

人道吊橋の振動計測におけるスマートセンサーの適用と 耐低温測定システムの開発

A vibration measurement of a pedestrian suspension bridge and
development of anti-low temperature measurement system for smart sensor

宮森 保紀*, 坂 和平**, 大島 俊之***, 三上 修一***, 山崎 智之****

Yasunori Miyamori, Kazuhei Ban, Toshiyuki Oshima, Shuichi Mikami, Tomoyuki Yamazaki

*博士(工), 北見工業大学准教授, 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

** 北見工業大学博士前期課程, 工学研究科土木開発工学専攻 (〒090-8507 北見市公園町 165)

***工博, 北見工業大学教授, 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

****博士(工), 北見工業大学助教, 工学部社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165)

Smart sensor systems are expected to be a suitable sensing solution for structural health monitoring of infrastructures because such sensors can transfer data via wireless network. In this study, an Imote2 smart sensor system is applied for bridge vibration measurement test. Weather proof housing with solar energy harvesting system is also developed for outdoor measurement. A cold room test of the housing has been done before real bridge measurement. The test bridge is an old pedestrian suspension bridge. Measurement results revealed that the developed solar energy system supplies enough power to a smart sensor. Natural vibration modes of the bridge are detected from free vibration data properly.

Key Words: Smart Sensors, Solar Energy Harvesting, Vibration Monitoring

キーワード: スマートセンサー, 太陽光発電システム, 振動計測

1. はじめに

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を損傷として検出する手法である. 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ことが必要になる. 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^{1~4)}. 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. スマートセンサーに利用可能な半導体加速度計やその他の要素部品はこれまでに多数開発され, 価格的に入手しやすいものもあるが, これらを適切に選定して半導体基板上に効率的に配置するには高度な知識と技術を要する⁵⁾. また, これらを制御するためのミドルウェアも必要であり, 特に無線通信に特有なセンサー間の時刻同期やデータ転送の効率化は極めて重要な要素技術である⁶⁾. このようにスマートセンサーを用いたモニタリングでは, これまでの土木構造物における一般的な振動計測の技術^{7,8)}に加えて特有の技術が必要となるが, スマートセンサーを実橋梁で適用した例⁹⁾はまだ多くはなく, 普及にはより広範な経験の蓄積が必要である. 一方, スマートセンサーは精密な電子機器であり, 一

一般的には使用できる温度範囲に制約がある。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には、そのような厳しい環境下でも利用可能かを検討する必要がある。また、センサーへの電力供給についても、無線計測の利点を生かすには、自己給電型のシステムが望ましい。

本研究は、土木分野におけるスマートセンサー利用の技術開発の一環として、蓄電池と太陽光発電を併用しながら低温環境下においてスマートセンサーを使用できる「耐低温測定システム」を製作しその有効性について実験、考察を行ったものである¹⁰⁾。さらに、スマートセンサーおよび開発した耐低温測定システムを実橋梁の振動計測に適用し、実用性の検討や適用上の課題点の抽出を行ったので、その結果を報告するものである¹¹⁾。

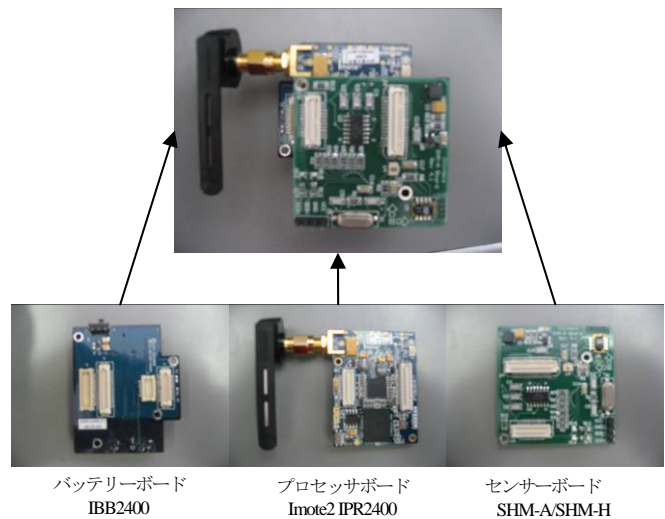


図-1 スマートセンサー Imote2

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-A¹²⁾および SHM-H¹³⁾センサーボードを使用している。

SHM-A には図-2 のブロック図に示すように 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¹²⁾。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。SHM-H のブロック図と設定可能なサンプリング周波数を図-3 と表-1 に示す¹³⁾。

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

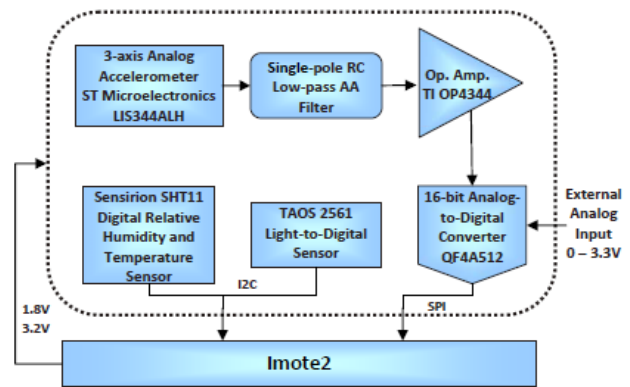


図-2 SHM-A ブロック図¹²⁾

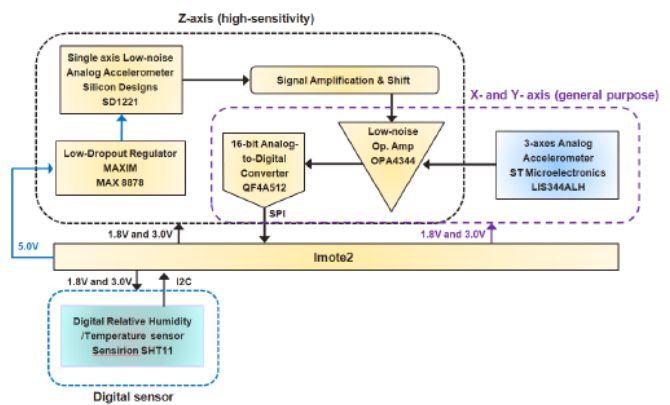


図-3 SHM-H ブロック図¹³⁾

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

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¹⁴⁾。通常は内臓アンテナ(Antenova社 A5645)を備えているが、本研究では外部アンテナ(Antenova社 B4844)に換装して使用している。通信距離は数100m程度まで通信可能とされているが、遮蔽物や金属部材など周囲の環境で大きく異なる。

図2および図3で示している各センサーボードに搭載されている部品は、部品ごとのデータシートによればいずれも-40℃以上で動作することとなっている。また、Imote2に搭載されているPXA271プロセッサは-25℃以上で動作する。しかしながら、それらが集積されたセンサーボードおよびプロセッサボードとしての使用可能温度は明示されていない¹⁵⁾。

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¹⁴⁾、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¹⁰⁾。なお、本センサーシステムの消費電力は、動作条件によって異なる。参考文献5)では、SHM-Aを用いて3軸の振動計測を行った場合で約700mWである。

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)¹⁶⁾により提供されているISHMP Toolsuite 2.0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。本研究ではゲートウェイノードとリーフノードが1対1で通信を行い、コマンドやデータの送受信を行うシングルホップ計測を用いる。

3. スマートセンサー用耐低温測定システム

スマートセンサーは図2、図3のように複数の電子部品を組み合わせた精密な電子機器である。各部品の動作可能温度はデータシートなどで確認できるが、センサーボード、プロセッサボード、バッテリーボードを組み合わせたシステムとしての動作可能温度についても検討する必要がある。氷点下での橋梁の振動計測はRiceら⁹⁾が行っているが、より低温な環境で十分な検討を行うために著者らは-26℃の低温室で動作試験を行った¹⁰⁾。その結果、低温環境下でもデータ送受信は正常に行なえ、SHM-Aセンサーボードによる振動測定も十分な電圧が供給される限り可能である。しかしながら、低温の影響によりバッテリー電圧の低下が激しく、電圧が不安定に

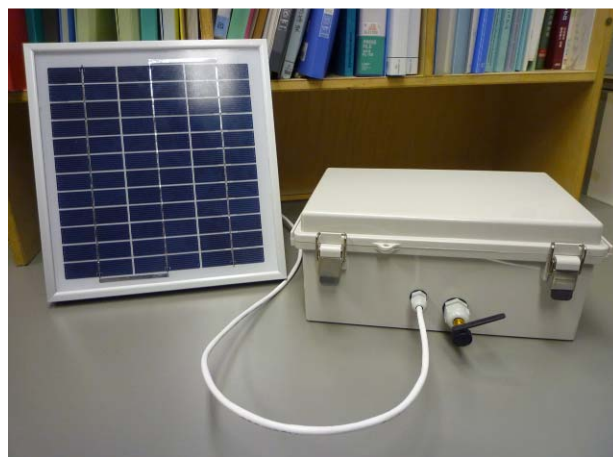


写真-1 スマートセンサー用耐低温測定システム(外装)

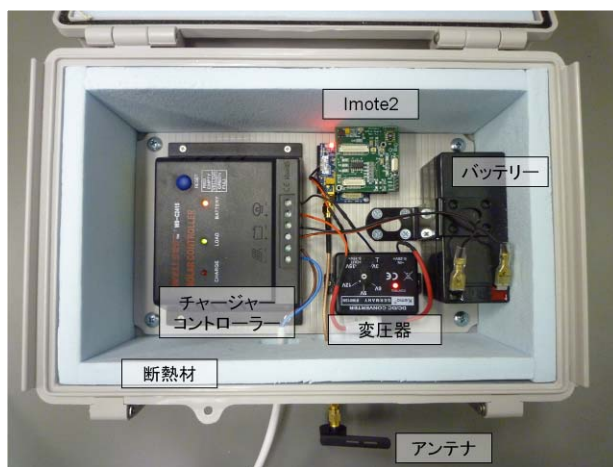


写真-2 スマートセンサー用耐低温測定システム(内部)

なることを確認した。

そこで低温環境においてスマートセンサーを使用するための補助システムを製作した。本システムは全天候での使用を実現するため、防水、断熱対策を施す必要がある。また、SHMのために長期間の使用も考慮して自立型で安定した電力の供給も求められる。これらの条件を満たすために太陽光発電システムの考案と、各機器とImote2センサーを収納するケースを製作した。写真-1、写真-2に製作したスマートセンサー用耐低温測定システムを示す。

3.1 耐低温防水ケース

センサーを収納するために使用したケース(タカチ電気工業社BCAP)はABS樹脂製でケースの寸法は300×200×131.5mmである。防水対策として蓋にポリウレタン製のガスケットを取り付けている。さらに、低温環境下での断熱性能を確保するため、ケース内の上下、側面に押出発泡ポリスチレン板(3種B, ダウ化工社スタイロエースII)を貼り付けている。また、Imote2にはケース外に出されたアンテナとケーブルで接続されており、発電システムはケース外のソーラーパネルとケーブルで接続されている。アンテナとソーラーパネルからの

ケーブルを通すために、ケース側面には穴を開けケーブルグランドを取り付けてある。

ケースの水密性は、蓋を閉じた状態で大量の水をかける簡易な実験を行い、問題が無いことを確認した。

3.2 太陽光発電システム

本システムでは外部電源や乾電池を使わずソーラーパネルで発電された電力を Imote2 に供給するが、余剰電力をバッテリーに蓄電し、また、太陽光が得られない場合は、バッテリーの電力を Imote2 センサーに供給する。チャージャーコントローラーは、このような電源の切り換えを制御する。Imote2 ではバッテリーボードの回路を改造し、制御ソフトウェアを用いることで外部のチャージャーコントローラーを用いずに電源切り替えを行うことができるが¹⁷⁾、本研究では開発段階における異常時の原因究明を確実にを行うために外部にチャージャーコントローラーを設けた。

Imote2 とチャージャーコントローラーの間には DC-DC コンバータが挿入されている。これは、発電システム全体が 12V で動作するのに対して、Imote2 の定格電圧が 4.5V であるために、Imote2 への入力電圧を調整す

るためのものである。また、この DC-DC コンバータによって、バッテリー駆動時も Imote2 に安定した電力を供給することができる。

具体的な各装置の仕様は以下のものである。太陽光パネル (YMT Energy 社) は多結晶シリコンを使用した寸法 312×288×26mm の製品で定格出力 8W、開放電圧は 17.28V である。チャージャーコントローラーは Wellsee 社の WS-C2415 で定格電圧は 12V、24V の自動切替機能を有する。DC-DC コンバータは Kemo Electronic 社の M015N である。バッテリー (Kung Long Batteries 社 WP1.5-12) は、密閉型鉛蓄電池で定格電圧は 12V、蓄電容量は 1.5Ah、寸法は 97×43×52mm である。

4. スマートセンサー用耐低温測定システムの有効性の検討

本システムを低温環境下で使用した場合の有効性を確認するために低温室内で測定実験を行った。

4.1 実験概要

実験は北見工業大学地域共同研究センターの低温室

表-2 測定回数

実験回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
15°C(断熱材あり)	79	81	81	83	81	81
15°C(断熱材なし)	68	79	78	62	66	71
-20°C(断熱材あり)	58	53	49	24	34	44
-20°C(断熱材なし)	47	38	41	29	29	37

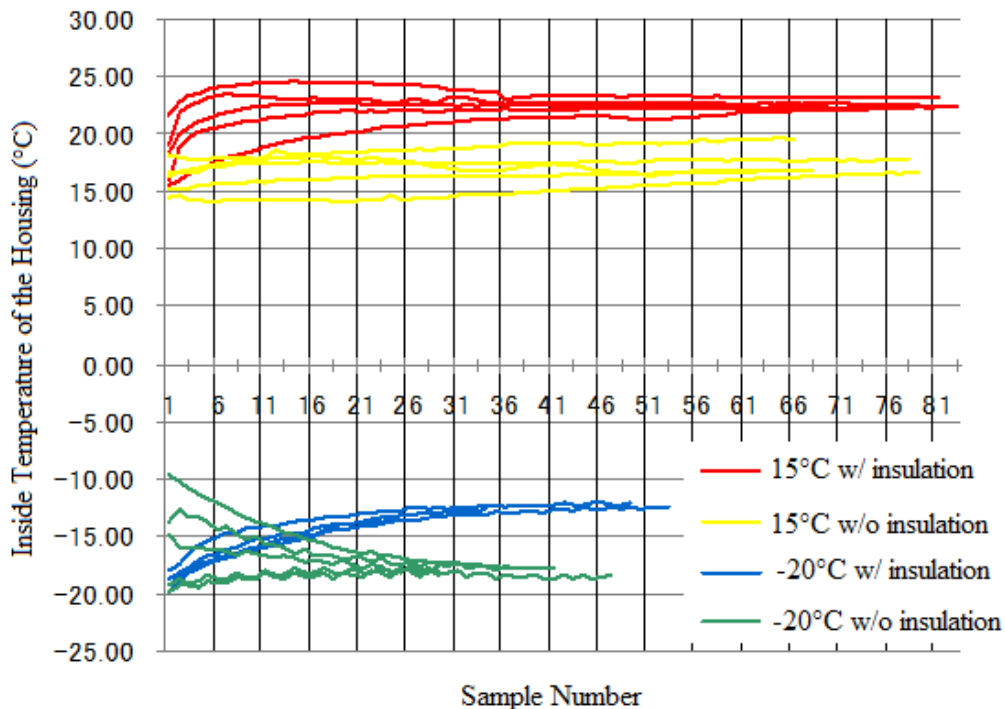


図-4 ケース内の温度変化

表-3 電圧変化 (単位: V)

	15°C(断熱材あり)		15°C(断熱材なし)		-20°C低温(断熱材あり)		-20°C(断熱材なし)	
	開始時	終了時	開始時	終了時	開始時	終了時	開始時	終了時
1回目	13.09	11.32	12.98	11.37	12.65	11.63	12.86	11.96
2回目	12.91	11.25	12.98	11.31	12.24	11.92	12.84	11.80
3回目	13.04	11.28	12.95	11.31	12.73	11.80	12.79	11.72
4回目	12.91	11.29	12.95	11.33	12.32	11.88	12.56	11.84
5回目	12.80	11.30	12.52	11.31	12.59	11.82	12.62	11.83

で行う。低温室内にリーフノードとなる Imote2 および SHM-A センサーボードを組み込んだケースを設置し、ゲートウェイノードは壁面にテープで固定する。測定用のパソコンは隣接する計測室内に設置し、USB ケーブルでゲートウェイノードと接続する。床面温度など、室温以外による影響を避けるためと、アンテナの高さを調節して電波状況を最適にするため、高さ約 10cm の発泡スチロール製ブロックの上にケースを設置した。

実験時の室温は 15°C、-20°C に設定し、各設定温度において、ケースに 3.1 で示した断熱材を取り付けた状態と、取り付けていない状態の計 4 通りの実験を行う。文献 10) の実験では低温室の最低設定温度に近い -26°C で行ったが、本研究では実橋梁での測定に適用するため、当地の最近 20 年間の最低気温である -20°C 程度を考慮した。常温は 15°C としたが、日本工業規格 (JIS Z 8703) で定める常温の範囲内(15 級)である。Imote2 使用時のケース内の温度変化を調べるため、一定時間の加速度測定を行い、ケース内の温度を測定する。ケース内の温度測定には熱電対を使用し、温度の測定は実験開始時から 10 秒毎に継続して行う。加速度測定はサンプリング周波数 280Hz、データ点数 28000 点とした。1 回の測定時間はデータ送信も含め 4 分程度である。測定開始時に SHM-A センサーに搭載された温度計で基盤上の温度も測定する。加速度測定はバッテリーからの電力供給がなくなるまで繰り返し行う。なお、室内実験のためソーラーパネルは使えないので、事前にバッテリーの充電を行い、実験は満充電状態で始める。実験後にバッテリーを再充電して上記の測定を 5 回ずつ行う。実験の開始時と終了時にバッテリーの電圧を、テスターを用い測定した。

本実験では、アプリケーションプログラムとして、ISHMP Toolsuite の RemoteSensing と、RemoteCommand プログラムの ReadTemp コマンドを用いた。

4.2 耐低温測定システムの有効性

バッテリーから電力を供給不能になるまでの加速度測定回数は表-2 に示すような結果となった。文献 10) における実験結果と同じく、常温に比べて低温下ではバッテリーが早く消費し、測定回数が少なくなる。

図-4 に実験時におけるケース内温度推移を示す。断熱

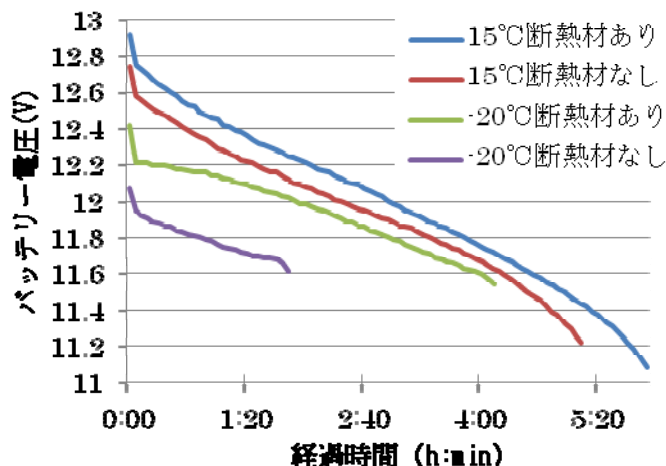


図-5 電圧低下状況

材を取り付けた方が断熱材を取り付けない場合に比べて、測定回数が増える傾向にある。各条件の温度変化の推移は断熱材ありの場合は 15°C、-20°C どちらも実験開始時から温度の上昇が観察される。これはバッテリーや Imote2 センサーの使用による発熱が断熱材によってケース外に放散されず、ケース内を暖めているためと考えられる。それに対し、断熱材なしの場合は 15°C での実験はケース内温度がほぼ同じであり、-20°C での実験はケース内温度が下がってゆく結果となった。これは、断熱材がないため、ケース内の温度が室温と同じになってゆくためと考えられる。

表-2 と図-4 からケース内の温度が高いほど測定回数が増えていることがわかる。気温 20°C 程度までは、バッテリーは周辺の気温が高いほうが高い性能を発揮することから、断熱材によってケース内温度を上げることができる本研究において作成したシステムは低温環境下において有効なシステムであるといえる。また、ReadTemp コマンドで計測したセンサーボード上の温度はケース内部の温度より約 5°C 高く、すべての実験ケースで共通していた。

実験の開始時と終了時にテスターを用いバッテリーの電圧を測定した。測定結果を表-3 に示す。実験開始時の電圧は 15°C に比べ、-20°C では低くなっている。これは、-20°C では常温の室内でバッテリーを充電した後、実験開始前にシステムが冷却されるため、バッテリーの性能が低下してしまったものと考えられる。いずれの実験でもチャージャーコントローラーの定格電圧 12V を

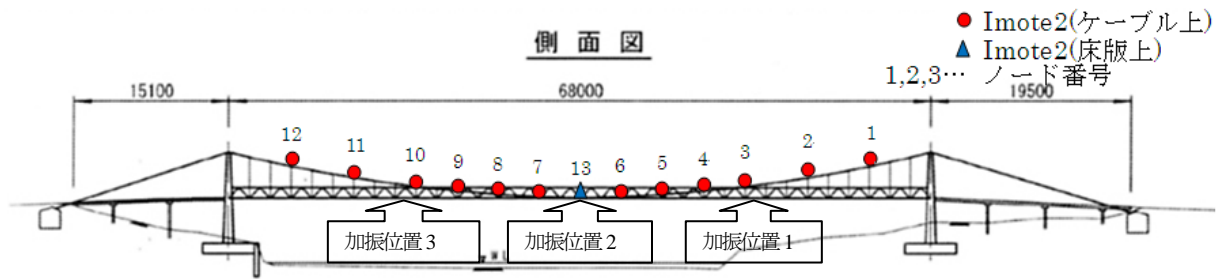


図-6 スマートセンサー設置位置と加振位置

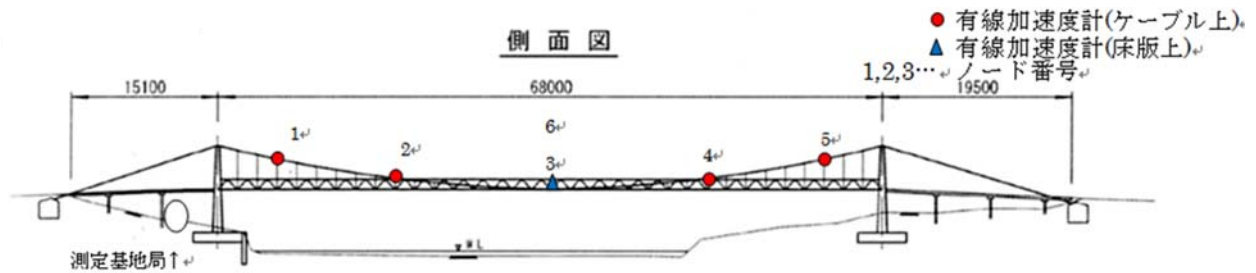


図-7 有線加速度計設置位置



写真-3 センサー設置状況

下回ってもある程度測定を継続しているが、 -20°C に比べ 15°C での実験終了時の電圧が低くなっている。これは、常温ではバッテリー内の化学反応が低温時より活発に行われたため、電圧が低下したものと考えられる。このような実験中の電圧変動をより詳しく調べるため、各ケースについて1回ずつ追加実験を行い、電圧の変化を調べた。追加実験では、バッテリーにテスターを接続し1回の加速度測定を行うごとに電圧を記録した。結果を図-5に示す。表-2および図-4では測定回数を記録したが、追加実験では経過時間も記録し図-5の横軸とする。いずれのケースでも測定開始直後に大きな電圧低下が発生するが、その後は単調に減少し、終了直前にやや大きな電圧低下が発生している。特に -20°C の場合で断熱



写真-4 耐低温測定システム設置状況

材の有無を比較すると、断熱材無しの場合には電圧の減少率が大きい、これは断熱材がある場合では図-4のようにケース内部の温度が上昇して、電圧の低下が抑えられることによるものと考えられる。なお、追加実験における測定回数や温度変化は表-2および図-4と同様の傾向であった。

本研究で製作したシステムは、Imote2に定格電圧4.5Vを供給するためDC-DCコンバータを用いている。システム全体の定格電圧が12VであるためImote2には常に安定した電圧が供給され信頼性の高い測定ができると考えられる。また、内部を断熱材で覆うことで、低温下ではバッテリーの電圧低下を抑え、測定可能時間を延長する効果が得られた。

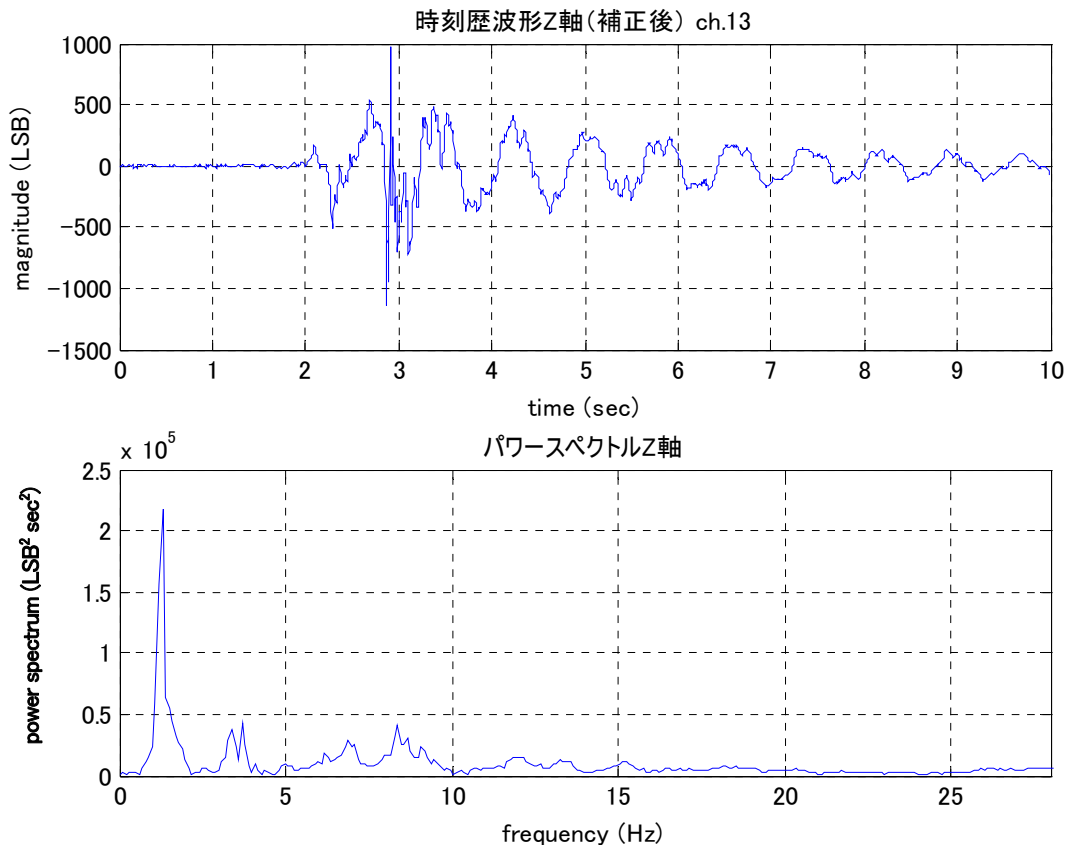


図-8 測定加速度波形

5. 実橋梁における振動測定

5.1 測定対象橋梁と実験概要

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。主径間は吊橋、側径間は形鋼を門型に組み立てた橋脚で支持された連続桁形式となっており、全体で7径間から構成されている。全長は102.6m、中央支間長は68m、幅員は2.5mである。実験は冬季の2月と夏季の7月に行った。

センサーからの電波を受信するゲートウェイノードを橋の左岸側下流約100mに設置した。図-6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、電波の受信を考慮して下流側の中央径間主ケーブルのみとした。この主ケーブル上にImote2プロセッサボードおよびSHM-Aセンサーボードを3ノード、SHM-Hを9ノード設置した。これらのリーフノードは写真-3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。また、2月の実験では耐低温測定システムの実用性を検証するため、同システムを写真-4のように中央径間支間中央の床版上に設置した。当日の気温は-5～5℃の範囲だった。

7月の実験では、2月の実験と同様にスマートセンサーを設置したが、耐低温システムは使用せずに測定を行った。また、有線加速度計も上流側に設置した。図-7のように上流側主ケーブル上に加速度計（共和電業社

AS-2GB）を4基、主径間中央の床版上に2基設置した。床版上の加速度計3、6番はねじれモードを測定できるように上下流の両側にそれぞれ設置した。なお、実験中の気温は16～27℃の範囲だった。

実験では減衰自由振動を測定した。具体的には、図-6で示した加振位置で加振者が屈伸または跳躍を1回行ったときの振動を測定した。2月の実験では橋梁の軸線上（曲げモード加振）でのみ加振しているが、7月の実験では橋梁の軸線上（曲げモード加振）と端部（ねじれモード加振）で加振した。測定時のデータ点数は2800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（有線加速度計はz方向のみ）。測定はそれぞれの加振位置で3回ずつ行った。測定終了後には、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。

5.2 測定結果と考察

測定結果の一例として、主径間中央で加振した際の床版上の鉛直方向（センサーボードz軸方向）の時刻歴応答加速度とそのパワースペクトルを図-8に示す。

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回の測定を行ったため、ピークを得た振動数の平均を橋の固有振動数とした。センサーの設置方向については、正確にはセンサーボードのz方向はケ

表-4 固有振動数(Hz)

測定回	曲げ1次	曲げ2次	ねじれ1次	曲げ3次			曲げ4次	曲げ5次
2月無線(下流側)	1.27	1.73	-	3.44	-	-	6.74	8.11
7月無線(下流側)	1.32	1.80 (連成)		3.52	3.84	4.50	6.76	-
7月有線(上流側)	1.30	1.74	1.82	3.57	-	4.41	-	-

表-5 減衰定数

測定回	曲げ1次	曲げ2次	ねじれ1次	曲げ3次			曲げ4次	曲げ5次
2月無線(下流側)	0.025	0.046	-	0.032	-	-	0.014	0.011
7月無線(下流側)	0.033	-		0.039	0.010	0.016	0.021	-
7月有線(上流側)	0.028	0.058	0.013	0.032	-	0.029	-	-

表-6 実験終了時の電圧(2月)

ノード	1	2*	3	4*	5	6*	7*
電圧(V)	3.250	3.468	3.364	3.488	3.374	3.447	3.488
ノード	8	9	10	11	12*	13	
電圧(V)	3.343	3.312	3.343	3.209	3.716	4.223	

* 実験中に電池交換をしたノード

ケーブルの法線方向に直角となるほか、収納箱内部での基盤の傾きも考慮する必要があるが、本研究ではモード形状全体に及びず影響は限定的であると判断した。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型バンドパスフィルタによる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。本橋のようなケーブル構造では、振動モードの固有振動数が近接するため、低いフィルタ次数で急峻な遮断特性を有するIIRフィルタを用いた。

表-4, 5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-9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。図中の高さはケーブルのサグを表現しており、モード振幅は最大値を1mとして橋梁の一般図の高さに足し合わせた。2月の実験では下流側のみにセンサーを設置したためねじれのモード形状を検出することができず、モード形状は曲げのみを検出した。7月の実験では有線加速度計の3, 6番の位相差からねじれモードを同定した。

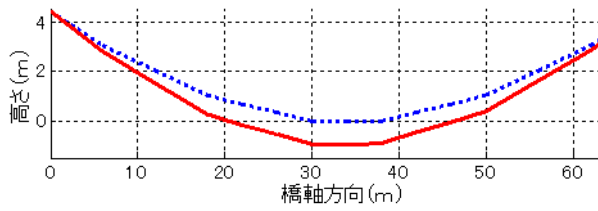
表-4, 5においては比較的狭い振動数範囲に複数のモードが存在している。7月の実験で得られた下流側のモードでは曲げ2次モードとねじれ1次モードが連成している。上流側では、連成モードが明確に検出できず、さらに曲げ3次モードにおいて、複数の卓越振動数が得られたが、これは上流側と下流側のケーブルで振動数が異なり、複雑な振動特性となっていることが考えられる。減衰定数については、曲げ2次モードで高い値となっている。実験では2次モードの振幅が比較的大きく振幅依

存性があるものと推測される。なお、連成モードとした下流側(7月)については減衰定数を求めなかった。

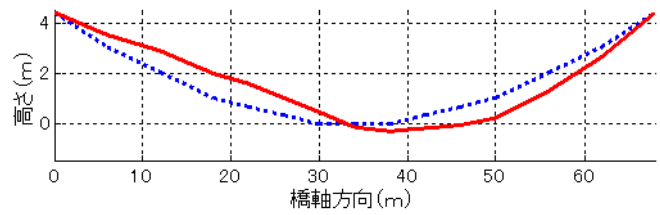
測定結果から得られたモード形状は、一般的な単一ケーブルの動的挙動に近く¹⁸⁾、本研究における計測は測定対象橋梁の固有振動特性をある程度適切に同定できたものと考えられる。なお、モード図では振幅やモードの節となる位置のばらつきが一部に見受けられるが、対象橋梁が相当の供用年数を経ており、吊材の軸力にばらつきがあることなどが原因と考えられる。

実験はいずれも晴天で行ったが、太陽光パネルと耐低温環境システムを用いた2月の実験中の太陽光パネルの発電電圧は17~21Vだった。このため耐低温測定システムのImote2は太陽光パネルから供給された電力で稼働したと考えられる。一方、通常の乾電池によるバッテリーボードを搭載したノードは5ノードが実験中に電池交換を行った。実験終了時のプロセッサボードの電圧は表-6に示すとおりである。ノード13以外は最低稼働電圧に近くっており、低温環境においてバッテリー電圧の低下が大きかったためと推測される。耐低温測定システムであるノード13はDC-DCコンバータで設定した出力電圧である4.3Vに近い電圧となっており、十分な電圧が確保されている。このことから、耐低温環境システムは低温環境の測定において有効であると考えられる。

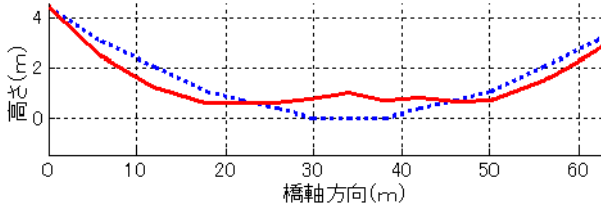
スマートセンサーを用いた振動測定では、各ノードのバッテリー電圧や電波状況の確認が不可欠であるが、ミドルウェアの仕様によってはこれらの確認に時間を要したり、確認のためにバッテリーを余分に消費したりすることがあるので注意が必要である。また、電波状況によってはアンテナ角度の調整が必要となり、本研究の測



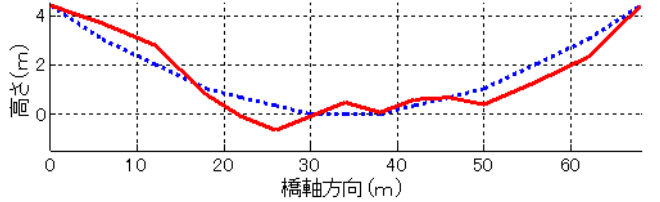
a) 曲げ1次



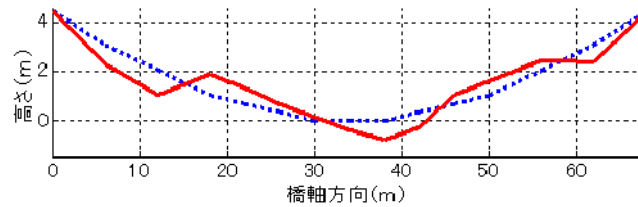
b) 曲げ2次



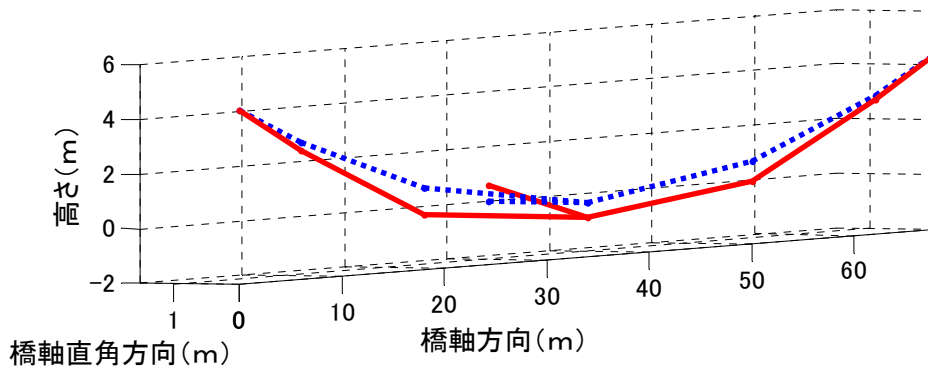
c) 曲げ3次



d) 曲げ4次



e) 曲げ5次



f) ねじれ1次

図-9 モード形状

定でも有線加速度計の設置より時間を要するノードがあった。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し、測定前に最適なデータ伝送経路を探索することも可能なため、用途や条件に応じた方法の検討が必要である。本研究では、データの部分的な欠落はないが、データ全体が受信できないノードがあった。なお、雨天時については、耐低温測定システムの蓄電池は十分な容量があるため雨天時でも十分な電圧を確保できると考えられるが、雨

天時に行った予備実験では、電波状況の変動が大きくなることがあったため、スマートセンサーによる長期測定では配慮が必要である。

6. おわりに

低温室および実橋梁における実験から、製作したスマートセンサー用耐低温測定システムは、SHMのための野外における構造物のモニタリングに利用可能であった。スマートセンサーでは、センサーノードが独立した

電源を有するが、十分な電圧が確保される必要がある。本研究で開発した発電システムは比較的大型で電力にも余裕があるので、小型化や複数のノードで1台の発電システムを共有する方法などを検討する余地がある。

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、今回の実験ではシングルホップ計測を行ったため、ゲートウェイノードを見通せる部分からしか振動データの取得ができなかった。構造物全体の振動応答を得るためには、センサーノードを橋梁全体に取り付ける必要がある。ゲートウェイノードと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。

本研究で対象とした橋梁に関しては、振動特性の季節(部材温度)や損傷による変動を評価するために、今後も継続的に振動実験を行う必要がある。

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。

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。本研究の実験データの取りまとめに際しては、藤本正樹氏(研究当時、北見工業大学土木開発工学科4年)、岡本覚人氏(同、社会環境工学科4年)、高祖伸幸氏(同、土木開発工学科4年)の協力を得ました。ここに記して感謝いたします。

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) 倉田成人: 建設分野におけるセンサネットワークの応用, 電気情報通信学会誌, Vol.89, No.5, pp.424-429, 2006.
- 3) 小国健二, 佐伯昌之, 井上純哉, 菅野高弘, 堀宗朗: 社会基盤センシングのための階層型センサネットワークの位置同定手法の開発, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.1,

pp.82-100, 2008.

- 4) 三木千壽, 山口浩, 判治剛, 田辺篤史: 無線センサネットワークによる鋼橋部材の疲労損傷原因の特定の試み, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.671-679, 2010.
- 5) Jennifer A. Rice and Billie F. Spencer, Jr.: Flexible smart sensor framework for autonomous full-scale structural health monitoring, NSEL Report #18, <https://www.ideals.illinois.edu/>, 2009.
- 6) 長山智則, B. F. Spencer, Jr., 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.
- 7) 橋梁振動研究会編: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂, 1993.
- 8) 加藤雅史: 振動計測における幾つかの失敗例, 第2回橋梁振動に関するコロキウム論文報告集, pp.151-154, 1989.
- 9) 漆島亮彦, 長山智則, 藤野陽三, 宮下剛, 吉岡勉, 家入正隆: スマートセンサによる橋梁振動の多点計測と詳細分析~耐震補強前後の比較を通して~, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, I-107, 2011.
- 10) 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.
- 11) 坂和平, 宮森保紀, 大島俊之: スマートセンサを用いた人道用吊橋の振動測定実験, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, CS9-010, 2011.
- 12) ISHMP: SHM-A Sensor Board Advanced User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu>, 2010.
- 13) ISHMP, SHM-H Board High-Sensitivity Accelerometer Sensor Board Datasheet and User's Guide, <http://shm.cs.uiuc.edu/>, 2009.
- 14) Crossbow: Imote2 High-performance wireless sensor network node, <http://www.xbow.com>, 2007.
- 15) Yasunori Miyamori, Kazuhei Ban, Tomoyuki Yamazaki, Shuichi Mikami and Toshiyuki Oshima: Vibration measurement tests for smart sensor Imote2 at low temperature environment, Proceedings of the 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, Paper No. 5WCSCM-015, 2010.
- 16) ISHMP: Structural Health Monitoring at the University of Illinois, <http://shm.cs.uiuc.edu/>
- 17) Timothy I. Miller, Billie F. Spencer, Jr., Jian Li, Hongki Jo: Solar Energy Harvesting and Software Enhancements for Autonomous Wireless Smart Sensor Networks, NSEL Report #22, <https://www.ideals.illinois.edu/>, 2010.
- 18) Niels J. Gimsing, 伊藤學, 藤野陽三, 長井正嗣, 杉山俊幸, 中村俊一: 吊形式橋梁, 建設図書, 1990.

(2011年9月14日受付)