

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14509

研究課題名（和文）自動共振調整機能を有するMEMS振動発電素子

研究課題名（英文）Resonant frequency tracking system for MEMS vibrational energy harvesters

研究代表者

本間 浩章（Honma, Hiroaki）

東京大学・生産技術研究所・特任助教

研究者番号：70833747

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、外部振動の周波数変化に連動したMEMS振動発電素子の自動共振調整システムを提案し実証した。インピーダンスにより共振周波数に変化する共振センサー一体型振動発電素子を開発し、共振センサからの位相信号と外部振動を位相比較器により比較することで、発電素子後段のインピーダンスを自動で調整するPLL（Phase Locked Loop）システムを実現した。これにより、100.7 Hzから102.0 Hzの帯域で2つの信号の位相差が90°にロックされ外部振動が変化しても発電電力が維持でき、自動共振調整システムの有効性を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の振動発電素子の多くは、微弱な環境振動を増幅するため共振機構を利用し発電するため、外部振動が変動すると発電電力が大幅に減少する問題がある。本研究で実証した自動共振システムは、周波数変動に対して発電素子の共振周波数を自動で追従できる。このため、提案システムを振動発電に導入することで、回転機など負荷状態によって数Hzの周波数変動がある環境振動源においても、常時最大発電電力を維持可能にした。

研究成果の概要（英文）：Automatic frequency tracking of MEMS vibrational energy harvester is demonstrated for the first time using a phase-locked loop (PLL) type feedback control on the electrostatic force acting on the power-generating electret electrodes. We developed an electret vibrational energy harvester which is capable of monitoring phase state variables. Taking advantage of the function, we compare the harvester's oscillation phase and that of the incoming vibrations to synthesize a voltage to control the impedance in the automatic frequency tracking system. The system controlled the resonance at a frequency ranging from 100.7 Hz to 102.0 Hz, thereby maintaining the output power at its peak value of the resonance.

研究分野：電子デバイス

キーワード：振動発電 MEMS 周波数追従 エレクトレット PLL

1. 研究開始当初の背景

点検作業員不足のため、様々なセンサを搭載した無線端末によるセンサネットワークによって工場内の生産設備や建物の保守点検を行う IoT (Internet of Things) システムの実現が求められている。無線端末の駆動には小型電池が使われてきたが電池交換の課題があり、その代替案として環境エネルギーを回収して利用する小型 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) エナジーハーベスタ素子の必要性が増している [1]。

環境中に普遍的に存在するエネルギー源として振動が注目されており、特に回転機などから漏れる微弱振動 ($1\text{ G} = 9.8\text{ m/s}^2$ 以下、 300 Hz 以下) から効率的にエネルギーを回収する共振型 MEMS 振動発電素子の開発が進められている。一般的に、振動発電素子の共振周波数を回転機の周波数に合わせて設計することで最大出力を得る。そこで、MEMS の共振により振幅を増幅し、さらに電極へエレクトレット (永久電荷) を被膜することで、機械振動を電力に変換するエレクトレット型振動発電素子が提案された [2]。従来研究で開発された素子では、共振時に 1 mW を超える発電電力が得られており、その電力を使い無線回路を間欠駆動させセンサ情報を送信する実証実験も行われた [3]。

しかし、研究室内で行う検証では無線端末を駆動するのに十分な発電量を示したが、実際に現地へ設置する場合、一定の回転数で動くはずの回転機も負荷状態の変化により動作中に 10 Hz 以下の微小な周波数変動を持つことが判明した。共振型発電素子の周波数帯域は、微弱振動を増幅する必要があるため大きくすることは難しく、通常 5 Hz 以下である [4]。このため、周波数の微小変動が原因で実環境では最大発電電力を供給し続けることは困難である。

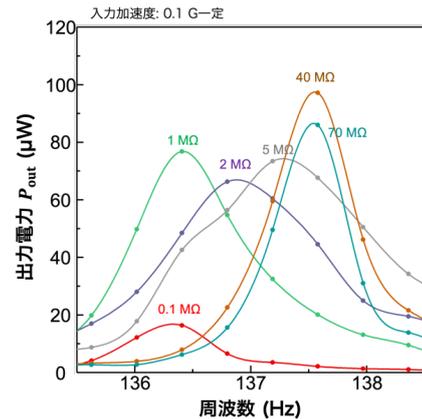


図 1. エレクトレット型 MEMS 振動発電素子の電力スペクトルと負荷の関係

2. 研究の目的

本研究の目的は、外部振動の変化に連動した MEMS 振動発電素子の自動共振調整システムの実証である。そこで本研究期間では、外部振動の周波数に連動するインピーダンス自動調整システムを試作する。それを振動発電素子に接続し、周波数変動への有効性を実証する。

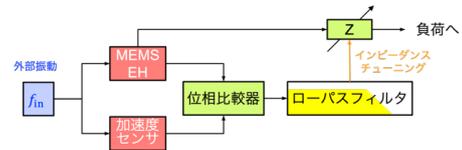


図 2. 外部振動の変化に連動した MEMS 振動発電素子の自動共振調整システム概念図

3. 研究の方法

図 1 にエレクトレット型 MEMS 振動発電素子の電力スペクトルと負荷の関係を示す。我々は、高出力エレクトレット型振動発電素子において、発電素子に接続した負荷抵抗により共振周波数がシフトする効果を見出している [5]。接続する負荷抵抗を数 $\text{M}\Omega$ 増やすことで振動発電素子の発電スペクトルが高周波側へ数 Hz シフトする。このとき発電電力の大きな劣化はない。これは、負荷状態によって異なる静電力がバネの見かけ上の硬さを変えていることが要因である [6]。よって、外部振動に合わせてアクティブにインピーダンスを制御すれば、回転機の周波数変動に連動し共振を変える自動出力調整が可能になる。

図 2 に外部振動の変化に連動した MEMS 振動発電素子の自動共振調整システム概念図を示す。振動発電素子における発電機構と外部振動の位相差を位相比較器により出力する。この出力により振動発電素子後段のインピーダンスを調整し共振周波数をシフトさせる構成であり、擬似的な PLL (Phase Locked Loop) 回路となっている。図 3 に自動共振調整システムの動作を示す。位相比較器は排他的論理和 (EX-OR) 回路により構成され、その出力はローパスフィルタを介して MOSFET のゲート電極に入力する。

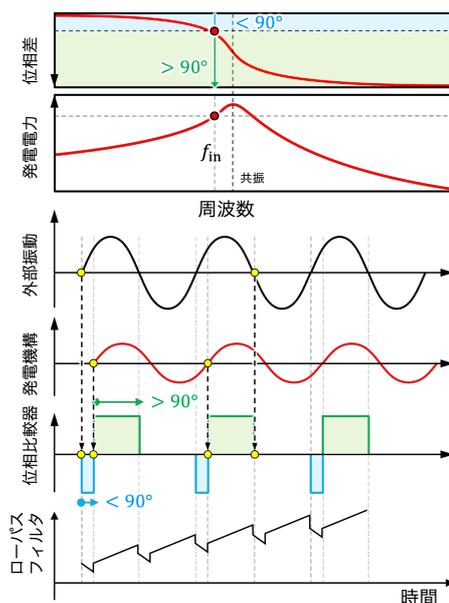


図 3. 自動共振調整システム内の位相比較器とローパスフィルタの動作概念図

MOSFET は発電素子の後段に接続されており、位相比較器の出力によりゲート電圧を調整しオン抵抗が変化する。位相比較器では、外部振動を測定する加速度センサ出力波形と発電機構の振動を比較する。共振時、外部振動と発電機構の位相差は 90° のため、位相比較器出力のデューティ比は 1:1 となる。このとき、ローパスフィルタからの電圧は放電と充電の時間間隔が等しくなるため以前の電圧値を維持する。外部振動の周波数が変化した場合、位相差は 90° から外れるため位相比較器出力のデューティ比が変化する。これによりローパスフィルタの出力電圧は増加または減少し、MOSFET のオン抵抗は変化する。これにより PLL 回路のように、発電素子の共振に合致するまでオン抵抗を自動で調整し続ける。

本研究では、振動発電素子内部に位相信号を出力する共振センサを組み込んだ素子を開発し、自動共振調整システムと一体化させ共振の自動追従を実証した。

4. 研究成果

図 4(a) に本研究で開発した共振センサー一体型エレクトレット MEMS 振動発電素子のチップ写真を示す[7, 8]。共振状態に極力影響を与えずに、発電機構の位相を発電しながら検出するため、発電用の歯電極の一部を共振センサに利用した。図 4(b) にチップ内部の共振センサの SEM 写真を示す。エレクトレットで覆われた歯電極は一つの固定電極に 900 本並べられているが、このうちの 12 本を発電機構の位相を測定するために分割し、残り 888 本で発電電力を供給する。次に、振動周波数を 109 Hz から 111 Hz に掃引した際の発電電圧を測定し、得られた発電スペクトルを図 5 に示した。掃引時の加速度は 0.03 G 一定としている。製作した素子の共振周波数は発電スペクトルのピークから 109.9 Hz とわかる。また、加速度センサ出力を X 軸、共振センサ出力を Y 軸とした際の X-Y プロットを 109.0 Hz、109.7 Hz、109.9 Hz、110.4 Hz の条件で作成し図 5 に重ねた。共振周波数付近の帯域では、外部振動に対する可動部変位の位相差は 0° から -180° に変わる。得られた X-Y プロットが共振付近で円形状から斜め線形状へと徐々に変化しており、発電電力の供給と同時に位相変化を観測することに成功した。

図 6(a) に自動共振調整システムの動作を検証するための振動試験系を示す。振動試験機 (Emic 9514-AN/SD 373-A, DCS-98S Smart) に接続されたステージに、共振センサー一体型振動発電素子と加速度センサ (Kionix, KXR94-2050) を固定した。検証で使用した素子の共振周波数は 101 Hz である。図 6(b) に自動共振調整システムの回路図を示す。システムは EX-OR 回路 (Texas Instruments, SN74HC86)、MOSFET (Alpha & Omega Semiconductor Inc., AO6404) により構成される。また、検証では、加速度センサ出力と共振センサ出力はコンパレータ (Analog Devices, LT1017) で矩形波とし EX-OR 回路に入力した。

図 7(a) に検証実験において測定した加速度センサ、共振センサ、位相比較器の出力電圧波形を示す。また、図 7(b) に振動周波数に対する位相比較器出力のデューティ比変化を示す[9]。振動周波数が変わることで加速度センサ出力の位相も変わり、位相比較器出力のデューティ比が変化

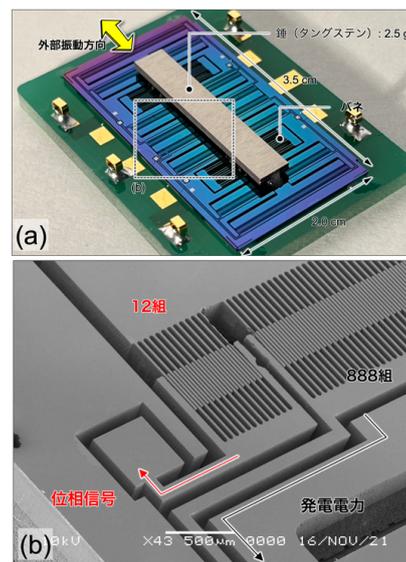


図 4. 位相信号が観測可能なエレクトレット MEMS 型振動発電素子の(a)チップ写真と(b)共振センサ部の SEM 写真

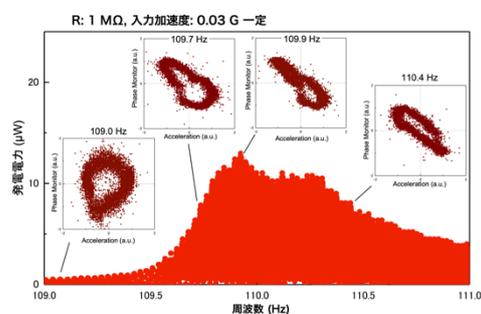


図 5. 振動周波数を 109 Hz から 111 Hz まで掃引した際の $1\text{ M}\Omega$ 負荷での発電電力スペクトル。振動周波数 109.0 Hz、109.5 Hz、109.9 Hz、110.1 Hz の際の X-Y プロット (加速度センサ出力を X 軸、共振センサ出力を Y 軸)

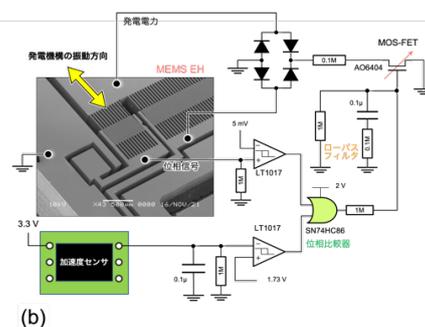
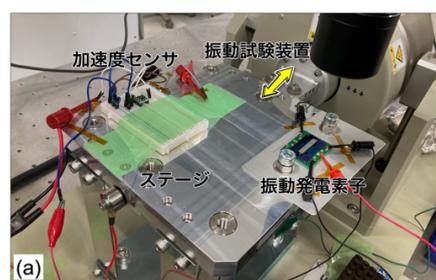


図 6. (a)振動ステージに加速度センサと発電素子を設置した振動試験系と(b) 自動共振調整システムの回路図

する。しかし、自動共振調整システムが動作することで、100.7 Hz から 102.0 Hz の帯域で 1:1 のデューティー比を維持していることが読み取れる。図 8 に自動共振調整システムの有無での周波数変動に対する発電電力を示す。システム無しの場合として、単体抵抗 (1 MΩ、3 MΩ、5 MΩ、50 MΩ) を接続した際の発電電力スペクトルを示した。これより、単体抵抗を大きくすることで 100.7 Hz から 102.4 Hz まで共振周波数が高周波側にシフトすることがわかる。また、単体抵抗を接続した場合は、共振周波数においてピークとなる山型の発電電力スペクトルとなることわかる。一方、自動共振調整システム有りの場合、100.7 Hz から 102.0 Hz の帯域で共振状態における発電電力 (単体抵抗を接続した際のスペクトルのピーク電力) を出力し続ける性能を示し、システムの動作を検証できた。これより、外部振動の周波数変化による電力変動を抑制することに成功し、自動共振調整システムの有効性を実証した。

引用文献

- [1] L. Atzori, A. Lera and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, pp. 2787–2805, 2010.
- [2] H. Honma, H. Mitsuya, G. Hashiguchi, H. Fujita and H. Toshiyoshi, "Improvement of energy conversion effectiveness and maximum output power of electrostatic induction-type MEMS energy harvesters by using symmetric comb-electrode structures," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 28, pp. 064005-1-064005-13, 2018.
- [3] 本間浩章、山田駿介、年吉 洋、「1 mW 級出力エナジーハーベスタで駆動する I o T 無線センサ端末の動作検証」、応用物理学会・第 14 回集積化 MEMS シンポジウム、2022 年 11 月 14 日～16 日、アステイとくしま
- [4] H. Honma, Y. Tohyama, H. Mitsuya, G. Hashiguchi, H. Fujita and H. Toshiyoshi, "A power-density-enhanced MEMS electrostatic energy harvester with symmetrized high-aspect ratio comb electrodes," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 29, pp. 084002-1-084002-9, 2019.
- [5] H. Honma and H. Toshiyoshi, "A PARADOXICAL APPROACH TO ENHANCE THE OUTPUT POWER OF VIBRATIONAL ENERGY HARVESTER BEYOND THE IMPEDANCE MATCHING CONDITIONS," in *Proc. The 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020)*, Jan. 18–22, 2020, Vancouver, Canada, S-081.
- [6] 三屋裕幸、芦澤久幸、下村典子、本間浩章、橋口 原、年吉 洋、「MEMS 振動発電の出力最大化チューニング手法」、電気学会センサ・マイクロマシン部門誌、第 141 巻、第 7 号、2021 年、pp 245–253.
- [7] Y. Akai, H. Honma and H. Toshiyoshi, "Vibrational MEMS Energy Harvester Capable of Monitoring Phase State Variables," in *Proc. Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT 2022)*, May 29 – June 1, Shanghai, China.
- [8] H. Honma, Y. Mizuno and H. Toshiyoshi, "Characterization of Resonance Sensor Integrated in MEMS Vibrational Energy Harvester," in *Proc. Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2023)*, Valletta, Malta, May 28–31, 2023.
- [9] Y. Akai, H. Honma and H. Toshiyoshi, "FREQUENCY TRACKING OF VIBRATIONAL ENERGY HARVESTER USING PHASE-LOCKED LOOP (PLL)," in *Proc. 22nd International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2023)*, June 25–29,

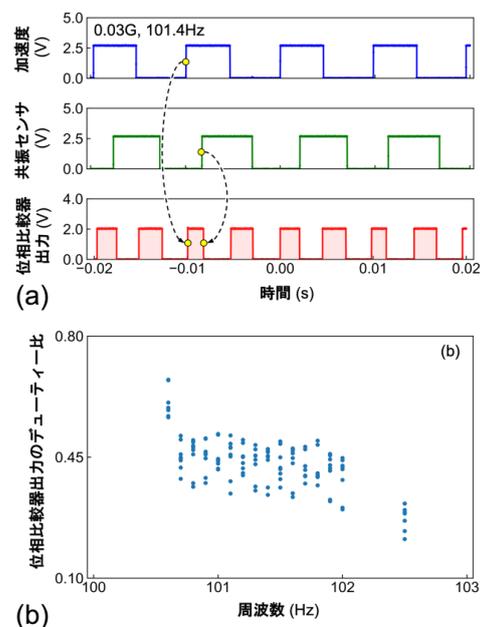


図 7. 自動共振調整システムの検証、(a) 0.03 G、101.4 Hz の振動を入力した際の加速度センサ、共振センサ、位相比較器の出力電圧波形、(b) 振動周波数に対する位相比較器出力のデューティー比変化

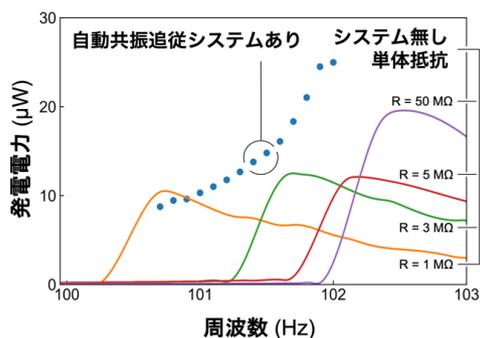


図 8. 自動共振調整システム有無での周波数変動に対する発電電力

2023, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, (accepted).

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 Hiroaki Honma, and Hiroshi Toshiyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Double-Deck MEMS Electrostatic Vibrational Energy Harvester with Airborne Interconnection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Sensors and Micromachines	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 Honma Hiroaki, Mitsuya Hiroyuki, Hashiguchi Gen, Fujita Hiroyuki, Toshiyoshi Hiroshi	4. 巻 34
2. 論文標題 Power Generation Demonstration of Electrostatic Vibrational Energy Harvester with Comb Electrodes and Suspensions Located in Upper and Lower Decks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 1527 ~ 1527
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/sam3785	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 Honma Hiroaki, Tohyama Yukiya, Mitsuya Hiroyuki, Hashiguchi Gen, Fujita Hiroyuki, Toshiyoshi Hiroshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Power enhancement of MEMS vibrational electrostatic energy harvester by stray capacitance reduction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Micromechanics and Microengineering	6. 最初と最後の頁 125008 ~ 125008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6439/ac2e46	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7件（うち招待講演 2件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuto Akai, Hiroaki Honma, Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 Vibrational MEMS Energy Harvester Capable of Monitoring Phase State Variables
3. 学会等名 The 10th Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2022 (APCOT 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Honma, Shota Harada, Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 Demonstration of production of pull-in cancellation voltage generated by electret-based vibrational energy harvester and Cockcroft-Walton voltage multiplier
3. 学会等名 The 17th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered & Molecular Systems (IEEE-NEMS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Honma, Sho Ikeno and Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 VIBRATIONAL ENERGY HARVESTER MADE BY SIMULTANEOUS PROCESS FOR ANODIC BONDING AND ELECTRET CHARGING
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間浩章、池野 翔、年吉 洋
2. 発表標題 エレクトレット帯電ノ陽極接合同时プロセスによるMEMS型振動発電素子
3. 学会等名 応用物理学会 第13回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間浩章、年吉 洋
2. 発表標題 シリコンMEMS振動発電から見たポリマー材料の可能性
3. 学会等名 日本機械学会年次大会 マイクロ・ナノ部門 先端技術フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Honma, Yuto Mizuno, Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 Characterization of Resonance Sensor Integrated in MEMS Vibrational Energy Harvester
3. 学会等名 Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本間浩章
2. 発表標題 非定常振動から発電するMEMSエナジーハーベスタ
3. 学会等名 フロンティア材料研究学術講演会 (招待講演)
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