

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18039

研究課題名(和文) 機械スイッチ式非線形回路による振動発電素子の発電量向上と広帯域化

研究課題名(英文) Output Power Enhancement and Widening Frequency Band Width by Mechanically Switching Nonlinear Circuit in Vibration Energy Harvesters

研究代表者

浅沼 春彦 (Asanuma, Haruhiko)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：10757298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、振動発電素子の発電量向上と発電可能な周波数の広帯域化を狙い、機械スイッチ式非線形回路を開発した。機械スイッチとして、折り畳みバネ構造を設計し、高発電量化と広帯域化に必要な条件を明らかにした。また、非線形回路を利用した発電素子の性能を予測するため、電子回路と機械振動を連成解析する手法を確立した。解析の結果、非線形回路は発電量の向上を実現するが、一方で、電圧の昇圧により振動を抑制し発電量を下げることがあることを明らかにした。従来の電気スイッチと機械スイッチの性能比較をシミュレーションと実験の双方から検証し、電気機械結合が強い素子では機械スイッチが優れた性能を有することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In aiming at both increase in the output power and wider frequency band width in vibration energy harvesters, we proposed a mechanically switching nonlinear circuit. We designed a folded-spring structure for the mechanical switch, and revealed the optimal condition of the structure. Furthermore, we have developed a two-way coupling simulation technique that allows us to evaluate the practical performance of the harvester connected with the nonlinear circuit, alternately solving the simultaneous equation concerning the mechanical vibration and the electrical circuit. The numerical results show that the nonlinear circuit, which boots up the voltage, may suppress the vibrational amplitude and thus decrease the resulting output power. We investigated the performance for the electronic and mechanical switch nonlinear circuits, both numerically and experimentally, and revealed that the output power for the mechanical switch can exceed that for the electronic one in highly coupled harvesters.

研究分野：振動発電

キーワード：非線形回路 機械スイッチ 振動発電 広帯域化 連成解析

1. 研究開始当初の背景

近年、産業機械/車両/インフラ設備/構造物へ多数の無線センサモジュールを設置して温湿度/加速度/圧力/歪みなどの環境情報をビッグデータとして取得・解析し、生産性や安全性を向上させる試みが盛んである。このようなシステムはIoT (Internet of Things, モノのインターネット化) と呼ばれ、その実現の鍵を握るのは無線センサモジュールの開発である。無線センサモジュールは、主に、環境情報を取得するセンサ、低消費電力でデータを送信する無線機器、電力を管理・制御する電子回路部品、そして電源より構成される。無線センサモジュールは社会の至る所に無数に配備されるため、電源系統からコンセントを介して電力を得ることは難しい。現在は、小型のバッテリーやボタン電池が電源として広く利用されているが、その寿命は数年と短く、交換に要する労力やコストが課題となっている。

そこで、そのような電源として、環境中の光/風力/温度差/電磁波/機械振動から電力を生み出すエナジーハーベスティングが注目されている。特に、産業機械や車両では機械振動が豊富に存在するため、振動発電素子の利用が検討されている。無線センサモジュールの電源に利用される振動発電素子には、微弱な環境振動からの発電、小型化、発電量の向上、発電可能な周波数の広帯域化、の4つの課題が存在する。特に、コインサイズから数ミリワット級の電力が求められているが、現状、そのような小型の振動発電素子から得られる電力は0.1ミリワットほどに留まり、その発電量の向上が急務である。

近年、圧電材を用いた振動発電素子の発電量向上を目指して、Guyomar ら (IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 52, 584-594, 2005) は、Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI) と称する非線形回路を開発した。通常の発電素子は、環境振動から得た交流(AC)電圧を整流して直流(DC)電圧へ変換する AC-DC 回路を接続して電力を得る。非線形回路は、この標準的な AC-DC 回路に、アクティブスイッチとコイルを接続する。発電素子の変位が最大/最小に達した際、スイッチが一瞬だけ閉じて圧電体のキャパシタとコイルとの間で LC 電気振動を起こし、圧電電圧を昇圧させ DC 電圧と電力を上昇させることができる。初期の非線形回路はアクティブスイッチを外部電源で制御しており、自律型の発電素子として矛盾を抱えていたが、その後、発電量の一部を消費してスイッチを駆動させる「セルフパワー型非線形回路」(Smart Materials and Structures, vol. 17, 035030, 2008) が開発され、脚光を浴びている。このスイッチは、エンベロープ検出回路、コンパレータ回路、デジタルスイッチ回路の3つの電子回路から構成される「電気スイッチ」である。エンベロープ検出回路と

コンパレータ回路が変位の最大/最小を検出して自律的にデジタルスイッチの開閉を制御する。しかしながら、基本的に調和振動条件で動作することが前提である点、回路が煩雑で素子のパラメータの最適化が必要である点、また、小型で実用的な素子ほどそのスイッチ回路の消費電力は無視できない点の3つが課題であった。更に、小型で実用的な素子では、非線形回路による昇圧で圧電体の制振効果も高まり、振動変位が抑制され最終的に得られる発電量が低下する恐れがあった。

2. 研究の目的

本研究では、小型化、発電量の向上と発電可能な周波数の広帯域化を狙って、また、既存の電子回路を用いた電気スイッチ式セルフパワー非線形回路の欠点を克服するため、「機械スイッチ式セルフパワー非線形回路」を開発する。

機械スイッチは、発電素子自体が機械的に開閉するスイッチとして機能する。これにより、電気スイッチのような複雑な回路やそのパラメータの最適化が不要になり、また、回路の消費電力が削減できるため、発電量の向上が期待される。更に、発電可能な周波数の広帯域化を狙い、発電素子の構造の最適化を検討する。前述のように、圧電制振力を考慮に入れて、非線形回路を適用した発電素子の性能を予測する解析手法は未だ存在しなかった。本研究では、この解析手法を確立し、電気および機械スイッチ式非線形回路の性能予測と実験による検証も行う。

3. 研究の方法

本研究では、初めに、発電可能な周波数の広帯域化と発電量の向上を狙って、折り畳みバネ構造体の設計と機械スイッチ非線形回路の組み込みに取り組む。図1に折り畳みバネ構造を用いた小型の振動発電素子を示す。

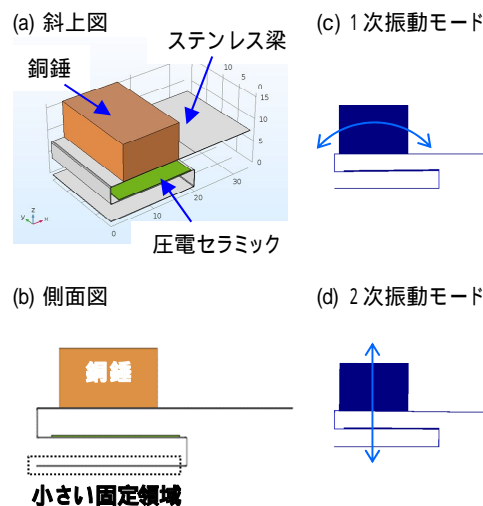
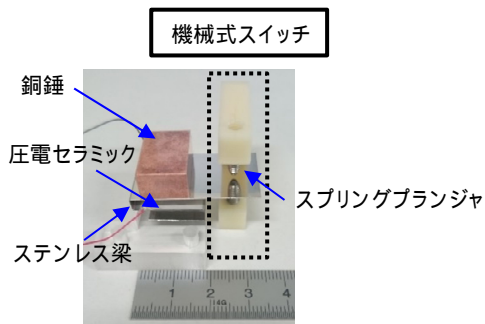


図1: 折り畳みバネ構造体と振動モード

折り畳みバネ構造は高い機械的信頼性を確保するため、微結晶粒ステンレス箔材（厚さ 0.15 mm）を用いて、板バネ用の工具で折り畳んで形成した。その後、圧電材と銅の錘を貼り付けて発電素子が完成する。バネ構造の先端が少し伸びている理由は、後述する機械スイッチとして利用するためである。この構造の特徴は、構造を最適化することで、1次と2次の振動モードの共振周波数を接近することができ、発電可能な周波数の広帯域化が得られる。また、一般に用いられる片持ち梁構造と比較して、梁の根元を固定する治具が不要なため、小型化にも優れている。

図2に、発電素子を利用した機械スイッチ式非線形回路を示す。機械スイッチ構造を含めた発電素子の有効サイズは、 $3.5 \times 2 \times 3 \text{ cm}^3$ ほどである。圧電セラミック（富士セラミックス社、C-6材）のサイズは $2 \times 1.7 \times 0.02 \text{ cm}^3$ でキャパシタンスは 32 nF である。機械スイッチ構造は、ABS樹脂を切削加工して成形したフレームに、スプリングブランジャを挿入して形成した。スプリングブランジャは、強い衝突や跳ね返りを抑制してソフトな機械的接触を実現するために用いている。圧電セラミックの下部電極は導電性のステンレス梁と導通している。こうすることで、十分大きな振動が発電素子に加わって先端がスプリングブランジャに接触すると、コイル L と圧電セラミックのキャパシタ C_p との間で LC 電気振動が生じて圧電電圧 V_p を昇圧させ、出力 DC 電圧 V_{DC} と発電量 P_{out} を向上することが出来る。折り畳みバネ構造と機械スイッチ式非線形回路を用いることで、小型化、周波数の広帯域化、発電量の向上が可能となる。

(a) 折り畳みバネ発電素子と機械スイッチ非線形回路



(b) 模式図

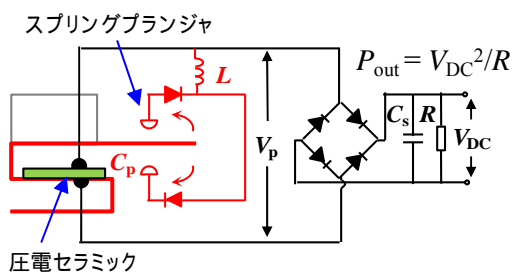


図2: 発電素子と機械スイッチ式非線形回路

図3は、本研究の発電量評価システムである。本研究では、加速度の大きさを制御した調和振動を加振して、発電量の周波数依存性を評価する。電圧波形はオシロスコープを介してパソコンでモニタされる。環境振動は、加速度の大きさが $1G(9.8 \text{ m/s}^2)$ 以下、ピーク周波数は 200 Hz 以下の水準が多い。本研究では、例えば車両のエンジンの振動を想定して、加速度 0.1-0.5G、周波数 30Hz 周辺の振動を加え、発電量を評価する。

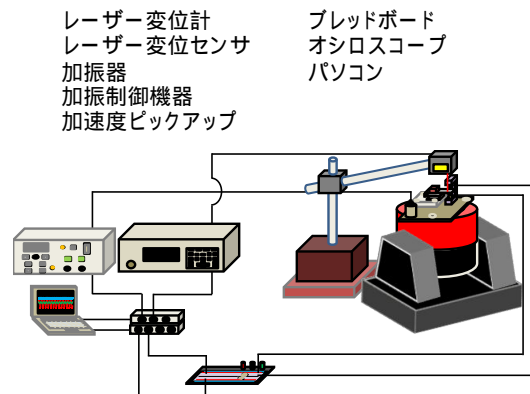


図3: 発電量評価システム

スイッチの種類に関わらず、非線形回路は圧電電圧を昇圧させて発電量を向上させるが、一方で、圧電電圧 V_p が昇圧されると圧電材が発生する制振力 αV_p も高まり、発電素子の変位 z が下がって発電量を下げる恐れがある。本研究では、片持ち梁構造の発電素子から1自由度系モデルを構築し、圧電電圧と変位を機械振動と電子回路へ相互にフィードバックして（図4）現実の素子の特性を予測する計算方法を開発する。計算には、機械振動の微分方程式を数値計算するソフトと電子回路シミュレータが必要で、本研究では Matlab/Simulink と Simelectronics を併用した。

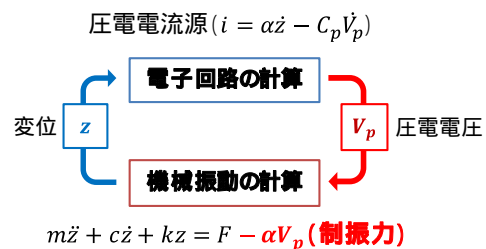


図4: 電気-機械連成解析法

4. 研究成果

【折り畳みバネと機械スイッチ非線形回路】

広帯域化の実現のため、1次と2次の振動モードの共振周波数が接近するように、有限要素法（FEM）を用いて構造の最適化を検討した。図5(a)に示すように、事前の検討から、錘の左端からの距離 d と折り畳みバネの高さ

h_1 が広帯域化に重要なパラメータであることが分かった。図5(b)に示す1次と2次の共振周波数差 Δf の等高線図から、 d を3 mm、 h_1 を4 mmと決定した。

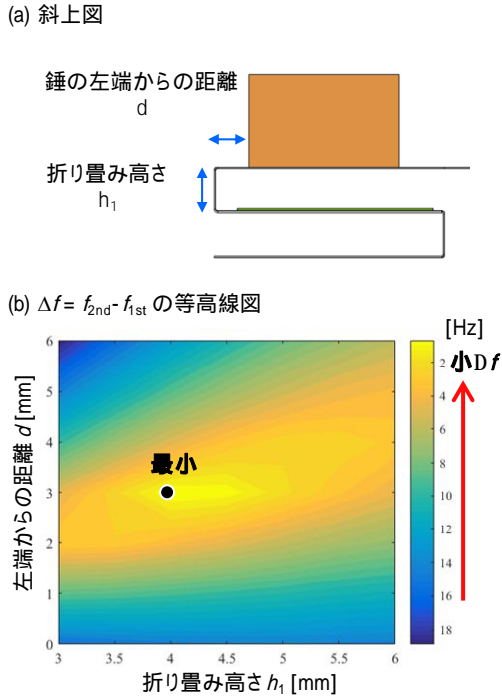


図5: FEMによる構造設計と広帯域化の検討

図6に、機械スイッチ非線形回路と標準回路を接続した折り畳みバネ構造の発電素子の周波数特性を示す。周波数特性は、加速度の大きさが0.5G (4.9 m/s²)で、周波数 f を掃引して発電量 P_{out} を評価して得た。図5の結果を基に製作した発電素子は、1次と2次の振動モードの共振周波数が接近し、狙い通り広帯域化を示した。更に、標準回路と比較して、機械スイッチ非線形回路により、1次の共振周波数で1.5倍、2次の共振周波数で2.2倍、発電量が向上した。1次および2次の最大発電量は、それぞれ0.58と0.31ミリワットであった。以上より、振動発電素子の小型化、広帯域化、発電量の向上に、本研究で提案の折り畳みバネ構造と機械スイッチ式非線形回路が有効であることを実証した。

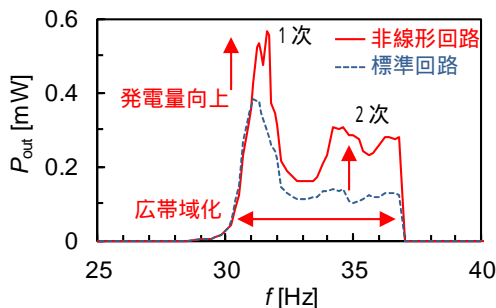


図6: 機械スイッチ非線形回路の特性

【圧電制振力を考慮した非線形回路の解析】

図7に、図4で説明した圧電制振力と変位の変化を考慮した非線形回路の数値解析結果を示す。電気スイッチは論文 (Smart Materials and Structures, vol. 17, 035030, 2008)に記載の回路を使用した。本評価では、加速度の大きさを変化させて、共振周波数の発電量と変位を評価した。変位は、最大値から最小値を引いたピーク_ピーク変位で示した。

初めに、図7(a)に示すように、本評価の範囲では機械スイッチの発電量は電気スイッチのそれよりも大きな値を示した。その理由は、図7(b)に示すように、電気スイッチは変位が最大/最小に達するごとに作動し、その度に圧電電圧を昇圧させて圧電制振力が高まり、最終的な変位が小さくなるからであった。それに対し、機械スイッチの発電量は変位が一定でも発電量が上昇する特異な現象を示した。この理由は、電気スイッチは変位が最大/最小に達するごとに作動するのに対し、機械スイッチは変位がプランジャとのギャップ距離を越えない限り作動しないためである。すなわち、機械スイッチでは発電素子の先端がプランジャに触れた時、電気スイッチと同じく圧電制振力を受けて変位が小さくなるが、その後変位が回復し、再びギャップ距離に達するまでスイッチングがスキップされる。加速度の大きさを上げると、ピ

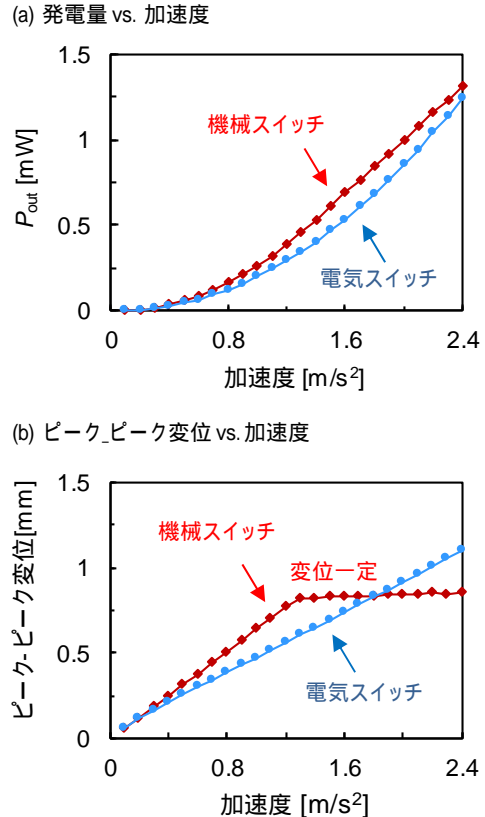


図7: 数値解析による電気及び機械スイッチ非線形回路の発電量と変位の加速度依存性

ーク_ピーク変位に変化はないが、スイッチングの回数が増えるため、見かけ上、変位が一定でも発電量が増える現象を示した。これらの現象を実験でも観測し、それらの結果を論文にまとめた(雑誌論文)。したがって、圧電制振力が無視できない発電素子では、スイッチング特性の違いから、機械スイッチが電気スイッチより大きな発電量が得られることを解析と実験から明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Haruhiko Asanuma, Kazuhiro Sakamoto, Toshihiko Komatsuzaki, and Yoshio Iwata, "Comparative Study of Electrical and Switch-skipping Mechanical Switch for Self-Powered SSHI in Medium Coupled Piezoelectric Vibration Energy Harvesters", Smart Materials and Structures, 2018, accepted. 査読有

DOI:

<https://doi.org/10.1088/1361-665X/aac4cc>

〔学会発表〕(計6件)

浅沼春彦, 大久保仁, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 「機械スイッチ式非線形回路を用いた振動発電素子の高出力化」, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2016, 2016年8月23日~8月26日, 山口大学(宇部市)

浅沼春彦, 大杉駿, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 「折り畳みバネ構造と機械スイッチを用いた小型振動発電素子の高性能化の検討」, 日本機械学会 2016年度年次大会, 2016年9月11日~14日, 九州大学(福岡市)

Haruhiko Asanuma, Hitoshi Okubo, Toshihiko Komatsuzaki, and Yoshio Iwata, "Folded Spring and Mechanically Switching SSHI for High Performance Miniature Piezoelectric Vibration Energy Harvester", The 16th international conference on micro and nanotechnology for power generation and energy conversion applications (PowerMEMS 2016), Paris, France.

坂本一博, 浅沼春彦, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 「機械スイッチ非線形回路を用いた振動発電素子の小型化の検討」, 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2017, 2017年8月29日~9月1日, 愛知大学(豊橋市)

大久保仁, 浅沼春彦, 小松崎俊彦, 岩田佳雄, 「小型振動発電素子における電気式および機械式スイッチ非線形回路の性能比較」, 日本機械学会 2017年度年次大会, 2017年9月3日~6日, 埼玉大学(さいたま市)

Kazuhiro Sakamoto, Haruhiko Asanuma, Toshihiko Komatsuzaki, and Yoshio Iwata, "Numerical Investigation of Mechanically

and Electrically Switching SSHI in Highly Coupled Piezoelectric Vibration Energy Harvester", The 17th international conference on micro and nanotechnology for power generation and energy conversion applications (PowerMEMS 2017), Kanazawa, Japan.

〔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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅沼 春彦 (ASANUMA, Haruhiko)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号: 10757298

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし