

piezo素子を活用した振動センサとモニタリングシステムの開発

西條 雅博*・石塚 理*・香川 紳一郎**

Development of a Vibration Sensor Using Piezo-electric Elements and Its Monitoring System

Masahiro SAIJO*, Osamu ISHITSUKA* and Shinichiro KAGAWA**

Abstract

OYO Corporation and Akita Prefectural University have been jointly developing a low-cost bolt-type vibration sensor (“vibration sensor”) using piezo-electric elements and a power-saving wireless logger to monitor roadway infrastructure. This vibration sensor does not require a power supply for measuring and has a robust, simple construction, thus enabling a low-power, long-term monitoring system to be built. By using this vibration sensor to acquire data for a road bridge in Akita Prefecture, we found a correlation between the traffic vibration caused by various vehicles passing over the bridge and the output of the vibration sensor, enabling the sensor to monitor traffic and the load of passing vehicles. Furthermore, as the measured peak values of the frequency spectrum were similar to the peak values of the accelerometer installed adjacent to the vibration sensor, the sensor can also be used for vibration monitoring instead of an accelerometer. In the future, the sensor durability, physical value conversion of measured values, and reliability of the system will be jointly evaluated with university using a system with a stand-alone power supply. Long-term data acquisition and analysis will be required in order to judge structural soundness by monitoring.

Keywords: Piezo-electric element, Vibration sensor, Monitoring system, Roadway infrastructure, Wireless

(要 旨)

応用地質株式会社と秋田県立大学は、道路インフラを対象としたモニタリングを行うために、 piezo素子を用いた安価なボルト型振動センサ（以下「振動センサ」）および省電力無線ロガーの開発を産学協同で取り組んできた。共同で開発した振動センサは、計測用の電源が不要であるとともに構造がシンプルで故障しにくいことから、省電力の長期モニタリングシステムの構築が可能と考えた。今回、秋田県内の道路橋において振動センサを用いてデータを取得した結果、各種通行車両の通行振動と振動センサの出力値に相関があり、通行量や通行車両荷重のモニタリングとして利用可能であることが分かった。また振動センサからは、隣接して設置した加速度計と同様な周波数スペクトルのピーク値が計測できたことから、加速度計に替わる振動モニタリングに適用可能であることが分かった。今後は自立型電源によるシステムの構築および振動センサの耐久性の向上、測定値の物理量への換算、システムの信頼性などの評価を大学等との共同研究にて進める。さらに今後、構造物のモニタリングによる健全度判定を行うためには、長期的なデータの蓄積・解析が必要である。

キーワード: piezo素子, 振動センサ, モニタリングシステム, 道路インフラ, 無線

*計測システム事業部 **エンジニアリング本部

* OYO Corporation Instruments & Solutions Division ** OYO Corporation Engineering Headquarters

1. まえがき

高度経済成長期に整備された社会インフラの多くは、建設後 50 年を迎え老朽化が懸念されている。国土交通省によると橋長 15 m 以上の橋梁 14 万橋のうち補修が必要な橋梁は、全国に約 6 万 9 千橋あるとされ、全体の 48% を占める¹⁾。現在橋梁等の道路インフラ（以下インフラと記述）の定期点検は、平成 26 年度から 5 年毎に実施することが道路法のもと法定化されたところである。その内容は、定性的な目視検査が主であり一部に打音検査なども併用されている。目視検査では、点検結果に点検者の主観が入りやすく点検者の技量に左右される。また構造物の見えない部位や見落としなどが指摘されており、点検結果にバラツキが生じ易いことが大きな課題とされている。さらに必要に応じて、機械足場の使用や足場の敷設が必要なため、高コストとなっている。加えて、少子高齢化社会の到来とともにインフラの点検従事者や経験技術者が急激に減少しており、点検の効率化が急がれている。

こうした維持管理を取り巻く環境の変化のなか、定量的な評価技術の一つとしてモニタリングシステムが期待されている。モニタリングシステムは、あらかじめ対象構造物にセンサを取り付けて長期間データを収集/解析し、異常時には警報を発生して、自動で通行止めの標識を出すといった対策を講じることが期待されているシステムである²⁾。

現在実用化されているモニタリングシステムは、光ファイバーセンサや多数の変位計を使用して微小な変位や変形をモニタリングするシステムが運用されているが、これらは装置が大掛かりであり、高価であるため財政規模の小さい自治体が管理するインフラへの適用は困難であると考えられる。

そこで当社は秋田県立大学と共同で、このようなインフラのモニタリングを対象に、 piezo 素子を用いた安価なボルト型振動センサおよび省電力無線ロガーの開発を行った。 piezo 素子を用いた振動センサは、センサの構造を単純にする事ができ、安価で故障が少なく、センサ用の電源供給が不要であるため、長期間の連続した計測が可能と見込んでいる。このため大きな社会問題となっている自治体が管理するインフラを対象に、低コストで異常検知が可能なモニタリングシステムに適していると考えた。

なおボルト型振動センサは、「ボルト型ひずみ検出器」(特許第 5487441 号)で特許取得済みである。

2. システムの概要

2.1 piezo 素子を用いたセンサ

piezo 素子とは、強誘電体の一種で振動や圧力などの力が加わると電圧が発生し、また逆に電圧が加えられると伸縮する圧電素子である。主にアクチュエータやマイクロフォン等に使用されている。今回この piezo

素子の一種であるプラスチック PVDF (PolyVinylidene DiFluoride) を使用した piezo ケーブル (図-1) を用いたボルト型振動センサ (写真-1) を開発した。

開発したボルト型振動センサは、測定対象構造物への取り付けを考慮したボルトの形状で、内部の piezo ケーブルをウレタン樹脂で充填した単純な構造とした。この構造により、 piezo 素子検出部分を保護しながら振動や変形の検出能力を損なわずに、高い感度を備えたセンサとなった。また構造を単純化することにより安価に製造が可能である。なおウレタン樹脂は耐摩耗性、耐候性に優れた素材であるため、屋外での使用に適している。

ボルト型振動センサの出力はボルト両端間の動的変形 (屈曲・圧縮) に伴い電圧が発生する。これは一般的なセンサと異なり電源供給の必要が無い。したがって、センサやケーブルが機械的に切断されない限り故障する可能性が著しく低く、長期安定性の高いセンサである⁴⁾。またセンサ用の電源供給が不要なため、省電力システムの構築が可能と考えられる。

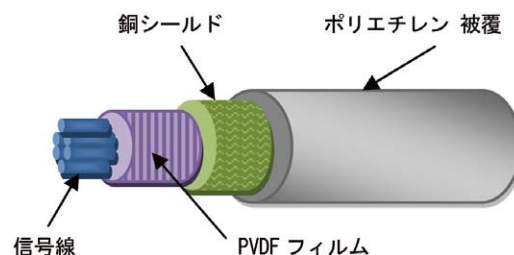


図-1 piezoケーブルの構造³⁾

Fig.1 Structure of piezo cable

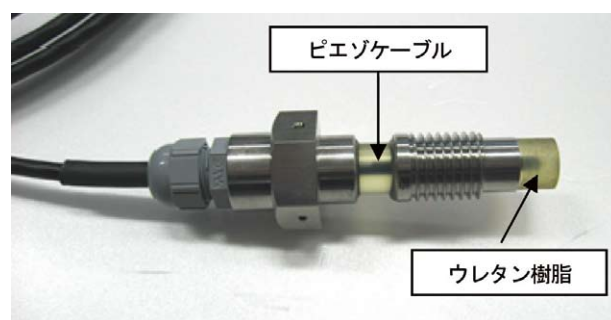


写真-1 ボルト型振動センサ

Photo 1 Bolt-type vibration sensor

2.2 センサ特性

ボルト型振動センサの基本特性について、振幅と周波数応答特性を振動試験により検証した。試験方法は、振動試験機に固定治具でボルト型振動センサを取り付け (写真-2)、レーザ変位計で振幅を 0.05, 0.1, 0.2[mm] に調整した時の振動周波数とボルト型振動センサの出力について測定した。図-2 に示す測定結

果より、センサ出力は振動周波数と比例関係にあり、振幅の大きさも比例した結果を得られた。また、同様に周波数特性試験を実施した結果、図-3に示すように1Hzから40Hz付近までは平坦な周波数特性を示した。

この結果よりボルト型振動センサは、振動の周波数

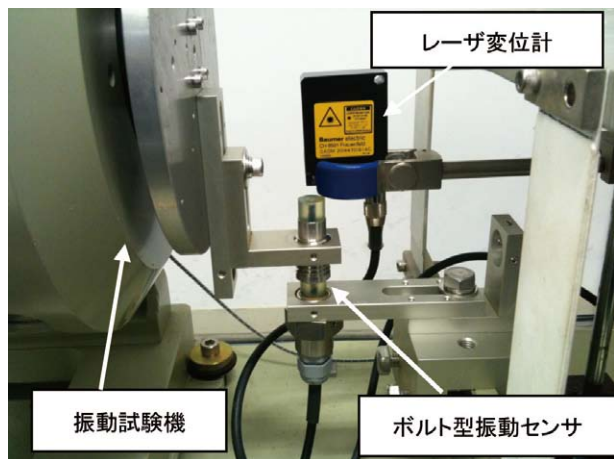


写真-2 基本特性試験状況
 Photo 2 Basic property test in progress

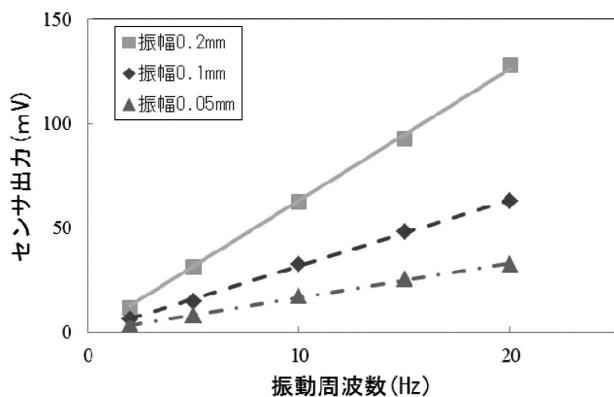


図-2 振動特性試験結果
 Fig. 2 Results of vibration characteristics test

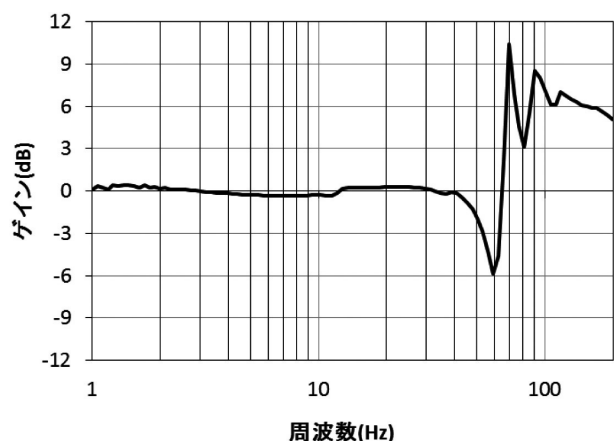


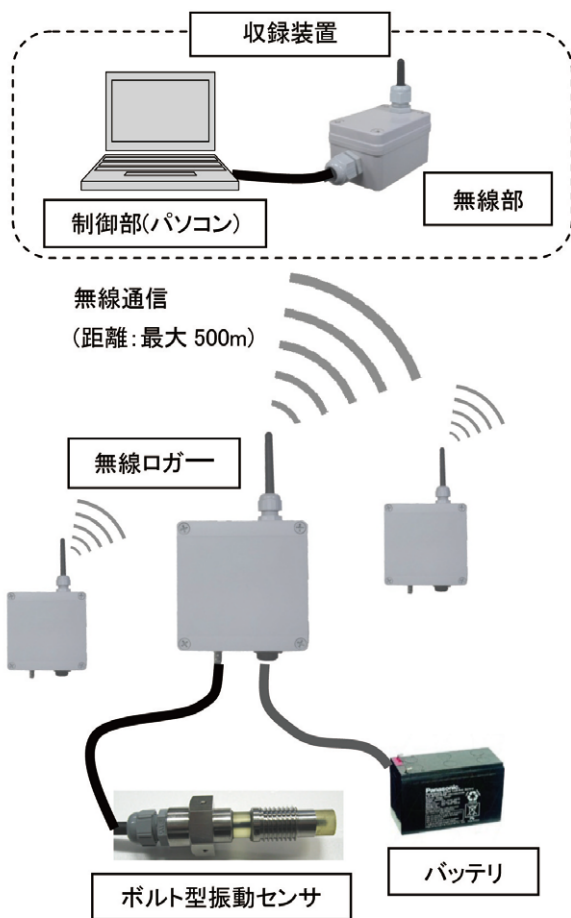
図-3 周波数特性試験結果
 Fig. 3 Results of frequency characteristic test

や振幅の変化を捉えられる振動センサとして利用可能であると判断した。

2.3 モニタリングシステムの構成

図-4に示すモニタリングシステムは、ボルト型振動センサの出力を計測する無線ロガーと、無線によりデータを収録する収録装置から成るシステムである。

無線ロガーは、収録装置からの時刻と通信タイミングで同期制御をしているため、複数での同時刻計測が可能である。また2.4GHz省電力無線通信 (ZigBee)



| | |
|---|---------------------------|
| <仕様> | |
| 無線ロガー | |
| センサ入力 | 1ch |
| サンプルング | 100Hz |
| メモリ容量 | 2 分間分データ |
| 無線周波数 | 2.4GHz 帯 |
| 電 源 | 12V バッテリ |
| 外形寸法 | 125×125×60mm |
| ※バッテリーで約3ヶ月の測定が可能 (バッテリー 12V7.2Ah, 1 時間に 1 分測定の場合) | |
| 収録装置 | |
| パソコン | Windows7 ノート PC |
| 接続方式(無線部) | . USB |
| 外形寸法(無線部) | . 95×65×55mm |

図-4 モニタリングシステム構成図と仕様
 Fig. 4 Configuration and specifications of monitoring system

によりケーブル配線が不要で設置が容易である。なおバッテリー駆動のため、ソーラーセルを併用した長期観測も可能で、インフラモニタリングに適したシステムと考える。

3. 試験計測事例

3.1 仮設橋での実装実験

(1) 実験内容

ボルト型振動センサが、通行車両の車重の違いによる振動の大きさを比較できるかを、モニタリングシステムを用いて実験を実施した。

(2) 実験状況

実験を行った橋梁は、秋田県内の子吉川に架かる全長約 175 m の仮設道路橋（プレートガーダー橋）において、大学および市役所建設部の協力を得て実施した。

実験は、左岸側の橋脚の一部にセンサを取り付け、

一般車両の通行状況を確認しながら計測した。ここでは、車両通過時の振動が大きく発生すると推定される主桁間、および主桁と橋脚間に取り付けて実施した（写真-3）。

(3) 実験結果

図-5に示したボルト型振動センサの出力より、通過車両の荷重を受けて橋梁が振動し大きなセンサ出力が計測されている箇所が数ヶ所ある。つまりこれは車両の通過時に生じた振動に反応したことを示している。また、通過した車重が最も重い重量トラック（6～8t）と他の乗用車（約2t）では、車重にほぼ比例した出力が示されている。

以上の測定結果より、ボルト型振動センサで通過車両の検出と、その出力の大きさより通過車両の重量判別が可能であることを示唆している。これより走行速度や路面接地状態による出力の差異はあるものの、橋梁が劣化する要因の一つと考えられる過積載車両の通行量モニタリング等への活用が可能であると考える。



写真-3 仮設橋外観およびセンサ取り付け状況

Photo 3 View of temporary road bridge test site and sensor locations bridge

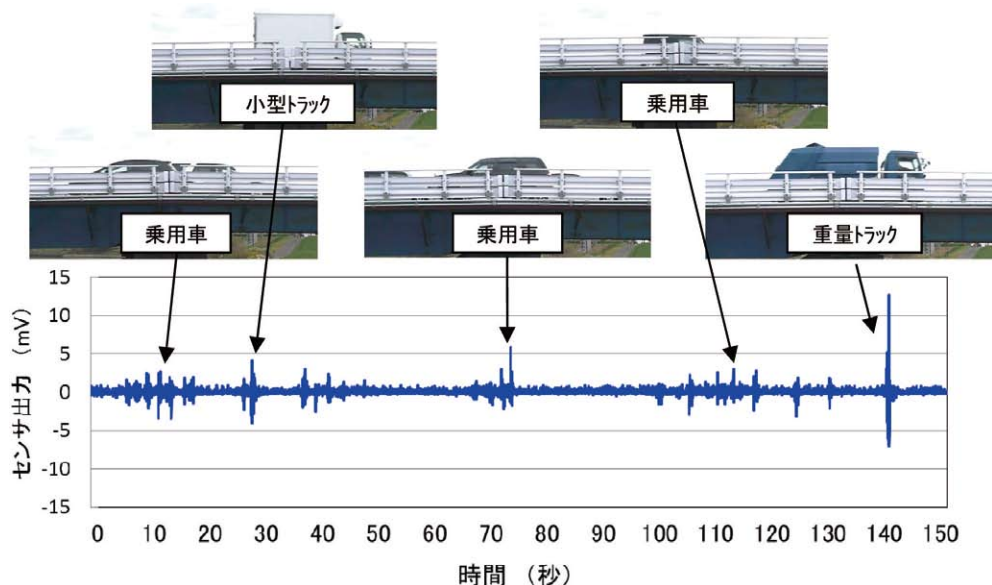


図-5 通行車両とセンサ出力結果

Fig. 5 Vehicular traffic and results of sensor output

3.2 実橋梁での比較測定試験

(1) 試験内容

ボルト型振動センサと加速度計, レーザ変位計の同時計測を行い, 周波数スペクトル等の比較計測を実施した.

(2) 試験状況

飛鳥大橋は, 秋田県内の子吉川に架かる橋長 380 m



写真-4 試験橋梁外観
 Photo 4 Appearance of test site bridge

で全7スパンと橋脚8基から構成されている1979年に竣工(供用後54年)した鋼単純桁橋(写真-4)である. 本試験は, 大学および県の建設部の協力を得て実施した. 測定は左岸側に架かる橋梁の最初のスパン31.25mの区間とし, 図-6に示す位置の主桁と橋脚間および床版にセンサを取り付けた.

飛鳥大橋は54年が経過した老朽橋ではあるが, 目視による破損やクラックは認められない. また管理者により実施された定期点検結果からも健全性が確認されている. このため通行車両の振動も小さく, センサ出力も小さいことが予想されるため, 主桁の振動が捉えられるような方向へセンサを7ヶ所取り付けた. なお, 同箇所には比較用の加速度計(リオン製PV-87)を併せて取り付け, 床版中央部には, 変位状況を測定するためレーザ変位計を取り付けた. また, 振動荷重として大型ダンプ(車体重量19t)を走行させて計測した.

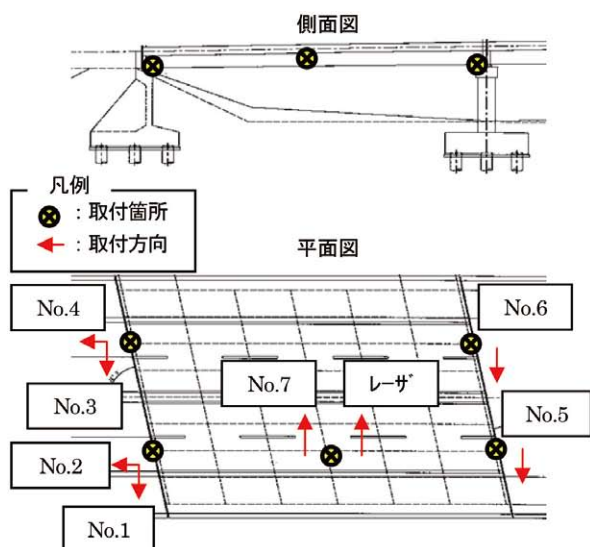


図-6 センサ配置図および取り付け状況
 Fig. 6 Sensor layout and installation

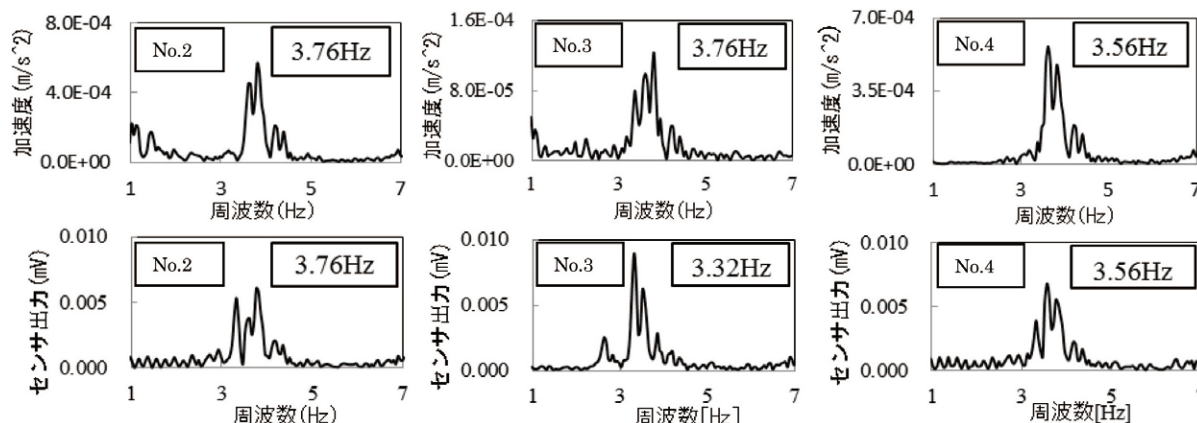


図-7 周波数スペクトルの比較 (上段: 加速度計, 下段: ボルト型振動センサ)
 Fig. 7 Comparison of frequency spectra (Upper : Accelerometer, Lower : Bolt-type vibration sensor)

(3) 実験結果

ボルト型振動センサと加速度計で測定されたデータの周波数スペクトルについて、全てのセンサで同様な傾向が見られた。ここでは比較的ノイズ影響の少ない3地点について整理した結果を図-7に示す。同地点で計測したボルト型振動センサと加速度計の周波数スペクトルのピーク値の比較では、両センサの結果がほぼ一致しており、加速度計と同様の振動を捉えたといえる。この結果から被測定対象物の固有振動数の変化を検知するモニタリングとして、ボルト型振動センサの利用は可能であると考えられる。

地点 No.7 において荷重車両がセンサ上部を通過した際の床版の変位について、レーザ変位計とボルト型振動センサ（積分処理）の測定結果を図-8に示す。レーザ変位計の出力が約 0.15 mm の変形に対し、ボルト型振動センサ出力も近似した出力となっていた。ただし、ボルト型振動センサは動的変形により信号が出力されるため、特に床版の変形が戻る時に出力が大きく出る傾向にある。このためボルト型振動センサの出力電圧から変位に直接換算することは出来ないが、レーザ変位計の最大値とボルト型振動センサの振幅値の関係より、最大の変位量を導くことは可能と考えられる。

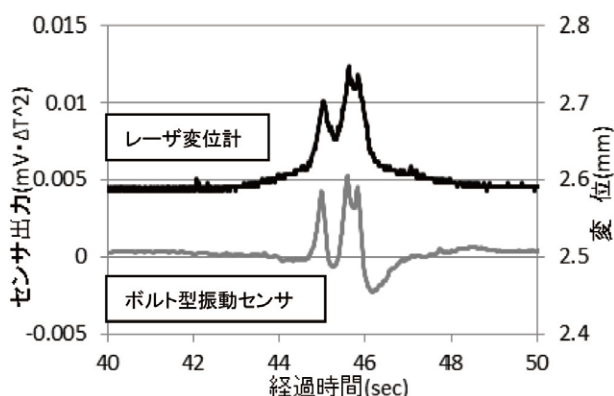


図-8 床版の変位状況

Fig. 8 Displacement of floor slab

4. まとめ

今回の実験や試験結果を以下にまとめた。

- ①ボルト型振動センサの出力は、振幅や振動数に比例した出力が得られるため、無電源振動センサとしての活用が可能である。
- ②仮設橋梁における実験結果から、通行車両の車重で発生した振動の大きさに比例した出力が得られたことを確認した。これにより車重の判別が可能と考えられ、過積載車両等の通行量モニタリングとして活用が可能である。
- ③加速度計との比較結果から、同様な周波数スペクトルのピーク値が得られたことにより、構造物の固有

振動を評価するモニタリングに適用できる可能性がある。

以上のように、加速度計に替わり振動計測に適用できる可能性があることが分かった。またセンサが安価なため、同じ条件で計測を行う場合は、約 1/5 程度のコストでモニタリングが可能と想定している。

今後、長期的な観測を必要とするインフラのモニタリングに適用するためには、自立型電源によるシステムの構築が望まれる。これにより電源供給が不要なボルト型振動センサ、低消費電力無線、エネルギー・ハーベスティング（環境発電技術）と当社のモニタリング技術を組み合わせる技術開発を行うことにより、自立型電源によるシステムの実現が可能と考える。

5. あとがき

本論文では、ボルト型振動センサの適用の可能性を述べたが、インフラ監視用のセンサとして活用する場合にはいくつかの課題がある。

現在、実施中である長期的な試験計測を継続してデータを蓄積し、季節変動の影響、センサの耐久性の向上、測定値の物理量への換算、システムの信頼性などの評価をする必要がある。また構造物のモニタリングによる健全度判定を行うためには、長期的なデータの蓄積・解析が必要であり、構造物の振動データの解析評価技術の確立を図っていく必要がある。

今後、秋田県立大学との共同研究で進めた本開発と実証実験を基により実績を重ね、インフラ監視用のモニタリングシステムとして実用化を目指すものである。

最後に、由利本荘市役所建設部ならびに秋田県由利地域振興局建設部のご協力に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省. 道路の老朽化対策—都道府県別点検実施状況・計画策定状況・修繕進捗状況(一覧表)—長寿命化修繕計画に基づく修繕実施状況(H25.4時点). 国土交通省.
<http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>, (参照2014-05-09).
- 2) 加藤文昭. インフラモニタリング. MDBトレンドレポート. (株)日本能率協会総合研究所, 2014, p.6.
- 3) (株)東京センサ. ピエゾポリマー同軸ケーブル. PIEZO FILM PRODUCT INFORMATION. (株)東京センサ, 2012, p.15.
- 4) 下井信浩, 西條雅博. 橋梁の危険予知用簡易スマートセンサの開発. 計測自動制御学会論文集. 2012, 48, 12, p.816-821.