

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20560443

研究課題名(和文) 移動車両を加振源とする橋梁ヘルスマニタリングとワイヤレスセンサノードの適用

研究課題名(英文) Bridge Health Monitoring under a Moving Vehicle and Implementing Wireless Sensors

研究代表者

金 哲佑 (KIM CHULWOO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80379487

研究成果の概要(和文)：従来のような個々の構造物に対する点検には多大な時間と費用がかかるため、迅速かつリアルタイムモニタリングは喫緊の課題である。このような社会的要望の中、本研究は点検車両および橋梁に廉価のワイヤレスセンサノードを装着し、さらに点検車両を橋梁の振動源として利用することで点検車両が橋梁上を走行しながらリアルタイムヘルスマニタリングを可能にするモニタリングシステムの開発に挑戦し、模型桁車両走行実験装置による検討を行った。また、走行しながらデータ取得を可能にするために開発中の無線センサノードの適用性についても検討を行った。走行実験より得られる振動データを用いた損傷推定結果より、車両の種類や速度にかかわらず、模型橋梁の損傷位置の把握が可能であることが分かる。また、ノイズ対策が必要であるものの車両走行による橋梁・車両データの無線同時振動計測が可能である。

研究成果の概要(英文)：Feasibility of bridge health monitoring (BHM) using the traffic-induced vibration data is investigated through a moving vehicle laboratory experiment of a scaled steel bridge model. This study also investigates feasibility of a novel sensor node equipped a MEMS accelerometer and wireless device for data transmitting, which is aiming to determine applicability of wireless sensors in terms of real time data acquisition by a moving vehicle. Observations through the study demonstrate that locations and severities of damage are detectable using the proposed method. It also demonstrates that the vehicle speed and vehicle types are not factors hampering the damage identification. The performance of a trial piece of the sensor node is examined through bridge vibration experiments. The data transmitted from the wireless sensors are well comparable with those from conventional wired sensors even though the data loss in the signal of the wireless sensor is analytically recovered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：橋梁ヘルスマニタリング, 交通振動, 損傷実験, 無線センサ

1. 研究開始当初の背景

振動モニタリングによる健全度評価について、国内外で様々な方法が提案されているが、振動モニタリングの実用化に際しての問題点の一つは構造物に動的外力をどのようにして与えるのかである。もちろん、大型加振機による構造物の動特性の把握は可能であるが、供用中の橋梁に対する大型加振機の使用は交通規制を要するなど実用性を阻害することになる。また、一般にコストが高い。観測するだけなので比較的成本が安い常時微動を用いる振動数領域での研究も盛んであるが、得られる情報の制限が大きい。橋梁では車両の走行により振動しており、交通振動に基づく健全度評価が可能であれば効率が良い。一方、交通振動は非定常性が強い。そのため、現在のところ、交通振動の非定常性まで考慮したヘルスマニタリング手法は見当たらず、交通振動を定常振動と仮定した試験的研究に留まっている。

振動計測に関して、ワイヤレス機能を持ちながら比較的廉価である MEMS (Micro Electro Mechanical System) センサ採用のセンサノードの登場は、近未来の計測分野を左右する重要なものであるが、市販品では必ずしも土木構造物の振動計測用として開発されたものではなく、土木構造物の振動モニタリングにも適するセンサについては、今後の研究開発を要する。

点検車両を橋梁の加振源とし、さらにワイヤレスセンサノードをデータ収集や通信媒体として用い、橋梁の非定常振動データを走行中の検査車両のデータ収集ホストへ逐次転送することでリアルタイム健全度評価を可能にする研究は、大量の橋梁ストックの維持管理のためにも喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本研究は、橋梁のリアルタイムヘルスマニタリングのための加振およびデータ収集機能を持つ点検車両による損傷推定の可能性と MEMS センサノードによる橋梁および実験車両のワイヤレス計測システムの開発を目的とする。すなわち、計測システムおよびデータ収録ホストを装着した点検車両がモニタリング対象橋梁上を走行することで同時に橋梁のヘルスマニタリングが可能となるシステムの構築を目指している。

3. 研究の方法

研究は「模型桁車両走行実験による損傷推定の有効性の検討」と「ワイヤレスアクセスの適用性」について検討を行う。

(1) 本研究では道路橋を対象として、時間領域での走行車両による橋梁の非定常振

動から橋梁の健全度を推定する方法について検討を行う。一般に健全度評価あるいは損傷度評価は観測情報からモデルを推定する逆問題の一種であり、なんらかの目的関数を設定し、その最小化を行うことがほとんどである。本研究では、橋梁-走行車両連成振動メカニズムから目的関数を設定し、その最小化問題を解くことにより剛性分布を推定し、損傷している部位、およびその程度を推定する。目的関数の最小化には最小二乗法を用いる。また、逆問題における非適切性(ill-posed problem)への対処と目的関数の最小化には正則化最小二乗法の一つであるチホノフの正則化法 (Tikhonov Regularization)を適用する。

推定手法の妥当性については、図1の模型橋梁車両走行実験装置を用いる。また、損傷として、部材の切断により人工損傷を対象模型桁に与える。損傷実験においては、図2に示すように2種類の損傷シナリオを考える。コンクリート橋において、支間中央部は曲げモーメントが極大となる部分があり、曲げひび割れが発生しやすい。そのため、これを模擬した損傷シナリオ1について損傷推定の可能性を検討する。また、桁のスパン中央部の損傷に加えて、桁端腐食を想定し、桁端部の部材を斜めに削る(図2-(b)参照)。No.2部材の損傷により、約11%の曲げ剛性が低下している。また、桁端部の損傷によりNo.4部材の曲げ剛性は約23%程度低下している。

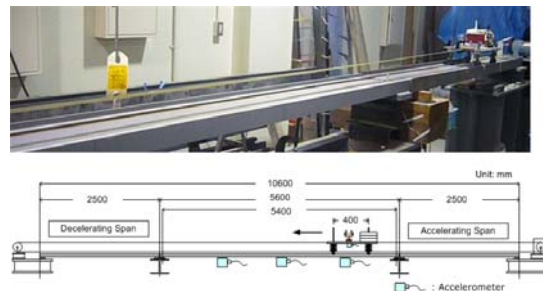
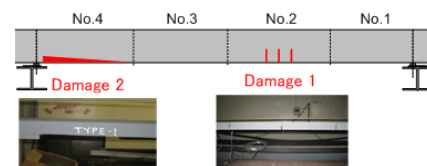


図1. 模型橋梁車両走行実験装置



(a) 損傷シナリオ1



(b) 損傷シナリオ2

図2. 損傷シナリオ

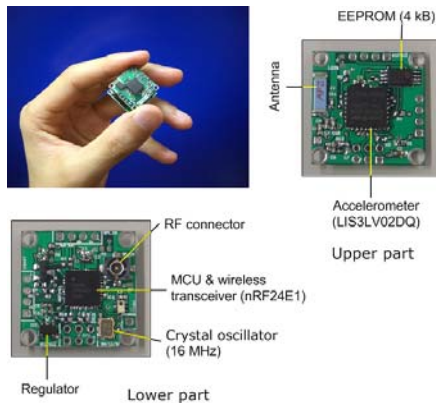


図 3. 無線センサ

表 1. 無線センサの仕様

基本仕様	外形寸法	20(W)×20(D)×4.2(H)mm (突起部を含まず)	
	質量	約 1g (電池を含まず)	
マイコン仕様	MPU	Intel 8051 互換 マイクロコントローラ	
	動作クロック	16MHz	
	プログラムメモリ	4Kbyte	
	データメモリ	256Byte	
	外部 EEPROM	4Kbyte	
無線仕様	通信モジュール	nRF2401	
	通信周波数	2404~2479MHz	
	通信方式	Shock Burst (Nordic 社独自方式)	
	通信速度	1MHz / 250kbps	
	無線チャンネル数	76 チャンネル	
	送信出力	0.3mW	
	通信距離	30m 程度	
電源仕様	アンテナ	内蔵型 (チップアンテナ)	
	電源電圧	DC 3~9V	
	動作電圧	DC 2.2~3.6V	
	動作時間	連続 72 時間	
	モード別消費電流	通常	5mA 程度
		通信時	30mA 程度
スリープ時		5μA 程度	
インタフェース仕様	プログラム用	SPI	
	通信用	UART	
	その他	Digital I/O 2 ポート (PWM 出力 1 ポート)	
加速度センサ	測定レンジ	±2.0G	
	AD 変換	12bit	

(2) 車両が走行しながら橋梁の振動情報を取得し、橋梁の損傷を推定するためには、無線センサの利用が不可欠である。本研究では開発中の超小型ワイヤレスセンサノード (図 3 参照) による振動計測の可能性および走行車両による橋梁の振動データ取得の可能性について検討を行う。開発中の超小型ワイヤレス・センサは従来式のセンサシステムより廉価であり、ニーズによって変更・設計できるという極めて拡張性が高い。開発中のセンサノードの仕様を表 1 にまとめる。

また、無線データ送受信にはデータ欠損の危険性が潜在している。もちろん、マルチパケットデータ送受信を行えばデータ欠損を防ぐことが可能であるが、そのためには大容量のメモリや電力の消費は避けられない。特

に走行車両の場合、モニタリング対象橋梁上を走行するため、時間とともに無線送受信の距離も増加し、定点観測で有効なマルチパケットデータ送受信の適用は望ましくない。それで本研究では、カルマンフィルタによる欠損データの補間を試みる(図 4 参照)。

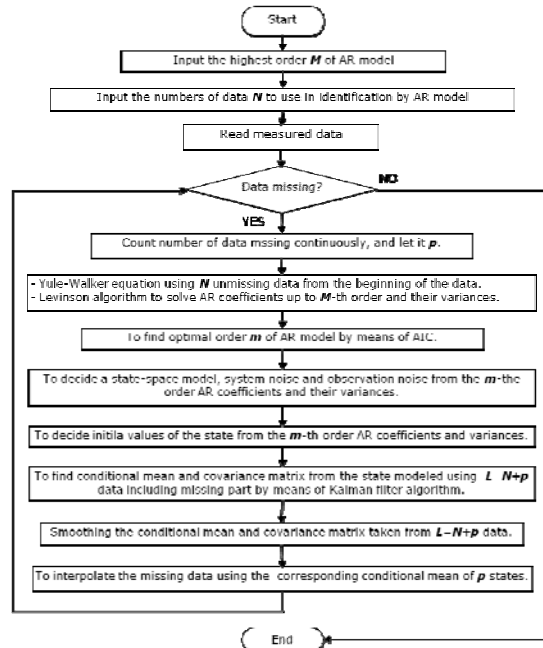


図 4. カルマンフィルタによる欠損データ補間アルゴリズム

4. 研究成果

(1) 走行車両加振による損傷推定

本研究では、走行車両加振による損傷推定の精度の検討に加え車両の違いや走行速度による推定精度への影響の検討も行った。

まず、走行速度や車両の種類に関わらず一定の損傷推定ができることを確認した。損傷シナリオ 1 の推定結果の一例として、走行車両別の推定結果を図 5 に示す。図の縦軸の ESI (Element Stiffness Index) は剛性率を示しており、当然ながら損傷がない場合は 1 になる。また、損傷により剛性が低下する場合は、1 より低い値を持つ。また、破線は損傷部材の健全時に対する剛性率を表す。すなわち、損傷シナリオ 1 に場合、損傷により部材 No. 2 の曲げ剛性が 11% 低下したことから、波線は剛性率 0.89 を示している。推定誤差は、0.2%~4.0% に分布しており、推定精度は高いと言える。また、図 5 から分かるように、損傷位置も正確に推定していることが分かる。

損傷シナリオ 2 についても同様の検討を行い、その推定結果の一部を図 6 に示す。2 か所に損傷を与えたモデルでも損傷位置や損傷に

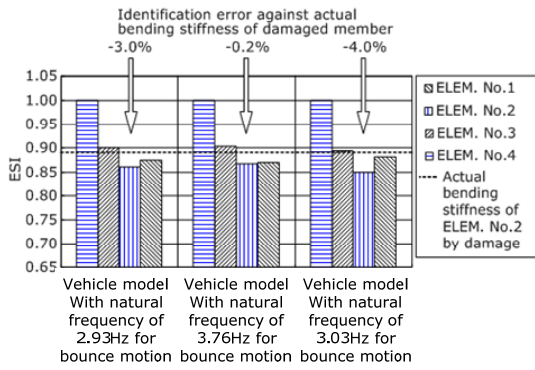


図 5. 損傷シナリオ 1 の推定結果

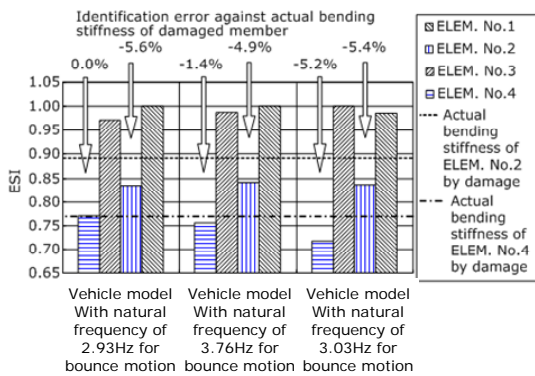


図 6. 損傷シナリオ 2 の推定結果

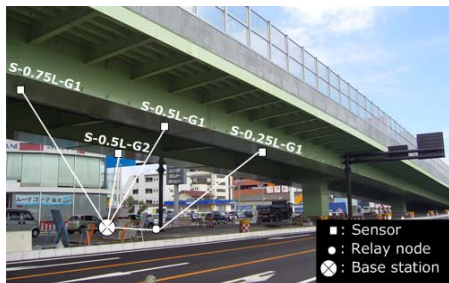


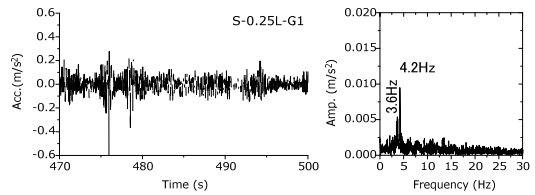
図 7. 計測対象橋梁

よる健全時に対する剛性率を精度よく推定していることが分かる。特に、1か所損傷の場合に比べ推定精度は落ちるものの、推定誤差は0.0%~5.6%に分布しており、損傷個所に関わらず一定の損傷推定精度が期待できると考える。

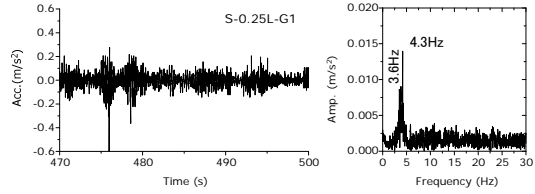
以上より本研究で提案する移動車両加振による損傷推定の有効性が確認できる。

(2) ワイヤレス・センサーによる振動計測

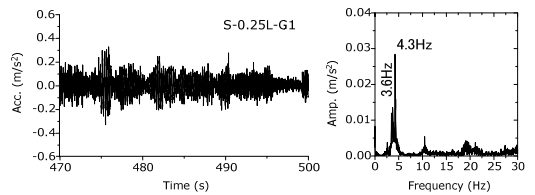
無線センサによる無線データ通信には、データ欠損が生じやすく、高価な装置の導入なしでは、欠損を完全に防ぐことは困難である。そこで本研究では、ある程度の欠損を許容し、データ欠損の補間に着目し、欠損補間手法を提案し(図4参照)その有用性を検討する。



(a) 欠損データ



(b) 補間結果



(a) 有線センサによるデータ

図 8. データ補間結果

Wireless data acquisition system on vehicle

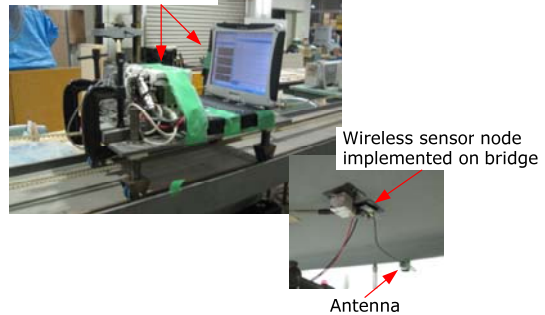
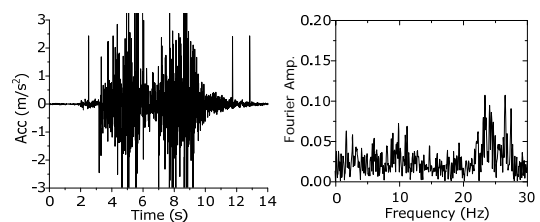
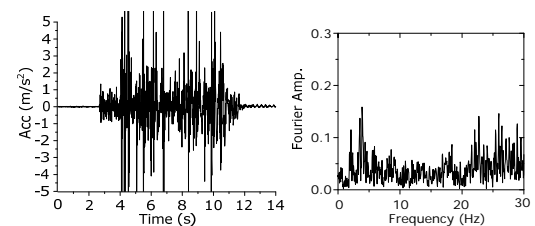


図 9 移動車両による模型桁振動データ収集



(a) 桁の加速度応答



(b) 車両の加速度振動 (後軸・ばね上)

図 10. 移動車両による計測結果

まず、実橋梁(図7参照)での計測を行い、欠損データについて、データ補間を行う。補間結果の妥当性を検証するため、同時計測した有線加速度の時系列およびそのスペクトルと比較・検討する。図8に示すように、補間データの時系列およびそのスペクトルは有線センサによる時系列およびスペクトルと近似していることが分かる。

次に、図9に示す走行車両上に搭載したデータ収集システムによるデータ収集の可能性について検討する。計測結果の一例を図10に示す。走行車両によるデータ収集には成功している。もちろん有線加速度による計測結果との比較によって、その有用性は確認している。一方、計測波形にはノイズと見られる成分が含まれており、ノイズをどのように処理するか、またはノイズが推定結果にどう影響するかは今後の課題である。

(3) まとめ

- 走行実験より得られた振動データを用いた損傷推定結果より、車両種類や車両速度にかかわらず、模型橋梁の損傷位置の把握が可能である。
- 有線加速度計と無線加速度計の加速度応答・フーリエスペクトル共に一致する結果となり、実橋梁における無線計測の適用性が示された。模型桁において、車両走行による橋梁・車両データの無線同時振動計測が可能である。
- 損傷レベルに応じた損傷推定の感度分析を行うことにより、どの程度の損傷で推定が可能かについては今後の検討課題である。
- また、今後の実用化に向けて、ノイズやデータ欠損、通信距離、センサ設置条件などの問題点を検討し、改良を進めていく必要がある。

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10件)

- ① C.W. Kim, M. Kawatani, and J. Hao, Modal parameter identification of short span bridges under a moving vehicle by means of multivariate AR model, *Structure and Infrastructure Engineering*. (DOI: 10.1080/15732479.2010.539061) (査読有)
- ② C.W. Kim, M. Kawatani, R. Ozaki, and N. Makihata, Recovering missing data transmitted from a wireless sensor node for

vibration-based bridge health monitoring, *Structural Engineering and Mechanics*., Vol.38(4), 2011, pp.417-428. (査読有)

- ③ 宇高雄大・吉田郁政・金哲佑：交通振動による橋梁損傷推定の感度分析に関する基礎研究，第25回信頼性シンポジウム講演論文集，日本材料学会，2010.12. (査読有)
- ④ 川谷充郎・金哲佑・尾崎隆弥・利波立秋・塚本昌彦・藤田直生・南靖彦：橋梁振動モニタリングのためのMEMS無線センサノード開発と実橋適用性検討，応用力学論文集，土木学会，Vol.13, 2010, pp.1009-1016. (査読有)
- ⑤ C.W. Kim, M. Kawatani, T. Fujimoto, Identifying bending stiffness change of a beam under a moving vehicle, *Bridge Maintenance, safety and Management*, CD-ROM, 2010. (査読有)
- ⑥ C.W. Kim, M. Kawatani, R. Ozaki, N. Makihata, and M. Kano, Low-cost wireless sensor node for vibration monitoring of infrastructures, *Bridge Maintenance, safety and Management*, CD-ROM. 2010. (査読有)
- ⑦ T. Toshinami, M. Kawatani, and C.W. Kim, Feasibility investigation for identifying bridge's fundamental frequencies from vehicle vibrations, *Bridge Maintenance, safety and Management*, CD-ROM, 2010. (査読有)
- ⑧ C.W. Kim and M. Kawatani, Challenge for a Drive-by Bridge Inspection, *Structural Safety and Reliability*, 2009, pp.758-765. (査読有)
- ⑨ C.W. Kim, M. Kawatani, R. Ozaki, and J. Hao, Modal Identification of Short and Medium Span Bridges under Moving Loads, *Structural Safety and Reliability*, 2009, pp.2446-2452. (査読有)
- ⑩ C.W. Kim, M. Kawatani, M. Tsukamoto and N. Fujita, Wireless sensor node development for bridge condition assessment, *Advances in Science and Technology*, Vol.56, 2008, pp.573-578. (査読有)

[学会発表] (計20件)

- ① C.W. Kim and K. Sugiura, Drive-by bridge monitoring for short span bridges, 2010 AIT-KU Joint Symp. on Human Security Engineering, Nov., 25-26, 2010, Bangkok, Thailand.
- ② P.J. McGetrick, C.W. Kim and E.J. O'Brien, Experimental Investigation of the Detection of Bridge Dynamic Parameters using a Moving Vehicle, Twenty-Third KCCNN Symp. on Civil Eng., Nov., 13-15, 2010,

- Taipei.
- ③ R. Isemoto, C.W. Kim and K. Sugiura, Abnormal diagnosis of bridges using traffic-induced vibration measurements, Twenty-Third KCCNN Symp. on Civil Eng., Nov., 13-15, 2010, Taipei.
- ④ 宇高 雄大・吉田 郁政・金 哲佑：交通振動による橋梁損傷推定の感度分析に関する基礎研究，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010 年 9 月 1 日，北海道大学
- ⑤ 伊勢本 遼・川谷 充郎・金 哲佑：模型桁車両走行実験における橋梁振動特性推定と異常診断，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010 年 9 月 2 日，北海道大学
- ⑥ 川谷 充郎・金 哲佑・利波 立秋・塚本 昌彦・尾崎 隆弥・藤田 直生・伊勢本 寮・南 康彦：試作無線センサノードの実橋振動モニタリングへの適用性検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010 年 9 月 2 日，北海道大学
- ⑦ C.W. Kim, and M. Kawatani, Bridge health monitoring using output-only vibration measurements excited, by a single moving vehicle, 15th IFIP WG7.5 Working Conf., 7-10 April, 2010, Munich, Germany.
- ⑧ M. Kawatani, C.W. Kim, R. Ozaki and N. Makihata, Missing data recovery by an interpolation method for vibration measurement of a wireless sensor node, Int. Conf. on Computational Design in Eng., 3-6 Nov., 2009, Seoul, Korea.
- ⑨ 川谷 充郎・金 哲佑・尾崎 隆弥：交通振動実験における橋梁の振動特性推定結果の仮説検定，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009 年 9 月 4 日，福岡大学
- ⑩ C.W. Kim and M. Kawatani, Feasibility Investigations for Long-term Health Monitoring of Short Span Bridges using Poles of AR model, 4th Int. Conf. on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure, 22-24 July 2009, Zurich, Switzerland.
- ⑪ C.W. Kim, M. Kawatani, and T. Fujimoto, Bridge Damage Identification through Moving Vehicle Laboratory Experiments, 4th Int. Conf. on Structural Health Monitoring on Intelligent Infrastructure, 22-24 July 2009, Zurich, Switzerland.
- ⑫ C.W. Kim, M. Kawatani, and T. Fujimoto, Moving Vehicle Laboratory Experiment to Realize a Drive-by Bridge Health Monitoring, 5th Int. Symp. on Steel Structures 12-14 March, 2009, Seoul, Korea.
- ⑬ C.W. Kim, M. Kawatani and R. Ozaki, Modal Parameter Identification of Short Span Bridges by means of Autoregressive Process, 5th Int. Symp. on Steel Structures, 12-14 March, 2009, Seoul, Korea.
- ⑭ C.W. Kim, M. Kawatani, M. Tsukamoto and N. Fujita, A Novel Wireless Sensor Node for Monitoring of Civil Structures, 5th Int. Symp. on Steel Structures, 12-14 March, 2009, Seoul, Korea.
- ⑮ 川谷 充郎, 金 哲佑, 藤本 達貴, 塚本 昌彦, 藤田 直生, 南 靖彦：橋梁振動モニタリング用 MEMS 無線センサノードの開発と実橋適用性検討，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月 10 日，東北大学
- ⑯ 川谷 充郎, 金 哲佑, 尾崎 隆弥, 郝 婕馨, 畑中 章秀：簡易無線計測システムを用いた多次元 AR(MA)モデルによる歩道橋の振動特性推定，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月 10 日，東北大学
- ⑰ 川谷 充郎, 金 哲佑, 郝 婕馨, 岡林 隆敏：中小スパン橋梁の振動モニタリングに着目した模型走行実験と多次元 AR モデルの適用，土木学会第 63 回年次学術講演会，2008 年 9 月 10 日，東北大学
- ⑱ C.W. Kim, M. Kawatani, and J. Hao, Modal identification of bridges by multivariate ARMA model, 14th IFIP WG7.5 Working Conf., 6-9 August, 2008, Toluca, Mexico.
- ⑲ I. Yoshida, C.W. Kim and M. Kawatani, Regularization of inverse problem for damage detection, Fourth Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, 13-17 July 2008, Seoul, Korea.
- ⑳ M. Kawatani, C.W. Kim and T. Fujimoto, Feasibility Investigation of Health Monitoring from Traffic-Induced Vibration Data of Bridge, Fourth Int. Conf. on Bridge Maintenance, Safety and Management, 13-17 July 2008, Seoul, Korea.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 哲佑 (KIM CHULWOO)
 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

(3) 連携研究者

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