

# 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」 事後評価（課題評価）結果

## 1. 研究領域の概要

本研究領域は、様々な環境に存在する熱、光、振動、電波、生体など未利用で微小なエネルギーを、センサーや情報処理デバイス等での利用を目的とした $\mu\text{W}$ ~ $\text{mW}$ 程度の電気エネルギーに変換（環境発電）する革新的な基盤技術の創出を目指します。

具体的には、2つの大きな柱で研究を推進します。1つは熱、光、振動、電波、生体等のエネルギーを電気エネルギーに高効率に変換または高度に利用するための基盤技術の構築とその源となる基礎学理の創出です。これらは、全く新しい原理・新物質または新デバイスなどを用いて、未利用の微小エネルギーを電気エネルギーに変換する研究であり、例えばスピンとトポロジーの相関等、革新的なエネルギー変換に資する原理の解明・実証、及びそれらを活用した新物質の創製や、従来の特長や機能を飛躍的に向上させる優れた物性を有する新物質の創製に挑戦します。もう1つの柱は、上記基盤技術の創出のための理論・解析評価・材料設計の研究で、エネルギー変換時における物理現象（材料物性、界面、輸送現象等）の新しい解析技術の構築や、物性理論に基づく、あるいは計算機シミュレーションを駆使した、新たな材料設計の指針を提示することに挑戦します。これら2つの柱は、相互補完的に密接に結びついて研究を進めることが非常に重要です。

したがって、本研究領域では、挑戦的な提案を求めつつ、領域終了時には、革新的な新原理、新物質、新デバイスが検証・実証できること、それらが次の研究開発ステージに繋がることを目指して研究を推進します。

そのため、研究総括及び副研究総括の強い統率の下、CREST・さきがけを複合領域として一体的に推進し、成果最大化のために研究チームの再編や研究進捗の調整、また課題間の連携などに取り組みます。

## 2. 事後評価の概要

### 2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

戦略的創造研究推進事業・CRESTにおける事後評価の目的、方法、評価項目及び基準に沿って実施した。

### 2-2. 評価対象研究代表者及び研究課題

#### 2019年度ステップアップ評価採択研究課題

- (1) 年吉 洋（東京大学生産技術研究所 教授）  
MEMS振動発電を用いたパーペチュアル・エレクトロニクス
- (2) 野村 政宏（東京大学 生産技術研究所 教授）  
フォノンエンジニアリングに立脚した熱電給電センシングシステム

#### 2020年度ステップアップ評価採択研究課題

- (1) 石橋 孝一郎（電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授）  
スーパーステップトランジスタによるレクテナと圧電トランスの融合によるRFエネルギーハーベスティング技術の実用化
- (2) 神野 伊策（神戸大学 大学院工学研究科 教授）  
高効率非鉛圧電薄膜発電システムの実証展開
- (3) 李 哲虎（産業技術総合研究所省エネルギー研究部門 主席研究員）

## 低熱伝導率材料を用いた熱電モジュールの開発

### 2021年度ステップアップ評価採択研究課題

(1) 岡本 敏宏 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授)

バンド伝導性有機半導体を用いたハイブリッド型環境発電素子の開発

(2) 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)

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

### 2019年度ステップアップ評価採択研究課題 (2022年度1年追加支援課題)

(1) 鈴木 雄二 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

ウェアラブルデバイスのための高出力エレクトレット発電の創成

(2) 渡邊 孝信 (早稲田大学理工学術院 教授)

プレーナ型スケーラブル熱電発電機構の実証と展開

### 2-3. 事後評価会の実施時期

2022年10月31日(月曜日)、11月9日(水曜日)

2023年1月 各研究者からの研究報告書に基づき研究総括、副研究総括による事後評価(1年追加支援課題)

## 2-4. 評価者

### 研究総括

谷口 研二 大阪大学 名誉教授

### 副研究総括

秋永 広幸 産業技術総合研究所デバイス技術研究部門 総括研究主幹

### 領域アドバイザー

青合 利明 (株)ムラカミ 顧問

齊藤 英治 東京大学大学院工学系研究科 教授

篠原 真毅 京大大学生存圏研究所 教授

白石 賢二 名古屋大学未来材料・システム研究所 教授

高柳 万里子 東芝デバイス&ストレージ(株) 技術企画部 エキスパート

竹内 敬治 (株) エヌ・ティ・ティ・データ経営研究所社会・環境戦略コンサルティンクユニット シニアマネージャー

藤田 博之 東京都市大学総合研究所 特任教授

舟窪 浩 東京工業大学物質理工学院 教授

宮野 健次郎 物質・材料研究機構 フェロー

山田 由佳 産業技術総合研究所情報・人間工学領域 領域長補佐

### 外部評価者

該当なし

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： MEMS 振動発電を用いたパーペチュアル・エレクトロニクス

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

年吉 洋（東京大学生産技術研究所 教授）

主たる共同研究者

橋口 原（静岡大学大学院工学領域 教授）

鈴木 孝明（群馬大学大学院理工学府 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている
-------------

○総合評価コメント：

パーペチュアル・エレクトロニクスという新しい技術分野を提唱し、独自に開発したシリコン酸化膜由来のエレクトレットを MEMS 振動子構造に付加することで世界最高水準の振動発電デバイスを実現した。振動発電デバイス実用化への課題を新規な着想で解決することにより、学術面および社会実装面でインパクトの大きい成果を挙げている。具体的には、物性理論解析や設計理論構築とその理論を実証する実験を緻密に行い、汎用性の高い研究成果を得ている。振動発電の非共振化・広帯域化、周波数追従性付与、さらにメタマテリアル構造の基板からの発電を含めた振動発電量の増大化等を達成。また理論計算の結果を基にシリコン酸化膜エレクトレットの形成・劣化機構を解明し、さらなる長寿命化への道筋を示した。これら研究成果は、幅広い産業分野において MEMS 振動発電素子の応用範囲を拓けるなど、その波及効果は大きい。さらに企業への技術移管によりシリコンプロセスと整合性の高い MEMS 振動発電素子の実用化も間近である。

戦略目標における「次世代型の環境保全」という社会の実現に資する成果にまで到達している。利用価値のある「For What に向けた基礎研究」の成功事例として特筆すべきと判断した。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： フォノンエンジニアリングに立脚した熱電給電センシングシステム

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

野村 政宏（東京大学生産技術研究所 教授）

主たる共同研究者

大西 正人（東京大学大学院工学系研究科 特任講師）

森下 真行（前田建設工業（株）ICI 総合センター グループ長）

原島 純一（凸版印刷（株）エレクトロニクス事業本部 主任）

吉田 宜史（セイコーフューチャークリエーション（株）開発一部 部長）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている
-------------

○総合評価コメント：

フォノンエンジニアリングの学理構築、Ray phononics 分野の創成、熱フォノンクス分野の開拓（薄膜ナノ構造を用いた指向性熱流発生や固体集熱の実証など）、熱フォノン平均自由測定法の確立、など伝熱工学において新しい学問分野を開拓し、世界トップレベルの研究成果を数多く生み出している。

科学技術イノベーション面においても、シリコン薄膜材料にナノ構造を形成することで、ZT の飛躍的な増強に成功した。このフォノンナノ構造薄膜を用いて、現時点で世界最高性能をもつ実用的な平面型シリコン熱電変換デバイスを実証した。また、熱電環境発電による電力で取得したセンシングデータをクラウドに記録するシステムを構築し、将来の IoT 用電源の実装例として企業と協力して保守点検が必要なインフラ管理システムのフィールドテストを行うなど、ステップアップによってさきがけ研究がさらに大きく飛躍し、基礎研究と企業共同の実用化研究を両立させて効果的に研究を進めた。「学問のあるところに技術は育つ」の好事例である。また、本領域の CREST さきがけ参加メンバーを糾合して応用物理学会においてフォノンエンジニアリング研究会を立ち上げ、国内の伝熱工学の研究に多大な貢献をした。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： スーパーステープトランジスタによるレクテナと圧電トランスの融合による RF エネルギーハーベスティング技術の実用化

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

石橋 孝一郎（電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授）

主たる共同研究者

井田 次郎（金沢工業大学工学部 教授）

柳谷 隆彦（早稲田大学先進理工学部 教授）

平山 裕（名古屋工業大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A+ 非常に優れている
-------------

○総合評価コメント：

ステップアップ CREST 研究の初期段階から関係企業参加のアドバイザー委員会を立ち上げ、目標を明確化・共有化しながら技術開発を進めてきた。研究成果としては、急峻な電圧電流特性を有する SOI-MOSFET とそれを用いたインバータおよびレクテナの考案、電波の到来方向によらず安定な受信が可能な無指向性のアンテナ (351MHz 帯、クレジットカードサイズ)、高インピーダンス・メタマテリアルアンテナと Cross Current 整流回路を組み合わせた高効率レクテナ (920MHz, 2.4GHz の周波数領域における世界最高整流効率達成)、ブラッグ反射器上に c 軸方向にジグザグ積層した ScAlN 圧電トランスの発明、極低消費電力 CPU、ウェークアップ信号受信デバイス、ボックスキャッター方式の低電力センサー信号送信方式の試作など、各研究グループの強みを生かした独自の実用的な RF エネルギーハーベスト技術を創出した。また、レクテナ・リファレンス設計技術を確立し、920MHz 帯向けの微小ループアンテナとショットキーバリアダイオードの高精度モデルを共同研究企業に技術移転している。アジア最大の展示会 CEATEC では、要素技術を組み合わせて無線環境発電による電子ペーパー上に画像表示するデモンストラクションに成功。研究期間の満了までに、100  $\mu$  W 発電デバイス実証の目途も立っており、十分に初期の設定目標を達成したと認められる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 高効率非鉛圧電薄膜発電システムの実証展開
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

神野 伊策（神戸大学大学院工学研究科 教授）

主たる共同研究者

前中 一介（兵庫県立大学工学研究科 教授）

吉村 武（大阪公立大学大学院工学研究科 准教授）

山田 智明（名古屋大学大学院工学研究科 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている
---------

○総合評価コメント：

世の中で広く使用されている圧電体セラミックス PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）の圧電性能を凌駕する非鉛の圧電材料(KNN や BF0)の開発に挑んだ。基礎研究面では、シリコン基板上でスパッタ法・ゾルゲル法による圧電薄膜エピタキシャル成長技術を確立し、応力による結晶構造の変化を観察することで相変化を含む圧電特性発現機構を明らかにした。材料の良質の薄膜形成法を開発したことで、非鉛系強誘電体は着実に社会実装が進んでいる。圧電薄膜デバイス開発においては、インパルス振動を駆動源とした 2 自由度型の振動発電素子とステンレス箔を用いたカード型圧電素子を設計・作製し、実用的なレベルの発電性能を確認した。並行して既存の圧電素子も利用したタイヤの振動や気流から発電してセンサ信号を無線送信できる自立無線センサノードを実証するなど、圧電薄膜発電の着実な進展が認められる。これらの利用価値のある基礎研究により 10 社と共同研究、1 社と NDA を締結するに至っている。また、研究代表者がプロジェクトリーダーになって進める国際標準化の活動も高く評価できる。国際電気標準会議（IEC）では、すでに 4 件の国際標準規格を成立させ、さらに、実環境下における振動発電デバイスの評価に関する 63150-3 を 2021 年に提案して、Committee draft ステージに到達させている。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 低熱伝導率材料を用いた熱電モジュールの開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

李 哲虎（産業技術総合研究所省エネルギー研究部門 首席研究員）

主たる共同研究者

水口 佳一（東京都立大学大学院理学研究科 准教授）

末國 晃一郎（九州大学大学院総合理工学研究院 准教授）

黒木 和彦（大阪大学大学院理学研究科 教授）

黒崎 健（京都大学複合原子力科学研究所 教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている
---------

○総合評価コメント：

Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>系に限られてきた熱電発電材料に風穴を開けるべく、希少元素を用いない環境調和型熱電材料の社会実装を目指して研究を進めてきた。基礎研究面では、電子-フォノン散乱による電子の緩和時間を第一原理的に組み込んだ熱電性能計算ソフトを開発し、熱電材料(Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>)のゼーベック係数及び電気抵抗の温度依存性がほぼ再現できることを確認した。

熱電デバイス作製面では、独自開発の熱電材料(p-type MgAgSb、n-type Mg<sub>3</sub>Sb<sub>2</sub>)の実用化に向けた量産性の高い溶融法と熱処理プロセスを開発し、200℃を超える領域で ZT>1 の熱電材料の製法を確立した。さらに、熱電モジュールとしての実用化を見据えて、電極界面での拡散防止層の形成プロセスを確立し、MgAgSb を p 型、(Mg, Y)<sub>3</sub>(Sb, Bi)<sub>2</sub> を n 型素子とするスケルトン型熱電モジュールを作製した。高温側 320℃、低温側 5℃とした時の変換効率が 7.4% (ΔT=315℃)に達し、Bi-Te-Sb 系のモジュールに匹敵する値が得られた。この熱電性能が Te フリーの材料で得られたことは熱電材料分野での大きなブレイクスルーであり、高く評価できる。熱電材料の開発だけでなく、低コスト製造プロセスの開発や信頼性の高い電極材料の開発まで、量産を念頭に熱電発電素子の技術開発が行われたことは、科学技術イノベーションにおいても十分な成果である。



## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： バンド伝導性有機半導体を用いたハイブリッド型環境発電素子の開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

岡本 敏宏（東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授）

主たる共同研究者

尾坂 格（広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授）

小林 伸彦（筑波大学数理物質系 教授）

野々口 斐之（京都工芸繊維大学材料化学系 講師）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

熱電特性および光電性能の優れた p 型/n 型有機半導体を開発し、同材料を使用した熱電・光電変換ハイブリッド型発電素子の作製プロセスを確立した。分子間振動を抑えたバンド伝導性の低分子有機半導体の開発、マルチオービット伝導に立脚した高性能 p 型有機半導体の開発や、主鎖内の電気伝導を高めた高分子半導体の創出および伝導メカニズムの解明、空気中でも安定で高性能の n 型ドーピング材の開発に加え、わずか 1 分子の厚さに電荷を閉じ込めた有機二次元ホールガスを実現して、有機半導体で「絶縁体—金属転移」を世界で初めて実証するなど、有機膜の基礎研究においては、極めて独創的な成果が得られている。また、新開発の「時間依存波束拡散法」を拡張したパワー因子の解析法は、計算規模、計算精度、材料の適応範囲において他の計算法を凌駕している。

熱電・光電変換ハイブリッド型発電素子の作製技術に関しては、新たに高結晶性 n 型高分子半導体を開発し、塗布・液相ドーピングプロセスを基に素子の高集積化技術を構築した。社会実装にまで辿り着くことはできなかったが、新しい有機熱電材料に関する科学的な知見を多く得ており、2 年間という期間では十分に目標を達成したと認められる。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

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）

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）

中嶋 宇史（東京理科大学理学部第一部 准教授）

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）

山根 大輔（立命館大学理工学部 准教授）

3. 事後評価結果

○評点：

A 優れている

○総合評価コメント：

研究代表者が提唱したスマートメカトロニクスの実現に向けて、電気二重層エレクトレットを求心力として、様々な分野のさきがけ研究者を糾合してステップアップ CREST の研究を進めてきた。エレクトレット材料、デバイス、システム、その応用技術まで広い範囲の技術を有するチームの中でエネルギーハーベスターという狭い枠を超えた分野で顕著な研究成果を得た。具体的には、電気二重層エレクトレットを使用したエネルギーハーベスターの開発、pA 級の極低消費電力変換器、エッジ AI を取り入れたインフラ異常診断アルゴリズム・異常診断システム、AI 解析技術を援用して「人の感動」をセンシングし演出と組み合わせる技術（ヒトコネクションテクノロジー）の開発などがある。ヒトとヒトが繋がり、Well-being を実現する「ヒトコネクションテクノロジー」については、SciFoS 活動の調査結果をもとに実用化障壁が高くない産業分野（玩具やゲームなど）に着目して技術開発を行った結果、芸術性を伴うエンターテインメント分野において外部と多種多様な連携関係が構築されたことは特筆に値する。電池の代替品と考えられていたエネルギーハーベスターの新しい利用法としての好事例である。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： ウェアラブルデバイスのための高出力エレクトレット発電の創成

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

鈴木 雄二（東京大学大学院工学系研究科 教授）

主たる共同研究者

加藤 隆史（東京大学大学院工学系研究科 教授）

田中 優実（東京理科大学工学部 准教授）

吉田 真史（東京都市大学理工学部 教授）

※1年追加支援時の体制

研究代表者

鈴木 雄二（東京大学大学院工学系研究科 教授）

主たる共同研究者

田中 優実（東京理科大学工学部 准教授）

3. 事後評価結果

○評点（2021年度事後評価時）：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント：

（以下、2021年度課題事後評価時のコメント）

フッ素樹脂CYTOP-CTX-Aをベース材料とし、機械学習を援用した量子化学計算を駆使したアミンの構造最適化と有機合成実験を通して、これまでにない高い表面電荷密度のポリマー・エレクトレット膜を開発した。この材料探索の新手法は、新規材料開発に一石を投じる画期的な方法と位置付けられる。新たに開発したポリマーエレクトレットを腕振り回転型発電器に適用し、新規電源管理回路の採用で、実用的な発電量1mW@1Hzを達成した。さらに電極間に液晶を挟んだエレクトレット発電デバイスを考案・試作し、発電量が約5倍増加することを実証した。当初計画には無かったペロブスカイト型LaAlO<sub>3</sub>、YAlO<sub>3</sub>の薄膜エレクトレットの発見も特筆すべき研究成果である。

エレクトレット材料やデバイスの開発と並行して、①フランス・サヴォアモンブラン大学やケント州立大学を筆頭に多くの海外研究機関と共同研究を実施、②応用物理学会新領域グループ「エネルギーハーベスティング研究グループ」の立ち上げ、③国際電気標準会議(IEC)のプロジェクトリーダーとして歩行時の腕振り発電に関する規格開発、などを積極的に進めて学協会、国際的にも大きな貢献をした。

（2023年1月追記）

1年追加支援によって、ポリマーエレクトレットを搭載した腕装着型振動発電デバイスの非線形系機構を用いたさらなる高出力化を目標として、実験計測・プロトタイプ試作を実施した。展示会等でのデモを積極的に行い、社会実装への試みが開始されている。重力による復元トルクを補償する反発トルクの導入によって腕振りから発電機回転子への入力を最大化しつつ固有周波数をチューニング可能な回転型エレクトレット発電機を試作した。4 km/h程度の低速の歩行運動において、従来比10倍以上の0.4 mWの発電出力を得た。また、超小型SECE回路においてもエレクトレット発電機によるコールドスター

トを初めて実現し、エレクトレット振動発電デバイスの実用化に大きく前進した。また、本追加支援期間中に、領域としてその実現を目指していた国際ワークショップが開催され、共同研究による研究成果の国際展開を期待できることとなった。

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： プレーナ型スケーラブル熱電発電機構の実証と展開

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

渡邊 孝信（早稲田大学理工学術院 教授）

主たる共同研究者

鎌倉 良成（大阪工業大学情報科学部 特任教授）

藤ヶ谷 剛彦（九州大学工学研究院 教授）

黒澤 昌志（名古屋大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

○評点（2021年度事後評価時）：

A 優れている

○総合評価コメント：

（以下、2021年度課題事後評価時のコメント）

「狭窄領域に熱流を通す” 拡がり温度場” を利用したプレーナ型熱電発電デバイスの着想を実証すべく、LSIと親和性の高い現実的な製造プロセスを提案し、同デバイスの開発を進めた。「 $1\text{mW}/\text{cm}^2$  @  $\Delta 10\text{K}$  の高密度発電」という挑戦的な数値目標は達成できなかったが、そもそもこれは極めて高い目標設定であったと判断している。

フォノンドラッグ効果シミュレータの開発や、新たに参画した研究者による配向を制御したCNTシートやIV属混晶熱電材料の開発に関しては、世界トップレベルの成果が出ている。

早稲田大学にアンビエントロニクス研究所を設立してエネルギーハーベスティング技術の拠点を立ち上げ、環境からの微小エネルギー取得という戦略目標に向けて異分野の研究者を統合する仕組みを整え、研究者ネットワークの形成等、戦略目標への貢献度は高い。さらにJSPSの国際研究拠点形成事業の採択課題「IoT社会を実現するマルチ環境発電材料・デバイス国際研究拠点形成」（令和2年度）に発展して、環境発電の研究が継続できている。アンビエントロニクス研究所では環境発電の活動を継続し、IoT産業の振興にアカデミアから貢献するとの表明もあり、大きな期待をもって歓迎したい。

（2023年1月追記）

1年追加支援によって、CNTシートを用いたフレキシブル熱電発電デバイスのプロセス技術開発に取り組んだ結果、新規に光照射によるパターニングが可能な光ドーパント発見し、世界で初めて、高解像度の光パターニングを用いたプレーナ型熱電シートの開発に成功した。本成果に関して、特許出願も行われた。また、電子-フォノン統合モンテカルロデバイスシミュレータを使って極微細FET内部のナノスケール熱制御の可能性を検討した結果、ドレイン端にホットエレクトロンに対するエネルギー障壁を設けることで、コンタクトに近い領域で一気に熱を放出させる素子になり得ることを確認した。この素子を使って熱放散を制御すれば、LSIのホットスポットの温度が抑えられる効果が期待される。