

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「スマートメカトロニクスを
基盤とした振動発電素子の開発」

研究終了報告書

研究期間 2021年04月～2024年03月

研究代表者：小野 新平
((一財)電力中央研究所
エネルギートランスフォーメーション
研究本部 上席研究員)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本 CREST 研究は「スマートメカトロニクスを基盤とした振動発電素子の開発」と題し、環境中に存在する未利用の環境振動から微小電力を回収して、社会インフラ監視などに必要とされる IoT 無線センサに電力供給することを目指して、電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子の研究開発を実施した。本研究では、振動発電素子の開発に必要な不可欠な材料科学、機械工学、電子工学、情報工学の基盤技術を融合させた「スマートメカトロニクス」という新たな学理を構築、および社会インフラから発生する様々な振動から発電・蓄電までを一体化して行う振動発電素子の実用化を目指すというグランドチャレンジを定めて研究を行った。また、振動発電素子の社会実装を目指して、インフラ監視を目的とした異常診断アルゴリズムの構築を行なった。

材料科学からのアプローチとして、電気二重層の構造解明、および表面電荷量測定による電気二重層エレクトレットの表面電荷の最大化を行った。電気二重層は、電解質に電圧を印加するとヘルムホルツ層（電極近傍で正イオン、もしくは負イオンが蓄積される層）が形成されると言われている。近年では、電解中のイオン密度が増大し、溶媒を含まないイオン液体も開発されている。しかし、高密度の電解質に電圧を印加した際に形成される電気二重層の構造は自明ではない。なぜなら、電気二重層の形成時には、電極近傍で同じ符号のイオン同士で強く反発力が働くはずであり、また、イオンの蓄積に伴って反対符号のイオンが強い引力で引きつけられるはずである。したがって、電気二重層の形成時に電極界面でイオンがそのような配列をもつか自明ではなかった。そこで、イオン液体の作りだす電気二重層の構造を明らかにするために、電極間に電圧を印加した際のイオン分布を、オペランド X 線顕微分光法を用いて測定した。また、得られた結果をモデル計算することで、電気二重層を形成される際の電圧の印加法によって、電気二重層の容量が電圧の印加法により増大できることを見出し、実験により実証することに成功した。

また、電気二重層の表面電荷の最大化を行うために、表面電位を計測する手法を確立した。従来、電気二重層エレクトレットの表面電荷量は、振動発電素子を作製して見積もっていた。しかし、どの程度の表面電位や電荷密度を有しているのかは明らかになっていなかった。そこで、さきがけ研究にて構築した表面電位・発生電流評価システムを利用して、電気二重層エレクトレットの表面電荷密度を評価するシステムを開発した。これらの評価装置を用いることで、様々な材料を用いて作製した電気二重層エレクトレット容易に評価できるようになった。これらの評価のできるようになったおかげで、振動発電素子の出力向上へ繋がる材料開発を行うことができた。

機械工学からのアプローチとして、電気二重層エレクトレットを利用した非接触型の振動発電素子の試作を行った。電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子は、従来は電極と電気二重層エレクトレットが接触することで発電していた。しかし、電極と電気二重層エレクトレットが接触を繰り返すことで電気二重層エレクトレットが劣化するという問題があった。これらの問題を解決するために、有限要素法により共振周波数を調整した稼働部の設計、および精密機械加工技術を利用して非接触型の振動発電素子の作製を行った。共振周波数の振動を印加すると、設計通り静電誘導による電流が発生することを実証した。

電子工学からのアプローチとして、電気二重層エレクトレット振動発電素子から電力を効率よく回収・蓄電する回路の作製を行った。生物の神経細胞を模倣し、電源回路を必要な時に必要な場所だけ制御することで消費電力を極限まで抑制する非同期制御技術を開発した。また、エレクトレット振動発電向けの電源回路を設計し、サブマイクロワットレベルの微小電力でも着実に充電する電源回路動作を実証した。

最後に、情報工学からのアプローチとして、振動発電素子を利用した、インフラ異常診断システムの開発を行った。一般的に、インフラの異常診断は、振動センサからの振動データを利用して判定を行うことが多い。我々は、振動センサの代わりに振動発電素子を利用し、通信に必要な電力が蓄電できた段階で振動データの無線通信を行うことで、振動データと通信間隔

の両方を異常判断の判定基準として利用する異常診断アルゴリズムの構築をおこなった。

以上の研究より、電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子の材料、機械工学、電子回路の要素技術が確立し、それらの技術が融合することにより、電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子の社会実装へ向けて加速した。環境振動から効率よく電力を回収する環境発電に、電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子が有効であることを実証できた。この成果の社会実装を目標として、1年追加支援期間中において、リアルタイムモーション解析技術の舞台演出への投入と、サブマイクロワットで駆動する環境発電用電源回路の適用先の探索をおこなった。これらの技術はエンタメに限ることなく、特別支援教育や ADL (Activities of Daily Living) 支援への展開へ繋がった。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子のメカニズム解明

概要:

電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子は、イオンの作り出す電気二重層を永久電荷として利用できるため、多くの電流を得ることができる。しかし、その発電のメカニズムは複雑であり、理解することが困難であった。そこで、振動発電素子の発生電流の詳細測定を行うことで、電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子のメカニズムが、静電誘導によるものだけでなく、圧電効果、摩擦発電によっても発電することが明らかになった。

2. 電気二重層エレクトレット電荷測定

概要:

電気二重層エレクトレットがどの程度の表面電位や電荷密度を有しているかは不明であった。そこで、さきがけ研究にて構築した表面電位・発生電流評価システムを利用して、電気二重層エレクトレットの評価を行った。その結果、電気二重層エレクトレットの表面電位は1V程度であり、表面電荷密度は $0.05 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 程度であることがわかった。この結果は脱分極が生じていることを示唆しており、発電能力の改善の余地は十分残されていることを明らかにした。

3. イオンの動きの放射光による観測

概要:

電気二重層が形成されると電極近傍では正イオン同士、負イオン同士で強い反発力が働くはずである。また、正・負イオンが蓄積されると反対符号のイオンが強い引力によって引きつけられるため、電極界面でイオン配列がどのような配列をもつか明らかではなかった。そこで、電極間に電圧を印加した際のイオン分布を、オペランド X 線顕微分光法を用いて測定することに成功した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 環境発電用電源回路の作製

概要:

電源回路を必要な時に必要な場所だけ制御することで消費電力を極限まで抑制する非同期制御技術を開発した。そして本技術を応用して、エレクトレット振動発電向けの電源回路を設計し、サブマイクロワットレベルの微小電力でも着実に充電する電源回路動作を実証した。本技術は、様々な環境発電用の電源回路設計を簡便化するとともに、センサ制御や無線制御等の幅広い省エネ回路へ応用されていくものと考えている。

2. 電気二重層エレクトレットを利用した非接触式振動発電素子の開発

概要:

電気二重層エレクトレットの表面電位測定結果をもとに、電気二重層エレクトレットを用いた非接触式振動発電素子の動作実証に初めて成功した。従来の電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子は、可動電極と電気二重層エレクトレットが物理的に接触するため、利用可能な振動周波数帯域が制限されていた。今回、非接触式を実現したことで、任意の振動周波数帯域で動作可能な電気二重層エレクトレット振動発電素子の実現見通しを得た。

3. モーションセンサ技術「FUTTE-Me」の開発

概要:

人の動きを解析し、照明、映像そして音楽を任意に調整する技術を新たに確立した。振動発電技術で必須となる低容量データで高精度な解析を実現するアルゴリズムを実装した。リアルタイムでのモーションデータの補完とデータ点の予測を実装することで、低遅延での解析を行うことに成功した。また、毎日放送、れ組と共同で「サントリー1万人の第九」において、「FUTTE-Me」の技術投入を行い、本研究で得られた成を社会実装した。指揮者の腕に装着したセンサのデータをリアルタイムで解析し、指揮者の動きに合わせて動画の再生速度の可変を行った。※1年追加支援時の成果

<代表的な論文>

1. Shimpei Ono, Kazumoto Miwa, “Electric Double Layer Electrets and its Application for Vibrational Energy Harvester”, *Sensors and Materials*, vol. 34, 1853-1858 (2022).

概要:

電気二重層エレクトレットを利用した振動発電素子に関して、新材料電気二重層エレクトレットの作製法、および振動発電素子のメカニズムに関して紹介した。電気二重層エレクトレットは、室温で作製することができるメリットがあるだけでなく、電気二重層の効果によって多くの電流を得ることができることを見出した。また、一般的なエレクトレットを利用した振動発電素子の静電誘導による効果だけでなく、圧電、摩擦発電によって発電していることを見出した。

2. Daisuke Yamane, Kentaro Tamura, Keigo Nota, Ryuta Iwakawa, Cheng-Yao Lo, Kazumoto Miwa, and Shimpei Ono, “Contactless Electrostatic Vibration Energy Harvesting using Electric Double Layer Electrets”, *Sensors and Materials*, vol. 34, 1869-1877 (2022).

概要:

電気二重層エレクトレット(EDEL)を用いた振動発電素子の利用環境拡大へ向けて、接触型と比較してより広い振動周波数帯域で動作可能な非接触型電気二重層エレクトレット振動発電素子を新たに提案し、原理検証デバイスを設計・試作して、大気環境中で動作実証に成功した。開発したデバイスは面内振動式であり、可動電極やばね構造は放電加工により作製した。今後、素子封止やMEMS技術を用いることで、小型化・高出化も期待できる。

3. Takeaki Yajima, “Ultra-low-power switching circuits based on a binary pattern generator with spiking neurons”, *Scientific Reports*, vol. 12, 1150 (2022).

概要:

生物の神経回路は、個々のニューロンが必要な時に必要な場所だけ動作することで、電力の低消費と高度な制御が実現できている。本論文では、独自に設計したニューロン回路を用いて、IoTデバイスを超省エネ制御する技術を確認した。具体的には、世界最小の消費電力である1.2ピコワットで動作するニューロン回路を作製し、IoTデバイスの標準機能である直流電圧変換を1ナノワット程度の超低消費電力で行えることを示した。この成果は、センサー・無線・電源供給などIoTデバイスで必要とされるさまざまな機能に応用できる。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 電力中央研究所グループ

研究代表者:小野 新平(電力中央研究所エネルギー変換・エネルギー貯蔵研究本部 上席研究員)

研究項目

・エレクトレットを用いた振動発電素子開発

② 東京理科大学グループ

主たる共同研究者:中嶋 宇史(東京理科大学理学部第一部 准教授)

研究項目

・低周波振動モニタリングシステムの開発

③ 立命館大学グループ

主たる共同研究者:山根 大輔(立命館大学理工学部 准教授)

研究項目

・振動発電素子構造の最適化

④ 九州大学グループ

主たる共同研究者:矢嶋 赳彬(九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授)

研究項目

・振動発電用蓄電回路の開発

⑤ 群馬大学グループ

主たる共同研究者:田中 有弥(群馬大学大学院理工学府 准教授)

研究項目

・エレクトレット材料の評価技術の開発

※1年追加支援時の体制

① 電力中央研究所グループ

研究代表者:小野 新平 (電力中央研究所エネルギー変換・エネルギー貯蔵研究本部 上席研究員)

研究項目

・リアルタイムモーション解析技術の開発

・エレクトレットを用いた振動発電素子開発

② 東京理科大学グループ

主たる共同研究者:中嶋 宇史 (東京理科大学先進工学部 准教授)

研究項目

・リアルタイムモーション解析技術の開発

③ 九州大グループ

主たる共同研究者:矢嶋 赳彬 (九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授)

研究項目

・振動発電用蓄電回路の開発

(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

- Paris-Saclay 大
電気二重層エレクトレット材料を貼り付けるだけで物性を変化させる研究に関して、フランス Paris-Saclay 大を中心とする EU Horizon プロジェクトと共同で研究を開始した。
- Purdue 大 Alex Wei 教授
電気二重層エレクトレット材料の大量生産法に関する共同研究を行った。
- Malaya 大 Thamil Selvi Velayutham 准教授
高分子圧電材料に関する共同研究を行った。
- Xiamen University Malaysia Wee Chen Gan 准教授
摩擦発電に関する共同研究を行った。
- National Tsing Hua University, Cheng-Yao Lo 教授
フレキシブル MEMS デバイスに関する共同研究を行った。