

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2011～2012
課題番号：23656289
研究課題名（和文） 橋梁振動モニタリングのための自己発電・蓄電機能を有する無線センサノードの開発
研究課題名（英文） Development of wireless sensor nodes with self-powered and accumulating modules for bridge vibration monitoring
研究代表者 川谷 充郎（KAWATANI MITSUO） 神戸大学・大学院工学研究科・教授 研究者番号：00029357

研究成果の概要（和文）：近年、無線センサノードは橋梁の健全性評価のための重要なツールとして期待されている。本研究では、無線センサノードの電源として圧電素子が利用できるかどうか調査した。室内実験を通じて、圧電素子の発電効率は、構造物のひずみの大きさに依存することが明らかとなり、結果として、ひずみレベルが 20μ から 30μ であれば十分に発電し、所定の条件を満たせば無線センサノードの電源として機能することが分かった。

研究成果の概要（英文）：Recently, a wireless sensor node has been expected as one of important tools to assess the structural health of bridges. An attempt in this study is made to investigate an applicability of PZT for a power source of wireless sensor nodes. From laboratory experiments, it is observed that piezoelectric property depends on the magnitude of strain of the structure. As a result, it was found that PZT can be available as a power source of wireless sensor nodes if some requirements can be satisfied.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：維持管理工学，橋梁損傷推定，振動モニタリング，MEMS センサ，圧電素子

1. 研究開始当初の背景

戦後整備された多くの社会基盤施設の老朽化が急速に進行している中、維持管理の効率化のため、無線センサノードを用いる振動モニタリングに大きな期待が寄せられている。一方、振動モニタリング用無線センサにおいて解決すべき課題として、1) 無線通信時のデータ欠損、2) 耐久性、3) 電源確保の3点が挙げられる。特に、様々な場所に整備されている社会基盤施設の特徴を考えると、電源確保は無線センサによる振動モニタリングの成否の鍵になっている。「データ欠損」と「耐久性」については、申請者が代表者として推進している平成 19 年度採択（平成 21 年度まで）萌芽研究課題「橋梁・走行車両同時計測による橋梁損傷推定のための MEMS の開発」により検討を進めている。研

究当初、電源として太陽電池や風力発電を考えていたが、経済的観点から望ましくないとの結論に至っており、対案として「圧電素子（Piezoelectric material）が貼られた構造部材が振動・変形する際に生じる電位差を電力として回収し、無線センサの電源として利用」する新たな研究に挑戦する着想に至った。

2. 研究の目的

本研究は、橋梁振動モニタリングのツールとして大きな期待が寄せられている無線センサノードの実用化において解決すべき課題である電源確保に着目し、「圧電素子（Piezoelectric material）が貼られた構造部材が振動・変形する際に生じる電位差を電力として蓄電し、無線センサの電源として利用」する新たなアプローチに挑む。特に、発電量

が少ない圧電素子発電の欠点を補うため蓄電機能を導入する無線センサノードの開発を目的とする。通常の橋梁振動モニタリングは24時間連続して行われることはなく、決められた時間間隔でモニタリングすればよいことが多いことから、少ない発電量を蓄電して利用することに注目している。

3. 研究の方法

(1) 圧電素子の選定

振動発電の媒体となる圧電素子の整備を行う。市販の圧電素子の種類は多く、その値段および特性も様々である。したがって、市販圧電素子の特性検討による圧電素子の選定は、本研究の成否にかかわる重要なプロセスである。一般に、圧電セラミックスと薄い金属板を貼り合わせた圧電素子、あるいは樹脂系のフィルム式の圧電素子も開発されており、場合によっては橋梁部材に直接貼るような発電も考えられる。この圧電素子の選定と並行して、提案される振動発電システムの性能検証のため、申請者保有の模型橋梁車両走行実験装置および無線センサノードを含む振動計測システムを整備する。図1に平成19年度採択萌芽研究により開発中の無線センサを示す。

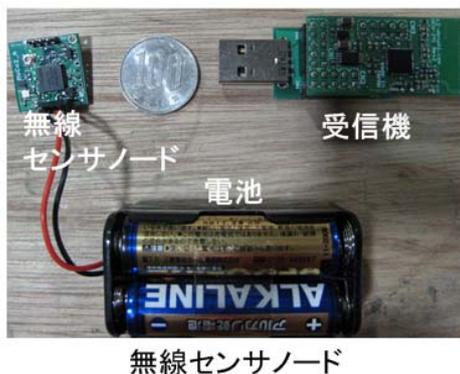


図1 試作無線センサノード

(2) ひずみ・振動特性と発電量の相関関係を検討するための室内実験

圧電素子を用いる振動発電の性能に関わる因子として、圧電素子そのものの性能以外に、圧電素子が貼られる構造物（構造部材）のひずみ量や振動特性も重要な因子になる。特に、橋梁のような振動モニタリング対象構造物の振動特性は様々であり、圧電特性のひずみ・振動依存性を明らかにしておく必要がある。本研究では、模型橋梁車両走行実験装置および疲労試験中の鋼板を圧電素子の被着体として用いる。

(3) 蓄電回路の設計および基板の試作品製作

選定される圧電素子により効率よく発電

および蓄電を可能にする蓄電回路の設計および試作品の製作を行う。特に、開発中の無線センサノードのデータ送信時の必要電流は20mA程度であることが分かっており、定期的に20mAが得られるように検討する。

(4) 自己発電機能を有する無線センサノードによる振動計測

提案される「振動発電システムと無線センサノードとの組み合わせおよび性能検証」および「実用化に向け技術的検討」を行う。申請者が開発している無線センサノード（図1参照）に振動発電システムを組み合わせた試作品を模型橋梁車両走行実験装置の模型桁および疲労試験中の鋼板に設置し、強制荷重下による発電および蓄電の可能性を検証する。また、蓄電された電源による振動計測も行う。以上の結果を踏まえ、実用化に向け技術的検討を行い、供用構造物への適用可能性あるいは適用の際に解決すべき技術的問題を把握する。

4. 研究成果

(1) 圧電素子の選定

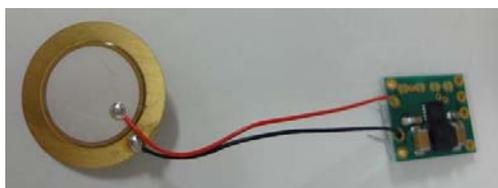
本項目では振動発電の媒体となる圧電素子の発電機能である圧電効果を調査した。市販の圧電素子の種類は多くその値段および特性も様々であるものの、結果として、曲げ振動(0.5Hz-10kHz)に反応する圧電ブザーなどに使用される圧電素子の発電効率が高いことが分かった。これに加え、今後は、樹脂系のフィルム式の圧電素子も開発されており、場合によっては橋梁部材に直接貼るような発電も検討する予定である。

(2) 振動特性と発電量の相関関係を検討するための室内実験

圧電特性を調べる際、当初は、模型橋梁車両走行実験装置を用いる予定であったが、より簡単に応力・ひずみを制御できる疲労試験中の鋼板に圧電素子を貼り付け、圧電特性の振動・ひずみ依存性を調査した。図2に圧電素子および実験状況を示す。

振動発電性能に関わる圧電素子の振幅について、鋼板のひずみレベルが大きい2200 μ の場合に、圧電素子そのものが疲労破壊に至り、発電効率が著しく低下することが明らかとなった。このことから、鋼板のひずみレベルを制御しながら、疲労試験下での圧電特性を調査した。結果として、鋼板の弾性変形範囲では引張・圧縮荷重下では線形な相関関係が存在することが明らかとなり、特に、20 μ ~30 μ 程度でも十分に発電することが明らかとなった。図3に疲労試験下の鋼板に圧電素子を取り付け、発電量をモニタリングした結果を示す。これは負荷を掛けた状況の約0Vから1.3V程度を変化している区間に着目し、

放電後終了（最低電圧）から充電（最高電圧）し放電終了までの1周期の電圧値を示している。なお、実験条件として、加振周波数 2Hz で鋼板に±30 μ のひずみを与えている。



(a) 圧電素子



(b) 実験状況

図2 圧電素子と実験状況

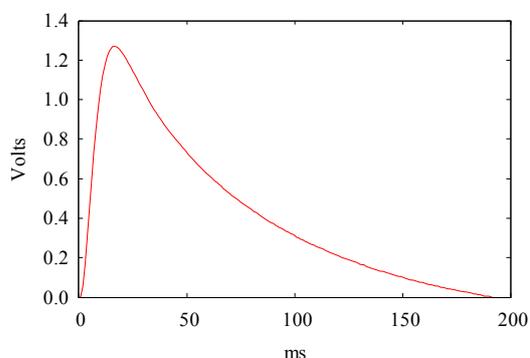


図3 最低電圧から放電までの電圧履歴

図3の結果をもとに、1k Ω の抵抗を接続する場合、1秒間に0.96mWsの電力量が蓄電されることとなる。この値は、加速度計測を100Hzのサンプリングで行うには、十分な電力量である。鋼板のひずみは極めて小さい±30 μ 程度であるものの、データ送信までの間に蓄電することで、PZT素子は十分に電源として機能すると考えられる。

(3) 蓄電回路の設計および基板の試作品製作

上記の検討で選定される圧電素子により効率よく発電および蓄電を可能にする蓄電

回路の設計および試作品の製作を行った。

(4) 自己発電機能を有する無線センサノードによる振動計測

研究代表者が開発している無線センサノードに振動発電システムを組み合わせた試作品により蓄電された電源による振動計測を行なった。計画していた模型橋梁車両走行実験装置と比較して実験効率の高い疲労試験機を利用した。それによる振動計測結果より、圧電素子を取り付ける被着体の振動・ひずみレベルが重要であることが判り、実橋梁での計測ではそのような測定部材の選定を行わなければならないことが分かった。具体的には、圧電素子の共振周波数帯として低周波域を確保し、さらに、被着体の変形により圧電素子そのものが破損しないよう強度を確保すべきであることが分かった。

以上の2年間の研究に基づき、実用化に向けた検討より、供用構造物への適用可能性の目途を付けることが出来、さらに適用の際に解決すべき技術的問題を把握した。構築済みのMEMSセンサにコンデンサを搭載し蓄電機能を付加することで、十分に自己発電・蓄電機能を有する無線センサノードを構築できることが分かった。

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4件)

- (1) K.C. Chang, C.W. Kim, M. Kawatani, Feasibility investigation for a bridge damage identification method through moving vehicle laboratory experiment, *Structure and Infrastructure Engineering*, 査読有, Vol.9, pp.1-18, 2013.
DOI:10.1080/15732479.2012.754773
- (2) C.W. Kim, R. Isemoto, K. Sugiura, M. Kawatani, Structural fault detection of bridges based on linear system parameter and MTS method, *Journal of JSCE*, 査読有, Vol.1, pp.32-43, 2013.
- (3) 金 哲佐, 伊勢本 遼, 川谷 充郎, 杉浦 邦征, 模型桁車両走行実験における異常診断の可能性の検討, *土木学会論文集A2 (応用力学)* (応用力学論文集Vol. 14), 査読有, Vol. 67, No. 2, pp.833-842, 2011.
- (4) 山本 亨輔, 利波 立秋, 大島 義信, 金 哲佐, 杉浦 邦征, 川谷 充郎, 車両応答の統計分析に基づく橋梁損傷検出法, *土木学会論文集A2 (応用力学)* (応用力学論文集Vol. 14), 査読有, Vol. 67, No. 2, pp.855-864, 2011.

〔学会発表〕（計 10 件）

- (1) C.W. Kim, S. Kitauchi, K. Sugiura, M. Kawatani, A year-long monitoring using in-service vibration data from a multi-span plate-Gerber bridge, Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE2012), 3-6 October, 2012, Vienna, Austria.
- (2) 野村 泰稔, 日下 貴之, 伊藤 智, PZT素子を用いたCFRP補強コンクリート接着接合部の界面剥離モニタリング, 土木学会第 67 回年次学術講演会講演論文集 CD-ROM, 講演番号: CS3-019 pp. 37-38, 2012 年 9 月 5-7 日, 名古屋大学.
- (3) M. Kawatani, C.W. Kim, H. Doi, T. Toshinami, Damage Identification of Bridges using Traffic-induced Vibration Data, The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM'12), 26-29 August, 2012, Seoul, Korea.
- (4) X. He, F.N. Catbas, H. Hattori, H. Furuta, M.Kawatani, T. Hayashikawa, T. Matsumoto, Development of a bridge damage detection approach using vehicle-bridge interaction analysis and soft computing methods, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012), 8-12 July, 2012, Stresa, Lake Maggiore, Italy.
- (5) C.W. Kim, R. Isemoto, K. Sugiura, M. Kawatani, Structural diagnosis of bridges using traffic-induced vibration measurements, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012), 8-12 July, 2012, Stresa, Lake Maggiore, Italy.
- (6) H. Hattori, X. He, F.N. Catbas, H. Furuta, M.Kawatani, A bridge damage detection approach using vehicle-bridge interaction analysis and Neural Network Technique, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012), 8-12 July, 2012, Stresa, Lake Maggiore, Italy.
- (7) C. W. Kim, R. Isemoto, T. Toshinami, M. Kawatani, P. J. McGetrick, E. J. Obrien, Experimental investigation of drive-by bridge inspection, 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5), 11-15 December 2011, Cancún, México.
- (8) K. Yamamoto, R. Isemoto, Y. Oshima, C.W. Kim, M. Kawatani, K. Sugiura, Field Experiment on Vibrations of a Steel Cantilever Truss Bridge before and after Applying Damage, The 2011 World

- Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM '11+), 18-22 September, 2011, Seoul, Korea.
- (9) R. Isemoto, C.W. Kim, K. Sugiura, M. Kawatani, Autoregressive Coefficients as an Indicator for Abnormality Detection of Bridges, The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM '11+), 18-22 September, 2011, Seoul, Korea.
 - (10) T. Kusaka, Y. Nomura, T. Nakamura, S. Ito, Debonding Detection System for CFRP-reinforced Concrete Structure Based on Evaluations of Elastic Wave Propagation, Proc. of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM11), pp.242, 19-21 September 2011, Kobe, Japan.

6. 研究組織

(1)研究代表者

川谷 充郎 (KAWATANI MITSUO)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00029357

(2)研究分担者

金 哲佑 (KIM CHUL-WOO)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80379487
野村 泰稔 (NOMURA YASUTOSHI)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号: 20372667
何 興文 (HE XINGWEN)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20454605
塚本 昌彦 (TSUKAMOTO MASAHIKO)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60273588