

# 研究終了報告書

## 「多層エレクトレット集積型 CMOS-MEMS 振動発電素子の創製」

研究期間：2017年9月～2021年3月

研究者：山根 大輔

### 1. 研究のねらい

本研究では、多層エレクトレットと積層メタル MEMS (Microelectromechanical Systems) 技術、集積回路技術を用いることで多層エレクトレット集積型 CMOS (Complementary Metal-oxide Semiconductor)-MEMS 振動発電素子を創製し、屋内・屋外を問わず環境振動エネルギーを mW 級の電気エネルギーに変換する小型デバイス (10cc 程度) の基盤技術の創製を目標とした。

本研究の科学技術的インパクトについて、本提案を実現することで IoT (Internet of Things) 社会のキーデバイスになり得る無線通信可能な自己給電型環境センサの基盤技術の創出が可能となる。目標とする mW 級発電を達成することで、既存の無線送受技術を利用可能な振動エネルギーハーベスティングになる。

研究内容として、10cc 程度の素子寸法において従来技術では達成困難な目標発電性能に到達するため、エレクトレット振動発電素子の新たな集積・実装技術の創出を目指した。さらに、デバイス・回路の統合設計環境を構築することで、素子性能を統合的に解析・設計可能な技術の創出を目指した。

本研究の提案技術で新たに獲得が見込まれる発電デバイス機能については、実装・集積化技術の観点より、多層エレクトレットによる固定電荷増大機能、高密度錘による発電量増大機能、そして、エレクトレット・MEMS・回路のワンチップ化で実現可能な低寄生容量による小型・高効率発電機能の獲得などを目指した。また、各デバイス・要素回路などを回路シミュレータ上の統合設計環境上にモデル化することで、実装・集積化の効果も含めた発電デバイス解析・設計機能の獲得も目指した。

本申請研究領域内の他の CREST・さきがけ領域との連携可能性について、提案素子は、MEMS プロセスに依存せずエレクトレットを選択可能であり、MEMS と回路の集積化の観点から半導体デバイスとの親和性も高いため、CREST・さきがけ複合領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」内で創製される新規エレクトレット材料や新規半導体型発電デバイスとの融合により、発電出力のさらなる向上や、多様な環境エネルギーを収穫可能なマルチソース・エネルギーハーベスティングなども期待できる。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

研究目的 (For What?) は冒頭のねらいに示しており、その目的達成に向けた新しい着眼点・挑戦的な点 (What is new/your challenge?) として、多層エレクトレット、高密度メタル錘、そして、ワンチップ集積化を挙げた。課題解決に向けて (How to break the limit?)、MEMS デバイス/プロセス・回路・実装技術を利用し、デバイス・回路技術ではそれぞれについて新たな特許も出願した。

エレクトレット技術に関しては、振動発電素子に複数のエレクトレット層を用いて発電性能を向上する試みである。MEMS 振動デバイスとは別に作製したエレクトレット素子を電気配線で接続することで振動発電が可能となる新発電方式を実証し、多層化への一つの方向性を示すことができた。

高密度メタル錘とは、従来と比較して約1桁高密度な金を振動デバイスの錘に用いることで、振動エネルギーを高効率に収集する試みである。本研究期間では、電解めっきを用いて多層 Au 錘を有する MEMS 振動デバイスを設計・試作・評価し、機械動作について設計値と実測値がおよそ一致することを実験的に確認した。振動発電素子の発電量は錘質量に比例するため、本技術により発電量向上が期待できる。また、この Au 錘 MEMS 振動デバイスの作製には、集積回路チップ上に MEMS を形成できる産業用プロセスを利用した。これにより、本提案の MEMS と回路のワンチップ集積化が可能であり、前述のエレクトレット集積技術等を利用することで、回路チップ上に MEMS 振動デバイスを集積した環境発電素子の実現見通しを得た。電源管理回路やセンサも同一チップ内に同時に作製可能なため、電源管理回路・センサの集積化技術としても有用になり得る。

回路技術についても、MEMS と電源管理回路のインターフェースとなる整流・昇圧部に関して、振動発電素子用の新しい MEMS-回路システムを考案し、原理検証と設計環境構築を行った。具体的には、従来整流素子では利用できない微弱な環境振動からも電力回収可能な整流昇圧回路を設計・試作・評価した。また、実環境で取得した微弱振動波形を回路シミュレータ上で再現し、MEMS と提案回路の挙動を同一シミュレータ内で解析可能な設計環境も構築した。以上より、エレクトレット集積、錘高密度化、ワンチップ集積化の各項目において、課題解決の見通しを得た。

## (2) 詳細

研究期間では、エレクトレット集積技術、MEMS デバイスとその集積化技術、振動発電素子の回路に関する技術の3項目を並行して推進した。各項目において、実験結果を含めた成果が得られたので、主要成果と達成状況を以下に記載した。

### 研究テーマ A「エレクトレット集積技術」

従来のエレクトレット型 MEMS 振動発電は、MEMS 可変容量素子とエレクトレット層を同一素子内に組み込み、エレクトレットの対向電極に生じる誘導電荷を利用していった。そのため、エレクトレットと MEMS の設計において互いが干渉し、材料選択・設計・作製方法などに多くの制約があった(図1)。そこで本研究では、個別に作製した MEMS 可変容量素子とエレクトレ

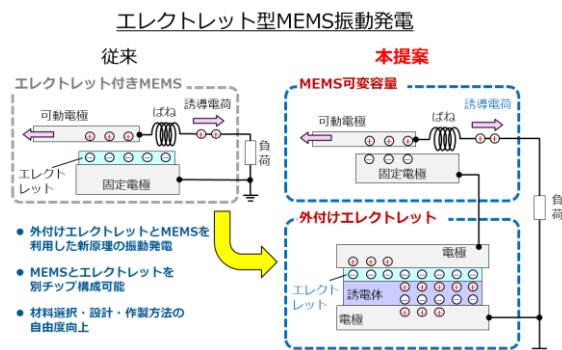


図1. 外付けエレクトレットを利用した MEMS 振動発電素子

ト成膜基板を電気配線で接続するだけで発電可能な新しい振動発電原理を提案し、実際の発電動作に成功した。提案手法により、エレクトレットを多層化して集積することも可能である。提案デバイス構造において、MEMS 可変容量素子内の可動電極は、外部振動による慣性

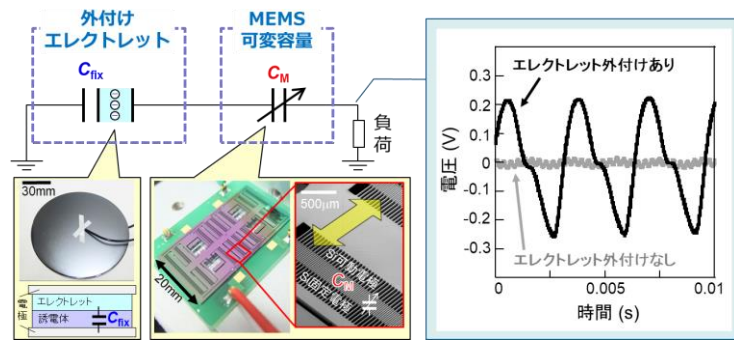


図2. 外付けエレクトレットと MEMS 可変容量素子を利用した振動発電(入力加速度振幅 0.2G, G は重力加速度)

力で機械的に動く構造である。その結果、振動に応じて MEMS 部の可動電極と固定電極の間の静電容量とエレクトレット層下部の静電容量のバランスが変化する。これにより、各静電容量に蓄積される電荷量が変わることから誘導電荷が生じ、その誘導電荷を外部負荷で取り出すことで、振動発電が可能となる。この原理を利用することで、任意の MEMS 構造に任意のエレクトレット材料を組み合わせることができる。

原理検証実験では、Si-MEMS 可変容量素子と、エレクトレットを成膜した Si 基板を用いた外付けエレクトレット素子を個別に用意して、各素子を電気配線で接続した。Si-MEMS 可変容量素子のみを振動させた場合は誘導電荷を生じないが、外付けエレクトレット素子と接続した場合は誘導電荷による発電を確認できた(図2)。多層化に向けて、原理検証用の評価ボード作製を行ったが、その後に研究環境の変化(研究代表者の異動)と新型コロナウイルスの影響によりエレクトレット素子作製や評価が困難となり、研究期間内に多層化の実証までは至らなかった。したがって、達成状況は途中段階であるが、今後も研究・開発を続ける予定である。

#### 研究テーマ B「MEMS デバイスとその集積化技術」

従来の錘材料(例:Si)と比較して約1桁高密度な金を MEMS 振動デバイスの錘に用いた Au-MEMS 振動発電デバイスを設計・試作し、初期評価を実施して、デバイス動作及び機械特性の妥当性を確認した。最終年度では、研究代表者の異動による研究環境変化により一部評価装置の利用が出来なくなったこと、そして新型コロナウイルスの影響による研究活動の中断が生じたため、MEMS 評価は継続中であり、今後も評価を行う予定である。したがって、達成状況は途中段階であるが、今回利用した MEMS 作製プロセスは、ファウンドリによるポスト CMOS の量産プロセスであり、MEMS と回路のワンチップ集積化に向けても有用性を示すことができた。

#### 研究テーマ C「振動発電素子の回路に関する技術」

研究テーマ B の成果で記載したように、ポスト CMOS プロセスを利用した MEMS 作製技術を用いることで、電子回路との集積化が容易になる。本研究テーマでは、振動発電素子の性能向上に向けた回路技術を検討した。具体的には、あらゆる環境振動発電素子の広帯域化に向けて、環境振動周波数でも動作可能な低閾値整流昇圧回路を設計・試作し、その回路を利

用した電気機械システムを提案した。実際に、MEMS と集積回路の技術を用いた環境振動発電システムを開発し、広帯域化を実証した。図3にそのシステム概要を示す。微弱な環境振動から環境振動発電素子を用いて電気エネルギーを生成する場合、入力振動の周波数が環境振動発電素子の共振周波数から外れると出力が急激に低下する。そのため、従来の整流技術（例：ダイオード整流）では、非常に狭い帯域の振動のみ電力として取り出していた。今回の研究では環境振動周波数（特に 1,000 Hz 以下）で動作可能な低閾値の整流昇圧回路を新たに開発し、その回路を環境振動発電素子の後段に接続した新システムを提案した。図3の低閾値整流昇圧回路は、従来の整流素子よりも最低入力電圧が低く、さらに入力電圧を所望の電圧まで上げられる。本提案技術により、従来は回収不可能だった周波数帯域の振動エネルギーを電気エネルギーに変換可能となる。また、提案システムは環境振動発電素子の機械構造によらず適用可能なため、高い汎用性を有している。回路開発においては、MEMS と提案回路の挙動を同一回路シミュレータ内で解析可能な設計環境も構築し、提案システムの有効性を実証実験前に示すことができた。

実証実験では、図4に示すように MEMS と集積回路の技術を用いて実システムを開発した。環境振動発電素子にはエレクトレット型 MEMS 振動発電デバイスを用いており、低閾値整流昇圧回路は Si-CMOS プロセスで作製した。振動試験機で発電デバイスを振動させた際のシステム出力電圧を測定した結果、従来のダイオード整流と比較して帯域が拡大していることがわかった。所望の出力電圧を 1.0 V~3.3 V とした場合、従来技術と比較して約3倍の広帯域化に成功した。さらに、高速道路で得られた実測の環境振動波形を加振機で再現して振動発電素子に入力し、振動発電素子の出力端子に本提案回路を接続して出力を測定した結果、従来整流素子の出力が 0.3V 以下の状況で、本提案回路の出力が 5V を超える結果を得た。これにより提案回路は、

ランダムかつ微小な環境振動から電力を回収するためにも有用な技術となり得る。最終年度は研究代表者の異動による研究環境変化により、一部評価装置や設計環境の利用が出来なくなったため、MEMS を集積したデバイスの開発は途中段階であるが、今後も研究を継続予定

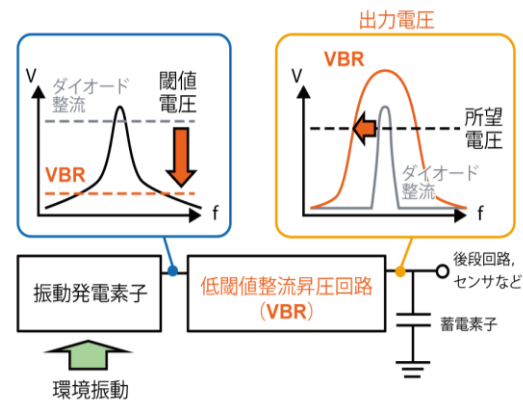


図3. 低閾値整流昇圧回路を利用した広帯域環境振動発電システム

ランダムかつ微小な環境振動から電力を回収するためにも有用な技術となり得る。最終年度は研究代表者の異動による研究環境変化により、一部評価装置や設計環境の利用が出来なくなったため、MEMS を集積したデバイスの開発は途中段階であるが、今後も研究を継続予定

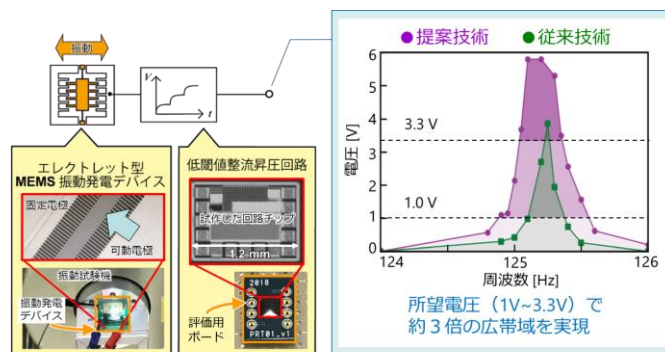


図4. 実システムとその測定結果  
(入力加速度振幅 1mG)

である。

なお、本研究成果については、2019年8月29-30日開催のイノベーション・ジャパン 2019～大学見本市 & ビジネスマッチング～において、デモ展示とショートプレゼンテーションを行い、産業界の方とも実用可能性について議論を進めることができた。

### 3. 今後の展開

研究テーマ A「エレクトレット集積化技術」に関して、本研究では MEMS 可変容量素子とエレクトレットを切り離した新原理の振動発電の実証に成功した。今後は、製造プロセスやリード線の接続過程で生じる補償電荷を低減するため、補償電荷を取り除く方法なども検討する。この技術により、MEMS 構造とエレクトレット材料を独立して最適設計すること、そして、各要素において最先端技術を融合できる見通しを得た。これは、従来のエレクトレット振動発電における制約条件を打破する成果であり、無線 IoT センサなどに向けた電池フリー、夜間・暗所でも発電可能な振動エネルギーハーベスティング技術において、性能向上につながると期待される。

研究テーマ B「MEMS デバイスとその集積化技術」について、ファウンドリによるポスト CMOS プロセスを用いた提案 MEMS 構造の実現可能性を示した。今後は、研究テーマ A 及び C との融合により、MEMS と回路の集積化への展開が期待される。

研究テーマ C「振動発電素子の回路に関する技術」では、低閾値整流昇圧回路を利用した新たな電気機械システムを提案した。提案システムのシミュレーション環境を構築し、さらに、MEMS と提案回路を用いた実システムを開発して、環境振動発電素子の広帯域化の実証に成功した。この技術を用いてあらゆる環境振動発電素子の利用環境を拡大することにより、無線 IoT センサ端末などへ向けた電池・配線・利用環境フリーのエネルギーハーベスティング技術の飛躍的な性能向上につながると期待される。

### 4. 自己評価

本さがけ研究では、提案した各研究項目について、新規技術・デバイスの開発・実証を行うことができた。一方で、研究目的の達成状況はどれも途中段階であり、今後の研究による進展が必要である。当初研究計画と比べて進捗が変化したのは、研究者の異動及び新型コロナウイルスの影響を受けたことも大きな原因であるが、同時に、不測の事態に対する準備が不十分であったことも事実である。今後は、このような想定外のリスクへの対応準備をより徹底し、急な研究環境の変化が生じた場合でも目的達成できるような研究の進め方を行うことを心掛ける。また、本さがけ研究で得られたデバイス・回路技術は世界に先駆けて創出された技術シーズであることから、今後の研究開発により、研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果が見込まれると考える。

### 5. 主な研究成果リスト

#### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

※2020年12月8日時点で投稿済論文(1件)、投稿準備中論文(1件)であり、2020年3月末までにアクセプトされたものは追記予定。

1. Y. Tohyama, H. Honma, N. Ishihara, H. Sekiya, H. Toshiyoshi, and D. Yamane, "A Voltage-Boost Rectifier Circuit for Energy Harvesting from Environmental Vibrations," Journal of Physics: Conference Series 1407, 012101 (2019).
- 環境振動発電素子の微弱出力電力を回収するための低閾値整流昇圧回路を提案した。Si-CMOS 技術によるディクソンチャージポンプ型の構成を利用した回路を設計した。また、電気-機械系マルチフィジックスシミュレーションを用いた解析により、ダイオード閾値以下の交流電圧から直流電圧を整流昇圧できることを示した。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 3 (特許公開前のもも含む)

1	発 明 者	山根 大輔、益 一哉
	発 明 の 名 称	発電装置、エネルギーハーベストデバイス
	出 願 人	国立大学法人東京工業大学
	出 願 日	2017/11/27
	出 願 番 号	特願 2017-226893
	概 要	本発明では、エレクトレットを用いたMEMS振動発電素子について、エレクトレットと電極構造を分離配置して電気配線で接続することで、従来例のない多層エレクトレットの並列接続を実施できる。
2	発 明 者	山根 大輔、石原 昇、年吉 洋、本間 浩章
	発 明 の 名 称	振動発電装置
	出 願 人	国立大学法人東京工業大学、国立大学法人東京大学
	出 願 日	2018/7/10
	出 願 番 号	特願 2018-130894
	概 要	本発明では、振動発電装置において環境振動による定常的な発電を可能とするため、Si-CMOS 技術を用いた振動型発電装置用の低電力昇圧回路を提案する。振動発電方式はエレクトレット式に限らない。

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 【学会発表】Daisuke Yamane, Shota Otobe, Ken Atsumi, Tatsuya Koga, Toshifumi Konishi, Teruaki Safu, Shinichi Iida, Hiroyuki Ito, Noboru Ishihara, Katsuyuki Machida, and Kazuya Masu, "A 3-D PARALLEL-PLATE MEMS ACCELEROMETER WITH A GOLD PROOF MASS," in Proc. 32nd IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2019), Seoul, Korea, Jan. 27-31, 2019, pp. 684-687.
- 【学会発表】Yukiya Tohyama, Hiroaki Honma, Noboru Ishihara, Hiroshi Toshiyoshi, and Daisuke Yamane, "Bandwidth Enhancement of Vibrational Energy Harvesters by a Voltage-Boost Rectifier Circuit," in Proc. 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2019 - EUROSENSORS XXXIII), 23-27 June 2019, Estrel Berlin Hotel&Congress Center, Berlin, Germany
- 【受賞】 SDGs 賞 Nature 創刊 150 周年記念シンポジウム「日本の科学の未来」ポスターセッション「Your vision」「社会へ貢献するあなたの研究ビジョン」  
発表タイトル:「Energy Harvesters for Autonomous Wireless Sensors in True IoT

Society」受賞者:山根大輔(2019年4月4日)

4. 【プレスリリース】「振動発電素子のエレクトレット外付けに成功 ー無線IoT 端末電源として性能向上に期待ー」 JSTプレスリリース(東工大と共同発表) 2019年1月27日
5. 【プレスリリース】「環境振動発電素子の広帯域化に成功 ~エネルギーハーベスティングへの応用に期待~」 JSTプレスリリース(東工大と共同発表) 2019年6月26日