

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15038

研究課題名(和文) 非定常環境振動下でも効率良く発電するMEMSエネルギーハーベスタ

研究課題名(英文) A High-Efficiency MEMS Energy Harvester for Stochastic Environmental Vibrations

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機械的共振による速度増幅に依存することなく静電型振動エネルギーハーベスタの周波数帯域幅を改善する設計手法を提案し、新たに非定常振動型発電素子を実現した。従来の共振型と異なり、短い櫛歯電極構造によりエレクトレットを高密度化し、微小な可動部変位でも誘導電流を回収する。同一レイアウトの非定常振動型発電素子チップを作製し、エレクトレット電位を-200 Vから-300 Vを増強した際に、NPD(Normalized Power Density)は0.7 mW/cm³/G²の高い値を維持したまま、帯域幅が3.6倍改善し64 Hzに拡張されることを実証した。

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において帯域拡張手法は、素子が肥大化し微小振動への応答性も劣化していた。一方、本研究が提案する手法では、素子面積は変えずにエレクトレット密度の増強により帯域幅を拡張でき、製作した非定常型振動発電素子は世界最高クラスの出力性能と帯域幅を併せ持つ。よって、提案する帯域拡張手法と非定常振動型発電素子により、非定常な環境振動下でも無線センサ端末の設置場所を選ばないIoT(Internet of Things)センサネットワークの構築が可能となる。

研究成果の概要(英文)：A design strategy is presented to simultaneously enhance the bandwidth and the sensitivity of electrostatic vibrational energy harvester without excessively depending on the velocity amplification through mechanical resonance. Instead, the new design uses comb-electrodes of very short-stroke that are finished with an extremely high density electret film, thereby enhancing the mechano-electric power conversion efficiency, leading to a 3.6-fold expansion of frequency bandwidth from 18 Hz to 64 Hz around a center frequency of around 100 Hz when the electret potential is 1.5-fold enhanced from -200 V to -300 V. Normalized power density as large as 0.7 mW/cm³/G² is confirmed.

研究分野：電子工学

キーワード：MEMS エネルギーハーベスタ 振動発電 広帯域化 非定常振動 IoT

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) センサネットワークを構成する小型無線センサ端末では、自給自足の電源として、環境エネルギーから電気エネルギーを発生するエナジーハーベスタの重要性が増している[1]。環境エネルギーの中でも普遍的に存在する「環境振動」が注目されているが、環境振動は微小 ($<0.1 G=0.98 \text{ m/s}^2$) であり、かつその多くが周波数ランダム性の強い非定常振動である。

通常、低加速度の振動を回収するために、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 振動機構の共振特性を利用して振幅をQ値倍に増幅し、その運動エネルギーから静電誘導などの変換メカニズムを介して発電する手法がとられている。研究代表者らはこれまでに、櫛歯構造の側面にエレクトレット (永久電荷) を形成する技術を用いてエレクトレット型MEMS振動発電素子を実現し、微小定常振動 (0.05 G, 125 Hz) で無線センサシステムを駆動することに成功した[2]。しかし、共振機能を用いる手法では、MEMS型振動発電素子の共振周波数に一致した定常振動だけを増幅するため、回転機などの定常振動には対応できるがそれ以外の振動周波数が時々刻々と変化する非定常的な環境振動には対応できない。ここで、非定常振動から発電電力を得るため周波数特性を広帯域にする手法が研究されており、共振周波数以外の振動においてもMEMS可動部を強制的に大きく動かす方法が提案されている[3]。たとえば可動部に距離の離れた2つの安定点を設け、ある閾値以上の外部振動が入ることで双安定的に二点間を遷移する。しかしながら、可動部を強制的に大きく動かすには一般的に0.1 G以上の加速度が必要であり、微小な環境振動では十分な特性を得ることができない。また、余分な構造を必要とするため発電素子が大きくなり、小型の無線センサ端末用途には向かない。

このため、既存の共振型振動発電素子をIoT無線センサ端末の電源として利用する場合、その共振周波数に適した設置場所を事前調査する必要がある。あるいは、設置場所に応じて異なる共振特性を有する発電素子をそれぞれ準備する必要があり、IoT発展の妨げとなっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時々刻々周波数に変化する非定常環境振動下でも効率良く発電するMEMSエナジーハーベスタの実現である。本研究では、エレクトレットの高密度化により電氣的損失を増強し、それによる新たな広帯域化の設計手法を確立する。また、それを応用した非定常振動型MEMS発電素子の原理検証を行う。これにより環境振動からの常時充電が可能となり、無線センサ端末の設置場所を選ばないセンサネットワークが実現する。

3. 研究の方法

本研究では、電気ダンピングを高めるために高電荷密度のエレクトレット櫛歯構造を製作し、非定常振動型発電素子の原理検証に取り組む。

本研究が提案する広帯域化では、Q値を意図的に抑制して帯域幅を拡大する。ここで、振動発電におけるQ値の減少はダンピング (損失) の増加を意味しているが、そもそも振動発電素子とは振動エネルギーを外部への電力として取り出す素子であり、電氣的な損失が大きい方が、発電効率が高い。エレクトレット櫛歯電極構造を持つMEMS振動エナジーハーベスタの場合、電氣的損失増強にはエレクトレット密度を増やす必要がある。しかし、同時に櫛歯電極間に働く静電引力も増強されるため、長い櫛歯構造では剛性を維持することができない。

そこで、本研究では、櫛歯長さに着目して、剛性を高めるために極端に短いエレクトレット櫛歯構造を設計・製作する。図1に従来の発電素子構造と新しく提案す

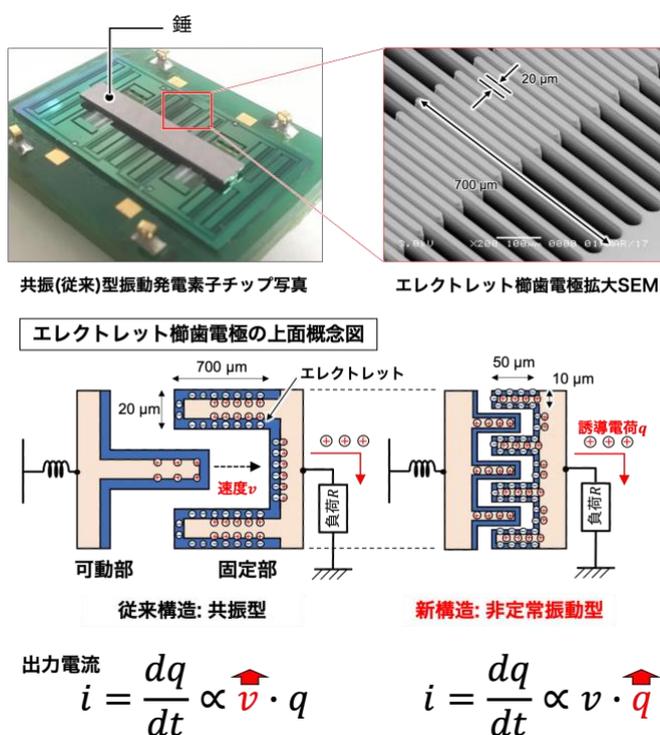


図1 共振(従来)型と非定常振動型振動発電素子のエレクトレット櫛歯電極の概念図

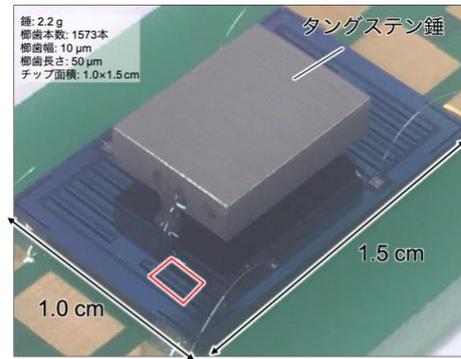
る構造の櫛歯部分の上面概念図を示す。従来構造の櫛歯長さは $700\ \mu\text{m}$ であるが、新構造では櫛歯電極長さを $50\ \mu\text{m}$ に極端に短くすることで、剛性を維持したままエレクトレット電位を増強することができる。さらに、櫛歯幅を細くし本数を増やすことでエレクトレット面積を増やしエレクトレット密度を高めることも可能となる。従来の発電素子構造は、櫛歯電極を長くし、励振時の可動部の速度を速くすることで誘導電流を大きくしていた。しかし、非共振時には速度が著しく低下するため出力電流は得られない。一方、新たに提案する短櫛歯構造では、非共振時の微小な可動部変位においても誘導される電荷量は従来構造より多くなり、出力電流を得ることができる。

本研究では、エレクトレット櫛歯構造を極端に短くした非定常振動型振動発電素子を作製し、エレクトレット電位増強による周波数応答帯域幅の拡大を実証する。

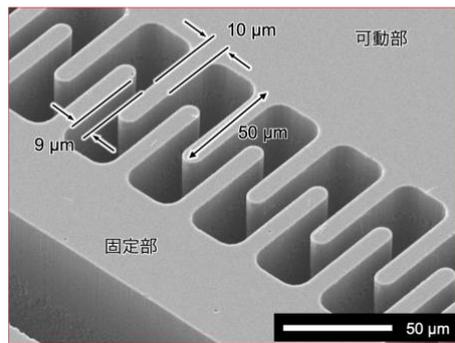
4. 研究成果

図 2 に製作した非定常振動型発電素子のチップ写真を示す。チップサイズは $1.0\ \text{cm} \times 1.5\ \text{cm}$ であり、可動電極上部には微小振動への応答性を向上させるためタングステンの錘を $2.2\ \text{g}$ 載せている。発電素子チップは SOI (Silicon on Insulator) 基板により作製されており、SOI 基板の両面を DRIE (Deep-Reactive Ion Etching) 装置を用いエッチングすることで可動櫛歯電極構造を形成している。可動構造の形成後、カリウム水溶液をバブリングしながらチップ表面を熱酸化することで、チップ前面にカリウムがドーピングされたシリコン酸化膜を形成する。その後、チップ全体を加熱しながら櫛歯電極間に帯電電圧を印加することで酸化膜中のカリウムイオンが動き、帯電電圧と等しい電位を持つエレクトレット層を電極側面に形成した [4]。

帯域幅の拡張を実証するため、同じ設計の非定常振動型発電素子チップに異なる帯電電圧 ($-200\ \text{V}$, $-250\ \text{V}$, $-300\ \text{V}$) を印加しエレクトレットを形成した 3 種類のチップを作製し周波数応答帯域を比較した。図 3 (a) に中心周波数での最大値で規格化した発電電力と振動周波数との関係を実測した結果を示す。入力加速度は一定値に固定され、最適負荷を接続した。これより、発電電力のスペクトルはエレクトレット電位を $-200\ \text{V}$ から $-300\ \text{V}$ に増やすことで広がっていることが読み取れる。さらに図 3 (b) にエレクトレット電位と帯域幅 FWHM (Full Width at Half Maximum) の関係を示した。エレクトレット電位 $-200\ \text{V}$ の素子では FWHM は $18\ \text{Hz}$ であったが、 $-300\ \text{V}$ 素子では $64\ \text{Hz}$ まで拡張され、エレクトレット電位を 1.5 倍にすることで帯域幅を 3.6 倍増強することに成功した。

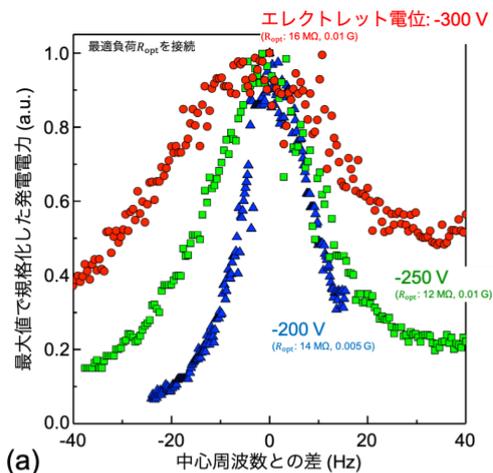


非定常振動型振動発電素子のチップ写真

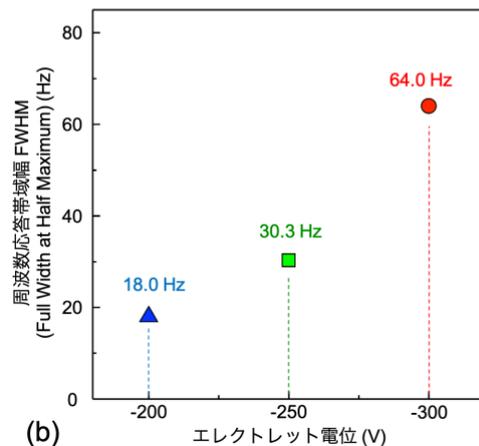


エレクトレット短櫛歯電極のSEM写真

図 2 非定常振動型振動発電素子のチップ写真と短櫛歯電極の拡大 SEM 写真



(a)



(b)

図 3 (a) 異なるエレクトレット電位 ($-200\ \text{V}$, $-250\ \text{V}$, $-300\ \text{V}$) を持つ非定常振動型振動発電素子の発電電力スペクトル、(b) エレクトレット電位と帯域幅の関係

図4に圧電型、電磁型、静電型の振動発電素子において帯域幅 FWHM と NPD(Normalized Power Density)の関係をもとめたベンチマークを示した[5]。NPD は発電電力を入力加速度と素子体積で規格化した値である。この数値が高いことは小型にも関わらず出力性能の高い発電素子であることを示しており、IoT無線センサ端末の電源用途へ向いていると言える。このベンチマークに製作した非定常振動型発電素子から得られた実測値も合わせてプロットした。従来の帯域拡張手法では、大きい入力振動と余分な構造が必要のため、FWHM を改善しようとすると NPD が著しく劣化していることがわかる。一方、非定常振動型発電素子とそれにおけるエレクトレット電位増強は、素子構造は一切変えていないため FWHM を改善しても NPD の劣化は見られない。従来素子では帯域幅 40 Hz 以上を持つ素子の報告例は少ないが、エレクトレット-300 V 素子は 60 Hz 以上の帯域幅を

持ち、NPD は従来比 10000 倍の $0.7 \text{ mW/cm}^3/\text{G}^2$ を達成した。これにより、世界最高クラスの周波数応答性能と出力性能を両立した振動発電素子の開発に成功したと言える。

以上より、エレクトレット短楕歯電極を持つ非定常振動型発電素子は、エレクトレット密度の増強により、出力性能を維持し周波数帯域幅を改善可能であることを実証した。

引用文献

- [1] L. Atzori, et al., *Comput. Networks*, vol. 54, pp. 2787-2805, 2010.
- [2] H. Honma, et al., *J. Micromech. Microeng.*, vol. 28, pp. 064005-1-064005-13, 2018.
- [3] R. L. Harne, et al., *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, pp. 023001-1-023001-12, 2013.
- [4] G. Hashiguchi, et al., *AIP ADVANCES*, vol. 6, pp. 035004-1-035004-8, 2016.
- [5] H. Honma, et al., *Transducers2021*, accepted.

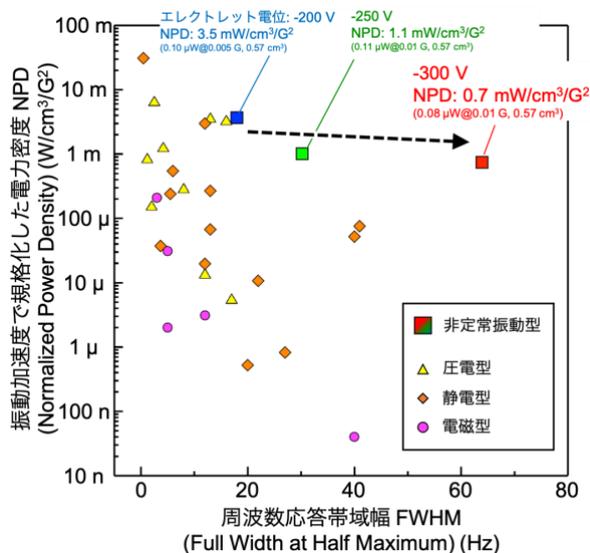


図4 帯域幅 FWHM と加速度で規格化した発電電力 NPD のベンチマーク [5]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Honma Hiroaki, Tohyama Yukiya, Ikeno Sho, Toshiyoshi Hiroshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Equivalent Circuit Model for MEMS Vibrational Energy Harvester Compatible with Sinusoidal and Nonsinusoidal Vibrations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 2475 ~ 2475
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2821	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 年吉 洋、遠山幸也、本間浩章、三屋裕幸、橋口 原	4. 巻 32
2. 論文標題 環境振動MEMS発電素子とIoT無線センサ応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 33-37
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 無
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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiroaki Honma, Yukiya Tohyama, Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 A Short-Stroke Electrostatic Vibrational Energy Harvester with Extended Bandwidth and Sensitivity
3. 学会等名 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Honma, Yukiya Tohyama, Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 A Paradoxical Approach to Enhance the Output Power of Vibrational Energy Harvester Beyond the Impedance Matching Conditions
3. 学会等名 2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroaki Honma, Hiroshi Toshiyoshi
2. 発表標題 Power Enhancement through Reduced Stray Capacitance by Airborne Electrical Interconnection for MEMS Electrostatic Vibrational Energy Harvester
3. 学会等名 The 19th International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (Power MEMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間浩章、年吉 洋
2. 発表標題 ダブルデッキ構造によるMEMS振動発電素子の小型化
3. 学会等名 応用物理学会・集積化MEMS技術研究会・第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間浩章、年吉 洋
2. 発表標題 1.3mW級MEMS環境振動発電素子とIoT応用大容量キャパシタへの高速充電
3. 学会等名 電気学会・第36回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間浩章、遠山幸也、年吉 洋
2. 発表標題 エレクトレット電位増強による非定常振動発電特性の向上
3. 学会等名 電気学会E部門総合研究会(マイクロマシン・センサシステム研究会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Optical & RF-MEMS Lab / IIS-UTokyo
<http://toshi.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/toshi/lab/>

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