

スマートセンサー用耐低温測定システムの開発と人道吊橋の振動計測

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

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 a structural health monitoring of infrastructures because such sensors can transfer data via wireless network. In this study, Imote2 smart sensor system is applied for bridge vibration measurement test. A weather shield case with solar energy harvesting system is developed for outdoor measurement. A cold room performance test has been done before bridge measurement. The test bridge is an old pedestrian suspension bridge. From measurement results, the solar energy harvesting system supplies enough power to Imote2 smart sensor and natural vibration modes of the bridge are detected from free vibration data.

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

近年、構造物の実時間的な健全性の監視を目指した「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温度範囲に制約がある。一方、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。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基礎的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。また、本システムを含めた多数のスマートセンサーを用いて実橋梁での振動計測を行って、スマートセンサー適用上の課題点の抽出を行った。

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それぞれ別個に存在し

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-A²⁾および SHM-H³⁾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振動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 倍の感度となっている。SHM-H のブロック図と設定可能なサンプリング振動数を図-3 と表-1 に示す³⁾。

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 のデータレートをサポートしている。通常は内臓アンテナ(Atenova 社 A5645)を備えているが、本研究では外部アンテナ(Atenova 社 B4844)に換装して使用している。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⁾、著者らの既往の研究では 3.4V を下回ると計測値に異常が発生することが確認されている⁵⁾。

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、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 2.0 を用いる。測定には複数台の 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グ

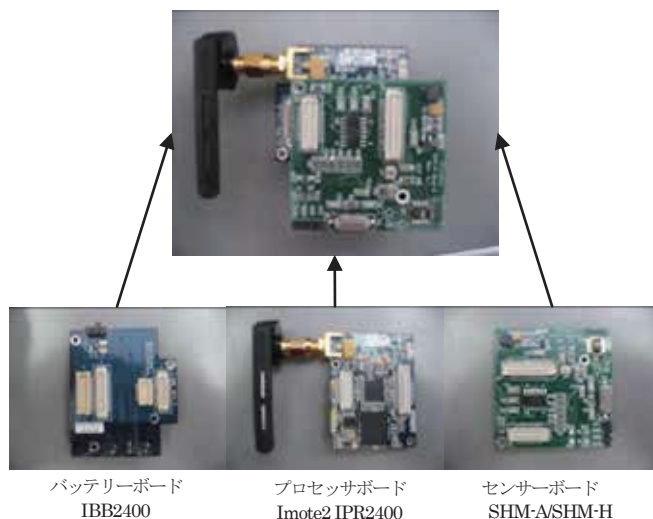


図-1 スマートセンサー Imote2

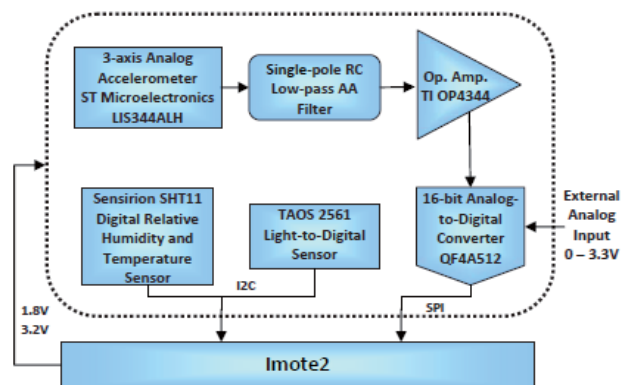


図-2 SHM-A ブロック図²⁾

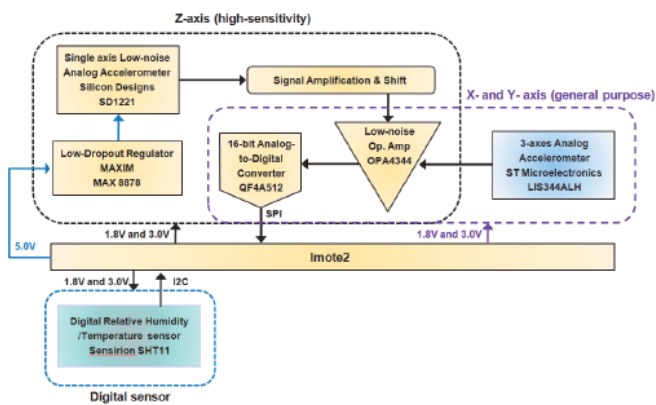


図-3 SHM-H ブロック図³⁾

表-1 SHM-A/SHM-H のサンプリング振動数

SHM-A		SHM-H	
サンプリング振動数 (Hz)	デジタルカットオフ 周波数(Hz)	サンプリング振動数 (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

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⁷⁾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⁵⁾。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。図-4、図-5 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。

ケースの水密性については、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



図-4 スマートセンサー用耐低温測定システム(外装)



図-5 スマートセンサー用耐低温測定システム(外装)

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⁸⁾、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変圧器が挿入されている。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、この変圧器によって、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 312×288×26mm の製品で定格出力 8W、最大動作電圧は 17.28V である。チャージャーコントローラーは Wellsee 社の WS-C2415、変圧器は 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℃、-20℃に設定し、各設定温度において、ケースに断熱材を取り付けた状態と、取り付けしていない状態の計 4 通りの実験を行う。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振動数 280Hz、データ点数 28000 点。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。

この実験では、具体的なアプリケーションプログラムとして、ISHMP Toolsuite の RemoteSensing プログラムと、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 5) 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事がわかる。

図-6 に実験時におけるケース内温度推移を示す。断熱

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℃(断熱材あり)	79	81	81	83	81	81
15℃(断熱材なし)	68	79	78	62	66	71
-20℃(断熱材あり)	58	53	49	24	34	44
-20℃(断熱材なし)	47	38	41	29	29	37

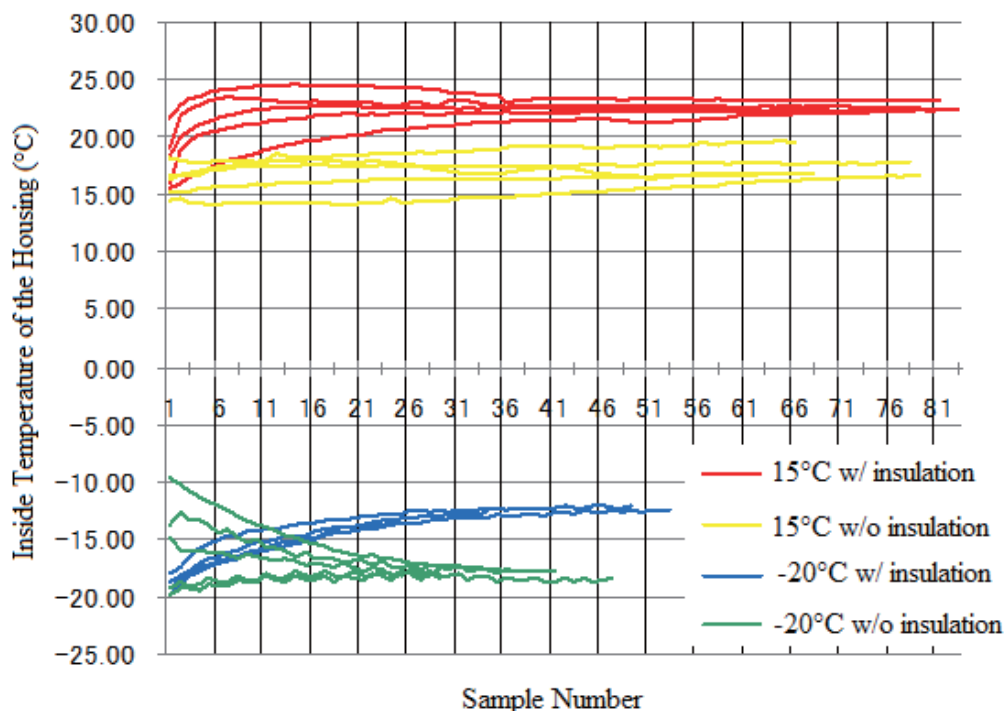


図-6 ケース内の温度変化

表-3 電圧変化 (単位: V)

	15℃(断熱材あり)		15℃(断熱材なし)		-20℃低温(断熱材あり)		-20℃(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



図-7 センサー設置状況



図-8 耐低温測定システム設置状況

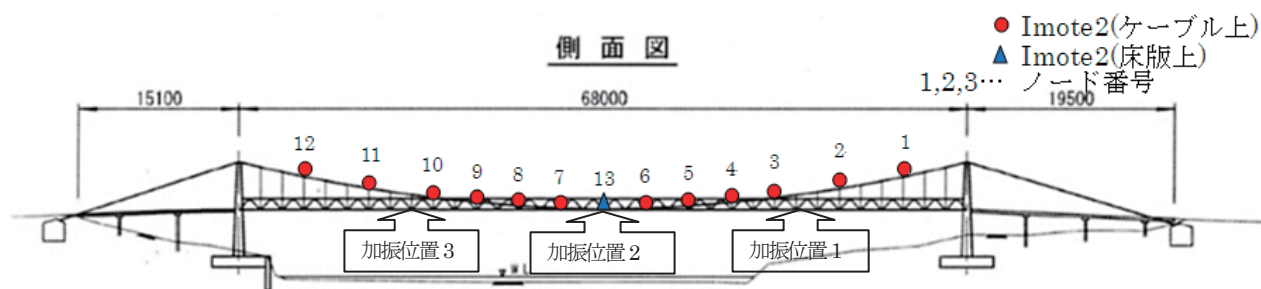


図-9 センサー設置位置

※加振位置の橋軸直角方向は中央部のみ

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同じ温度条件なら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℃、-20℃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℃での実験はケース内温度がほぼ同じであり、-20℃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-6 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℃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℃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℃に比べ-20℃では低くなっている。これは、-20℃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。また、-20℃に比べ、15℃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。本研究で製作したシステムでは Imote2 に安定した電圧を供給出来るように変圧器を用いており、この変圧器は入力電圧が出力電圧より 3V 以上高くなくては作動しな

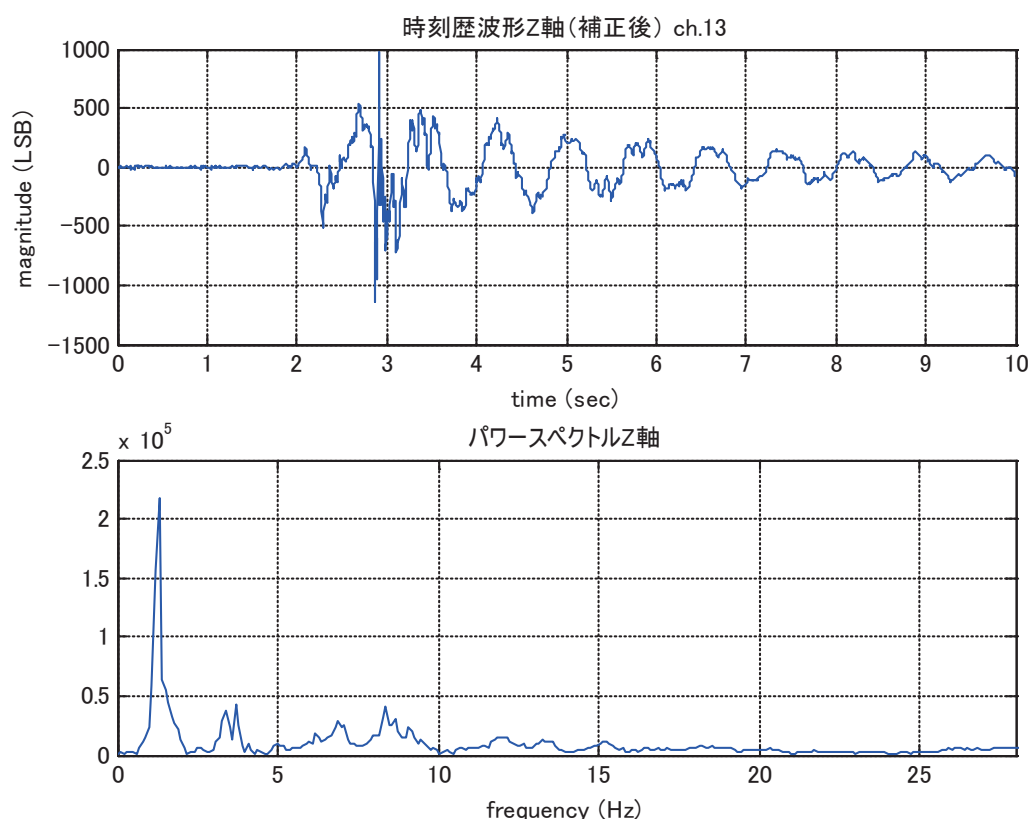


図-10 測定加速度波形

表4 固有振動数と減衰定数

モード	固有振動数(Hz)	減衰定数	モード形状
1次	1.23	0.028	曲げ対称
2次	1.71	0.019	曲げ逆対称
3次	3.42	0.036	曲げ対称

い。Imote2 システムの定格電圧が 4.5V であるため、コンバーターの入力電圧には 7.5V 以上が必要である。今回の測定結果より、全ての実験で実験開始時、終了時ともに 7.5V 以上の電圧が確認された。このことより、本システムを用いる場合 Imote2 に安定した電圧が供給されるため、信頼性の高い測定ができると考えられる。

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

測定対象は無補剛の人道用吊橋で振動しやすい特性を有する。7 径間から構成され、全長は 102.6m、中央支間長は 68m、幅員は 2.5m である。

今回の実験では、ゲートウェイノードを橋の左岸側下流約 100m に設置した。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図-7 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、耐低温測定システムはプロセッサボ

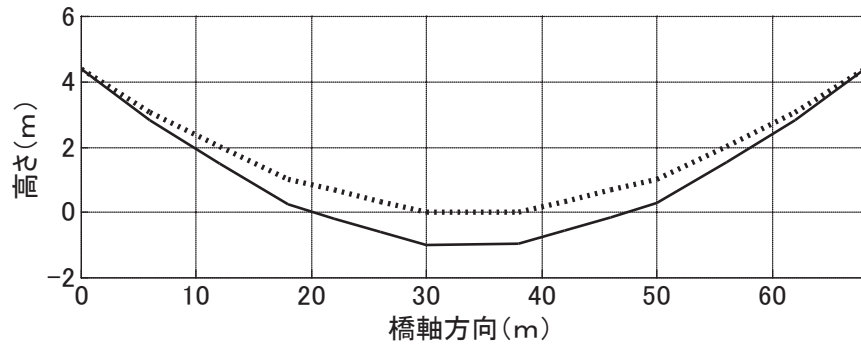
ードと SHM-A センサーボードを組み込み中央径間支間中央の床板上に設置した。太陽光パネルは図-8 のように高欄に取り付けた。図-9 に橋梁一般図とセンサーの設置位置を示す。なお、本実験は耐低温測定システムの実用性を検証するために、冬季の 2 月に実験を行った。当日の気温は -5 ～ 5℃ の範囲であった。

実験では減衰自由振動を測定した。具体的には、図-9 で示した加振位置で加振者が屈伸を 1 回行ったときの振動を測定した。データ点数は 2800 点、サンプリング周波数は 280Hz とし、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 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。

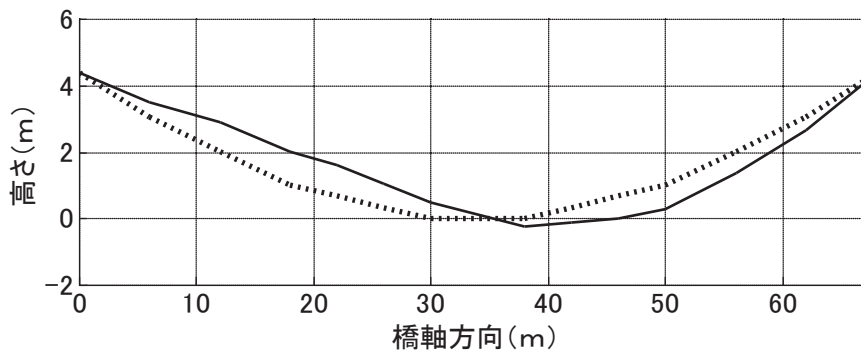
5.2 測定結果と考察

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-10 に示す。

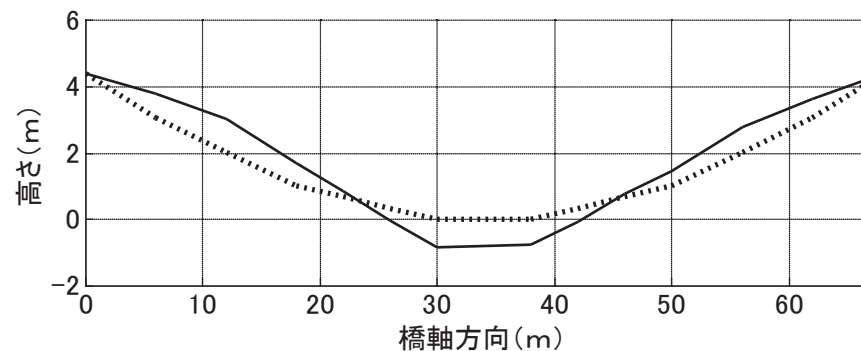
センサーボードの z 軸方向を全体系の鉛直方向とみなしてパワースペクトルのピーク値を橋の固有振動数とした。減衰定数は測定した減衰自由振動波形に対して



a) 1次モード



b) 2次モード



c) 3次モード

図-11 モード形状

ピーク振動数周辺の帯域を通過させるような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。表-4は以上のデータ処理によって得られた主要な振動モードの固有振動数と減衰定数である。

図-11に示すモード形状の決定には、減衰定数の算出時と同じフィルタリング処理後の減衰自由振動波形を用いた。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することで、対象となる振動モード毎に測点の振幅比を求めることでモード形状とした。今回の実験では橋梁の片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。

検出したモード形状は、一般的な単一ケーブルの動的挙動に近いことから⁹⁾、Imote2センサーシステムを使用して、橋の振動特性同定を行うことが可能である。

本実験の測定中は晴天であり、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-5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なっており、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は変圧器で設定した出力電圧

表-5 実験終了時の電圧

ノード	1	2 *	3	4 *	5	6 *	7 *
電圧(V)	3.250 3.343	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

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。

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ると考えられる結果が得られた。

今後の課題として、今回の実験ではシングルホップ計測で電波状態の問題から橋梁の一部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マルチホップ計測などを利用して、より確実に電波送受信を出来る環境を Imote2 センサーに組み込む必要がある。また、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必要がある。

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。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）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: Structural Health Monitoring using Smart Sensors, Ph. D. Dissertation, NSEL Report #1, University of Illinois at Urbana-Champaign, <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/>
- 7) Jennifer A. Rice and Billie F. Spencer, Jr.: Flexible smart sensor framework for autonomous full-scale structural health monitoring, NSEL Report Series, Report No. NSEL-018, 2009.
- 8) 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 Series Report No. NSEL-022, 2010.
- 9) 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.