

スマートセンサーを用いた実橋梁の固有振動特性同定と気温の影響

A thermal effect on modal properties of the bridge using smart sensor

北見工業大学社会環境工学専攻	○学生員	綿崎良祐(Ryosuke Watasaki)
北見工業大学社会環境工学専攻	学生員	岡本覚人(Akito Okamoto)
北見工業大学社会環境工学専攻	学生員	潘凱凱 (Kaikai Pan)
北見工業大学社会環境工学科	正会員	宮森保紀(Yasunori Miyamori)
北見工業大学社会環境工学科	正会員	齊藤剛彦(Takehiko Saito)
北見工業大学社会環境工学科	正会員	三上修一(Shuichi Mikami)

1. はじめに

近年、構造物の新しい健全度評価方法として、「構造ヘルスモニタリング(Structural Health Monitoring, SHM)」が注目されている。振動を利用した SHM は、無感地震や常時微動、交通振動などの応答を用いた性能診断や、大地震や台風などによる損傷程度の推定を自動的に行うことである。しかし、従来の有線型のセンサーシステムでは多点で長期間の測定を行うには経済性や効率性の面で不向きである。そこで、情報処理機能と無線通信機能を備えたスマートセンサーを用いることで、経済的で効率的な振動測定を可能にすると期待されている。

振動を利用した SHM において、対象の経年劣化によって変化する固有振動数や減衰定数、モード振幅の比較を行う方法がある。この方法は周期的に対象の振動計測を行う必要がある。しかし、一般的な土木構造物は屋外環境において供用されており、固有振動特性に影響を与える要因が存在する。対象構造物を定期的に振動測定するうえで、季節や天候による気温の変化が構造物の固有振動特性に変化を与える 1 つの要因になると考えられる。SHM を実用化するためには、気温の変化が構造物の固有振動特性にどのような影響を与えるかを確認することが重要となる。

本研究では、気温の違いによる実橋梁の固有振動特性への影響を調べることを目的とし、供用中のコンクリート橋にて季節の異なる 2 回の振動測定実験を行うとともに実験中の気温を計測する。また、各実験で得られた振動データに ERA 解析を適用して固有振動特性を算出し、実験日ごとに固有振動数と減衰定数の比較を行う。

2. Imote2 スマートセンサー

本研究で使用するセンサーは図 1 で示す、MEMSIC 社の Imote2 システムである。本システムはプロセッサーボード、センサーボード、バッテリーボードを組み合わせて使用する。Imote2 への電力供給はバッテリーボードを使用し、製品では単 4 乾電池 3 本が電源となっている。単 4 乾電池は容量が少なく長時間の実験において電池交換が必要となる。そのため、単 3 充電電池と定電圧回路を用いることで一定の電圧を供給することができる定電圧供給システムを製作し、実験に用いた¹⁾。図 2 に定電圧供給システムを示す。センサーボードはイリノイ大学において開発された鉛直方向の感度が良い SHM-



図 1 Imote2 システム 図 2 定電圧供給システム



(a) (b)

図 3 (a)EL-USB-2 データロガーと(b)遮光ケース

H²⁾を利用している。Imote2 は情報処理・無線通信機能を備えており、ソフトウェアが必要となる。OS は比較的消費電力の少ない TinyOS、ミドルウェアとして ISHMP Toolsuite、アプリケーションソフトウェアとして橋梁振動モニタリングシステム BHELMO を使用している。

3. 実験概要

本実験は気温による固有振動数と減衰定数への影響を調査することを目的とし、スマートセンサーを用いた多点振動測定実験を行った。実験で得られた振動データを解析し、固有振動数と減衰定数を求める。実験は 2013 年 2 月と同年 7 月に行った。各実験は 1 日で行った。実験中の気温計測には図 3 に示す EL-USB-2 データロガーを使用した。直射日光による計測温度の変化を防ぐために遮光ケースを使用した。

3.1 実験対象

実験対象は 2001 年から供用を開始したポストテンション方式 3 径間連続 PC 箱桁橋である。本橋は北見市内に位置している。橋長は 120m(主径間 50m)、幅員 16.5m、R=150m の曲線橋である。図 4 に対象橋梁の平面図とセンサーの設置位置を示す。

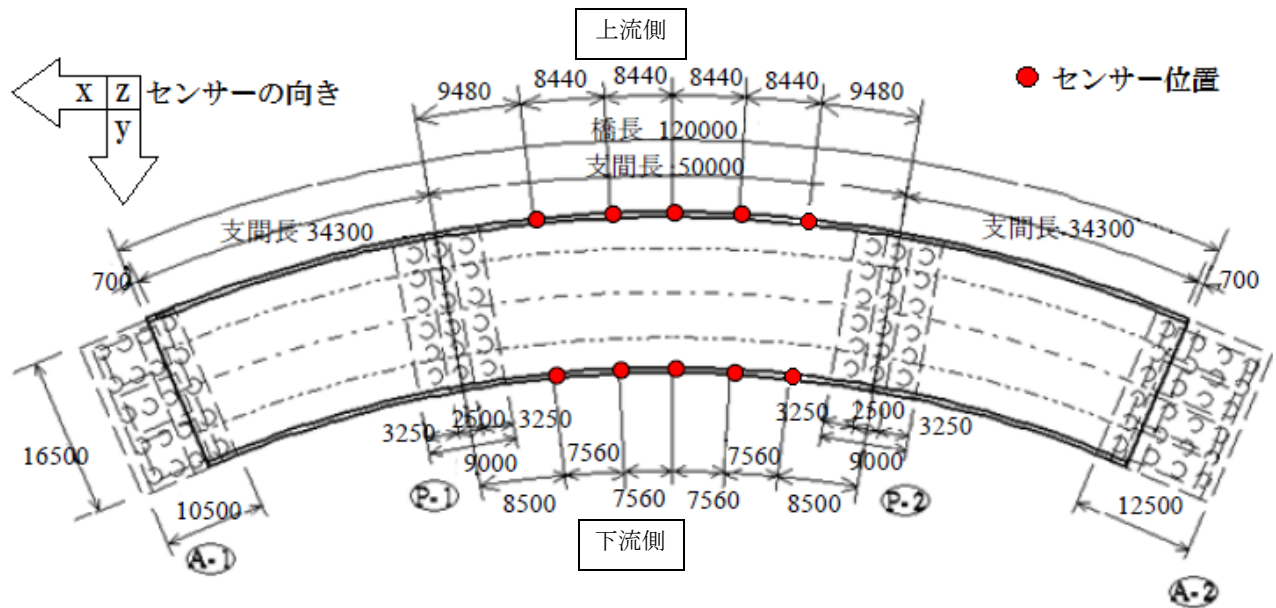


図4 対象橋梁の平面図とセンサーの設置位置

3.2 実験環境

2月における実験の天候は曇り時々晴れであり、日差しの変化が大きかった。また、歩道、地覆等に積雪があり、道路と歩道の間に雪壁がある。7月における実験の天候は曇りであり、大きな日差しの変化はなかった。実験時の橋梁の状況を図5に示す。

3.3 実験方法

センサーの数は定電圧供給システムを用いた Imote2 スマートセンサー10基である。センサーの設置位置は図4で示したように主径間の上流側に5基、下流側に5基である。センサーは鋼板上に両面テープで固定し、地覆上に設置した。2月の実験では地覆上に積雪があったため除雪し設置した。振動データの解析では、鉛直方向であるセンサーのz軸方向のデータのみを解析した。振動測定におけるサンプリング周波数は280Hz、データ点数は16800点とした。測定回数は2月に12回、7月に11回行った。

測定する振動は橋梁を通過する車両による交通振動である。重量の重い車両を加振源とするため、路線バスの通過に合わせて振動測定を行った。

3.4 解析方法

振動データの解析では、本実験で得られた振動データの加速度は数galから数十galと小さいため、一般的によく用いられるピークピッキング法で固有振動特性を求めることが困難であった。そこでERA解析を用いた³⁾。

常時微動データをNExT法により相互相関関数の形にし、減衰自由振動波形を生成する。次に生成した減衰自由振動波形をERAに適用して固有振動数、減衰定数、モード形状を算出した。

相関関数法では基準点sと観測点rの常時微動データに対して、 $r \times s$ 組の相互相関関数 R_{sr} を算出する。これは点sに外力を与えたときの点rの応答となる。本実験では基準点と観測点を全10点とし、 10×10 組の相関関数を作成した。



(a)2月

(b)7月

図5 実験時の状況

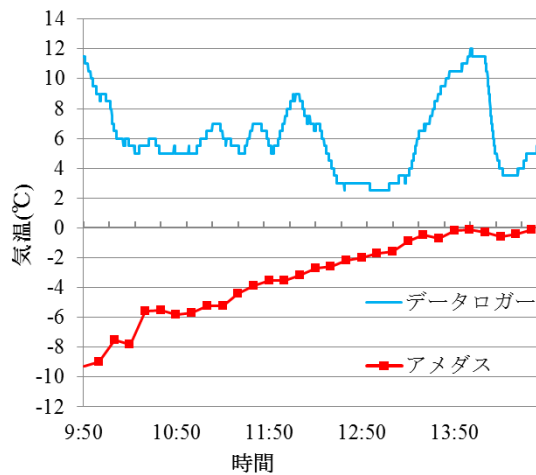
ERAでは、相関関数を自由度ごとに並べたMarkovパラメーターを作成する。Markovパラメーターを任意の行列まで並べたHankel行列を作成する。本解析ではHankel行列の大きさを240行80列とした。次にHankel行列の特異値分解から対角行列を算出し、最大特異値の数%以下を削除してシステム行列を再構築する。これに対して固有値解析を行った。

4. 実験結果

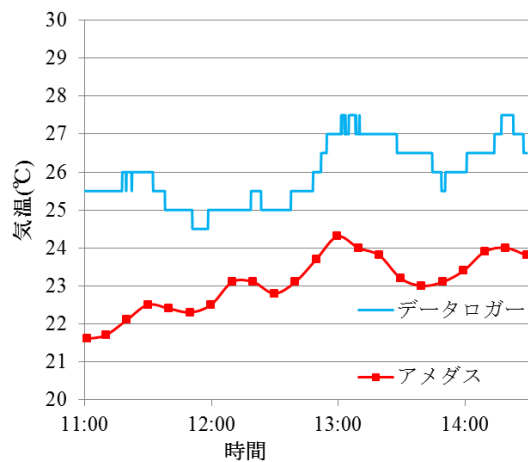
2月と7月に測定実験を行ったが、各実験の所要時間は2月が4時間30分、7月が3時間30分である。

4.1 実験時の気温

2月と7月の実験中の気温を図6に示す。気温は前述のEL-USB-2データロガーで計測したものとアメダス⁴⁾のデータを表している。北見市のアメダスは対象橋梁から西南西の方角に約2.5km離れた場所にある。2月の気温において、データロガーに室温による熱が残っており9時50分から10時10分までの計測温度が安定していない。データロガーとアメダスの計測温度が同時刻に変化しているが、データロガーとアメダスの計測温度に大きく差がある。これは実験日の日差しの変化が大きく、遮光ケースの効果がなかったことが原因だと考えられる。気温が比較的安定している7月の実験においても、データロガーとアメダスの数値に4℃程度の差が見られる。この計測温度の差は遮光が不完全なデータロガーが歩道から反射した日光による熱の影響によるものだと考えら



(a)2 月



(b)7 月

図6 実験中の気温

れる。7月の気温における13時00分と14時20分頃の気温の上昇は日射によるものである。

実験中の気温の変化による対象橋梁の固有振動数と減衰定数への影響が考えられるが、対象橋梁の主部材であるコンクリートは比熱が大きいため、気温の変化があっても部材の温度変化は少なかったと考えられる。

4.2 ERA 解析の結果と考察

前述の方法から、本実験で得られた振動データに対して ERA 解析を行った。センサーのサンプリング周波数から 25Hz 以下のモードを解析対象とした。固有振動数と減衰定数を表1に、モード形状を図7に示す。表1における各モードの固有振動数および減衰定数は平均値である。モード次数は鉛直方向のモードにおいて、振動数の低いものから番号を設定した。モード形状は赤い実線が上流側、緑の破線が下流側を表している。2月の実験において1基のセンサーでデータを取得できなかったため、上流側のスパン 17.92m でモード振幅が描けなかった。モード形状の振幅は各振動データから得られたモードの振幅を最大値で無次元化し、すべてのデータの平均値で表している。本橋梁は縦断勾配があるが、モード図では考慮していない。

表1 固有振動特性

実験日 (気温)	2 月		7 月	
次数	固有 振動数 (Hz)	減衰定数	固有 振動数 (Hz)	減衰定数
1	3.068	0.0081	2.933	0.0127
2	5.211	0.0158	5.013	0.0394
3	7.697	0.0322	7.588	0.0323
4	12.844	0.0214	12.282	0.0351
5	14.861	0.0177	14.181	0.0221
6	18.492	0.0186	17.740	0.0196
7	21.459	0.0085	19.792	0.0095

表2 固有振動特性の比較

次数	変化率(%)	
	固有 振動数	減衰定数
1	95.59	156.47
2	96.20	250.02
3	98.58	100.36
4	95.62	163.81
5	95.42	125.20
6	95.93	105.34
7	92.23	112.63

表1から2月と7月を比較すると、1次から7次のすべてのモードで7月の固有振動数の方が低いことがわかる。一方、減衰定数は大きくなっている。各モードの固有振動特性を比較したものを表2に示す。表2の各値は変化の割合を表している。固有振動数および減衰定数はそれぞれ以下の式(1)、(2)で算出する。

$$\frac{f_{Jul}}{f_{Feb}} \times 100(\%) \quad \text{式(1)}$$

$$\frac{h_{Jul}}{h_{Feb}} \times 100(\%) \quad \text{式(2)}$$

f_{Feb} : 2月の固有振動数 f_{Jul} : 7月の固有振動数

h_{Feb} : 2月の減衰定数 h_{Jul} : 7月の減衰定数

固有振動数に関しては、3次モードで1.42%、7次モードで7.77%低下しており、1, 2, 4, 5, 6次モードでは4%前後低下している。減衰定数に関しては、すべてのモードにおいて増加しているが、ほぼ変化のない3次モードや2倍以上増加した2次モードのように値にバラつきがある。

解析の結果、温度が上昇すると固有振動数が低下しており、温度と固有振動数の関係が確認できた。一方、減衰定数の値はすべてのモードで大きくなっているがバラつきが大きく、温度との関係を確認できなかった。また、2月と7月それぞれの実験中における最も気温差の大き

な時刻の振動データの解析結果を確認したが、1日の約10サンプルの測定結果では固有振動数の変化はほとんどなかった。

実橋梁において、気温の変化によって部材が伸縮することで固有振動数が変化することが考えられる。本実験の結果から低い気温に比べ、高い気温のときの固有振動数は低くなることがわかった。既往の研究において、気温による固有振動数の変動を確認しており、気温が低いときに比べ、気温が高いときに固有振動数が低くなることを確認されている^{5), 6)}。一方、気温以外に風速によって固有振動数および減衰定数が変化することも報告されている⁷⁾。

5. まとめと今後の課題

本研究では気温の変化が実橋梁の固有振動特性へ与える影響を調べるために、季節の異なる2回の実橋梁振動測定実験を行い、固有振動数と減衰定数の比較を行った。振動データの解析にはERAを用いた。実験は2013年2月と同年7月に行った。実験結果を比較し、気温による固有振動数と減衰定数の変化を確認した。

今後の課題としては、実橋梁振動測定を定期的に行い、固有振動数と温度の関係をより正確に把握することである。また、対象構造物付近の気温や部材温度の計測を精度よく行う必要がある。

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：25870025）ならびに、北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会の研究助成による支援を得ました。また、実験の実施に際して北見工業大学工学部社会環境工学科の西山勝隆氏の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 綿崎良祐，岡本覚人，潘凱凱，宮森保紀，三上修一，山崎智之：橋梁振動測定のための Imote2 スマートセンサーにおける電源システムの改良，土木学会全国大会，第68回年次学術講演会講演概要集，CS6-008，2013.
- 2) ISHMP : SHM-H Board High-Sensitivity Accelerometer Sensor Board Datasheet and User's Guide , <http://shm.cs.uiuc.edu/>, 2009.
- 3) 長山智則，阿部雅人，藤野陽三，池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解，土木学会論文集，No.745/I-65，pp155-169，2003.
- 4) 気象庁：アメダス，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 5) Yasunori Miyamori, Rihua Tan, Toshiyuki Oshima, Makio Kimura : 3 Years Remote Vibration Monitoring of a Cable Stayed Bridge, ANCRISST : The Fourth International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, pp97-102, 2008
- 6) 奥村俊博，岡村隆敏，本山雅規，樺山好幸，室井智文：振動遠隔モニタリングによるPC主桁橋梁の固有振動数の長期的変動について，土木学会西部支部研究発表会，I-042，pp83-84，2009.
- 7) 栗田哲，森本淳，木村仁紀，千葉一樹：連続振動モニタリングに基づく建物の振動特性の変動と風速の関係，日本建築学会大会学術講演概要集，21357，pp713-714，2009.

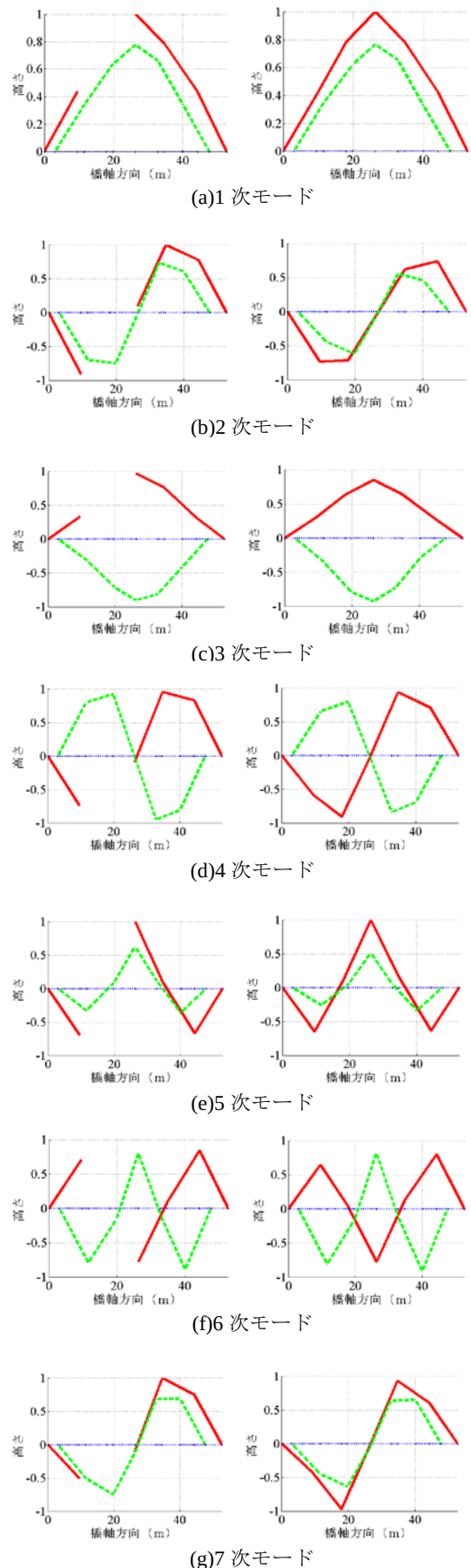


図7 モード形状(左：2月 右：7月)