

スマートセンサーを用いた人道用吊橋の振動測定実験

Vibration measurement on pedestrian suspension bridge by smart sensors

北見工業大学	正員	宮森保紀	(Yasunori Miyamori)
北見工業大学	学生員	○坂和平	(Kazuhei Ban)
北見工業大学	学生員	岡本覚人	(Okamoto Akito)
北見工業大学	正員	山崎智之	(Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学	正員	三上修一	(Shuichi Mikami)
北見工業大学	F会員	大島俊之	(Toshiyuki Oshima)

1. はじめに

近年、構造物の挙動をセンサーによって観測し、損傷位置や程度を同定することで健全性の監視を行う「構造ヘルスマニタリング(SHM)」に関心が高まっている。SHMは構造物の振動や応力などの応答を測定し、何らかの構造同定手法を用いて構造系の剛性低下などの損傷を明らかにする手法である。構造物の応答を適切に把握するためには、センサーによる計測を十分な密度で行なう必要がある。しかしながら、従来の有線型のセンサーシステムは費用や測定時の手間がかかることから多点での測定を長期間行うことは困難であり、より安価で効率的なセンサーシステムが必要である。

このような要求に対して、データ処理機能と無線通信機能を有するスマートセンサーが構造モニタリングにおいて効率的な測定を可能にすると考えられ、研究が進んでいる¹⁾。スマートセンサーは半導体基板上にMEMS(微小電気機械システム)技術を用いた小型の加速度計とこれに接続する信号増幅器、A/D変換器を集積したもので、メモリやプロセッサ、無線通信チップなどを組み合わせることで、端末自体にデータ処理機能と無線通信機能を持たせることができる。

一方、スマートセンサーはMEMS(微小電気機械システム)技術を用いた精密な電子機器であり、一般的には使用できる環境条件に制約がある。SHMの対象となる土木構造物は、屋外の厳しい環境条件にさらされながら供用されている。このため、土木構造物のモニタリングにスマートセンサーを利用するためには、そのような厳しい環境下でも利用可能かを検討しておく必要がある。

このようなスマートセンサーを用いた実橋梁振動測定実験はいまだ例が少なく、電波送受信環境、センサーの供給電力不足などの課題がある。このため、スマートセンサーを用いて人道用吊橋における振動測定実験をおこない、スマートセンサーによる実橋梁の振動測定の問題点を調査するとともに、測定した振動データから実橋梁の振動特性同定を行った。本報告では、その結果を報告する。

2. スマートセンサー

本研究において使用するセンサーは図-1に示すMEMSIC社のImote2システムである。データを収集するセンサーボード、データを計算処理するプロセッサボードそしてバッテリーボードが独立しており、これらを接続して使用する。センサーボードはイリノイ大学において開発されたSHM-AおよびSHM-H

センサーボードを使用している^{2),3),4)}。

SHM-AにはMEMS式3軸加速度計(ST Microelectronics社 LIS344ALH)や、光、温度、湿度計が搭載されている²⁾。AD変換器(Quickfilter Technologies社 QF4A512)の最下位ビット(LSB)に対応する加速度は約0.14galである。また、AD変換器では表-1のようにサンプリング周波数とカットオフ周波数をユーザーが選択出来る。SHM-Hは、z軸方向に高感度の加速度計(Silicon Designs社 SD1221)を搭載したセンサーボードで、z軸方向の加速度計測定範囲を0.8~1.2Gと-0.2~0.2Gで切り替えできる。z軸方向のLSBに対する加速度は0.0145galで、SHM-Aと同じ加速度計を用いているx,y軸の約10倍の感度である³⁾。SHM-Hの設定可能なサンプリング周波数も表-1に示す。

プロセッサボードは、データの計算処理や無線通信を行うもので、CPUはMarvell PXA271を採用している。また、無線通信チップ(Texas Instruments社 CC2420 IEEE802.15.4)を使用し、2.4GHz帯で16チャンネル、250 kbpsのデータレートに対応している⁴⁾。通常は内臓アンテナ(Antenna社 A5645)を備えているが、本研究では一部、外部アンテナ(Antenna社 B4844)に換装して使用している。通信距離は予備実験では数100m程度まで通信可能だったが、遮蔽物や金属部材など周囲の環境で大きく異なる。

バッテリーボードは1.5V単4型電池3本を搭載する。Imote2への電源供給はバッテリーボードとUSBポートから可能である。バッテリーボードによる駆動電圧はデータシート上3.2-4.5Vであるが⁴⁾、これまでの実験では3.4Vを下回ると計測値に異常が発生する場合がある⁵⁾。

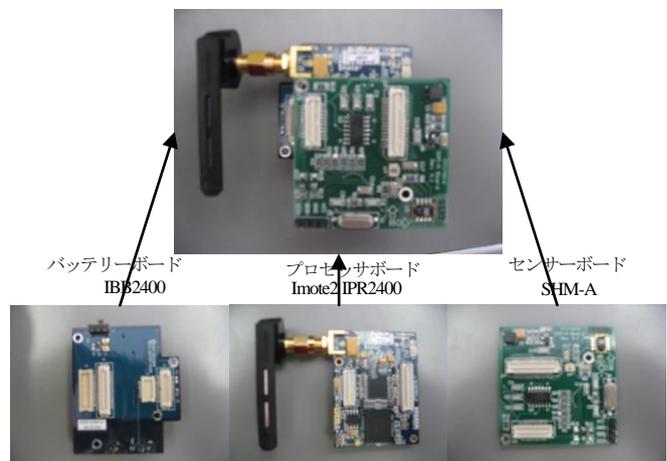


図-1 スマートセンサー Imote2

表-1 SHM-A/SHM-Hのサンプリング周波数

SHM-A		SHM-H	
サンプリング周波数 (Hz)	デジタルカットオフ 周波数(Hz)	サンプリング周波数 (Hz)	デジタルカットオフ 周波数(Hz)
25	10	10	4
50	20	50	20
100	40	100	40
280	70	280	70

Imote2 では OS やアプリケーションプログラムをインストールして使用するが、本研究では OS には TinyOS 1.x を、スマートセンサーを制御するミドルウェアおよびアプリケーションプログラム群としては、ISHMP (Illinois Structural Health Monitoring Project) ⁶⁾により提供されている ISHMP Toolsuite 3.0 を用いる。ISHMP Toolsuite では振動測定プログラム以外に電波状況やバッテリー電圧などを監視するプログラムが含まれる。

測定には複数の Imote2 を用いるが、測定を行う無線端末をリーフノードと呼び、データ受信・収録側としてパソコンと Imote2 を USB ケーブルでつないだものをゲートウェイノードとする。

3. 人道用吊橋における振動測定

2章で説明したスマートセンサーの加速度測定システムを用いて、実橋梁の振動測定を行い、橋梁の振動特性を把握するとともにスマートセンサーを実橋梁の振動測定に用いる上での問題点を調査する。

3.1. 測定対象橋梁と測定方法

測定対象は 1959 年に北見市内に架設された無補剛の人道用吊橋で振動しやすい特性を有する。全長は 102.6m、中央支間長は 68m、幅員は 2.5m である。実験は 11 月に行った。

実験に使用したノードのセンサーボードとプロセッサボードの組み合わせは、センサーボードが SHM-A を 13 ノード、SHM-H を 3 ノード使用した。Imote2 プロセッサボードは外付けアンテナ型を 12 ノード使用し、4 ノードは内蔵アンテナ型を使用した。外付けアンテナを使用したリーフノードは写真-1 のように樹脂製の小型ケースに収納して両面テープと針金でケーブルに固定した。一方、内蔵アンテナを使用したリーフノードはケースが電波の遮蔽物となるために、写真-2 のように両面テープで治具に直接固定している。

センサーからの電波を受信するゲートウェイノードは電波の送受信を考慮して橋の中央径間中央部に設置した。図-2 に橋梁一般図とセンサーの設置位置を示す。センサー設置位置は、橋梁両側の主ケーブル上に設置している。

実験では減衰自由振動を測定した。具体的には、図-2 で示した加振位置で加振者が 30 秒の測定時間で 10 秒毎に跳躍を計 3 回行ったときの振動を測定した。測定時のデータ点数は 8400 点、サンプリング周波数は 280Hz として x,y,z 軸の 3 軸の加速度を測定した。測定はそれぞれの加振位置で 1 回ずつ行った。測定前には、毎回 RemoteCommand プログラムの Vbat コマンドを使用し、バッテリー電圧を測定した。



写真-1 外付けアンテナ用センサー設置方法

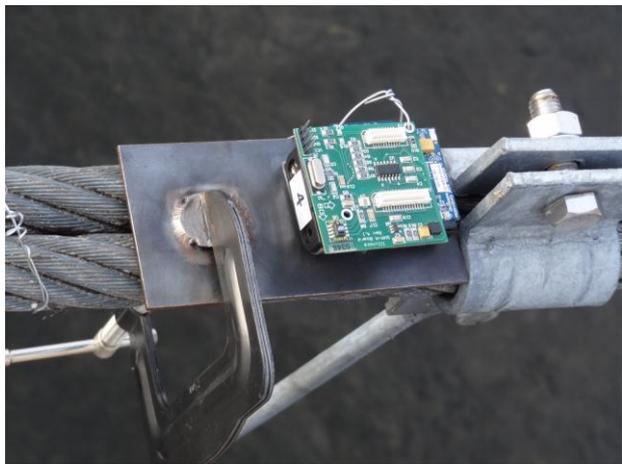


写真-2 内蔵アンテナ用センサー設置方法

3.2. 加速度データの解析と振動特性

測定した減衰自由振動の加速度データを z 軸のみを対象としスペクトル解析を用いて固有振動数、減衰乗数、モード形状を算出した。解析結果から対象橋梁の振動特性について考察する。

3.2.1. データ処理手法

測定した 30 秒の加速度データは 10 秒毎に切り分けて 3 回分の減衰自由振動の測定データとした。センサーボードの z 軸方向を全体系の鉛直方向とみなしてパワースペクトルのピーク値を抽出した。各加振位置において複数の測定データを得たため、ピークを得た振動数の平均を橋の固有振動数とした。減衰定数は測定した減衰自由振動波形に対してピーク振動数周辺の帯域を通過させるような楕円 IIR 型バンドパスフ

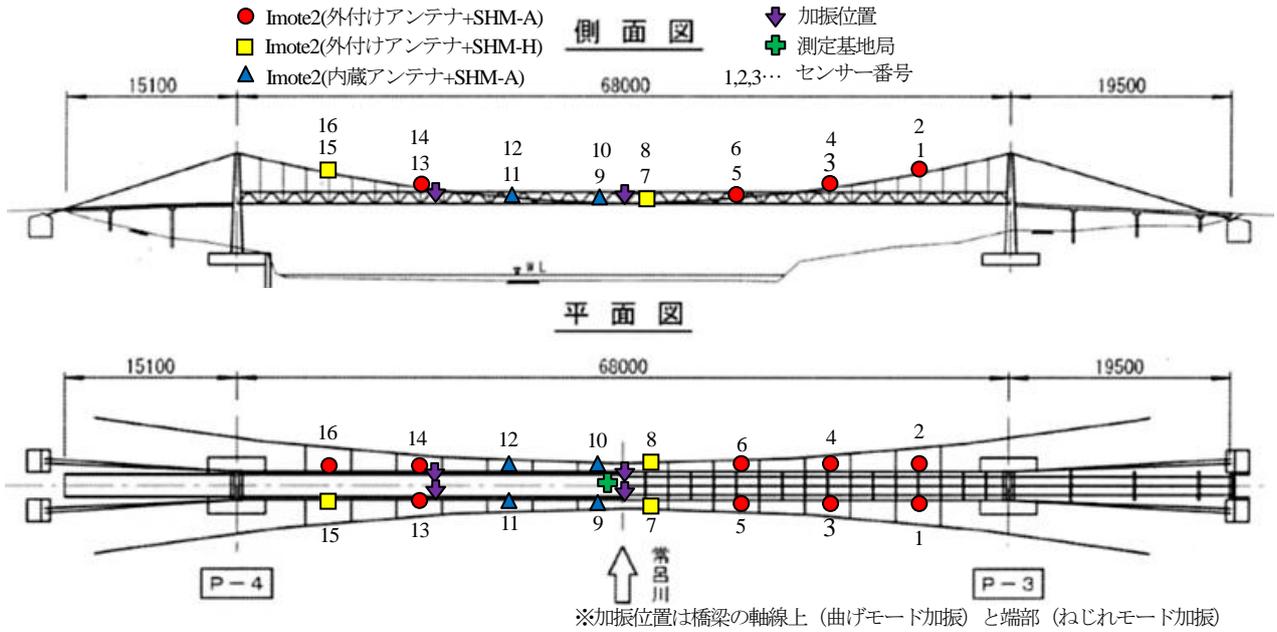


図-2 スマートセンサー設置位置

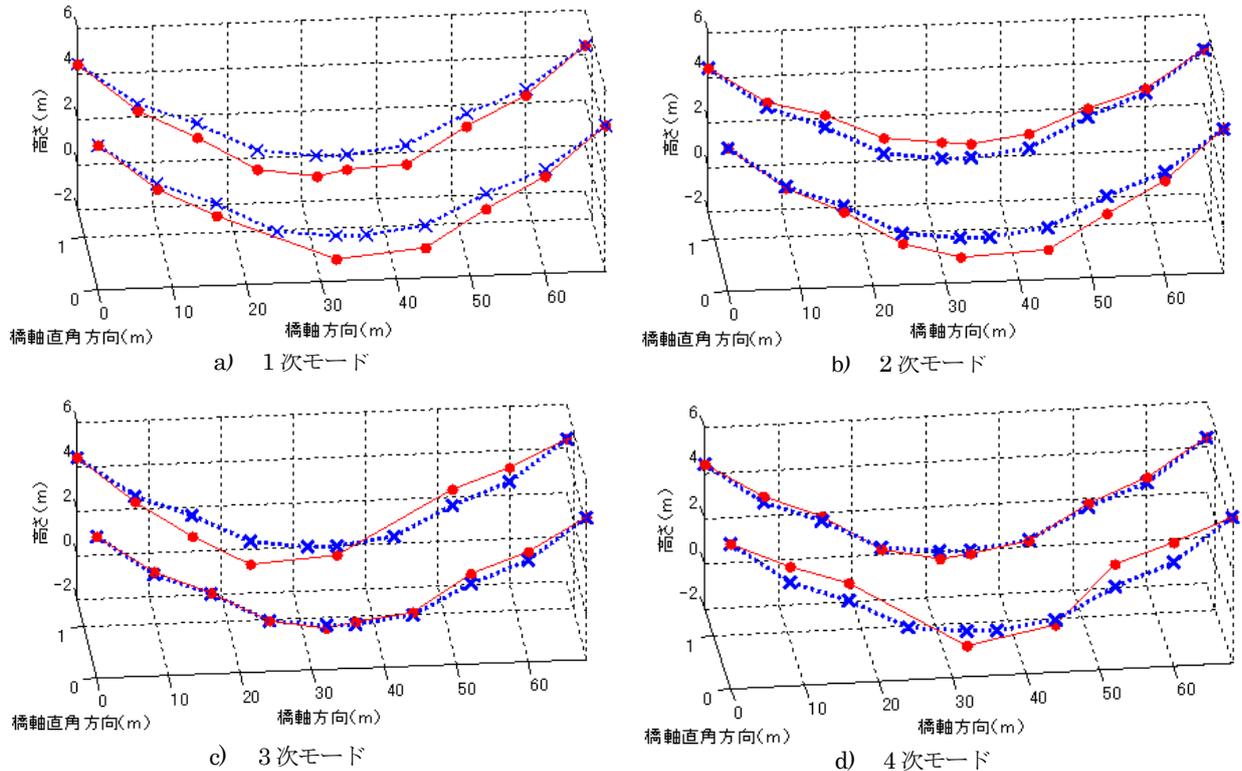


図-3 モード形状

フィルタリング処理を施し、抽出した波形から対数減衰率を算出し減衰定数を求めた。表-2 は以上のデータ処理によって得られた各振動モードの固有振動数と減衰定数である。図-3 に示すモード形状は、代表的な測定結果に対して、フィルタリング後の振動波形で振幅が極大に達する時刻の測点ごとの加速度応答値を最大値で無次元化した。ケーブルのサグを表現するために、最大値 1 を 1m として橋梁の一般図の高さに足し合わせた。実線がモード形状であり、点線が基準となるケーブルの形状である。図において橋軸方向の

0 点は P-4 橋脚、橋軸直角方向の 0 点は、上流側主ケーブル、高さ方向の 0 点は床版上面とした。実験では電波環境の問題によって測定できないノードが 1~2 ノード存在したためモード形状ではプロットされてない点がある。

表-2 固有振動数と減衰定数

モード	1次	2次	3次	4次
固有振動数	1.30Hz	1.81Hz	2.50Hz	3.66Hz
減衰定数	0.029	0.017	0.040	0.046

3.3.2. 固有振動特性と考察

表-2 の 1 次モードは、すべての加振位置でパワースペクトルのピーク値が最も大きく、このことから、対象橋梁で最も検出されやすいモードであるといえる。図-7a)のモード形状から対称曲げモードであると考えられる。2 次モードは床版の端部で加振した場合のパワースペクトルでピークが大きく確認されている。このことから、ねじれのモード形状であることが推測され、b)のモード形状は主ケーブルの上流側、下流側で 180°の位相差が確認されることから、対称ねじれの形状であると考えられる。3 次モードはノード番号 13,14 付近で加振した場合のパワースペクトルでのみピークが確認された。このことから、モード形状の節が中央部に存在する逆対称のモード形状であると推測される。また、パワースペクトルのピークは上流側のケーブルではほとんど確認できず、下流側のケーブルが逆対称に大きく揺れる挙動となっていることがわかる。このことから、3 次モードは下流側ケーブルのみが振動する逆対象曲げモードであると言える。4 次モードは橋梁中央部で加振した場合のパワースペクトルでピークが大きく、中央部が腹となる対称なモード形状であると推測される。また、パワースペクトルのピークは下流側のケーブルではほとんど確認できず、上流側のケーブルが対称に大きく揺れる挙動となっていることがわかる。このことから、4 次モードは上流側ケーブルが振動する対称曲げモードであると言える。3 次モード、4 次モードでは、上流側、下流側のケーブルが片側しか振動しないモード形状が確認された。これは両側のケーブルがそれぞれ違う張力を有しており構造特性が違うためと考えられる。

測定結果から得られたモード形状は、一般的な単一ケーブルの動的挙動に近く、本研究における計測は測定対象橋梁の固有振動特性を適切に同定できたものと考えられる。なお、モード図では振幅やモードの節となる位置のばらつきが見受けられるが、対象橋梁が相当の供用年数を経ており、吊材の軸力にばらつきがあることなどが原因と考えられる。

3.4. 実橋梁測定でのスマートセンサーの問題点

スマートセンサーを使用する上で稼働電圧の維持と良好な電波環境の確保が大きな問題となってくる。スマートセンサーを用いた振動測定では、データ送信時の消費電力が大きく、また、2 章で示すように Imote2 稼働電圧の範囲は限られているため、測定時間の長大化にともない給電システムの規模を大きくする必要がある。また、電波状況が悪い場合には、データの一部が欠落したり、特定のノードのデータが収集できないことがある。データの送受信方法はミドルウェアに依存するので用途に応じた方法の検討が必要である。このように、安定した測定データを得るためには各ノードのバッテリー電圧や電波状況の確認が不可欠であるが、ミドルウェアの仕様によってはこれらの確認に時間を要したり、確認のためにバッテリーを余分に消費したりすることがあるので注意が必要である。また、電波状況によってはアンテナ角度の調整が必要となり、本研究の測定でも一般的な有線加速度計の設置より時間を要するノードがあった。

4. まとめと今後の課題

本研究はスマートセンサーの実橋梁振動測定への適用を目的としている。実橋梁でスマートセンサーの多点計測を行った結果からは、人道吊橋における低次の主要な固有振動数と振動モードを同定することができた。

今後の課題として、上述したようなセンサーノードへの供給電圧や無線通信状況の確認を容易にすることが挙げられる。また、今回の実験では構造物全体の振動応答を得るために、電波送受信が比較的容易な橋梁上にゲートウェイノードを設置したが、構造物の質量が変化するため振動特性を正確に把握するためには望ましくない。このため、橋梁上以外で実験をできるように直接見通しを確保できないノードに対しては、隣接するリーフノードを介してゲートウェイノードにデータを送信するマルチホップ計測を利用して、より確実に電波送受信を出来る環境を構成する必要がある。

以上より SHM を目的としたスマートセンサーの適用と普及については、解決すべき課題がいくつかあるものの、構造物の振動測定そのものは十分に可能であることから、今後の技術開発によりスマートセンサーの土木構造物の振動測定への適用が進むことが期待される。

【参考文献】

- 1) Tomonori Nagayama and Billie F. Spencer, Jr.: Structural Health Monitoring using Smart Sensors, NSEL Report #1, <https://www.ideals.illinois.edu/>, 2007.
- 2) ISHMP: SHM-A Sensor Board Advanced User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu>, 2010.
- 3) ISHMP, SHM-H Board High-Sensitivity Accelerometer Sensor Board Datasheet and User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu/>, 2009.
- 4) Crossbow: Imote2 High-performance wireless sensor network node, <http://www.xbow.com>, 2007.
- 5) 宮森保紀、坂和平、藤本正樹、山崎智之、三上修一、大島俊之：振動計測のための耐低温環境用スマートセンサーシステムの開発、土木学会北海道支部平成 22 年度論文報告集、第 67 号、A-04、2011.
- 6) ISHMP : Structural Health Monitoring at the University of Illinois, <http://shm.cs.uiuc.edu/>

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（若手研究（B））、課題番号：21710166）ならびに、科学技術振興機構の戦略的国際科学技術協力事業の支援を受けて行われました。吊橋での測定実験に関しては、北見市役所と地震防災工学研究室（北見工業大学）、（株）豊水設計の皆様の協力を得ました。また、イリノイ大学アーバナ・シャンペイン校の B. F. Spencer, Jr. 教授、東京大学の長山智則講師には Imote2 の運用について貴重なアドバイスと支援をいただきました。ここに記して感謝いたします。