

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「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」
研究課題「エレクトレットMEMS振動・トライボ発電」

研究終了報告書

研究期間 2016年12月～2019年3月

研究代表者：年吉 洋
(東京大学 生産技術研究所、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本CREST研究は「エレクトレットMEMS振動・トライボ発電」と題し、環境中にあまねく存在する未利用の低周波数環境振動から微小電力を回収して、道路・鉄道・橋梁などの社会インフラ監視や流通管理、建物空調管理等に必要とされるIoT(Internet of Things)型の無線センサに電力供給に使用することを目標にして、静電誘導・トライボ発電型のMEMS(Microelectromechanical Systems)エナジーハーベスタの研究開発を実施した。また、2020年度までに体積電力密度 $10\text{mW}/\text{cm}^3$ の発電能力を実現するための基礎技術と、プロジェクト終了時まで素子あたり 1mW を実現するための新規材料研究、MEMS構造の設計・製造技術研究を実施した。

静電誘導・トライボ発電により環境振動から 1mW 級の電力を回収するためには、(1)環境振動に適したMEMS振動系の設計と、(2)高密度のエレクトレット(永久電荷)膜の形成、(3)電源素子としての出力インピーダンスの低減の3点の技術開発が必要である。そこで本研究では、東京大学グループが研究代表となって「①高効率エレクトレット振動発電素子の製作と評価」を実施した。また、その発電素子の素材となる「②固体イオンエレクトレットに関する研究」を静岡大学グループとの共同研究として実施した。さらに、出力インピーダンス低下のための「③イオン液体電気二重層に関する研究」を電力中央研究所との共同研究として実施した。

従来の振動発電素子の研究例では、必ずしもエネルギー変換効率とエネルギー取り出し効率を区別した明確な議論がなされていなかったが、東京大学グループの研究により、機械的入力パワーから電氣的パワーへの「変換効率」(efficiency)と、理論的に出力可能な電力に対する実際の出力を示す「電力取り出し効率」(effectiveness)を区別する解析モデルを体系化した。また、電力取り出し効率を理論最大の100%に近づけるための設計・製作手法を示し、実際にシリコンマイクロマシニング技術を用いて面積 $35\text{mm} \times 20\text{m}$ の振動発電素子を製作した。これにより、周波数 125Hz 、加速度 0.2G において出力 $430\mu\text{W}$ 、電力取り出し効率90%以上の性能を実現した。

また、アルカリ金属系不純物は半導体プロセス製造ラインでは禁忌とされていたが、静岡大学との共同研究により、K(カリウム)イオンをシリコン酸化膜中に取り込んで高温・高電解で活性化することにより、高密度・長期信頼性のあるエレクトレットとして利用可能であることを初めて示した。また、この処理はシリコン系製造ラインの最終工程で実施するために、半導体製造ラインへの不純物汚染は回避できる。エレクトレットは高効率の振動発電だけでなく、MEMSアクチュエータ・センサ特性の改善にも利用できる。

イオン液体が金属界面において大容量の電気二重層キャパシタを形成することは長く知られているが、液体であるために取り扱いに難があった。そこで本研究では電力中央研究所との共同研究によりイオン液体をポリマー中に分散・固定した素材そのものを分極してエレクトレット化し、高効率のトライボエレクトリック(接触)発電に使用可能であることを初めて示した。

以上の研究により、 $10\sim 100\text{Hz}$ 程度の低周波数環境振動に対してはシリコン製MEMS共振構造による振動発電が有効であることが示された。また、これよりも低い $0.1\sim 10\text{Hz}$ 程度の極低周波数においては、ゲル化イオン液体を用いたトライボ発電が有効であることを示した。両技術をマルチモーダルの組み合わせることで、環境振動から効率良く電力を回収してエレクトロニクス素子を駆動する新たな手法の有効性が実証できた。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. 高効率MEMS振動発電素子の設計・製作理論の体系化とその実現
概要：従来の振動発電素子の研究例では、必ずしもエネルギー変換効率とエネルギー取り出し効率を区別した明確な議論がなされていなかったが、本研究により、機械的入力パワーから電氣的パワーへの「変換効率」(efficiency) と、理論的に出力可能な電力に対する実際の出力を示す「電力取り出し効率」(effectiveness) を区別する解析モデルを体系化した。また、電力取り出し効率を理論最大の 100%に近づけるための設計・製作手法を示し、実際に90%以上の効率を実現した。
2. 固体イオンエレクトレットの形成メカニズム解明
概要：半導体プロセス製造ラインでは禁忌とされていたアルカリ金属系不純物は、シリコン酸化膜中に取り込んで高温・高電解で活性化することにより、高密度・長期信頼性のある永久電荷膜(エレクトレット)として利用可能であることを初めて示した。また、この処理はシリコン系製造ラインの最終工程で実施するために、半導体製造ラインへの不純物汚染は回避できる。エレクトレットは高効率の振動発電だけでなく、MEMSアクチュエータ・センサ特性の改善にも利用できる。
3. ゲル化イオン液体ポリマーによる新たなトライボ発電
概要：イオン液体が金属界面において大容量の電気二重層キャパシタを形成することは長く知られており、国外の研究例においては接触発電の特性改善にも利用されている。これとは異なり、本研究ではイオン液体をポリマー中に分散・固定した素材そのものを分極してエレクトレット化し、高効率のトライボエレクトリック(接触)発電に使用可能であることを初めて示した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. MEMS振動発電素子の事業化移行準備
概要：本CREST研究で開発したエレクトレット型MEMS振動発電素子を今後数年以内に事業化すべく、研究開始当初から国内企業との産学連携研究を行っている。現在は、エレクトレット材料とMEMS構造の製造ラインの整備を行っており、本研究のエレクトレット・MEMS構造製造の再現性を確認している。なお、本CREST研究で発生した知財は、当該企業との連名で共同出願している。

< 代表的な論文 >

- [1] Hiroshi Toshiyoshi, Suna Ju, Hiroaki Honma, Chang-Hyeon Ji, and Hiroyuki Fujita, "MEMS vibrational energy harvesters," Science Technology of Advanced Materials, vol. 20, no. 1, 2019, pp. 124-143. <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1569828>
- [2] Chikako Sano, Hiroyuki Mitsuya, Shimpei Ono, Kazumoto Miwa, Hiroshi Toshiyoshi, and Hiroyuki Fujita, "Triboelectric energy harvesting with surface-charge-fixed polymer based on ionic liquid," Science Technology of Advanced Materials, vol. 19, no. 1, pp. 317-323, 2018.
- [3] Hiroaki Honma, Hiroyuki Mitsuya, Gen Hashiguchi, Hiroyuki Fujita, and Hiroshi Toshiyoshi, "Improvement of Energy Conversion Effectiveness and Maximum Output Power of Electrostatic Induction-type MEMS Energy Harvesters by using Symmetric Comb-electrode Structures," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 28, pp. 064005-064017 (13pp), 2018.

<その他の成果>

1. 研究開発当初からの産学共同研究

概要： 大学発のシーズ・オリエンテッドな研究では、企業への技術移転段階において往々にして量産性や信頼性の点で開発課題が残ることが多い。これに対して本CREST研究では開始当初から国内企業との産学連携を実施しており、メーカーとユーザーの視点から必要な研究開発項目を設定し、これらを実施した。

2. 人材育成に重点をおいた産学共同研究

概要： 本CREST研究では連携先企業から研究者を迎え入れて、開始当初から共同研究を実施した。すなわち、単に企業からの研究費の対価として研究成果を提供する受託研究方式ではなく、企業研究者の設計・製造能力の育成を重視した。これにより、当該研究者が企業に戻った後にも、将来に渡って継続して研究開発を実施するタイプの産学連携研究モデルをした。

3. ユーザー研究者との異分野連携研究

概要： 上記2項の産学連携研究に加えて、本CREST研究では無線センサを社会インフラ監視に使用するユーザー側研究者(京都大学、東京都市大学)と連携した。具体的には、フィールドワークにより高速道路の高架橋や道路床版の振動を実際に計測し、それらの周波数・加速度特性に適した振動発電素子を設計・製作した。これらの計測箇所には部外者の立ち入りはできないため、高速道路事業者と共同研究を行っている大学研究者との異分野連携が不可欠であった。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

- ① 東京大学グループ（本CREST研究の研究代表）
研究代表者：年吉 洋（東京大学 生産技術研究所 教授）
研究項目：
 - (1) 高効率エレクトレット振動発電素子の製作と評価
 - (2) 新規な摩擦発電素子の研究開発
 - (3) エレクトレット型振動発電素子の数値モデル構築
- ② 静岡大学グループ（主たる共同研究者）
研究代表者：橋口 原（静岡大学 大学院総合科学技術研究科 教授）
研究項目：
 - (1) エレクトレット形成メカニズムの理解
 - (2) エレクトレット電位増大
 - (3) 高速エレクトレット形成
- ③ 電力中央研究所グループ（平成29年10月まで主たる共同研究者、その後はさきがけ研究に離脱）
研究代表者：小野新平（電力中央研究所 材料科学研究所 上席研究員）
 - (1) 静電容量の増大・電気二重層の可視化
 - (2) イオン液体の濡れ性とゲル化メカニズム
 - (3) ゲル化イオン液体の帯電メカニズム(→平成28年11月より東京大学グループが引き継ぎ)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- 株式会社鷺宮製作所
 - 本CREST研究成果の振動発電素子を事業化するために、CREST研究開始当初から共同研究を実施している。
- 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 益研究室 山根大輔 助教(さきがけ研究員)
 - 本CREST研究のエレクトレット材料を東工大に提供して、同助教のさきがけ研究と共同研究を実施している。
- 神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 神野伊策 教授（同領域CREST研究）
 - MEMS振動発電素子による自立電源エレクトロニクスに関して、本CREST研究開始当初から共同研究を実施している。
- 京都大学 インフラ先端技術産学共同講座 塩谷智基 教授
 - 振動発電素子を用いた社会インフラセンサの応用として、高速道路の劣化を計測するセンサに関して、平成27年度NEDO先導研究当時から共同研究を実施している。
- 東京都市大学 大学院工学系研究科 都市工学専攻 関屋英彦 准教授
 - 振動発電素子を用いた社会インフラセンサの応用として、高速道路の劣化を計測するセンサに関して、本CREST研究開始以降、共同研究を実施している。

- 韓国・梨花女子大学 電気電子工学科 Chang-Hyeon Ji 教授
 - Ji 教授はかつて東京大学グループ年吉研究室の客員教授として在籍したことがある。韓国に帰国後にも、継続して本CREST研究の振動発電素子の解析モデル構築に関する共同研究を実施している。

- CNRS (フランス国立科学研究センター) LIMMS (Laboratory for Integrated Micro-mechatronic Systems)
 - LIMMS/CNRS-IIS (UMI-2820)は1995年に創設されたMEMS関連の日仏国際共同運営ラボであり、フランスCNRSの国際共同研究所 UMI (Unité Mixte Internationale) としての格をもちつつ、東京大学生産技術研究所内に研究室を構えている。本CREST研究ではLIMMSからポストドク研究員を受け入れて、MEMS振動発電素子の共同研究を実施している。