

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

Development of anti-low temperature smart sensor system for vibration measurement

北見工業大学 正 員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
 北見工業大学 学生員 ○坂和乎 (Kazuhei Ban)
 北見工業大学 学生員 藤本正樹 (Masaki Fujimoto)
 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検討として、低温下における動作の可否や電力消費量の検討を行い、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出来るシステムを試作しその有効性について実験、考察を行ったものである。

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Crossbow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⁾を使用している。SHM-Aは加速度センサーの他に温度センサーも搭載されている。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)³⁾により提供されているISHMP Toolsuite 2.0を用いる。測定には2台のImote2を用い、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、測定を行う無線端末をリーフノードとして用いる。

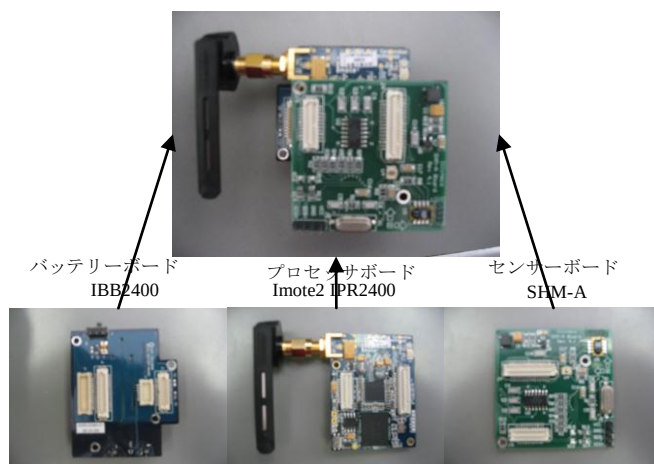


図-1 スマートセンサー Imote2

3. 低温環境がスマートセンサーに及ぼす影響

低温環境下においてスマートセンサーを使用した場合、動作状況や電力消費量にどのような影響を及ぼすかを実験し、検討した。

3.1 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い、Imote2を図-2のように設置した。図-2に示すようにゲートウェイノードとリーフノードの距離は1.3mとし、ノードの間は直接見通せるような状態で実験を行う。リーフノードは鋼製の片持ち梁の上に置き、ゲートウェイノードは壁面にテープで固定した。測定用のパソコンは隣接した計測室内に設置し、USBケーブルでゲートウェイノードと接続した。また低温室の室温は、26℃、13℃、0℃、-13℃、-26℃でそれぞれ実験する。実験内容は、片持ち梁の振動計測、電波送信におけるノードの受信状況の確認の2つとした。各室温の測定では、電池を新しい物に交換したが、使用した電池はすべてPanasonic社のIndustrial アルカリ電池(AM-4PI)を使用した。

3.1.1 振動計測

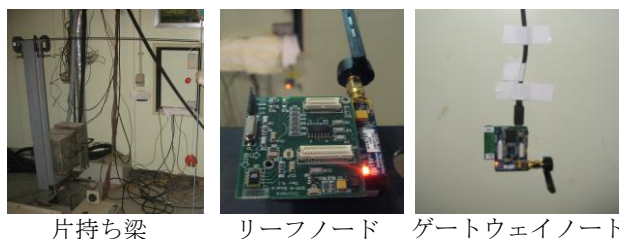


図-2 スマートセンサー設置

図-3 に Imote2 センサーの 3 軸の加速度計の測定方向を示す。図-4 に示すように振動測定では、片持ち梁に見立てた鋼製の板の先端に綿糸を結びつけ、さらに綿糸の下端に質量 500g の錘を載せた。加振方法は、ゲートウェイノード側、リーフノード側にそれぞれ人員を配置しゲートウェイノード側がセンサーの振動計測が始まったことを確認してからリーフノード側に合図を送りリーフノード側が糸をハサミで切断した。これを各設定温度において 10 回行った。測定軸 3 軸、サンプリング周波数 280Hz、データ点数 2800 点 (10 秒) また、振動測定の前後に受信ノードのバッテリー電圧を測定して振動測定における電力消費量を計測した。この実験において、具体的なアプリケーションプログラムとしては、ISHMP Toolsuite の RemoteSensing プログラムと、RemoteCommand プログラムの Vbat コマンドを用いた。

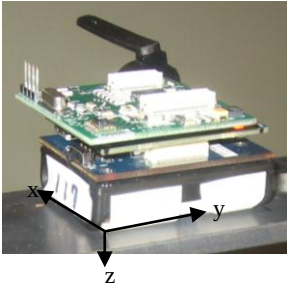


図-3 センサー測定方向

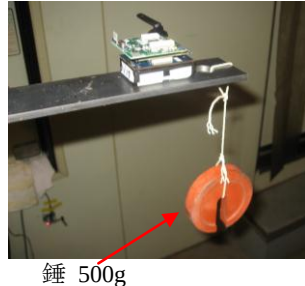


図-4 重錘設置状況

3.1.2 電波送信におけるノードの受信状況

ゲートウェイノードからリーフノードに返信させる命令を送り、送信ノードから受信ノードに応答させる。これを 5 万回 (5 万パケット) 一括して行い、リーフノード、ゲートウェイノード双方の受信回数を調査した。各室温で同じ実験を 20 回繰り返す。1 回の測定ごとに送信ノードの電源電圧を測定した。以上において、具体的なアプリケーションプログラムとしては、ISHMP Toolsuite の TestRadio プログラムと、RemoteCommand プログラムの Vbat コマンドを用いた。

3.2 結果と考察

3.2.1 振動計測

振動計測結果を表-1 にまとめた。表-1 は、○が測定成功、△が静的加速度の変動を、×が測定失敗を表している。測定結果は設定温度-26℃以外の温度における振動データはほぼ同じ結果となったが、設定温度-26℃において、静的加速度が 4 回目から 7 回目の測定データで変化し、8 回目の測定から測定できなくなった。図-5 に示す各設定温度におけるバッテリー電圧の推移によると、より厳しい低温環境下であるほど、電圧の減少が激しく、Imote2 センサーは 3.4V 以下になると、加速度測定に異常をきたす。静的加速度が変動してしまう原因は不十分な電圧供給であると考えられる。

3.2.2 電波送信におけるノードの受信状況

図-6 は各設定温度での 20 回分のパケット損失率を平均化したものである。図-6 から、パケット損失率は設定温度すべてにおいて、0.025%~0.03%ほどであり非常に低い値となっている。また、各設定温度間のパケット損失率の差も 0.003%程度であることから、温度変化によるパケット損失への影響はほとんどないものと考えられる。図-7 はパケット損失率測定における電圧の推移

一電圧の推移を示したものである。6 回目の測定までは、図-5 と同様の減少傾向を示すが、7 回目から電圧が増加し始め 3.1V 前後で細かく電圧が増減する結果となった。これは、バッテリー本体が Imote2 センサーの使用によって発熱し、性能を維持できるようになったためと推測される。

表-1 振動計測結果

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
0℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-13℃	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
-26℃	○	○	○	△	△	△	△	×	×	×

○: 測定成功
△: 静的加速度変動
×: 測定失敗

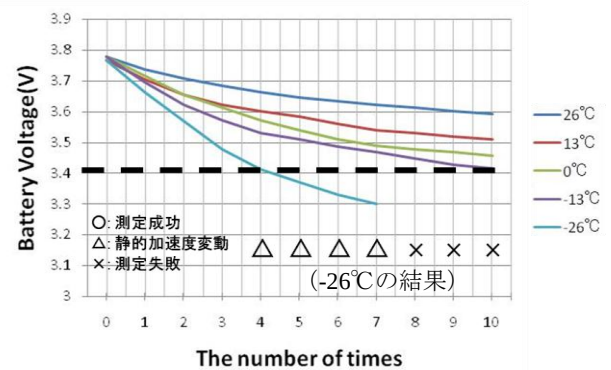


図-5 振動測定実験における電圧の推移

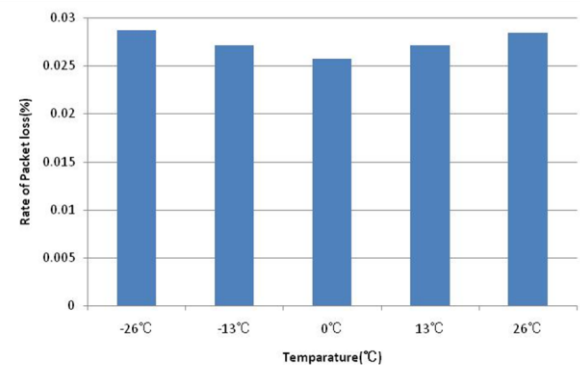


図-6 パケット損失率

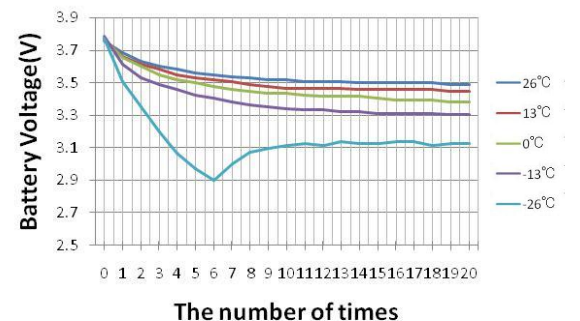


図-7 パケット損失率測定における電圧の推移

3.3 低温環境におけるスマートセンサーの影響と対策

本実験はスマートセンサー Imote2 に対して、低温室内でパケット送受信実験と振動測定実験を行った。実験結果から低温環境下でもデータ送受信は正常に行なえることを確認できたが振動データの測定に影響があった。低温環境下でも振動測定自体は可能であるが電圧が不安定になり必要な電圧の供給が難しくなることから、十分な電圧を確保する必要がある。本実験では十分に乾燥した低温室内でセンサーをケースに収納しない状態で実験を行ったが、実際の測定ではセンサー周辺の環境温度を保つとともに結露や霜を発生させないようなケースが必要となる。

4. 低温環境耐用品スマートセンサーシステム

3 章の実験結果をもとに低温環境においてスマートセンサーを使用するためのシステムの作成を行った⁴⁾。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、長期間の使用も見据え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 センサーを収納し、かつ全天候で使用出来るケースを製作した。図-8、図-9 に製作した低温環境耐用品スマートセンサーシステムを示す。

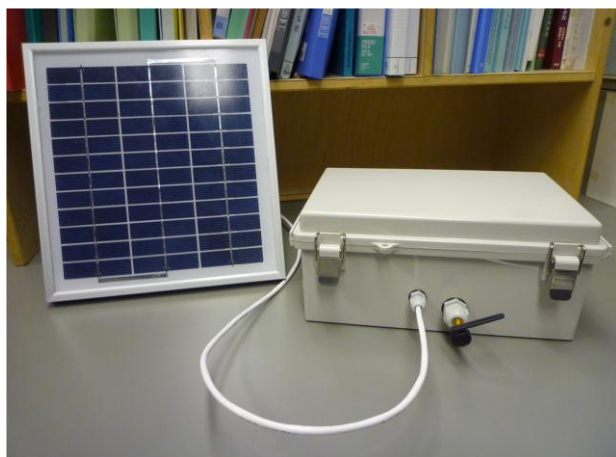


図-8 耐低温環境用スマートセンサーシステム(外装)

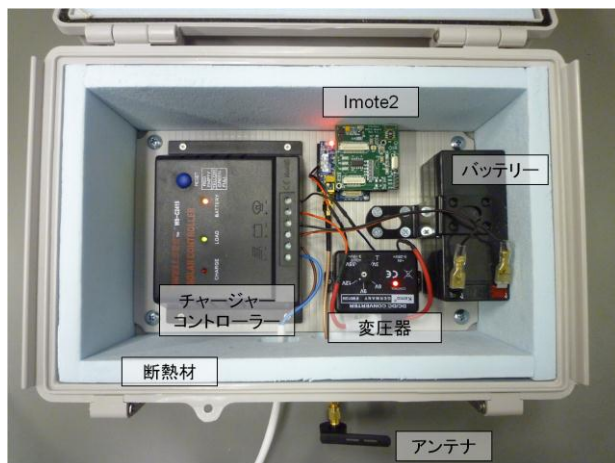


図9 耐低温環境用スマートセンサーシステム(内装)

4.1 ケースの仕様

センサーを収納するために使用したケースには防水対策として蓋にゴムパッキンを取り付けている。さらに、低温環境下での使用を見据え、ケース内の上下、側面には断熱材を貼り付けている。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。ケースの寸法は幅 300mm、奥行き 200mm、高さ 131.5mm である。

4.2 発電システム

ソーラーパネルで発電された電力を Imote2 に供給するが、余剰電力が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 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、Imote2 に安定した電力を供給することができる。

5. 低温環境耐用品スマートセンサーシステムの有効性の検証

3 章の実験結果から判明した、低温環境が Imote2 センサーに及ぼす影響について、本システムの有効性を低温室における実験によって検証する。

5.1 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入りケースを置き、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。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 3 回ずつ行う。この実験において、具体的なアプリケーションプログラムとしては、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。

5.2 結果と考察

製作したシステムを用いた振動測定における各実験条件での測定可能回数、ケース内での温度変化などについ

て、実験結果から考察する。

5.2.1 測定回数と温度変化の関係

実験結果から、バッテリーから電力を供給不能になるまでの実験回数は表-2 に示すような結果となった。3 章の実験結果と同じく、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-10 に実験時におけるケース内温度の推移のグラフを示す。断熱材を取り付けた状態の方が断熱材を取り付けない状態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低温、常温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常温での実験はケース内温度がほぼ同じであり、低温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-10 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。この実験結果や 3 章の実験結果から分かるように、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。

5.2.2 静的加速度の変動

3 章の振動測定において、低温環境下において振動測定を行った結果、静的加速度が変動する結果となった。その原因として低温環境下によってバッテリーの電圧が

不安定であるためと考察した。新しい発電システムを用いた今回の実験では、変圧器を使用し、Imote2 センサーに供給される電圧を一定とした。各条件で測定した振動データから新しい発電システムを用いた振動データには静的加速度の変動は確認されなかった。したがって、Imote2 センサーに供給する電圧を一定にする変圧器を用いた発電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。

6. まとめと今後の課題

本研究は低温環境下での Imote2 センサーの適用を目的としている。3 章の実験結果から低温環境下で Imote2 センサーを使用するためには、温度変化の影響を受けやすいバッテリーの性能を維持しなくてはならないことが判明し、低温環境下でのバッテリーの問題として、バッテリーの消費が激しいこと、Imote2 センサーへの不安定な電圧供給などがあり、それらの問題を解決するために 4 章で述べた耐低温環境用スマートセンサーシステムを開発した。5 章の実験により作成したシステムの有効性を確認することができた。

今後の課題としては、ケース内のセンサーやバッテリーの霜、結露やケース内の温度を維持するために、発熱気を用いることや、ソーラーパネルを含め製作したシステムの実橋梁での適用実験を行っていく。

【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: Structural Health Monitoring at the University of Illinois, <http://shm.cs.uiuc.edu/>
- 4) Timothy I. Miller and Billie F. Spencer, Jr.: Solar Energy Harvesting and Software Enhancements for Autonomous Wireless Smart Sensor Networks, NSEL Report #22, University of Illinois at Urbana-Champaign, <https://www.ideals.illinois.edu/>, 2010.

表-2 測定回数

実験回数	1回目	2回目	3回目	平均
常温(断熱材あり)	79	81	81	80
常温(断熱材なし)	68	79	78	75
低温(断熱材あり)	58	53	49	53
低温(断熱材なし)	47	38	41	42

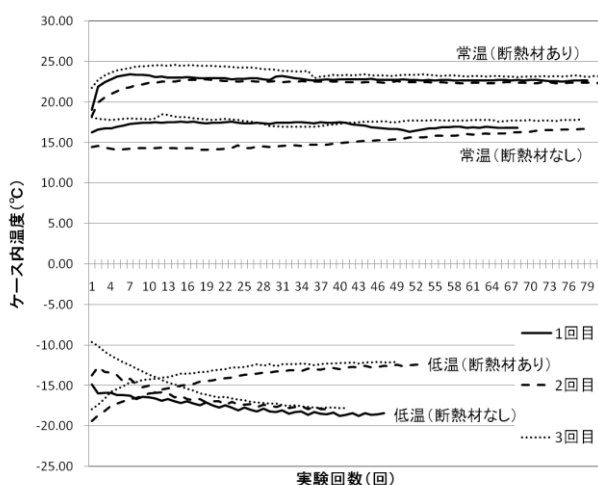


図-10 実験時におけるケース内温度の推移