

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究では、中小スパン橋梁の振動ヘルスマonitoringに役立つ「効率的加振法」、「迅速なデータ収集」、「異常診断のための意思決定」を可能とする移動点検車両による簡易Monitoringおよび交通振動を利用するMonitoringの開発に着目している。研究課題の構想の発端は「ある程度の精度を犠牲しながらも迅速にMonitoringできる手法の開発がなければ、適切な点検が行われていない大量の橋梁インフラが荒廃してしまう」との危機感にある。国や市町村が管理する橋梁の大半を占める中小スパン橋梁の維持管理のためには、経済的かつ迅速なMonitoring手法が必要である。従来の「高価な装置」、「交通規制」を要する手法は、国や地方の厳しい財政状況や大量の維持管理対象橋梁を勘案すると中小スパン橋梁のMonitoringには適していないからである。

(2) 移動点検の技術として、米国の連邦道路管理局のレーダによる床版の非破壊検査を走行しながら行う技術が知られているが、低速であること、高価であること、対象が床版に限られる等の欠点がある。一方、移動車両の振動から橋梁の低次振動数を推定する方法が報告されているが、路面凹凸の影響を如何に減らすかあるいは除去できるかが実用化に向けての検討課題である。

(3) 供用中の中小スパン橋梁の交通振動を利用するMonitoringに関して、走行車両との連成振動により強い非定常性を持つ中小スパン橋梁の交通振動データをMonitoringに利用するときには、非定常性を考慮する必要がある。

(4) 本研究で提案する非定常性を考慮する「橋梁の加振やデータ収集・分析を、移動点検車両が走行しながら行う移動点検」と同定結果のバラツキまでを考慮する統計学的なアプローチを導入する「同定振動パラメータの統計的推論による異常診断に関する意思決定法」の融合は重要な検討課題である。

## 2. 研究の目的

(1) 橋梁ストックの大半を占める中小スパン橋梁の効率的かつ迅速な診断を可能にするため、振動データの収集が容易である交通振動の利用に着目し「橋梁の加振やデータの収集・分析を移動点検車両が走行しながら行う移動点検手法の開発」と、Monitoring結果から「統計的推論に基づき対象橋梁の異常を判断する意思決定支援システムの提案」が本研究の目的である。

(2) そのため、非定常振動である車両-橋梁-路面連成系を考慮したシステム同定手法の構築と、その可能性と妥当性を検証するため模型橋梁走行車両実験および供用中の実橋梁での長期Monitoringを行う。最終的には、移

動点検から異常診断の意思決定について提案する。

## 3. 研究の方法

(1) 研究目的の目標を達成するために、これまで申請者らが開発した車両-橋梁連成振動を考慮する損傷推定手法および線形システム同定法に基づき、車両と走行車両の非定常連成振動における状態方程式を構築し、非定常連成系の橋梁の振動成分を推定するアルゴリズムを開発する。

(2) 健全橋梁の動特性の確率特性を利用する統計的プロセス管理手法と事例ベース推論による意思決定支援アルゴリズムの開発も同時に行う。構築した手法は模型橋梁と実橋を対象とする短期および長期ヘルスマonitoringに適用し、提案手法の妥当性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 非定常連成振動系のシステム同定手法の構築：ウェーブレット係数を損傷指標とし、損傷橋梁上を走行する車両振動に潜んでいる橋梁の振動特性の変化の検知可能性をシミュレーションによる検証している。また、ばらつきが多い非定常連成振動系の同定結果からMonitoring対象となる振動特性の効率的な抽出のため、多次元自己回帰モデルによる同定結果に統計的抽出法を組み合わせた新しい分析法SAMAR (Stabilization diagram Aided Multivariate AutoRegressive)の構築に成功している。

(2) 統計的パターン分析手法の構築：橋梁の損傷による異常を合理的に検知するため、抽出した振動特性の損傷前後の統計的違いを定量的に評価できる手法として、多次元統計距離に着目し、不規則非定常振動データから橋梁の異常判断にかかわる情報を精度よく推定する手法の構築にも成功している。

(3) 橋梁の加振やデータの収集・分析を移動点検車両が走行しながら行う移動点検手法の開発：模型橋梁走行車両実験を通して、解析的研究の妥当性の検討を行った結果、車両加速度から橋梁振動特性の変化は同定可能であるものの、走行条件等によって同定可能性にばらつきが出ており、路面凹凸の影響の低減などの課題が見つかった。一方、路面凹凸の影響を簡単に低減するために統計的指標に着目し、ウェーブレット係数を損傷指標とした模型橋梁車両走行実験および実橋梁での実験により、橋梁上を走行する車両の加速度から橋梁の振動特性の変化同定の可能性を実験的に示した。

図1には、実トラス橋で行った損傷実験により得られた橋梁の加速度より同定された損傷による損傷指標の変化を示しており、健全時の

H0に比べ引張材を切断したD2とD3損傷による変化が明らかであることがわかる。

損傷時の橋梁上を走行した車両の加速度振動から、本研究で開発したウェーブレット係数からなる損傷指標の変化を検討した結果を図2に示す。図2から車両振動のみから同定した損傷指標の変化が橋梁の振動から同定した損傷指標の傾向と類似であり、本研究で提案する点検車両の振動のみでの損傷同定の可能性が一層高まっている。

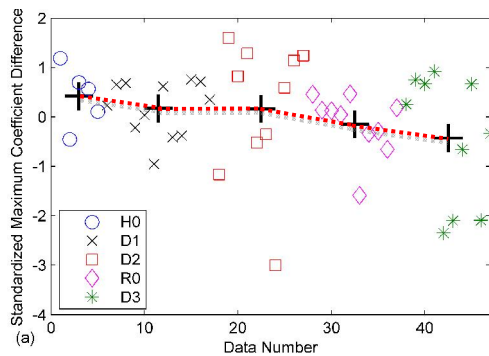


図1 損傷実験による実トラス橋の損傷による損傷指標の変化 (H0:健全, D1:軽微な損傷, D2:トラス部材切断, R0:損傷復旧, D3:他のトラス部材切断)

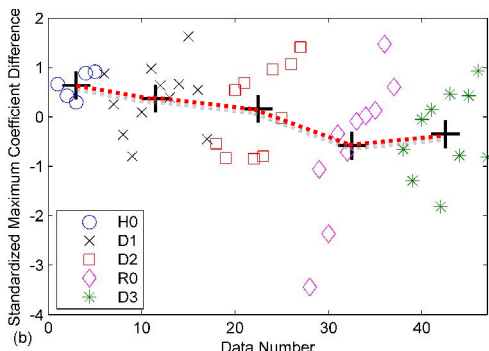


図2 損傷実験の実トラス橋の上を走行する車両振動から同定した損傷指標の変化 (H0:健全, D1:軽微な損傷, D2:トラス部材切断, R0:損傷復旧, D3:他のトラス部材切断)

(4) 統計的推論に基づき対象橋梁の異常を判断する意思決定支援システムの提案：多変量統計量の一元化による処理すべく情報量の低減を図り、マハラノビス距離を用いた異常検知手法の開発に成功した。二つの実橋梁での損傷実験を通して、損傷検知の可能性を確認している。

① 図3に示す9連続ゲルバートラス橋を対象に損傷実験を行い、ノイズの影響が多いデータから損傷に敏感な指標による損傷同定に可能性を検討した。提案指標として計測時系列の自己回帰モデル係数の特異値の寄与率に着目している。図4に検討結果の一例を示す。図2には、各センサーから同定した橋梁の損傷前後のばらつきに着目した提案損傷指標 (CR) と、健全橋梁の自己回帰モデル係数の特異値

の寄与率のばらつき (CV:INT) および損傷橋梁の自己回帰モデル係数の特異値の寄与率のばらつき (CV:DMG) を示しており、提案損傷指標 (CR) の損傷により変化が強調され異常検知が容易になる可能性を示している。

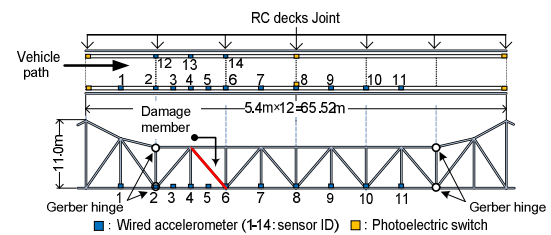


図3 橋梁Aの人工損傷とセンサー位置

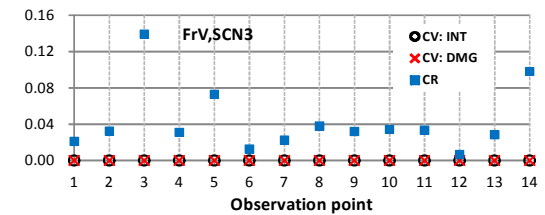


図4 橋梁Aの各センサーから同定した損傷時の健全時に比べたばらつきの量 (CR:ノイズ除去後の橋梁の損傷前後のばらつきに着目した提案損傷指標, CV:INT:健全橋梁の自己回帰モデル係数の特異値の寄与率のばらつき, CV:DMG:損傷橋梁の自己回帰モデル係数の特異値の寄与率のばらつき)

② 図5に示すワーレントラス橋を対象に損傷実験を行い、多変量統計量の一元化による処理すべく情報量の低減を図り、マハラノビス距離を用いた異常検知手法の可能性を検討した。

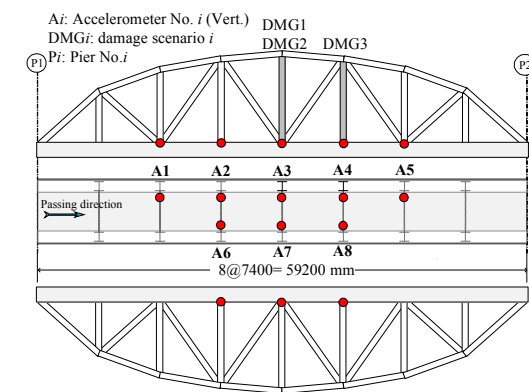


図5 橋梁Bの人工損傷とセンサー位置

その結果、図6に示すように損傷に鈍いと知られた低い振動帯域の橋梁振動数でも、複数の振動モードを項目として考慮すれば、結果的には統計的パターン分析による異常検知精度の向上につながった。本提案手法により、従来に蓄積された振動数を活かした異常検知の可能性を示した。

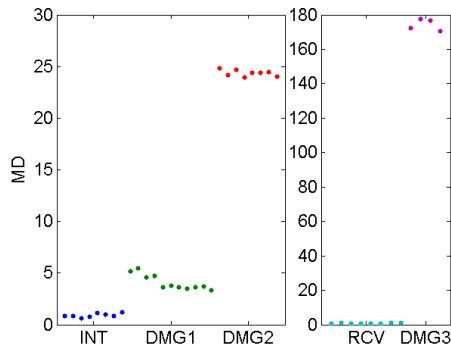


図6 橋梁Bの低次の4つの振動数の統計的距離に着目した異常検知 (MD: 多変量統計的距離, INT: 健全, DMG1: 軽微な損傷, DMG2: トラス部材切断, RCV: 損傷復旧, DMG3: 他のトラス部材切断)

③ 長期の供用期間を有する橋梁において (図7), 劣化は緩やかに進行するため, 長期モニタリングが必要である. 長期モニタリングにおいて, 温度や通行車両などの外部因子の変化は, 振動特性の変化に影響を及ぼすことがわかっている.

そこで, 長期橋梁ヘルスマニタリングにおいて, 外部因子の影響をいかに考慮し, 意思決定を行うかを検討するため, ベイズアプローチにより外部因子の影響を考慮した長期橋梁振動ヘルスマニタリングについて検討を行い, その可能性を示した. また, 定量的な異常検知のために, ベイズファクタを用いた方法論の提案にも成功している.

図8にカルマンフィルタを適用し検討結果結果を示している. 温度を考慮する回帰分析において, ARXモデルを用いた場合は, 線形回帰を用いた場合より回帰精度が高かった. また, ARXモデルを用いた回帰分析において, 温度と車両重量を考慮する場合は, 温度のみを考慮する場合より回帰精度が高いことが分かった.

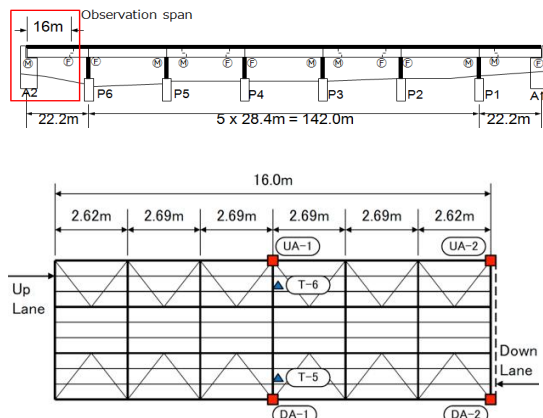


図7 長期モニタリング対象橋梁とセンサー配置

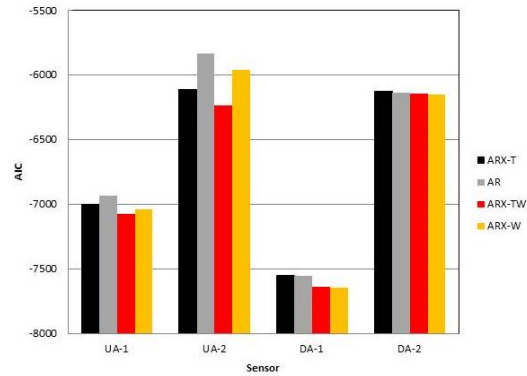


図8 AICに着目した長期モニタリングのための最適回帰モデルの検討 (ARX-T: 温度のみを外部因子と考慮したARXモデルによる結果, AR: 温度のみを外部因子と考慮したARモデルによる結果, ARX-TW: 温度と車両通行重量を外部因子と考慮したARXモデルによる結果, ARX-W: 車両通行重量のみを外部因子と考慮したARXモデルによる結果).

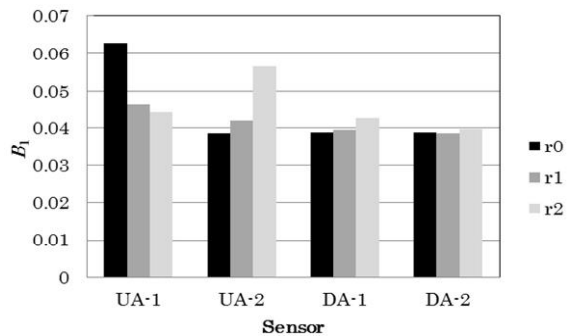


図9 健全橋梁の長期モニタリングデータから同定したベイズファクタ ( $B_1$ : ベイズファクタ, UA-1, UA-2, DA-1, DA-2: 図7に示す計測点,  $r_0$ : 1年間のデータ,  $r_1$ :  $r_0$ の2ヶ月後に計測した半年間のデータ,  $r_2$ :  $r_0$ の4年後に計測した1年間のデータ).

また, 定量的な異常検知のために, ベイズファクタを用いた方法論の可能性についても検討を行い, 健全時データを用いた検討からベイズファクタ $B \ll 1$ になり損傷可能性はないと判定された (図9). ただし, 実際の損傷に対するベイズファクタの感度については今後の検討課題である.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計15件)

- ① C.W. Kim, T. Morita, Y. Oshima, K. Sugiura, A Bayesian approach for vibration-based long-term bridge monitoring to consider environmental and operational changes, *Smart Structures and Systems, An Int J.*, Vol. 15, No. 2, pp. 395-408, 2015. (査読有)
- ② P. McGetrick, C.W. Kim, A. Gonzalez, E. O'Brien, Experimental validation of a drive-by stiffness identification method for bridge monitoring, *Structural Health Monitoring*. DOI:10.1177/1475921715578314, 2015.

(査読有)

- ③ 金 哲佐・張 凱淳・北内 壮太郎: 損傷前後の鋼単純トラス橋の振動特性同定と統計的分析による異常検知, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, p.I\_63-I\_72, 2014. (査読有)
- ④ 金 哲佐・森田 知明・杉浦 邦征: 温度および通行車両の影響を考慮した長期橋梁振動ヘルスマニタリングのためのベイズ的アプローチ, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.70, No.2, p.I\_73-I\_80, 2014. (査読有)
- ⑤ C.W. Kim, R. Isemoto, P. McGetrick, M. Kawatani, and E.J. OBrien, Drive-by bridge inspection from three different approaches, *Smart Structures and Systems, An Int J.*, Vol. 13, No. 5, pp.775-796, 2014. (査読有)
- ⑥ 金 哲佐・北内壮太郎・張 凱淳・大島義信・杉浦邦征: 単径間鋼トラス橋における振動特性の同定とその変化に及ぼす損傷の影響, 構造工学論文集 Vol.60A, pp.184-193, 2014年3月. (査読有)
- ⑦ 金 哲佐・北内 壮太郎・杉浦 邦征・川谷 充郎・甲斐 正義: 多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.3, pp.557-571, 2013. 11. (査読有)
- ⑧ C.W. Kim, R. Isemoto, K. Sugiura, M. Kawatani, Linear system parameter as an indicator for structural diagnosis of short span bridges, *Smart Structures and Systems, An Int J.*, Vol.11, No. 1, pp.1-17, 2013. (査読有)
- ⑨ C.W. Kim, R. Isemoto, K. Sugiura, M. Kawatani, Structural fault detection of bridges based on linear system parameter and MTS method, *J. of JSCE*, JSCE, Vol.1, No. 1, pp.32-43, 2013. (査読有)
- ⑩ 山本亨輔・大島義信・金 哲佐・杉浦邦征: 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp.320-331, 2013. 3. (査読有)

[学会発表] (計 30 件)

- ① C.W. Kim, Real-world applications of Vibration-based Damage Detection for Health Monitoring of Steel Truss Bridges, 6WCSCM, July 15-17, 2014, Barcelona, Spain.
- ② K.C. Chang, Vibration-based damage detection and damage-induced stress redistribution of a real steel truss bridge, IABMAS2014, July 7-11, 2014, Shanghai, China.
- ③ P. McGetrick, Wavelet based drive-by bridge inspection system, IABMAS2014, July 7-11, 2014, Shanghai, China.
- ④ C.W. Kim, Considering varying temperature and traffic load in long-term bridge health monitoring by means of Bayesian regression,

EURODYN 2014, 30 June - 2 July 2014, Porto, Portugal.

- ⑤ P. McGetrick, An indirect bridge inspection method incorporating pattern recognition and model updating Mini-symposia: System identification and structural health monitoring, EURODYN 2014, 30 June - 2 July 2014, Porto, Portugal.
- ⑥ C.W. Kim, Damage detection of a steel truss bridge through on-site moving vehicle experiments, SMAR2013, Sept. 9-11, 2013, Istanbul Tech. Univ., Turkey.
- ⑦ K.C. Chang, Changes in modal parameters of a steel truss bridge due to artificial damages, ICOSSAR2013, June 16-20, 2013 Columbia Univ., New York, USA.
- ⑧ K.C. Chang, Structural damage diagnosis of steel truss bridges by outlier detection, ICOSSAR2013, June 16-20, 2013 Columbia Univ., New York, USA.
- ⑨ C.W. Kim, A year-long monitoring using in-service vibration data from a multi-span plate-Gerber bridge, IALCCE2012, Oct. 3-6, Vienna, Austria, 2012.
- ⑩ C.W. Kim, Structural diagnosis of bridges using traffic-induced vibration measurements, IABMAS2012, July 8-12, 2012, Stresa, Italy.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金 哲佑 (KIM, Chul-Woo)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80379487

### (2) 研究分担者

川谷 充郎 (KAWATANI, Mitsuo)  
神戸大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 00029357

吉田 郁政 (YOSHIDA, Ikumasa)  
東京都市大学・工学部  
研究者番号: 60409373

大島 義信 (OSHIMA, Yoshinobu)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10362451

マクゲトリック パトリック (MCGETRICK, Patrick)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 70635648  
(退職のため平成 25 年度まで)