

機関番号：10106  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21710166  
 研究課題名（和文） 廃止ローカル線橋梁群を利用したスマートセンサーによる構造健全度診断技術の実証実験  
 研究課題名（英文） Feasible study of smart sensors for structural health monitoring by using old steel railway bridges.  
 研究代表者  
 宮森 保紀（MIYAMORI YASUNORI）  
 北見工業大学・工学部・准教授  
 研究者番号：00363383

## 研究成果の概要（和文）：

構造物の健全性を定量的に評価するために、橋にセンサーを設置してそのデータを用いる構造健全度診断について、センサー技術の開発と改善の観点から研究を行った。従来のセンサーに代えて、無線通信機能とデータ処理機能を併せ持つスマートセンサーを用い、その橋梁での適用性を検証した。また、電源の供給されない自然環境下でこのセンサーを利用するための自律型電力供給システムを開発し、低温室における性能検証試験と実橋梁での試験を行った。

## 研究成果の概要（英文）：

Smart sensor system which has radio transmission and data processing capacity is expected to be applied for structural health monitoring for bridge or other infrastructures. In this study, applicability of the sensor system is tested in testbed. The system needs energy harvesting system for long term use under severe environment. The developed system is tested in a cold room and real bridge testbed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,000,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

## 研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 社会システム工学・安全システム

キーワード：都市・社会防災 センシング社会基盤

## 1. 研究開始当初の背景

2007年に相次いだミネアポリスの橋梁崩落事故や木曾川大橋の部材破断事故は、社会基盤施設の機能低下が人々の安全と安心を脅かす現実的な脅威となりつつあることを示している。このような状況に対してより少ない費用と労力で社会基盤の安全性を継続

して確保する方法が必要である。

近年、「スマートセンサー」を用いて構造物の挙動を継続的に観測し、その結果から損傷の位置や程度を自動診断する構造健全度診断が提案されている。「スマートセンサー」は測定・通信・計算などの機能を集積したセンサーを指す。一方、このようなセンサー実

際の橋梁で試験した事例は少ない。開発したセンサーの精度や遵守同定手法の適用性を検討するためには、損傷の位置や程度の同定精度を確かめるために構造物に損傷を与えることが必要だが、供用中の橋梁ではこのような実験は許可されない。稀に撤去工事に伴い利用できる機会があっても時間の制約が大きい。2007年の科学技術振興機構(JST)と米国国立科学財団(NSF)による「高度化センサー技術に関する日米ワークショップ」においても、新技術の試験や普及のために「テストベッド」を開発することの必要性が討議された。

これらに対して研究代表者らは、鉄道廃線に残存する鋼橋を利用した図-2のような実証実験環境の開発を行っていた。

## 2. 研究の目的

廃線鉄道から移設した橋梁を用いて、構造物に損傷を与える際の損傷レベルや位置の設定、取得するデータなど、実橋梁の構造健全度診断実験に必要な条件を明確にする。この経験に基づき、近隣で橋梁の撤去工事がおこなわれる際に現地実験を行い、時間や設備の制約下で橋梁の健全度診断実験に必要な項目を整理し、標準的な方法を提案する。具体的には電源供給方法、信頼性があり安価なデータ収録方法と計測の遠隔化を検討する。

## 3. 研究の方法

無線型 MEMS センサーを 20 基程度導入して、橋梁の振動測定を行う。橋梁が長期間、複雑に変化する自然環境下で使用されることを考慮し、夏季および冬季など複数の環境条件下で振動データを収集する。また、建物と違い橋梁では電源が利用できない場合が多く、計測システムを長期間運用する上では電源の確保が問題となる。太陽光発電が一つの解決策となるが、このシステム開発について、寒冷環境下での影響を評価するために低温室での試験を行う。

具体的な研究方法は以下のとおりである。

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-A 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)により提

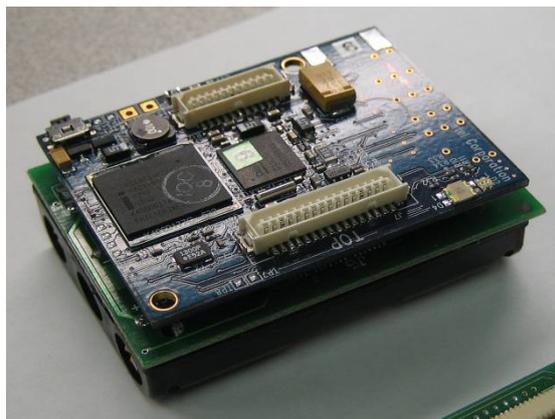
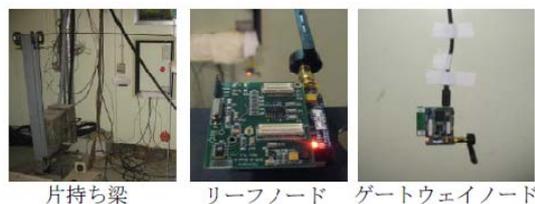


図-1 スマートセンサー



図-2 テストベッド



片持ち梁 リーフノード ゲートウェイノード

図-3 低温室実験

供されている ISHMP Toolsuite 2.0 を用いる。測定には 2 台の Imote2 を使い、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。

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た。

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-3 のように設置した。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。

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。

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°C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°C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-4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。

以上の実験はスマートセンサーImote2 に対して、低温室内で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。

以上より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。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

表-1 振動計測結果

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

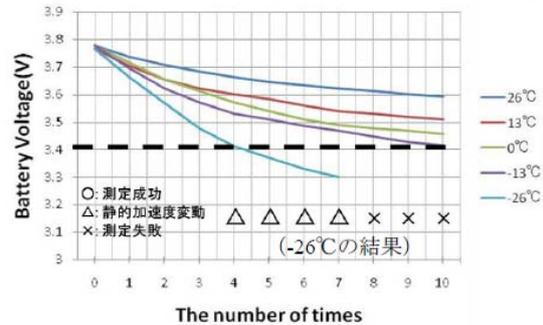


図-4 振動測定実験における電圧

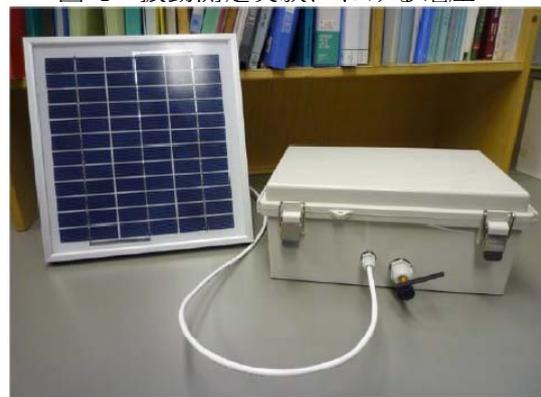


図-5 低温環境用システム (外観)



図-6 低温環境用システム (内部)

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-5、図-6に製作した低温環境用スマートセンサーシステムを示す。本システムの有効性を検証するために低温室内において実験を行った。

実験は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°C、-20°C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。

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。Imote2単体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-7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てい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-7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。これまでの実験結果から分かるように、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。

以上のスマートセンサーおよび開発した耐低温環境システムの実橋梁における実証試験を冬季間の2月に行った。測定対象橋梁は図-8のような7径間からなる無補剛吊橋で、

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

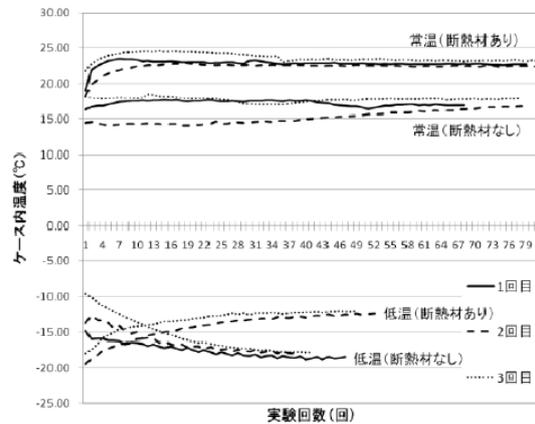


図-7 ケース内温度の推移



図-8 実証実験対象橋梁

全長は102.6m、中央支間長は68m。幅員は、全幅員2.5m、有効幅員1.7mである。

本実験では、吊橋の構造特性を把握するため、振動実験を行い、振動の特性を解析した。測定実験は直接橋に加振して、加振後の振動を測定する減衰自由振動を行った。減衰自由振動測定時の加振方法には人が橋の上で1回屈伸を行った。測定対象モードは、X、Y、Z軸の3方向に振動する28Hz以下の振動モードである。

測定にはImote2を15台用いた。これには、耐低温環境システムに使用したImote2も含まれている。センサーボードは、SHM-Aを4ノード、SHM-Hを9ノードに用いた。耐低温環境システムは図-9のように、橋軸方向中央部の床板上に設置し、太陽光パネルは裏面の穴に針金を通し、高欄に取り付けた。その際、太陽光パネルの裏に断熱材を挟み、パネ

ルに角度をつけた。耐低温環境システム以外の Imote2 は、図-10 のように全て主ケーブルに取り付けた。

実験では、橋の上で一人の人間が 1 回屈伸をすることによって生じる減衰自由振動を測定した。振動測定のサンプリング振動数は 280Hz、データ点数は 2800 点（10 秒間）とした。加振者は本部からの合図で 1 回屈伸を行い、次の合図があるまで動かない。これを右岸側主塔から中央支間の橋軸方向の 1/4、2/4、3/4 の位置をそれぞれ加振位置 1、加振位置 2、加振位置 3 とし、この 3 箇所ですべて 3 回ずつ行った。3 つの加振パターンで卓越する振動モードの固有振動数、減衰定数、モード形状を確認する。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。

振動測定によって得られた振動データの一例を図-11 に示す。測定した減衰自由振動のパワースペクトルから表-3 に示すように、橋の固有振動数および減衰定数を求めた。固有振動数は振動データのパワースペクトル値のピークから導き出した。減衰定数については、測定した減衰自由振動データからバンドパスフィルタによるフィルタリング処理を施し、同定した固有振動成分を抽出する。抽出した自由減衰振動波形から対数減衰率を求め、減衰定数を求めた。橋のモード形状についても減衰定数を求める際に生成した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値を求め、振幅比に 1m をかけて最大振幅を 1m とし、測点間を実線で結ぶ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。以上のように、通常の有線加速度計などを用いて得られたデータから求めた場合と同程度の精度の同定結果が得られた。

#### 4. 研究成果

太陽光発電技術を利用した自律型スマートセンサーシステムを開発し、低温室における寒冷環境下での性能試験を行い、また実橋梁の測定試験にも適用して、振動計測に適用可能であることを確認した。

廃線橋梁を利用したテストベッドのほかにも、国道の道路橋や上記の人道吊橋で測定実験を行い、スマートセンサーの利用可能性を明らかにした。



図-9 耐低温環境システム設置状況



図-10 Imote2 設置状況

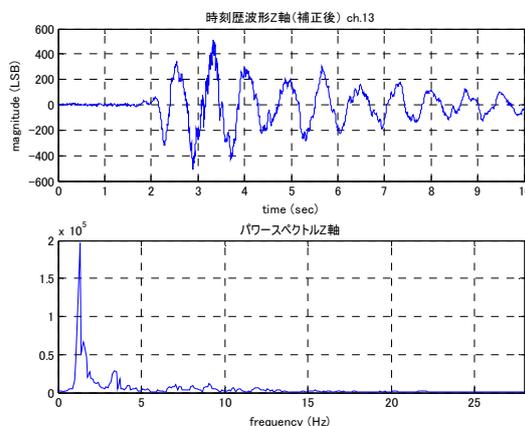


図-11 振動測定結果

表-3 実証実験における同定結果

モード	固有振動数(Hz)	減衰定数
1次	1.2308	0.028304
2次	1.7094	0.018926
3次	3.4188	0.035138

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- 1) 宮森保紀、白川龍生、山崎智之、大西弘芳、三上修一、大島俊之：ふるさと銀河線(旧池北線)における鋼橋群について、土木史研究論文集、28巻13号、pp.21-28、2009.

[学会発表] (計 6 件)

- 1) 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論文報告集、第66巻、2011.
- 2) 坪川良太、大島俊之、三上修一、宮森保紀、山崎智之：異なる局部加振方法による橋梁構造の欠陥検出精度の検討、土木学会北海道支部論文報告集、第66巻、2011.
- 3) 坪川良太、大島俊之、三上修一、宮森保紀、山崎智之：圧電アクチュエータの局部加振による実橋梁の微小欠陥検出に関する研究、土木学会第65回年次学術講演会講演概要集、I-453、2010.
- 4) 坂和平、宮森保紀、大島俊之：低温環境下におけるワイヤレスセンサーの適用性と電力消費、土木学会第65回年次学術講演会講演概要集、I-508、2010.

- 5) Y. Miyamori, K. Ban, T. Yamazaki, S. Mikami, T. Oshima: Vibration Measurement Tests for Smart Sensor Imote2 at Low Temperature Environment, The Proceedings of 5WCSCM, 2010.

- 6) K. Ban, Y. Miyamori, T. Oshima, T. Yamazaki, S. Mikami, B.F. Spencer Jr.: Development of the Testbed for Structural Health Monitoring Application for International Collaboration, The Proceedings of 5WCSCM, 2010.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://mobile.civil.kitami-it.ac.jp/galaxyline/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮森保紀 (MIYAMORI YASUNORI)

研究者番号：00363383