (Case 1)

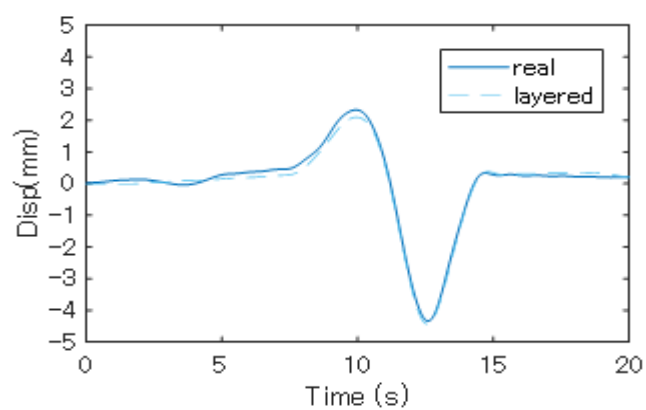


図 3-4-7 B-WIM 手法適用結果 (Case 2)

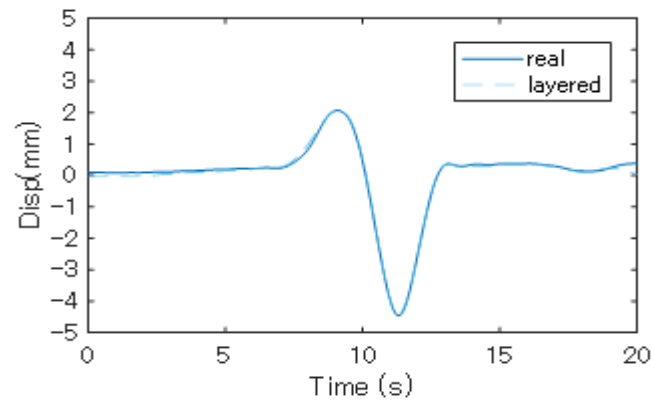


図 3-4-8 B-WIM 手法適用結果 (Case 3)

表 3-4-3 試験車走行速度

	Case 1	Case 2	Case 3
Velocity [m/s]	7.06	8.53	8.42

3-5 Excel による B-WIM

3-5-1 はじめに

3-2 から 3-4 で述べた B-WIM の一連の作業を、Microsoft Excel を用いて簡易的に実施した。

- 1) 加速度計の設置位置とチャンネル番号を図 3-5-1 に示す(この図は図 3-1-8 にチャンネル番号や方向を追記したものである)。
- 2) 試験車量が、対象橋梁上をコンビニから駅方面に単独で走行した 14:33 付近、15:17 付近、18:50 付近のデータを使用する。
- 3) 第 1 径間支間中央の加速度記録(ch23)を時間積分し、変位データを算出する。
- 4) 車軸の対象橋梁への進入時間は、ch21 の加速度記録から判断する。
- 5) 退出時間は、ch29 の記録が途中で取れなくなったため、ch9 の加速度記録から判断する。
- 6) 14:33 付近の変位データから影響線を求め、14:33、15:17、18:50 の試験車量の軸重を推定し精度を確認する。
- 7) 試験車量の詳細を図 3-5-2 に示す(図 3-5-2 と同じ)。車軸は 4 軸あるが、前 2 軸、後 2 軸の軸重と全体の車両重量のみ計測できた。軸重計量器の影響で前 2 軸と後 2 軸の軸重の合計が、車両重量と一致していない。本検討では、各軸の軸重を表 3-5-1 の値とした。
- 8) 3-4 では影響線の同定に、試験車量が対象橋梁を通過した前後の時間も含めたデータを用いている(例えば図 3-4-4)。本検討では、試験車量が通過した部分のデータを切り取って使用した(例えば後述する図 3-5-7)。

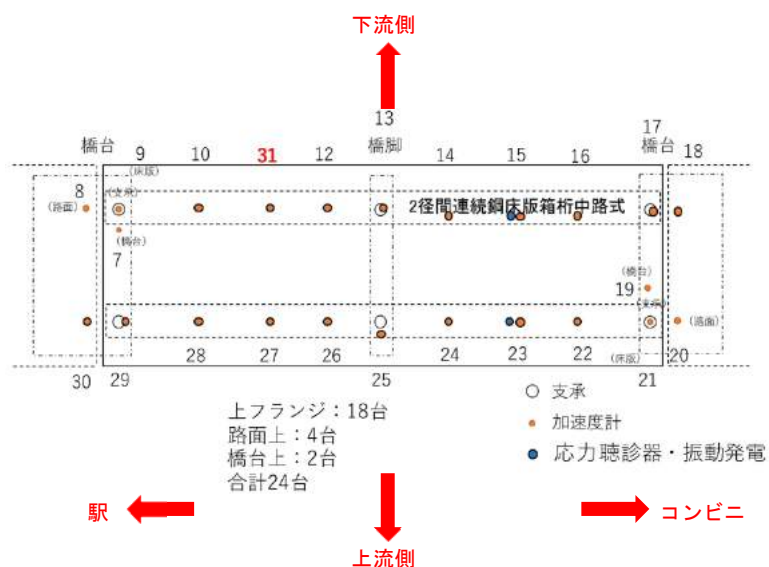


図 3-5-1 加速度計の位置とチャンネル番号

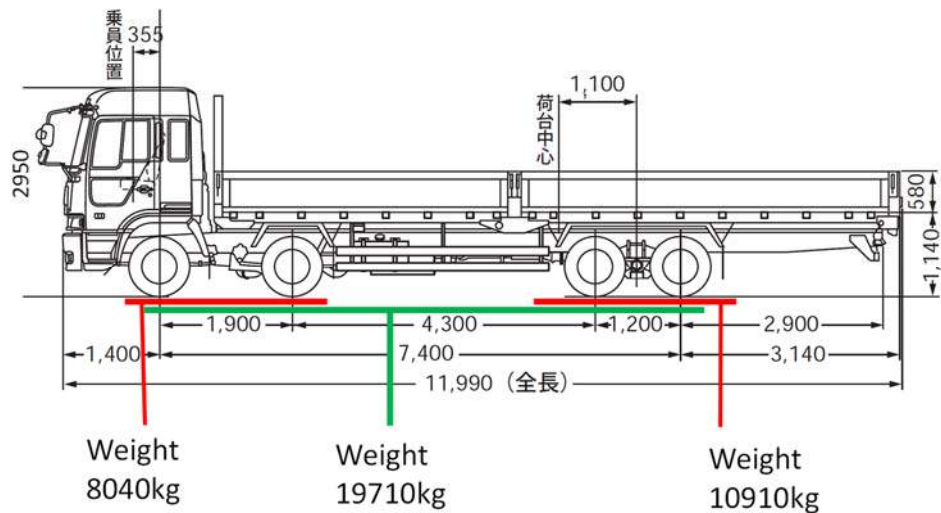


図 3-5-2 試験車量

表 3-5-1 軸重

p1	4181
p2	4181
p3	5674
p4	5674
合計	19710

3-5-2 データの取得

今回の実験では各チャンネルで 320 万 4905 行のデータを計測した. この中から必要な時刻付近のデータを取り出すには WG3 の結果が参考にできるが, 活動が平行していて WG2 の準備も整わなかったため, 独自に Excel に取り込んだ.

- 1) 各チャンネルを 1 つの Excel ブックに保存する.
- 2) Excel のシートには行数制限があるため, 1 シートに 90 万行保存する(90 万行 x 3 シート + 50 万行 x 1 シート).
- 3) 列の構成は基データ(テキストデータ)と同じとする.

表 3-5-2 計測データの列構成

列数	1列目	2列目	3列目	4列目	5列目	6列目
内容	チャンネル番号	計測時間	x方向加速度	y方向加速度	z方向加速度	制御信号

加速度の単位: G(重力加速度)

x 方向: 橋軸直角軸方向(上流側が正)

y 方向: 橋軸方向(駅側が正)

z 方向: 鉛直方向(下向き正)

3-5-3 変位データの算出

第1 径間支間中央(ch23)の z 方向加速度記録を時間積分し、z 方向の変位データを算出する。

- 1) 着目している時刻付近のデータを 65536 行取り出す。後に示す 5) でデータを高速フーリエ変換するため、データ数を 2 の階乗とした。
- 2) z 方向加速度記録($a_{ccZ,i}$)から、平均値を減じ(以降、平均値処理), 980 を乗じて単位を $\text{cm/s}^2(\text{gal})$ に変換する。

$$a_i = \left(a_{ccZ,i} - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_{ccZ,k} \right) \times 980 \quad (1)$$

ここに,

$$N=65536$$

- 3) 式(1)を時間積分して速度データ($v_{o,i}$)を算出する。

$$v_{o,i+1} = \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)\Delta t + v_{o,i} \quad (2)$$

- 4) 速度データを平均値処理し、さらに平均加速度法で変位データ($d_{o,i}$)を算出する。

$$v_i = v_{o,i} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} v_{o,k} \quad (3)$$

$$d_{o,i+1} = \frac{1}{2}(v_{i+1} + v_i)\Delta t + d_{o,i} \quad (4)$$

- 5) 変位データを高速フーリエ変換し、0.03Hz～1Hz 以外の成分を 0 にして逆フーリエ変換する。

⇒ i.e. 0.03Hz ～ 1Hz のバンドパスフィルター(BPF)を通す。BPF の範囲は、3.2 での検討結果に合わせた。

$$d_{o,i} \rightarrow \text{BPF (0.03Hz} \sim \text{1Hz)} \rightarrow d_i \quad (5)$$

加速度を積分する際、速度と変位の初期値($v_{o,0}$, $d_{o,0}$)が必要となる。今回はいずれも 0 とした。時間積分の式(2)を展開すると

$$\begin{aligned} v_{o,i+1} &= \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)\Delta t + v_{o,i} \\ &= \frac{1}{2}(a_{i+1} + a_i)\Delta t + \frac{1}{2}(a_i + a_{i-1})\Delta t + v_{o,i-1} \\ &= \frac{1}{2}(a_{i+1} + 2a_i + 2a_{i-1} + \cdots + 2a_1 + a_0)\Delta t + v_{o,0} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、全ての $v_{o,i}$ に初期値 $v_{o,0}$ が含まれていることが分かる。よって平均値処理(式(3))を実施すると初期値の影響は無くなる。フーリエ係数の振動数 0 の成分は平均値そのものであるから、BPF(式(5))を通した d_i も初期値の影響は除かれている。

18:50 付近のデータに 1)から 5)の処理をした結果を図 3-5-3 に示す。

積分したままの速度データ(青線)がほぼ $0[\text{cm/s}]$ から $-1[\text{cm/s}]$ となり 27900[s] 付近で再度 $0[\text{cm/s}]$ に戻っている。これは加速度がこの範囲では大きく見ると単調に増加しており、平均値処理した結果、ある値 $-a[\text{cm/s}^2]$ から $+a[\text{cm/s}^2]$ に変化するようなデータとなったためと考えられる。速度は初期値 $0[\text{cm/s}]$ で、加速度は $-a[\text{cm/s}^2]$ から徐々に大きくなり、 $0[\text{cm/s}^2]$ を経て $+a[\text{cm/s}^2]$ になる。よって速度も一度減少し、また $0[\text{cm/s}]$ に戻っている。

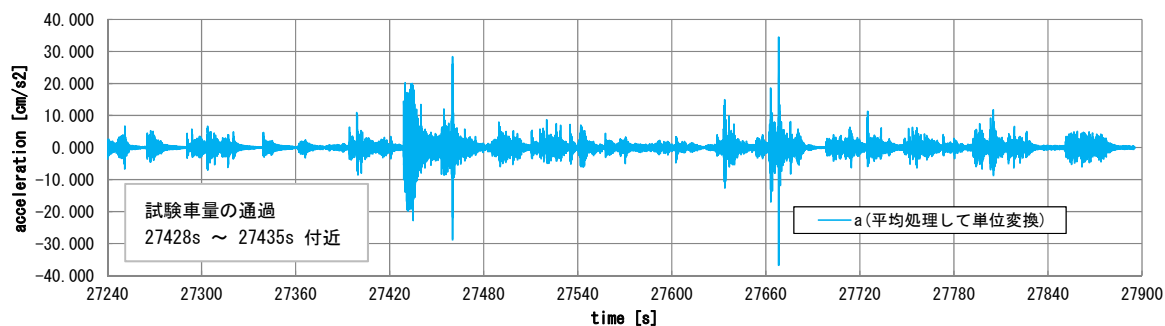


図 3-5-3a 加速度記録

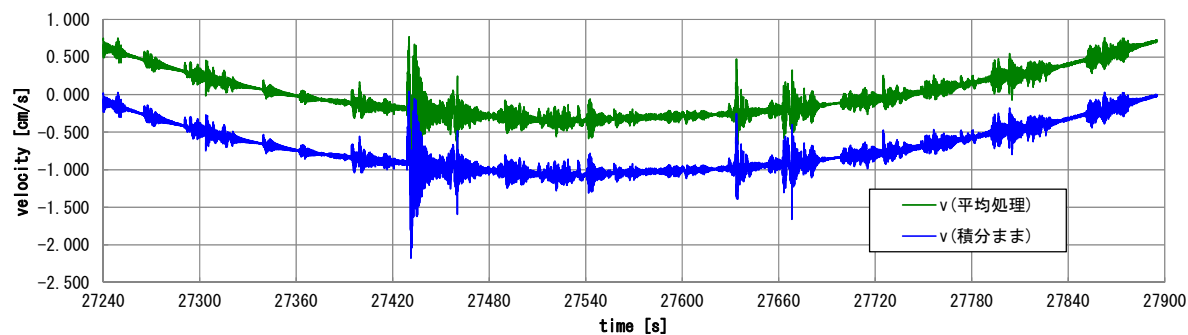


図 3-5-3b 速度データ

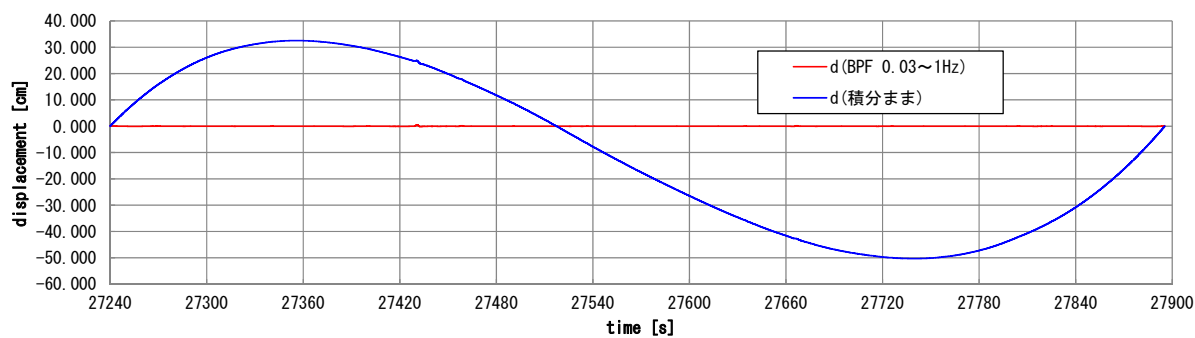


図 3-5-3c 変位データ

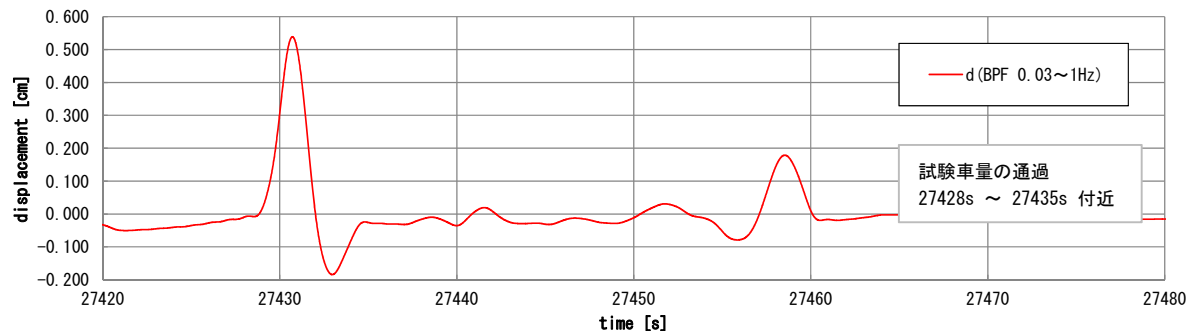


図 3-5-3d 変位データ (BPF 処理したもののみ)

図 3-5-3 加速度記録の処理 (18:50 付近)

参考に、2)で加速度記録を平均値処理し単位変換した後に BPF(0.01Hz~10Hz)を通し、3)以降の処理をした場合の結果を図 3-5-4 に示す。最終的に得られる変位データ(図 3-5-4d)は BPF を通さない結果(図 3-5-3d)とほぼ同じで有意な差が無い。実際にグラフを重ねると一致する。

よって本検討では、BPF 処理を変位データを算出した後に 1 度だけ実施することとした。

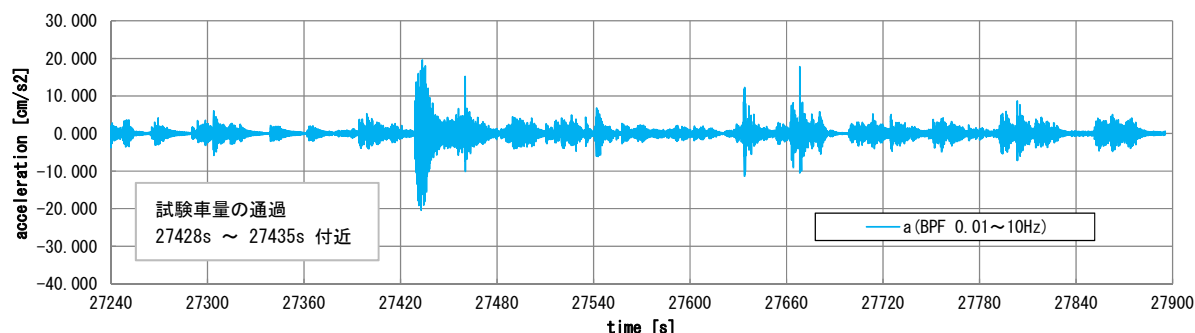


図 3-5-4a 加速度記録

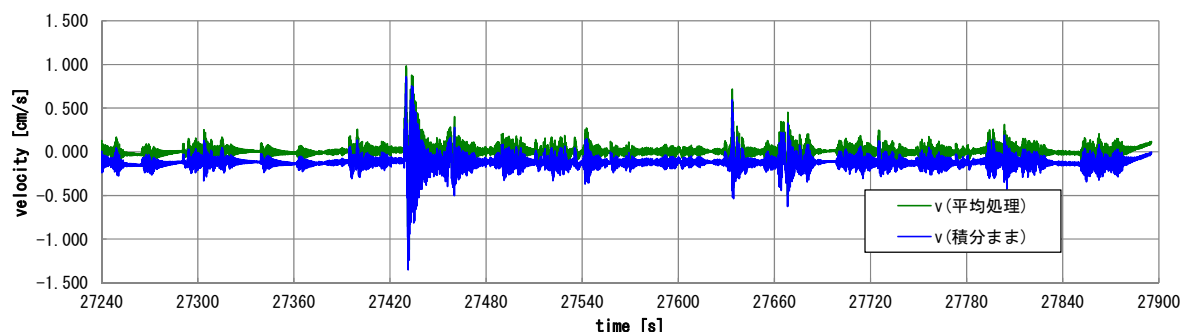


図 3-5-4b 速度データ

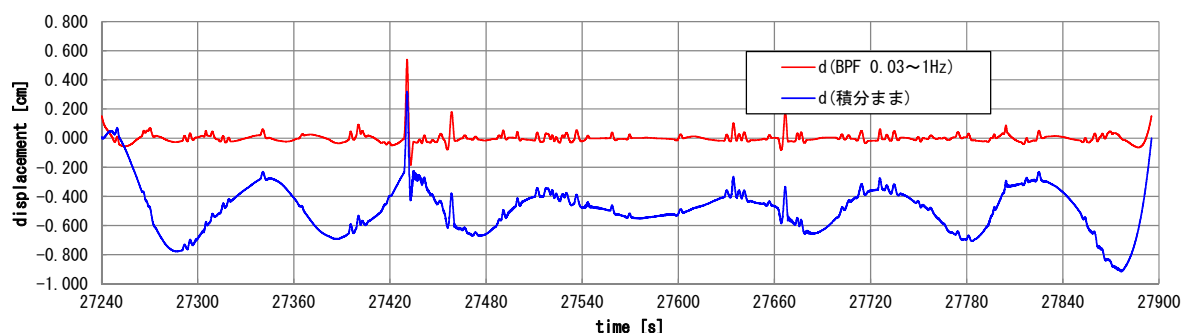


図 3-5-4c 変位データ

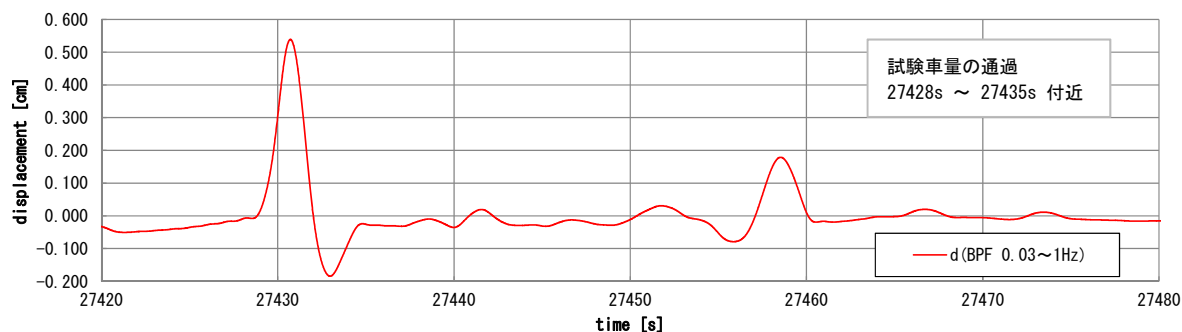


図 3-5-4d 変位データ (BPF 処理したもののみ)

図 3-5-4 加速度記録の処理(18:50 付近、加速度記録を BPF 通してから積分)

図 3-5-5, 図 3-5-6 に 14:33, 15:17 付近の加速度記録から得られた変位データを示す。

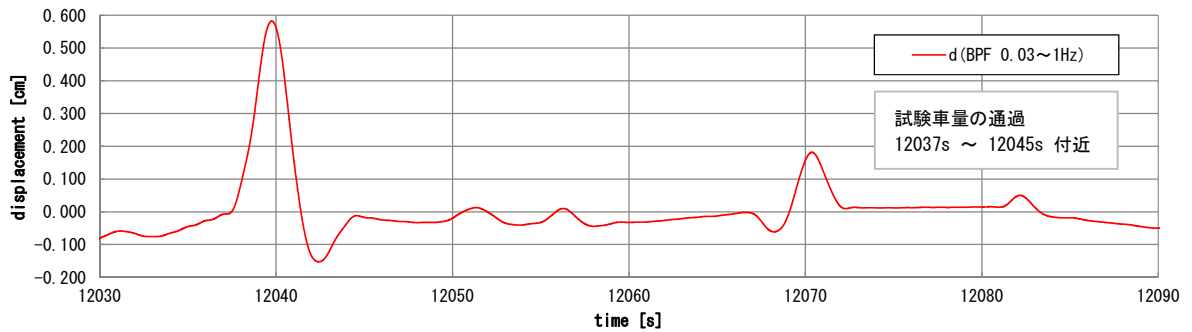


図 3-5-5 変位データ (14:33 付近)

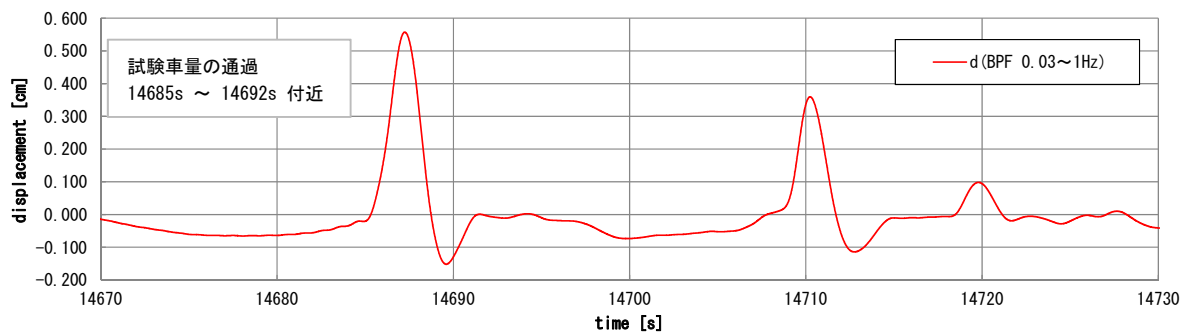


図 3-5-6 変位データ (15:17 付近)

3-5-4 試験車量走行時データの抽出

3-5-3 で得られた変位データ(図 3-5-3d, 図 3-5-5, 図 3-5-6)から, 試験車量走行時のデータを抽出する。

- 1) 試験車量の橋梁への進入は, ch21 加速度記録の立上り時とした。
- 2) 試験車量第 4 軸の橋梁からの退出は, ch9 加速度記録から判断した。ただし, 加速度記録がきれいに 0 になっておらず通過時の特定が難しかったため, 加速度記録のピーク時とした。
- 3) 軸間の距離と軸通過時間より, 試験車量の速度を算出した。
- 4) 変位データは, 試験車量の進入, 退出時に 0[cm]となるべきであるが, 実際には何らかの値を持っている。これは変位データに残るドリフト成分の影響と考えられる(図 3-5-3d, 図 3-5-5, 図 3-5-6 参照)。
- 5) 本検討では試験車量の進入, 退出時の変位を 0[cm]に補正するため, 変位データに 1 次関数を加算した。

$$\text{補正值: } \Delta(t) = \frac{(-d_1) - (-d_0)}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}}(t - t_{\text{start}}) + (-d_0) \quad (7)$$

ここに, ※つまり, $-d_0 \sim -d_1$ を結ぶ 1 次関

$$d(t = t_{\text{start}}) = d_0$$

$$d(t = t_{\text{end}}) = d_1$$

試験車量走行時の変位データと車軸通過時間、車両速度を図 3-5-7～図 3-5-9、表 3-5-3～表 3-5-5 に示す。

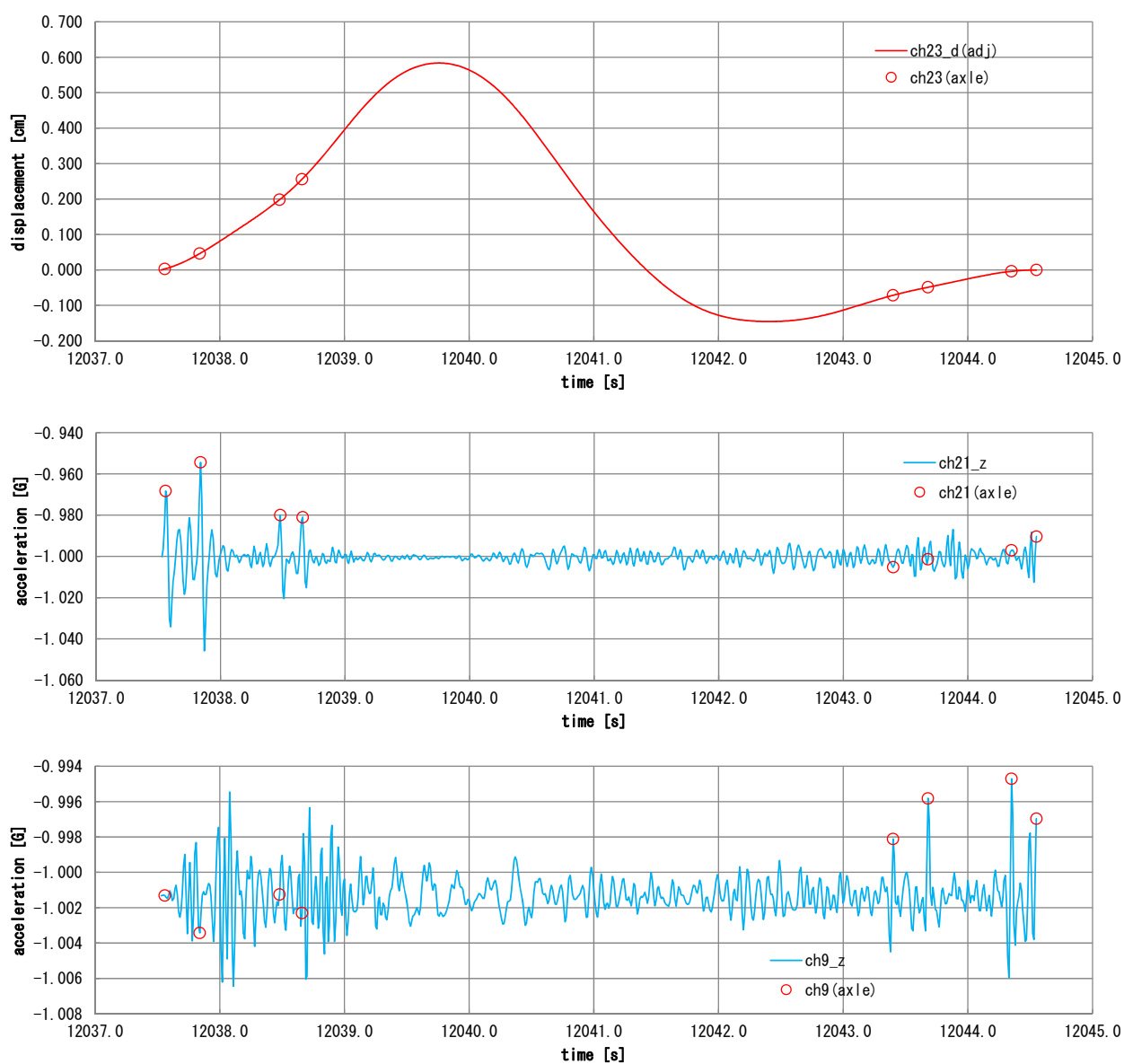


図 3-5-7 試験車量走行時データ(14:33 付近, 上段: ch23 変位, 中段: ch21 加速度, 下段: ch9 加速度)

表 3-5-3 車軸通過時間と車両速度(14:33 付近)

Axle		Entering			Exiting		
Number	Distance [m]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]
1st	0.0	12037.56		0.00	12043.40		0.00
2nd	1.9	12037.84	24.4	0.28	12043.68	24.4	0.28
3rd	4.3	12038.48	24.2	0.92	12044.35	23.1	0.95
4th	1.2	12038.66	24.0	1.10	12044.55	21.6	1.15
Average			24.2			23.0	

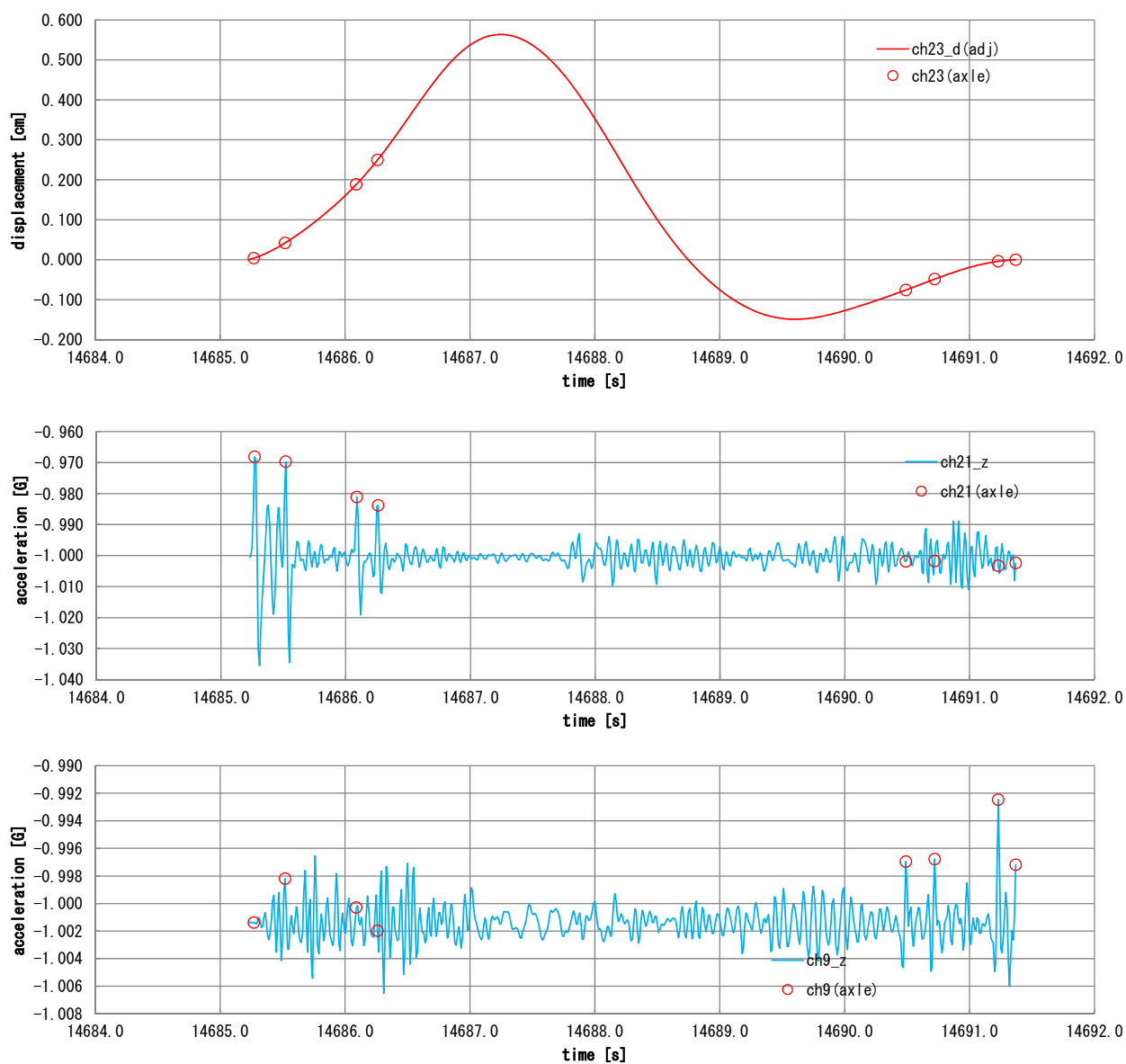


図 3-5-8 試験車量走行時データ (15:17 付近, 上段: ch23 変位, 中段: ch21 加速度, 下段: ch9 加速度)

表 3-5-4 車軸通過時間と車両速度 (15:17 付近)

Axle		Entering			Exiting		
Number	Distance [m]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]
1st	0.0	14685.27		0.00	14690.49		0.00
2nd	1.9	14685.52	27.4	0.25	14690.72	29.7	0.23
3rd	4.3	14686.09	27.2	0.82	14691.23	30.4	0.74
4th	1.2	14686.26	25.4	0.99	14691.37	30.9	0.88
Average			26.6			30.3	

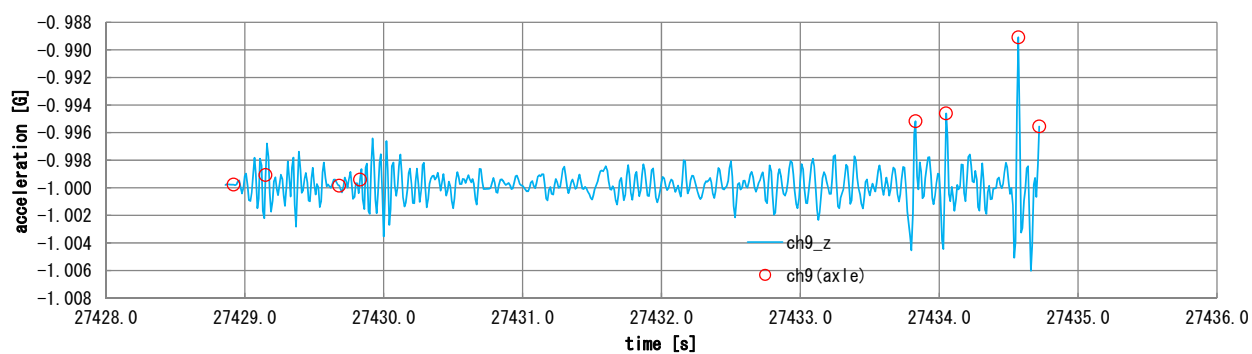
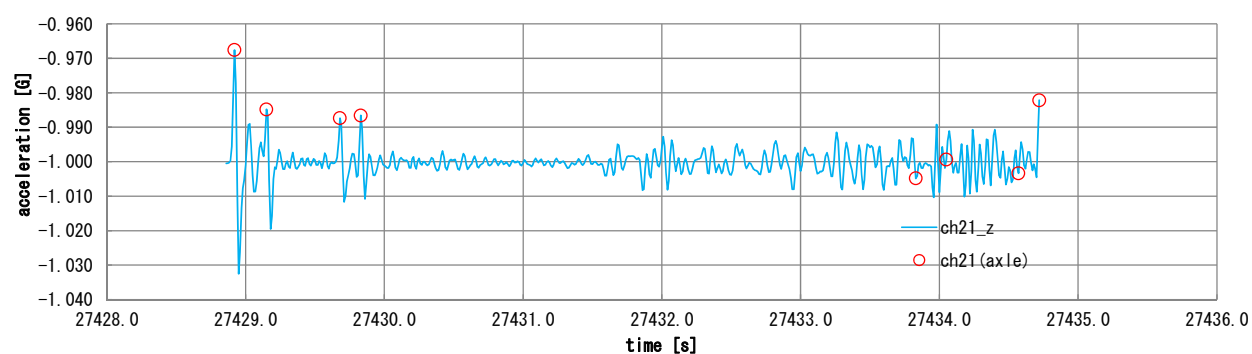
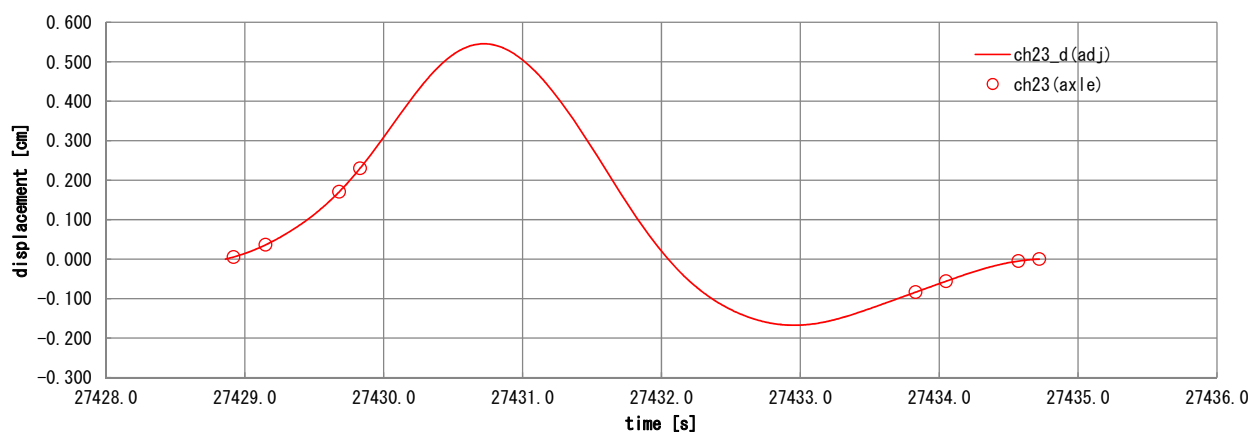


図 3-5-9 試験車量走行時データ (18:50 付近, 上段: ch23 変位, 中段: ch21 加速度, 下段: ch9 加速度)

表 3-5-5 車軸通過時間と車両速度 (18:50 付近)

Axle		Entering			Exiting		
Number	Distance [m]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]	Time [s]	Velocity [km/hr]	Lag Time [s]
1st	0.0	27428.92		0.00	27433.83		0.00
2nd	1.9	27429.15	29.7	0.23	27434.05	31.1	0.22
3rd	4.3	27429.68	29.2	0.76	27434.57	29.8	0.74
4th	1.2	27429.83	28.8	0.91	27434.72	28.8	0.89
Average			29.2			29.9	

3-5-5 影響線

14:33 の変位データ(図 3-5-7)と車軸通過時間の情報(表 3-5-3)より影響線を算出する.

- 1) 以下の参考文献の手法を用いる. ⇒参考文献 7)

鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析

舘石和雄・竹之内博行・三木千尋, 土木学会論文集 No.507/I-30, P109-119, 1995.1

- 2) (以下 3-4-1 の繰返しとなるが)着目位置での影響線を $i_{\varepsilon}(t)$ とすると, その位置での変位は各車軸によって生じる変位の重ね合わせとなる.

$$d(t) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot i_{\varepsilon}(t - \tau_i) \quad (8)$$

ここに,

n : 車軸数(今回は 4)

P_i : 軸重(表 3-5-1 の通り)

τ_i : 車軸 i の通過時間(表 3-5-3 の Lag Time)

- 3) この時, 影響線 $i_{\varepsilon}(t)$ のフーリエ変換 $I_{\varepsilon}(f)$ は式(8)の両辺をフーリエ変換することにより次式となる.

$$I_{\varepsilon}(f) = \frac{D(f)}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot e^{-i2\pi f \tau_i}} \quad (9)$$

ここに,

$D(f)$: $d(t)$ のフーリエ変換

- 4) $I_{\varepsilon}(f)$ を逆フーリエ変換することにより影響線 $i_{\varepsilon}(t)$ を求めることができる.

$$i_{\varepsilon}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{\varepsilon}(f) \cdot e^{i2\pi f t} df \quad (10)$$

このようにして求めた影響線を図 3-5-10 に示す.

赤点線は式(10)そのもの, 青実線は第 1 軸が橋梁を退出した後の影響線を 0 としたものである. 上記の手法では $d(t)$ が周期関数であると仮定してしまうため, 実際には車軸が橋梁を退出した後も赤点線のように値が発生してしまう. また $t=0$ の時にも値を持つてしまう.

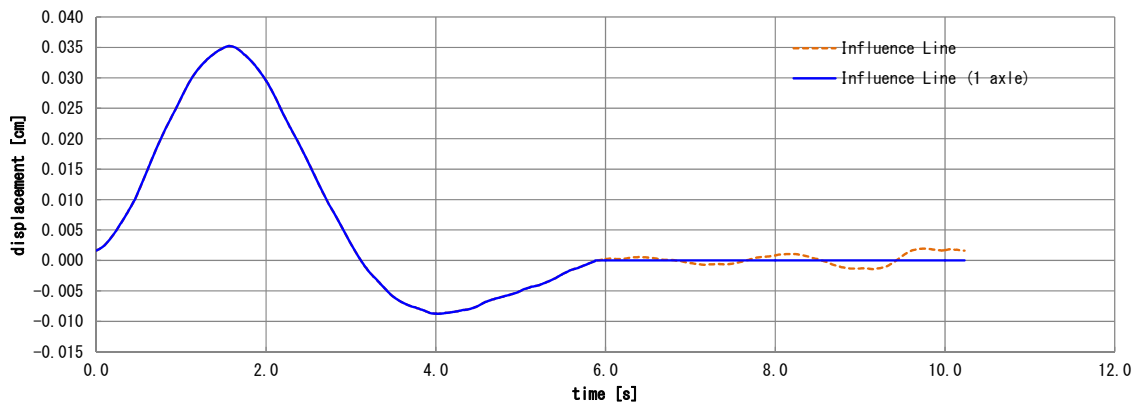


図 3-5-10 影響線

影響線を青実線とし、式(8)で変位を算出した結果が下図の青点線である。図 3-5-10 で $t=6\text{s}$ 付近以降の値を切り捨てた影響で、式(8)で算出した変位(青点線)が、積分して算出した変位(赤実線)と若干合わない。

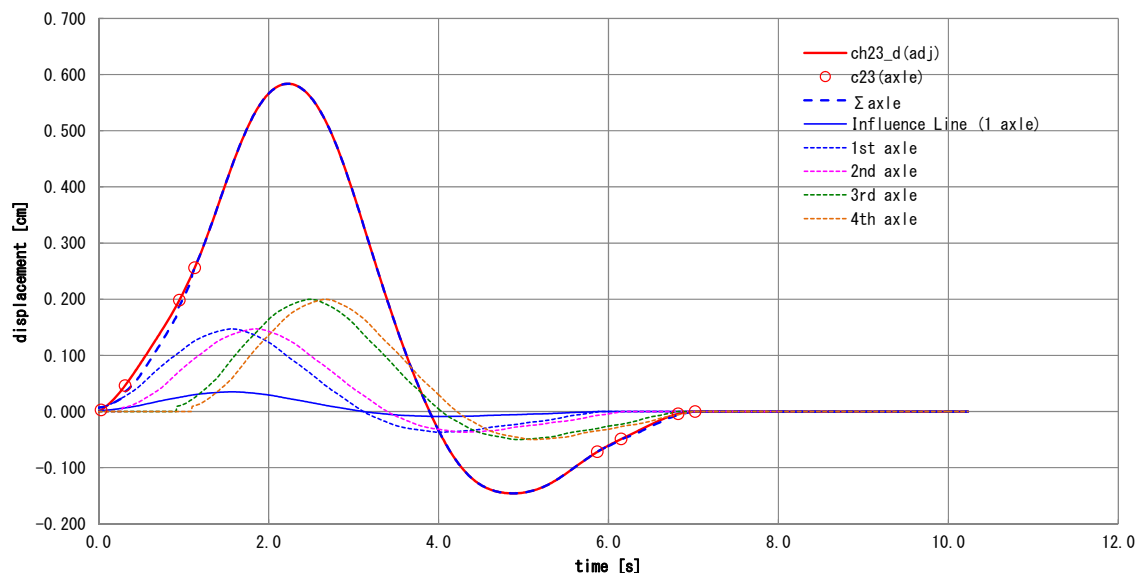


図 3-5-11 影響線と影響線で算出した変位

ここでは、 $t=0\text{s}$ の時に影響線が 0 となるように $t=0\text{s} \sim 1\text{s}$ (影響線のピーク位置を考慮してそれを超えないように範囲を設定した)の間で影響線を補正した。最終的に軸重の推定に用いた影響線を図 3-5-12 (青線)に示す。図 3-5-13 がその影響線で算出した変位(青点線)と、積分で算出した変位(赤実線)の比較である。

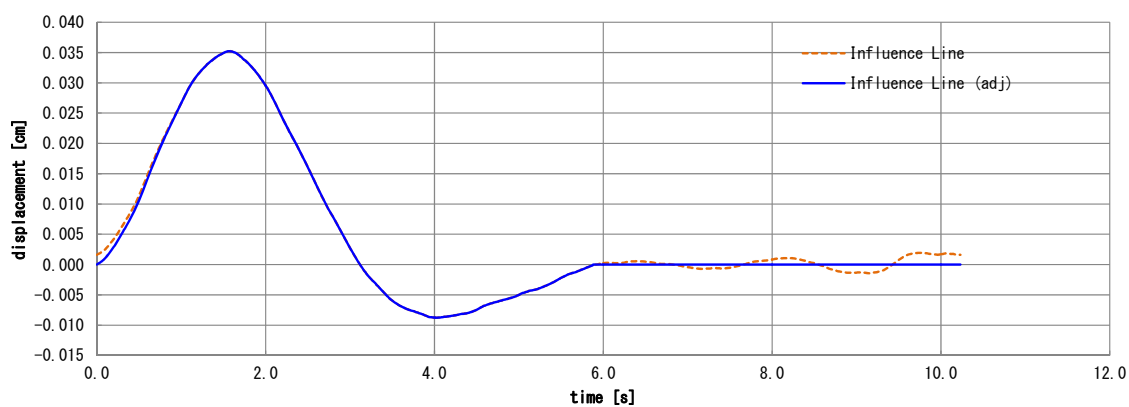


図 3-5-12 影響線

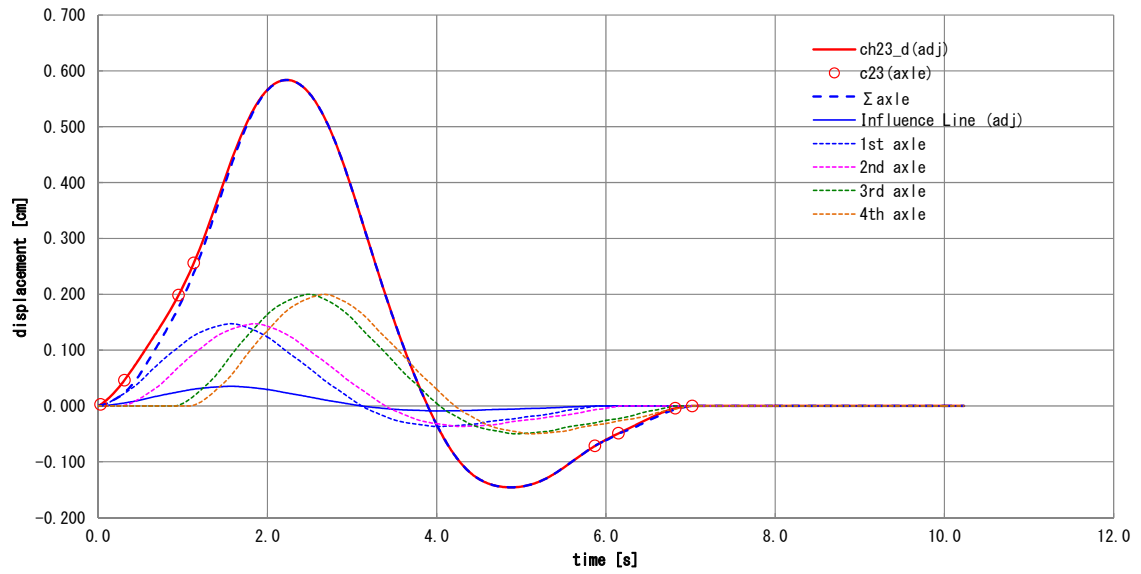


図 3-5-13 影響線と影響線で算出した変位

3-5-6 軸重の推定

3-5-5 で算出した影響線を用いて軸重を推定した.

- 1) 軸重の推定には条件のない間接測定における最小二乗法を用いる.
- 2) 変位データ $d(t)$ を N 個の要素を持つベクトル, 第 i 軸が橋梁に進入した時間に合わせた影響線を $i_i(t)$ とすると, 軸重 P は以下のように算出できる.

$$d(t) = P_1 i_1(t) + P_2 i_2(t) + P_3 i_3(t) + P_4 i_4(t) \quad (11)$$

$$= [i_1(t) \quad i_2(t) \quad i_3(t) \quad i_4(t)] \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix}$$

$$= IP$$

$$I^t d = I^t IP \quad (12)$$

$$\therefore P = (I^t I)^{-1} I^t d \quad (13)$$

(1) 14:33 の変位データ

14:33 の変位データから改めて軸重を推定した結果を表 3-5-6 に示す。表 3-5-6 には実際の軸重(表 3-5-1)との比較も示す。また推定した軸重と影響線より式(8)で算出した変位を図 3-5-14 の青点線で示す。図 3-5-14 の赤実線は積分して求めた変位(図 3-5-7 上段と同じ)である。変位のピーク値の比較を表 3-5-7 に示す。

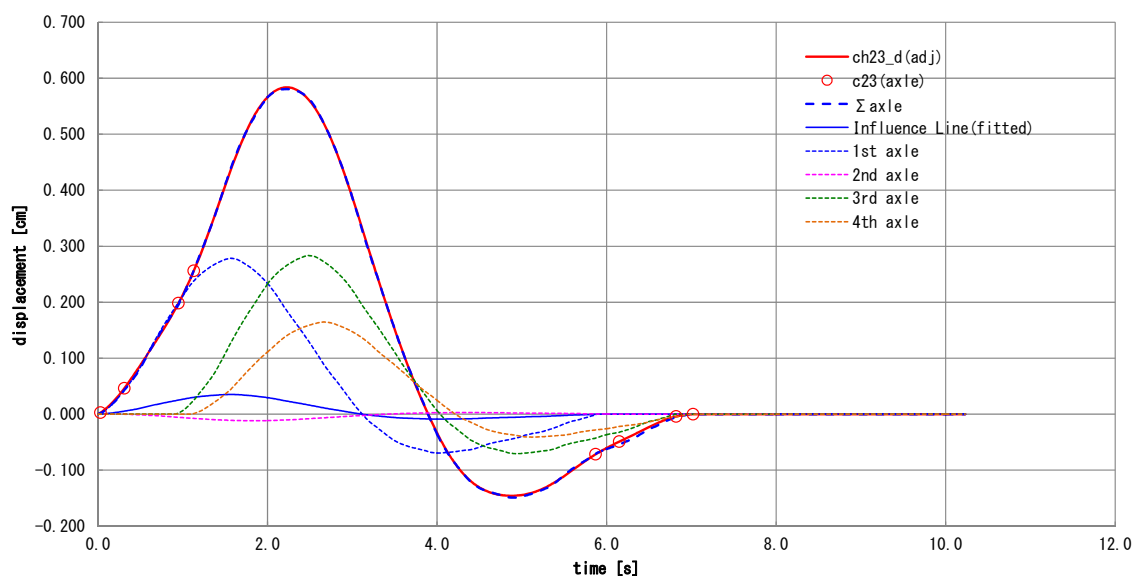


図 3-5-14 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(14:33)

表 3-5-6 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error
			Est/Act
1st	7.90	4.18	
2nd	-0.34	4.18	
front total	7.57	8.36	0.91
3rd	8.04	5.67	
4th	4.67	5.67	
rear total	12.71	11.35	1.12
Total	20.28	19.71	1.03

表 3-5-7 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference
			Est/Int
1st Span	0.58	0.58	0.99
2nd Span	-0.15	-0.15	1.02

今回用いた影響線で変位を算出すると、本来は図 3-5-13 に示すように積分で求めた変位と誤差が生じる。しかし、式(13)では変位が合うように軸重を推定しているため、推定された軸重は実際の軸重と合わず、10%前後の誤差が生じている。誤差が発生する要因としては、そもそも各車軸の軸重が正確に分かっている訳ではなく、

第 1 軸の軸重 = 第 2 軸の軸重

第 3 軸の軸重 = 第 4 軸の軸重

として影響線を求めている影響も大きいと考えられる(表 3-5-1)。

一方変位の方は非常によく一致している(表-7)。また車両重量についてもよく一致している(推定値 20.28[tonf])。

(2) 15:17 の変位データ

15:17 の変位データから軸重を推定した結果を図 3-5-15、表 3-5-8、表 3-5-9 に示す。ここでは車両の速度が違っているため、影響線の作用時間を調整している(図 3-5-16)。

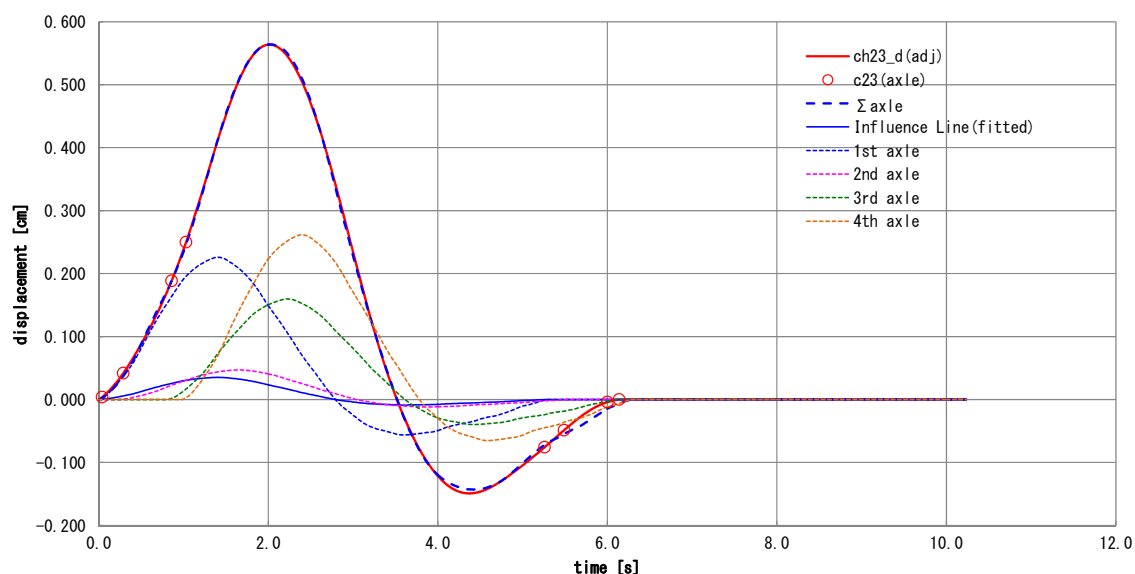


図 3-5-15 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(15:17)

表 3-5-8 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error Est/Act
1st	6.42	4.18	
2nd	1.34	4.18	
front total	7.75	8.36	0.93
3rd	4.54	5.67	
4th	7.43	5.67	
rear total	11.97	11.35	1.05
Total	19.73	19.71	1.00

表 3-5-9 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference Est/Int
1st Span	0.56	0.56	1.00
2nd Span	-0.14	-0.15	0.96

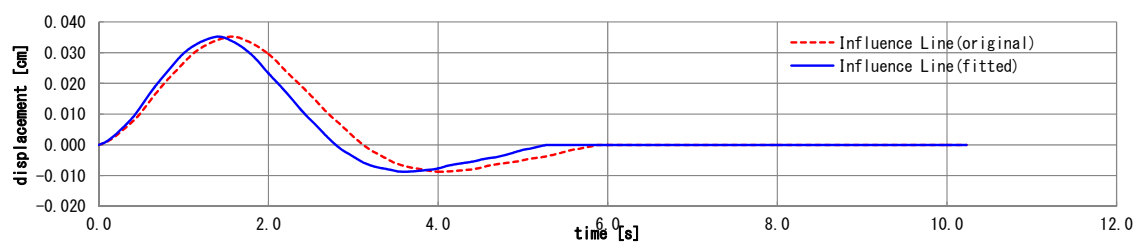


図 3-5-16 影響線の作用時間の調整(15:17)

各軸の軸重はそれほど良く一致していないが、前 2 軸の合計と後 2 軸の合計、全体重量、変位は良く一致している。

(3) 18:50 の変位データ

18:50 の変位データから軸重を推定した結果を図 3-5-17、表 3-5-10、表 3-5-11 に示す。ここでも影響線の作用時間を調整している(図 3-5-18)。

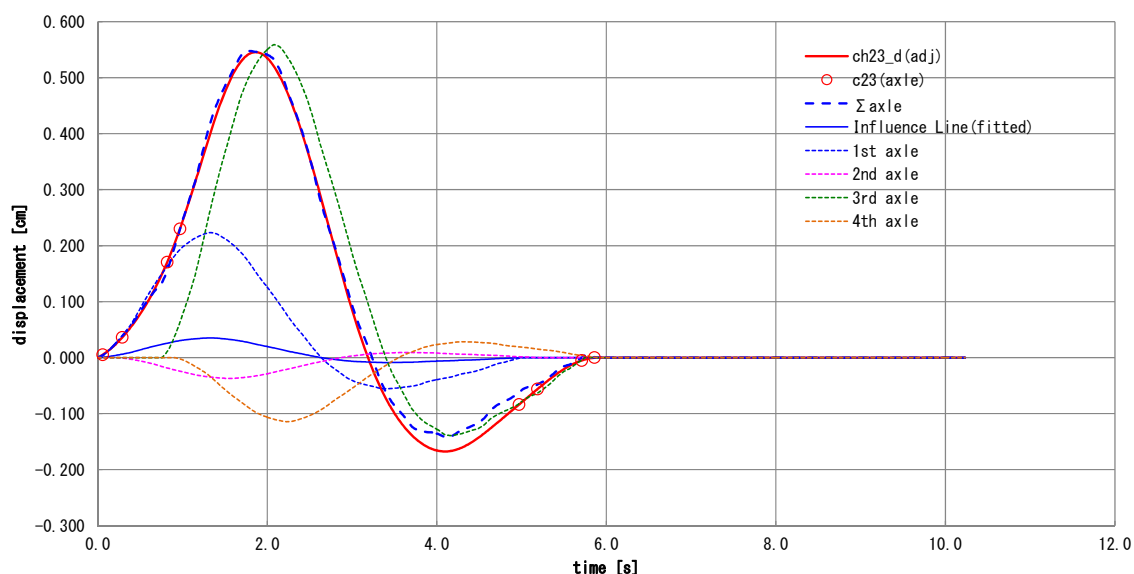


図 3-5-17 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(18:50)

表 3-5-10 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error
			Est/Act
1st	6.34	4.18	
2nd	-1.05	4.18	
front total	5.29	8.36	0.63
3rd	15.86	5.67	
4th	-3.24	5.67	
rear total	12.62	11.35	1.11
Total	17.91	19.71	0.91

表 3-5-11 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference
			Est/Int
1st Span	0.55	0.55	1.00
2nd Span	-0.14	-0.17	0.85

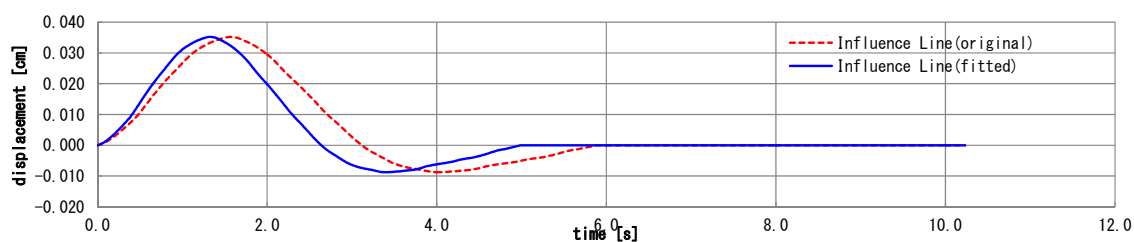


図 3-5-18 影響線の作用時間の調整(18:50)

このデータでは軸重の精度はあまり良くなく、変位も第 2 径間の値が悪い。全体重量は 10%以内となっておりまずまずである。

もともと、積分して求めた変位データの第 2 径間の値(-0.17[cm])が、14:33、15:17 のものと比べて大きい。軸重はここに引っ張られて精度が落ちたと考えられる。なぜ第 2 径間の変位が他の時間の

データと比べて大きかったのかは不明であるが、図 3-5-3 を見ると、試験車量が退出した後に変位が 0 に戻っておらず、積分した結果にドリフトの影響が大きく入り込んでいるものと考えられる。

(4) 14:33 の変位データ(影響線のリンク効果を考慮した場合)

以上(1)～(3)は影響線を図 3-5-12 の青実線とした場合の結果である。物理現象としては意味が無いが、フーリエ変換時のリンク効果を見せず、影響線を図 3-5-12 の赤点線として軸重を推定した結果を図 3-5-19、表 3-5-12、表 3-5-13 に示す。

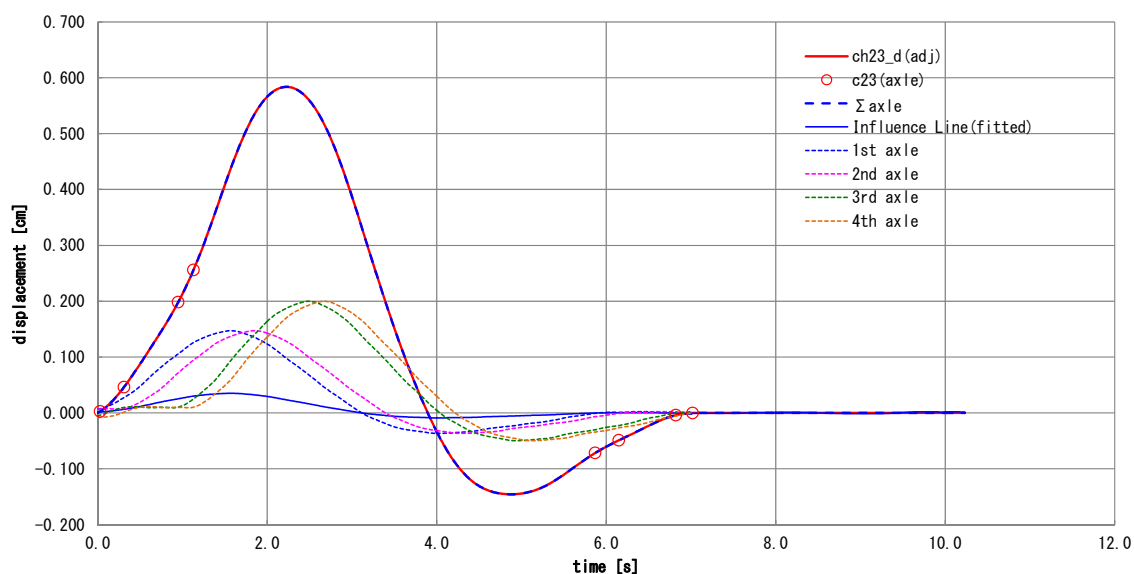


図 3-5-19 推定した軸重と影響線を用いて算出した変位(14:33)

表 3-5-12 推定した軸重と実際の軸重

	Axle Weight [tonf]		
	Estimated	Actual	Error Est/Act
1st	4.18	4.18	
2nd	4.18	4.18	
front total	8.36	8.36	1.00
3rd	5.67	5.67	
4th	5.67	5.67	
rear total	11.35	11.35	1.00
Total	19.71	19.71	1.00

表 3-5-13 変位のピーク値の比較

	Displacement [cm]		
	Estimated	Integration	Difference Est/Int
1st Span	0.58	0.58	1.00
2nd Span	-0.15	-0.15	1.00

数学的には当たり前かもしれないが、軸重も変位もぴったり一致する。

3-4-7 まとめ

本検討では B-WIM の一連の作業を Microsoft Excel で実施し、まずまずの精度が出ることを確認した。作業をして感じたことを以下にまとめる。

- 1) 今回は BPF を実現するためにデータを一度フーリエ変換した。直接、時刻歴上で BPF を実現できればデータの扱いがもう少し自由になると思われる。
- 2) 軸重の頻度分析をするには、車両通過時のデータの取り出しを自動化する必要がある。

- 3) 2 径間でまとめて影響線を求めたが、径間ごとに分けても良かった。そうすれば走行中に速度が変わっているような場合でも精度が上がると予想できる。

【参考文献】

- 1) 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽: MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 3, pp. 364-379, 2016.
- 2) Park K-T., Kim S-H., Park H-S., and Lee K-W.: The determination of bridge displacement using measured acceleration, Engineering Structures 27, pp. 371-378, 2005.
- 3) 関屋英彦, 横関耕一, 木村健太郎, 小西拓洋, 三木千壽: 橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 1, pp. 61-74, 2016.
- 4) Yutaro Umekawa, Eiichi Sasaki, George Minesawa: Evaluation of Vehicular Induced Displacement by Using Wavelet Transformation from Wireless Acceleration Measurement, pp. 260-267, IABSE Workshop Helsinki, 2015.
- 5) Nagayama, T, and Zhang C.: A numerical study on bridge deflection estimation using multi-channel acceleration measurement, 構造工学論文集 A, Vol.63, pp. 209-215, 2017.
- 6) イブ・トーマス, 中村尚五: デジタル信号処理, 東京電気大学出版局, 1999.
- 7) 舘石和雄, 竹之内博行, 三木千寿: 鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析, 土木学会論文集 No.507/I-30, 109-119, 1995.

§4 簡易な B-WIM に関する検討

4-1 キャリブレーションフリーの B-WIM

一般的な B-WIM 手法である影響線を用いた方法は、影響線を求めるためにキャリブレーション試験を行う必要がある。キャリブレーション試験は、重量が既知の試験車両を用いて実施するが、橋梁上のほかの車両の走行がないフリーな状況でのデータ取得が必要であり、かつ、そのデータが車線ごとに複数回分のデータがあることが望ましい。また、橋梁の振動数等の振動特性は温度の影響を受けるとの指摘もあることから、本来はキャリブレーション試験は様々な温度条件下で実施する必要性があるとも考えられる。このようなキャリブレーション試験は、B-WIM 手法の適用上障壁となる可能性もある。そこで、試験車両を準備してのキャリブレーション試験を必要としない、キャリブレーションフリーの B-WIM 手法について検討することとした。すなわち、キャリブレーション試験を実施せず、できる限り精度の良い影響線を同定することができないかという試みである。ここでは、キャリブレーションフリーの B-WIM 手法の実現例として、通常多く走行している普通乗用車通行時のデータを数多く利用して、普通乗用車の平均重量とされている 1.42 トンという情報を用いて影響線を取得しようとする方法について提案する。この方法によれば、温度が異なる状況での影響線同定なども可能となる可能性があり、よりアダプティブな B-WIM の構築が期待できる。提案手法の適用性検討のため、3 章で取得した加速度計による計測データを用いる。

4-1-1 普通乗用車通過時のデータを用いた影響線の同定

影響線を同定する際に、その誤差を最小限に抑えるためより多くの普通乗用車通過時のデータを用いて、平均化することで、普通乗用車の平均重量に近づくと考えられる。ここでは、3 章で実施した加速度の連続計測データから、普通車が単独で走行した全データの速度を補正して足し合わせ、その平均を取ることで普通乗用車通過時の代表的な時系列データとして用いることとした。普通乗用車の平均重量は、国土交通省の自動車燃費一覧（平成 24 年 3 月）¹⁾に掲載されたガソリン乗用車車両重量中の中間値を平均したもの 1.42ton に、乗員の重量を考慮し 1.5ton として考えることとした。影響線の同定の際には、平均されたデータを 0.75ton ずつの 2 軸にわけて用いることとした。

図 4-1-1 に普通車 88 台分を平均した変位データ、図 4-1-2 に同定された影響線を示す。影響線同定に用いる加速度計位置は図 3-4-3 で示した。また、影響線同定に必要な軸間隔は 3-4-1 同様にエクスポンジョイントを通ったときの衝撃に着目し、支承部 B の加速度データから取得した。速度は図 3-4-1 に示す A と B の加速度データから橋梁を通過している区間は等速と仮定し、一軸目の通過時間をそれぞれ取得することで算出し、9.0(m/s)として用いた。

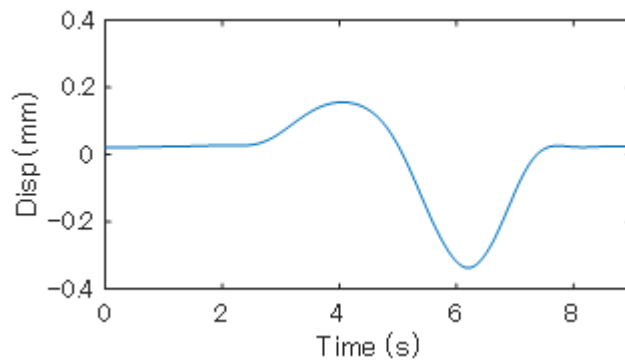


図 4-1-1 普通乗用車通過時のデータ 88 台分を平均化した変位履歴

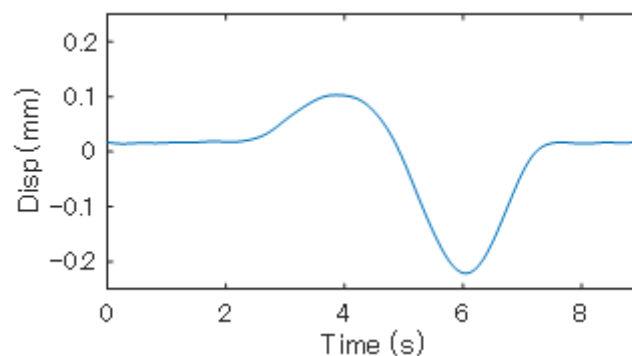


図 4-1-2 普通乗用車通過時のデータから同定された影響線

4-1-2 車両重量分析結果

3-4-2 同様、現場測定で用いた試験車両が単独で走行した 3 ケースを用いて、車両重量分析を行うこととした。その結果を図 4-1-3~5、表 4-1-1 に示す。図中の **real** は測定された試験車が走行したときの変位データ、**layered** は最小二乗法によって算出された軸重と影響線を掛け合わせて足したものを示している。

表 4-1-1 に示すように総重量の誤差はそれぞれ 1.8%、5.6%、5.6%となり、総重量の誤差は 3 ケースとも 6%以内に抑えられていることがわかる。また、3 ケースの平均値をとると、20.56(tonf)となり、誤差は 4.3%と精度が高い結果が得ることができている。またこの手法においても表 3-4-3 に示すように、異なる試験車両の速度条件においても高い精度を得ることができると確認された。

表 4-1-1 車両重量分析結果

	Case 1	Case 2	Case 3	Real
P ₁	-1.57	-8.68	-3.41	
P ₂	8.77	22.18	12.83	
P ₃	18.08	-3.64	10.42	
P ₄	-5.22	10.95	0.97	
Total [tonf]	20.07 (+1.8%)	20.81 (+5.6%)	20.81 (+5.6%)	19.71

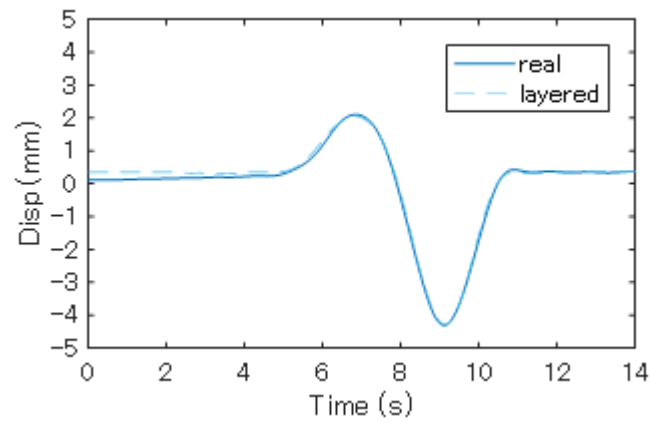


図 4-1-3 キャリブレーションフリーの B-WIM 手法適用結果 (Case 1)

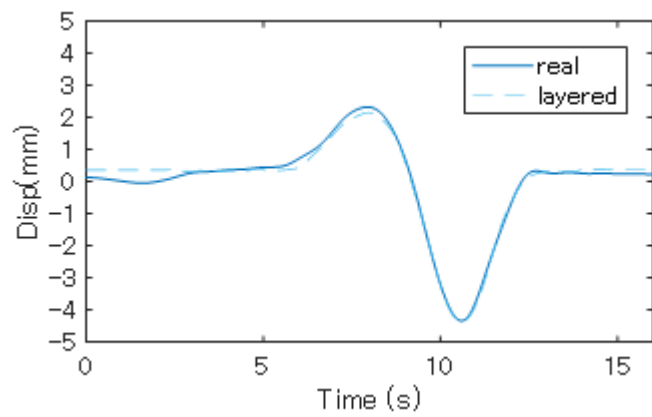


図 4-1-4 キャリブレーションフリーの B-WIM 手法適用結果 (Case 2)

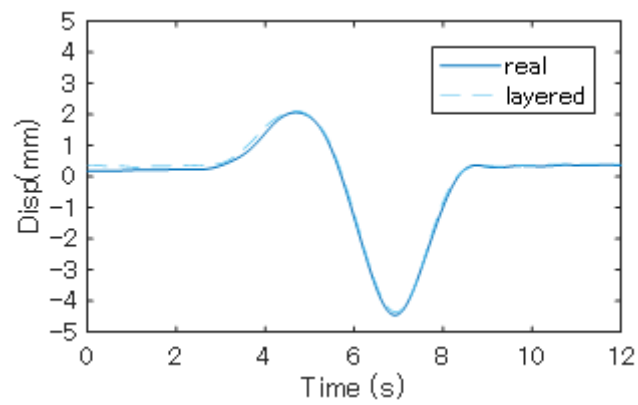


図 4-1-5 キャリブレーションフリーの B-WIM 手法適用結果 (Case 3)

4-2 発電に着目した荷重評価の可能性

近年、橋梁の振動を利用した環境発電技術の検討がなされている。竹谷ら²⁾³⁾は、橋梁における低周波振動、温度等による振動特性の微変動に対応できるロバスト性の高い、橋梁振動発電デバイスの設計手法を提案し、その手法に基づいて実際に発電デバイスを開発し、実橋梁において発電・蓄電が可能であることを示している。当該研究の中で、図4-2-1のように、大型車交通量と橋梁振動発電デバイスによる発電量は高い相関があることを示している。橋梁振動を利用した発電においては、通過する大型車の重量により発電量が異なると考えられ、このことを利用して、発電量の情報から大型車の重量や交通量について考察することが今後可能になる可能性もあると考えられる。

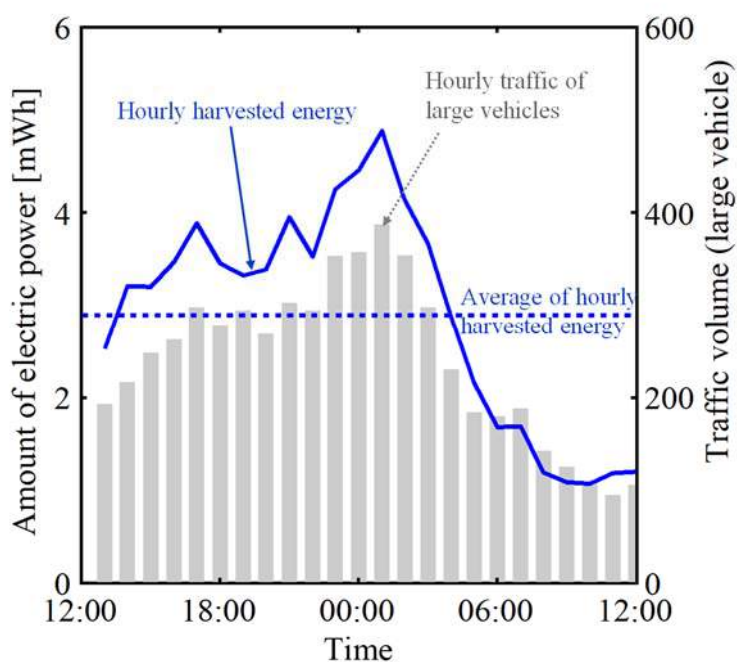


図 4-2-1 発電量と大型車交通量の関連性について³⁾

【参考文献】

- 1) 国土交通省自動車局：http://www.soumu.go.jp/main_content/000240963.pdf
- 2) 竹谷晃一，佐々木栄一，岩吹啓史，長船寿一，洞宏一，名児耶武：橋梁振動を対象とした同調質点系発電デバイスの開発と実橋梁への適用，土木学会論文集 A1，Vol. 72，No. 2，pp. 290-301，2016.
- 3) Koichi Takeya：Design and Development of Vibration Energy Harvesters using Tuned-Mass Systems for Bridge Structures，Doctoral Dissertation，Tokyo Institute of Technology，2017.

3. 大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術WG 調査研究報告書

大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術
に関する研究

大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術 WG メンバー

WG 長	宮森 保紀	北見工業大学
部会員	飯田 哲也	瀧上工業（株）
〃	石原 彰子	宮地エンジニアリング（株）
〃	大迫 章平	JIP テクノサイエンス（株）
〃	戸田 勝哉	（株）IHI インフラシステム
〃	豊田 純教	川田テクノシステム（株）

大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術 WG 目次

§ 1. はじめに	3-1
§ 2. 大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術に関する文献・事例調査	3-2
2-1. 大規模データ貯蔵・処理技術の基礎知識	3-3
2-1.1. データベースについての基礎知識	3-3
2-1.2. ビッグデータについての基礎知識	3-5
2-1.3. データウェア・アプライアンス (DWH アプライアンス)	3-10
2-2. 大規模データ貯蔵・処理技術と事例の整理	3-14
2-2.1. リレーショナルデータベースによる測定データ管理の事例	3-14
2-2.2. 山岳トンネルにおける CIM の開発	3-16
2-3. 可視化技術の基礎知識	3-17
2-3.1. データ可視化に関する基礎知識	3-17
2-3.2. AR (拡張現実) の基礎知識	3-21
2-3.3. 基本的な可視化の事例	3-24
2-4. 可視化技術と事例の整理	3-27
2-4.1. 道路維持管理における点検・診断・モニタリングの現状と展望	3-27
2-4.2. 赤外線サーモグラフィによるスクリーニング	3-28
2-4.3. ひずみ測定による鋼構造物の余寿命診断	3-29
2-4.4. ちば市民協働レポート	3-30
2-4.5. InfraDoctor	3-31
2-4.6. 耐候性鋼材のさび判定	3-32
2-4.7. CIM モデリングシステム	3-34
§ 3. 大規模データ貯蔵・処理のための加速度計測データ処理プログラム	3-35
3-1. 大規模データ貯蔵・処理システムの意義	3-35
3-2. 加速度計測データ処理プログラムの機能と使用方法	3-36
3-3. 加速度計測データ処理プログラムの適用例	3-49
§ 4. 大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術における課題と今後の展望	3-53

§ 1. はじめに

近年、各種のセンサー開発やデータ処理技術を含むセンシング技術の発展により、鋼橋を含むインフラの製作、架設や維持管理においても、生成されるデータ量は飛躍的に増えている。

これらの大量のデータに対して、従来のようにデータファイルごとに閲覧し、分析することは膨大な作業量となり、取り扱いそのものが難しくデータが死蔵される恐れもある。しかしながら、生成される多種・多量のデータに対して、目的に応じて自動的に分析することができれば、これまでに得られなかったような有意義なデータを得ることが可能になる。例えば、構造物の劣化や変状を発見する構造健全度診断や、構造物への荷重作用を推定する Weigh in Motion、地震が発生した際のデータから構造物の状態を一斉に点検することなどは有効な適用例と考えられる。むしろ、大規模なデータの取得と貯蔵、処理や可視化に関する技術は、センシング技術を用いて構造評価を行うために不可欠な技術であるともいえる。

そこで、WG3 では、このような大量のデータを効率的に取り扱うためには、データを貯蔵・管理するデータ貯蔵システムと大量のデータを効果的に取り扱う可視化技術が必要であるとの立場から、以下の活動目標を設定した。

- ・ データ貯蔵システムと可視化技術に関する調査により、橋梁センシングに必要な機能や課題を明らかにする。
- ・ データ貯蔵システムと可視化技術のそれぞれについて、橋梁センシングに適用可能なシステムを試作し提案する。

この目標に対して、まずデータ貯蔵システムと可視化技術に関して、橋梁技術者として共有すべき基本的知識を整理し、他分野などでの先行事例の収集と整理を分担して調査した。さらに、実データに対する大規模データの処理、可視化を行う例として、加速度計測データ処理プログラムを開発し、本部会で実施した実橋梁の計測結果に適用して、その有効性を検証した。さらに、これらの調査、検討結果に基づき、これらの技術にける課題と今後の展望について整理した。

§ 2. 大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術に関する文献・事例調査

本節では、「大規模データ貯蔵・処理技術の基礎知識」「大規模データ貯蔵・処理技術と事例の整理」「可視化技術の基礎知識」「可視化技術と事例の整理」について、メンバーで分担して事例調査を行った。その結果を次頁以降にフォーマットに沿ってまとめた。

分類 (選択して 他を削除)	① データ貯蔵システムに関する知識
技術／知識 の名称	データベースについての基礎知識
概要	大量のデータをコンピュータで保存し、活用するためには、データについてその種別や組織化方法および操作方法について体系的に定めたデータモデルに従って整理、貯蔵することが必要である。さらに、適切なデータベース管理システムによって、それらのデータを操作する必要がある。本項では、現状でもっとも普及しているリレーショナルデータベース（関係データベース）に関する基礎知識をまとめる。 この項の参考文献は末尾にまとめる。
詳細	1. 3層スキーマ データを組織化して管理するためにデータの種類や形式、構造を具体的に定義したものをスキーマ(schema)と呼ぶ。1978年に米国規格協会(ANSI)は図1のような3層からなるスキーマを提案し、現在では広く使われている。 3層の中層となる概念レベルには、データベース化される実世界のデータの関係を論理的に定めた概念スキーマがある。このデータ間の関係を定めることをデータモデリングというが、データベースに対する多様な利用目的に応えるような汎用性と、現実世界のデータ関係を忠実かつわかりやすく表現することが求められる。リレーショナルデータベースでは、この概念スキーマを1つまたは複数の表の集まりで表現する。 上層になる外部レベルでは、それぞれのユーザーやアプリケーションの利用目的に応じたデータベースの見え方（ビュー）を外部スキーマとして定義する。概念スキーマはデータ全体を定義するが、外部スキーマではその用途に応じて、必要なデータのみを構造化する方が、効率性やセキュリティの面で都合が良い。 下層の内部レベルでは、データはハードディスクなどの物理的なストレージに格納されるが、このハードウェア上でデータの取り扱いを規定する内部スキーマが定義される。 図1 ANSIの3層スキーマ

	2. 関係モデルとリレーショナルデータベース 例えば橋梁の測定を行う場合のデータ管理を考えると、橋梁ごとにその名称や橋長、所在地などの情報を整理した表を作るがまず考えられる。また、使用したセンサーについて、種類や型番、シリアルナンバーを整理した表も作られるだろう。このような表をテーブルと呼ぶが、テーブルを構成する橋梁名や橋長、所在地などの各項目が列（カラム または アトリビュート）となり、それぞれの橋梁の情報が行（レコード または タブル）となる。それぞれの表にはその表に 1 回しか現れないデータ項目があり、これを主キーと呼ぶ。橋梁の表では橋梁名が主キーとなり得るが、同じ名前を持つ橋はしばしば存在するので、橋梁 ID などの番号を割り振って管理することが多い。いずれにせよ、このような表形式で定義されたデータ構造を関係モデルと呼び、これらの表によって構成されるデータベースをリレーショナルデータベースと呼ぶ。 リレーショナルデータベースは、複数の表から構成することができる。例えば上述の例では、橋梁 ID を主キーに持つ橋梁テーブルと、センサーID を主キーに持つセンサーテーブルがあり、さらにこれらの表に対して、測定した事実とそのデータの情報を持つ「測定テーブル」が考えられる。測定テーブルは、「測定 ID」を主キーとして、測定日時や測定データをカラムとして持つほかに、測定を実施した橋梁と用いたセンサーの情報も持つことが望ましい。このような場合、測定テーブルのレコードには橋梁 ID とセンサーID を「外部キー」として設定する。このようにリレーショナルデータベースでは、実世界に基づいて情報構造を表で表すが、このデータ構造を適切に作成する方法として E-R 図を用いる方法がある。また、データの一貫性を保つために正規化という操作が行われる。
参考文献	1) 矢吹信喜、蒔苗耕司、三浦憲二郎：工業情報学の基礎、理工図書、2011. 2) 白鳥則郎監修、三石大、吉廣卓哉編著：未来へつなぐデジタルシリーズ 26 データベースービッグデータ時代の基礎ー、共立出版、2014. 3) 増永良文：データベース入門、サイエンス社、2006.
備考	

分類	①データ貯蔵システムに関する知識										
技術／知識 の名称	ビッグデータについての基礎知識										
概要	一般的に語られる「ビッグデータ」の概念について確認し、鋼橋への適用事例について調査した。次に、ビッグデータを収集する際に用いられる手法、ならびに、収集したデータの貯蔵方法についての調査内容を示した。最後に、貯蔵したデータの分析を行う際の観点と、データ活用方法の例を示した。										
詳細	1. ビッグデータの概念について ビッグデータとは、一般には「インターネットを通じて流通する、多種多様な大量のデータ」を指すことが多い。 また、近年のセンサー技術の向上やあらゆるモノがインターネットにつながることにより、リアルタイムに大量に生成される多様な情報を収集し、様々なデータを組み合わせて分析を行い、事業に付加価値をもたらす取り組みを、ビッグデータの利活用として捉えることができる。⁰⁾ <pre> graph LR A[①データの収集] --> B[②データ分析] B --> C[③事業への活用] </pre> 図1 ビッグデータの利活用の流れ 鋼橋への適用事例として、東京ゲートブリッジでのセンシングデータを活用した構造物モニタリングシステムがある。このモニタリングシステムでは、下表で示すように、センサー等で収集したデータを用いて、橋梁管理や健全度の把握等に役立てている。¹⁾ 表1 収集データと事業活用への事例 <table border="1"> <thead> <tr> <th>収集データ</th><th>事業への活用</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>風向風速、雨量、震度等</td><td>通行規制の判断（交通管理情報）</td></tr> <tr> <td>桁温度、支承変位</td><td>常時の橋梁健全度の把握</td></tr> <tr> <td>地震前後の支承部の変位</td><td>異常時の橋梁健全度の把握</td></tr> <tr> <td>通過車両台数と車両重量の計測</td><td>鋼床板への負荷検知を行う等、予防保全に向けての情報収集</td></tr> </tbody> </table> 2. 大量に生成される多様なデータの収集 大量に生成される多様なデータとして、橋梁センシングを例にとると、	収集データ	事業への活用	風向風速、雨量、震度等	通行規制の判断（交通管理情報）	桁温度、支承変位	常時の橋梁健全度の把握	地震前後の支承部の変位	異常時の橋梁健全度の把握	通過車両台数と車両重量の計測	鋼床板への負荷検知を行う等、予防保全に向けての情報収集
収集データ	事業への活用										
風向風速、雨量、震度等	通行規制の判断（交通管理情報）										
桁温度、支承変位	常時の橋梁健全度の把握										
地震前後の支承部の変位	異常時の橋梁健全度の把握										
通過車両台数と車両重量の計測	鋼床板への負荷検知を行う等、予防保全に向けての情報収集										

加速度、ひずみ、変位、通行車両重量、応力、外気温等のデータが挙げられる。このような計測データは、計測機器の種類やシステムのバージョンの違い等により、ほとんどの場合データ毎に仕様（フォーマット）やデータソース（データ保持の方法）が異なる。そのため、データ収集を行う際、各々のデータに応じたツールをそれぞれ用意しなければならず、また、データ生成の頻度や利用シーンによって収集手法の使い分けが必要なことから、運用面で困難が生じていた。

このような課題を解決する方法として、異なるデータソース・仕様に対して統一した運用を行える仕組みを持ち、さらに、データ収集にリアルタイム性が求められる場合はストリーミング処理を行い、定期的にまとまった大容量データを処理する場合はバッチ処理を行うツールが登場した。

ストリーミング処理を行うツールとして「**fluentd**」、バッチ処理を行うツールとして「**Embulk**」が挙げられる。両ツールとも、異なるデータソースに対してプラグイン（機能追加プログラム）を適用したデータ処理が行えるため、異なるデータソース・仕様への対応が簡単に行える。また、ツールのコミュニティによりプラグインが共有されることから、再利用性が高いことも特徴として挙げられる²⁾。

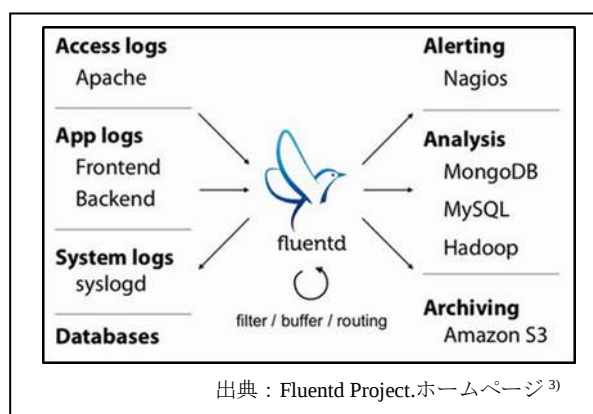


図 2 Fluentd のデータ処理イメージ

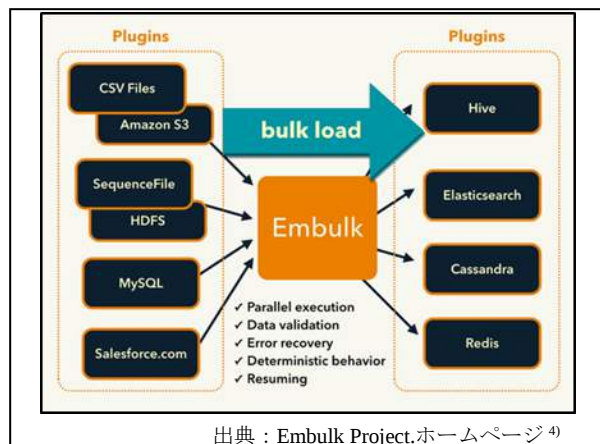


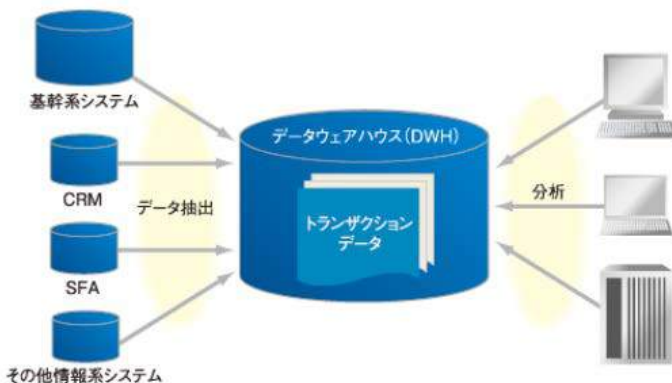
図 3 Embulk のデータ処理イメージ

表 2 fluentd と Embulk の使い方の比較

	Fluentd	Embulk
データ収集、転送の方法	・ストリーミング処理	・バッチ処理
処理対象	・”今”発生しているデータ（数秒間隔で発生し送信されるデータ）	・”過去に”発生したデータ（ファイルやデータベースに蓄積されたデータ）
データ量	・更新頻度＝高い ・データ数＝大量 ・転送容量＝少ない	・更新頻度＝低い ・データ数＝少ない ・転送容量＝大量
鋼橋での利用シーン	・地震による振動や支承変位等の急激な変化の把握 ・車両重量の閾値オーバーによる、重量超過車両の通過の把握	・長期間にわたる振動計測データの並列解析 ・応力、変位、気温、車重等の長期間データの集約による類似性抽出
その他	・メモリ内に受信データをバッファリングするため、障害発生時にデータ消失の可能性あり。	・収集元と転送先のデータの一元性を保つための仕組みは、別途考慮が必要。
	【共通事項】 ・解析処理や類似性抽出は、後工程で行うため、別の仕組みが必要である。	

	これらの仕組みを利用することで、多様なセンサー機器が出力するデータを統一した仕組みで処理し、解析処理に適した形でデータ出力を行うことができる。さらに、プラグインの共有により、生産性を向上させることができる。 3. 多様な形式のデータの貯蔵 ここで、前述の形で収集されたデータをデータベースに貯蔵する場合、後工程のデータ分析等で利用しやすい構造で格納することが期待される。つまり、利用シーンに応じたデータ構造で格納できる仕組みが必要となる。 現在、一般的に使われているリレーショナル型データベースは、あらかじめデータ構造を決めておく必要があるため、柔軟な対応は困難なことが多い。そこで、多様な構造のデータ貯蓄を行い得るよう、リレーショナル型データベースと併せて、非構造化データベースが用いられることになる。 非構造化データベースには、キーと値の単純な組合せでデータを格納するキー・バリュー型データベース、行毎に任意のカラムを格納するカラム指向データベース、XML や JSON といったツリー構造等の柔軟な構造でデータを格納するドキュメント指向データベース等がある。 4. データ分析の手法 多様なセンシングデータを用いた研究として、矢吹らによる、建物のエネルギー消費の改善のためのデータマイニング手法と知識システムを組み合わせた研究⁵⁾がある。この中では、センサデータを用いたデータマイニング（膨大なデータから優位な知識を発掘するためのプロセス）を行う際に必要とされる事項として、次のように述べている。 センサデータを用いたデータマイニングにおいては、センサデータ単体からのデータマイニングでは有用な知識の発見は難しく、センサの周辺情報などのコンテキスト情報を加味したデータマイニング手法が有効である。⁵⁾ 橋梁の振動データをセンサデータとした場合、コンテキスト情報としては、以下に示す情報等が挙げられる。 ・ 橋梁諸元、構造、築年数 ・ 外部からの荷重 ・ 外気温の影響 ・ 通行車両の振動、重量
--	---

	・計測センサの特性（センサ種類、分解能、周波数範囲、出力感度） これらのセンサデータを複合的に分析するには、比較的多くの時間を要するが、複数台の処理装置を用いた並列分散処理を行ったり、より高速なデータアクセスを可能とするインメモリデータベースを用いたりすることで、処理時間の短縮が見込める。その結果、より多くのパターン分析や遊び心をもった調査を行うことができ、新しいアイデアを引き出すことにつながる。 5. データの活用方法 データ分析から得られた結果の活用方法の一例を示す。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>データ分析の結果</th><th>活用方法の一例</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>閾値判定 変化点の抽出</td><td>異常状態の検知</td></tr> <tr> <td>外れ値判定</td><td>異常状態の検知 計測データからのノイズ除去</td></tr> <tr> <td>モード解析の結果 分析結果の自動分類</td><td>データが持つ傾向の把握 関連性の発見</td></tr> </tbody> </table> なお、収集した多様なセンシングデータや分析したデータについて、これまで培ってきた技術に適用できるよう、個別アプリケーションや表計算ソフト向けに整形した形で提供することも有効な活用手段である。	データ分析の結果	活用方法の一例	閾値判定 変化点の抽出	異常状態の検知	外れ値判定	異常状態の検知 計測データからのノイズ除去	モード解析の結果 分析結果の自動分類	データが持つ傾向の把握 関連性の発見
データ分析の結果	活用方法の一例								
閾値判定 変化点の抽出	異常状態の検知								
外れ値判定	異常状態の検知 計測データからのノイズ除去								
モード解析の結果 分析結果の自動分類	データが持つ傾向の把握 関連性の発見								
参考文献	0) 総務省：平成 27 年版情報通信白書 1) 横田 昭人：東京ゲートブリッジの維持管理計画について,関東地方整備局ホームページ,http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000080088.pdf 2) トレジャーデータブログ, (http://blog-jp.treasuredata.com/entry/2014/12/26/090000) 3) Fluentd Project.,(http://www.fluentd.org/) 4) Embulk Project.(http://www.embulk.org/docs/) 5) 矢吹 信喜, 塚本 祥太, 中山 一希, 福田 知弘, 道川 隆士: 建物のエネルギー消費の改善のためのデータマイニング手法と知識システム, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 70 (2014) No. 2 p. I_26-I_33								
備考									

分類	① データ貯蔵システムに関する知識
技術／知識 の名称	データウェア・アプライアンス (DWH アプライアンス)
概要	爆発的に増え続けるデータからタイムリーに価値ある情報を抽出するために、ビッグデータをアドホックに分析したいというニーズが高まっている。近年、経営・会計・マーケティングなどのビジネスインテリジェンス (BI) に活用されている高速分析プラットフォームの「DWH アプライアンス」の概要と注目されている理由について紹介する。
詳細	1. はじめに 「DWH アプライアンス」は、Netezza 社が作った言葉であり、“複雑で手間のかかるデータウェアハウス”をアプライアンスのように“簡単”に使えるようにする、というコンセプトが言葉の由来である。 DWH (Data Warehouse) という言葉をそのまま日本語に訳すと、「データの倉庫」となる。文字通り、企業が情報システムを通じて集めたさまざまなトランザクションデータ（主に取引情報）を保管しておく、巨大な倉庫のようなデータベースを指す（図 1）。 アプライアンス (Appliance) という英語は日本語で「家電」と訳される。一般的に、家電は「冷蔵庫」、「洗濯機」といった「冷やす」、「洗濯物を洗う」といった機能に特化している機械で、その専門の技術者ではなく、誰でも簡単に利用できるといった専用機と定義付けられる。 DWH アプライアンスは、機能を特化することで誰でも簡単に利用できるというコンセプトをビッグデータの収集・蓄積・分析に活用し、複雑なデータウェアハウスをこのアプライアンスという誰でも簡単に利用できる専用マシンで構成されたシステムである。  図 1 : DWH の概念図 2. ビッグデータとアドホック分析 大量で多種多様な蓄積情報であるビッグデータから価値ある情報を取り

出すためには、定型化された分析アプローチではなく、さまざまな角度からデータを眺める目的を特定化したアドホックな分析アプローチが必要となる。つまり、ビッグデータに対する分析アプローチは、あらかじめ想定されていない分析パターンを試行錯誤しながら行う「アドホック分析」が中心になる。

「大量、多様、高頻度」という特性を持ったビッグデータをアドホック分析する際に求められる要件は次の3つである。

- ①高速性：大量データを高速処理できること
- ②簡易性：多種多様なデータを簡単に取り込み、組み合わせて分析できること
- ③迅速性：高頻度で発生するデータをタイムリーに分析できること

この3つの要件の中で特に考慮すべき要件は「簡易性」である。現在、方法論が確立されておらず手探りで進めなければならないビッグデータの分析では、どのデータ種と、どのデータ種を組み合わせで分析すればよいが事前に想定することは難しいため、あらゆるデータ種を分析対象として分析することになる。

このように、ビッグデータの分析においては数多くのデータ種を取り扱う必要があるため、多種多様なデータを簡単に取り込み、組み合わせて分析できるという「簡易性」が重要になる。

3. DWH アプライアンスシステムの特長

(1)システム構成

DWH アプライアンスは、サーバとストレージに、高度なデータ検索/分析を行うアーキテクチャとソフトウェアを組み合わせで最適化したものである（図2）。

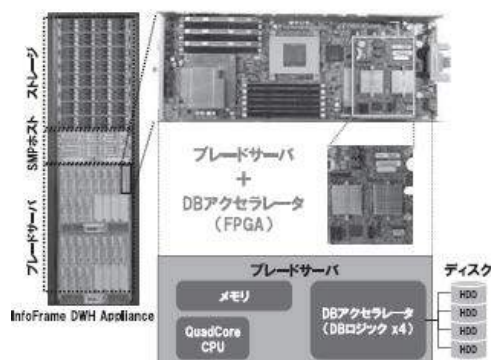


図2：DWH アプライアンスシステム構成(NEC 社製[1])の例

(2)データ処理の高速性

ビッグデータのような大量データを処理する場合、「できるだけデータ

を動かさない」ことが重要である。

大量データの不要な移動は、I/O ボトルネックの発生や、CPU 及びメモリにおける過剰処理につながり、結果としてシステム・パフォーマンスに大きな悪影響をもたらす。

DWH アプライアンスでは、「FPGA (Field Programmable Gate Array)」(設計者やユーザーが構成を設定できる集積回路) という汎用デバイスを利用して、データ・ストリーミングのできるだけ早い段階でデータのフィルタリング処理(データがディスクから取り出されるのと同時に不要なデータを取り除くなど)を実施する。このようにデータの存在するディスクの近くでデータ処理し、不必要な大量データの移動を避ける(図 3)。

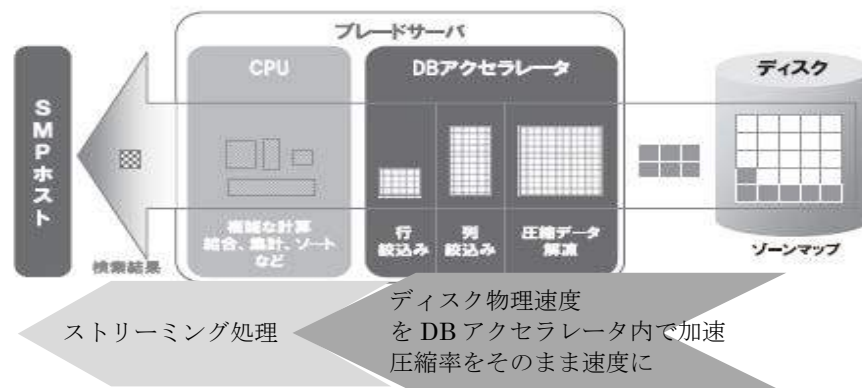


図 3 : FPGA によるデータ・ストリーミング処理(NEC 社製[1])の例

また、「超並列処理アーキテクチャ (Massively Parallel Processing: MPP)」を活用して、大量のデータベース (DB) の検索や分析処理性能を高める(図 4)。

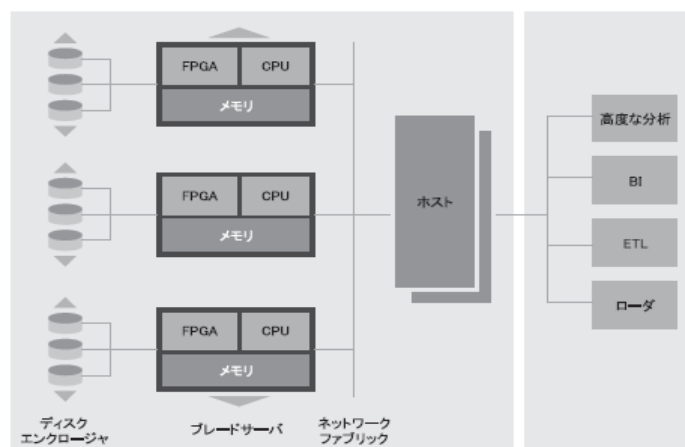


図 4 : DWH アプライアンスの MPP アーキテクチャ(NEC 社製[1])の例

(3)システム利用における簡易性

	DWH アプライアンスのシステムは、「簡易性」を重視した設計となっている。本システムにロードされたデータは、データベース管理者が関与しなくても、自動的にデータ分散が行われて格納される。また、システムに投げられた非定型クエリ（アプリケーションがデータベース内のどのレコードのどの項目を参照するか、あらかじめ決まっていない状態でデータの問い合わせ）は、超並列グリッド内で自動的に高速処理される。そのための事前準備として、一般的な DB 技術では必要とされるデータベース・チューニング作業（インデックス作成やパーティショニングなど）を行う必要はほとんどない。 このような DWH アプライアンスの持つ「簡易性」は、ビッグデータのアドホック分析において大きな効果を発揮する。数百種類のデータ種を組み合わせる分析することになるビッグデータの分析において、新たなデータ種が追加されるたびに、データベース・チューニング作業を実施することは現実的ではない。新たなデータ種を追加しても特にチューニングを必要とせず、ロードすればすぐ分析に使えるという「簡易性」が、ビッグデータのアドホック分析では重要になる。 4. 今後の展望 2000 年代前半からのハードウェアの価格下落により、DWH 自体の大幅な導入コスト削減が図られている。また、自律的にチューニングする機能も備えている DWH アプライアンスの導入・運用に掛かる工数の多くを占めるチューニング作業が不要になれば、大幅なコスト削減が見込める。 こうしたメリットが知られるようになった結果、現在 DWH アプライアンスはユーザーとベンダ双方から注目を集めている。近年 DWH アプライアンスをめぐるベンダの動きが活発化しており、レポートツールなどの DWH の周辺ソフトウェアが整備されてきたことや Google, Amazon がクラウドサービスを展開していることも相乗効果で脚光を浴びている。 特に今後は、DWH の導入ハードルが大幅に下がった現在、BI 以外の広い範囲での活用が広がっていくと予想される。 BI 用途以外の工学分野での DWH の活用例として、IoT により蓄積された大量で多様なセンシングデータをアドホックに分析すること。更にこのデータを技術知識情報として共有するための共通データ基盤としてナレッジ用途に発展させて DWH を利用することが期待できる。
参考文献	[1] 孝忠 大輔・三国 晋,超高速データ分析プラットフォーム「InfoFrame DWH Appliance」,2012.9, http://jpn.nec.com/techrep/journal/g12/n02/pdf/120203.pdf?fromPDF_J6502
備考	

分類 (選択して 他を削除)	② データ貯蔵システムの事例
技術／知識 の名称	リレーショナルデータベースによる測定データ管理の事例
概要	米国 NEES の事例と日本 EDgrid の事例を紹介する
詳細	1. NEES プロジェクトの事例 米国では NEES¹⁾(George E.Brown,Jr.Network for Earthquake Engineering Simulation)が構造工学分野における IT 技術の利用研究や NEESgrid プロジェクトを行なっている。NEES とは震動台だけでなく津波やその他の実験設備を対象に、幅広い地震に関する研究のさらなる高度化を目的に作られた実験的研究および教育に関する次世代ネットワーク資源である。全米に広がる 15 個の実験施設、共同で使用出来るツール類、中央データリポジトリ、および地震シミュレーションソフトウェアによって構築され、全米各地に散らばる NEES の地震工学に関する実験施設と実験データへ地震工学研究者らが自由にアクセスして、実験施設を遠隔から制御したり、実験データを閲覧したりすることを目的としている。この NEES のためのリポジトリシステムとして NEESgrid が存在する。 図 1 NEES プロジェクトのデータモデル²⁾ 2. EDgrid の事例 NEES が進めてきた IT 技術の利用研究や NEESgrid プロジェクトの成果を参考に、我が国では 1995 年に発生した兵庫県南部地震での経験を踏まえて、2005 年 1 月「実大・三次元・破壊」をキーワードとした世界最大の震動実験施設である E-Defense³⁾が完成した。E-Defense は実物大の構造物の崩壊を観察することのできる三次元震動実験施設である。E-Defense では鉄筋コンクリート、木造住宅、橋梁、危険物貯蔵タンク、地盤などに対して三次元の加振を行い、実大規模の構造物の破壊過程や新しい耐震技術を検証することができる。 これらの振動実験には、960 個のセンサ、27 個のカメラ、2 台の高解像度ハイビジョンカメラがあり、1 回の震動台実験で膨大なデータが生成される。これらの実験データは EDgridDAQ によって取り込まれ、リポジトリ

に蓄えられ、E-Defense で定められたデータフォーマットに変換され、データチェック後に EDgrid のセントラルリポジトリに永久的に保存される。EDgrid とは、研究者に対して実験データの一般公開を行っているプロジェクトである。EDgrid では、E-Defense の希少性と構築や実験に関わる費用が莫大なことから、実験によって得られた実験データをインターネットによるリモートアクセスを実現させ、安全で効率的なデータ保存、データ運用を行うサイバーインフラストラクチャの構築を行っている。しかしながら、このデータモデルは実際には EDgrid では採用されなかったとされ⁴⁾、大規模データを低コストでかつ使いやすく取り扱えるシステムの実現は容易なことではないことがわかる。

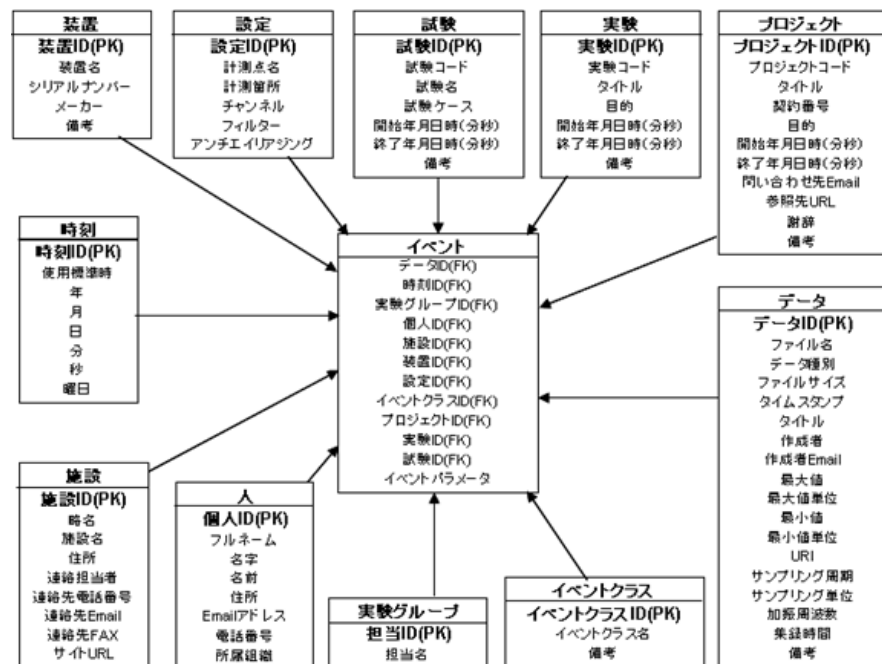
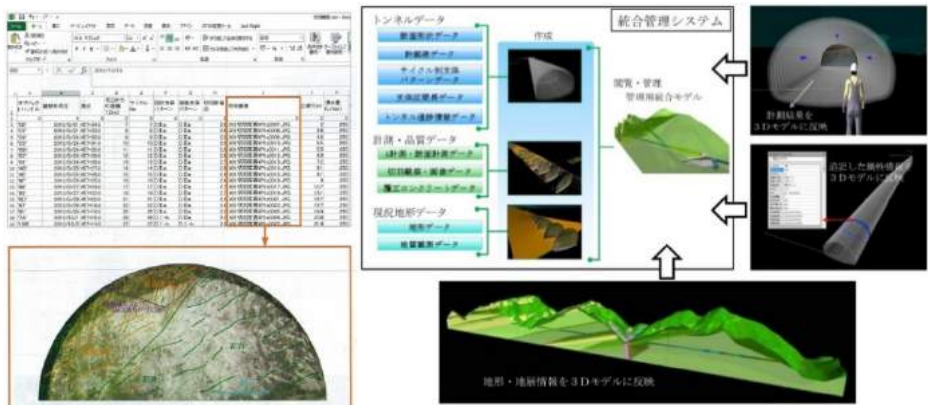


図2 EDgrid のデータモデル²⁾

参考文献

- 1) NEES: <http://www.nees.org/>
- 2) 矢吹信喜、吉田善博：EDgrid（E-Defense Grid）のデータモデルの開発、土木情報利用技術論文集、vol.15, pp.111-118, 2006.
- 3) E-Defense: <http://www.bosai.go.jp/hyogo/index.html>
- 4) http://www.building-smart.jp/download/files/20150527_01.pdf

備考

分類	② データ貯蔵システムの事例
技術／知識 の名称	山岳トンネルにおける CIM の開発（大林組）
概要	山岳トンネル施工管理、維持管理での CIM の活用
詳細	近畿自動車道紀勢線見草トンネル施工管理で使用した。トンネルの 3D モデルを構築し、各部の材料検査結果などが属性情報として埋め込まれている。3D モデルはオートデスクの「Navisworks」の形式とし、無料のビューワー「NaviWorks Freedom2014」で見られる。データの合計容量は約 4.1GB で、1 枚の DVD に収められている。 パシフィックコンサルタンツが保有するトンネル点検車両(MIMM-R)でトンネル内面の 3D 計測や覆工の写真撮影を行い、3D モデルにリンクさせている。点群データについては、データ量が膨大なため DVD には入れていない。 3D モデルの属性情報や PDF 書類や写真などは、エクセルのシート上で整理し、リンクを張っている。  Fig. 6 山岳トンネルに1stのプロトタイプ The Mountain Tunnel CIM (Draft Edition)
参考文献	1)日経コンストラクション(2015年10月12日号,P56～61) 2)畑浩二,杉浦伸哉,後藤直美：山岳トンネルにおける CIM の開発,大林組技術研究所報 No.78 2014
備考	「Navis+(ナビスプラス)」は、伊藤忠テクノソリューションズ(株)が開発した、AutoDesk 社製プロジェクトレビューソフトウェア Naviworks 上で動作するアドオンソフト。Naviworks が対応している CAD データモデルの IFC (Industry Foundation Classes) フォーマットを始めとして、50 種類以上のファイルフォーマットに対応している。スタンドアロンライセンスが 50 万円、ネットワークライセンスが 60 万円。

分類	③可視化に関する知識																
技術／知識 の名称	データ可視化に関する基礎知識																
概要	データ可視化に関する一般的な概念について以下の項目に分け説明する。 (1)データ可視化の要点、(2)可視化の役割、(3)可視化に対する注意点、(4)効果的な可視化について、(5)データ可視化作業の流れ、(6)代表的可視化方法の紹介、(7)近年における可視化の開発技術の紹介																
詳細	(1)データ可視化の要点 可視化は探索（発見を含めて）と分析（解釈や利用を含めて）のプロセスに分けられるが、両プロセスにおいてユーザーに起因する曖昧性が含まれる。[1] 一番のポイントは、「データが視覚変数※をコントロールする」ことで、データから視覚要素へのマッピングを設定してアルゴリズム的に生成することを主眼としている。 ※視覚変数 Jacques Bertin が提示した概念で、以下の要素に分類される（図 1）、データを変換する先の視覚的要素の集合のこと。 ①位置、②大きさ、③形、④明るさ、⑤色、⑥向き、⑦テクスチャ 上記 7 種を「視覚変数」と呼ぶ。[2] 全てのデータ可視化は、データをこれらの要素にマッピングする作業。 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bertin's Original Visual Variables</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Position changes in the x, y location</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Size change in length, area or repetition</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Shape infinite number of shapes</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Value changes from light to dark</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Colour changes in hue at a given value</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Orientation changes in alignment</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Texture variation in 'grain'</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> 図 1：Bertin により提示された視覚変数[3] (2)可視化の役割 検索結果の閲覧、絞り込み、概要把握、判断・理解の容易化と即時化、想起の支援など[4] (3)可視化に対する注意点 ①インフォグラフィック（図 2）（例：標識、地図、地下鉄路線図など）とデータ可視化は異なる。（可視化は、グラフィカルと等価ではない。） ②デザイン・見栄えの良さが、良い可視化ではない。 データ可視化技術は、文書化可能な技術であり才能に依存しない。 （芸術性ではなく、実用性で評価する。） ③情報の見せ方を恣意的に扱うことで、可視化が悪い効果となる。	Bertin's Original Visual Variables		Position changes in the x, y location		Size change in length, area or repetition		Shape infinite number of shapes		Value changes from light to dark		Colour changes in hue at a given value		Orientation changes in alignment		Texture variation in 'grain'	
Bertin's Original Visual Variables																	
Position changes in the x, y location																	
Size change in length, area or repetition																	
Shape infinite number of shapes																	
Value changes from light to dark																	
Colour changes in hue at a given value																	
Orientation changes in alignment																	
Texture variation in 'grain'																	

図3のようなデフォルメのような可視化操作により、生データが視覚情報に変換される際にユーザーに起因する曖昧性から、可視化結果を読み解く際に誤判断を誘発する。[1]

- ④数値データや数理モデルなどに対応付ける部分に本質があり、敢えて可視化を強調する必要がないものもある。[1]

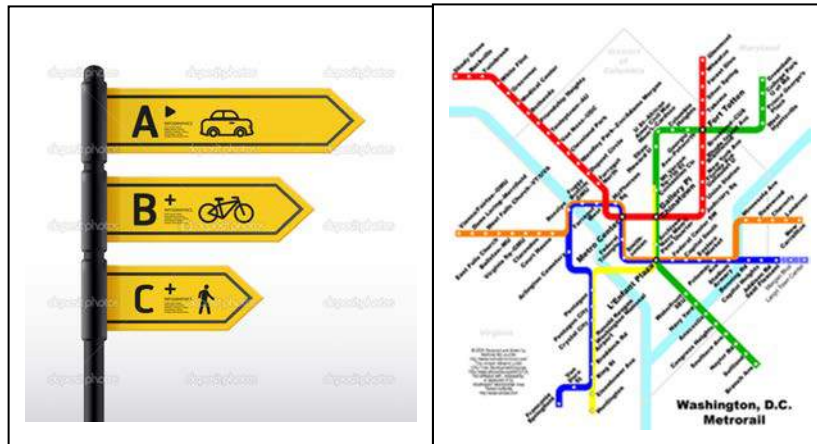


図 2：インフォグラフィックの例：標識（左）と地下鉄路線図（右）

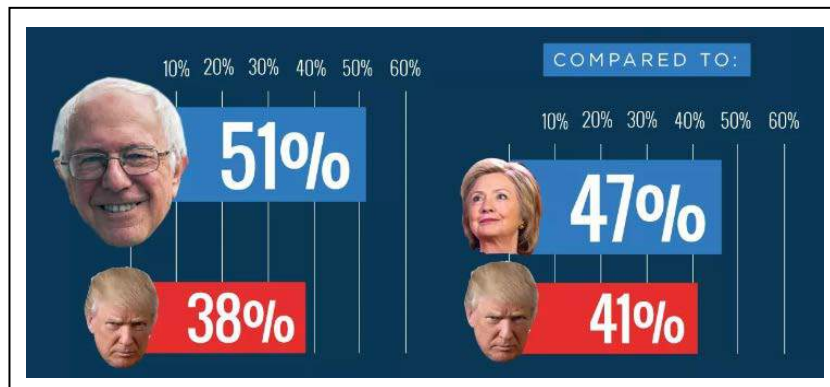


図 3：恣意的にデフォルメした悪い視覚化の例

(4)効果的な可視化について

データから伝えたいテーマを設定し、それを実現するためにデータから視覚変数への必要最小限のマッピングを設定すること。

上述を分解した内容を以下に示す。

- ①データの大まかな傾向と特性を把握する。
- ②目的を語るためのストーリーを考える。
- ③ゴールへ到達するための可視化を行う。
- ④ゴールへ到達するのに不必要な視覚情報を盛り込まない。
- ⑤各視覚変数の特性を理解し、マッピングを効果的に利用する。
- ⑥技術を目的のために使う。技術のために目的を設定しない。

(5)可視化作業の流れ

- ①テーマの設定（最重要項目）
- ②データの大まかな傾向・特徴の把握
- ③手法の選択
- ④データの準備（加工）
- ⑤データの読み込みと統合
- ⑥実際の可視化

- ・マッピングの作成
- ・レイアウト

(6) 代表的可視化方法の紹介

① 統計グラフ

データ群の比較、変化、推移、傾向を可視化

例) 棒／線／帯グラフ、レーダーチャート、散布図など

② ベン図

データ集合の相関を可視化

③ 階層構造図

データ大規模化に伴う探索と分析作業の負荷軽減のため、興味領域 (ROI : Region(s) Of Interest(s)) と詳細度 (LOD: Level(s) Of Detail(s)) にもとづく探索を可視化[1]

特徴量に基づき ROI を定め (あるいは示唆し)、細部を調べる。
クラスタリングなどを利用して情報に階層的な構造を持たせる。

例) Node-Link diagram, Cote tree, Reconfigurable Disk Tree, Tree Map

④ 平行座標

⑤ バネモデル

(7) 近年における 可視化の開発技術の紹介

1) ビジネスインテリジェンス (BI)

大規模データを探索や分析し可視化する技術。

主要要素技術として、データディスカバリ、データビジュアライゼーション、マッピングを組み合わせた複合的技術。

例 1) Google CLOUD DATALAB

データ共有、レポート作成を素早く行うことが可能

オープンソース Jupyter notebooks(旧 IPython)使用

関連 : Google Chart API、Google Maps API

例 2) Amazon QuickSight

現在、ビジネス分野向けデータ分析・可視化ツールとして利用。

今後、ビッグデータ/IoT 向けへ利用拡張予定

例 3) その他の代表的ツール

Flot, Raphael, D3, Visual.ly, Crossfilter, Tangle, CartoDB, OpenLayers
Processing, NodeBox など

2) AR (拡張現実)

現実の世界に情報を付加させる技術(図 3)



図 3 : AR 技術を活用したアプリケーションの例

3) VR (仮想現実)

コンピュータなどによって作り出されたサイバースペースをあたかも

	現実のように体験する技術（図 4）  図 4 : VR 技術を活用したアプリケーションの例
参考文献	[1]白山 晋, 可視化から何がわかるか?, システム創成学 第二回 学術講演会, 2009 [2] Jacques Bertin, <i>Semiologie Graphique</i>, 1967 [3] Carpendale, M. S. T.: <i>Considering Visual Variables as a Basis for Information Visualisation</i>, University of Calgary, Department of Computer Science, 2001-693-16, 2003 [4]高間 康史, 第 2 回情報編纂研究会, 2010
備考	

分類	③可視化に関する知識
技術／知識 の名称	AR（拡張現実）の基礎知識
概要	データ可視化に関する技術の中から、AR（拡張現実）の種類や使われ方等の基礎知識について調査した。
詳細	1. AR（拡張現実）とは 現実の環境には存在していないが、そこに付加的な情報を与え、映像や音声等で表現することにより、人間の五感（視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚）に作用する技術である。 ■視覚に訴える事例：T-WAVE Co.,Ltd.「山カメラ。」¹⁾ スマートフォンのカメラを通して映る映像に、山の名称や標高等の情報を表示する。アウトドア愛好者向けのアプリ。 ■聴覚に訴える事例：サイバネット「聞こ AR（きこえーる）」²⁾ レストランメニューにスマートフォンをかざすと、メニュー案内や本日のお勧めを音声で読み上げる。視覚障害者の生活を支援するアプリ。 ■触覚に訴える事例：NEC「ARmKeypad（アームキーパッド）」³⁾ グラスカメラとウェアラブルウォッチを装着した操作者の腕に仮想キーボードが表示され、タッチ入力によりキーボード操作が行える。業務のハンズフリーを実現する機器。 2. 視覚に訴える AR の種類 現在主流な AR 技術は、視覚に訴える AR である。主にスマートフォン等のカメラやウェアラブルカメラで表示される現実の映像に、情報の重畳表示を行う。 視覚的な AR は、位置情報を利用した「ロケーションベース AR」と、図形情報を利用した「ビジョンベース AR」に分けることができる。さらに、「ビジョンベース AR」は、AR コードというマーカーにより情報認識する「マーカー型」と、ランドマークや物体の形状により情報認識する「マーカーレス型」に分類できる。⁴⁾ (1) ロケーションベース AR ロケーションベース AR は、GPS 等から得た位置情報を元に、スマートフォン等のカメラで移した現実の映像における位置を特定し、現実の映像と情報の重畳表示を行うものである。

	スマートフォン等の通信機器を用いることで、GPS による位置情報が容易に取得できるため、事前準備が少なくすむことがメリットである。また、同機器が保有する地磁気センサと加速度センサの計測情報を用いることで、端末の向きや傾きを考慮した精度の高い表現を行うこともできる。 しかし、都市部の建物の間やトンネルの中、また、橋梁の床板下面等の天空が見渡せない場所では、GPS 衛星の電波が届きにくく、正確な位置情報が得られないことがある。また、カーナビやスマートフォンのような従来の受信機で位置を求める場合、位置精度は数 m から数十 m となり、1m 以内の精度を求められるような情報の扱いは難しい。なお、現在、複数種類の衛星電波を用いた測位方法として、「マルチ GNSS による高精度測位」の技術開発及び標準化が進められている。⁵⁾ さらに、スマートフォンの加速度センサの計測値には、重力の影響や手ぶれの影響といったノイズが含まれるため、実際に発生した加速度を取得するため、計測データ利用時には、ノイズを取り除く処理を考慮する必要がある。 このような影響を踏まえ、利用対象とするものが、計測対象の環境や範囲に合致しているか、検討が必要である。 (2) ビジョンベース AR- マーカー型 ビジョンベース AR のうちマーカー型は、特定パターンの図形 (AR マーカー) に付加情報を与えておき、スマートフォン等のカメラで AR マーカーを認識し、現実の映像と情報の重畳表示を行うものである。 例えば、家具の大きさ・色・形等の情報が付加された AR マーカーを複数の紙に印刷しておき、空の部屋の床に AR マーカーを配置する。その後、スマートフォン等のカメラで部屋をかざすと、まるで家具が部屋に設置されているかのように見える、といった用途がある。⁶⁾ この例では、映像内の奥行きや、マーカーの大きさをどのように認識するか、付与情報をどのように表現するかがポイントとなる。 しかし、マーカー型は、マーカー実体の準備が必要であったり、情報付与する場所にマーカーを設置しておかねばならなかったりするため、手間がかかる。また、情報付与する場所 (現実世界) にマーカーを見えるように示さねばならないため、公共の構造物への設置は難しいことが多いようである。 (3) ビジョンベース AR- マーカーレス型 ビジョンベース AR のうちマーカーレス型は、特定パターンの図形 (AR
--	---

	マーカー)は使わず、代わりに物体を特定するための複数の特徴点を用意し、付加情報を与えておく。そして、スマートフォン等のカメラで現実の映像から物体を認識し、映像と情報の重畳表示を行うものである。 例えば、果物(リンゴ、バナナ、みかん等)の特徴を認識するための特徴点を用意した上で、果物毎に産地、生産者、価格等の情報を定義しておく。そして、実際に果物が並べられた場所をスマートフォン等のカメラでかざすと、実際の個々の果物の映像に、産地、生産者、価格等の情報が重畳されて表示される、といった用途が考えられる。 ここで、物体の認識を行うには、大量の特徴点を元に画像解析を行う画像マッチング技術を利用するため、従来、高性能なPC等の機器が必要だった。近年になり、高機能な処理ライブラリ(オープンソースの“ARToolKit”⁶⁾や、ソニーが開発した統合型拡張現実感技術“SmartAR”を使った“SmartAR SDK”⁷⁾等)が登場し、また、スマートフォン等端末の高機能化が進んだことで、より身近な技術になっている。 なお、屋外の構造物を対象とする場合、構造物の特徴点の三次元データの作成、特徴点のデータ量の肥大化、映像での奥行き認識、環境光の影響等が課題となる旨の講演記事があった。⁸⁾
参考文献	1) T-WAVE: ホームページ「日本初の山座同定(さんざどうてい)アプリ!」, http://twave-ltd.jimdo.com/%E5%B1%B1%E3%82%AB%E3%83%A1%E3%83%A9/ 2) CYBERNET: プレスリリース(2014年10月29日)「聴覚ARシステム「聞こAR(きこえる)」を開発」, http://www.cybernet.jp/news/press/2014/20141029.html 3) NEC: プレスリリース(2015年11月5日)「腕を仮想キーボード化するユーザインタフェースを開発」, http://jpn.nec.com/press/201511/20151105_04.html 4) atmarkIT: 「いまさら聞けないAR(拡張現実)の基礎知識」, http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1109/26/news136.html 5) 国土地理院: 第1回 マルチGNSSによる高精度測位技術の開発に関する委員会【資料2-1】, http://www.gsi.go.jp/common/000066392.pdf 6) 株式会社エム・ソフト: ARToolKit ホームページ, http://www.msoft.co.jp/ar/ 7) サイバネットシステム: AR作成支援ポータルサイト「cybARnet」, http://www.cybernet.co.jp/ar-vr/products/smartar/ 8) 池内克史: AR(拡張現実)と先端測量技術～大規模屋外構造物のモデル化とその応用～, 先端測量技術 No.106 2014年10月, http://archive.sokugikyo.or.jp/pdf/apa106_2014_10/106-03.pdf
備考	

分類	③ 可視化に関する知識
技術／知識の名称	基本的な可視化の事例
概要	グラフ表示などデータを可視化する基本的な事例をまとめる
詳細	1. 2次元グラフによる表示 センサにより測定した結果や、計算した結果のデータを表現するには2次元グラフがこれまで最も多く用いられてきた。 2次元グラフでは、独立変数を横軸(x軸)に取り、それに対する従属変数を縦軸(y軸)に取って表示する。例えば、図-1のように時間(x軸)に対する振動加速度(y軸)を表示する場合である。時間軸のようにx軸の数値が単調に増加する場合は線グラフを用いるが、増減する場合は図-2のように散布図を用いることも多い。複数のデータを1枚に表示するため縦軸を2つ設定する場合(L軸、R軸)もある。軸の数値目盛りは、等間隔に設定する線形表示以外に、軸を対数で表示する場合もあり、値の変化が大きいときに用いられる。 2次元グラフでは、軸の交点で数値を明確に読み取れる利点があり、また紙やスクリーンなどの2次元媒体への表示と親和性が高い。変数が3以上になる場合、プロットの色や大きさを変えて表現することもあるが、表示が複雑になり理解しづらくなることに注意する必要がある。 図1 振動データの時刻歴波形 (線グラフ・線形表示) 図2 温度に対する振動数の関係 (散布図・線形表示) 2. 3次元での表示

3次元グラフは3軸(x,y,z 軸)を用いて物理量の変化を表示する場合に使われる。例えば、図-3のように横軸(x 軸)に振動数、縦軸(z 軸)に大きさを表示するスペクトルにおいて、第2の横軸(y 軸)を用いて場所や時間による変化を表示することができる。3次元グラフは2次元グラフでは表せない複雑なデータを可視化して傾向の変化を把握できるが、z 軸のピークの高さなどの値を正確に読み取ることは難しい。

測定値や計算値の表示以外に形状や位置を表示するための3次元表示は最近よく用いられる。図-4のようにx,y,zの空間座標に橋梁の形状を表示して視点を変化させることで、今までの2次元図面とは異なる直感的な形状の理解が容易になった。また、図-5の振動モード形状のように座標値に計算値を重ね合わせた表示も可能である。これらの3次元表示でも、各点の正確な値を読み取ることは2次元表示よりも難しいため、使用に際してはどのような表現が適した表示となるかよく検討することが必要である。

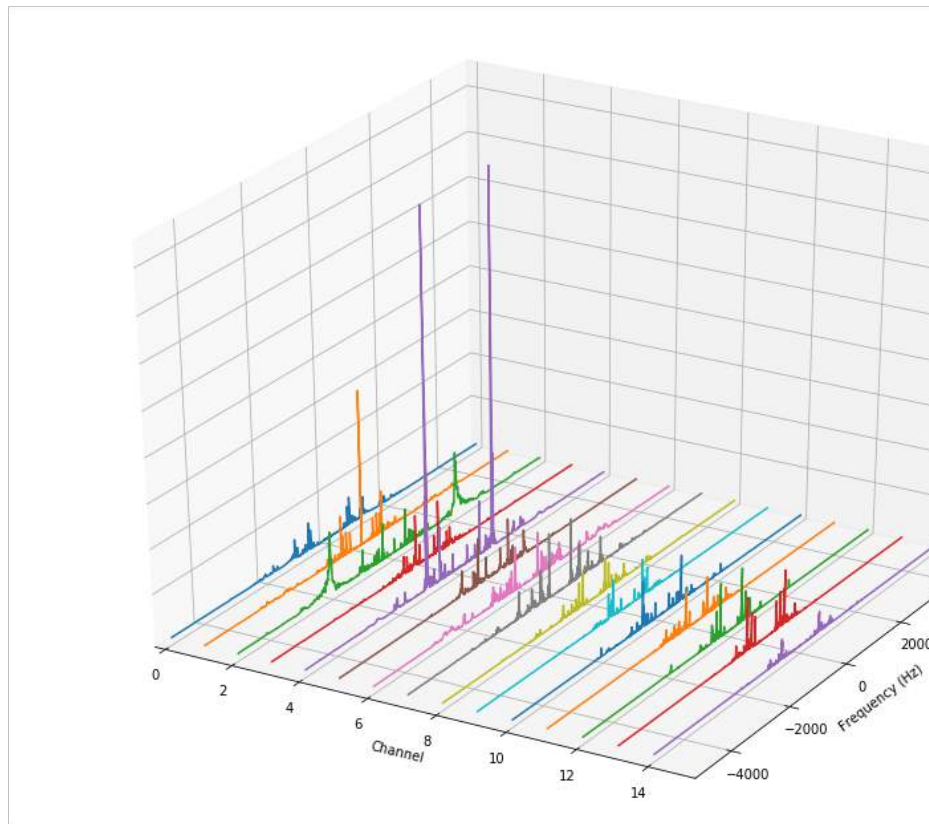


図3 測点によるスペクトルの違い

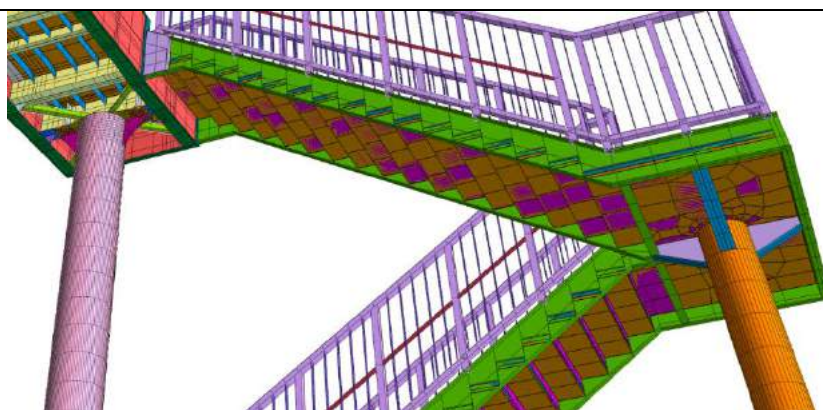


図-4 歩道橋の3次元モデル

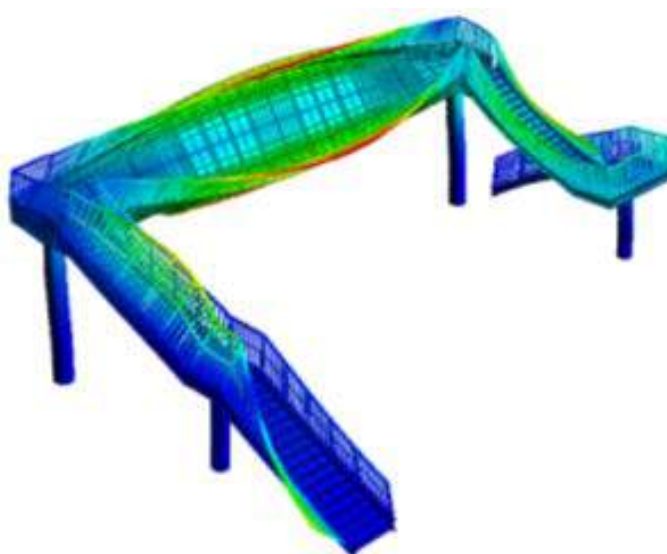
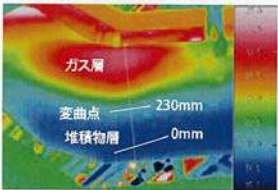
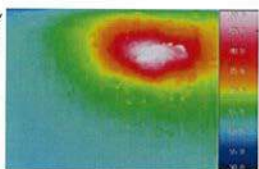
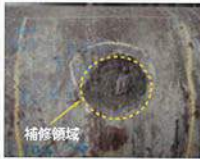
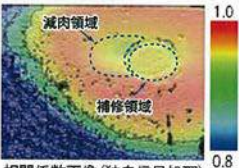


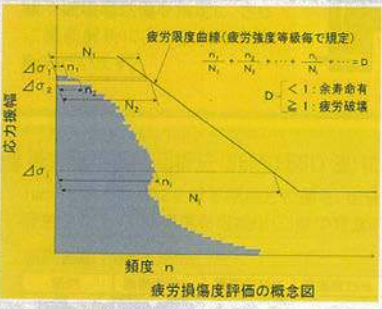
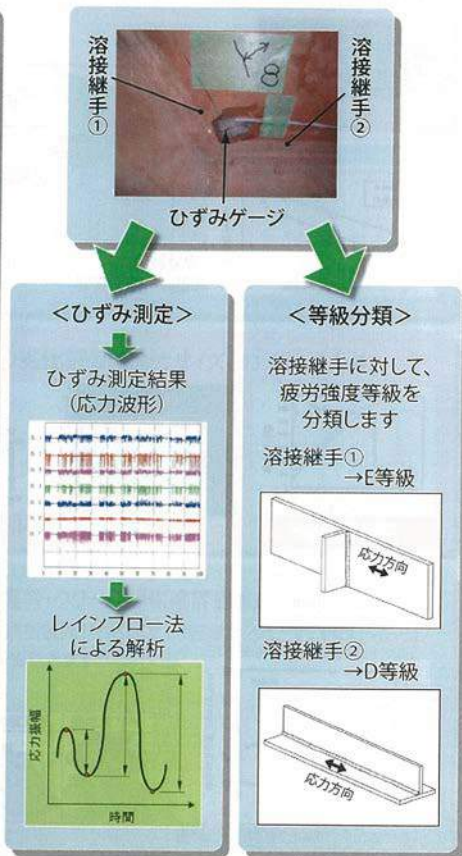
図-5 3次元 FEM による振動モード形状

参考文献

備考

分類	④ 可視化の事例
技術／知識 の名称	道路維持管理における点検・診断・モニタリングの現状と展望
概要	2 道路維持管理のスマート化に向けた I C T 技術の活用について
詳細	・振動センサ活用技術 ・光学振動解析技術 ・無人機搭載用リモートサーモカメラ ・インバリアント分析技術 ・異種混合学習技術 内容詳細：別紙資料参照 2015年（一財）首都高速道路技術センター技術講演会 道路維持管理における 点検・診断・モニタリングの現状と展望 平成27年 6月3日 一般財団法人 首都高速道路技術センター 後 援 首都高速道路株式会社 首都高技術株式会社
参考文献	2015 年（1 財）首都高速道路技術センター技術講習会
備考	日本電気株式会社 中央研究所 情報・メディアプロセッシング研究所 主任研究員 三上伸弘

分類	④ 可視化の事例
技術／知識 の名称	赤外線サーモグラフィによるスクリーニング
概要	広い範囲を遠隔で検査し、精密試験が必要な場所を素早く特定できる。
詳細	【特徴】 ・ 広い領域を短時間に試験、スクリーニングができる。 ・ 足場が不要 ・ 材質への影響を受けない ・ 独自開発の信号処理技術により試験精度が向上  <スラッジレベル測定> 管内の水位を足場無しで測定します。  日陰の配管は アクティブ法 で対応可。 可視画像  赤外線画像 <減肉分布測定> 著しい減肉部分を見やすく表示します。  ハロゲン ランプ 赤外線 カメラ  赤外線画像  可視画像  相関係数画像(独自信号処理) その他の試験対象：防食塗装の劣化、鋼床版の滞水 U リブ、繊維補強材の剥離、亀裂、配管の詰まり、
参考文献	1) 神鋼検査サービス株式会社
備考	神鋼検査サービス株式会社

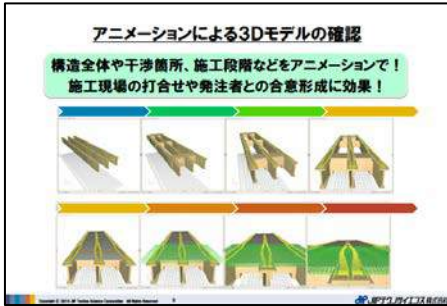
分類	④ 可視化の事例
技術／知識 の名称	ひずみ測定による鋼構造物の余寿命診断
概要	現在の鋼構造物の供用状況から余寿命年数を算出
詳細	【特徴】 事後保全や供用年数から推測する手法に比べ、適切な保全計画の立案が可能となる。 調査対象の鋼構造物の中で高い応力がかかる部位、または疲労強度等級の低い溶接継手にひずみゲージを貼付し、載荷試験、長期データ収集を実施します。   ひずみ測定結果から応力解析を行い、疲労強度等級に対応する疲労損傷度評価によって余寿命予測を行います。  鋼構造物の劣化状況や疲労亀裂の発生する可能性を、稼働時の応力測定により算出します。 疲労余寿命評価は、日本鋼構造協会の「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」に基づいて実施します。
参考文献	1) 神鋼検査サービス株式会社
備考	神鋼検査サービス株式会社

分類	④ 可視化の事例
技術／知識 の名称	ちば市民協働レポート（千葉市）
概要	スマートフォンアプリを使った市民参加型のインフラ管理
詳細	地域インフラの不具合についての情報（地域の課題）を、発見した市民が千葉レポに投稿する。その際、スマートフォンのGPS機能によって位置情報が添付されるので、市の担当者はどこでその不具合が発生しているかを地図上で迅速に知ることが出来る。市民の投稿に対しては、市の担当者が修繕や撤去などの対応を行う他、場合によっては市民が自ら対応して解決を図る場合もある。投稿された地域の課題は「ちばレポ」で公開され、投稿者やほかの市民は不具合の事実とそれへの対応状況（受付済、対応中、対応済）を知ることが出来る。 【ちばレポの仕組み】  【スマートフォンアプリの操作イメージ】  実証実験を2013年7月から11月まで実施し、2014年9月から正式にスタートした。2015年4月末までに市民からの通報は1,095件投稿され、そのうち道路に関する投稿が約71%あった。参加登録者数は2015年4月末までに、2,887名である。
参考文献	1)総務省 情報通信白書H27年度版： http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h27/html/nc233220.html 2)千葉市 ちば市民協働レポート： http://chibarepo.force.com/
備考	・対応するOSは、Android OS 2.3以上、iOS7以上を推奨している。 ・写真のデータ容量は1枚につき5MBまで、データ形式は、JPEG、GIF、PNG、BMPをサポートしている。 ・ちばレポアプリのカメラ機能で撮影した動画（10秒まで）も投稿可能。

分類	④ 可視化の事例
技術／知識 の名称	InfraDoctor（首都高技術、エリジオン、朝日航洋の３社共同開発）
概要	３次元点群データを活用した道路・構造物の管理システム
詳細	下記、三つの基本機能がある。 1)「GIS プラットフォーム機能」 MMS（移動計測車両による測量システム）で取得される３次元コンテンツと橋梁などの図面、点検記録データを、位置情報をキーに統合管理し、各種データの総合窓口として点検業務の効率化を図ることが出来る。 2)「点検結果台帳機能」 日々実施される道路・構造物の点検・補修の最新情報を簡単に検索し入手できる。橋脚番号や距離票をキーに関連する構造物の情報を一括検索できるほか、劣化に起因する事故が発生した場合などにおいて同種構造物の検索を可能とし、緊急点検業務のリードタイム短縮を実現する。 3)「３次元点群データ活用機能」 オフィスにいながらにして３次元での位置関係を含めた任意の寸法を計測することや、GIS から取得した現場の地理情報、レーザースキャナーで計測した点群データにより作成された空間、重機の CAD データを画面上で融合し、重機と構造物の干渉のシミュレーションが可能となる。加えて、３次元点群データを活用し、建築時期が古く図面が残されていない道路や構造物の CAD データ化を支援する機能、取り込んだ地理情報と点群データを活用し規制図を作成する機能も備えている。
参考文献	1)首都高技術(株) 首都高技術、エリジオン、朝日航洋が業務提携： http://www.shutoko-eng.jp/updir/shutoko20141120174228_1.pdf
備考	・株式会社エリジオンの会社概要 独自の３次元形状処理とデータ交換技術をベースとしたパッケージソフトウェア開発を行っており、国内では、トヨタ自動車・日産自動車・キャノンなど各分野のリーディングカンパニーの開発プロセスに導入されている。 ・朝日航洋株式会社 航空機を利用した旅客・物輸などを行う航空事業と、航空機による空からの計測、車両を用いた陸からの計測、船舶を利用した河川・海洋の計測といった測量を基盤とした空間情報事業の二つの事業を展開している

分類	④ 可視化の事例
技術／知識 の名称	耐候性鋼材のさび判定
概要	耐候性鋼材の RST（Rust Stability Tester、イオン透過抵抗測定装置）によるさび安定度定量評価
詳細	- 耐候性鋼材は、安定さびの評価を適切に評価しないと、危険である。 - 耐候性鋼材の保護性さびの評価については、下図のように今まで色やサビの大きさで識別していた。 外観評点5: さびの量は少なく、比較的明るい色調を呈する。 [今後の処置の目安: 不要] (約 200μm未満) 外観評点4: さびの大きさは 1mm 程度以下で細かく均一である。 [今後の処置の目安: 不要] (約 400μm未満) 外観評点3: さびの大きさは 1～5mm 程度で粗い。 [今後の処置の目安: 不要] (約 400μm未満) 外観評点2: さびの大きさは 5～25mm 程度のうろこ状である。 [今後の処置の目安: 経過観察要] (約 800μm未満) 外観評点1: さびは層状の剥離がある。 [今後の処置の目安: 板厚測定] (約 800μm超) * () 内数値は外観評価の補助手段として測定したさび厚さの目安を示す。 図-1 さびの外観評点¹⁾ - RST は安定さびの局所的な計測機器で、電極間の抵抗（交流インピーダンス）を計測する。腐食の抵抗率を計測するので、さびの状態が緻密であると抵抗率が高く、逆に緻密でない場合（異常腐食）は抵抗率が低下する²⁾。 - 機器の改良により無塗装耐候性鋼のみならずさび安定化処理や塗装に対しても適用できる。イオン透過抵抗値が 20GΩ と高いため計測精度が高く、今まで 1 点あたり 60 分程度の時間が必要であったが、この機械は 1～2 分程度で計測可能³⁾。 - 今までの外観評価は診断者の経験年数によりバラツキがあったが RST を使うことで、それを解消できる。 - 桁の計測する位置によって抵抗値は変化し、融雪剤の影響を受けやすい下フランジと桁端部を重点的に計測することが重要である。

	図-2 装置の概念図²⁾ 図-3 装置の適用例⁴⁾
参考文献	1) 日本鉄鋼連盟、日本橋梁建設協会：耐候性鋼の橋梁への適用、2010. 2) 紀平寛：耐候性鋼上の安定さび形成状況評価と診断、材料と環境、Vol. 48, No.11, pp.697-700, 1999. 3) 今井篤実、立花仁、松本洋明、紀平寛：鋼構造物の腐食診断にむけたイオン透過抵抗法の適用、防錆管理、Vol.51, No.5, pp.216-221, 2007. 4) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、2010.
備考	

分類	④可視化の事例
技術／知識 の名称	CIM モデリングシステム
概要	土木、建設業向けの設計、製作、施工、維持管理と連携した CIM ソリューションの紹介
詳細	・生産性向上を目指し、設計、製作、施工、維持管理と連携した CIM モデルを活用した取り組みやサービスが提供されている。 ・景観検討や関係機関との協議の際、従来の 2 次元図面でなく CIM の 3 次元モデルを用いることで、立体的なイメージ図やアニメーションといった具体的な可視化により品質が向上し、作業効率化が図られている¹⁾。 ・製作、施工段階における、3 次元モデルによる本体主構造や付属物などの干渉チェックや施工プロセスの可視化を行うことができる²⁾。   ・橋梁予備設計段階での景観検討等への CIM モデル活用のため、CAD での詳細な入力を行わずに、橋梁予備設計の設計データを元に CIM モデルを作成するツールが提供されている²⁾。 ・CIM のデータモデルは、道路プロダクトモデル LandXML や、CAD データモデル IFC 等を用いた標準化が図られている。
参考文献	1) CIM 試行事業（橋梁編）への取り組み～モデル作成とその利活用～（オープン CAD フォーマット評議会、http://www.ocf.or.jp/cim/seminar2015/S2_bridge.pdf） 2) 「CIM/3D モデリング 鋼橋サービス概要」（JIP テクノサイエンス㈱、http://www.jip-ts.co.jp/product_service/service/cim3d_steel.html） 3) 鋼橋 CIM モデリングシステム「BeCIM/MB」（JIP テクノサイエンス㈱、http://www.jip-ts.co.jp/product_service/product/becim_mb/index.html）
備考	

§ 3. 大規模データ貯蔵・処理のための加速度計測データ処理プログラム

3-1. 大規模データ貯蔵・処理システムの意義

前節で調査したように、橋梁の性能評価に際しては多種、多量のデータを統合的に取り扱う必要がある。これらのデータの中で、振動加速度はこれまでも計測事例が多くあり、今後もさらにデータ量の増加が見込まれる。このため、これらのデータを効率的に処理するシステムを構築することが今後のビックデータ対応の試金石となる。そこで、本 WG では、大量の加速度計測データを高速で処理してグラフ表示するシステムを開発した。

このシステムは、図 3-1 に示すようなセンシング技術を用いた構造評価の枠組みにおいて、データの貯蔵と貯蔵したデータから必要な部分を可視化する機能を具体化したものであり、構造評価を行うための基盤的技術と位置付けられる。具体的には、「加速度データの検索・抽出ツール」と抽出結果を表示する「データビューワー」から構成され、最近の振動測定データの解析におけるニーズに応えることが期待される。

【WG3】データ貯蔵と可視化技術WG - 実装イメージ(JTS大迫(案)) 2016/5/18 全体部会向け資料 -

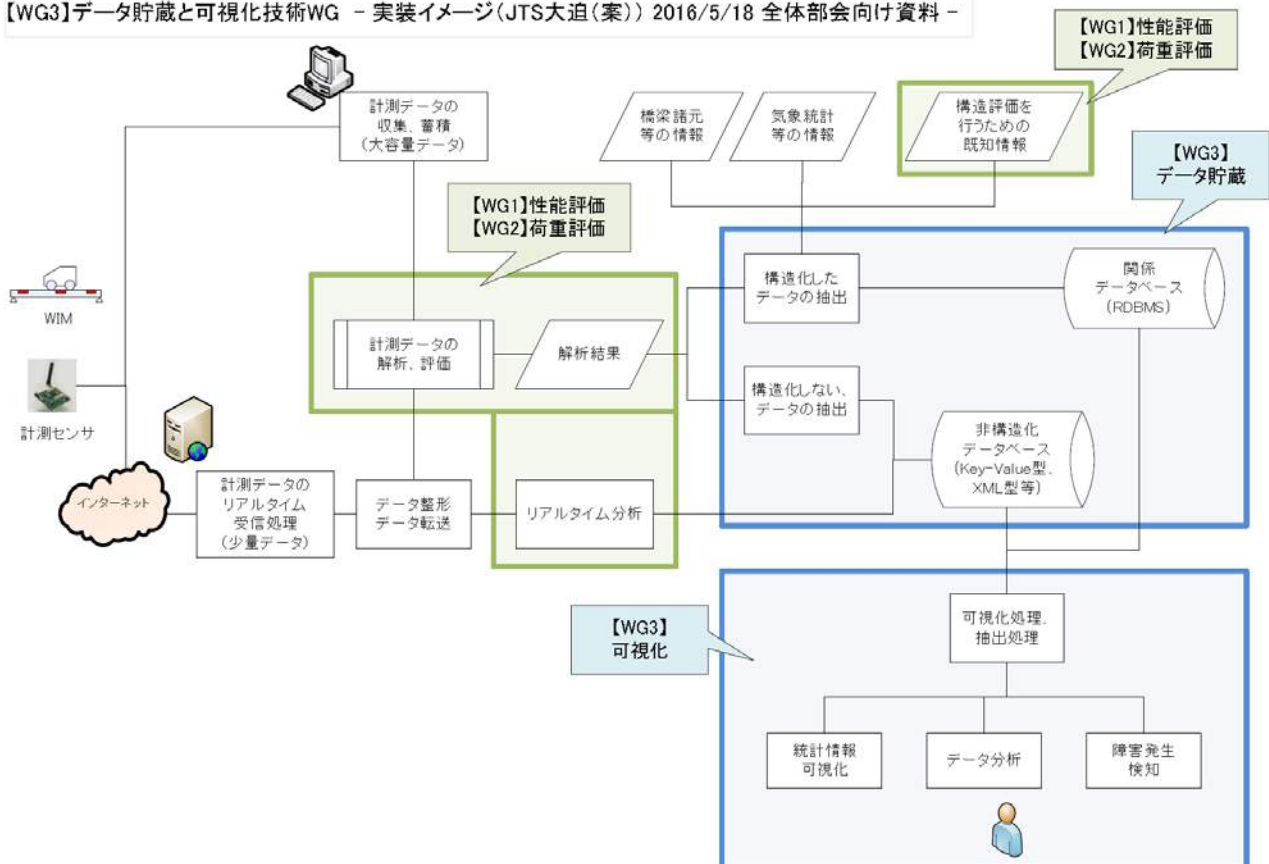


図 3-1 橋梁振動計測におけるデータ貯蔵・可視化技術実装イメージ

3-2. 加速度計測データ処理プログラムの機能と使用方法

3-2.1 機能概要

加速度計測データ処理プログラムは、「加速度データの検索・抽出ツール」と「加速度グラフ描画ツール」で構成される。

「加速度データの検索・抽出ツール」は、長時間にわたり計測した加速度計測ファイルから、特徴的な領域を検索したり、指定時間帯のデータを抽出したりすることで、大容量データの効率的な貯蔵を補助するツールである。

また、「加速度グラフ描画ツール」は、「加速度データの検索・抽出ツール」で抽出した加速度データを対象に、同一時間帯のノード毎の加速度グラフを描画し、データ可視化を実現するツールである。

3-2.1.1 特徴のある領域の検索機能

時系列に蓄積された加速度データから、一定値以上の振幅が計測された領域（特徴領域と呼ぶ）を検索することで、ギガバイトを超える大容量データファイルから、散発して発生する振動箇所を簡単に把握することができる。

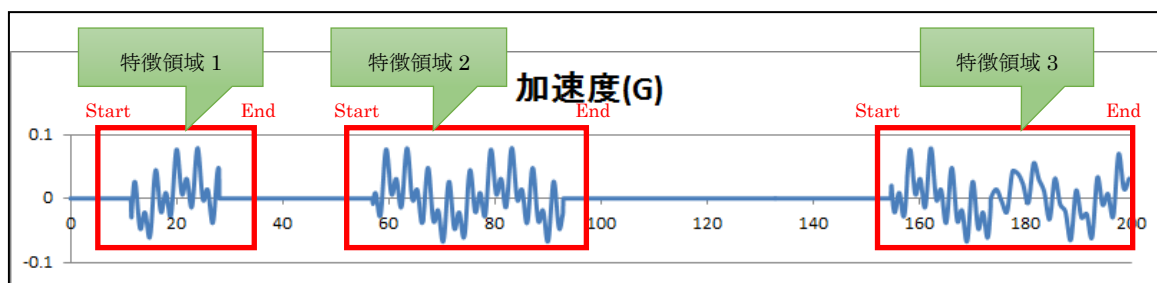


図 3-2 特徴領域の検索イメージ

なお、特徴のある領域の検索機能の仕様は、以下の通りである。

(1) 対象とする加速度データ

以下のフォーマットで記録された加速度データを対象とする。

- ◆ ノード番号，計測開始からの秒数，x 軸，y 軸，z 軸加速度（G），その他文字列
- ◆ 区切り文字が“半角スペース”（※設定により変更可能）

(2) 機能要件

機能要件は、以下の通りである。

- ◆ 検索対象軸は、3 軸（X 軸、Y 軸、Z 軸）とする
- ◆ 特徴領域の開始は、検索対象軸のピークピーク値が境界値を超えた時とする
- ◆ 特徴領域の終了は、計測値のばらつきが一定値以下になった時とする
- ◆ 特徴領域の検索にあたり、検出時間の下限値と上限値を設ける
- ◆ 特徴領域の開始時刻、抽出時間を 3 軸（X 軸、Y 軸、Z 軸）毎に出力する

(3) 検索処理

検索対象のファイル毎、検索対象の軸毎に、並列処理を行う。

(4) 検索結果

検索対象のファイル毎、検索対象の軸毎に、特徴領域の開始日時、期間を出力する。

3-2.1.2 指定時間帯のデータ抽出機能

時刻同期した複数ノードの計測ファイルから指定時間帯のデータを抜き出すことで、荷重車通過時や地震発生時に着目したノード間のデータ比較等を迅速に行うことができる。

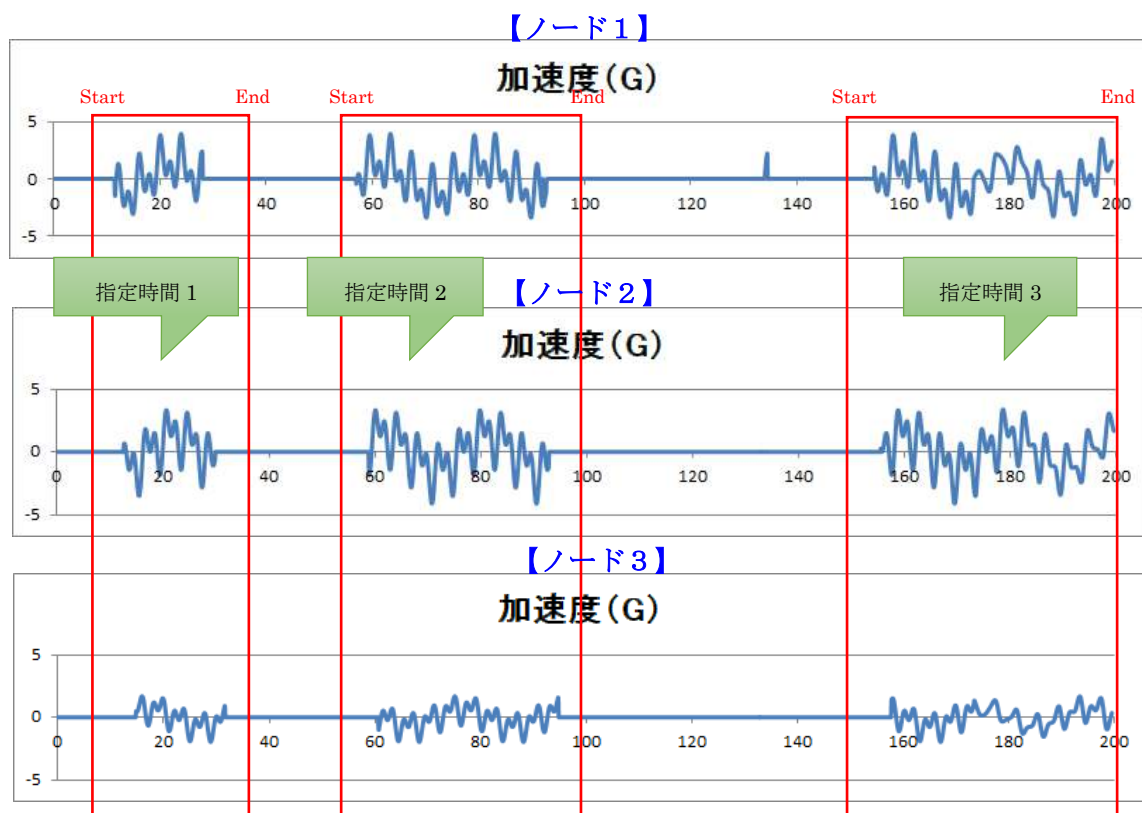


図 3-3 指定時間帯のデータ抽出イメージ

なお、指定時間帯のデータ抽出機能の仕様は、以下の通りである。

(1) 対象とする加速度データ

前述の特徴領域の検索機能で用いた加速度データを対象とする。

(2) 機能要件

機能要件は、以下の通りである。

- ◆ 単一ノード、または、時刻同期した複数ノードの計測ファイルを対象とする
- ◆ 抽出開始時刻と抽出期間で指定した時間帯のデータを抽出する
- ◆ 複数の時間帯を指定可能とする
- ◆ 抽出時間帯の前後に、一定の余裕時間（バッファ）を指定可能とする
- ◆ 「計測値」または「計測値の平均値をゼロと見立てた補正值」の出力を指定可能とする

(3) 抽出処理

- ◆ 抽出対象のファイル毎、指定時間帯毎に並列した抽出処理を行う

(4) 抽出結果

- ◆ 抽出対象の指定時間帯毎にフォルダを作成し、抽出部分のデータを出力する
- ◆ 抽出元と同じ出力様式（ファイルフォーマット）で出力する
- ◆ 抽出データの情報（メタデータ）をテキスト形式で出力する

3-2.1.3 加速度グラフ描画機能

「加速度データの検索・抽出ツール」で抽出した加速度データを対象に、同一時間帯のノード毎の加速度グラフを列挙して描画することで、抽出データの可視化を容易に実現する。

なお、加速度グラフ描画機能の仕様は、以下の通りである。

(1) 対象とする加速度データ

- ◆ 前述の指定時間帯の抽出機能で抽出した加速度データを対象とする。

(2) 加速度グラフの描画機能

- ◆ 加速度グラフの描画は、1フォルダに格納された、複数の計測ファイルを対象とする
- ◆ フォルダ内の全計測ファイルについて、着目軸を指定し描画する方法と、全ての軸を描画する方法を設ける
- ◆ 加速度の描画範囲は、全てのグラフで同一範囲とする方法と、各グラフの最小値・最大値を自動反映する方法を設ける

3-2.1.4 加速度計測ファイルの処理時間と処理方法の検討

本ツールで扱う加速度計測ファイルには、サンプリング周波数 100Hz で計測された X-Y-Z 軸の 3 軸の加速度、ならびに、計測ノード及び計測開始からの経過時間の情報が記録されている。

1 秒間に記録される計測データは 100 行であり、記録に必要な容量は、概ね 4KB～5KB である。これより、計測データの記録容量を 4.5KB/秒と想定した場合の 1 ファイルあたりの記録行数及び記録容量容量の概算値は、表 3-1 に示すとおりとなる。

表 3-1 加速度データの 1 ファイルあたりの記録容量の概算

計測期間	記録行数(万行)	記録容量の概算値(MB)
1 時間	36	16.2
1 日間	864	388.0
7 日間	6048	2720.0
14 日間	12096	5440.0

ツール構築にあたり、現地計測データから特徴のある領域を抽出するために必要な処理時間を計測することとした。A 橋及び B 橋の計測データの記憶容量を表 3-2 に示す。また、処理時間の計測に用いた PC スペックを表 3-3 に示す。

表 3-2 A 橋及び B 橋の計測データの記憶容量

計測橋梁	ノード数	計測期間(時間)	総記憶容量(MB)
A 橋	13	336	68500
B 橋	23	9	2960

表 3-3 本検討に用いた PC スペック

項目	スペック
OS	Windows 7 Professional 64bit
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-3612QM CPU @ 2.10GHz、4 コア-8 スレッド
メモリ	8GB
ストレージ	HDD 200GB

(1) 特徴領域の検索処理時間の計測

A 橋及び B 橋の任意の 5 ノードに対して、3 軸それぞれの特徴領域の検索に要する時間を計測した。検索処理は、ノード毎の各軸を逐次処理する方法と、ノード毎及び軸毎に並列処理する方法の異なる 2 つの方法で計測した。

なお、表 3-4 に、計測対象ノードの計測ファイルの情報を示す。

表 3-4 計測対象ノードの計測ファイルの情報

	ノード	データ名	ファイル行数	容量(MB)
A 橋	37	037-0014.csv	127129905	5642
	38	038-0014.csv	127129905	5587
	39	039-0016.csv	127129905	5714
	40	040-0007.csv	127129905	5587
	41	041-0028.csv	127129905	5586
	平均		127129905	5623.0
B 橋	8	008-0025.csv	3204905	136
	9	009-0015.csv	3204905	136
	10	010-0015.csv	3204905	136
	13	013-0025.csv	3204905	136
	14	014-0015.csv	3204905	141
	平均		3204905	137.1

表 3-5 A 橋の特徴領域の検索処理時間

A 橋	1 回目(秒)	2 回目(秒)	平均(秒)
逐次処理	9556	9448	9502.0
並列処理	3099	3055	3077.0

表 3-6 B 橋の特徴領域の検索処理時間

B 橋	1 回目(秒)	2 回目(秒)	3 回目(秒)	平均(秒)
逐次処理	271	271	270	207.7
並列処理	104	105	103	104.0

A 橋の計測結果は、表 3-5 に示す通り、逐次処理が平均 9502.0 秒、並列処理が平均 3077.0 秒であった。1MB あたりの処理時間は、逐次処理が 1.69 秒/MB、並列処理が 0.547 秒/MB となることから、並列処理の方が逐次処理よりも 3 倍程高速である。

また、B 橋の計測結果は、表 3-6 に示す通り、逐次処理が平均 207.7 秒、並列処理が平均 104.0 秒であった。1MB あたりの処理時間は、逐次処理が 1.52 秒/MB、並列処理が 0.759 秒/MB となることから、並列処理の方が逐次処理よりも 2 倍程高速である。

これより、ファイル行数及びファイル容量によらず、逐次処理と並列処理の検索処理は、並列に処理することの方が高速である結果が得られた。

(2) 指定時間帯のデータ抽出処理時間の計測

A 橋及び B 橋の表 3-4 に示すノードに対して、指定時間帯の Z 軸方向のデータ抽出に要する時間を計測した。検索処理時間は、ノード毎に逐次処理する方法と、ノード毎に並列処理する方法の異なる 2 つの方法で計測した。

なお、表 3-7 に、計測対象ノードの抽出データ数と検索対象期間を示す。

表 3-7 計測対象ノードの抽出データ数と検索対象期間

	抽出データ数	検索対象期間(時間)
A 橋	117	336
B 橋	214	9

表 3-8 A 橋の指定時間帯のデータ抽出処理時間

A 橋	1 回目(秒)	2 回目(秒)	平均(秒)
逐次処理	8975	9179	9077.0
並列処理	3023	3145	3084.0

表 3-9 B 橋の指定時間帯のデータ抽出処理時間

B 橋	1 回目(秒)	2 回目(秒)	3 回目(秒)	平均(秒)
逐次処理	612	632	616	620.0
並列処理	176	175	175	175.3

A 橋の計測結果は、表 3-8 に示す通り、逐次処理が平均 9077.0 秒、並列処理が平均 3084.0 秒であった。抽出データ 1 件あたりの処理時間は、逐次処理が 77 秒/件、並列処理が 26 秒/件となることから、並列処理の方が逐次処理よりも 3 倍程高速である。

また、B 橋の計測結果は、表 3-9 に示す通り、逐次処理が平均 620.0 秒、並列処理が平均 175.3 秒であった。抽出データ 1 件あたりの処理時間は、逐次処理が 2.90 秒/件、並列処理が 0.82 秒/件となることから、並列処理の方が逐次処理よりも 3.5 倍程高速である。

これより、抽出データ数及び検索対象期間によらず、逐次処理と並列処理の検索処理時間は、同様の傾向を示す結果が得られた。

(3) 計測結果に対する考察

特徴領域の検索処理について、逐次処理の処理時間と並列処理の処理時間を比較すると、逐次処理に比べて並列処理の方が 2 倍から 3 倍程度高速に処理できていることから、特徴領域の検索処理では並列処理が有効に動作しているといえる。

また、指定時間帯のデータ抽出処理について、逐次処理の処理時間と並列処理の処理時間を比較すると、逐次処理に比べて並列処理の方が 3 倍から 3.5 倍程度高速に処理できていることから、指定時間帯のデータ抽出処理においても並列処理が有効に動作しているといえる。

これより、ツールの基本機能として、並列処理による検索及び抽出機能を採用することとした。

3-2.2 ツールの使用方法

3-2.2.1 ツールとデータの配置

(1) 動作環境

ツールの動作環境として、下記環境での動作を保証する。

- ◆ OS : Windows7 (64bit 版)
- ◆ RAM : 16GB
- ◆ Java : Java Version 8 Update 161 (64 ビット版)

(2) Java のインストール

加速度計測データ処理プログラムの動作には、Java が必要である。利用環境に Java がインストールされていない場合、ダウンロードサイト (<https://www.java.com/ja/download/manual.jsp>) からセットアップを入手し、インストールを行う。

(3) 実行ファイルの配置

GitHub の URL : <https://github.com/jipts-oosako/accelerationfileanalyzer/releases> から ZIP ファイル (AFATool_v*.zip (* : バージョン番号)) をダウンロードし、任意のフォルダに展開する。

なお、ZIP ファイルは、以下のフォルダ及び起動用バッチファイルを含んでいる。

- ◆ fileanalyzer
「加速度データの検索・抽出ツール」の部品が格納されているフォルダである。
- ◆ visualizer
「波形グラフ描画ツール」の部品が格納されているフォルダである。
- ◆ data
“計測ファイル” 及び “ツールで用いる設定ファイル” を格納するフォルダである。
- ◆ start_fileanalyzer.bat
「加速度データの検索・抽出ツール」の起動用バッチファイルである。
- ◆ start_visualizer.bat
「波形グラフ描画ツール」の起動用バッチファイルである。

(4) 加速度データ及び設定ファイルの準備

展開した「data」フォルダに、加速度計測ファイル (CSV ファイル) 、及び、ツールで用いる設定データを格納する。

(5) 加速度データの検索・抽出ツールの起動

start_fileanalyzer.bat ファイルのダブルクリックにより、「加速度データの検索・抽出ツール」の画面が表示される。ツールの操作方法は、「2-2.2.3 加速度データの検索・抽出ツールの操作方法」に示す。

なお、実行結果は、data フォルダ以下に出力される。異なる条件で繰り返し実行する場合、過去の結果が上書きされるため、予め結果ファイルを退避しておく。

(6) 加速度グラフ描画ツールの起動

start_visualizer.bat ファイルのダブルクリックにより、「加速度グラフ描画ツール」の画面が表示される。ツールの操作方法は、「2-2.2.5 加速度グラフ描画ツールの操作方法」に示す。

なお、予め「加速度データの検索・抽出ツール」によりデータ抽出が行われていない場合、加速度グラフは描画されない。

3-2.2.2 注意事項

アプリケーションは、通常、画面右上の閉じる (×) ボタンで終了する。

ただし、アプリケーションのフリーズやエラーにより正常終了できない場合、Windows タスクマネージャを用いて、プロセス「javaw.exe」を終了することで、アプリケーションを強制終了させる。

3-2.2.3 加速度データの検索・抽出ツールの操作方法

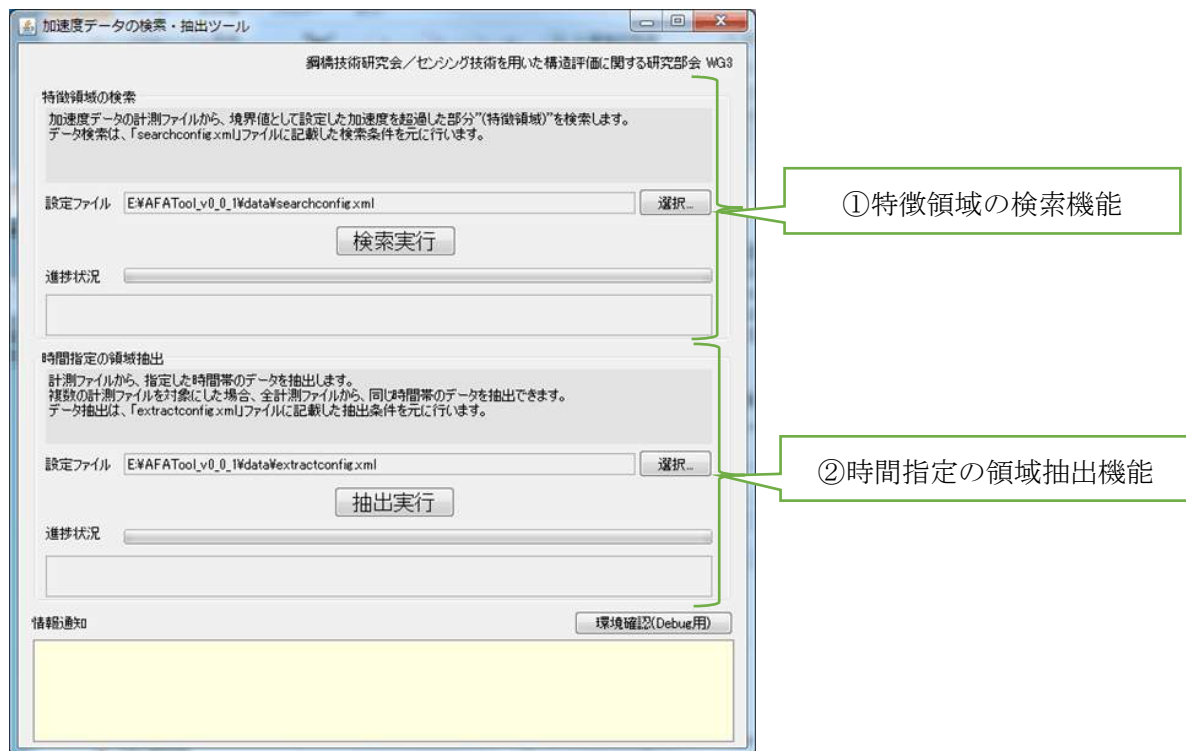


図 3-4 ツール起動画面

■ ①特徴領域の検索機能の操作手順

- (1) 設定ファイル [選択] ボタンを押し “searchconfig.xml” を選択
- (2) [検索実行] ボタンを押し、検索処理を開始
- (3) 検索処理終了後、結果フォルダを開き、出力内容を確認
- (4) 検索結果を基に、領域抽出したい領域の情報を “extractconfig.xml” に記載

■ ②時間指定の領域抽出機能

- (1) 設定ファイル [選択] ボタンを押し、“extractconfig.xml” を選択
- (2) [抽出実行] ボタンを押し、抽出処理を開始
- (3) 抽出処理終了後、結果フォルダを開き、出力内容を確認

3-2.2.4 設定ファイルの内容

(1) 特徴領域の検索機能の設定ファイル：searchconfig.xml

特徴領域の検索機能の設定ファイルについて、主な設定項目を説明する。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<configuration>
  <!-- 計測ファイルの条件 -->
  <measurement>
    <!-- 計測データの格納ディレクトリ（空白の場合、このファイルが置かれているディレクトリ） -->
    <datadir></datadir>
    <!-- 対象とする計測ファイル名称 -->
    <filepattern>(010-0015|031-0015)%.csv</filepattern> ①
    <!-- 計測開始日時 "yyyy/MM/dd hh:mm:ss SSS" -->
    <starttime>2016/09/06 11:12:00 000</starttime> ②
    <!-- 計測周波数(Hz) -->
    <frequency>100</frequency>
  </measurement>
  <!-- 特徴領域の検出条件 -->
  <detection>
    <!-- 常時微動と判定する際の境界値(G)(=標準偏差) -->
    <nearzero>0.0003</nearzero> ③
    <!-- 常時微動の判定時間(s) -->
    <endduration>5.0</endduration> ④
    <!-- 検出時間の下限値(s)(※ 常時微動の判定時間以上とする)-->
    <minduration>5.0</minduration> ⑤
    <!-- 検出時間の上限値(s) -->
    <maxduration>180.0</maxduration> ⑥
    <!-- 検出直前に割り込ませる余裕時間(s) -->
    <prebuffer>1.0</prebuffer> ⑦
    <!-- 各軸の検出境界値(G)(=最大値と最小値との差、ピークピーク値) -->
    <boundary axis_x="0.050000" axis_y="0.050000" axis_z="0.050000"></boundary>
  </detection> ⑧
  <output>
    <!-- 特徴領域の検出結果の出力ディレクトリ(計測データの格納ディレクトリに生成) -->
    <dirname>特徴領域情報</dirname>
  </output>
</configuration>
```

図 3-5 設定ファイルのサンプル（特徴領域の検索機能）

■ 項目説明

◇ ① : measurement/filepattern

特徴領域の検索対象の計測ファイル名称、または、そのパターンを指定する。

※サンプルで示した“(010-0015|031-0015)¥.csv”の場合、データフォルダ内の 010-0015.csv と 031-0015.csv の CSV ファイルを対象とする。

※パターンの指定方法は、Java の Pattern 表現を参照。

Java の Pattern 表現 : <https://docs.oracle.com/javase/jp/8/docs/api/java/util/regex/Pattern.html>

◇ ② : measurement/starttime

計測ファイルの計測開始日時を、"yyyy/MM/dd hh:mm:ss SSS"の様式で指定する。

◇ ③ : detection/nearzero

常時微動の判断に用いる加速度の境界値(G)を指定する。常時微動の判断には、④の指定時間に計測された加速度を標本とした標準偏差を用いることとし、指定された境界値未満の場合に常時微動と判断する。

◇ ④ : detection/endeduration

特徴領域の終端を検出するため、常時微動の判断に用いる標準偏差を算出する際、標本の対象とする時間を秒単位で指定する。

◇ ⑤ : detection/minduration

微小時間の特徴領域の検出を回避するため、検出時間の下限値を秒単位で指定する。

◇ ⑥ : detection/maxduration

特徴領域の検出が終了しない状態を回避するため、検出時間の上限値を秒単位で指定する。

◇ ⑦ : detection/prebuffer

特徴領域の検出直前に割り込ませる余裕時間を、秒単位で指定する。

◇ ⑧ : detection/boundary

特徴領域の検出を行う際の境界値(G)を指定する。特徴領域は、計測データの 0.5 秒間の加速度から最大値と最小値の差（ピークピーク値）を取得し、その値が指定された境界値を超えた場合に、特徴領域として検出する。

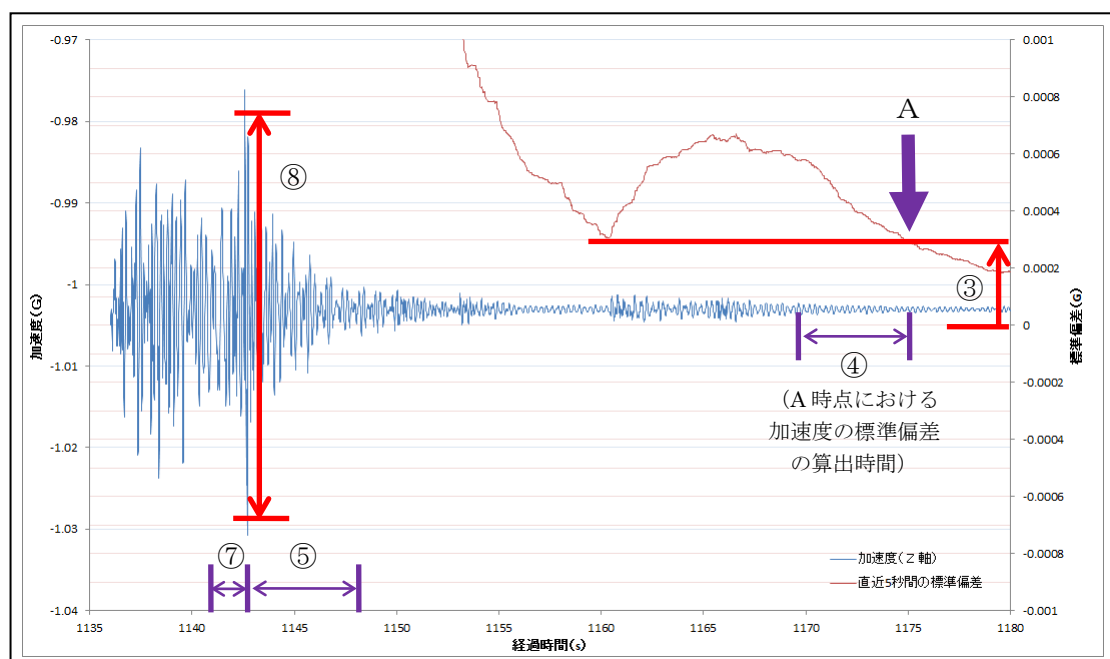


図 3-6 計測データと検出パラメータの使い方

(2) 時間指定の領域抽出機能の設定ファイル：extractconfig.xml

時間指定の領域抽出機能の設定ファイルについて、主な設定項目を説明する。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<configuration>
  <!-- 計測ファイルの条件 -->
  <measurement>
    <!-- 計測データの格納ディレクトリ (空白の場合、このファイルが置かれているディレクトリ) -->
    <datadir></datadir>
    <!-- 対象とする計測ファイルのファイルパターン -->
    <filepattern>.*%.csv</filepattern>
    <!-- 計測開始時刻 "yyyy/MM/dd hh:mm:ss SSS" -->
    <starttime>2016/09/06 11:12:00 000</starttime>
    <!-- 計測周波数(Hz) -->
    <frequency>100</frequency>
  </measurement>

  <!-- 時間指定の抽出条件 -->
  <extraction>
    <!-- 抽出基準(=開始)日時、period=抽出期間(s)、margin=抽出前後の余裕時間(s) -->
    <!-- extractbasetime は、複数指定可能 -->
    <extractbasetime period="181" margin="1">2016/09/06 11:12:04</extractbasetime>
    <extractbasetime period="84" margin="1">2016/09/06 11:15:14</extractbasetime>
    <extractbasetime period="60" margin="1">2016/09/06 11:16:39</extractbasetime>
    <extractbasetime period="28" margin="1">2016/09/06 11:18:00</extractbasetime>
    . . .
    <extractbasetime period="130" margin="1">2016/09/06 20:03:58</extractbasetime>
  </extraction>

  <output>
    <!-- 抽出結果の出力ディレクトリ(計測データの格納ディレクトリに生成し、結果を出力する) -->
    <dirname>抽出結果</dirname>
    <!-- ゼロ点からのズレの補正(true=ズレを補正して出力する、false=元データのまま出力する) -->
    <zerohosei>true</zerohosei>
  </output>
</configuration>
```

①

②

③

④

図 3-7 設定ファイルのサンプル（時間指定の領域抽出機能）

■ 項目説明

◇ ① : measurement/filepattern

時間指定の領域抽出の対象とする計測ファイル名称、または、そのパターンを指定する。

※サンプルで示した “.*¥.csv” の場合、データフォルダ内の全ての CSV ファイルを対象とする。一方 “031-0015¥.csv” のように設定した場合、データフォルダ内の “031-0015.csv” ファイルのみを対象とすることができる。

※パターンの指定方法は、Java の Pattern 表現を参照。

Java の Pattern 表現 : <https://docs.oracle.com/javase/jp/8/docs/api/java/util/regex/Pattern.html>

◇ ② : measurement/starttime

計測ファイルの計測開始日時を、“yyyy/MM/dd hh:mm:ss SSS”の様式で指定する。

◇ ③ : 時間指定の領域抽出条件

◆ ③-1 : extraction/extractbasetime

抽出開始の日時を、“yyyy/MM/dd hh:mm:ss”の様式で指定する。

◆ ③-2 : extraction/extractbasetime[@period]

抽出期間を、秒単位を指定する。

◆ ③-3 : extraction/extractbasetime[@margin]

ノード間で生じる振動の時間差を補うためのパラメータである。抽出期間の前後の余裕時間を、秒単位で指定する。

◇ ④ : output/zerohosei

出力計測値について、計測値の平均値をゼロと見立てた補正值（計測値から平均値を減じた値）を出力することができる。

◆ 補正值を出力する場合 : true

◆ 元の計測値を出力する場合 : false

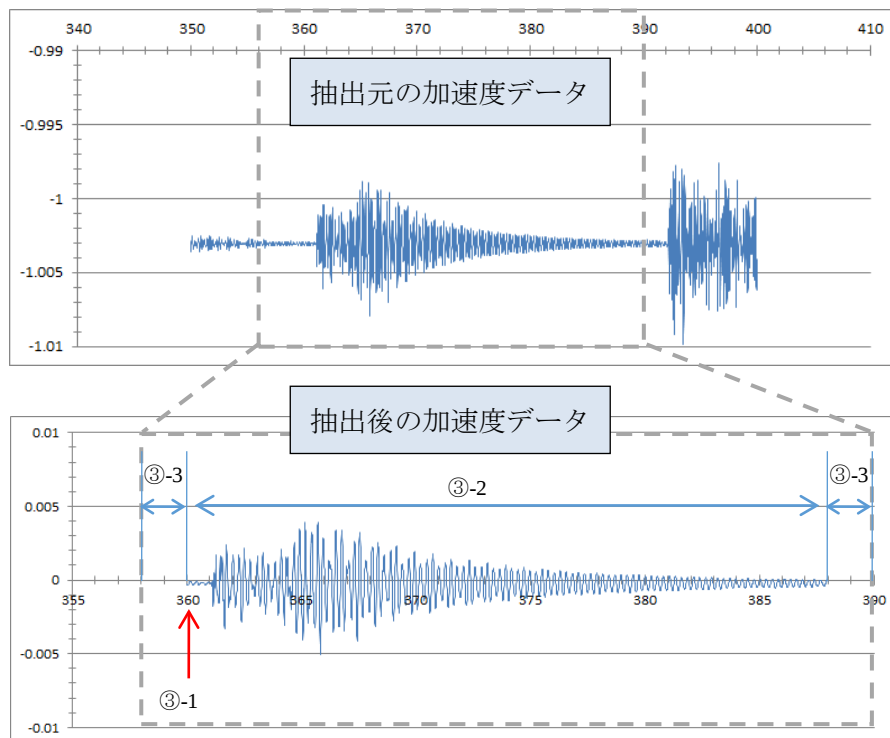


図 3-8 計測データと検出データの例

3-2.2.5 加速度グラフ描画ツールの操作方法

(1) メニューの操作

加速度グラフ描画ツールのメニュー操作方法を説明する。

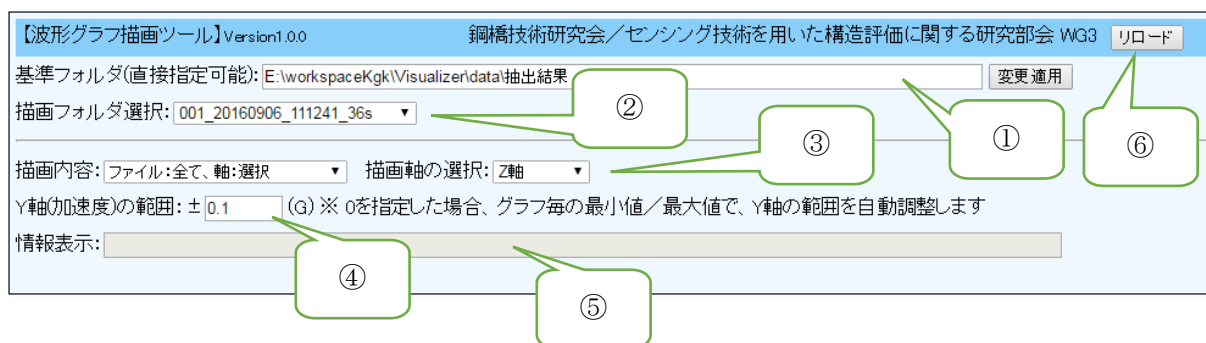


図 3-9 加速度グラフ描画ツールのメニュー

■ 項目説明

◇ ①：基準フォルダ

加速度グラフの描画対象フォルダを指定する。フォルダパスを変更した場合、[変更適用] ボタンを押し、変更内容を適用する。

◇ ②：描画フォルダ選択

加速度グラフの描画対象とするフォルダを、ダウソリストから選択する。

◇ ③：描画内容

描画内容を「ファイル：全て、軸：選択」または「ファイル：選択、軸：全て」から選択する。

◆ 「ファイル：全て、軸：選択」選択時

描画内容: ファイル:全て、軸:選択 描画軸の選択: Z軸

描画対象の軸を、「X 軸」、「Y 軸」、「Z 軸」から選択する。グラフ描画部には、描画フォルダ内の全計測ファイルについて、選択した軸の加速度グラフが描画される。

◆ 「ファイル：選択、軸：全て」選択時

描画内容: ファイル:選択、軸:全て 描画ファイルの選択: 008-0025.csv

描画対象の計測ファイルを選択する。グラフ描画部には、選択した計測ファイルの X 軸、Y 軸、Z 軸の加速度グラフが描画される。

◇ ④：Y 軸(加速度)の範囲(G)

加速度グラフの Y 軸(加速度)の範囲を指定する。例えば、0.1(G)を指定した場合、全てのグラフが、-0.1(G)から+0.1(G)の範囲で描画される。

なお、0(G)を指定した場合、グラフ毎の最小値/最大値で、Y 軸の範囲を自動調整する。

◇ ⑤：情報表示欄

エラー発生時にメッセージが表示される。

◇ ⑥：リロード

計測ファイルを更新した場合、[リロード] ボタンを押して、データを再読み込みする。

(2) グラフ描画部の操作

加速度グラフ描画ツールのグラフ描画部の操作方法を説明する。

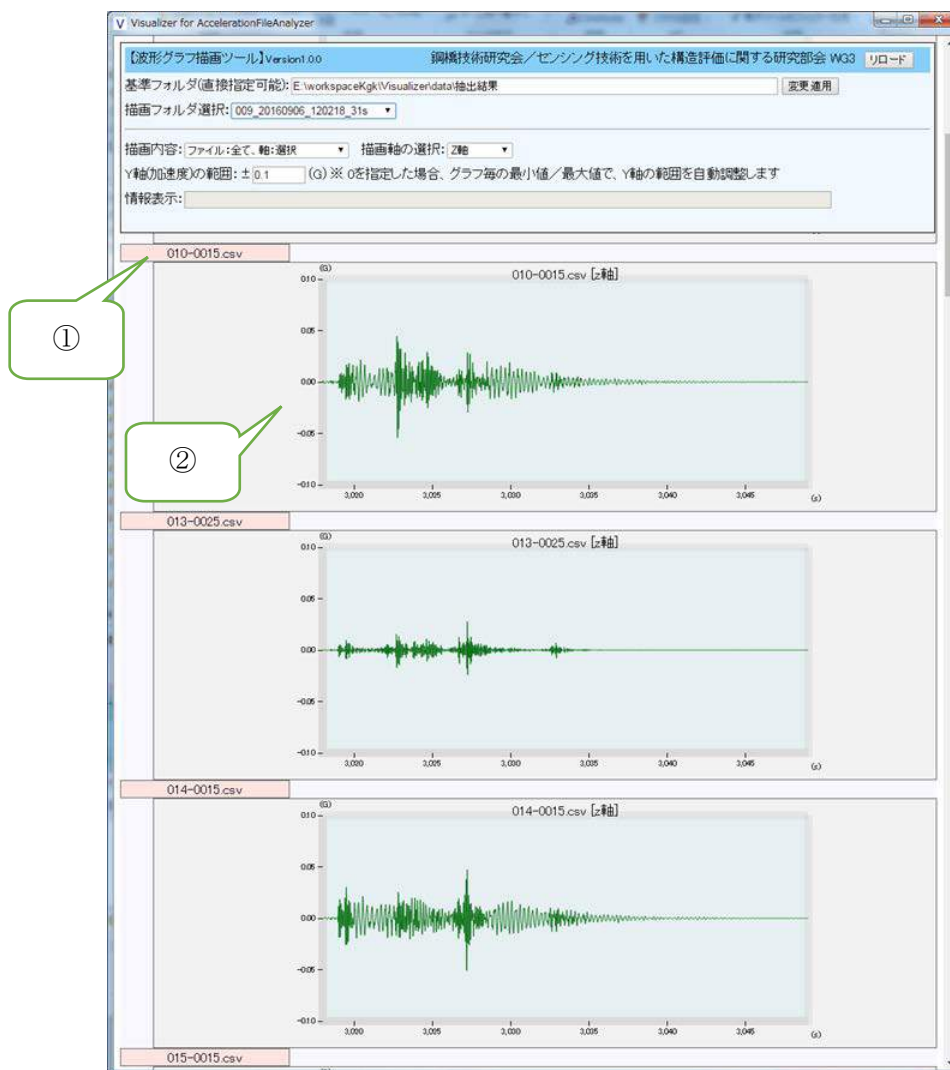


図 3-10 加速度グラフ描画ツールの描画部

■ 項目説明

◇ ①：グラフラベル

描画グラフのファイル名を示す。ラベルをクリックすることで、加速度グラフの表示／非表示を一時的に切り換えることができる。

◇ ②：加速度グラフ

横軸は経過時間（秒）、縦軸は加速度（G）とする加速度グラフを描画する。
なお、グラフに表示する加速度データは、最大 10 分（600 秒）までに制限される。

3-3. 加速度計測データ処理プログラムの適用例

3-3. 1. B 橋における測定例

3-3. 1. 1 測定データの概要

以下のような測定データを対象に解析を行う。

対象データ：	2016 年 9 月 6 日に B 橋で測定された振動加速度
センサーとチャンネル：	加速度計 23 基×3ch=69ch
サンプリング周波数：	100Hz
計測時間：	11 時頃から 20 時ごろまで約 9 時間
ファイル容量：	合計 2.96GB
ファイル形式：	CSV

3-3. 1. 2 パラメータの設定

パラメータの設定は図 3-11 のそれぞれに対して以下のように設定した。

- ③ 0.005(G)
- ④ 5.0(s)
- ⑤ 5.0～180.0(s)
- ⑦ 1.0(s)
- ⑧ X, Y, Z とも 0.05(G)

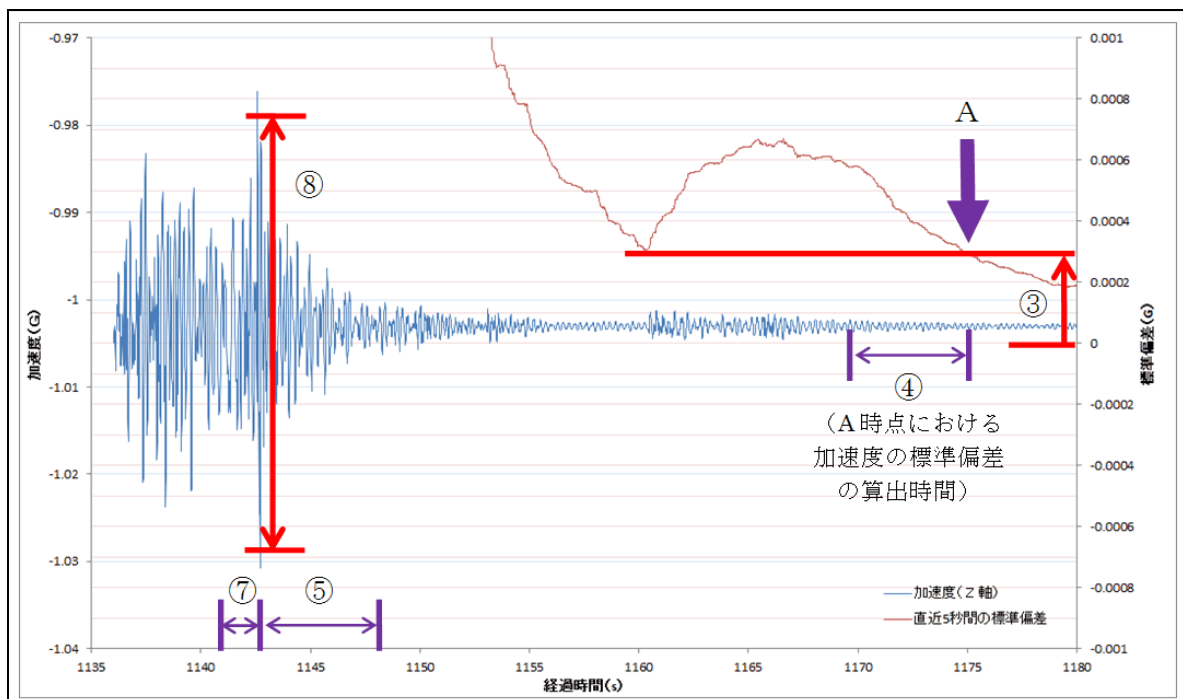


図 3-11 B 橋の計測におけるパラメータの設定

3-3.1.3 抽出結果

上記のような設定でデータを抽出した結果、全データから 3031 サンプル抽出され、時間帯の重複を除いたユニークなものは 1535 サンプルであった。チャンネルごとの抽出結果を図 3-12 に示す。

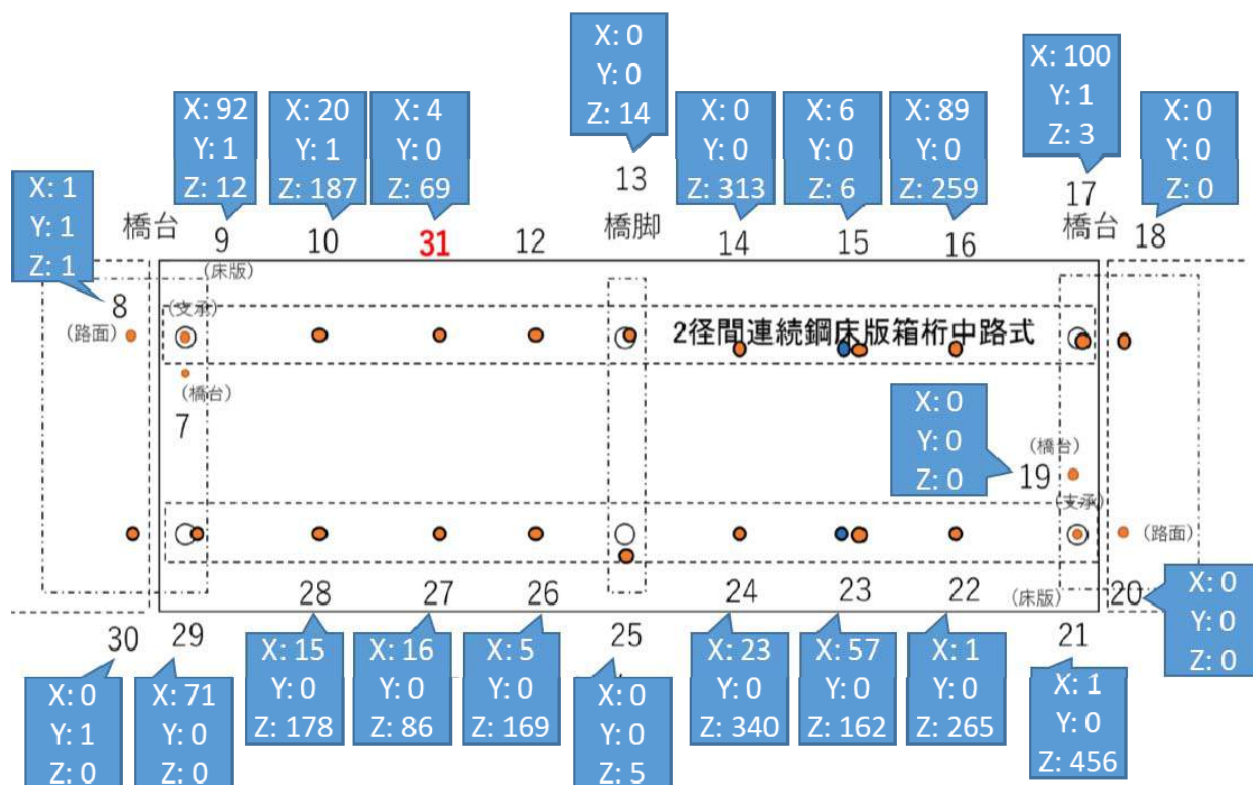


図 3-12 B 橋におけるデータ抽出結果

ある時点での抽出結果をすべての測点で表示させた例を図 3-13 に示す。これは 11 時 12 分 42 秒に測定された全測点の z 方向の振動加速度であり、測点ごとの振幅の大きさや、その増減の時間変化が確認できる。図 3-13 では、橋台や橋脚に設置した加速度計では鉛直方向の振動加速度がほとんど発生しない一方、支間部では大きな振動が発生していることが分かる。

また、同じ支間部で測点による振幅の違いを検討した例を図 3-14 に示す。これは 18 時 35 分 56 秒に測定された、測点 14 と測点 24 の z 方向の振動加速度である。測点 24 の振幅が大きいため、車両の走行位置を推測できる。さらに、図 3-15 は、異なる支間での測定例である。17 時 40 分 11 秒に記録されたこの波形では、測点 24 では最初に比較的振幅が大きく記録された一方、測点 28 では、後半の振幅が大きくなっており、車両が測点 24 から測点 28 の方向に進行したことが推定できる。

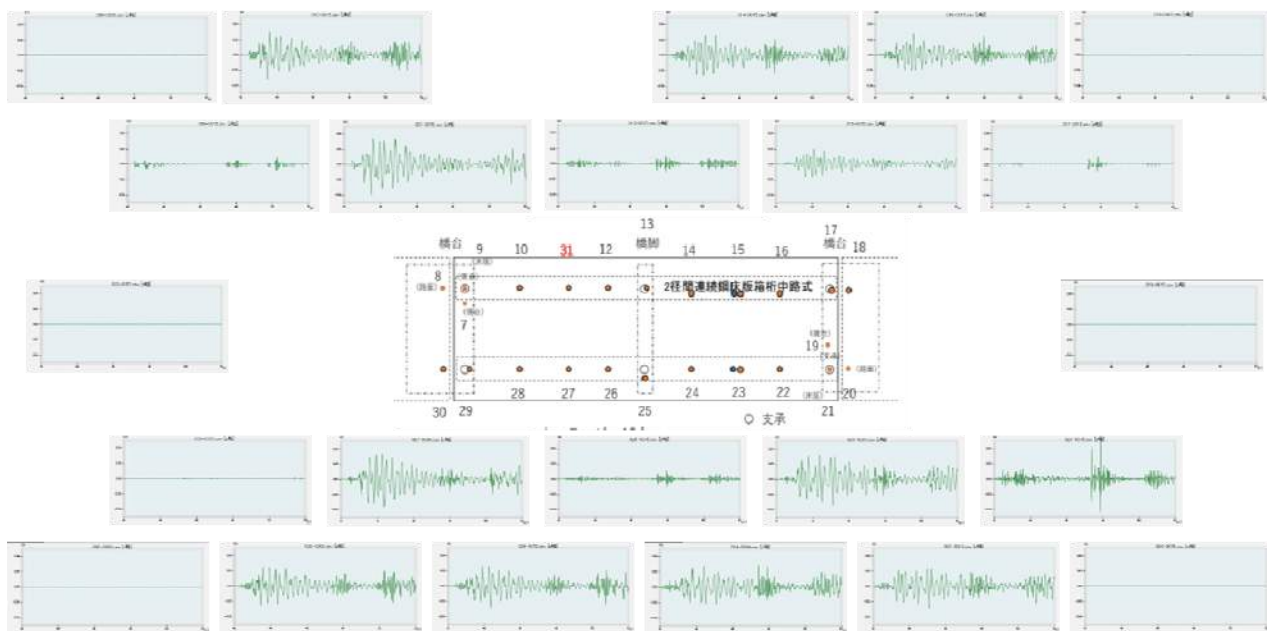


図 3-13 11 時 12 分 42 秒の振動加速度（Z 方向）

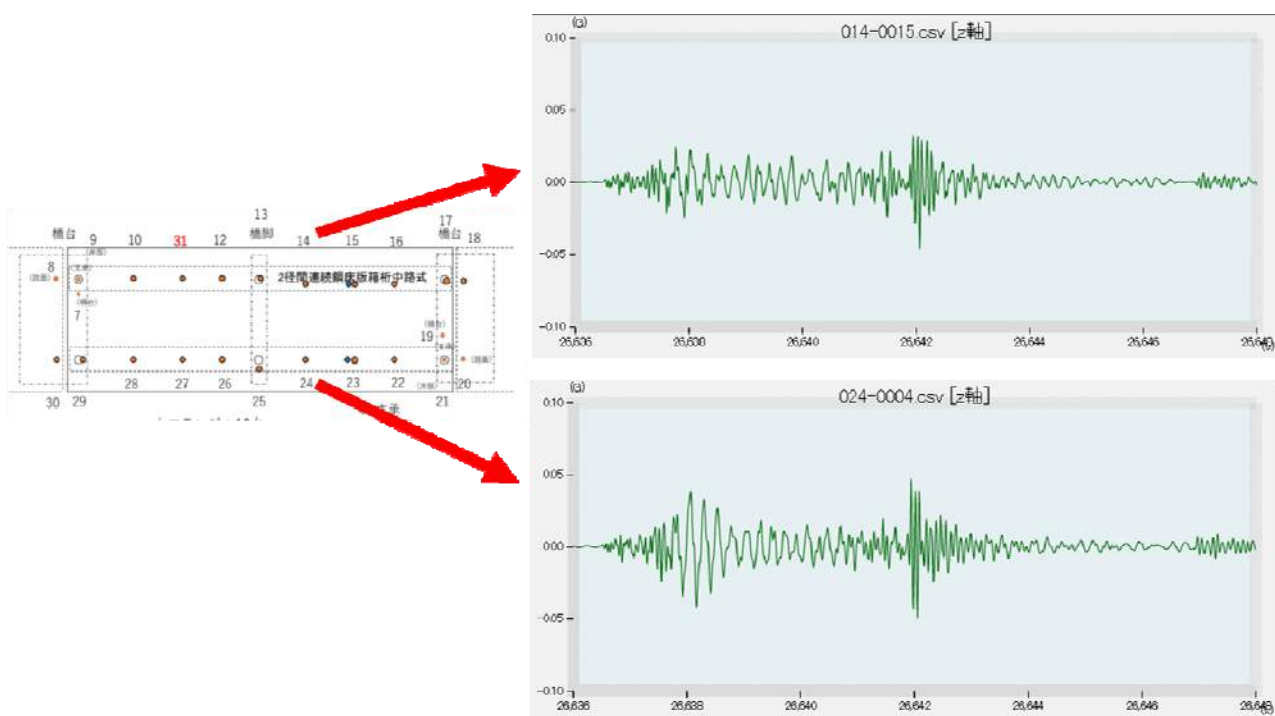


図 3-14 18 時 35 分 56 秒の振動加速度（測点 14・測点 24 の Z 方向）

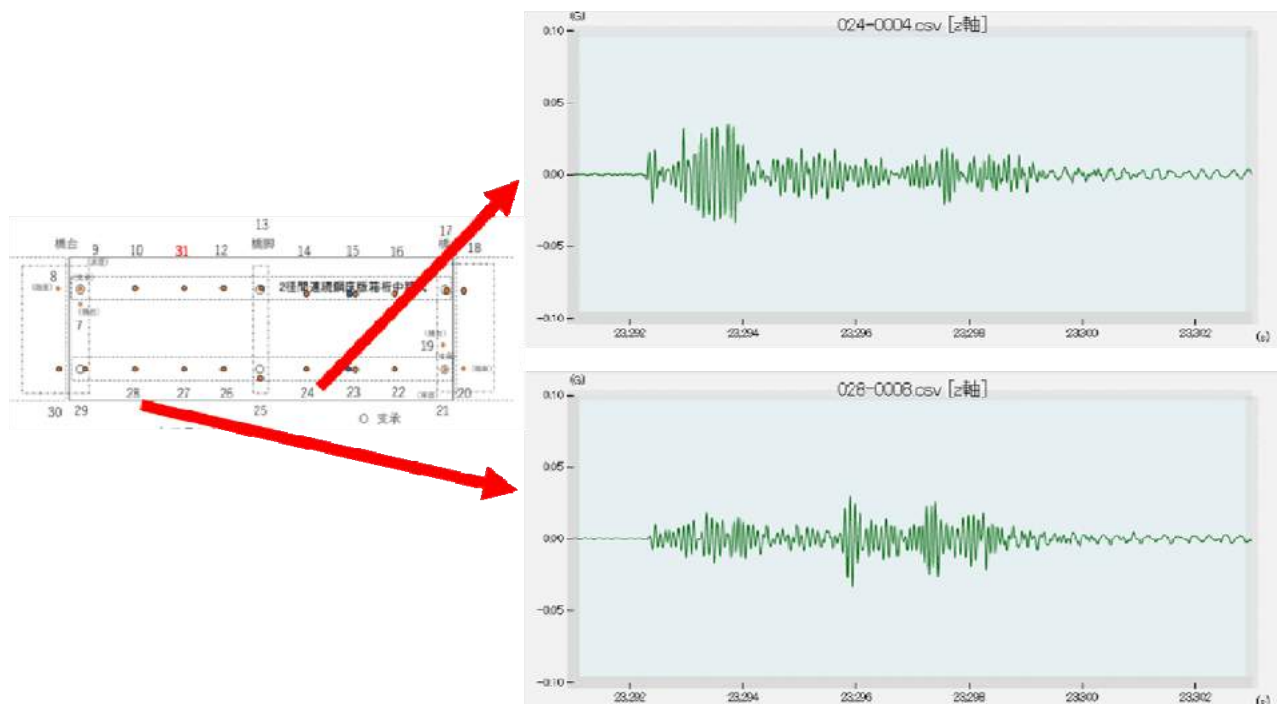


図 3-15 17 時 40 分 11 秒の振動加速度（測点 24・測点 28 の Z 方向）

2-3.1.4 B 橋の測定における成果と今後の課題

今回開発したツールによって振幅が大きい時間帯のみを抽出することが高速にできるようになった。また、データ描画ツールにより時刻歴波形の確認が容易になった。今後の課題としては、10GB を超える大量のデータ処理と、データの内容を表すデータ（メタデータ）の作成とデータベースへの登録が必要である。

§ 4. 大規模データ貯蔵・処理技術と可視化技術における課題と今後の展望

WG3 における検討を通して、大量のデータを適切に処理して構造評価に用いるためには、対象とする構造物や部材、どのような評価を行うかを明確にした上で、目的に応じて測定時間や測定項目を定め、データ処理を行う必要があることが明らかになった。また、現状ではそれぞれに課題もある。そこで、モニタリングの期間ごとに、ニーズやシーズと課題、想定される解決策を表 4-1 のように整理した。

表 4-1 からは、10 秒から 1 日程度の測定は、現状でも比較的行われることもあり、センシングの実施自体の課題は少ないが、構造評価の観点から必要な精度を得るためには、交通量や天候などの環境条件の把握、測定対象の選定などが課題となる。一方、1 年程度の長期計測の場合は、機器の信頼性確保やメンテナンスが必要となり、さらに大量のデータ処理が必要となるため、センシング技術自体の課題が顕在化してくる。したがって、センシングによる構造評価を常時モニタリングによって行う場合には、センシング技術と構造評価の両面に課題があることになる。また、点検の一環としてモニタリングを行う場合には、点検期間や点検（測定）間隔に応じて適した点検方法を選択する必要があることもわかる。例えば、期間 10sec の No.1 や No.3 のような計測では、数十秒間で必要なデータは取得できるので、長期間の計測を行う必要はない。一方、期間 1 年間の No.1 のように季節変動を把握するためにはそれに応じた長期間の計測が必要になる。

表 4-1 で挙げたような課題は、情報処理技術の今後の進展によって解決が期待できる項目もあるが、構造物の挙動をどのように測定しどのように評価するかという橋梁分野自体の課題も残されており、今後は新しいセンシング技術を活用しながら構造評価に関する研究をいっそう進展させることが求められる。

表 4-1 モニタリング期間ごとのニーズ・シーズと課題、解決策

期間	No.	何ができる or 何がしたい	課題および問題点	解決策
10 秒	1	大型車を一時的に通過させる等の、瞬間的な挙動や応力測定を行うことができる。	予め数値的根拠が分かっている実験なら良いが正確性に劣る。	実験であると割り切って計測する。
	2	スマホやタブレットを使って誰もが瞬時に計測できるアプリを作りたい。	誰でも簡単に使えるソフトを作るのが困難では？	一般人のモニターを選定し、素人でも使えるソフト開発を行う。
	3	対象橋梁の固有振動数を知りたい。イニシャルの固有振動数、定期点検ごとの固有振動数を見る。	橋梁全体の健全性を見ることはできるが、詳細は分かるだろうか。	定期点検ごとに測定する事で、経年的な変化は分かる。
	4	ノードの最大変位より支承や伸縮装置、内在する疲労亀裂を知りたい。疲労損傷や桁のたわみを知ることができないか。	局所的な範囲でのモニタリングであり、そこから離れると困難である。	複数のノードの動きを連動させることで異常値を検出できないか。測定箇所を絞れるか（支点ソールプレート、桁端の切欠き部、横構面外ガセット、垂直補剛材天端部）
	5	ノードの傾斜角、橋軸直角方向のたわみを見て、変化の予兆を知りたい。	車軸からのズレにより、数値が変わる可能性がある。	最も影響を与える輪荷重の位置を割り出し、その点を抽出して傾斜角、たわみを想定する。

1 時間	1	事前情報を基に、ピークの時間帯を選択肢することで、集中的に計測できる。	事前の交通量調査等が必要になる。	センサス等を参考にする。
	2	5年に1回の定期点検時に点検者が作業の間に行うことができる時間である。	定期点検時に計測を行うの組み作りをしなければならない。	実現可能な状態にしてから仕組み作りを行う。
	3	時間当たりの大型車両の数が分かる。過積載車を抽出したい。	大型車両通過時の荷重の影響が分かる。大型車両通過の抽出が必要。	今回の抽出ソフトが使える。大型車両通過時の影響を見る。
	4	実交通荷重による応力変動状況を知りたい。	時間当たりの対象橋梁の応力変動。	全ての交通車両を対象として、橋梁の時間当たりの応力変動を抽出できる。
1 日	1	日射の影響による1日単位での桁の挙動を把握することができる。	その日の天候（快晴、曇り、雨、雪）の影響を受けるため、評価が難しい。	天候を選択する。
	2	朝、有のラッシュ時間や日中における大型車輛の混入等を計測することが可能となる。	曜日によって交通量の変化が大きい場所では判断が難しい。	曜日を選択する。
	3	大型車両の多く通過する時間帯を知りたい。その時間帯に特化してモニタリングを実施する。	大型車の定義。	車軸からのずれでも正しく計測されるのか。
	4	日射の影響を知りたい。陽向部分と日陰部分では桁の伸び縮みが多少異なる。	局所過ぎて分からない可能性がある。	地域の天候の記録から推定できないか。
1 週間	1	曜日ごとの交通量の変化による桁の挙動を測定することができる。（ノーカーデイの影響等）	人が常駐して管理できる限界である。	無人化（リモート）を視野に入れる。
	2	損傷が発生している部分の進展度合いを計測することができる最短時間。	診断評価する人材を1週間以上配置すると、スケジュール調整やコストが大きくなる。	診断できる人材を増やす。
	3	大型車両が多く通過する曜日を知りたい。その曜日に特化してモニタリングを実施する。	曜日毎の加速度の差を抽出。	2週間程度モニタリングすることで、曜日毎の特性を見る。
四半期	1	3ヶ月間計測することで、ある程度の交通量の影響を把握することができる。	1年分のデータを保存または処理が大変である。 商用電源が必要	処理速度の速い方法を見つける。 太陽光発電等を利用する。
	2	1ヶ月以上計測すれば交通車輛に関するデータ信頼性はかなり向上する。	繁忙期や閑散期の交通事情を考慮できない。	計測の季節を選択する。
	3	季節変動の影響を知りたい。夏場は桁が伸びやすく、冬場は収縮する傾向。	対象橋梁は、日射の影響を受けやすい等を見出す。	季節毎に、2週間程度モニタリングを実施。
	4	寒冷地では冬季には凍結防止剤の影響を知りたい。伸縮装置等の腐食が発生しや	凍結防止剤が腐食をどれだけ進行させるか。	冬季にモニタリング実施。

		すい。		
1 年間	1	季節毎の気温の影響による桁の挙動の違いを調べることができる。(舗装の弾性係数の違い等)	1 年分のデータを保存または処理が大変である。 太陽光または商用電源が必要	処理速度の速い方法を見つける。 太陽光発電等を利用する。
	2	詳細点検や補修工事のタイミングを見つけることができる。(基礎資料となる。)	計測器装置を屋外に長期保管するため、装置自体の保守・点検が発生する。	耐急性の高い計測装置を開発する。
	3	1 年分のデータを利用することで橋梁全体の挙動について解析を行い、計画的な評価・劣化予測および寿命予測を行う。	ビックデータを処理できるコンピューターが必要	京を使う？
	4	5 年に 1 回の定期点検時に、モニタリングの項目を入れる。	どこの場所をモニタリングするのか。	モニタリングの対象部材を決め、経年劣化を見る。
	5	劣化現象を抽出したい。経年的な影響を見るために、劣化が見られ始めた橋梁に対して 1 年ごとの検査を実施。	劣化現象毎のモニタリングの実施ができるのか。	促進試験等実施。室内試験レベルでも劣化事例ごとの特性を捉えられるのでは。

センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会 報告書 (No.082)

編 集 鋼橋技術研究会 センシング技術を用いた構造評価に関する研究部会
発 行 平成30年7月
発 行 所 鋼橋技術研究会
〒965-0832 福島県会津若松市天神町25-3 有限会社ハートランド内
TEL.0242-36-5260

※当該資料の内容を複写したり他の媒体へ転載するような場合は、
必ず鋼橋技術研究会の許可を得てください。

編集協力 株式会社 アズ・クリエイト