

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04347

研究課題名（和文）マルチスイッチ非線形回路を用いた振動発電の機械-電気連成現象の探求と高性能化

研究課題名（英文）Investigation of electromechanically coupled properties and increase in performance of piezoelectric vibration energy harvester by using multi-switching nonlinear circuit

研究代表者

浅沼 春彦（Asanuma, Haruhiko）

金沢大学・フロンティア工学系・助教

研究者番号：10757298

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧電型の振動発電素子の機械-電気特性を正確に再現する事が出来る新しい支配方程式を導き、機械-電気結合の強化現象を活用するマルチスイッチ非線形回路により、高出力・広帯域化を両立する高性能な振動発電素子の実現を目指した。強弾性ヒステリシスによる非線形圧電性を考慮した支配方程式が実験をよく再現する事を実証し、スイッチ非線形回路との連成解析を簡略化する手法を考案した。また、マルチスイッチ非線形回路のスイッチング回数と周波数特性の関係を明らかにし、高出力・広帯域化への可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、線形の圧電方程式を基にした支配方程式が振動発電の機械-電気特性の理解に広く利用されていたが、加振水準が変動すると実験を再現しなかった。強弾性ヒステリシスによる非線形圧電性を考慮した新しい支配方程式により、振動発電の正確な性能予測が可能となった。また、一部のスイッチ非線形回路との連成解析は、変位の4次方程式で簡略化される事を実証した。新しい支配方程式とマルチスイッチ非線形回路により、従来技術では実現できない振動発電素子の高出力・広帯域化への可能性を確認した。この新しい解析モデルにより、IoT電源用途の振動発電の設計が容易になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study was aimed at deriving a governing equation which can predict electromechanical properties of a piezoelectric vibration energy harvester accurately and achieving an increase in the power output and the frequency bandwidth by using a multi-switching nonlinear circuit which utilizes an increase in the electromechanical coupling. We demonstrated that a governing equation based on the nonlinear piezoelectricity considering the ferroelastic hysteresis replicates the experimental results well, and we developed a simple numerical methodology for the analysis coupled with the harvester and the nonlinear circuit. We also demonstrated an increase in the power output and the frequency bandwidth by revealing the relationship between the switching numbers and the frequency response properties.

研究分野：機械力学

キーワード：振動発電 非線形圧電性 マルチスイッチ非線形回路

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

IoTの基幹デバイスである無線センサモジュールには小型の電池が用いられているが、その交換に要する労力やメンテナンスコストが課題である。そこで生産装置やインフラの環境振動からエネルギーを得る圧電型の振動発電が検討されているが、発電量の向上(高出力化)と発電可能な周波数帯域の拡張(広帯域化)が強く求められている。

圧電型の振動発電の機械-電気特性を解析する従来手法として、線形の圧電方程式を基にしたバネ-マス-ダンパ-圧電制振力の1自由度系モデルが広く用いられている。この1自由度系モデルと高出力発電回路を連成解析することで、変位や速度の機械特性、電圧・電流や発電量の電気特性を算出してその性能を予測する。この際、発電回路内のトランジスタを単純オン/オフスイッチで簡易化して回路方程式から解析解を導く手法、機械解析式をLCR等価回路で還元して発電回路と回路シミュレータで連成解析する手法が広く採用されている。

しかしながら、小型で高出力の振動発電素子の機械-電気特性を評価すると、加振加速度が上がるに連れて従来の1自由度系モデルでは説明できない共振周波数の低周波数側シフト、変位や発電量の周波数特性の非対称化、発電量の低下が観測される。我々は先の圧電素子を用いたスマートダンパの研究(文献 )から、"非線形圧電性"がこれらの結果に強く関与していると考えた。また、この非線形圧電性は振動構造と圧電素子の機械-電気結合を強化する効果をもたらす事が予想された。この非線形圧電性と実用的な振動発電素子の構造を考慮した解析モデルは存在せず、圧電型の振動発電素子の正確な性能予測は困難であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、非線形圧電性と実用的な振動発電の構造を考慮した新たな支配方程式を導出し、非線形圧電性の機械-電気結合の強化を活用するマルチスイッチ非線形回路により、高出力化と広帯域化を両立する振動発電技術の実現を目指した。機械-電気結合の強化は、発電回路の抵抗が低い状態と高い状態の共振周波数値が離れる現象をもたらす。マルチスイッチ非線形回路のスイッチのオン/オフ回数を制御することで疑似的に抵抗状態を変化させ、2つの抵抗状態の周波数特性の包絡線に沿うような発電特性を実現して高出力化と広帯域化を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 非線形圧電性と実用的な振動発電の構造を考慮した新たな支配方程式の導出

初めに、非線形圧電性と実用的な振動発電の構造を考慮した新たな支配方程式の導出を検討した。材料物性の研究者から様々な非線形圧電性モデルが提唱されているが、先行研究(文献、 )から"強弾性ヒステリシス効果"を基にした非線形圧電性モデルが振動発電素子の機械-電気特性を再現する可能性が高い事が分かってきた。そこで、本研究では強弾性ヒステリシス効果を基にした非線形圧電モデルを採用した。図1(a)に示すように、発電量、共振周波数、製造コストを考慮して、多くの振動発電素子は先端に重りの付いた片持ち梁構造を採用し、圧電素子は梁の固定部付近の一部に張り付けられる。非線形圧電性モデルに加え、実応用の上で重要な重り付き片持ち梁構造を考慮して、ハミルトンの原理から新たな支配方程式の導出を試みた。支配方程式の非線形項のパラメータ値は、材料メーカーが提供するカタログには提供されていない。そこで、周波数特性の加振加速度依存性の実験評価から非線形項のパラメータ値を同定した。

支配方程式は次に示す手順で導出する。

手順1. 非線形圧電性を考慮した圧電素子の電気エンタルピー密度を導入し、片持ち梁構造を基に系全体の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを求める。

手順2. ハミルトンの原理から、片持ち梁のたわみに関する機械系方程式と電気系方程式を導出する。機械系方程式は圧電素子の有/無の箇所でも2つ導出される。

手順3. 圧電素子の有無の箇所に分けられた2つの機械方程式に対して、変数分離と固有モード解析を行い、境界条件を考慮して1つの方程式に簡略化する。

手順4. 加振加速度を変えて変位と圧電電圧の周波数特性を実験で評価し、その各ピーク値を用いてハーモニックバランス法と非線形最小二乗法から非線形項のパラメータを同定する。

図1(b)の機械・電気支配方程式が示すように、非線形圧電性により、剛性のソフトニング効果( $K_2$ は負の値)や機械-電気結合の強化( $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ の項)が現れる事が分かる。これらの現象は従来の線形圧電方程式を用いた1自由度系モデルでは現れない。また、これら非線形項は変位(又は加振加速度)の大きさが上がるほど、その程度が強まる事が分かる。

図1(c)に、提案解析と従来解析の変位の周波数特性の比較結果を示す。従来解析の方程式は線形圧電方程式を基に手順1~3を経て導いた。バネ性リン青銅梁から成る振動発電素子の長さは34 mm、幅は15 mm、厚さは0.3 mmで、長さ8 mm、厚さ0.2 mmの2枚の圧電素子が並列バイモルフの形態で固定端付近に張り付けられている。加振加速度を変えて周波数を掃引し、振動発電素子の先端部付近をレーザー変位計で計測した。本評価の最大変位は1.8 mmと振動発電素子の長さに対して5%ほどで、梁の大変位系で観測される剛性のハードニング効果は無視できる変位領域である。図1(c)に示すように、従来解析は実験を再現する事が出来ないが、提案解析は実験で観測される共振周波数の低周波数側シフト、周波数特性の非対称化を再現した。これらの現象は非線形圧電性から生じる剛性のソフトニング効果によるものである。

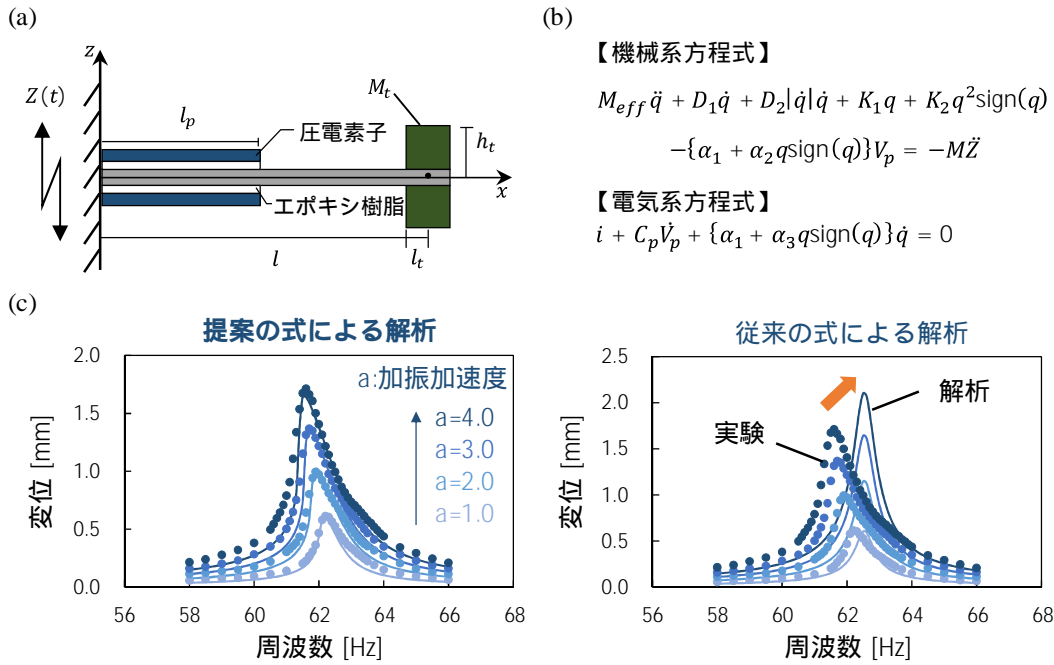


図 1 (a)片持ち梁型振動発電素子、(b)支配方程式、及び(c)変位の周波数特性 (文献 )

本研究では、圧電型の振動発電素子の新たな支配方程式を導出し、その支配方程式が実験を精度よく再現する事を実証した。強弾性ヒステリシス効果を基にした非線形圧電性により、変位（又は加振加速度）の大きさに依存した剛性のソフトニング効果や機械-電気結合の強化を説明できる事が分かった。しかし、非線形圧電性の微視的な起源は未解明である。今後、本研究成果を材料物性の研究者へ報告し、その起源の解明に取り組みたいと考える。

## (2) スイッチ非線形回路との連成解析法の構築

複雑な回路の評価の前に、圧電型の振動発電素子の新たな支配方程式と AC-DC 整流部や昇圧部を含む汎用的な発電回路との連成解析を検討した。従来、解析が容易になるという理由から、非線形項を含む振動発電の解析では単一の抵抗素子を用いて発電量評価を行う研究が多く見られる。しかし、無線センサノードの駆動には AC-DC 変換が必要で、単一の抵抗素子を用いた発電量評価は実用的ではない。また、数値計算ソフトと回路シミュレータを併用した連成解析も可能であるが、計算コストが非常に高い。そこで、より計算コストが低い連成解析手法の構築に取り組んだ。

正弦波加振を想定して、支配方程式と回路の方程式を組み合わせた積分方程式を導出し、それを数値計算で解く事で変位と発電量を算出する手法を考案した（詳細は文献 を参照）。最終的にまとめられた方程式は、変位の 4 次関数で簡略化された。図 2(a)(b)に、振動発電素子の汎用的な標準 AC-DC 回路とスイッチ非線形回路を示す。スイッチ非線形回路のスイッチは振動発電のエネルギーの一部を消費して自立駆動し、圧電電圧を昇圧させて発電量を向上する。図 2(c)に、加振加速度を変えた発電量の周波数特性を示す。複雑な発電回路であるが、連成解析は実験を再現している事が分かる。考案の連成解析法により数値計算ソフトと回路シミュレータを併用した連成解析法と比較してその計算時間を 1/10 以下に削減する事ができ、発電量・変位・共振周波数の負荷抵抗、加振加速度、加振周波数依存性を解明した。また、解析と実験の比較から 2 つの重要な知見が得られた。1 つは、スイッチ非線形回路の使用により非線形圧電性の剛性のソフトニング効果が緩和される事が分かった。その理由は、スイッチ非線形回路への接続により機械ダンピング力が増大し、変位が抑制される為である。2 つ目は機械-電気結合の強化が明確に現れるには、想定より大きな変位振幅（又は圧電素子への大きな負荷応力）が必要である事が分かった。従って、マルチスイッチ非線形回路により高出力・広帯域を実現するには振動発電素子の圧電素子に大きな機械的負荷がかかる振動構造や加振が必要である。

その他、非線形項を多く含む支配方程式と発電回路の連成解析を簡略化する手法として、一般化インピーダンスを用いる手法も考案した（文献 ）。解析は大きな圧電電圧が得られる領域では実験をよく再現したが、小さな電圧領域では実験結果と差異が生じた。その理由は、圧電電圧が小さい領域では理想的なスイッチング特性を得る事が出来ない為である。文献 の連成解析法ではスイッチ遅延や電圧反転効率の低下も考慮しており、圧電電圧が小さい領域で正確性を重要視する場合は文献 の解析手法が適している事が分かった。

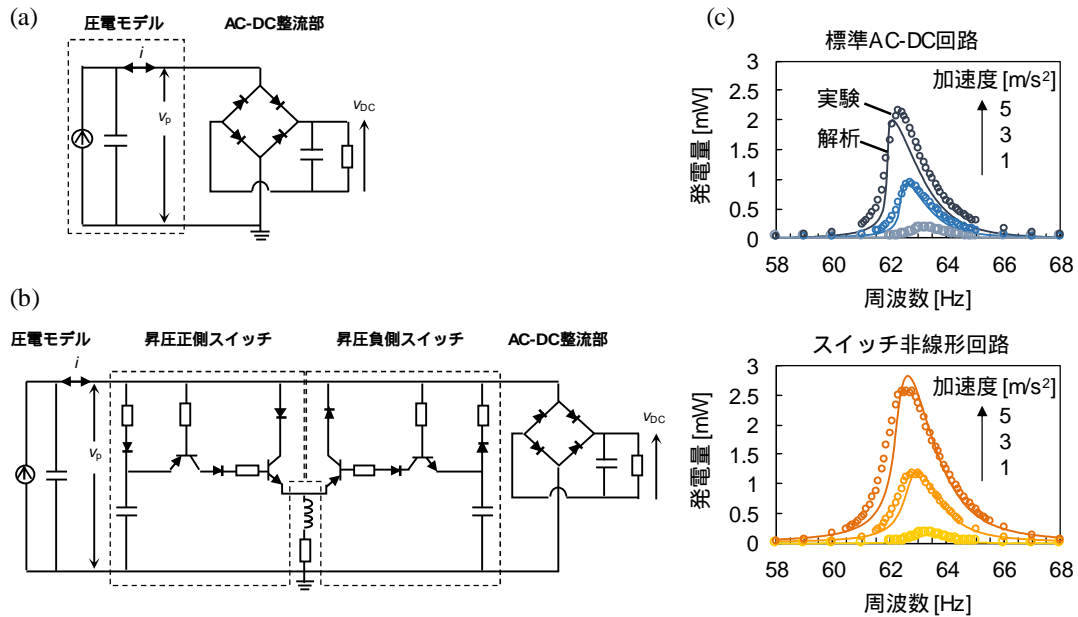


図 2 (a)標準 AC-DC 回路、(b)スイッチ非線形回路、及び(c)発電量の周波数特性 (文献 )

(3) マルチスイッチ非線形回路による高出力化・広帯域化の実証

先の研究から得られた知見を用いて、マルチスイッチ非線形回路の概念の実証を検討した。マルチスイッチ非線形回路は、低抵抗状態と高抵抗状態の 2 つの周波数特性の包絡線に沿うような発電特性を実現して高出力化と広帯域化を実現する。非線形圧電性により、低抵抗状態と高抵抗状態の共振周波数は変位が上がるほど離れる。初めに、最も簡単な回路構成として図 3(a)に示すマルチスイッチ非線形回路を考えた。インダクタを利用して抵抗可変スイッチが低抵抗状態の発電特性を向上させる。発電量がピークを越えて下がりはじめると、回路切替スイッチにより高抵抗状態の発電特性を実現し、最終的に高出力化と広帯域化を達成する。図 3(b)に発電量の周波数特性を示す (文献 )。概念実証のため、本研究では低抵抗状態用と高抵抗状態用の回路を別個に用意した。図 3(b)に示すように、回路切替スイッチを回路切替点で作動させる事で、点線に示す発電特性が実現可能である事が分かった。また、抵抗可変スイッチを想定されていたよりも多数回スイッチングすると発電量が大きく向上することを発見した。その理由は、頻繁にスイッチングを行うことで発電による機械ダンピング効果を低減できる為である。

その後、可変抵抗スイッチと回路切替スイッチの自立駆動を検討したが、実環境振動の水準から得られる小型の振動発電素子の電力は乏しく実現出来なかった。そこで、同様の効果を実現する他の手法として DC-DC コンバータを適用した発電回路を提案した (文献 )。従来の DC-DC コンバータとは異なり、低抵抗状態側で従来よりも多数のスイッチングを行い発電による機械ダンピング効果を低減させた。提案手法により、振動発電素子から 10 ミリワット程の発電量が得られればマイコンの PWM 制御で自律駆動が可能と考える。今後、振動発電とマイコンによるマルチスイッチ非線形回路の自立駆動化に取り組む。

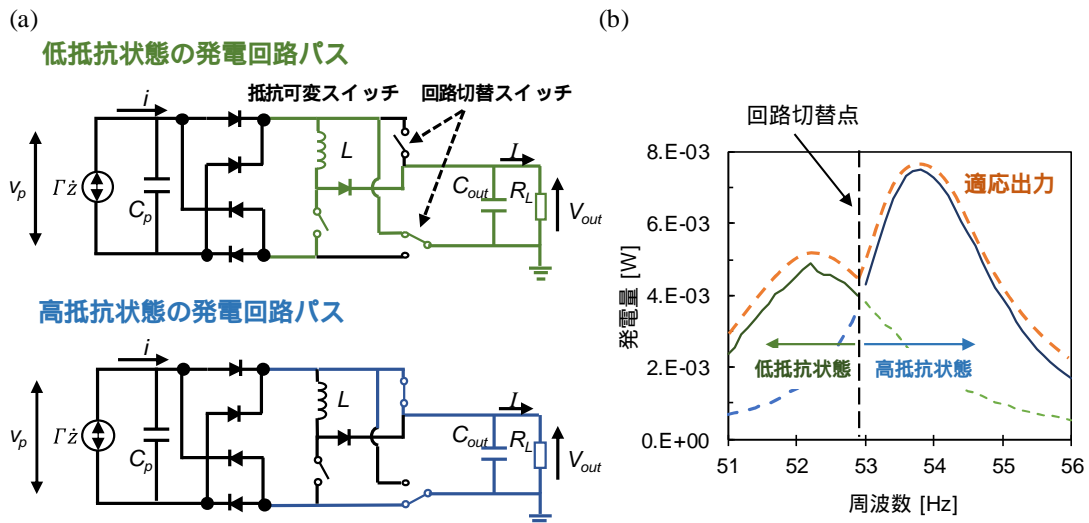


図 3 (a)マルチスイッチ非線形回路の一例と(b)発電量の周波数特性 (文献 )

#### 4. 研究成果

本研究を通して、以下の3つの研究成果を得た。

(1) 強弾性ヒステリシス効果を基にした非線形圧電性と実用的な振動発電の構造を考慮した新たな支配方程式の導出手順を考案した。その支配方程式が実験結果を精度よく再現する事を実証した。

(2) 圧電型の振動発電素子の新たな支配方程式と複雑な発電回路の方程式を組み合わせた積分方程式を導出し、それを数値計算で解く事で変位と発電量を算出する連成解析法を考案した。考案の連成解析法により、数値計算ソフトと回路シミュレータを併用した連成解析法と比較してその計算時間を大幅に削減する事ができた。解析と実験の比較から、スイッチ非線形回路の使用により非線形圧電性の剛性のソフトニング効果が緩和される事、機械-電気結合の強化が明確に現れるには、大きな変位振幅（又は圧電素子への大きな負荷応力）が必要である事が分かった。

(3) マルチスイッチ非線形回路の概念の実証を検討し、抵抗可変スイッチと回路切替スイッチにより低抵抗状態と高抵抗状態の発電特性を実現し、高出力化と広帯域化が達成可能である事を実証した。スイッチ回路の自立駆動化は困難であったが、DC-DCコンバータの原理を適用して、振動発電素子から10ミリワット程の発電量が得られればマイコンのPWM制御で自律駆動が可能と考える。今後、振動発電とマイコンによるマルチスイッチ非線形回路の自立駆動化に取り組む。

#### <引用文献>

H. Asanuma, T. Komatsuzaki, "Nonlinear piezoelectricity and damping in partially-covered piezoelectric cantilever with self-sensing synchronized switch damping on inductor circuit," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 144 (2020) 106867

H. Asanuma, "Selecting nonlinear piezoelectricity for fully autonomous self-sensing synchronized switch damping on inductor technique," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 159 (2021) 107846

S. Leadenham, A. Erturk, "Unified nonlinear electroelastic dynamics of a bimorph piezoelectric cantilever for energy harvesting, sensing, and actuation," *Nonlinear Dynamics*, vol. 79 (2014) pp. 1727-1743

伊藤有以, 浅沼春彦, 小松崎俊彦, 「非線形圧電方程式を基にした振動発電素子の非線形パラメータの決定方法」, 日本機械学会機械力学・計測制御部門 D&D2020, (2020) 447

H. Asanuma, "Electromechanical model and simple numerical analysis for a piezoelectric vibration energy harvester considering nonlinear piezoelectricity, nonlinear damping, and self-powered synchronized switch circuit," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, (2023) in press

H. Asanuma, H. Tanaka, "Coupled analysis of a compact autoparametric vibration energy harvester with synchronized switch circuits," *Sensors and Actuators A: Physical*, (2023) accepted

山田 貴晴, 浅沼 春彦, 「電力変換回路のスイッチ制御による振動発電の高性能化」, 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会, (2022) C024

山田 貴晴, 浅沼 春彦, 「高速スイッチング DC-DC コンバータ回路による振動発電素子の発電量向上」, 日本機械学会北陸信越支部 2023 年合同講演会, (2023) E002

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Haruhiko Asanuma, Hiroto Tanaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Coupled analysis of a compact autoparametric vibration energy harvester with synchronized switch circuits	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 -
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 Haruhiko Asanuma	4. 巻 -
2. 論文標題 Electromechanical model and simple numerical analysis for a piezoelectric vibration energy harvester considering nonlinear piezoelectricity, nonlinear damping, and self-powered synchronized switch circuit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Intelligent Material Systems and Structures	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/1045389X231179287	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5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 浅沼春彦
2. 発表標題 非線形圧電性とスイッチ機能回路による高性能化
3. 学会等名 振動談話会第7回若手研究交流会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田貴晴, 浅沼春彦
2. 発表標題 電力変換回路のスイッチ制御による振動発電の高性能化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤有以 浅沼春彦 小松崎俊彦
2. 発表標題 非線形圧電方程式を基にした振動発電素子の非線形パラメータの決定方法
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門 D&D2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅沼春彦
2. 発表標題 圧電素子を用いたスマートデバイスの機械-電気連成モデルの構築
3. 学会等名 東海ダイナミクス・制御研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田貴晴, 浅沼春彦
2. 発表標題 高速スイッチングDC-DCコンバータ回路による振動発電素子の発電量向上
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

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
---------	---------