

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

Development of Wireless Sensor Node for Bridge Vibration Monitoring and Feasibility Investigation for Actual Application

川谷充郎¹・金哲佑²・尾崎隆弥³・利波立秋³・塚本昌彦⁴・藤田直生⁵・南靖彦⁶
Mitsuo KAWATANI, Chul-Woo KIM, Ryuya OZAKI, Tatsuaki TOSHINAMI,
Masahiko TSUKAMOTO, Naotaka FUJITA and Yasuhiko MINAMI

¹工博 神戸大学教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

²博(工) 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³工学士 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

⁴博(工) 神戸大学教授 工学研究科電気電子工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

⁵工修 神戸大学大学院 工学研究科電気電子工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

⁶工学士 神戸大学大学院 工学研究科電気電子工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲町 1-1)

Maintaining and improving condition of civil infrastructures is critical to the structural integrity. Structural health monitoring (SHM) from vibration data of structures is recognized as an important approach for maintaining structures. To activate health monitoring of civil structures using vibration measurements, developing a cost-effective monitoring method and sensor system has been a technical issue. This paper discusses field experiments for wireless sensor nodes equipped MEMS accelerometer and wireless device for data transmitting, which are aiming to design low-cost wireless sensor node for monitoring civil structures. Performance of the prototype of the sensor node is investigated through vibration experiments on a newly constructed bridge and a pedestrian bridge. Comparable results between data taken from cabled and wireless sensors are obtained, even though noisy responses on the time history measured by wireless sensors are observed.

Key Words: bridge health monitoring, cost effective sensor, vibration measurement, wireless sensor node, MEMS

1. はじめに

戦後から高度成長期にかけて整備されてきた土木構造物は、長期の供用による劣化・老朽化の進行が危惧されている。今後これら既存構造物の更新時期が集中し、更新にかかる財政的な負担が飛躍的に増大することから、現状の予算規模で事後保全的な管理形態を続けた場合、多くの橋梁で通行規制や重量制限が発生する可能性があり、社会的影響が極めて大きくなる¹⁾。また、近年の社会基盤施設を巡る状況を見ると、施設の新規整備に比べ、相対的には既存施設の維持管理や有効活用の比重が高まってくる。既存施設の維持管理には構造物の劣化に関する将来予測、補修の意思決定を行う上で、現状の構造物の健全性の評価が必要不可欠であり、適切なアセットマネジメントを行う上でも既存構造物の健全度評価は大変重要なテーマとなっている。

健全度評価のための様々な方法が提案されているが、通常、構造物においては、部材の損傷や劣化はその質量、減

衰や剛性等の材料特性、固有振動数、減衰比や振動モード等の動特性の変動として現れることから、振動モニタリングによる構造物の健全度評価は有効であると報告²⁾³⁾⁴⁾されている。従来の振動計測は有線計測システムを基盤にしているが、特に、橋梁の振動計測において、配線の煩雑さ回避と現地作業時間削減のため、ワイヤレス化の要望が高まっている。

近年、無線センサネットワークと呼ばれる技術に関する研究・開発⁵⁾が注目を集めており、小型で廉価なセンサノードと呼ばれる無線通信機能を持つデバイスを現実社会のさまざまな環境に配置し、ネットワーク化することによって、その環境の物理現象を得ようとしている。しかしながら、現在のところワイヤレスセンサによる振動モニタリングは、試験的な実橋適用の事例が報告されており、計測可能性の確認のための研究が多い。

構造ヘルスマニタリングのためのワイヤレスセンサに関する研究として、長井ら⁶⁾は、構造ヘルスマニタリングに適したワイヤレスセンサネットワークの理論解析、構築

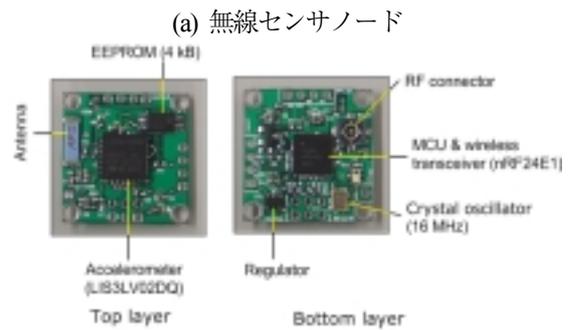
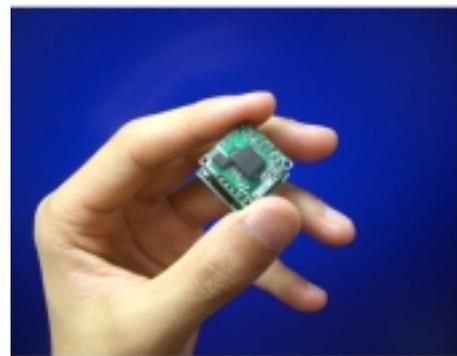
とその評価を行っている。また、Lynch らの一連の研究^{7) 8) 9)}において、ワイヤレスセンサシステムのプロトタイプ設計、ハードウェア設計、ソフトウェア設計、基礎実験、実構造物への適用実験を報告している。この研究におけるワイヤレスセンサシステムは加速度計、AD コンバータ、マイクロプロセッサ、ワイヤレスモデムから構成されている。Marcy らは¹⁰⁾、地域全体と移動車両のヘルスマonitoringを目的にワイヤレスセンサネットワークシステムを提案しており、センサとして48kHz サンプリングの加速度センサを用いたシステムを開発している。Ihler らは¹¹⁾、亀裂などのローカルな損傷をMonitoringするため、バッテリーを無くして電力をワイヤレスで供給するピエゾセンサシステムを提案している。Lemke らは¹²⁾、ワイヤレスアクセスとインターネットを介した遠隔での振動Monitoringシステムを提案している。この論文で述べられているワイヤレスアクセス方式は携帯電話のデータ転送モデム機能を利用している。Mitchell らは¹³⁾、WEBで制御できるワイヤレスセンサネットワークシステムを提案している。このシステムはHTMLを用いて、遠隔からセンサデータへのアクセスとその操作を簡単に行えるようにしているもので、静的な計測が目的である。Ravindran らは¹⁴⁾、ワイヤレスアクセス方式としてBluetoothを用いた温度センサネットワークを実装している。また、宮下らは¹⁵⁾、2台の無線LAN加速度計により簡易な橋梁の振動モード形同定を提案している。しかし、加速度センサの精度、無線による転送遅延、また大量のセンサ間の時刻同期の確保などの要求に応じた廉価のセンサノードは見当たらない。

そこで本研究では、廉価の振動計測およびMonitoring用の無線センサノードの実現を目的とし、中小スパン橋の交通振動を対象に計測を行う目的で開発中の無線センサノードの試作品に対する有用性検討を行う。

本論文では、実橋梁における有線・無線センサそれぞれの計測振動波形やフーリエ振幅スペクトルを比較・検討することで無線センサの有用性を確認する。また、より実橋梁への適用性を高めるべく、無線センサノードの通信距離向上を目的とした外部アンテナ付き無線センサノードの動作と、その性能実験を歩道橋において行い、実用化への検討を行う。

2. 無線センサシステム

開発中の無線センサノードのデバイスやシステムの動作概要について記す。本研究で用いるセンサノード¹⁶⁾を、図-1に示す。仕様設計から電子回路設計および基板設計を著者らが行い、汎用のマイクロコントローラとMEMS加速度センサを用いてセンサノードを実装している。本ノードの外形寸法はバッテリーを除き20×20×4.2mm、質量は約1gである。モジュールは、3Vで稼働可能であり、本実験では単3電池2本で稼働させている。表-1にハードウェアの主な仕様を、またノードの概要ブロック図を図-2に示す。本研究で開発したノードは、マイクロコント



(a) 無線センサノード

(b) 無線センサノード仕様

図-1 無線センサノード

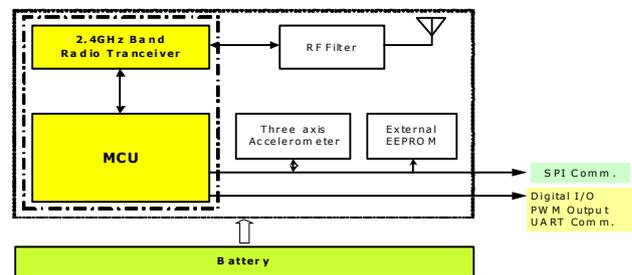


図-2 ノード概要ブロック図

ローラと無線通信モジュールを一つのLSI内に搭載し、低消費電力である通信方式をもつLSIであるNordic社製nRF24E1を採用する。nRF24E1は、Intel8051互換のマイクロコントローラと同社の無線トランシーバnRF2401を搭載するLSIである。ノードのすべての処理は、nRF24E1が搭載するマイクロコントローラにより行う。無線トランシーバnRF24E1は2.4GHz帯の周波数で、Nordic社独自の通規格であるShockburstにより無線通信を行う¹⁷⁾。

MEMS加速度センサは、STマイクロ社のデジタル12bit出力のLIS3LV02DQ¹⁸⁾を採用する。LIS3LV02DQはnRF24E1とSPI通信を行い、3軸の加速度データの出力や機能の設定を行う。また、LIS3LV02DQは、マイクロコントローラに対する割り込み信号を発生させることができる。これを用いることで、設定値以上の加速度が検出されたときにnRF24E1をスリープモードから復帰さ

表-1 ハードウェア仕様

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
	アンテナ	内蔵型 (チップアンテナ)
電源仕様	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)
加速度センサ仕様	測定レンジ	±2.0G
	AD 変換	12bit

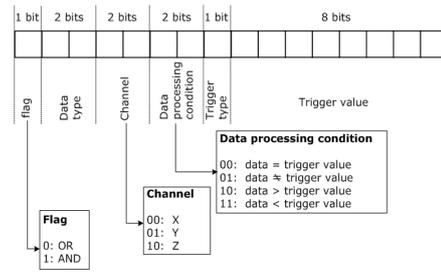
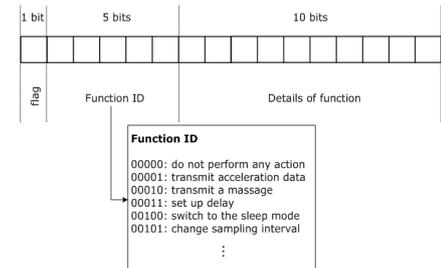
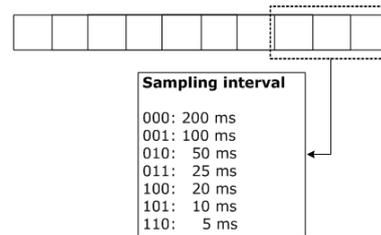


図-4 コンディション記述



(a) アクション記述

In case of Function ID = 00101



(b) アクションの詳細記述例

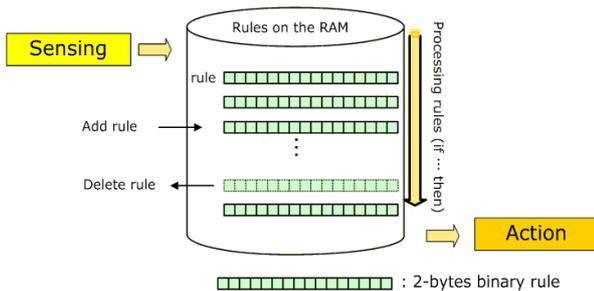


図-3 ノード動作概要

せることができる。マイクロコントローラは、内部 ROM として 512 バイト、内部 RAM として 256 バイトを搭載している。プログラム用のフラッシュメモリは搭載しておらず、起動時にブートローダが外部の EEPROM (4k バイト) からユーザプログラムを読み込む仕組みとなっている。

本センサノードは約 1 万円で作成可能であり、廉価なセンサノードと言える。

図-5 センサノードの機能制御

3. ノードの動作概要

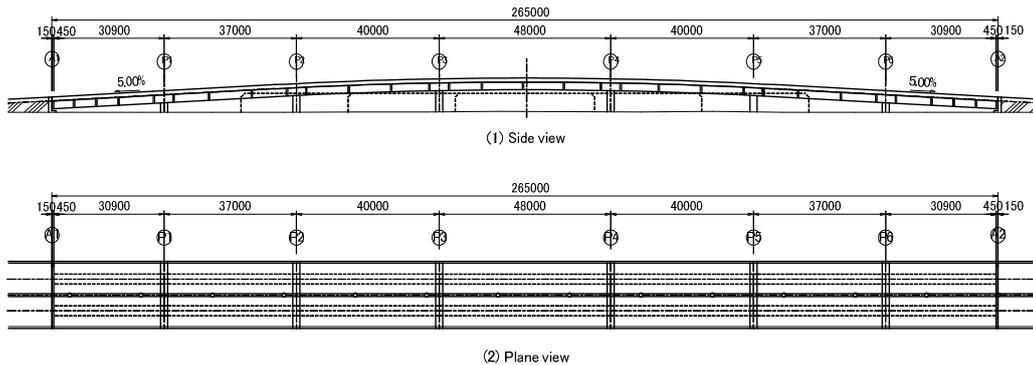
センサノードの機能を制御するため、図-3 に示すような動作設計がなされている。ルールベースに格納されているルールに従い動作するため、ルールの追加や削除により機能を追加することができる。よって実験目的や実験状況に合わせ、例えばサンプリング周波数や、加速度計測時のレンジの設定などを容易に変更することができる。ルールの変更はノート PC に装着したレシーバを通して無線で行われる。

ルール制御はコンディション (実行条件) とアクション (実行動作) の 2 パートから成り、ともに 2 バイト固定で記述する。最上位ビットにフラッグを設けることで、複数のコンディション、または複数のアクションの組み合わせを可能にする。

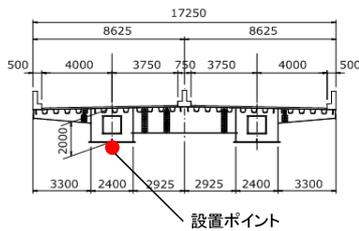
コンディション記述は図-4 に示すように、比較するデータの種類、加速度センサの軸、比較符号、しきい値タイ



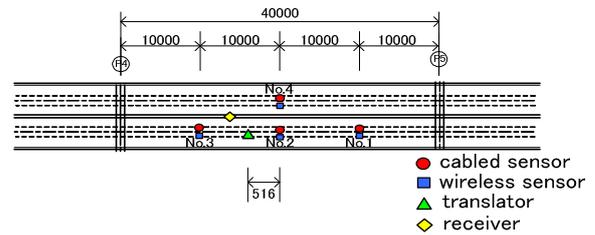
図-6 対象橋梁



(a) 一般図



(b) 断面図



(c) 計測点

図-7 対象橋梁の一般図 - 断面図および計測点

ブ、およびしきい値の記述により構成される。しきい値のタイプがプリセットに設定されている場合は、コンディション記述内のしきい値を用いてコンディションの評価を行う。しきい値のタイプが保存値に設定されている場合は、“センサデータをしきい値に設定する”というアクションにより保存されている値を評価に用いる。

アクション記述は、図-5(a)に示すように、5bitのアクションIDと10bitのアクション詳細により構成される。アクションIDにより行うアクションを識別し、下位10bitでその詳細を設定する。アクションの詳細は、アクションの内容によりフォーマットが異なり、例えばサンプリング周期を5msに変更したい場合、図-5(b)に示すように、アクションIDを110に変えるのみでよい。

計測は、汎用のノートPCを用いて行い、時刻同期は観測開始時にPCから全てのノードに開始信号を送信することで行う。

4. 鋼床版箱桁道路橋における性能検証実験

4.1 実験概要

図-6および図-7に示す橋長265.0m、総幅員17.25mの7径間連続鋼床版2箱桁ラーメン橋の車両交通振動を計測する。P3~P4間で交差点と立体交差する跨道橋であり、第4径間中央において地面から橋面までは7.7m、橋台位置では3.0mとなる。測点は、図-7(b)、(c)に示すようにP4~P5橋脚間の鋼箱桁の下フランジの4点とする。無線仕様の通信距離が30mと検討されているが、事前に行った性能実験により、屋外における通信距離が最大10mとなっていたため、測点No.1に取り付けたノードのために中継器を用いる。計測は、夜間に10分間の振動計測を3回行う。サンプリング周波数は有線センサが200Hz、無線センサが100Hzとする。

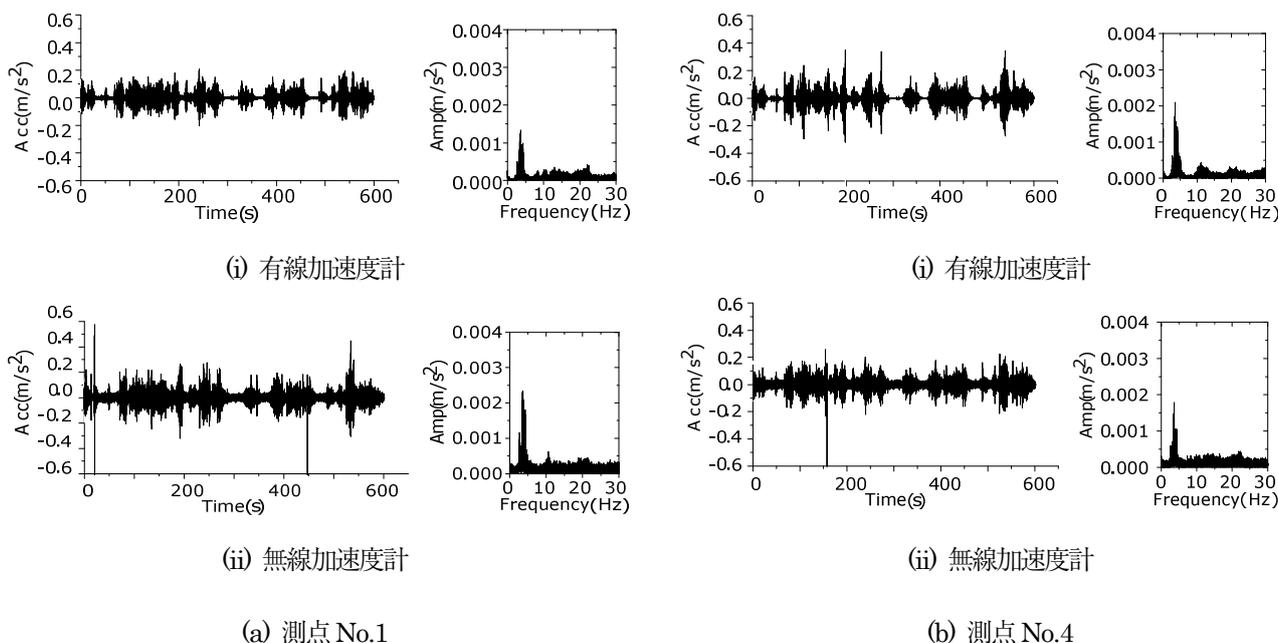


図-8 加速度波形およびフーリエ振幅スペクトル

表-2 データ欠損率 (%)

Experiment	No.1	No.2	No.3	No.4
First	1.37	1/6000	0.28	4.12
Second	0.01	0.01	0.01	0.93
Third	7.06	0	1.5	0.16

4.2 実験結果

無線センサから得られた計測データには、欠損が生じている。各データの欠損率を表-2に示す。データ欠損の理由については、無線センサの性能、センサ・レシーバ(PC)の設置位置、計測機器、電子レンジや携帯電話による外来波などの外的影響が挙げられるが、明らかになっておらず、より精度の高い振動モニタリングのためには、今後の大きな検討課題であると言える。もちろんデータ欠損の防止策や、および原因究明マルチパケット通信や無線の通信出力を上げることも対策として考えるが、本研究では、より消費電力やメモリを抑えた小型で廉価な無線センサ開発を目指しているため、ある程度の欠損を許容し、カルマンフィルタを用いたデータ欠損補間手法¹⁹⁾を構築している。本論文では具体的な手法は省略するが、以後、無線センサが示す全てのデータは本手法により補間済みである。

例として、測点 No.1、および No.4 における有線・無線センサそれぞれから得られた加速度応答と、そのフーリエ振幅スペクトルを図-8に示す。両測点において、加速度応答とフーリエ振幅スペクトルはほぼ一致することから、本無線センサの有用性は確認できたと言える。しかし、全測点において有線加速度計から得られた加速度応答には見られないノイズが多く含まれることがわかる。原因として、MEMS 加速度計そのものの特性、他の通信機器によるノイズなどが考えられるが、更なる検討が必要である。

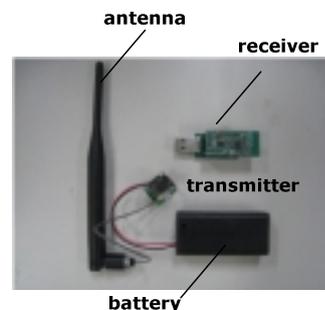


図-9 外部アンテナ付き無線センサ

5. 歩道橋実験の振動計測による性能検証実験

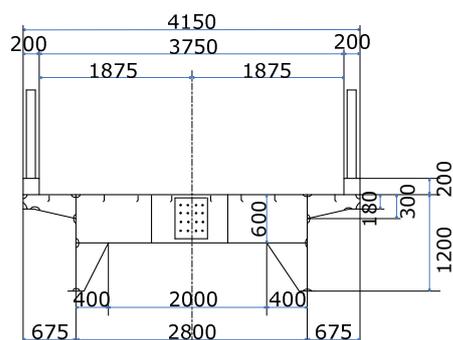
5.1 実験概要

本実験では、通信距離向上を目的とし、図-9に示すように無線センサに外部アンテナを取り付ける。外部アンテナの有用性確認として行った性能実験では、表-3に示すように、外部アンテナを取り付けることにデータ欠損を抑えることができ、最大通信距離は20mであれば欠損率10%未満で計測できることを確認した。なお、中継器にも外部アンテナを取り付けており、長距離通信下における本無線センサの有用性検討を目的としている。

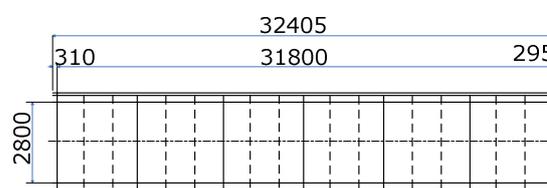
対象橋梁は、図-10に示すような橋長 32.4m、支間長 31.8m、有効幅員 3.75mの単純鋼床版 I 桁橋である。測点は、図-11のように4点とし、受信機から中継器までを 5.3m とするシナリオ 1、受信機から中継器までを 10.6m とするシナリオ 2 の全 2 シナリオを考慮する。前述の実験同様、有線加速度計と同時計測し、それぞれ 5 分間を 3 回行う。サンプリング周波数は、有線加速度計、無線センサ共に 100Hz である。なお、計測機器に不備があったため、三回目の計測における No. 2、および No. 3 のデータは取得できていない。



(a) 実験対象橋

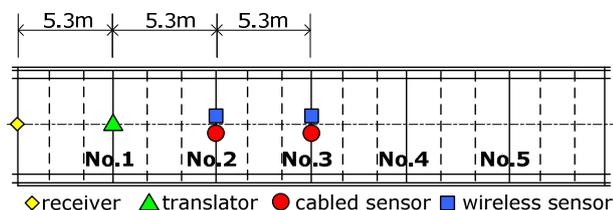


(b) 断面図

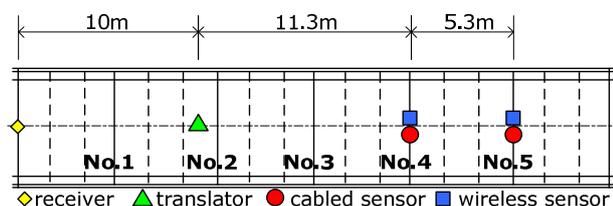


(c) 平面図

図-10 対象歩道橋



(a) シナリオ 1



(b) シナリオ 2

図-11 計測シナリオ

表-3 データ欠損率 (%)

距離	外部アンテナ無	外部アンテナ有
12m	64.1	8.1
15m	26.4	17.3
17m	50.4	7
20m	87.6	8.8

5.2 実験結果

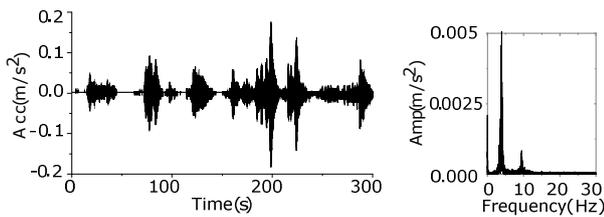
本実験においても、データ欠損が生じており、その欠損率を表-4に示す。鋼床版箱桁道路橋の振動計測と比べて欠損率が高い原因として、センサやレシーバー (PC) の設置条件によって、データ通信の精度が変化することがわかっており、地面にセンサを設置している歩道橋実験では、通信の障害となる可能性があると考えられる。

他測点に比べ、No.2における欠損率は小さな値を示している。中継器を介すことによって、約26mのデータ通信距離下において、15%前後のデータ欠損率での計測が可能であることがわかる。一般的に受信機、また中継器と無線センサが遠いほど欠損率は高くなるが、測点 No.4 と No.5 においてはその傾向に従わない。これについては明確な理由は分かっておらず、今後さらなる検討が必要である。

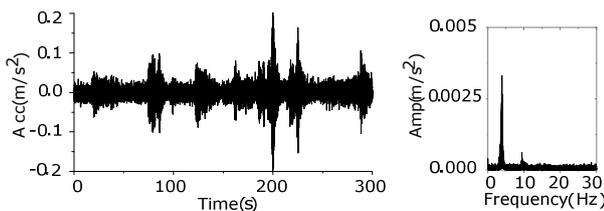
また、例として、測点 No.2、および No.4 における有線・無線センサそれぞれから得られた加速度応答と、そのフーリエ振幅スペクトルを図-12に示す。両測点において、加速度応答とフーリエ振幅スペクトルはほぼ一致することから、本無線センサの有用性は確認できたと言える。しかし、鋼床版箱桁道路橋の振動計測同様、両測点において有線加速度計から得られた加速度応答には見られないノイズが多く含まれることがわかる。

表-4 データ欠損率 (%)

Scenario 1		
Experiment	No.2	No.3
First	8.6	30.1
Second	5.7	20.1
Third	-	-
Scenario 2		
Experiment	No.4	No.5
First	22.8	14.8
Second	24.5	13.6
Third	24.8	16.5

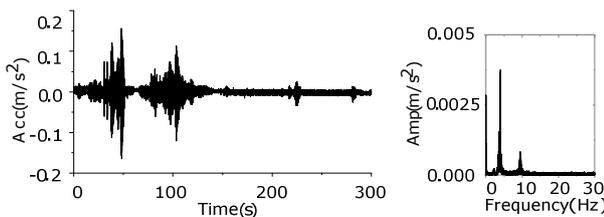


(i) 有線加速度計

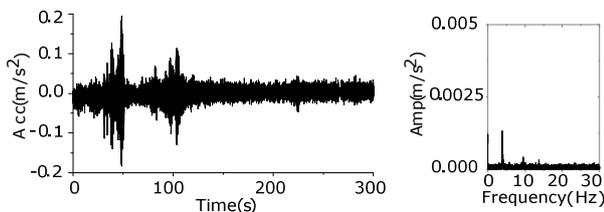


(ii) 無線加速度計

(a) 測点 No.2



(i) 有線加速度計



(ii) 無線加速度計

(b) 測点 No.4

図-12 計測加速度およびフーリエ振幅スペクトル

6. まとめ

橋梁構造物の振動モニタリングを可能にする無線センサノード試作品の有用性検討を行った。鋼床版箱桁道路橋実験や歩道橋実験の振動計測結果から、有線加速度計と加速度波形、またフーリエスペクトル結果がほぼ同じであることから、開発中の無線センサノードによる振動計測は可能であると考えられる。しかし、応答にノイズが含まれることや、センサや受信機の設置条件によるデータ通信の不安定性の問題がある。今後の実用化に向けて、データ通信が安定的に行われる設置条件などの検討を進めていく必要がある。

本無線センサノードを用いた研究では、データ欠損を減少させる手法ではなく、ある程度の欠損を許容した上で、欠損補間後のデータを比較対象としている。より精度の高い振動モニタリングのためには、データ欠損の防止策、また欠損率低下のための対策を講じる必要があると言える。センサの設置位置や条件もデータ欠損の原因と考えられるが、明確な理由が分かっていないこともあり、欠損のないデータを取得するのは困難であると言える。よって本研究では今後、無線センサの改良とともに、データ欠損補間手法の発展に取り組んでいく。同時に、構造ヘルスマニタリングにおいて有効なデータを扱う際の欠損率の許容範囲の設定や、欠損補間精度の向上も同じく重要な検討事項であると言える。

謝辞 本研究は、(独)日本学術振興会 科学研究費補助金萌芽研究(代表者:川谷充郎)および基盤研究(C)(代表者:金哲佑)の研究助成を受けて行ったものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省: 道路行政の業績計画書, 2003.
- 2) Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W.: Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics, *A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-MS*, 1996.
- 3) Lee, J.J., Yun, C.B. and Koo, K.Y.: Neural networks-based damage detection of bridge deck systems on vibration data, *Second International Symposium on Steel Structures*, pp.214-219, Seoul, Korea, November 21-22, 2002.
- 4) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: 構造物の損傷に伴う振動特性の変化に関する実験的考察, *土木学会地震工学論文集*, Vol.28, No.019, pp.1-9, 2005.
- 5) 長山智則, Spencer Jr., B. F., 藤野陽三: スマートセンサを用いた多点構造振動計測のためのミドルウェア開発, *土木学会論文集 A*, Vol.65, No. 2, pp. 523-535, 2009.
- 6) 長井望, 三田彰, 矢向高弘, 佐藤忠信: 構造ヘルスマニタリング用ワイヤレスセンサに関する研究, *日本地震工学会論文集* Vol.3, No. 4, pp.1-13, 2003.

- 7) Lynch, J. P., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Carryer, E., Kenny, T. W., Partridge, A. and Sundararajan, A.: The design of a wireless sensing unit for structural health monitoring, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring*, pp.1041-1050, Stanford, CA, USA, September 12-14, 2001.
- 8) Lynch, J. P., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Carryer, E., Kenny, T. W., Partridge, A. and Sundararajan, A.: Validation of a wireless modular monitoring system for structures, *SPIE 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, pp.124-135, San Diego, CA, USA, March 17-21, 2002.
- 9) Lynch, J. P., Sundararajan, A., Law, K. H., Kiremidjian, A. S., Kenny, T. W. and Carryer, E.: Computational core design of a wireless structural health monitoring system, *Proceedings of Advances in Structural Engineering and Mechanics Conference (ASEM'02)*, pp.1-8, Pusan, Korea, August 21-23, 2002.
- 10) Marcy, H. O., Agre, J. R., Chien, C., Clare, L. P., Romanov, N. and Twarowski, A.: Wireless sensor networks for area monitoring and integrated vehicle health management applications, *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Collection of Technical Papers*, Vol.1, pp.1-11, Portland, OR, Aug. 9-11, 1999.
- 11) Ihler, E., Zaglauer, H. W., Herold-Schmidt, U., Dittrich, K. W. and Wisebeck, W.: Integrated wireless piezoelectric sensors, *Proceedings of SPIE, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, Vol.3991, pp.44-51, March, 2000.
- 12) Lemke, J.: A remote vibration monitoring system using wireless internet data transfer, *Proceedings of SPIE, Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities and Pipelines 5*, Vol.3995, pp.436-445, March, 2000.
- 13) Mitchell, K., Dang, N., Liu, P., Rao, V. S. and Pottinger, H. J.: Web-controlled wireless network sensors for structural health monitoring, *Proceedings of SPIE, Smart Structure and Materials 2001 Smart Electronics and MEMS*, Vol. 4334, pp.234-243, 2001.
- 14) Ravindran, V. and Varadan, V.V.: Implementation of local area wireless sensor networks using bluetooth, *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 2002 Smart Electronics, MEMS, and Nanotechnology*, Vol.4700, pp.258-265, 2002.
- 15) 宮下剛, 久保田慶太, 藤野陽三, 宮本則幸, 梅本秀二: 2台の無線LAN加速度計による橋梁の振動モード形同定, 土木学会第61回年次学術講演会, I-496, 2006.
- 16) Kim, C.W., Kawatani, M., Tsukamoto, M. and Fujita N.: Wireless sensor node development for bridge condition assessment, *Advances in Science and Technology, Trans Tech publications*, Vol.56, pp.573-578, 2008.
- 17) Nordic Semiconductor, <http://www.nordicsemi.com/>.
- 18) STMicroelectronics, <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/11115.pdf>.
- 19) 北川源四郎: 時系列解析入門, 岩波書店, pp.138-141, 2005.

(2010年3月9日受付)