

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04641

研究課題名（和文）振動発電デバイスを用いた自律型インフラモニタリングシステム

研究課題名（英文）Self-Sensing Sytem with Micro Energy Harvester for Structural Health Monitoring

研究代表者

橋本 勝文（Hashimoto, Katsufumi）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：30609748

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：既存インフラの定常状態に加えて、豪雨や地震の突発的な作用発生後の変状の検知・安全性確保のため、近年で飛躍的・革新的な発展を遂げている高効率MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）振動発電デバイスの実装による変位・振動モニタリングにより、的確かつ低コストで構造物の状態を把握できる常時モニタリングシステムおよび緊急時アラートシステムを構築する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフラ構造物の点検業務・稼働に物理的な限界があり、状態変化と異常検知に時差が発生する。インフラ状点検作業を振動発電デバイス設置で置換することにより、振動発電デバイスが自己動作（発電）することでリアルタイムモニタリングが可能となる。また、構造物の変位・振動応答と精緻な整合データを出力可能な小型・安価なデバイスの開発による監視範囲の拡大と現場端末および管理サーバとのネットワークを構築できる。本研究の成果により、地方自治体および分野横断型研究開発体制と民間道路管理会社との連携による実務点検業務フローへの実装・実証的アプローチを示すことができる。

研究成果の概要（英文）：Micro energy harvesters (MEH) based on microelectromechanical systems (MEMS) are rapidly developing, providing a green and virtually infinite energy source. The electrostatic vibrational power generator outputs electric power when it vibrates, motivating us to apply it to vibrating civil infrastructures excited by daily loading or sudden event such as earthquake. An innovative monitoring system utilizing MEH devices was proposed for detecting structural health condition of social infrastructures and buildings. The change in natural frequency and amplitude could be monitored by the change in the generated power. A power generation index to detect the damage was proposed and its applicability was verified with the numerical models. The slab and pier models studied herein were simplified and the vibrations used to calculate the MEH generated energy were simply harmonic. More complicated structural types, models, and vibration patterns would help in generalizing the proposed methods.

研究分野：コンクリート工学，非破壊検査工学，維持管理工学

キーワード：社会インフラ構造物 維持管理 モニタリング MEMS 固有振動数 センシング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

対象物の振動をエネルギーに変換できる静電方式による高効率 MEMS 振動発電デバイス[引用文献]をセンシング機器として応用・活用し、構造物の常時・緊急時の状態把握が可能となるモニタリングネットワークの構築「最適解」であると申請者らは考えている。社会インフラを構成する構造物特有の低周波(数 Hz ~ 100Hz 程度)の環境振動において、圧電方式や電磁誘導式と比較して、小型で有利な発電効率を発揮して振動エネルギーを電気エネルギーへ変換する(「変位・振動 発電」)ことができる静電方式による振動発電デバイスを「センサ」として用いることで上述のシステムを確立する。即ち、図1に示すように、環境振動により設置したデバイスが自己動作により出力する発電量から、逆に、構造物の変位・振動挙動を取得する(「発電 変位・振動」)が、交通や自然(常時型事象)あるいは地震や洪水発生(突発型事象)による構造物の応答と発電量の関係を明らかとし、振幅および周波数に応じた発電量の変化と検知した状態の整合性を示す必要がある。

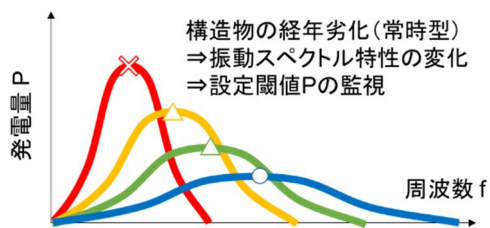


図1 a) 常時型モニタリング
定常振動スペクトルに着目した発電量の監視

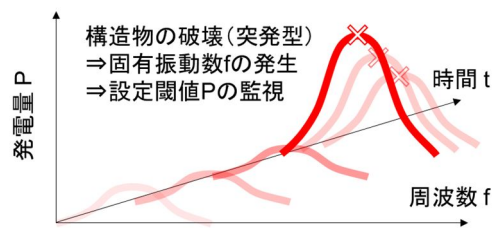


図1 b) 突発型モニタリング
特定の周波数帯域に着目した発電量の監視

2. 研究の目的

「高効率 MEMS 振動発電デバイスによるインフラ構造物のモニタリングおよびアラートシステム」の構築を目指す上で、簡易に設置できるセンサ端末の開発とともに、構造物への実装による現場での実証実験に適用する。

3. 研究の方法

(1) RC床版の剛性低下に関する MEMS 振動発電デバイスを用いた異常箇所検知システム

振動発電デバイス[引用文献]をRC床版に設置し、交通荷重の作用等に伴う供用環境中での自由振動を静電誘導により電気エネルギーへ変換することで発電し、発電した発電量から対象構造物あるいは部材の固有振動数および振動モード等の振動挙動を推定することで健全状態を把握することを本論文の目的としている。特に、複数のパネルから構成されるRC床版の振動特性評価モデルを作成し、剛性低下を模擬した有限要素解析を行い、変状の発生前後での振動特性を数値解析的に把握する。また、各パネルで構成される床版の任意箇所での静電誘導型の振動発電デバイスの発電量を算出することで、パネル単位の損傷発生状況に基づく健全性モニタリングのための振動発電デバイスの適用方法を提案する。

(2) 橋梁の低消費電力異常周波数監視システム

実際に橋梁上の自動車走行による振動を想定し、模擬橋梁と模擬車両を用意して、健全状態と損傷状態の振動周波数に違いを検証した。図2 a)に示すように全長 5.6 m (橋脚間)の模擬橋梁の 1/4 から 1/2 スパン部にかけて、事前に損傷を模擬して3箇所の切り欠きを入れておき、それらが露出した状態を損傷模擬状態(以下損傷状態)とした(図2 b)。また、この切り欠きを金属プレートで挟み込んだ補修状態を健全模擬状態(以下健全状態)とした(図2 b)。これは、実際の橋梁の補修でも行われる手法であり、例えば金属の鋼桁が腐食して減肉した場合などは、その腐食減肉部を金属プレートで補強することがある。

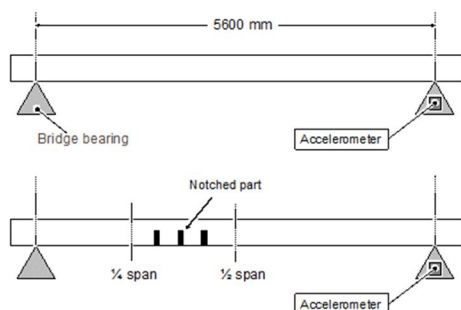


図2 a) 模擬橋梁
上: 健全 下: 損傷模擬



図2 b) 測定環境の概要
上: 切り欠き部 下: 補強プレート

模擬橋梁の支承部に取り付けた加速度センサで、健全状態と損傷状態のそれぞれを計測した振動加速度データを高速フーリエ変換 (fast Fourier transform: FFT) した結果について図 3 a) および b) を示す。振動加速度のデータを周波数ドメインで比較すると、損傷時に 204 Hz の加速度が卓越していることがわかる。

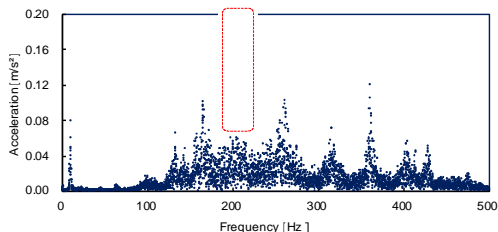


図-3 a) 健全時の周波数スペクトル

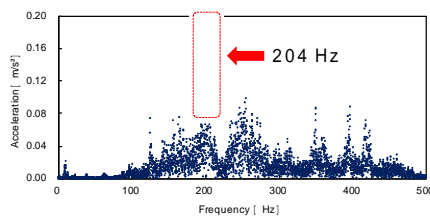


図-3 b) 損傷模擬時の周波数スペクトル

(3) MEMS 振動発電センサによる突発型異常検知システム

先行研究の結果、構造物が有する固有振動数に対して、分解能が 1Hz 以下となる狭帯域に特定の監視周波数を設定して、MEMS 振動発電デバイスからの出力電圧に閾値を設けることで、無電源での異常振動検知システムを構築した。これを地震時被災検知システムへ発展させるため、予め設定した振動挙動 (振幅・加速度・周波数) に対する閾値に基づいて、図 4 に示すような地震時応答に基づくイベントドリブ-ウェイクアップ機能を付与し、自己動作 (発電) する振動発電 MEMS デバイスを神経系のように無数に組み込まれた自律的に安心・安全を監視・確保するキャンパス施設を具現化する。

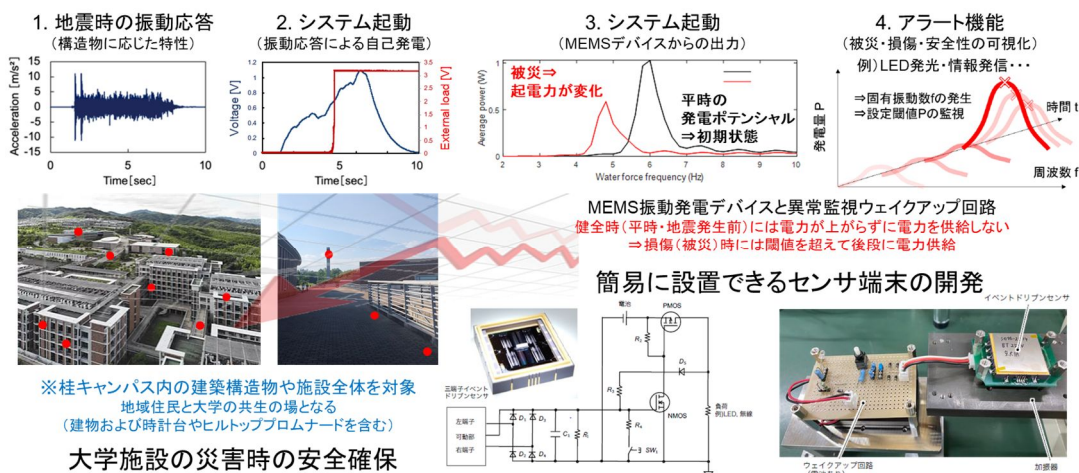


図 4 突発型異常検知システム概念

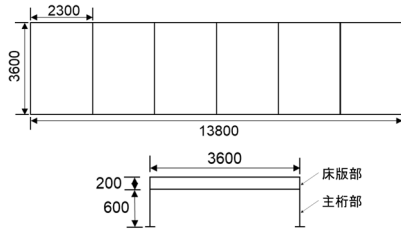
4. 研究成果

(1) RC 床版の剛性低下に関する MEMS 振動発電デバイスを用いた異常箇所検知システム

複数のパネルから構成される床版がすべて健全であると仮定すると、パネル間の発電量の比率は、No.0 の結果と常に同じでなければならない。RC 床版の FEM 解析モデルと材料特性値を図 5 に示す。また、損傷を模擬した RC 床版劣化モデルを図 6 に示す。No.0 のパネル 1~パネル 6 での発電量について、空間位置および振動モード (曲げ 1 次および曲げ 2 次を対象) に依存しない発電量の正規化を行う必要がある。これにより、算出される発電量にパネル位置に応じた補正係数を乗じることで No.0 と損傷後の発電量との相対的関係の差異を明確に表すことができる。上述の補正係数は以下の式を用いて導出した。

$$I_j = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{P_i}{P_j}}{6} \text{ for } j=1, 2, 3, 4, 5, 6$$

ここで、 I_j はパネル 1~パネル 6 の各パネルに対応する補正係数、 P_i と P_j は No.0 の健全な床版の各パネルでの発電量である。例えば、図 7 に示すように No.0 の健全モデルの発電量の分布から得られる補正係数を曲げ 1 次および曲げ 2 次モードにおいて劣化モデルの各ケースの発電量比に乗じることで、発電量の相対的関係を空間位置に依らず補正して表すことができる。また、健全モデルとの差異を発電量比の平均値を閾値として表すことができる。



RC床版のFEM解析モデル
(上：平面図 下：断面図 単位：mm)

	弾性係数	ポアソン比	密度
Steel	210 GPa	0.3	7850 kg/m ³
Concrete (健全)	60 GPa	0.2	2450 kg/m ³
Concrete (劣化)	15 GPa	0.2	2450 kg/m ³

図5 RC床版のFEM解析モデルと材料特性値

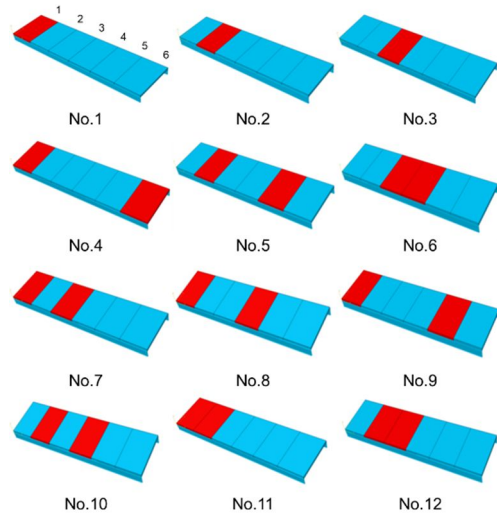


図6 損傷を模擬したRC床版劣化モデル

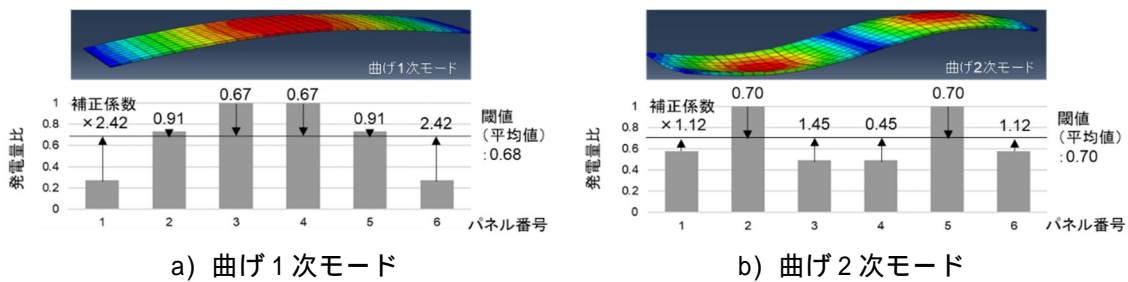


図7 補正係数と閾値決定の概念

以上の結果において、閾値を超えているものを損傷パネルと判定する方法について、判定方法の精度を全72パネルに対し確認を行った結果から、曲げ1次モードでは72.3% (57/72)、曲げ2次モードでは91.7% (64/72)であり、高い精度で剛性低下を生じているパネルを検出できることがわかった。2次の曲げ振動に着目することで、床版の疲労損傷を適切に評価できることが既往の研究[引用文献]でも示されており、MEMS振動発電デバイスを用いた本システムの妥当性においても同様の知見に従う結果となった。

(2) 橋梁の低消費電力異常周波数監視システム

損傷検知・異常発報センサモジュールを支承部に磁石固定で設置し、模擬橋梁上に模擬車両を走行させて実証実験した。その結果、健全時にはLEDは点滅せず、損傷時には模擬車両の走行開始後約3秒でLEDが点滅を始めた。次に、健全時、損傷時に蓄電キャパシタの電圧とLED(外部負荷)への電源供給電圧を計測した。なお、蓄電キャパシタ電圧はメインスイッチ・トランジスタの導通直後に電池によって自己保持されるため、計測の際には自己保持機能を除外した。その結果、図8 a)およびb)に示す通り、健全時のキャパシタ電圧は高々0.3V程度であり、電池電圧は供給されない。その一方で、損傷時のキャパシタ電圧は最大約1.1Vである。ここで、走行開始後3秒で0.7Vに到達し、外部全時には0.3μJ、損傷時には5.1μJであり、約17倍の発電量の差があった。

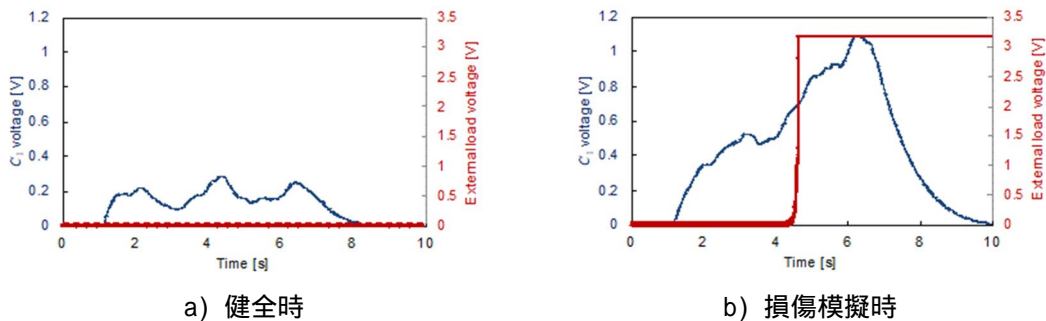


図8 キャパシタ電圧および電池電圧

(3) MEMS振動発電センサによる突発型異常検知システム

対象構造物とするクロックタワー、事務管理棟、プロムナードの振動特性を把握するために、

予備振動計測を実施した。予備計測結果より、クロックタワーが最終検討対象と選定した。特に、後述する地震動検知シミュレーションによるイベントドリブン型のセンサデバイス開発に向けた対象構造物とした。対象構造物の地震応答を生成するために、有限要素法で地震応答解析を行った。作成したモデルの固有振動数について、弱軸一次曲げモードは1.1Hz、強軸一次曲げモードは1.3Hzであり、計測値より一定比率で低くなっている。地震応答解析に入力とする地震動は示方書に提示されているLevel 1地震動（発生する確率が高い地震動）1通り、Level 2（発生する確率が低いが大きな強度を持つ地震動）、Type 2（内陸直下型地震）地震動3通りを用いた。地震動を検知してシステムを起動するイベントドリブン型の振動発電デバイスとするため、ウェイクアップ回路を図9に示すような構造とした。デバイスに入力するのはLevel 2地震の際の測定箇所の中で最も高い位置のデータを用いた。その結果に基づき、作製した振動発電デバイスでの出力電圧を算出した結果を図10に示す。これより、1~5Hz程度の低周波ピークを持つ地震動でも外部供給電圧が3.0Vに達しており、100Hzの共振を持つデバイスにおいても地震動を検知してイベントドリブンスイッチを駆動できることを確認した。

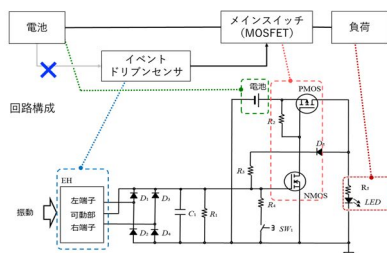


図9 イベントドリブン型ウェイクアップ回路

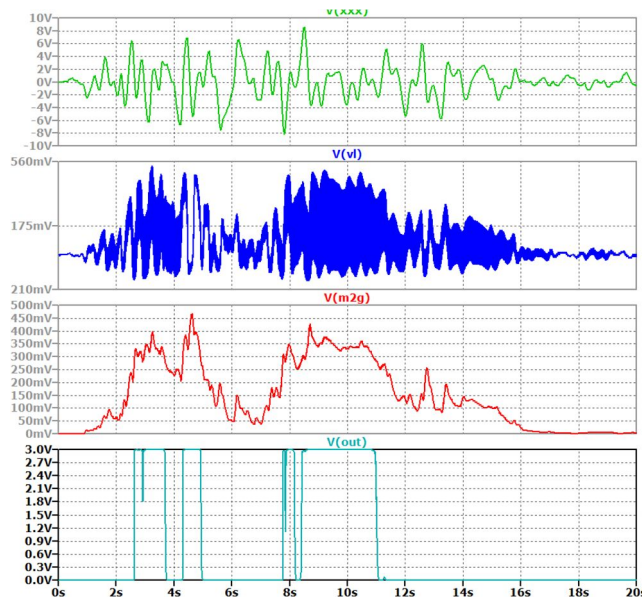


図10 振動波形・整流前後の発電電圧・供給電圧

以上により、イベントドリブンシステムにより動作した後に、電源と保持回路によってシステムの軌道を継続することができ、地震動によりセンサシステムのスイッチ動作が可能になった。なお、デバイス側の共振周波数と実際の環境振動との関係に基づく電圧の出力機構については、今後さらなる検討が必要と考えている。

< 引用文献 >

三屋裕幸，芦澤久幸，橋口原，本間浩章，藤田博之，年吉洋：インパルス振動に特化したコインサイズエナジーハーベスタ，センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム，Vol.33，No.25pm2-C-1，2016。

Koga, H., et al.: Development of a Cantilever-Type Electrostatic Energy Harvester and its Charging Characteristics on a Highway Viaduct, Micromachines, Vol.8, No.3, 293, 2017.

宮村正樹ほか：振動特性に着目したRC床版の疲労損傷度評価手法に関する研究，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1251-1262，2011。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 橋本勝文, 塩谷智基, 張凱淳, 川端康平, 三屋裕幸	4. 巻 21
2. 論文標題 RC床版の剛性低下に関するMEMS振動発電デバイスを用いた異常箇所検知システム	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 91-96
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hashimoto Katsufumi, Shiotani Tomoki, Mitsuya Hiroyuki, Chang Kai-Chun	4. 巻 10
2. 論文標題 MEMS Vibrational Power Generator for Bridge Slab and Pier Health Monitoring	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 8258 ~ 8258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app10228258	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Chang Kai-Chun, Hashimoto Katsufumi, Mitsuya Hiroyuki, Shiotani Tomoki	4. 巻 1
2. 論文標題 Electrostatic micro-electro-mechanical system vibrational energy harvesters for bridge damage detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Rise of Smart Cities, Elsevier Book Chapter	6. 最初と最後の頁 319 ~ 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/b978-0-12-817784-6.00016-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 構造物の診断システムおよび診断方法	発明者 塩谷智基、橋本勝文、三屋裕幸	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、7253205	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	張 凱淳 (Chang Kai Chun) (50751723)	京都大学・工学研究科・講師 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関