

戦略的創造研究推進事業
—CREST・さきがけ複合領域—

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」

複合領域事後評価用資料

研究総括：谷口 研二

副研究総括：秋永 広幸

2023年3月

目次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
① 概要	1
② 達成目標	1
③ 研究推進の際に見据えるべき将来の社会像	1
(2) 研究領域	2
(3) 研究総括・副研究総括	2
(4) 採択研究課題・研究費	4
① CREST	4
② さきがけ	7
2. 研究総括のねらい	10
(1) 本研究領域の対象とする技術分野	10
(2) 研究分野に応じた研究の指導方針	13
(3) 研究進捗管理に活用した「おにぎり」について	14
3. 研究課題の選考について	15
(1) CREST	15
(2) さきがけ	17
(3) 複合領域として	19
4. 領域アドバイザーについて	19
5. 研究領域のマネジメントについて	21
(1) 研究領域マネジメントの基本方針	22
(2) 領域運営全体の流れ	22
(3) 研究進捗状況の把握について	24
(4) CREST、さきがけ研究課題への対応	32
① CREST	32
② さきがけ	32
③ 複合領域として	33
(5) 研究費配分の方針	40
(6) CREST チームのステップアップ評価について	43
6. 戦略目標の達成状況について	50
(1) CREST	50
① 各研究課題の成果概要	50
② 顕彰・受賞	59

(2) さきがけ	61
①各研究課題の成果概要.....	61
②顕彰・受賞	64
(3) 複合領域の研究を実施した結果.....	65
①研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献.....	65
②研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献.....	68
③国際標準化への貢献.....	70
④研究成果の外部発信.....	70
⑤人材輩出と研究継続に向けた国家プロジェクト(国プロ)への採択状況.....	78
⑥その他の特記事項.....	79
7. 総合所見	83
(1) 研究領域のマネジメントについて.....	83
(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況.....	84
(3) 本研究領域を設定したことの意義.....	85
(4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待, 展望, 課題.....	86
(5) 所感、その他	87

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「微小エネルギーの高効率変換・高度利用に資する革新的なエネルギー変換機能の原理解明、新物質・新デバイスの創製等の基盤技術の創出」

①概要

自然界の中で未利用のエネルギーは数多くあり、これらを電気エネルギーに変換して利用する技術が盛んに研究されている。その中でも、微小なエネルギーからマイクロワットからミリワット程度の出力ができる電気エネルギーへの変換技術の開発が欧米諸国で注目を集め、環境に存在するエネルギーを常に利用可能とすることで、社会の中で数億～数兆も利用されることが想定されるセンサーや、更には系統電源からの電源供給が不可能な環境下で用いることが想定されるモビリティ用デバイスや生体用デバイス等の自立的な電源として活用することを目的とした投資が強化されている。

一方、自然界の中で未利用の微小エネルギーを電気エネルギーに高効率に変換するための新原理と、それに基づく新たな物質の創製が必要とされている中で、我が国は、新しい原理(一例として、スピンゼーベック効果など)や、新物質創製(一例として、高 ZT 物質、マルチフェロイック物質など)に関する革新的な研究シーズを有している。

そのため、本戦略目標では、我が国の強みを活かし、微小エネルギーの高効率変換・高度利用に資する革新的なエネルギー変換機能の原理解明及び新物質・新デバイスの創製等の基盤技術の創出に取り組むことで、大量のエネルギーを必要としないセンサー等の様々な環境への普及を加速し、世界に先駆けた Internet of Things (IoT)、ビッグデータの活用による次世代型の環境保全・ものづくりの実現を目指す。

②達成目標

本戦略目標では、基本的な原理の解明や新物質・新構造デバイスの創製だけでなく、基盤的解析・設計技術や理論的アプローチを含めて戦略的に研究を推進することで、現在ある原理や変換材料を凌駕する、微小なエネルギーから電気エネルギーへの変換技術を創出することを目的とする。具体的には、以下の達成を目指す。

- (1) 微小エネルギーの高効率変換・高度利用技術に資する新原理の解明及び革新的な物質・デバイスの創製
- (2) 微小エネルギーの高効率変換・高度利用技術創出のための理論及び基盤的解析・設計技術の開発

③研究推進の際に見据えるべき将来の社会像

上記「達成目標」に記載した事項の達成を通じ、以下に挙げるような社会の実現に貢献す

る。

微小エネルギーからの電気エネルギー創出が可能となることにより、系統電源への接続による電源供給には適さないものの大量のエネルギーを必要としないセンサー、モビリティ向けデバイス、生体デバイス等の普及が加速し、IoT、ビッグデータの活用による次世代型の環境保全・ものづくりが実現している社会。

(2) 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」(2015年度発足)

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 μW ~ 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す。

具体的には、2つの大きな柱で研究を推進する。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を創出する。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、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、従来の特性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する。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する。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ある。

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する。

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む。

(3) 研究総括・副研究総括

谷口 研二 (大阪大学 名誉教授)

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)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

平成 27 年度新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h27.pdf

(4) 採択研究課題・研究費

①CREST

表 1. CREST およびステップアップ CREST の採択研究課題と研究費 (百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 採択時 ²	研究課題	研究費 ¹
2015 年度 (2015 年 度～2018 年度)	上野 敏幸	金沢大学 理工研究域 電子情報学系 准教授	磁歪式振動発電の実用化に 向けた革新的メカニズム・ 材料の創成	161.5
	勝藤 拓郎	早稲田大学 理工学術 院 教授	軌道／電荷の揺らぎを用い た低熱伝導性-高電気伝導 性素子の開発	157.0
	鈴木 雄二	東京大学 大学院工学 系研究科 教授	高出力環境発電のための革 新的エレクトレット材料の 創成	208.8
	年吉 洋	東京大学 生産技術研 究所 教授	エレクトレット MEMS 振動・ トライボ発電	127.1
	中辻 知	東京大学 物性研究所 教授	トポロジカルな電子構造を 利用した革新的エネルギー ハーヴェスティングの基盤 技術創製	162.5
	森 孝雄	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクト ニクス研究拠点(MANA) MANA 主任研究者	新規な磁性半導体熱電材料 を用いた熱電発電デバイス の研究開発	179.2
2016 年度 (2016 年 度～2019 年度)	渡邊 孝信	早稲田大学 理工学術 院 教授	計算フォノンニクスを駆使し たオン・シリコン熱電デバ イスの開発	174.5
	石橋孝一郎	電気通信大学 大学院 情報理工学研究科 教 授	Super Steep トランジスタ と Meta Material アンテナ による nW 級環境 RF 発電技 術の創出	156.9
	大野 雄高	名古屋大学 未来材 料・システム研究所 教授	超薄膜材料を用いた電解液 流体発電技術の創出	160.0

	河口 研一	富士通(株) ネットワークプロダクト事業本部 ワイヤレスシステム事業部 研究員 (富士通(株) モバイルシステム事業本部 ワイヤレスシステム事業部 事業部長付)	ナノワイヤ半導体を用いた環境電波発電デバイスの研究開発	142.0
	神野 伊策	神戸大学 大学院工学研究科 教授	分極制御非鉛圧電薄膜による高効率 MEMS 振動発電素子の創製	172.3
	塩見淳一郎	東京大学 大学院工学系研究科 准教授 (同教授)	メカノ・サーマル機能化による多機能汎用熱電デバイスの開発	226.0
	李 哲虎	産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 主任研究員 (同研究グループ長)	ラットリングとローンペアの融合的活用による熱電材料の開発	154.1
2019年度 ステップ アップ評 価採択	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	242.2
	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	164.7
	野村 政宏	東京大学 生産技術研究所 准教授 (同教授)	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	204.3
	森 孝雄	物質・材料研究機構国際ナノアーキテクニクス研究拠点(MANA) MANA 主任研究者(物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 グループリーダー)	新規な磁性半導体熱電材料を用いた熱電発電デバイスの研究開発と応用	28.5

	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	190.1
2020年度 ステップ アップ評 価採択	石橋孝一郎	電気通信大学 大学院 情報理工学研究科 教 授	スーパースティープトラン 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	162.0
	神野 伊策	神戸大学 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	154.5
	塩見淳一郎	東京大学 大学院工学 系研究科 教授	メカノサーマル工学による 熱電技術の低コスト化と高 付加価値化	155.5
	李 哲虎	産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 研究グループ長 (同首席研究員)	低熱伝導率材料を用いた熱 電モジュールの開発	120.0
2021年度 ステップ アップ評 価採択	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	53.1
	小野 新平	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	97.8
			総研究費	3754.6

¹各研究課題とも研究期間の総額，進行中の課題は予定を含む(2022年12月23日現在)

²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

②さきがけ

表 2. さきがけの採択研究課題と研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 採択時 ²	研究課題	研究費 ¹
2015年度	黒崎 健	大阪大学 大学院工学研究科 准教授	変調ドープ高効率バルクナ ノシリコン熱電材料の開発	40.0
	黒澤 昌志	名古屋大学 エコトピア科学 研究所グリーンコンバージョ ン部門 特任講師 (名古屋大学 大学院工学研究 科 物質科学専攻 講師)	革新的多機能センサモジュ ール実現に向けた新しい IV 族混晶熱電物質の創製	37.4
	鈴木 孝明	群馬大学 大学院理工学府知 能機械創製部門 准教授 (同教授)	柔軟な 3 次元微細構造を用 いたポリマー振動発電	40.1
	野村 政宏	東京大学 生産技術研究所 マ イクロナノメカトロニクス国 際研究センター 准教授 (東京大学 生産技術研究所 マイクロナノ学際研究センタ ー 准教授)	熱フォノンニクスの学理創出 と高効率熱電変換への応用	40.0
	藤岡 淳	東京大学 大学院工学系研究 科 講師 (筑波大学 大学院数理物質科 学研究科 准教授)	トポロジカル半金属におけ る熱・スピン起電力の開拓	36.6
	藤ヶ谷剛彦	九州大学 大学院工学研究院 応用化学部門 准教授 (同教授)	半導体性単層 CNT からなる 熱電変換シートの創製	40.2
	松野 丈夫	理化学研究所 石橋極微デバ イス工学研究室 専任研究員 (大阪大学 大学院理学研究科 教授)	5 d 電子系酸化物のスピン 流誘起熱電変換	43.4
	湯浅 裕美 (福澤裕美)	九州大学 大学院システム情 報科学研究院 教授	スピンゼーベック発電増大 に向けた新材料と新構造の 探索研究	39.2

	吉田 秀人	大阪大学 産業科学研究所 准教授	熱電ナノ材料の原子構造と ナノスケール温度分布の可 視化	35.7
2016年 度	片瀬 貴義	北海道大学 電子科学研究所 助教 (東京工業大学 科学技術創成 研究院 准教授)	遷移金属酸化物歪界面を利用 したフォノンドラッグ熱 電能の制御	40.5
	酒井 英明	大阪大学 大学院理学研究科 准教授	多層ディラック磁性体にお ける新奇熱磁気発電現象の 開拓	40.6
	高橋 竜太	東京大学 物性研究所 助教 (日本大学 工学部 准教授)	メンブレン単結晶を用いた 振動発電デバイスの創製	44.2
	中嶋 宇史	東京理科大学 理学部第一部 講師 (同准教授)	柔構造制御に基づく機能性 圧電ポリマーの創製	47.5
	中村 優男	理化学研究所 創発物性科学 研究センター 上級研究員	バルク光起電力効果による 光電変換プロセスの機構解 明と高効率化に向けた新材 料開拓	25.1
	野々口斐之	奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 助教 (奈良先端科学技術大学院大 学 先端科学技術研究科 助 教)	超分子ドーピングを駆動力 とする高性能ナノカーボン 熱電膜の創製	40.0
	村田 理尚	京都大学 化学研究所 助教 (大阪工業大学 工学部 准教 授)	π 拡張型ジチオラート金属 錯体を用いた中性熱電材料 の創製	40.1
	柳谷 隆彦	早稲田大学 電気・情報生命 工学科 准教授	分極反転構造の圧電トラン ス薄膜音響共振子による電 波発電	40.1
	山田 智明	名古屋大学 大学院工学研究 科 准教授	強誘電体ナノ構造の分極操 作による巨大圧電膜の創製	41.0
2017年 度	衛 慶碩	産業技術総合研究所 ナノ材 料研究部門 研究員 (同主任研究員)	伝導性ポリマーによる熱充 電可能な電気化学セルの創 成	40.1

	岡本 敏宏	東京大学 大学院新領域創成 科学研究科物質系専攻 准教授	有機半導体の構造制御技術 による革新的熱電材料の創 製	51.2
	小野 新平	電力中央研究所 材料科学研 究所 上席研究員 (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)	イオン液体ゲルによる新奇 メカノエレクトリック変換 の解明と応用展開	48.5
	小菅 厚子	大阪府立大学 大学院理学系 研究科物理科学専攻 准教授	低温廃熱回収を目的とした 熱電変換材料及びデバイスの 開発	44.0
	桜庭 裕弥	物質・材料研究機構 磁性・ スピントロニクス材料研究拠 点 主任研究員 (同グループリーダー)	異常ネルンスト効果を用い た新規スパイラル型熱電発 電の創成	41.7
	田中 有弥	千葉大学 先進科学センター 助教	極性分子配向薄膜を備えた 新規振動発電器の創生	52.1
	都甲 薫	筑波大学 数理物質系 准教 授	新奇ドーピング機構に基づ く高出力フレキシブル熱電 変換シート	31.1
	矢嶋 赳彬	東京大学 大学院工学系研究 科 助教 (九州大学 大学院システム情 報科学研究院 准教授)	抵抗変化素子を活用した環 境発電用回路技術の創成	51.3
	山根 大輔	東京工業大学 科学技術創成 研究院未来産業技術研究所 助教 (立命館大学 理工学部 准教 授)	多層エレクトレット集積型 CMOS-MEMS 振動発電素子の 創製	66.2
			総研究費	1,137.9

¹各研究課題とも研究期間の総額，進行中の課題は予定を含む(2022年12月23日現在)

²変更/移動のあった場合、下段に括弧つきで記載

2. 研究総括のねらい

我が国が目指す Society5.0(超スマート社会)では、無数のセンサーからの情報をクラウドにあげ、その膨大なデータを活用して豊かな人間生活、無人産業、自動走行車などを可能にする社会の実現を目指している。このため、センサーの数は2025年頃には1兆個(「トリリオンセンサー」)、その後も指数関数的に増加すると予想されている。この膨大な数のセンサーとその情報通信用の電源としては、電源系統と電池が想定されるが、前者では配線工事コストだけでなく災害による停電時にはセンサーからの情報が途絶える重大な問題を抱えている。一方、後者(電池駆動方式)では定期的な電池の交換に人手がかかる上に廃棄される多量の電池による環境汚染が懸念される。

このようなセンサーの爆発的増加による問題を解決する第三の環境発電(エネルギーハーベスター)が注目されている。これは我々の身の回りにある様々な環境エネルギー(光、熱、振動、電波など)を積極的に利用して、地球環境に負担をかけずに増え続けるセンサーの電力需要に応えようとするものである。本研究領域では、この目的を達成するために、我が国の環境発電に携わる研究者・技術者をまとめて超スマート社会の実現に向けた環境発電の研究拠点の形成を目指した。

環境発電を支える学問・技術分野は広範囲に及ぶことから、学術と産業の両面の同時並行的な研究開発が望ましい。この技術分野の発展には、各研究者が専門とする狭い研究領域に閉じこもることなく環境発電全体を俯瞰し、広い視野を持つ研究者が互いに情報交換できるネットワーク型のバーチャル研究所の構築が重要である。すなわち、環境発電技術の課題が膨大にあるがゆえに、研究者が個別突破を図るのではなく、集団でゴールに向かう協働型の研究開発を行う必要がある。本研究領域では、参画する研究者がCRESTやさきがけの区別なく情報交換ができ、相互の協力・協働体制がとれるCRESTとさきがけが一体となった垣根のない“完全複合型”の研究管理・運営を行った。

(1) 本研究領域の対象とする技術分野

環境発電は、図1に示す熱、振動、電波などのエネルギー源を横断する3つの共通要素(エネルギー取込み機構、エネルギー変換材料、電力変換回路)から構成されている。本研究領域ではこの3つの構成要素とそれらを集積した環境発電デバイスの実証を研究の対象とした。

エネルギー取込み機構

微小エネルギー発電の初段は環境との接点にあたるエネルギー取込み機構である。これは熱、振動、電波などに敏感に反応する構造によって次段のエネルギー変換材料に環境エネルギーを伝える役割を果たす。なおWi-Fi無線やテレビ電波などの電磁波から直接電圧(電流)を取り出すアンテナ(エネルギー取込み機構)ではエネルギー変換材料は必要としないが、無指向性や高インピーダンスにして電波取込み効率を高めるには様々な工夫が必要と

なる。

微小な環境エネルギーを扱う本研究領域では、この環境エネルギー取込み機構での損失を抑えて高い効率で電力を取り出す方法が主要な研究課題となる。振動発電を例にとると、環境に存在する様々な周波数の振動は三次元的に揺れ動いているが、市販の振動発電器では一方向に揺れ動く狭帯域の周波数の振動から電力を得ているに過ぎない。将来的には振幅方向や広帯域の振動に対して効果的にエネルギーを取り込む機構の開拓が必要である。

また、熱電変換機器の初段にあたる熱流取込み機構(熱流制御機構)では、熱伝導率の高い金属やセラミックに挟まれた熱電材料に大きな温度差をつける熱流設計法や熱源/熱電モジュール間および熱電モジュール/空気界面の熱抵抗を下げする方法も重要な研究課題となる。

エネルギー変換材料

環境発電で取得できる電力は圧電材料、磁性材料、熱電材料などの物性値(圧電係数、異常ネルンスト係数、熱電係数など)に応じて増減する。また、例えば、熱電材料においては、一般に、電気伝導率が大きく、熱伝導度が低いという相反する物性値を制御した材料が必要となることから、スピン物性の顕在化、ナノ構造化などの様々な試みが必要となる。このため環境発電の社会実装に向けて、エネルギー源を電圧(電流)に変換する材料の性能向上が最優先課題となるが、高性能な材料が開発されてもすぐに実使用に耐えられる訳ではない。振動発電では繰り返し変形による材料の疲労破壊や電極のはがれなどが避けられない。機械的な振動が無い熱電発電でも昇降温によるパッケージの熱歪や高温での特性劣化や構造物のはがれなどが生じる。このため、開発された高性能材料が研究進捗の過程で長期的な信頼性が確保できずに淘汰されていく例は数知れない。新材料が最終的に社会実装される可能性は小さいが故に、数多くの材料の研究を並行的に行う必要がある。材料開発の成功例の裏には屍が累々としているが、GaN 結晶のように成功すると極めて大きな経済効果(LED 照明)を生むことが多い。この意味で材料開発に長けた我が国において、エネルギー変換材料を新たに研究開発することは本研究領域の重要な使命でもある。

本研究領域で開発する材料としては、現在、市販されている Bi_2Te_3 (熱電材料)、PZT(圧電材料)、CYTOP(エレクトレット)を超える性能の材料開発を目指した。

電力変換回路

電力変換回路は半導体スイッチ、コイル、コンデンサで構成されたコンバータとインピーダンス整合回路、整流回路から構成される。微弱な電波発電の整流回路では、使用するダイオードの順方向電圧による電力損失が支配的なため、ダイオードに代る低損失整流素子の開発が求められる。

また、環境発電ではエネルギー変換素子(圧電変換素子や熱電変換素子)の内部抵抗が取得電力量に大きく影響する。例えば、コンバータの入力抵抗が変換素子の内部抵抗より小さ

ければ、コンバータの入力端子にはわずかな電圧しか現れない。逆に入力抵抗が内部抵抗より大きいと、入力端子に流入する電流が大幅に減る。いずれの場合でもコンバータに伝わる電力は低下することから入出力のインピーダンスを整合させた電力変換が最も重要になる。さらにデバイスの寄生素子の存在も発電量に大きく影響する。熱電変換素子では電力損失につながる直列寄生抵抗(熱電材・金属間のコンタクト抵抗)を低減するため、金属材料の選択やコンタクト抵抗に影響する製造プロセスの確立も重要な研究課題である。圧電素子では電力変換材料に並列に寄生するキャパシタを逆に利用した取得電力量増加法も検討されている。具体的には、コンバータ側にコイルを付加し、共振のタイミングをスイッチングで調整して電力を絞り取る回路方式である。この種の電力抽出回路技術はまだ研究段階にあり、解決すべき研究課題は山積している。

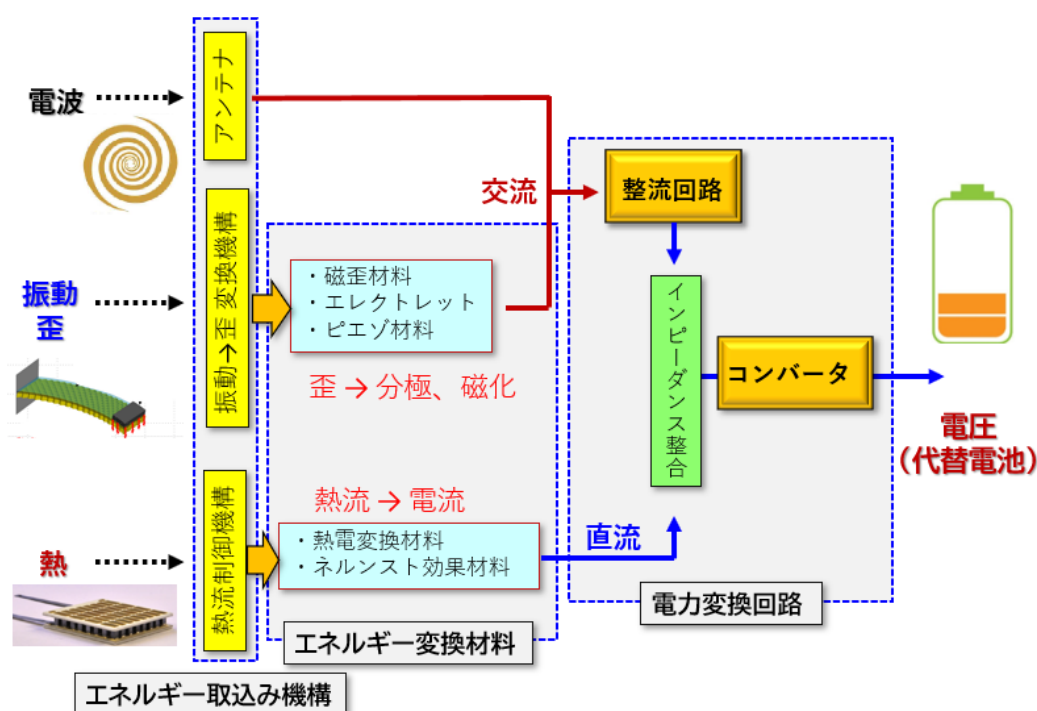


図1. 環境にある電波、振動(歪)、熱などのエネルギー源は、(1)エネルギー取込み機構、(2)エネルギー変換材料、(3)電力変換回路、を経て電力に変換される。

上記の電波、振動、熱発電以外にも、従来型太陽電池、蓄電技術に基づく環境発電、生体埋め込み型の環境発電等が想定されるが、これらのエネルギーハーベスターは、既に製品化技術開発のステージにあるプログラム、あるいは他省庁系のプログラムで行うべきと考えて本研究領域の研究対象から除外した。

[補足] 2015～2016年度の募集で本研究領域の対象としていたエネルギーハーベスティングの研究分野に加えて、2017年度のさきがけ募集の際には、特に期待する研究テーマとして、「フレキシブルデバイスへの応用を指向する提案/効率良く電力を取り出すデバイスの構造、回路方式やパッケージングに関する提案」をあげた。この理由は、エネルギーハーベ

スティング技術を広くとらえるようにしたことと、研究総括・副研究総括が想定していなかったPoCの実現も期待したからである。結果として、さきがけ3期生がステップアップ(後半フェーズ)CRESTに応募した際には、有機太陽電池とのハイブリッド発電技術への展開がなされることとなった。また、2019年、2020年度採択のステップアップCRESTにおいては、研究計画作り込みの議論を経て、提案技術の適用先として、二次電池も含めたシステム開発や心臓発電の開発も実施されることになった。

(2) 研究分野に応じた研究の指導方針

本研究領域は、上述の個別要素技術の研究に加え、これら要素技術を集積した発電デバイスの動作実証を含んでいる。このような専門領域に閉じた学術的な研究と、技術を組み合わせたデバイスの開発の双方を含む本研究領域では、技術分野に応じた指導が必要と考えた。

材料研究分野の指導方針

これまでの材料開発は、様々な材料プロセス条件の下で実験を繰り返しながら新物質を発見する“経験と勘”に頼る研究が主流であったが、本研究領域では科学的な研究開発の方法論に基づく研究指導をした。具体的には、物性値や材料特性に関する目標を明確にするために、研究者には可能な限り①第一原理計算法、②マテリアルズ・インフォマティクス、の活用を勧めた。第一原理計算法は、元素の空間的な配置から電子帯構造や格子振動様式などを計算する方法で、物質に熱、光、歪などを加えた時の物性の変化を机上である程度予測することができる。作製した物質の性能は必ずしも第一原理計算の結果と一致するという訳ではないが、定性的には元素置換や格子歪などによる材料物性の変化の方向(ベクトル)を知ることができる。

さらに元素組成に物性が依存する材料の研究には、機械学習による材料探索の手法(マテリアルズ・インフォマティクス)や、数少ない実験で幅広い組成の成膜ができるコンビナトリアルスパッタ装置などの使用も推奨してきた。

一方で優れた性能の材料が開発できても信頼性試験をしている過程で「はがれ」や「特性劣化」などの問題が発生し、多くの材料は淘汰されていく。この種の淘汰された材料に関するデータは、同じ失敗を繰り返さないためにも研究者間で情報共有することが大切である。本研究領域の領域会議などでは情報共有のために失敗例の報告を奨励してきた。

また、薄膜の熱電性能や圧電性能などについては、標準的な性能評価法が確立していないため、同一材料の評価結果が研究者毎にばらつくケースが見受けられる。振動発電の分野においても、異なる技術間では、発電量の比較を行うことが困難であった。これらの問題を解決すべく、同一試料を世界各国の研究機関が保有する機器で評価するラウンドロビンを取り入れた計測手法の開発や、国際電気標準会議におけるデジュール国際標準化にも積極的に取り組んできた。

設計分野の指導方針

材料開発と違って、環境エネルギー取込み機構や電力変換回路などは、使用する部品や材料の物理定数(熱伝導係数、ポアソン比、弾性率、圧電定数など)と材料・部品の構造が決まるとシミュレーションにより構造解析や発電量の見積もりができる。このため、デバイスの試作を繰り返す旧来の開発方法を避けるため、現象を科学的に理解し、それを再現する物理モデルの構築を勧めている。こうすればシミュレーション精度が向上し、机上である程度の環境発電デバイスの性能を予測することができる。

また、エネルギー取込み機構や電力変換回路の製作については、すでに完成度の高い製造プロセス技術を持つ民間企業と共同でデバイスを試作することも奨励してきた。MEMS や CMOS 回路の試作では、業界標準の機械系の構造設計シミュレータや SPICE などの回路系シミュレータを活用してデバイスの性能を最適化した上で試作ができる。さらに民間企業で製造する特性ばらつきの少ない環境発電デバイスを実現することで早期の社会実装が可能になるメリットがある。

(3) 研究進捗管理に活用した「おにぎり」について

本研究領域では研究進捗の管理に図 2 に示す「おにぎり」を用いた。採択課題の研究者には「おにぎり」の各頂点にある質問事項(For what?, What's your challenge?, How to break the limit?)を考慮して、研究期間内に達成する数値目標を立てるよう指導してきた。この作業を通して研究者は、本人の研究の独自性を再認識し、数値目標の達成を阻む技術的な壁を見つけ、その壁の向こうに見える将来の応用、を意識するようになる。

各自の研究は、この「おにぎり」の図面を完成させて総括・副総括の了解を得た後に始まるが、研究の進捗に応じた修正も総括・副総括が了解すれば可能である。さらに半期毎に実施する領域会議や年度計画書で「おにぎり」図面の使用を義務付けて、定期的に研究の進捗を振り返りながら初心に戻ることを意識させてきた。自ら作成した「おにぎり」図面によって、学理解明などの学術研究に偏りがちな研究者も環境発電デバイスに求められる課題を意識した研究者に変化する。逆に発電デバイスの開発に重点を置く技術者も専門外の材料開発などにも配慮した設計を心掛けるようになる。こうして、「おにぎり」をもとに研究の守備範囲を広げた領域メンバーは、本人の専門分野を超えた議論もできるようになった。

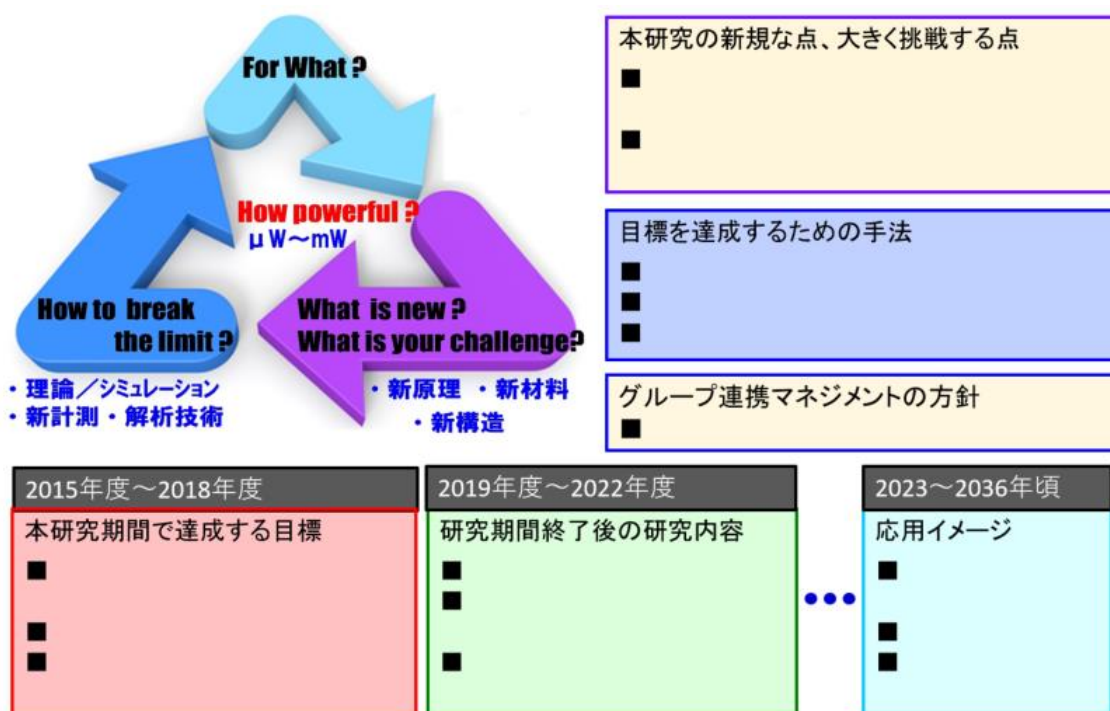


図 2. 研究者自らが研究の位置づけを認識し、研究進捗を確認するために用いる研究自己管理表「おにぎり」。領域会議や研究計画提出時などで研究者自ら研究を振り返るために繰り返し使用した。

3. 研究課題の選考について

(1) CREST

本研究領域では、①さきがけとの壁をほぼ完全に打ち破った運営、②前半と後半のフェーズに分かれた研究期間、③後半フェーズ(ステップアップ)への移行時には研究総括・副研究総括の責任の下で研究課題の再編・強化すること、が従来の CREST との違いである。このことを認識した上で応募してもらうため、CREST 課題の募集要項に以下の説明を加えた。

表 3. 募集要項からの抜粋

<p>■研究期間と研究費</p> <p>本研究領域の期間は、平成 27 年度から平成 34 年度まで(予定)です。この期間を、2 つの研究フェーズと大きく捉えて、研究領域の運営にあたります。まず前半フェーズは、未利用で微小なエネルギーを、電気エネルギーへ高効率に変換することが期待できる、より多くの基盤技術の創出に取り組む期間と位置づけます。</p> <p>次に後半フェーズは、革新的な新原理、新物質、新デバイスの検証・実証に向けて、これらの中から有力と判断される基盤技術の集積や応用先の開拓等に取り組む期間と位置</p>
--

づけます。

このことを踏まえて、今年度の研究提案は以下の通り募集します。

CREST での研究期間は、従来とは異なり、平成 28 年度から平成 31 年度(4 年度)以内とします。また研究費については、1.6 億円以内とします。

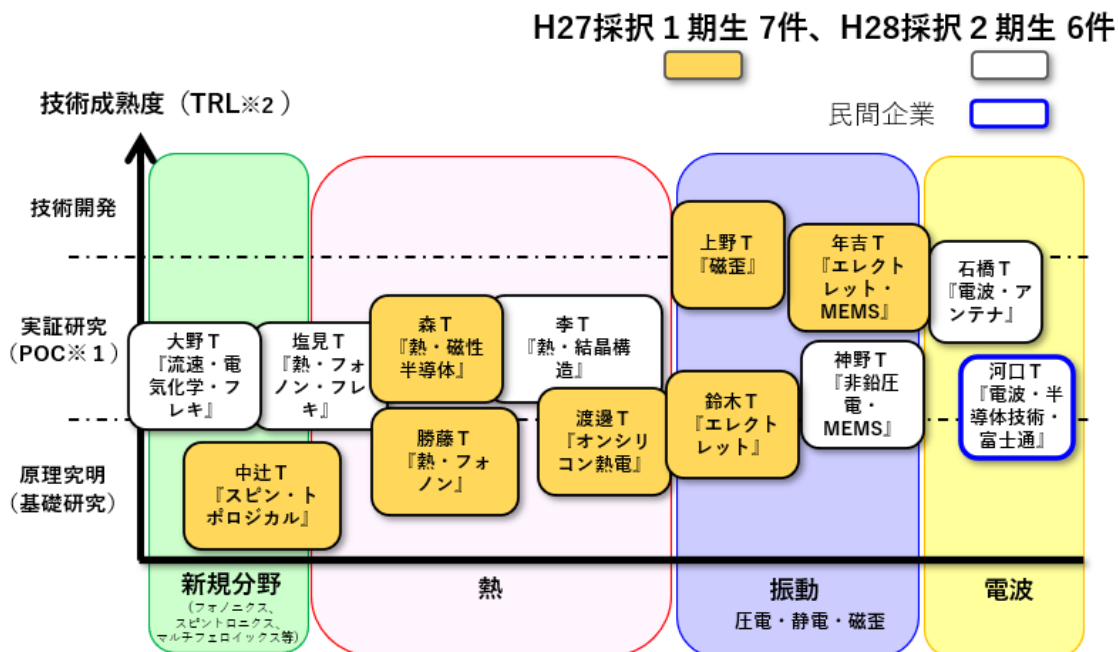
なお、CREST・さきがけ共通して、研究期間を通じて研究進捗の把握とそれを踏まえた研究計画の調整を行います。特に今回採択する研究課題の期間が終了する年度には、将来の実用化を視野に入れた研究成果の利用価値を見出すための課題進捗評価を実施します。その結果として、研究領域の後半フェーズでの成果の最大化に向けて、一部の研究課題を必要に応じて再編も行いつつ改めて取り上げ、発展や強化させます。これは、研究領域内の研究チーム及び研究者(CREST、さきがけを問わず)が相互に協働し、異分野横断や相互補完的な連携をした新たなチーム体制を構築して、課題解決に取り組むことを意味し、それまでの研究成果および将来性を加味して、研究総括・副研究総括の責任の下でこの新たな体制構築を行います。

※ 全国の共用施設を積極的に利用し、効率的な研究費計画の立案をお願い致します。

前半フェーズの CREST に関しては、応募件数の年次推移は、2015 年度 41 件、2016 年度 27 件であった。書類選考では、各応募書類を 3 名の審査委員が専門の立場から、4 段階(S, A, B, F)の評価を行った。また、独創性、新規性、優位性に加え、(1)研究グループのシナジー効果(研究代表者のマネジメント力)、(2)シナリオ実現可能性、も評価の視点に加えた。これらの審査結果をもとに面接対象者選考会で総括・副総括の領域運営の方針(特定の環境エネルギー発電に偏らない配慮)も考慮しながら最終採択件数の 2 倍程度の面接対象者を選出した。

面接選考会では、研究の独創性・発展性に加えて、研究代表者がサイエンスとテクノロジーの双方に精通し、基礎学理、材料からデバイス応用まで幅広い知識と経験を持ち、提案する研究分野で多くの研究業績を有することや機関横断的な専門家集団の研究をマネジメントする能力も採択の重要な判断項目とした。その結果、1 期 7 件、2 期 6 件を CREST チームとして採択した。

研究代表者の研究機関は大学が 10 チーム、国立研究機関 2 チーム、民間企業 1 チームである。採択課題の 13 件を、技術成熟度(TRL)を縦軸、環境エネルギーの種類を横軸に配置すると、想定していたすべての環境発電エネルギー源をカバーして、TRL の観点からも基礎研究から製品に近い技術開発までを幅広くカバーしていることが分かる。



※1:POC=Proof of Concept ※2:TRL= Technology Readiness Level

図 3. 採択した CREST 課題の技術成熟度 (TRL) と対応するエネルギー源の種類

なお、後半フェーズで採択したステップアップ (SU)-CREST 課題については後で説明する。

(2) さきがけ

個人研究のさきがけでは、環境発電に資する原理の解明、優れた物性を有する新物質の創製、基盤技術の創出のための解析評価・材料設計、デバイスの実証 (POC) など、環境発電に関する科学 (サイエンス) と技術 (テクノロジー) の観点から研究課題を募集した。サイエンス主体の研究課題では研究の独創性を重視し、技術を指向した研究課題では実効性に重点を置きつつ、数値目標の達成可能性や研究成果の波及効果などを勘案して採択を行った。

応募件数は 2015 年度 72 件、2016 年度 59 件、2017 年度 50 件であった。CREST の選考と同様、審査委員の評価結果と総括・副総括の判断に基づいて採択者数の約 2.5 倍の面接対象者を選考した。この際、独創性に加え、(1) 伸び代 (期待される成果の具体的な記述等から判断)、(2) 提案書のわかりやすさ (目標達成にむけた研究計画の筋道等から判断)、(3) 熱意 (提案時の明確な目標設定等から判断)、も評価の視点に加えた。続く面接選考会では研究の独創性や実効性、研究者の熱意や着想の豊かさなどを採択の基準とした。なお、基礎学術領域・萌芽的・挑戦的な研究課題についても、提案者の研究能力を見極めながら、新学術分野の発展の可能性を考慮して採択課題を決定した。

なお審査員の評価が拮抗しているケースでは若手研究者や女性研究者、外国籍の研究者の採択を優先した。その結果、1 期生から 3 期生までそれぞれ各 9 名、合計 27 名をさきが

け研究者(女性研究者 2 名、外国籍研究者 1 名)として採択した。エネルギー源の種類と技術成熟度(TRL)に応じて配置した採択課題を図 4 に示す。

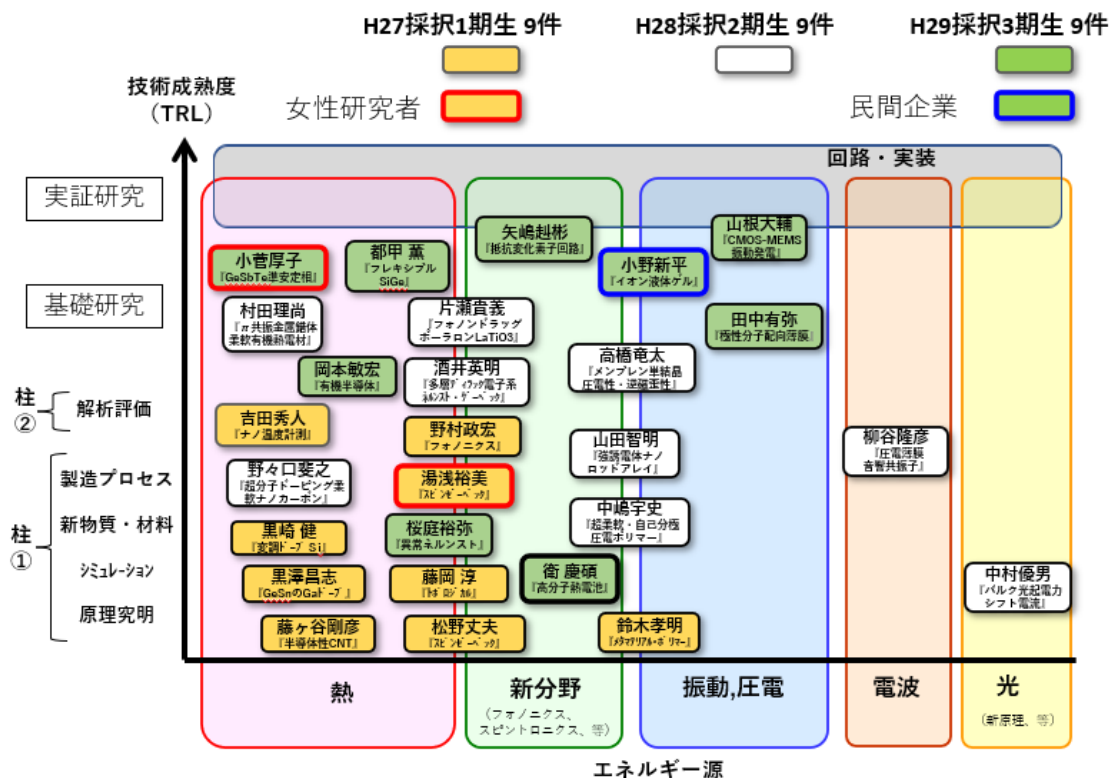


図 4. さきがけ採択課題の技術成熟度 (TRL) とエネルギー源の種類による分類

採択された研究者の所属研究機関の分布は、図 5 に示すように、採択時点で関東地区 15 名、関西地区 7 名、九州地区 2 名、東海地区 2 名、北海道 1 名となった。大学(公立 1 名、私立 2 名)22 名、国立研究機関 4 名、民間企業 1 名であった。



図5. 採択されたさきがけ研究者の所属機関の所在地(赤丸は女性研究者)

(3) 複合領域として

本研究領域では、CREST とさきがけの双方を合わせて一体的に運営した。CREST とさきがけ双方の研究課題で、多くのエネルギー源(熱、振動など)を網羅し、基礎原理から材料、デバイス、システムまで含む本研究領域の全体像を意識して採択を決定した。その際、着実に成果が見込める開発的な課題と目標達成に多少懸念のある挑戦的な研究とのバランスを考慮しつつ複合領域として最大の成果が得られる研究課題の組み合わせにした。

3期生までの研究課題の採択を通して、物性原理の究明、材料、デバイス構造、電力変換、設計論、シミュレーションなど、バランスのよい研究課題の採択ができたと考えている。

4. 領域アドバイザーについて

CREST とさきがけの壁を完全に取り除いて領域を運営することを前提に、①専門分野で多くの実績を有する著名な研究者、②後進の研究者の育成にも熱意のある専門家、を領域アドバイザーに指名した。具体的には、以下の表4に示す通り、環境エネルギー源の各研究領域における専門家(有機熱電材料(青合)、磁性材料・デバイス(大野、斎藤)、電波発電(篠原)、計算物理・化学(白石)、メカトロニクス(藤田)、ピエゾ材料(舟窪))に加えて、後半フェーズで実証する発電デバイスに対して的確に指導ができる民間企業の技術者(集積回路(高

柳)、熱電デバイス(山田))、環境発電デバイスやシステム全体を見渡せる環境発電コンサルタント(竹内)、JSTの研究管理・運営の立場から本研究領域の指導にあたる宮野アドバイザーの合計11名である。このうち、高柳ADと山田ADの2名は女性研究者である。なお、大野ADは東北大学の学長就任に合わせて2018年3月末で退任となった。

表4. 領域アドバイザーの所属と専門分野

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 ¹	役職	任期
青合 利明 (有機材料)	千葉大学 自然科学系教育研究機構 (株式会社ムラカミ)	特任教授 (顧問)	2015年7月～2023年3月
大野 英男 (磁性材料・デバイス)	東北大学 電気通信研究所	教授	2015年7月～2018年3月
斎藤 英治 (磁性物性)	東京大学 大学院工学系研究科	教授	2015年7月～2023年3月
篠原 真毅 (電波発電)	京都大学 生存圏研究所	教授	2015年7月～2023年3月
白石 賢二 (計算物理・化学)	名古屋大学 未来材料・システム研究所	教授	2015年7月～2023年3月
高柳 万里子 (集積回路)	東芝デバイス&ストレージ株式会社 技術企画部	参事 (エキスパート)	2015年7月～2023年3月
竹内 敬治 (環境発電コンサルタント)	株式会社エヌ・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グユニット	シニアマネージャー	2019年4月～2023年3月
藤田 博之 (メカトロニクス)	東京都市大学 総合研究所	特任教授	2015年7月～2023年3月
舟窪 浩 (ピエゾ材料)	東京工業大学 物質理工学院 材料系	教授	2015年7月～2023年3月
宮野 健次郎 (材料物性)	物質・材料研究機構	フェロー	2015年7月～2023年3月
山田 由佳	パナソニック株式	総括担当	2015年7月～2023年3月

(熱電デバイス)	会社 ビジネスイノベーション本部 事業開発センター (産業技術総合研究所 情報・人間工学領域)	(領域長補佐)	
----------	--	---------	--

¹変更/移動のあった場合、下段に括弧つき記載

各アドバイザーはさきがけ研究者の担当も兼任し、サイトビジットや面談などを通して研究環境の確認、個々の研究指導、研究成果の社会実装に向けたアドバイスなどを行った。表5は、アドバイザーの専門領域を考慮して、担当を決定したさきがけ研究者の一覧表である。

表5. さきがけ研究者の担当領域アドバイザー

アドバイザー	1期生	2期生	3期生
青合 利明	藤ヶ谷 剛彦	野々口 斐之	衛 慶碩 岡本 敏宏
齊藤 英治	松野 丈夫		(桜庭 裕弥)
篠原 真毅		柳谷 隆彦	矢嶋 赳彬
白石 賢二	野村 政宏	村田 理尚	小野 新平 (桜庭 裕弥)
高柳 万里子	黒澤 昌志 湯浅 裕美		山根 大輔
藤田 博之	鈴木 孝明	山田 智明	田中 有弥
舟窪 浩	吉田 秀人	(高橋 竜太) 酒井 英明	(高橋 竜太)
宮野 健次郎	藤岡 淳	片瀬 貴義 中村 優男	都甲 薫
山田 由佳	黒崎 健	中嶋 宇史	小菅 厚子

() 枠に記載の桜庭研究者については斎藤 AD が物性面、白石 AD が材料面で研究指導を分担。高橋研究者は台風洪水による研究室被害のため、さきがけ研究を一年間延長したため、2期生および3期生として取り扱った。

5. 研究領域のマネジメントについて

(1) 研究領域マネジメントの基本方針

第5期科学技術基本計画(2016年～2020年)で策定されたSociety5.0では、あらゆるところに膨大な数のセンサーが設置されることが想定されており、そのセンサーを駆動する環境発電技術が重要となるが、これまでの環境発電デバイス(エネルギーハーベスター)は変換効率、材料の問題、量産性・信頼性・コスト等の面から広く普及するには至っていない。これを打開するには学術的な材料研究と社会実装に向けた技術開発(発電性能、安全性、耐久性、量産プロセスなど)の両面からのアプローチが重要である。本研究領域のプログラムの前半フェーズ(1期生の場合、2015年度～2018年度)は、特定分野に偏らない研究課題を採択し、検討した多くの材料・技術の中から環境発電に適した材料や技術を絞り込む期間と位置付けた。

なお、本研究領域をマネジメントするにあたって、下記の3つのポイントに重点を置いた。

- (1) 世界一を目指す研究集団(One team意識)の構築
- (2) 次世代を担う若手研究者の育成
- (3) 社会実装を前提とした環境発電デバイスの実証

プログラムの後半フェーズ(1期生の場合、2019年度以降)では、CRESTのステップアップ(ステージゲート)評価を実施して、CRESTチームの代表者が必要に応じてさきがけ研究生(含：領域内の他CREST研究者)を加えた研究計画を提案し、ステップアップ(SU)-CREST選考会の審査を経て研究継続の可否を決定することとした。この意図は、前半フェーズと後半フェーズでメンバーの組み換えを奨励して後半フェーズにおける実証デバイスの作製に向けた体制を強化(融合加速)することにある。

(2) 領域運営全体の流れ

本研究領域は、超スマート社会(Society5.0)に必要なセンサー用電源として、環境に存在するエネルギー(排熱、振動、電波など)から電力を得る環境発電デバイス(エネルギーハーベスター)を研究対象とした。これらはエネルギー源毎に動作原理やデバイス構造が異なっていることを考慮して、その多様性を包含すべく多くの研究課題を採択することにした。

東京(3回)と大阪(2回)で開催した公募説明会で、本複合領域の意図するところや期待する研究分野を伝えた。応募者との面接選考においても、①研究計画が本研究領域の推進に寄与し得るものであること、②応募者が科学的な研究開発を行う能力を有していること、などに重点を置くことを説明した。また、成果が期待できる研究や技術開発だけでなく、学術的な新しい知見につながりそうな挑戦的な研究課題も意識的に採択した。これは挑戦的な研究人材が本研究領域に加わることによって、創造的な思考や科学的な研究開発の手法が本研究領域内で横断的に広がって、他の研究者が活性化されると想定したからである。こうして多数の応募の中から優秀な研究者をさきがけ研究者として、また技術成熟度の異なるレイヤーの複数の研究者・技術者が参画する研究課題をCREST研究チームとして採択した。

本複合領域ではこれらの採択課題をバーチャルな研究所の中で、CREST 研究とさきがけ研究を“完全”一体化して運営した。これは多くの研究者との交流を通して、①異なる研究分野を専門とする研究者間での相互理解を深めて本複合領域の目的をメンバー間で共有すること、②各研究者が自らの立ち位置を環境発電全体の中で理解し、それを各自の研究に反映すること、を期待したからである。

研究領域の運営の基本は、本研究領域の成果最大化に向けた複数の会議と、研究総括・副研究総括・アドバイザーによる研究指導、の二本柱とした。

会議に関しては、まず採択された研究課題はキックオフ会議(CREST・さきがけ合同開催)で研究計画を領域メンバーに紹介し、研究者間をつなぐ最初の契機とした。また、CREST とさきがけのメンバーは半年に一度全員が集合して、合宿形式の合同領域会議でアドバイザーや他チームとの研究交流を深めるとともに、研究成果の報告を通して情報交換や研究連携を進めた。若手研究者の育成にあたっては、本CREST 研究領域の若手研究者をさきがけ研究者と区別なく扱い、領域会議などに参加させて相互の研究の理解と情報交換、若手研究者のネットワーク形成に努めた。実際、CREST 研究者とさきがけ研究者との交流を通して研究の相互乗り入れや共同研究が実現し、数多くの共著論文も発表された。

また、会議やサイトビジットでは、世界的に活躍している領域アドバイザーの経験に基づく助言やイノベーション創出につながる前向きなコメントを行った。特に粗削りなさきがけ研究者に対しては、担当アドバイザーと研究総括・副研究総括によるサイトビジットでの指導を通して、採択時には多少曖昧であった研究計画や研究目的を明確にすることができた。進捗が思わしくない研究課題については、研究内容の精査を通して、設定目標や研究計画の修正などの指導、さらには故障した実験設備の修理や研究状況に応じた応急予算を措置した。

研究期間の終了の1年前にはアドバイザーを含む研究者面談を行って、研究進捗状況の確認や、各研究項目における問題点について深く議論した。

また、2019年以降はCREST・さきがけの卒業生も領域会議への参加を要請して、領域終了後の研究進捗状況の報告などを通して研究者間のネットワークを維持し続けた。これに関連して、本研究領域を卒業した若手研究者の受け皿となるエネルギーハーベスティング研究会(応用物理学会：2018年10月)を発足させた。

コロナ禍によって対面での会合ができなくなった2020年以降は、領域会議運営にリモート会議を全面的に導入した。その際の工夫として、例えば、2021年度の領域会議においては、モバイルカメラ(GoProやiPad等)を用いて配信されるリアル動画をZoomで共有することで、領域メンバーがバーチャルに研究室訪問を行うイベントを行った。その他、Remoを活用し、エネルギーハーベスティング分野における大学発ベンチャーを主宰する方々にお越しいただいて議論を行った。このベンチャーとは、その後、共同研究が推進されるに至っている。

本複合領域運営の最大の特長は、研究開始3年半経過後にCRESTのステップアップ評価

を行い、それまでの研究実績と後半フェーズの研究計画を精査して継続の可否を判断していることにある。本複合領域で初めて採用したステップアップ方式の効用については、①環境発電デバイスの試作・実証など、社会実装に向けた出口意識の醸成と、②CREST チームとさきがけメンバーとの補完的な研究分担による融合加速が進んだこと、が挙げられる。この後半フェーズで行ったステップアップ(SU)-CREST については後で詳しく説明する。

また、研究成果を我が国のイノベーションにつなげるため、企業の技術者などに向けて新聞報道、プレスリリース、動画配信、展示会なども積極的に行った。CREST やさきがけの研究終了時に開催した一般公開の報告会と技術相談会には、関係する産業界から多数の技術者の参加があり、企業との共同研究に発展した。

(3) 研究進捗状況の把握について

採択研究課題の進捗管理については、①研究総括・副研究総括・担当アドバイザーが対面形式で行うサイトビジットや個人面談、②研究総括・副研究総括と領域アドバイザー全員で進捗状況を把握する領域会議、キックオフ会議、事後評価会、ステップアップ面接選考会、③年度研究計画書や半期毎の研究進捗報告書などの書類審査、などを併用しながら研究進捗の状況を確認した。図6は上記①と②を時間軸上にまとめたものである。図中の横青線と横赤線がそれぞれCREST とさきがけを表しており、黄色の縦線が半年ごとに実施している合同領域会議である。縦青線、縦赤線および縦紫線はそれぞれキックオフ会議、事後評価会、ステップアップ評価会である。この他にも、研究総括・副研究総括と担当アドバイザーがサイトビジットおよび個別面談を実施した。これら研究実施者と研究総括・研究副総括間の議論を基に、各年度の研究計画の「作り込み」と「見直し」を繰り返した。

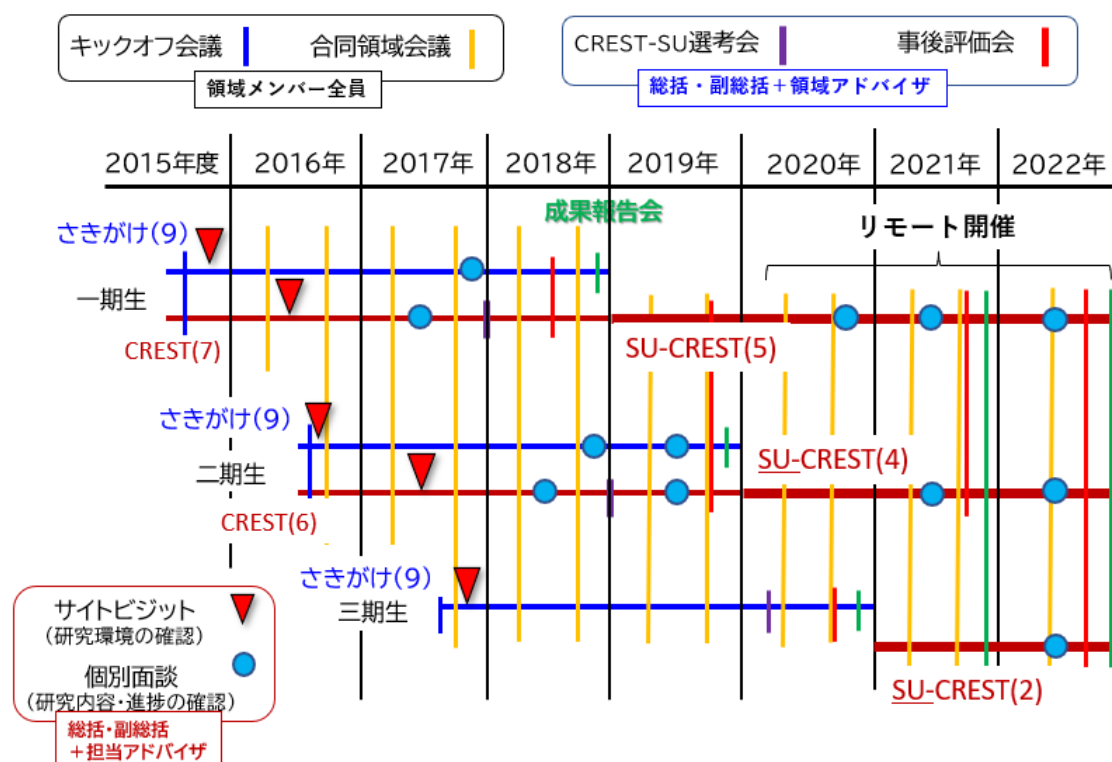


図 6. 研究者との面談や領域メンバーが関わる会議の開催時期。2020 年度以降はコロナ禍の影響ですべてリモート開催に変更。

新規に採択された課題の研究者 (CREST、さきがけ) は、キックオフ会議で採択研究課題の内容を紹介し、自己の研究計画を研究領域の全メンバーに公開した。その後のサイトビジット (参加者: 研究総括・副研究総括、担当アドバイザー (さきがけのみ)) では、研究環境 (保有装置、研究室の占有面積、学生数など) の確認と研究計画の詳細な詰め、さらに設定目標や研究自己管理表「おにぎり」の記載項目に関する相談・改訂に向けたアドバイスなどを行った。特に、さきがけ研究者の所属機関関係者に対しては研究開発に専念できる環境の整備を依頼した。その後は半期毎の領域会議で研究進捗を確認した。

その他、研究期間終了前 (緑の縦線) には成果報告会を開催し、さきがけ研究者に修了証を手渡した。

以上の実施イベントの日程を以下に示す。

表 6. キックオフ会議

	日程	名称	会場
第 1 回	2016 年 1 月 18 日	CREST・さきがけ合同キックオフ会議 (1 期生)	JST 東京本部 (東京)
第 2 回	2016 年	CREST・さきがけ合同キックオフ会議 (2 期生)	東京グリーンパレス

	11月10日	期生)	(東京)
第3回	2017年 10月18日	さきがけキックオフ会議(3期生)	JST 東京本部 (東京)

表7. サイトビジット(CREST)

年度	日付	チーム名	場所	訪問者
2015年度 採択	2016年6月 7日	上野敏幸	株式会社 福田結晶技術研究所	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2016年6月 27日	渡邊孝信	静岡大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2016年6月 29日	森孝雄	物質・材料研究機構	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2016年7月 4日	鈴木雄二	東京大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2016年8月 22日	年吉洋	静岡大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2016年8月 25日	勝藤拓郎	早稲田大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2016年8月 30日	中辻知	東京大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 笠井
	2017年6月 29日	森孝雄	物質・材料研究機構	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 山中
2016年度 採択	2017年6月 7日	石橋孝一郎	電気通信大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 山中
		河口研一	富士通株式会社	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 山中
	2017年6月 29日	李哲虎	産業技術総合研究所	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 山中
	2017年9月 27日	神野伊策	神戸大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 山中
		大野雄高	名古屋大学	谷口総括、秋永副総括、JST 内山、JST 山中
	2017年10 月24日	塩見淳一郎	東京大学	谷口総括、秋永副総括、JST 山中、JST 内山

[参考]2度目のサイトビジットについては色付けをして区別している。

表 8. サイトビジット(さきがけ)

年度	日付	チーム名	場所	訪問者
2015 年度 採択	2015 年 12 月 2 日	黒崎健	大阪大学	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
		吉田秀人	大阪大学	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
	2016 年 2 月 2 日	黒澤昌志	名古屋大学	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
	2016 年 2 月 3 日	藤ヶ谷剛彦	九州大学	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
		湯浅裕美	九州大学	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
	2016 年 2 月 12 日	野村政宏	東京大学	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
		藤岡淳	東京大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井
	2016 年 2 月 16 日	鈴木孝明	群馬大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井
	2016 年 2 月 17 日	松野丈夫	理化学研究所	谷口総括、秋永副総括、JST 生嶋、JST 笠井
2016 年 10 月 20 日	吉田秀人	大阪大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井	
2016 年度 採択	2016 年 10 月 19 日	片瀬貴義	北海道大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井、JST 内山
	2016 年 10 月 20 日	酒井英明	大阪大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井、JST 内山
	2016 年 10 月 25 日	高橋竜太	東京大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井
	2016 年 10 月 28 日	村田理尚	京都大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井、JST 内山
		野々口斐之	奈良先端科学技術 大学院大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井、JST 内山
	2016 年 11 月 9 日	中村優男	理化学研究所	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井
	2016 年 11	柳谷隆彦	早稲田大学	秋永副総括、JST 笠井、JST

	月 15 日			内山
	2016 年 11 月 22 日	中島宇史	東京理科大学	谷口総括、秋永副総括、山田アドバイザー、JST 笠井
	2016 年 11 月 28 日	山田智明	名古屋大学	谷口総括、秋永副総括、JST 笠井
2017 年度採択	2017 年 10 月 2 日	矢嶋赳彬	東京大学	秋永副総括、JST 笠井、JST 内山、JST 山中
		山根大輔	東京工業大学	秋永副総括、JST 笠井、JST 内山、JST 山中
	2017 年 10 月 30 日	都甲薫	筑波大学	谷口総括、秋永副総括、宮野アドバイザー、JST 山中
		衛慶碩	産業技術総合研究所	谷口総括、秋永副総括、青合アドバイザー、JST 山中
	2918 年 1 月 11 日	小菅厚子	大阪府立大学	谷口総括、秋永副総括、山田アドバイザー、JST 山中
	2018 年 1 月 12 日	桜庭裕弥	物質・材料研究機構	谷口総括、秋永副総括、JST 山中
		岡本敏宏	東京大学	谷口総括、秋永副総括、青合アドバイザー、JST 山中
	2018 年 2 月 1 日	小野新平	電力中央研究所	谷口総括、秋永副総括、JST 山中
		田中有弥	千葉大学	谷口総括、秋永副総括、JST 山中

[参考] 色付けをしている 2 度目のサイトビジットについては、1 回目のサイトビジットで指摘した案件の再確認をおこなった。

表 9. 領域会議一覧

	日程	会場	特別講演
第 1 回	2016 年 4 月 21 日～22 日	FORUM246(神奈川) 【見学会】 富士フイルム株式会社 先進研究所	・領域アドバイザー講演 －山田由佳先生(産総研) ・さきがけナノエレ －服部梓先生(大阪大学) －山崎歴舟先生(東京大学)
第 2 回	2016 年 12 月 13 日～14 日	けいはんなプラザ(京 都)	・領域アドバイザー講演 －竹内敬治先生(NTT データ経営)

		【見学会】 パナソニック株式会社 先端研究本部	研究所)
第3回	2017年 5月22日～24日	びわ湖大津プリンスホテル(滋賀) 【見学会】 株式会社東レリサーチ センター	・CREST 情報計測 －岡本博先生(東京大学) ・招待講演 －荒牧晋司先生(次世代化学材料評価技術研究組合)
第4回	2017年 12月11日～13日	フクラシア品川クリスタルスクエア(東京)	・JST －清水信宏、丹羽博(産業連携展開部) ・東中資喜(起業企画室)
第5回	2018年 5月22日～24日	チサンホテル神戸(兵庫)	・ゲスト講演 －小原春彦先生(産総研) ・領域アドバイザー講演 －篠原真毅先生(京都大学)
第6回	2018年 12月18日～20日	AP市ヶ谷(東京)	
第7回	2019年 5月21日～23日	TKP ガーデンシティ博多アネックス(福岡)	・さきがけ1期修了者 －湯浅裕美先生(九州大学) －吉田秀人先生(大阪大学)
第8回	2019年 11月18日～20日	TKP ガーデンシティ Premium 横浜ランドマークタワー(神奈川)	・CREST1期修了者 －上野敏幸先生(金沢大学) －酒井明人先生(東京大学) ・JST －大日向琢二、立平靖(知的財産マネジメント部) －岡部成光(産学連携展開部)
第9回	2020年 6月22日～24日	オンライン開催	
第10回	2020年 12月21日～23日	オンライン開催	
第11回	2021年 7月19日～7月21日	オンライン開催	・意見交換会 話題提供者 －前中一介先生、藤本匠氏 －伊庭野健造先生、伊藤雄一先

			生、菅原徹先生(大阪ヒートクール株式会社)
第12回	2022年 1月19日～1月20日	オンライン開催	・意見交換会：各チームから Beyond 微小エネ領域に関する発表
第13回	2022年 7月13日、20日	オンライン開催	

表 10. 成果報告会

	日程	名称	会場
第1回	2019年 2月5日	CREST・さきがけ複合領域 平成30年度成果報告会	大阪大学 中之島センター 佐治敬三メモリアルホール (大阪)
第2回	2020年 1月30日	CREST・さきがけ複合領域 令和元年度成果報告会	東京ビッグサイト会議棟 606 会議室(東京)
第3回	2021年 3月9日	CREST・さきがけ複合領域 令和2年度成果報告会	オンライン開催 (Zoom Webinar)
第4回	2022年 3月7日	CREST・さきがけ複合領域 令和3年度成果報告会・成果展開 VR シンポジウム	Zoom 開催:研究成果発表 Virbela 開催:成果展開 VR シンポジウム / 招待講演、 ポスターセッション・セミナー、 意見交換会
第5回	2023年 3月9日	CREST・さきがけ複合領域 令和4年度成果報告会	AP 新橋(東京)

本研究領域では、上に示した面接形式の進捗状況管理の他、図7に示す時期に提出された研究計画書や研究進捗報告書に基づく研究進捗状況確認を行った。研究総括・副研究総括は提出された報告書の内容を詳細に確認し、各研究者に研究内容の修正や、追加で研究すべき課題などをフィードバックし、改訂版の再提出を依頼。最終的には研究者と研究総括・副研究総括合意の下で年度研究計画を承認した。

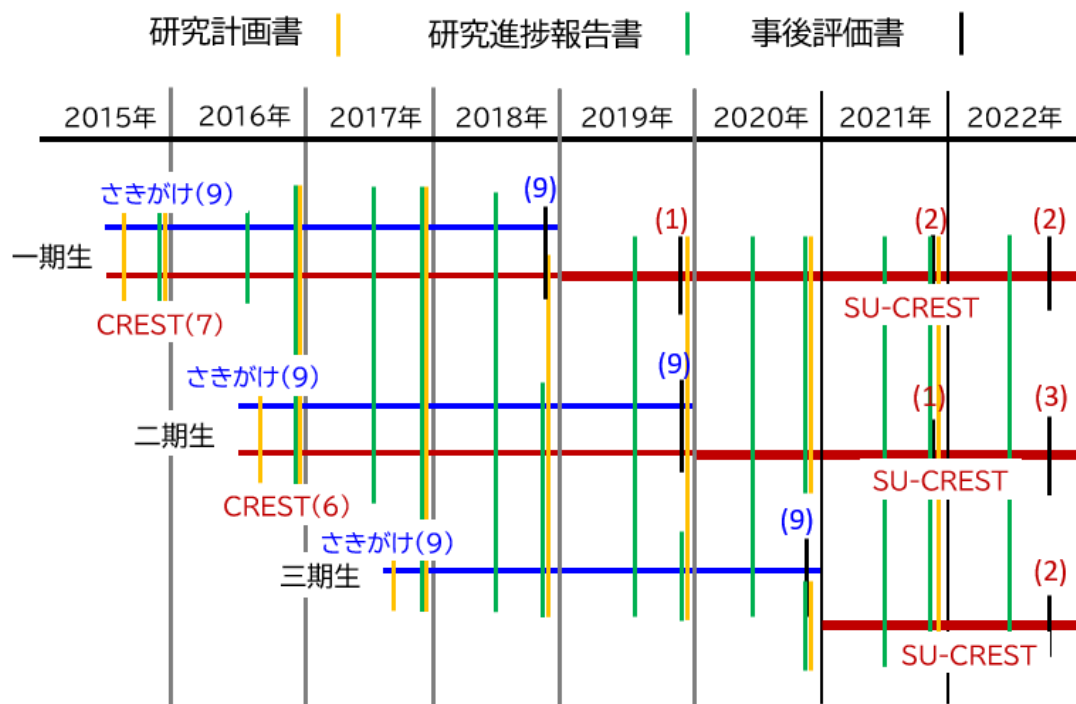
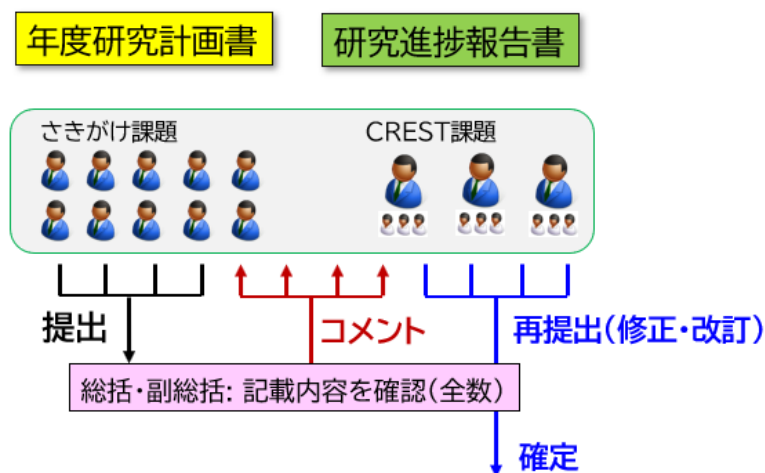


図7. 提出書類(研究計画書、研究進捗報告書)をもとに研究の進捗を確認する時期。括弧内の数字は事後評価を行ったさきがけ生の人数(青)とCRESTのチームの数(茶色)。



コメント内容

- ①研究経費の使途、②研究計画(内容)の修正、③知財確保要請、など

図8. 提出書類(年度計画書、研究進捗報告書)の確定までの流れ。

(4) CREST、さきがけ研究課題への対応

①CREST

学術的な材料研究が主体の研究課題については、代表者に研究対象となるエネルギー変換材料の発電量の見積もりを依頼し、数値目標とのギャップを埋める方策の検討を要請した。一方、社会実装の見込める研究課題については、当該分野で実績を有する代表者にある程度の裁量を委ねた。具体的には、研究代表者が作成した年度研究計画を研究総括・副研究総括が内容を精査した後、サイトビジットや面談時に双方合意の下で研究計画を改訂し、代表者はその改訂版の研究計画に沿ってグループメンバーをまとめて研究を遂行してきた。

CREST の前半フェーズでは、多くの基盤技術の創出に取り組む期間と位置付け、CREST チームが最大の研究成果をあげられるよう計測装置や成膜装置など、研究環境の整備に研究費を優先的に配分するよう指導した。研究加速予算については、購入予定装置の領域メンバー(含:さきがけ)との共同利用の可否および共同研究への発展の可能性を慎重に判断して優先順位を付け、メリハリを付けた研究費の配分を行った。

この前半フェーズでは、新原理、新物質、新デバイスの検証・実証などを網羅的に進め、得られた成果の中から有力と判断される基盤技術や材料を後半フェーズの研究に向けて絞り込む時期と位置付けた。また、CREST・さきがけ完全融合型の領域運営の特長を生かして、CREST のチーム代表者にはさきがけ研究者の成果との“融合”を探り、“相互補完的”に協働する後半フェーズに向けた新たなチーム作りをするよう要請した。

さらに後半フェーズの SU-CREST ではエネルギーハーベスターの社会実装を視野に、開発した技術がスムーズに移管できるよう、あらかじめ知財獲得や民間企業との共同研究を進めるよう指導した。さらに展示会に向けた実証デバイス試作などでは、研究代表者がリーダーシップを発揮し易くなるよう特別追加支援を行った。

同時に、後半フェーズでは実証デバイスの製作に注力するだけでなく、本研究領域の本来の目的(アカデミアの本来の使命)である基礎原理の解明や学術的価値のある基礎理論の構築なども強く要請した。コロナ禍によって領域会議がすべてリモートになり、合宿や休憩時間の合間に行われていた情報交換の場がなくなったことや大学での研究ができない期間があったことは SU-CREST の若手研究者にとって痛手であった。そのような環境においても、SU-CREST の2チームでは、プロトタイプ試作とデモを実施することで、企業との共同研究を開始する芽が出始めていたことから、一年間の追加支援(1,000万円/年・チーム)を行い、2022年度末までの研究延長を承認した。

②さきがけ

CREST と同様、研究者が作成した年度研究計画(案)を研究総括・副研究総括が確認し、必要な見直しを指示し、その後、サイトビジットや面談時に研究計画の改訂を双方納得の上で確定した。購入予定装置の精査も同時に行い、汎用的な計測・評価装置については大学や研

究機関の中での共同利用設備の活用を勧めて研究費の有効利用を図った。

さきがけでは、将来の我が国の科学技術の発展に貢献する若手研究者の育成を最優先項目として位置付けた。科学的な研究開発の方法論の実践を通して研究者としての資質向上を図るため、図 2 の研究自己管理表「おにぎり」を使って明確な研究開発のビジョンを立て、原理・原則に基づく研究を行うよう指導した。

本研究領域は多岐にわたる環境エネルギー(熱、振動、電波、光など)に固有の動作原理、材料、発電機構や発電デバイス、応用システムなど、様々な学術・技術分野が含まれているため、ともすれば狭い学術・技術分野に閉じこもる“たこつぼ”的な個人研究に陥りがちであるが、多くのイノベーションは領域横断的な技術の融合から生まれていることから、若手研究者自から隣接する学術分野にまで興味を拡げるよう指導した。また、研究成果の社会還元意識を高めるため後述の SciFoS への参加を促して民間企業の技術者との意見交換を勧めてきた。

さらに CREST のステップアップ評価時には、新 CREST チームにさきがけ研究者の参加を奨励し、研究の発展的継続に向けたモチベーションの維持を図った。コロナ禍によるさきがけ研究への影響は、3 期生それぞれの所属組織や研究内容によって様々であり、実験系の研究者にとっては多大な影響が見られた。研究成果をまとめるために半年間の研究延長が有効と判断されたさきがけ研究者(3 期生)2 名に対しては、その研究期間延長を承認した。この結果、プレスリリースを伴う学術論文の発表等がなされている。

③複合領域として

本研究領域では、CREST とさきがけの垣根のない完全複合型のプログラム運営を心掛けた。そのねらいは研究者の有機的な人的ネットワークの形成にあり、研究者同士の智慧を出し合う人材交流を通して相乗的に研究資質の向上につなげることを意図している。

CREST の若手研究者やさきがけ研究者には CREST・さきがけ合同領域会議などを通して研究内容の相互理解を深め、基礎学理を行う研究者でも環境エネルギー発電全体を俯瞰しつつ最終的に出口を見据えた研究を意識する環境の整備を心掛けた。研究者間の相互理解を深める領域運営の意図は、(1)異なる環境エネルギーも一旦電力に変換すれば、その種類に依らず、共通のプラットフォーム上で応用システムが構築できること、(2)共通点の多いデバイス製造プロセスや材料の評価技術に関しては分野横断的な協力で研究開発が効果的に進むこと、などがあげられる。このため、領域内では CREST とさきがけの壁を越えた研究協力を強く要請し、研究成果の横方向展開を推し進めてきた。

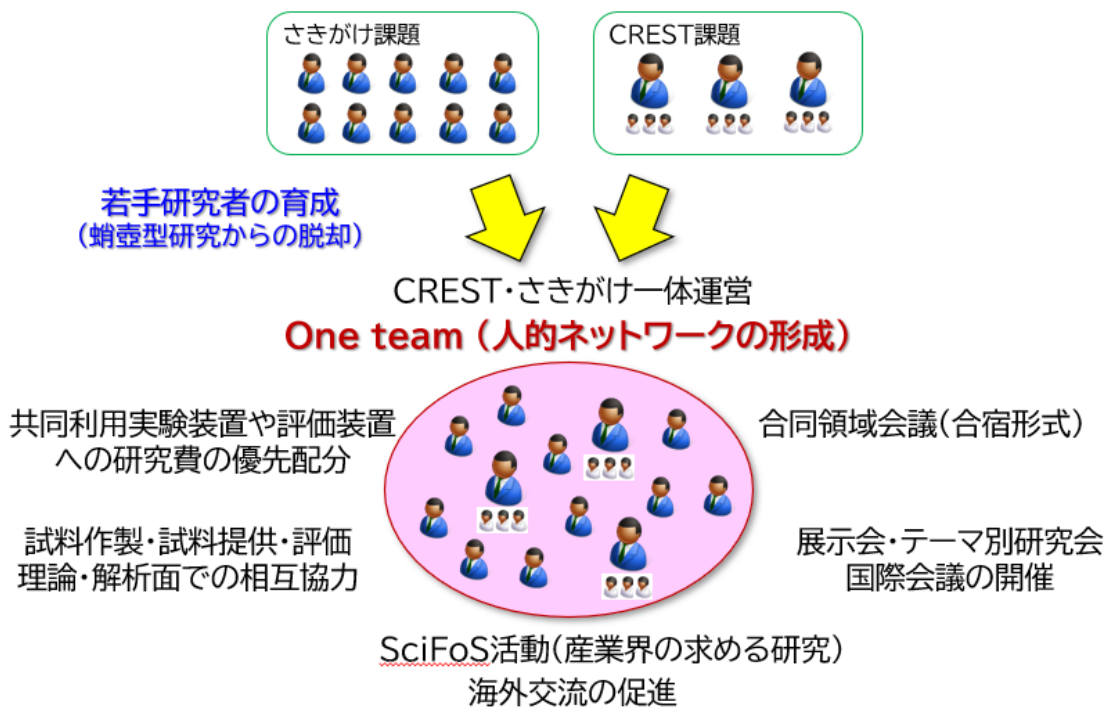


図9. 前半フェーズでは、CREST とさきがけのメンバーを One team として人的ネットワークの形成と若手研究者の育成を狙う完全融合型の領域運営を実施した。

研究者間の相互理解を深める具体的な方策としては、(1) 共同利用可能な装置購入などに研究経費を優先配分し、装置を介した領域内の共同研究を促した。(2) CREST チームの若手研究者とさきがけ研究者・学生などが積極的に交流できる CREST・さきがけ合同領域会議(合宿形式)を開催した。より具体的には、CREST チームとさきがけ研究者による合同発表や、あるテーマに対して 3~4 名のさきがけ研究者で事前検討を行った結果を発表し、CREST 研究代表者がコメントを行う分科会形式の領域会議などを開催した。(3) 領域メンバーの相互理解を深め、試料提供、試料作製や計測評価などの研究協力に関する情報を相互に提供すべくニュースレター(1号~40号)を発行した。(4) テーマ別国際シンポジウムや領域会議ではポスターセッションなどで CREST チームの若手研究者(含大学院生)の発表の機会を与えて「若手研究者の見える化」を図った。(5) 積極的に学生や若手研究者の海外派遣を実施して国際共同研究などを通して研究の高度化と人的ネットワークの形成を図る、(6) 技術分野を限定した国際シンポジウムなどを開催し、領域内メンバー間の学術・技術レベルの向上を図る、などの配慮をしてきた。

その結果、図 10 に示す研究者間ネットワークが本研究領域内で形成され、CREST チーム横断型、CREST・さきがけ研究者間、さきがけ研究者同士での共著論文が前半フェーズで 16 件になった。これらは領域メンバーが得意とする計測、解析、設計、試作などを互いに持ち

寄って協力的に研究を進めた結果であり、相互協力を通して各研究者の研究領域の範囲が拡大した。

図 10 から分かるように、エレクトレットと圧電に分類される振動発電については、鈴木(さきがけ 1 期生)、小野(さきがけ 3 期生)、CREST の年吉チーム、神野チームが本研究領域内での共著論文を作るレベルの連携ができた。熱電発電では、塩見チーム、森チーム、李チーム、黒澤(さきがけ 1 期生)、野村(さきがけ 1 期生)、藤岡(さきがけ 1 期生)、片瀬(さきがけ 2 期生)が領域内連携に積極的である。逆に上野チーム(磁歪発電)が本研究領域の中で孤立しているが、このチームは特殊材料を用いたデバイスを製作してきた経緯もあり、領域内連携の必要性を感じなかったものと思われる。

このような完全複合領域として運営した結果、後半フェーズの SU-CREST が始まった段階では、前半フェーズで培った CREST チームのメンバーとさきがけ研究者との間の共有意識により、他のメンバーとの親和性は良く、チーム全員が一丸となって研究や技術開発に取り組む姿勢が認められた。実際、後半フェーズ終了間近な現時点で、チーム横断型の共著論文が 8 件発表されている。これは研究領域の一体運営で構築された人的ネットワークを通して SU-CREST チームを跨いで積極的に共同研究が実施された証左でもある。



- ・ 研究連携を奨励
- ・ 研究者間の有機的なネットワーク形成

領域内横断型共著論文が増加(赤い太線)

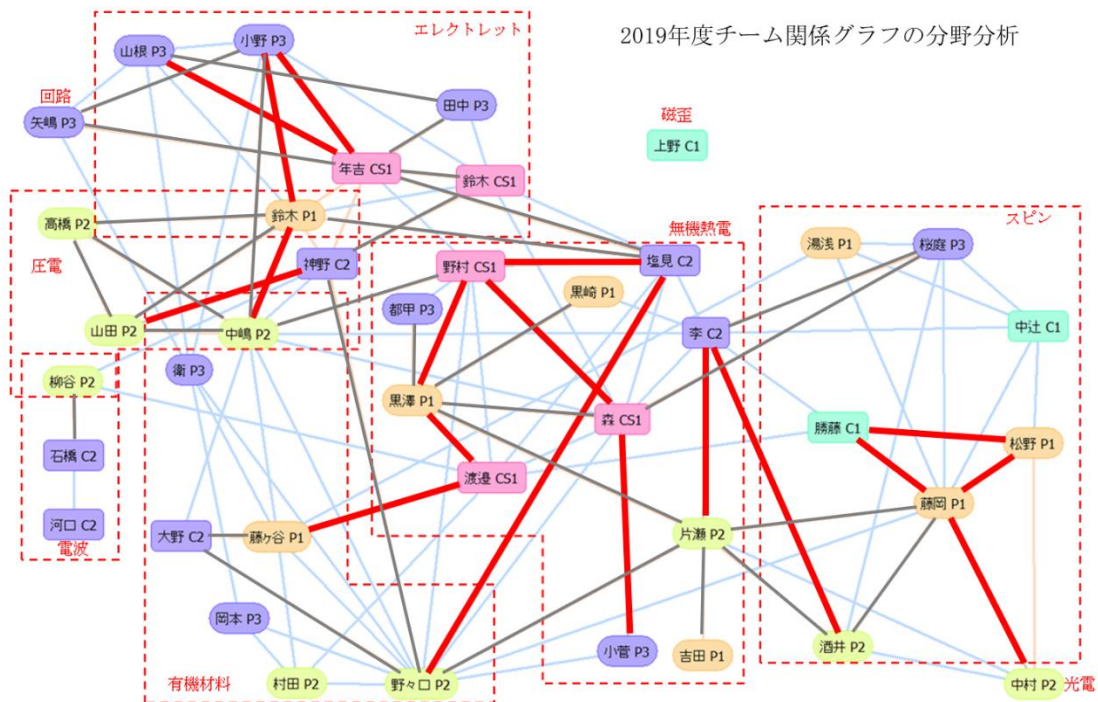


図 10. 研究者間の協力・連携の程度を表す相関図

記号は、P“さきがけ”、C“CREST”、数字は期生を表している。CS(ピンク)はSU-CREST。
 連携の深さは、赤線：共著論文、灰色：共同研究実施、水色：情報交換

(i) 領域内の研究課題間や海外の研究機関との連携協力の推進

前半フェーズでは若手人材の育成を目的に意識的に海外出張や海外派遣を行ったが、コロナ禍(2020年以降)では感染状況をみながら連携協力を実施したため、実績数は激減した。

○ 海外の研究機関との本格的連携

森チーム：ウィーン工科大学(オーストリア)のバウアー教授が CREST 研究の主たる共同研究者として「超高性能薄膜の磁性との相関解明と高度化」を担当

○ 国際強化支援

・海外研究機関との共同研究

森チーム：スロベニア研究機関 (Jozef Stefan Institute) との連携 (2018 年度)

研究課題名：新規な磁性半導体熱電材料を用いた熱電発電デバイスの研究開発

神野チーム：スロベニア研究機関 (Jozef Stefan Institute) との連携 (2018 年度)

研究課題名：分極制御非鉛圧電薄膜による高効率 MEMS 振動発電素子の創製

コロナウイルス感染拡大により計画していた国際連携事業が中止、あるいは延期される中で、特にスロベニア研究機関との連携は粘り強く継続してきた。森チームが連携を進めた研究グループは、ISTE Wiley SCIENCES “Thermoelectric generators” における執筆者となっている。また、神野チームにおいては、オンライン会合を重ね、2021 年 10 月には、Japan - Slovenia workshop on piezoelectric thin films を開催した。スロベニアではエネルギーハーベスティングに資する材料開発とともに、スマートシティ実証等が行われており、日本との関係も深い。本研究領域の技術が、材料研究とシステムをつなぐ役割を担い、今後もこの良好な協業関係が継続することを期待している。

・海外からの研究者招聘

招聘者：Dr. Yuriy Kosevich (ロシア科学技術アカデミー)

受入機関：東京大学 (塩見チーム)

研究課題名：フォノン共鳴・干渉現象に関する知見の習得と新しい共鳴現象の計算

期間：2018 年 10 月～2018 年 12 月

招聘者：Prof. Luong Duy Manh (Le Quy Don Technical University, Vietnam)

受入機関：電気通信大学 (石橋チーム)

研究課題名：Super Steep Transistor Modeling

期間：2018 年 10 月～2018 年 11 月

招聘者：Adrien Badel 教授 (フランス・サヴォア＝モンブラン大学)

受入機関：東京大学 (鈴木チーム)

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

期間：2019 年 7 月 2 日～2019 年 7 月 18 日

招聘者：Keunhan Park 准教授 (米国・ユタ大学)

受入機関：東京大学 (野村チーム)

研究課題名：Lab-in-TEM におけるサブナノメートルギャップでのフォノン
トンネリング

期間：2022年5月7日～2022年8月15日

招聘者：Yury Kosevich 教授(ロシア科学アカデミー)

受入機関：東京大学(野村チーム)

研究課題名：遮蔽2次元電子系が存在する極性材料における表面フォノン-
ポラリトンに関する研究

期間：2022年9月16日～2023年8月31日

・海外への研究者長期派遣

派遣者：田中佑樹(修士2年)、三好智也(特任助教)

派遣先：米国・ユタ大学 Shad Roundy 教授

研究課題名：高出力環境発電のための革新的エレクトレット材料の創成

期間：2018年12月4日～2018年12月24日

派遣者：三好智也(特任助教)

派遣先：米国・ケント州立大学液晶研究所 Torsten Hegmann 教授

研究課題名：高出力環境発電のための革新的エレクトレット材料の創成

期間：2019年1月28日～2019年3月29日

派遣者：三好智也(特任助教)

派遣先：米国・ケント州立大学液晶研究所 Torsten Hegmann 教授

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

期間：2019年10月14日～2019年11月17日

派遣者：小野新平 さきがけ研究者 (国際強化支援)

派遣先：米国・Purdue 大学

研究課題名：ロール to ロール法を使った電気二重層エレクトレットの開発

期間：2019年4月～2020年3月

○ 国際ワークショップの開催

Energy Harvesting Technologies toward SDGs Goal 7 ～How to break the limit
by cutting-edge material sciences? ～

開催日：2018年11月8日 開催場所：早稲田大学 西早稲田キャンパス(東京)

MRM 2019 Satellite Symposium International Symposium on Thermoelectric
Energy Harvesting ～How to bring about thermoelectric evolutions in our

smart societies?～

開催日：2019年12月9日 開催場所：横浜シンポジウム(神奈川)

International Workshop on 8th Piezoelectric MEMS

開催日：2021年6月7日～9日 開催場所：Todaiji Cultural Center, Nara
ハイブリッド開催

Future Technologies from HIMEJI

開催日：2021年11月9日～11日 on-line

Japanese French Energy Harvesting Workshop

開催日：2022年9月7日 開催場所：フランス・サヴォア＝モンブラン大学

International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in
Actuators 2022 (IWPMA2022)

開催日：2022年10月24日～26日 on-line

○ その他、数カ月にわたる研究者の海外派遣については下記の通りである。

派遣者：S. Kim 東京大学(鈴木チーム) 博士課程学生

派遣先：ドイツ Max Planck Institute Denis Andrienko 博士

研究課題名：ポリマーエレクトレットの固相電子親和力の計算手法について研究

派遣期間：2017年5月1日～7月31日

派遣者：柳依然 東京大学(鈴木チーム) 博士課程学生

派遣先：フランス・サヴォア＝モンブラン大学 Adrien Badel 教授

研究課題名：高出力環境発電のための革新的エレクトレット材料の創成

派遣期間：2018年4月2日～2018年7月20日

派遣者：松下裕司 大阪府立大学大学院(神野チーム) 博士後期課程2年

派遣先：スロベニア・Jožef Stefan Institute

研究課題名：水系原料を用いた非鉛圧電体薄膜の造成

派遣期間：2018年10月～2019年1月

派遣者：坂上良介 慶應義塾大学(李チーム) 博士課程学生

派遣先：英国・ブリストル大学

研究課題名：酸化物マイクロワイヤー・ナノワイヤーの合成に関する研究

派遣期間：2019年8月～2019年12月

派遣者：Z. Shi 東京大学(鈴木チーム) 博士課程学生

派遣先：フランス・サヴォアモンブラン大学

研究課題名：エレクトレット発電機に特化したチューナブル SECE 回路の開発

派遣期間：2022年9月6日～2023年1月31日

(ii) 領域内連携による共著論文

本研究領域では、CREST とさきがけの壁を取り去った完全複合領域運営を行っており、異なるチームに属する CREST メンバー同士やさきがけ研究者同士、さらには CREST メンバーとさきがけ研究者との間で共同研究が進み、共著論文を 23 件発表している。

(5) 研究費配分の方針

本研究領域で採択した 50 課題(さきがけ 27 課題、CREST13 課題、SU-CREST10 課題)の研究費総額は 48 億 9250 万円である。この中には材料開発のための成膜装置や計測装置、国際連携などを中心に 4 億 8251 万円の追加配分が含まれている。この追加配分を行う際の原則は「戦略目標の達成を加速する」と「共同利用の促進」にあり、個別面談、領域会議、ステップアップ評価、研究進捗報告書などで研究進捗を確認し、総括裁量経費およびその他の予算を活用して研究費を追加支援した。その際、購入予定装置の共同利用の可否や共同研究への発展の可能性を慎重に判断して優先順位を付け、メリハリを付けた研究費の配分を行った。また、購入予定装置の精査時には、汎用的な計測・評価装置については、大学や研究機関の中での共同利用設備の活用を勧めて研究費の有効利用を図った。

共同利用可能な高額装置としては森チームの高速パルス熱伝導測定装置(2016 年度、総括裁量経費)や鈴木チームの国際標準に準拠した評価用のパラレルリンクロボット(歩行時の腕運動模擬用、2017 年度)が挙げられる。前者に関しては、本研究領域の熱電特性評価のプラットフォーム化を図ったものである。また、マテリアルズ・インフォマティクスとの併用で成果が期待できるコンビナトリアルスパッタ装置(2017 年度)にも優先的に経費を配分した。

デバイス実証を目指す後半ステージのステップアップ CREST では、デバイス作製装置や展示会に向けたデモ製品の試作などに重点的に配分した。

以上のように、研究領域に配分された総括裁量経費は、CREST 研究チームやさきがけ研究者からの説明をもとに再配分を行ってきたが、必要に応じて面談や追加の情報提供を求める等の精査を行い、一方で、その効果を最大化するためにも速やかな再配分を心掛けてきた。その結果、例えば、野村チームにおいては、デバイス開発を加速することでインパクトの高

い研究成果発表に結実させることに成功する等、効果的な執行ができたと考えている。

表 11. CREST チームへの追加経費配分の内訳

CREST 追加配分経費	184,565 (千円)
内訳	
見直し純増	109,865
総括裁量経費による加速支援	70,350
国際強化支援費	3,900
機械学習支援	250
SciFoS	200

表 12. SU-CREST チームへの追加経費配分の内訳

SU-CREST 追加配分経費	176,047 (千円)
内訳	
見直し純増	77,818
総括裁量経費による加速支援	46,246
国際強化支援	32,183
SciFoS	300
新型コロナウイルス感染に関する追加的研究	20,000

表 13. さきがけ研究者への追加経費配分の内訳

さきがけ追加配分費	121,902 (千円)
内訳	
見直し純増	59,251
総括裁量経費による加速支援	9,450
国際強化支援	8,400
機械学習支援	600
スタートアップ支援	22,901
SciFoS	1,300
新型コロナウイルス感染に関する追加的研究	20,000

さきがけ研究者に対する追加配分については、表 13 に示す総括裁量経費からは CEATEC2019 の展示品の試作費や緊急故障装置の修理費として支給し、国際強化支援は小野研究者の海外派遣(Purdue 大学での共同研究)費として、スタートアップ支援は異動先の研究室の立ち上げや、台風 19 号(2019 年)の洪水被害を受けたさきがけ研究者に優先的に配分した。

以上の全期間を通じた総括裁量経費からの増額は 1 億 2605 万円、戦略事業の国際強化支援等の諸制度や予算調整における追加支援は 3 億 5697 万円である。

(6) CREST チームのステップアップ評価について

本研究領域の CREST では、ステップアップ評価会(研究開始 4 年目に実施)を経て、後半フェーズに移行する CREST 研究チームの数を絞り込む新しい取り組みを実施した。領域内では予め、このステップアップ評価を実施する旨を公表して、後半フェーズでは For what? を意識した研究の推進を奨励し、SU-CREST チームの編成時に研究加速が見込めるさきがけ研究者の参画を認めた。これはさきがけ研究者の研究継続のモチベーションアップにもつながった。

表 14. ステップアップ審査要項の抜粋

<p>本研究領域では、融合加速方式*を導入し、将来の実用化を視野に入れた研究成果の利用価値を見出すための評価(ステップアップ評価)を実施します。</p> <p>本研究領域では、ステップアップ評価前後の期間を、2つの研究フェーズと大きく捉え、</p> <ol style="list-style-type: none">① 前半フェーズは、未利用で微小なエネルギーを電気エネルギーに高効率に変換する、もしくは高度に利用するに資すると期待できる、より多くの基盤技術の創出に取り組む期間と位置づけています。② 後半フェーズは、革新的な新原理、新物質、新デバイスの検証・実証に向けて、これらの中から有力と判断される基盤技術の集積や応用先の開拓等に取り組む期間と位置づけます。 <p>ステップアップ評価では、本研究領域が目指す革新的な基盤技術の創出に向けて、各課題が前半フェーズで創出した基盤技術を元に、研究領域内外の研究チーム及び研究者(CREST、さきがけを問わず)が相互に協働し、“異分野横断”や“相互補完的”な連携をした新たなチーム体制を構築し、課題解決に取り組む研究提案を期待します。</p> <p>そして、ステップアップ評価後には、採択課題に対して、研究総括、及び、副研究総括の強い統率の下、「利用価値のある基礎研究」として、産業界との連携(協働)につながることを視野に入れた発展・強化に取り組んでいきます。</p>
--

※融合加速方式(戦略研究推進部)

● 「競争的研究費改革に関する検討会 中間取りまとめ」において、CREST に、分野の特性に応じて、最適な「研究者群」を分野融合的に形成し、更に研究を推進する新たな方式の導入を検討するとされた。

● 分野の特性に応じ、融合加速方式を導入する領域においては、分野の特性に応じた中間評価により、それぞれの採択課題における研究を一旦終了させ、産業界との連携につながる「出口を見据えた研究」が行われる上で最適な「研究者群」を分野融合的に形成(融合を加速)して、より最適化した新チームで戦略目標達成に向けて研究を再スタートさせる。

ステップアップ評価では、各研究課題が前半フェーズで創出した基盤技術を元に、研究領域内外の研究者(CREST、さきがけを問わず)が相互に協働し、“異分野横断”や“相互補完的”な連携をした新たなチーム体制を構築し、課題解決に取り組む姿勢を重要視した。評価項目として、①CREST チームの研究業績、②プログラム終了時点(2022年度末)に想定している環境発電の概念実証(POC)への取り組み、③新しいチーム編成による研究加速の可能性、をステップアップの判断材料とした。

具体的な募集要項については下記の通り。

表 15. 「ステップアップ評価：実施要領」より抜粋

① 研究提案の、何が「融合」で、何が「加速」としての取組みなのか記載をお願い致します。

※例えば、前半フェーズでの研究速度を、そのまま後半フェーズで続けた場合に比べ、どのような非連続なステップアップが期待出来、かつ、終了時に、どのような価値を社会に提供できるまでを含めて、わかりやすく記載をお願い致します。

② 提案された研究課題の目標が期間内に達成されることを前提として、実用化を目指す研究段階に発展させるために、後半フェーズ終了に向けて、また終了直後に、どのようなことに取り組む必要があるのか等の道筋に関しても、必ず明確に記載してください。

● 成果の活用・展開に向けて、重要なポイントである知財取得・活用、技術の標準化活動、産業界との連携推進なども検討し、記載願います。領域内で発表された SciFoS 活動報告などを参考にして、社会における研究・技術開発成果の受け

取り手を開拓する工夫があれば記載願います。また、異なる産業分野、異なる技術レイヤーとの融合も新たな展開につながる可能性がありますので、検討願います。

③ 図1を意識した記載をお願い致します。

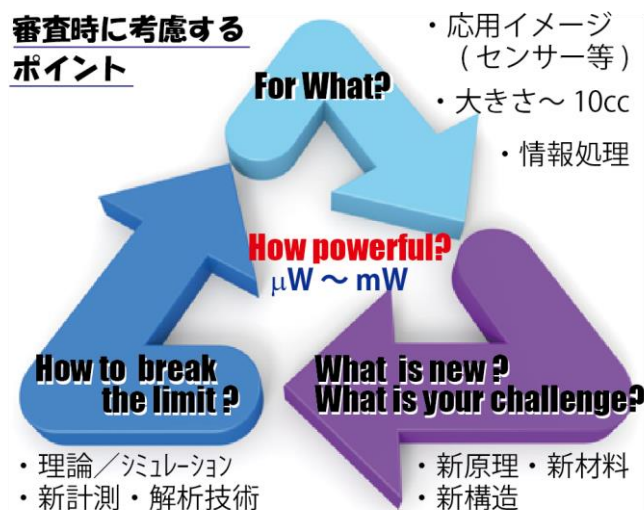
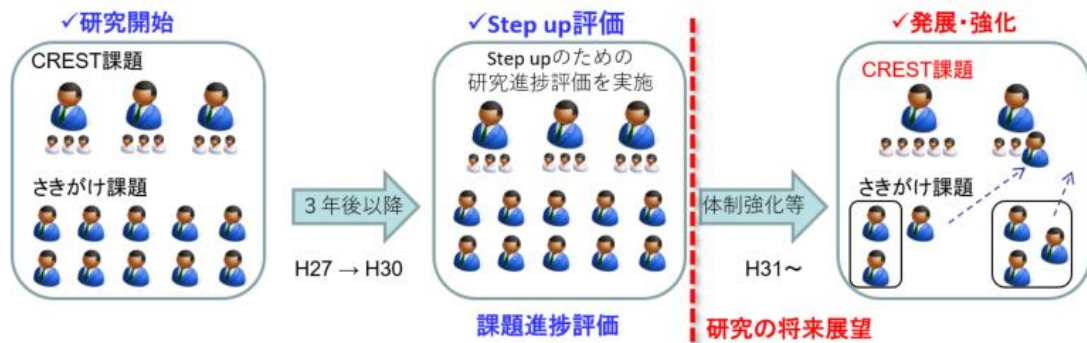


図1. 本研究領域における研究推進の考え方

ステップアップ後の後半フェーズでは、環境発電デバイスを実証することと並行して、世界の環境発電をリードする専門家集団の形成を目指した。

一方、実用化の近い研究課題についてはステップアップ評価時点で本プログラムから卒業し、他の事業化プログラムへの応募を推奨した。

領域マネージメント（融合加速方式）



◆タイムスケジュール

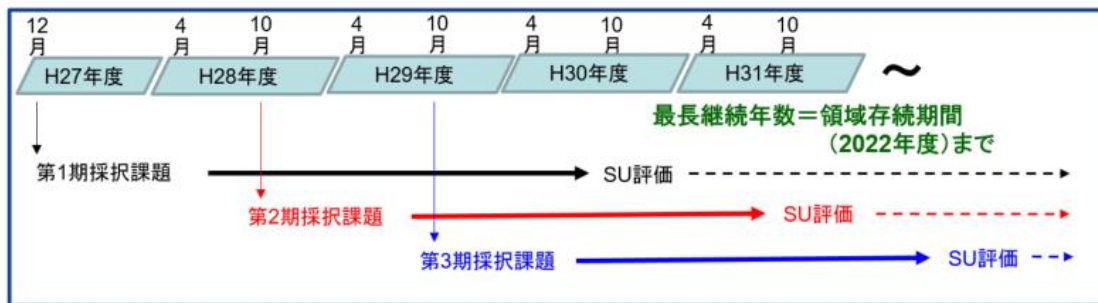


図 11. 融合加速方式による SU-CREST のイメージ

ステップアップ評価の結果と所見

本研究領域のステップアップ評価は、前半フェーズ終了の1年前に実施した。これは不採択課題の代表者が他のプログラムへ応募できるよう配慮したためである。

また、研究領域内であらかじめこのステップアップ評価の時期と目的を公開することで、領域内の横断的な連携が進み、プログラムの後半に向けた研究目標達成のため研究メンバーの再編成が進んだ。実際、新たにステップアップが承認された研究課題では1～4名のさきがけ研究者が主たる共同研究者としてチームに組み込まれて活躍した。

表 16. ステップアップ(SU)評価会

No.	日程	名称	会場
1	2018年 4月5日	ステップアップ(SU)評価会(1期生)	JST 東京本部別館(東京)
2	2019年 4月12日	ステップアップ(SU)評価会(2期生)	JST 東京本部別館(東京)
3	2020年 4月23日	ステップアップ(SU)評価会(3期生)	リモート開催

ステップアップ評価の結果(第1期)

ステップアップ評価後の CREST チームは、①本研究領域を卒業する CREST チーム、②さきがけ研究者を加えた新たなチーム編成の CREST、③さきがけ研究者が立ち上げた新規 CREST チーム、に分類される。なお、ステップアップ評価後の CREST チームは、【融合加速型】、【融合発展型】、【選択集中加速型】に分けられる。

・鈴木チーム【選択集中加速型】

異方性誘電率を有する液晶を用いて発電量 20 倍以上を目指すとともに第一原理計算によって見出した高性能エレクトレットの製品化に向けた研究開発を加速する提案。後半フェーズで実証するウェアラブル・エレクトレット発電器は、①腕の振りに対応した回転型発電器(歩行時:3mW)、②指押し型プッシュボタン発電器(目標:200 μ J)、③セラミック系エレクトレットを用いた新原理に基づく振動発電デバイス、である。

・年吉チーム【融合加速型】

さきがけ1期生(鈴木)を加えて、周波数・強度がランダムに変化する環境振動から効率良く電力を回収する非共振・広帯域MEMS振動発電素子の研究開発を推進する。回路と集積化した振動発電素子に関しては、連携先の株式会社鷺宮製作所に技術移転して事業化する計画であり、早期の社会実装が見込める提案である。

・渡邊チーム【融合加速型】

さきがけ1期生(藤ヶ谷、黒澤)を加えて、IV属系元素薄膜にかかる急峻な温度勾配を利用した平面型集積熱電変換デバイスの開発を目指す提案。

早稲田大学内に、本研究領域のCREST研究者、さきがけ研究代表者、研究分担者をはじめ、情報通信分野の専門家も参加する融合領域「アンビエントロニクス研究所」(代表者:渡辺)の発足で研究の加速も期待できる。

・野村チーム【融合発展型】

さきがけ研究者(野村)が研究代表者となって立ち上げた新CRESTである。フォノンエンジニアリングの学理探求による熱伝導制御技術の開発と並行して連携企業(前田建設、凸版印刷、セイコーインスツルメンツ)の協力を得て、フォノンエンジニアリングに立脚した実用的な熱電給電センシングシステムの実現を目指す。

いずれのチームも新たにさきがけ研究者や連携企業などが加わった融合・加速をとともなう研究プロジェクトチーム構成になっている。

この他、森チームは採択後に卒業となった。

・森チーム【採択後、半年経過して卒業】

磁性熱電材料の開発をしてきた森チームはステップアップ評価で後半フェーズへ

の継続が承認されて研究を進めてきたが、2019年度の大規模プロジェクト型(技術実証研究)未来社会創造事業に採択された。研究内容は本研究領域でこれまで実施してきた磁性熱電材料の研究の継続である。高額な研究開発費(総額 31 億円上限)による我が国全体の熱電材料開発の進展が見込めると判断して卒業を了承した。

ステップアップ評価の結果(第2期)

・石橋チーム【融合発展型】

さきがけ2期生(柳谷)を共同研究者に加え、柳谷が開発してきた圧電トランスの技術と石橋チームが前半ステージで開発してきた高周波技術との融合を図り、周波数高選択 Wake Up Receiver、極低消費電力動作回路、電波発電モジュールを組み合わせた微弱電波応用システムを開発する。新たにレクテナ関連の主たる共同研究者を迎えるとともに、民間企業からなるアドバイザー会議を設置して社会実装に向けたデバイス開発を加速する。

・神野チーム【融合発展型】

新たにさきがけ2期生(山田)を共同研究者に加えて、人工超格子構造による圧電薄膜の性能向上を目指すとともに、高強度圧電 MEMS 振動発電素子の開発、圧電薄膜素子と集積化薄膜二次電池を搭載したセンサーノード駆動用自立型電源システムを作製・実証する。研究領域外の研究者を主たる研究者に参加させ、国際共同研究者を取り込むなど、特徴的なチーム作りを行っている。

・塩見チーム【選択集中加速型】

研究領域外から主たる共同研究者を迎え、微視的な視点からのメカノ・サーマル工学の実証、表面化学の緻密制御、パルスアニリングによる局所結晶化などの技術を導入して、材料の設計・制御性を向上させながら、①低コスト Si ナノ複合焼結体/面直温度勾配デバイスと②Si 系ナノ構造制御薄膜/面内温度勾配デバイス、のバルク化、大面積化、フレキシブル機能の一体化によって熱電発電の実用化を目指す。

・李チーム【選択集中加速型】

ステップアップ採択後、研究総括・副研究総括との面談を経て前半フェーズで扱った熱電材料を3種類に絞り込み、それらの熱電性能の向上を目指す。さきがけ1期生(黒崎)を主たる共同研究者として加え、モジュール作製及び発電能力評価に研究の軸足を移して熱電発電モジュールの実用化を進める。絞り込まれた熱電材料の1つは総括裁量経費で研究加速によって新たな合成法が開発されたものである。

ステップアップ評価の結果(第3期)

3期ステップアップの評価の時点では前半フェーズの CREST チームがすべて卒業してい

ることから、それまでの SU-CREST と異なる選考方法で 3 期の SU-CREST チームを選考した。すでに実施中の SU-CREST チームの技術領域を念頭に、チームリーダーに相応しいメンバー(さきがけ 3 期生)に対して新規 SU-CREST(第 3 期)の立ち上げを打診し、前向きな回答を得たチームに対する評価会を実施して、2 件を採択した。

・岡本チーム【融合加速型】

さきがけ研究(岡本)において開発されたバンド伝導性低分子・高分子 半導体と、それらのプロセス開発に関わる研究成果を基盤とし、有機環境 発電分野における異分野融合型研究チームでハイブリッド型環境発電素子の実現を目指す提案である。SU-CREST では、さきがけ 2 期生(野々口)を主たる共同研究者として加えて n 型向けドーパント・ドーピング法の開発、さらに研究領域外のさきがけ研究者を加えて光電変換用 n 型高分子半導体の開発(尾坂)と有機半導体の電荷輸送・熱輸送・熱電変換に関する理論(小林)を強化し、ハイブリッド型環境発電素子の実現を目指す。

・小野チーム【融合加速型】

さきがけ研究(小野)の成果の不足/未達部分を補完する研究課題を設定し、材料科学、機械工学、電子工学、情報工学を横断するスマートメカトロニクスの新学理構築を図りながら、社会インフラへ向けた振動発電素子の実用化を目指す。領域会議でのグループディスカッションをトリガーとした有機的な連携体制の下、さきがけ 2 期生(中島)と 3 期生(田中、山根、矢嶋)を主たる共同研究者として加え、「本研究領域における研究推進の考え方(おにぎり)」に沿った、高い利用価値の創出が期待される。

*小野チームリーダーは、CREST 年吉チームの主たる共同研究者として研究を担当していたが、研究成果に大きな進展が見られたことで独立し、さきがけ 3 期生として活躍した。SU-CREST 小野チームの採択は、CREST・さきがけ完全融合型の領域運営の特長を端的に示す好事例である。

2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 (年度)

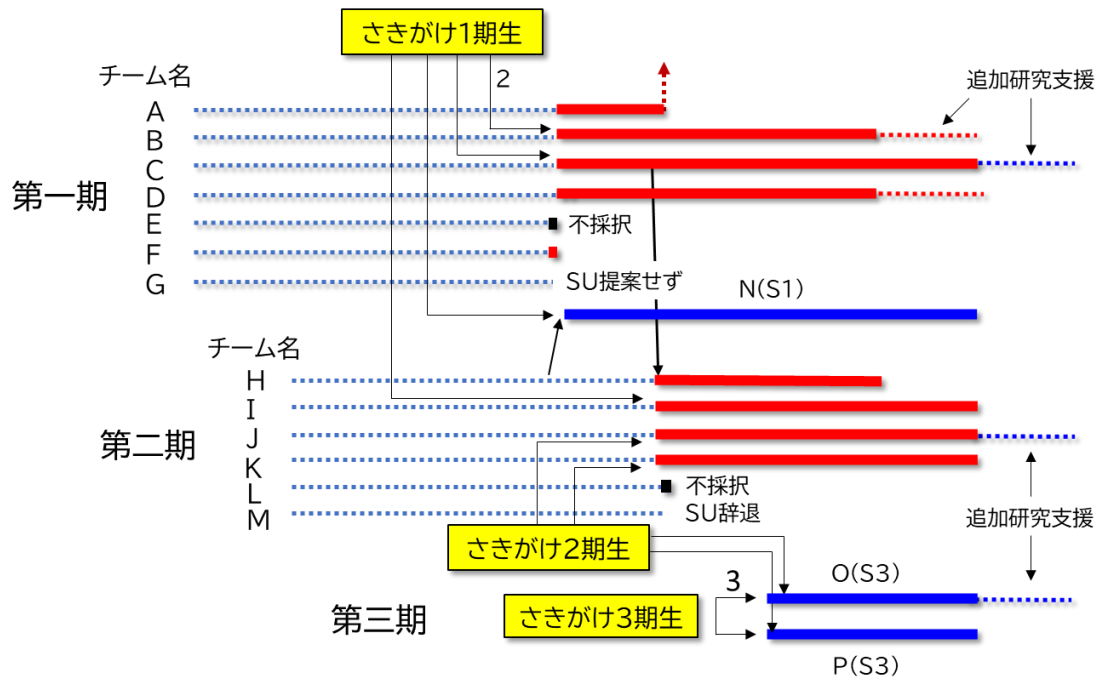


図 12. 第 1 期～第 3 期の SU-CREST の採択状況。前半フェーズの CREST (水色点線)、SU-CREST (赤線)、さきがけ生が代表者の SU-CREST (青線)、さきがけ 1 期生～3 期生の各 SU-CREST チームへの参加状況を黒矢印で示している (数字は参加人数)。その他の黒矢印は CREST チーム間の研究者の移動。赤点線は事後評価支援 1 年追加支援課題。

6. 戦略目標の達成状況について

CREST 13 チームと SU-CREST 11 チームの外部発表総数は論文 692 件と口頭発表 2,099 件を合わせて 2,791 件にのぼり、招待講演 (798 件) や受賞も多いことから、総じて期待通りの成果が得られたと評価できる。

また、さきがけ研究者 27 名の外部発表総数は国際会議での 113 件の招待講演を含めて、論文 255 件と口頭発表 822 件を合わせて 1,077 件にのぼり、後掲の受賞も多い。国際的にも最高水準の成果が得られている。

(1) CREST

① 各研究課題の成果概要

CREST 1 期

○上野チーム

振動磁歪型発電デバイスの設計に関する研究において磁歪式振動発電の鍵となる Fe-Ga 合金の結晶成長技術 (4 インチ径) を確立した。永久磁石で磁気バイアスを印加した磁歪式振

動発電デバイスの設計手法を開発し、世界最高水準の発電能力を持つ磁歪振動発電デバイスを作製した。振動発電デバイス構造の基本特許を7か国で権利化している。

○勝藤チーム

遷移金属元素の3d軌道の揺らぎによる熱伝導の抑制と軌道自由度による熱電材料の研究を行い、広範囲の温度・応力下での熱電特性の実験により、遷移金属酸化物の軌道揺らぎがフォノン熱伝導度を下げて、熱電性能が向上することを明らかにした。遷移金属酸化物(n型熱電材料)のホランダイト型 $Ba_xTi_8O_{16+\delta}$ を開発するなど、学術面での研究成果が認められる。

○中辻チーム

異常ネルンスト効果を反強磁性体 Mn_3X (X: Sn, Ge) で実験的に初めて明らかにし、その機構の解明と熱電材料としての有効性を示した。反強磁性体 (Mn_3X) および強磁性体 (Co_2MnGa) で磁気ワイル粒子を観測した。室温で $6 \mu V/K$ の係数を持つワイル強磁性体 Co_2MnGa の開発にも成功。スピン系物性物理分野の研究成果は特筆すべきものである。

○森チーム

Mn ドープ磁性半導体材料の高い熱電性能は、電子と Mn イオンとの強い磁気相互作用による大きな有効質量(磁気ポーラロン)によるものであることを初めて明らかにした。磁性イオンやナノ空隙などを取り入れた高い熱電性能 ($ZT \sim 1.6$: $CoSb_3$ 系スクッテルダイト) の熱電材料を開発など、安価な材料を主成分とする磁性半導体硫化物の熱電材料を開発した。

○年吉チーム

機械振動系と電気回路系の連成モデルを用いた振動発電の等価回路を構築し、発電デバイスの電力取り出し効率を最大化する設計手法を明らかにした。シリコン酸化膜中にカリウムイオンを含む高電荷密度・高信頼性エレクトレット膜を開発し、出力 $439 \mu W$ 、電力取り出し効率90%のMEMS振動発電を実証。民間企業への技術移転が可能な体制ができている。

○鈴木チーム

エレクトレット材料の設計に量子化学計算を活用し、従来の2倍の表面電荷密度 ($4mC/m^2$) を有するポリマー材料の開発に成功。振動発電向けの非線形電源管理回路(SSHI)を考案し、これまでの4倍の発電出力を得た。電極間に液晶を満たした振動発電デバイスを試作し、対空気ギャップ比60倍以上の発電出力が得られることを実証した。

○渡邊チーム

CMOS プロセスとの親和性が高いオン・シリコン熱電発電デバイスで $12 \mu W/cm^2$ (温度差 $5^\circ C$) の高い熱電性能を得ている (Si 系の平面型熱電デバイスとしては世界最高記録)。微細化による発電密度のスケールアップを提案し、プレーナ型熱電発電デバイスの設計法を示した。代表者は早稲田大学に設立されたアンビエントロニクス研究所の初代所長に就任。

CREST 2期

○大野チーム

流体発電デバイス(導電性CNT薄膜)の発電量は、流動起電力と電極での電子交換による電

流で律速されることを明らかにし、液滴発電では 導電性薄膜と電解液液滴界面の電気二重層の形成によるチャンネル内電位差と液滴の移動に応じたキャリアの移動で説明できる発電モデル式を提唱した。流体の流量や温度を無線で送信するシステムを試作した。

○河口チーム

マイクロ波帯のナノワイヤ GaAsSb/InGaAs バックワードダイオードの製作プロセスを確立し、700 kV/W(2.4GHz)の世界最高感度のナノワイヤ BWD 特性を実証した。ナノワイヤ BWD を用いて世界で初めてマイクロ波 RF 信号の直流変換に成功した。マスコミなどで「微弱電波からの発電」として紹介され、本研究領域の狙いを喧伝することに貢献した。

○塩見チーム

マテリアルズ・インフォマティクス手法により、熱電変換の性能指数を最大にするナノ構造設計手法を開発した。発熱体の表面形状(粗面・曲面・伸縮面)への装着性が優れた折り紙型熱電発電デバイスを作製し、25%程度の延伸性と効果的な熱電発電を実証している。安価なシリコンで作られた熱電材料の中では世界最高の熱電性能を達成している。

○石橋チーム

SOI(Silicon on Insulator)FET 構造により、Subthreshold Slope(SS) = $33 \mu\text{V}/\text{dec}$ の電圧スイング(従来素子の 1/1000 以下)でスイッチングする Super Steep FET を開発。2.4GHz 帯のメタマテリアルアンテナ(体積 7.9cc インピーダンス $2\text{k}\Omega$)を開発。整流回路技術と併せて環境 RF 信号(AM ラジオ波、携帯電話 950MHz 帯)からの発電を実証した。

○神野チーム

非鉛圧電薄膜(K, Na)NbO₃(KNN)に MnO₂ を添加してリーク電流を大幅に抑える技術を開発し、KNN の実用化に近づけた。低比誘電率材料 BiFeO₃ の分極壁密度を増大させて PZT 薄膜と同等レベルまで性能指数を向上できることを明らかにした。IEC SC47F のプロジェクトリーダーとして圧電測定の電気機械結合係数、及び、環境耐性に関する国際規格を提案。

○李チーム

平面元素配位の物質系において、化学的圧力を加えた中心原子のラットリングによって格子熱伝導率が効果的に抑制できることを初めて見出した。実用的な熱電材料として α -MgAgSb の熔融法による作製方法を確立し、中温域(200°C)では BiTe 系を超える熱電性能を得た。

SU-CREST

○鈴木チーム

・アモルファスフッ素樹脂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、世界最高の表面電荷密度のポリマー・エレクトレット膜を開発した。この機械学習を用いたポリマー・エレクトレットの探索は、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。

・電極間に液晶を挟んだエレクトレット発電デバイスの発電量が約5倍増加することを実証

し、特性劣化要因である液晶中の不純物の除去が可能となったことで、高寿命・高出力の液晶発電デバイスの実用化に大きく前進した。

・新たに開発したポリマー・エレクトレットを腕時計型の回転式エレクトレットデバイスに適用し実用的な発電量1mW@1Hzを達成した。

・当初計画には無かったペロブスカイト型 LaAlO_3 、 YAlO_3 の薄膜エレクトレットの発見は特筆すべき研究成果である。

(追加支援の成果)

・発電量を増大させるための負のばね定数を持つローター機構を開発。

・手首装着型回転型発電機を低歩行速度において高出力化した(歩行時に 0.7mW 以上の発電出力)。さらに、コールドスタートが可能な SECE 回路を試作し、出力電力が 2 倍になることを示した。

【COVID-19 追加的研究】

腕装着型の電池レス・ウェアラブルデバイスとスマートフォンからなるソーシャルディスタンス・アドバイザーを試作した。これは近隣のデバイス間のみで共有する距離情報(超音波センサー)を BLE(Bluetooth Low Energy)を経由してクラウドに上げるシステムである。

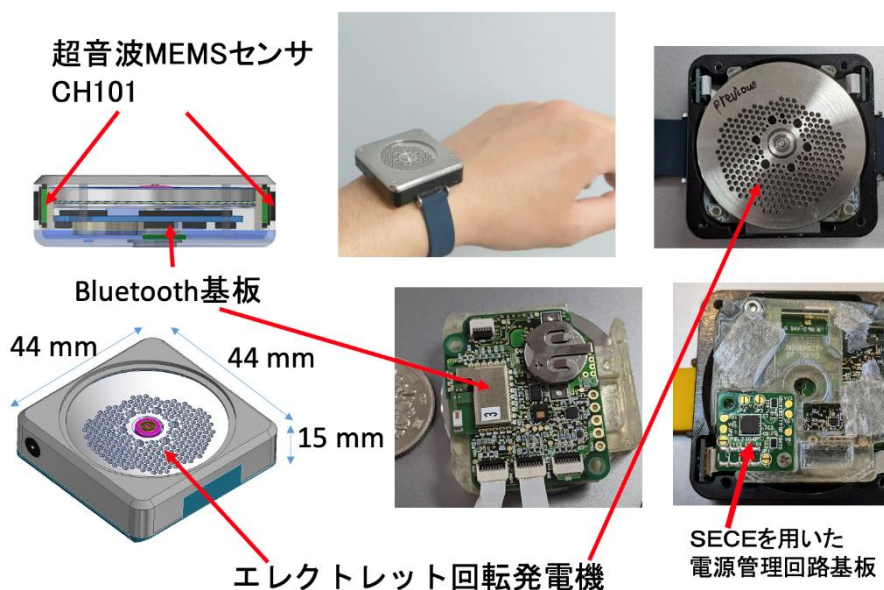


図 13. 電池レス・ソーシャルディスタンス計測デバイス試作機

○渡邊チーム

・狭窄領域に大きな熱流を通す“拡がり温度場”を利用したプレーナー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駆使して同デバイス開発を進めた。

・CNT の配向を制御した不織布シートの n 型パターン形成プロセスを開発し、シート面内方向に温度勾配を付けることで、より顕著な発電量が得られることを実証した。

・700-800 μ W/cm \cdot K²の巨大なパワーファクター(世界最高値)を有する n 型の IV 族(Si, Ge, Sn) 元素混晶薄膜の形成に成功。

・フォノン・フォノン散乱の微視的な物理モデルを組み込んだフォノンドラッグ効果シミュレータを世界に先駆けて開発し、微小熱電デバイスでは実効的なゼーベック係数がデバイス長に比例することを明らかにした。

(新たに追加した研究課題)

・放射加熱・放射冷却を利用した環境発電(Bi₂Te₃使用)IoT 実験を実施、大阪府枚方市が主催する地域課題解決プロジェクトで最優秀賞を獲得。現在、同プロジェクトの枠組みを利用して大阪府枚方市内の圃場に環境発電 IoT システムを配置してスマート農業に応用する研究を進めている。

○塩見チーム

熱電ひずみエンジニアリングの基礎研究基盤の構築から、応用研究としての Si ナノ複合焼結体材料の高性能化、バルクスケールの熱電材料の作製、フレキシブル性と延伸性を有する熱電デバイスの開発に至るまで、基礎研究と技術開発の両面ともバランスよく成果を創出し、社会実装に繋がる大きな成果をあげた。

・熱伝導マッピング装置等の計測系を構築し、加圧ねじり加工や応力加圧下での熱電特性の評価・解析を通して「熱電ひずみエンジニアリング」を実証し、新しい熱電の技術分野を創出した。

・ナノ構造、金属ドーピング、微量酸素の添加、などを組み合わせた高速焼結プロセスにより、高い熱電性能のバルクスケール・シリコンナノ複合焼結体を開発した。

・熱電高性能ナノ構造制御薄膜材料としてコンビナトリアルスパッタ材料合成法を活用し、室温で ZT=0.6 の高性能を有する Cu₂Se_xO_y 材料を開発した。

・薄膜基板に切り込みを入れて立体的に折り上げる切り紙巴型構造の優れた伝熱ヒートシンクを考案し、熱源と雰囲気との温度差の半分程度が熱電材料に印加できるモジュール構造を使って ZT=0.1 の熱電材料でも温度センサーデータの無線送信が可能であることを実証した。

○野村チーム

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、熱電変換材料の高性能化につながる表面ナノ構造形成技術、新しい熱フォノン平均自由行程測定法の確立、など伝熱工学において新分野を開拓し、世界トップレベルの研究成果を複数生み出した。

・窒化シリコン薄膜において表面フォノンポラリトンによる熱伝導率が温度とともに上昇する現象を観測し、表面フォノンポラリトンがフォノン以上の主たる熱キャリアとなることを初めて明らかにした。

・半導体薄膜に空孔を整列させることで、熱流に指向性を与えられること(フォノンの弾道的輸送特性)を予測・実証し、放射状に空孔を整列させて熱流を空間の一点に集中させる固

体集熱を初めて実現した。

- ・ナノスリット構造を形成したシリコン薄膜を用いて、熱緩和時間のスリット幅依存性の計測結果と理論解析モデルから熱フォノンの平均自由行程を測定する手法を開発した。

- ・多結晶シリコン薄膜に構造パラメータを最適化したナノフォニック構造を形成し、熱伝導率の低減により、 $ZT > 0.1$ が見込まれるシリコン薄膜材料の作製に成功。

- ・平面型熱電変換デバイスにおいて重要な熱設計とそのためデバイス作製技術を構築し、環境温度差を熱電材料に効果的に印加できるマイクロ構造を安定して作製する技術を獲得した結果、自然冷却と比較して1万倍以上の発電量密度を実現した。

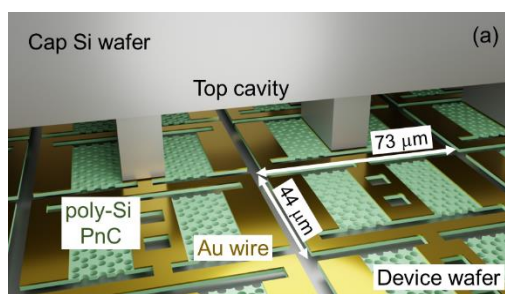


図 14. 平面型シリコン熱電変換デバイスの模式図

○年吉チーム

パーペチュアル・エレクトロニクス概念を掲げ、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高度の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、IoT無線センサーノードの動作確認に成功した。その基礎となるエレクトレット形成メカニズム解明、デバイスと回路の最適化を可能にする設計論、ウェハーレベルパッケージを可能にする製造技術、環境振動の周波数変動への対応技術などを着実に確立した。

- ・MEMS振動発電素子において、エレクトレット帯電電圧と櫛歯電極のアスペクト比を高め、無効電力につながる浮遊容量を大幅に削減して最大1.2mW(周波数150Hz、加速度0.6G)の出力電力を実証した(振幅制限のある振動発電素子における出力電力の最大化を理論的に捉え直し、MEMS構造と帯電電圧の最適化によって世界トップレベルの出力、出力体積密度を実現)。

- ・機械-電気結合係数の極大化により、共振による振動速度増大に頼らずに静電誘導電流を拡大できる非共振型MEMS振動発電素子で、世界最高の周波数帯域幅が得られることを実証した。

- ・振動周波数の変動や素子の経時変化を吸収するPLL周波数制御方式の振動発電素子を考案・試作した結果、メンテナンスフリーで長期間発電が維持できることを確認した。

- ・シリコン製MEMS構造物の表面に形成したKイオンドープ熱酸化膜を帯電してエレクトレット化する新手法(赤外レーザー光の空間走査による加熱帯電処理)を開発した。

- ・分子動力学(MD)に基づく第一原理計算(melt-quench法)によって、Kイオンドープ熱酸化

膜の帯電機構(5配位のSi原子の存在)を明らかにした。第一原理計算で材料の素性を明らかにし、耐劣化性に優れたプロセスの開発をした数少ない例として評価できる。

- ・バルク圧電ポリマーによる構造体の共振周波数は高く、低周波数領域に分布する環境振動への適合が難しいが、メタマテリアル構造を用いて材料剛性を調整すると共振周波数を低減できることを実証した。構造体の加工によって等価的に負のポアソン比を有する圧電ポリマーの発電効率が2倍近く改善することを確認した。

- ・トライボ発電において、微小変形を考慮した界面構造の微細化に体系的に取り組み、界面構造をマイクロメートルオーダーに微細化することで、最大発電電力を4倍にできることを実証した。

(新たに追加した研究)

- ・①MEMS機構をノーマリーOFF型のイベントドリブン・スイッチとして利用した新しいIoTセンサー、②エレクトレットをバイアス電圧に用いた静電アクチュエータを使った接点開閉型の静電スイッチを開発とそれを用いた電圧レギュレータの実証、③生体模倣の聴覚センサーの提案、など想定を上回る成果が得られた。

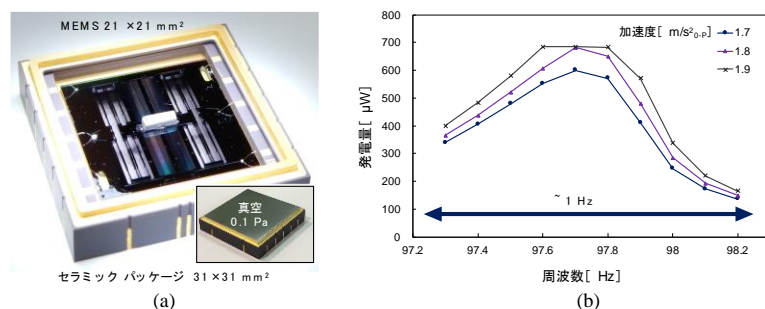


図 15. (a) 年吉チームの共同研究先(鷺宮製作所)が作製した MEMS 振動発電素子、
(b) 同デバイスの振動発電-周波数特性

○石橋チーム

さきがけ研究者の柳谷を加えて無指向性アンテナ、レクテナ、昇圧及び電源供給回路、極低消費電力 CPU、ウェイクアップ信号受信デバイス、バックscatter方式の低電力センサー信号送信方式などを試作し、各研究グループの強みを生かした独自技術を創出した。

- ・Subthreshold Slope(SS)<1mV/dec を有する FET を考案し、CMOS インバータの実測でデルタ関数的なゲイン特性を確認した。RF(Radio Frequency)における 10mV の微小振幅の整流データをもとにシミュレーションした結果、効率 80%@-30dBm の高効率レクテナが実現できることを示した。

- ・スマートフォン向けの周波数フィルターに使われている窒化アルミニウム (AlN) 圧電薄膜材料に Yb を添加すると電気機械結合係数が最大約 1.4 倍増加することを発見。理論計算に

より電気機械結合係数の向上メカニズムが解明され、圧電材料の探索に有用な指針を得た。

- ・高インピーダンスメタマテリアルアンテナ、整流デバイスの RFEH 向け精密モデリング、CC(Cross Current)整流回路を組み合わせた整流回路において、920MHz、2.4GHz の周波数領域における世界最高の整流効率を達成した。

- ・RFEH により得られる μW 級の電力で動作する Wake up Receiver(WuRx)、LoRa を用いた Beat センサー、温度センサーTAG、Sub μW CPU、Ambient Back Scatter(AmBC)通信技術等を開発した。

- ・エネルギーハーベスティングやウエイクアップアッププレシーバーに好適な、電波の到来方向によらず安定な受信ができる等方性 Ω アンテナ(351MHz 帯、クレジットカードサイズ)を開発。

- ・多重共振のない圧電トランスを考案し、ブラッグ反射器上に c 軸ジグザグ ScAlN 積層型圧電トランスを作製することで比帯域幅が 46 倍広帯域化することを確認。

【COVID-19 追加的研究】

- ・コロナ追加予算により開発した傾斜配向 ScAlN 薄膜を用いた抗原抗体反応検出センサーを開発。

○神野チーム

圧電薄膜基盤技術を深耕し、圧電性能を向上させた①大変形・衝撃で効率的に発電可能な圧電薄膜素子、②超構造を制御した圧電素子の開発を目標において、シリコン基板上での圧電薄膜エピタキシャル成長技術を確認、結晶構造と圧電性の関係を明らかにした。

- ・PZT、KNN 薄膜の熱力学現象論に基づく圧電応答モデルを構築し、計算により相境界の推定が可能となった。このモデルに基づく圧電性増大の指針を PZT 薄膜の実験により検証した。

- ・U 字構造振動増幅機構を用いて薄膜 2 自由度型 MEMS 振動発電素子を設計・試作し、PZT および BFO 薄膜振動発電素子において夫々 90 倍および 50 倍の発電電力の増大を達成した。

- ・PZT 薄膜を用いた MEMS 発電素子を使用して、タイヤに内蔵する無線センシングシステムを構築した。PZT 圧電 MEMS 振動発電素子のより構造を厚み方向に傾斜を持たせた等応力構造とし素子耐久性の向上が大幅に改善した。

(新たに追加した研究)

- ・有機材料特有の柔軟性、生体親和性を利用した、インプラントブルセンサー・発電素子を設計・試作した。心臓モデルでの発電出力計測に加え心臓の動きを 3 次元的に測定するアレイセンサーを開発した。

○李チーム

Bi-Te-Sb 系のモジュールの性能を凌駕する非 Te 系熱電材料開発を目指し、室温 \sim 200°C 域で現行 BiTe 系に迫る熱電性能の材料と、その量産に適したプロセス(熔融法&熱処理)と素子化技術(電極・拡散防止層形成)を開発し、Bi-Te-Sb 系のモジュールに迫る熱電性能を確認した。

・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。Mg₃Sb₂のゼーベック係数及び電気抵抗の温度依存性をほぼ再現できるまで精度を高めることに成功した。

・焼結後の熱処理により(Mg, Y)₃(Sb, Bi)₂の電荷キャリア濃度を調整するプロセスを確立し、バルク中の電子濃度を10²¹/cm³に高めることで、ZT=1.34(T=724K)の高い熱電性能を持つ材料開発に成功した。

・熔融法と熱処理を組み合わせた製造プロセスの開発により ZT=0.90(T=470K)のp型熱電材料α-MgAgSbの開発に成功した。

・反応性の高いMgを主成分とする熱電材料(Mg, Y)₃(Sb, Bi)₂、MgAgSbに適切な拡散防止層を形成することで、~10⁻⁶ Ω cm²の低界面抵抗値を実現したことでBi₂Te₃に匹敵する熱電変換効率の熱電モジュールが実証された。完全にTeフリーの熱電変換モジュールとしては世界最高の変換効率を有する。

○岡本チーム

有機熱電材料の学理を深耕し、電気伝導性および熱電特性の優れたp型/n型有機半導体を開発、さらに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・実証(目標発電量10~50μW)を推進した。また素子開発に向けて新たに高結晶性n型高分子半導体を開発。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。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考えられる。

・熱電特性(ゼーベック係数)解析のため、「時間依存波束拡散法」を拡張し、1億原子系でパワー因子が評価できる計算法を開発した。この有機半導体における“Partially dressed polaron モデル”に基づく伝導解析法は計算規模、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。

・p型有機半導体における複数の分子軌道が伝導に寄与するマルチオービット伝導性の有機半導体を開発し、10 cm²/Vs以上の高キャリア移動度を観測した。

・2.5 cm²/Vsの高キャリア移動度を有するキノイド型構造の高分子半導体を合成した。第一原理計算により、キャリア(π電子)を主鎖に沿って非局在化することで移動度が向上することが分かった。

・超分子錯体を用いて電子ドーピングした、大気下で安定かつ良好な導電性をもつ有機半導体フィルムを開発した。これは実用レベルのn型有機熱電変換技術の端緒を開くものと考えられる。

・高結晶性高分子半導体厚膜の成膜は容易でないが、加熱した高濃度溶液をブレードコーティングすることで約2 μm厚の高分子膜作製に成功した。

・高分子半導体の厚膜塗布技術とドーピングパターンニング技術を併用して縦型πレグ熱電変換素子の集積化に成功した。

○小野チーム

電気二重層エレクトレット (EDLE) を求心力として、様々なさきがけ研究者を統合して CREST グループ研究を進めた。応用に関しては新規電源回路の提案、また EDLE の特徴 (=安価で軽量) を捉えた複数のアプリケーション (AI 技術を使った故障診断・歩行動作解析、エンタメライブ機器) を試し、使途を実例として示したことは評価できる。

- ・電気二重層エレクトレット振動発電素子の発電メカニズムがエレクトレットによる静電誘導効果、圧電、摩擦発電によることを見出した。

- ・消費電力を極限まで抑制する非同期制御技術を用い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 μW の微小電力を蓄電する電源回路の動作を実証した。

- ・通信に要する電力が蓄えられると振動データを無線通信する方式において、振動データと通信頻度の双方を「異常」の判定基準として利用する機械学習アルゴリズムを用いた EH 故障診断システムを構築し、センサー信号と併せて送信頻度を特徴量とする事で精度が向上することを明らかにした。

② 顕彰・受賞

主な受賞としては、森孝雄研究代表者の nano tech 大賞や、塩見チームの異能 (Inno) vation ジェネレーションアワード部門、センシング・データ部門賞、李チームの日本熱電学会進歩賞、年吉チームの先端技術大賞文部科学大臣賞、先端技術大賞経済産業大臣賞など産業技術に関する受賞が多い。

萌芽的な研究、独創的視点に立った研究等、高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた 40 歳未満の若手研究者が対象となる科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞についても 4 名が受賞している。

CREST 1 期

片山裕美子	第 71 回日本セラミックス協会進歩賞 (2016)
森 孝雄	nano tech 大賞 2016 プロジェクト賞 (グリーンナノテクノロジー部門)
加藤 隆史	日本化学会賞 (2017)
大場 俊輔	電子デバイス界面テクノロジー研究会 (第 22 回) 服部賞 (2017)
大谷 義近	平成 29 年度日本磁気学会業績賞
鈴木 茂	日本金属学会・谷川・ハリス賞 (2018)
有田亮太郎	第 23 回日本物理学会論文賞 (2018)
中辻 知	第 24 回日本物理学会論文賞 (2018)
大谷 義近	IEEE Magnetics Distinguished Lecturer (2018)
渡邊 孝信	早稲田大学リサーチアワード (国際発信力) (2018)
鈴木 雄二	日本機械学会研究功績賞 (2018)

CREST 2 期

岩瀬 英一	異能(Inno)vation ジェネレーションアワード部門、センシング・データ部門賞(2017)
水口 佳一	応用物理学会論文賞(2017)
高野 義彦	Highly Cited Researchers 2017 Clarivate Analytics
児玉 高志	日本伝熱学会学術賞(2019)
水口 佳一	文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2018)
水口 佳一	第 13 回凝縮系科学賞(2018)
末国晃一郎	日本熱電学会進歩賞(2018)

SU-CREST

山田 駿介	先端技術大賞<学生部門>文部科学大臣賞(2019)
三屋 裕幸	先端技術大賞<社会人部門>経済産業大臣賞(2019)

SOIバルクマイクロマシニング、エレクトレット形成

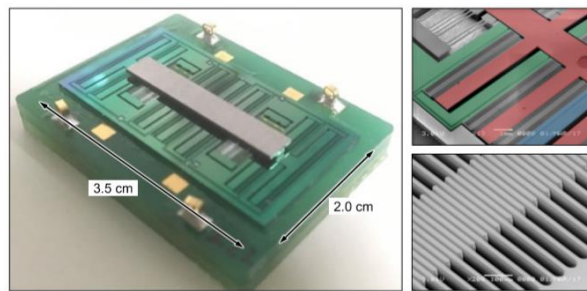


図 16. 第 33 回独創性を拓く先端技術大賞(経済産業大臣賞)を授与された振動発電デバイス
(年吉チーム、2019 年)

野村 政宏	応用物理学会解説論文賞(2020)
野村 政宏	日本学術振興会賞(2020)
塩見淳一郎	日本学術振興会賞(2020)
山田 智明	Richard M. Fulrath Award(米国セラミック協会)(2020)
越智 正之	令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞(2020)
年吉 洋	CEATEC AWARD 2020 オープン部門グランプリ(2020)
塩見淳一郎	日本熱電学会学術賞(2021)
鈴木 雄二	IEEE Fellow(2021)
年吉 洋	第 53 回市村学術賞(貢献賞)(2021)
年吉 洋	第 77 回電気学術振興賞(進歩賞)(2021)
前中 一介	電気学会業績賞(2021)
矢嶋 赳彬	令和 4 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞(2022)
渡辺 豪	令和 4 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞(2022)

岡本 敏宏 日本化学会第 39 回学術賞 (2022)
加藤 隆史 高分子科学功績賞 (2022)

(2) さきがけ

①各研究課題の成果概要

さきがけ 1 期生

○黒崎 健

シリコン系材料に変調ドーパ/ナノ構造を導入して熱電性能を高めるアイデアを提案し、ナノ構造と変調ドーパ構造が同時に作製可能なメルトスピン法を用いた独創的な材料作製法で Si 熱電材料の開発を行った結果、ZT が Si の 4 倍程度にまで増加することを確認した。

○黒澤 昌志

Si-CMOS プロセスとの親和性の高い IV 族元素系熱電変換材料を取り上げて、① Ge 系材料では困難とされていた高濃度 n 型ドーピング技術の開発、② 超高 Sn 組成 $\text{Si}_{1-x}\text{Sn}_x$ 膜形成を実証し、価電子帯端オフセット (VBO) を初めて観測した。

○鈴木 孝明

3 次元ポリマー微細構造(メタマテリアル、ジグザグ、3 次元メッシュ)の独創的な振動発電 MEMS デバイスを開発し、高い発電性能を実証した。様々な周波数の振動・歪に応じた振動発電デバイス設計法を提案し、振動発電デバイスの適用範囲の拡大に大きく貢献した。

○野村 政宏

熱フォノンクスの学理を構築し、同時にフォノンエンジニアリング(熱伝導制御)の新分野を開拓した。①フォノンニック結晶構造の多結晶薄膜 Si で発電量が 10 倍に増大することを実証、②熱のバリスティック伝導性を生かした集熱デバイスが設計できることを示した。

○藤岡 淳

強相関トポロジカル半金属における熱・スピン起電力(異常ネルンスト、スピンゼーベック)効果の基礎学理の解明に向けた研究を行い、異常ホール効果が観測される反強磁性ワイル半金属相を見出し、ワイル電子の仮想磁場による異常ネルンスト効果を観測。

○藤ヶ谷 剛彦

生体貼付け型 CNT シート用の大気中で安定な n 型ドーパントを開発し、その発現メカニズムを解明。単層 CNT シートへの高分子被覆と半導体性単層 CNT 抽出剤の除去が ZT の向上に有効であることを示し、CNT 熱電変換材料の社会実装に向けた技術的課題を解決した。

○松野 丈夫

YIG 磁性体上へのイリジウム酸化物のエピタキシャル成膜に成功。スピン流の注入効率がスピン流誘起熱電変換の律速要因であることを明らかにした学術的意義は大きい。本成果を基にレビュー論文をまとめ上げるなど、スピン流の物理に一石を投じた。

○湯浅 裕美

磁性絶縁体／非磁性膜界面におけるスピン注入効率向上にむけて最適な材料を探索する過程で、界面制御の概念を取り入れてスピンミキシングコンダクタンスの増大につながる成果を得た。非磁性層としては Ta₅₀W₅₀ 合金が有効であることを明らかにした。

○吉田 秀人

走査透過型電子顕微鏡法を用いた電子エネルギー損失分光法のプラズモンピークシフトからナノスケールの温度分布をマッピングする技術を開発。実験の結果、誤差約±5°Cで温度の計測が可能であることを確認した。ナノスケールの温度ムラの可視化の意義は大きい。

さきがけ 2 期生

○片瀬 貴義

フォノンドラッグ効果を利用した新熱電材料 LaNiO₃ 薄膜に圧縮歪を加えて出力因子を 10³ 倍増加させることに成功した。格子歪による遷移金属酸化物のフォノンドラッグ熱電能の増加には、平均自由行程の長いフォノンが関与していることを明らかにした。

○酒井 英明

ネルンスト効果の起電力増大に向け、高い電子移動度と磁気秩序を併せ持つ多層ディラック電子系磁性体のキャリア濃度を制御して熱磁気・熱電発電性能が最適化できることを示し、磁気秩序がディラック電子と結合する微視的メカニズムを解明した。

○高橋 竜太

圧電性単結晶メンブレン膜の製作プロセスの開発とその膜を用いた振動発電デバイスの創製を目指す研究を行った。導電体 ITO を塗布した PET 基板上に BaTiO₃ 単結晶膜を転写した振動発電デバイスを試作し、5Hz の機械的振動の下で 1 μW を超える電力を得た。

○中嶋 宇史

電気機械結合係数(電気エネルギーへの変換効率の指標)が 10%を超える圧電性非フッ素系ナイロンフィルムの合成に成功。熱処理のみで膜が分極するフッ化ビニリデン系材料の成膜条件を見出し、無電界塗布可能な(プリンタブル)圧電膜形成技術を開発した。

○中村 優男

結晶構造の空間反転対称性が破れた物質で生じる光照射起因のシフト電流はエネルギー散逸が小さく、格子欠陥量依存性の実験よりシフト電流がバルク内部および表面状態に鈍感であることを明らかにした。シフト電流はサブ psec の超高速応答を示すことを確認した。

○野々口 斐之

表面錯体形成に基づく n 型 CNT の耐熱化の研究を通して、安定性の優れた n 型カーボンナノチューブの設計指針を構築した。有機塩によるイオン間相互作用がドーピングに寄与することを示し、p 型ドーピングにおけるカウンターアニオン依存性を明らかにした。

○村田 理尚

ジチオラート型ニッケル錯体の実験を通して、ゼーベック係数ならびに電気伝導率を改善するための分子構造設計の指針を明らかにした。ジチオラートにポリスチレン微粒子を

加えた新しい塗布法を開発して高い性能($PF = 13 \mu W m^{-1} K^{-2}$)の熱電膜を得た。

○柳谷隆彦

電波発電のレクテナ応用を目指して c 軸が傾斜した ScAlN 薄膜を用いたジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜の形成に成功。横波に対する電気機械結合係数の世界最高値を達成した。ジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜を用いたトランスで入力電波が 12 倍増幅されることを確認した。

○山田智明

強誘電体ナノロッド膜の表面・界面の静電相互作用による分極状態を利用して材料全体が巨大圧電応答を示す機構解明の研究を行った。SrTiO₃ 基板上的 Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ (PZT) ナノロッドのサイズや側面の金属被覆の有無によって分極方位の制御ができることを確認。

さきがけ 3 期生

○衛 慶碩

伝導高分子膜 PEDOT/PSS 電極と電解液 K₃Fe(CN)₆/(NH₄)₄Fe(CN)₆を用いた電気化学セル(寸法 5cm×5cm×2cm)を作製し、温度差 30°Cの下で開放電圧 40mV、最大 300 μW (@1 Ω 負荷)の電力を得た。熱電気化学セルを使った世界初センサーノードを試作し、動作を確認した。

○岡本 敏宏

アルキル置換 Cn-DNBDT を塗布結晶化法で成膜した極薄膜単結晶膜(2 分子膜、約 8 nm)の実験より、90 $\mu W m^{-1} K^{-2}$ の良好なパワーファクター値を得、低分子系半導体材料が熱電材料に利用できることを明らかにし、熱電性能の向上のための半導体分子の設計指針を得た。

○小野 新平

電気二重層エレクトレットを用いた振動発電素子では、電気二重層エレクトレットへの電極の接触・離反時に観測される電流発生の原因が、静電誘導、接触帯電、および圧電効果であることを明らかにした。

○小菅 厚子

低温域(室温~100°C)の GeSbTe 系の熱電変換特性を有する材料を研究し、 $ZT=0.4\sim 1.3$ の熱電性能の p 型熱電変換材料の開発に成功。高性能の要因は①材料特有の共鳴結合による低格子熱伝導率と②フェルミ準位近傍の特異なバンド構造、であることを明らかにした。

○桜庭 裕弥

異常ネルンスト効果を利用した熱電発電の実現に向け、大きな内因性異常ホール効果をもつ Co₂MnAl や Co₂MnGa をベースとし、原子規則度やフェルミ準位位置が異常ネルンスト効果に与える影響を系統的に調べ、過去最高クラスの 6-7 $\mu V/K$ の発電能の材料を発見。

○田中 有弥

市販の CYTOP をコロナ荷電によってエレクトレット化した値(2.0 mC/m^2)に匹敵する表面電荷密度 1.7 mC/m^2 の荷電処理不要のエレクトレット薄膜 TPBi を開発した。極性分子のエレクトレット振動発電デバイスを作製し、その動作を確認した。

【COVID-19 追加的研究】山根さきがけ研究員との共同提案

自己組織化エレクトレットを使ったコロナウイルス用マスクの開発

○都甲 薫

Al 誘起層交換法で大粒径(50 μ m)のSi_{0.4}Ge_{0.6}薄膜形成に成功し、出力因子として、ガラス上で430 μ W/mK²、ポリイミド上で190 μ W/mK²を得た。80°CのZn誘起層交換法で作製したp型試料の出力因子240 μ W/mK²は低温合成膜としては世界最高の熱電性能。

○矢嶋 赳彬

CMOS デジタル回路を用いたイベント駆動(間欠動作)型ニューロン回路(劇的な低消費電力動作回路)を考案。設計した振動発電回路をTSMCの実デバイスモデルを用いてシミュレーションし、超低消費電力動作することを確認した。

○山根 大輔

従来の振動発電デバイスが抱えていたエレクトレットとMEMSの相互干渉による材料選択・設計・作製方法などの制約を解消するため、可変容量素子とエレクトレット成膜基板を別々に作製し、それらを電気配線した新しい振動発電デバイスの発電に成功した。

【COVID-19 追加的研究】田中さきがけ研究員との共同提案

自己組織化エレクトレットを使ったコロナウイルス用マスクの開発

②顕彰・受賞

さきがけ研究者は学会での活躍が認められ、さまざまな賞を受賞している。以下に主な受賞をリストアップする。これらの若手研究者の受賞は今後のキャリア形成に寄与するものである。

さきがけ1期生

黒崎 健	日本熱電学会学術賞(2018)
黒澤 昌志	第38回応用物理学会優秀論文賞(2016) MNC2017 Award for Outstanding Paper(2018)
鈴木 孝明	第21回横山科学技術賞(2017) 日本機械学会若手優秀講演フェロー賞(2018)
野村 政宏	日本機械学会熱工学部門一般表彰講演論文表彰(2016) 丸文研究奨励賞(2017) German Innovation Award, Gottfried Wagener Prize (2018)
松野 丈夫	第5回理研CEMS Award(2018)

さきがけ2期生

片瀬 貴義	71回日本セラミックス協会賞進歩賞(2017) 第31回安藤博記念学術奨励賞(2018)
酒井 英明	大阪大学賞(2018)

野々口斐之	日本熱電学会優秀講演賞(2019)
村田 理尚	第30回有機合成化学協会東ソー研究企画賞(2017)
中嶋 宇史	第65回応用物理学会春季学術講演会 Poster Award(2018)
柳谷 隆彦	平成30年度科学技術分野の文部科学大臣表彰(2018)
山田 智明	強誘電体応用会議最優秀発表賞(2017) 日本セラミックス協会第37回エレクトロセラミックス研究討論会 最優秀賞(2017)

さきがけ3期生

矢嶋 赳彬	第40回応用物理学会論文賞(2018)
山根 大輔	Nature 創刊150周年記念シンポジウムSDGs賞(2019)

(3) 複合領域の研究を実施した結果

①研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

(i) 科学的な観点からの貢献

学術に顕著な貢献をした研究成果は多々あるが、ここではまず原著論文の引用回数の多い4つの研究成果をあげる。

- ・ナノ構造シリコン薄膜の熱伝導の系統的な研究を通して、熱フォノンニクスの学理を構築し、同時にフォノンエンジニアリング(熱伝導制御)の新分野を開拓した。[野村(さきがけ)]

Nature Communications 8, 15505 (2017) 文献引用 168回

- ・ワイル反強磁性材料の異常ネルンスト効果を熱電発電に利用する研究。「トポロジー」の概念がエネルギー分野でも適用できることを示した最初の事例として後世に残る成果である。[中辻チーム(CREST)]

Nature Physics 13, 1085-1090 (2017) 文献引用 409回

- ・機械学習と分子シミュレーションを用いた熱輸送計算を交互に組み合わせたマテリアルズ・インフォマティクス手法により、熱電変換の性能指数を最大にするナノ構造設計手法を開発した。[塩見チーム(CREST)]

Physical Review X, 7, 021024 (2017) 文献引用 263回

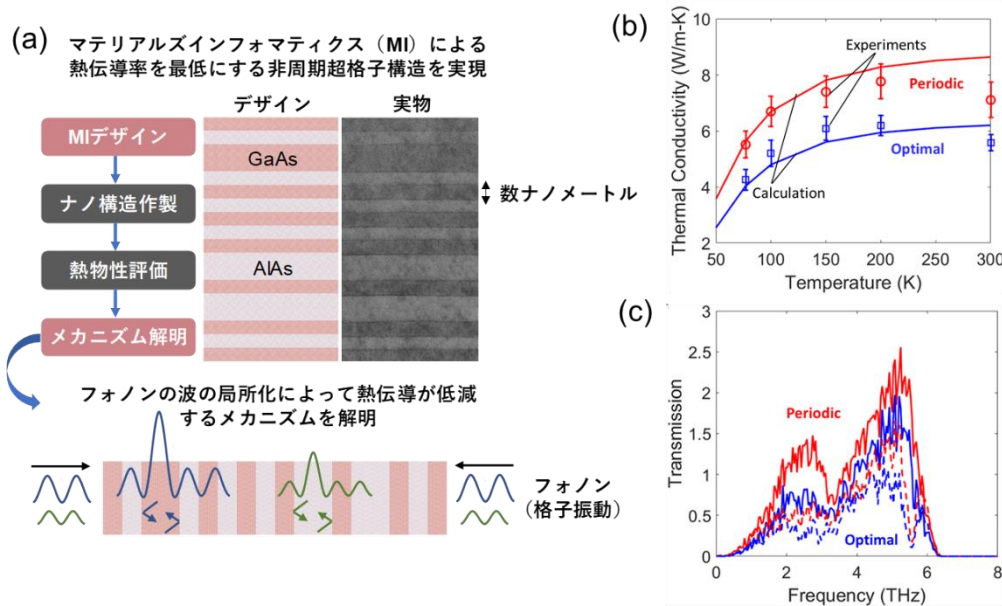


図 17. 最適化プロセスと設計した超格子の透過型電子顕微鏡図[塩見チーム (CREST)]。 (b)周期構造と最適化された非周期構造の熱伝導率と (c)フォノン透過率

・熱電材料に導入した磁性イオンによって高い熱電性能が得られることを実証。[森チーム (CREST)]

Journal of Materials Chemistry A, 5, 7545-7554 (2017) 文献引用 127 回

その他、有機半導体の熱電特性(ゼーベック係数)解析のため、「時間依存波束拡散法」を拡張し、1億原子系でパワー因子が評価できる計算法を開発した。この“Partially dressed polaron モデル”に基づく解析法は計算規模、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。[岡本チーム(SU-CREST)]

鈴木チーム(SU-CREST)の機械学習による量子化学計算を用いたアミンの構造最適化(ポリマー・エレクトレットの探索)を使用し、世界最高の表面電荷密度(4mC/m²)のポリマーエレクトレット材料を発見した手法は、新規材料開発に一石を投じる画期的な方法である。

(ii)技術的な観点からの貢献

エネルギー源の熱、振動、電波に対して代表的な貢献例をそれぞれ一つ紹介する。

・熱電発電

薄膜金属板に切り込みを入れて立体的に折り上げる切り紙型構造の伝熱ヒートシンクを考案し、ZT=0.1の熱電材料でも温度センサーデータの無線送信が可能であることを実証した。これまで、延伸性を得るためにはエラストマ基板や有機熱電材料など材料の延伸性を求めるものがほとんどであったが、本発明の構成方法は基板や熱電材料に屈曲性や延伸性

がなくともデバイス全体の屈曲性や延伸性が得られるものであり、材料選択の幅を格段に広げる発明である。[塩見チーム(CREST)]

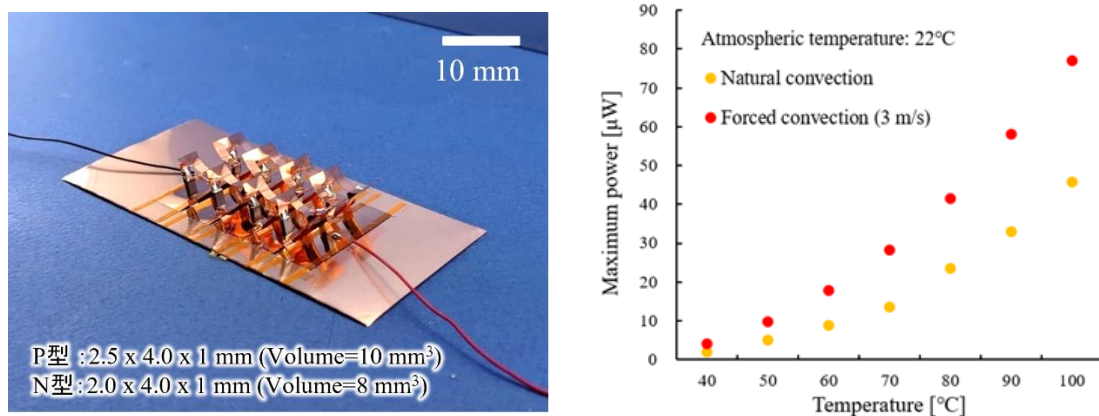


図 18. (左)Si 系熱電素子を実装した切り紙・巴型熱電デバイスの写真、(右)デバイスの発電性能

・振動発電

リソグラフィを駆使した 3 次元ポリマー圧電デバイス構造(ジグザグ、3 次元メッシュ)によって振動発電のベースとなる材料の弾性定数を実効的に変化させて共振周波数を自在に調整できる 3D 中空構造カンチレバーの作製技術を確立。負のポアソン比を持つ材料の作製が可能であり、その応用範囲は極めて大きい。[鈴木(さきがけ)]

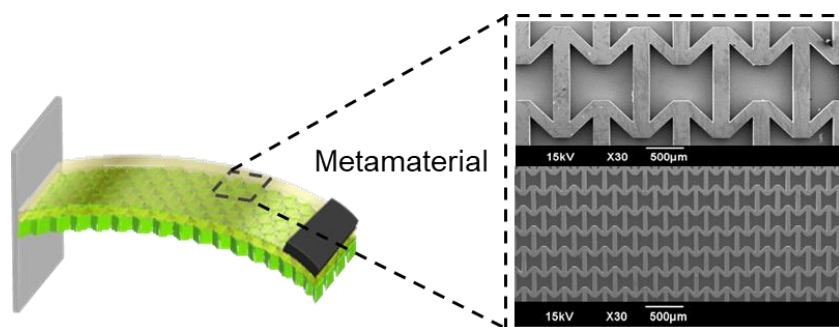


図 19. 負のポアソン比を実現した 3 次元ポリマー圧電カンチレバー構造

・エレクトレット発電

機械振動系と電気回路系の連成モデルを用いた振動発電の等価モデルを構築。発電デバイスの電力取り出し効率を最大化する設計手法を用いてシリコン MEMS では世界最高の電力 (1.2mW, 150Hz, 0.65G) を得ている。[年吉グループ]

Sci. Techno. Adv. Mater., vol. 20, no. 1, 2019, pp. 124-143 文献引用 80 回

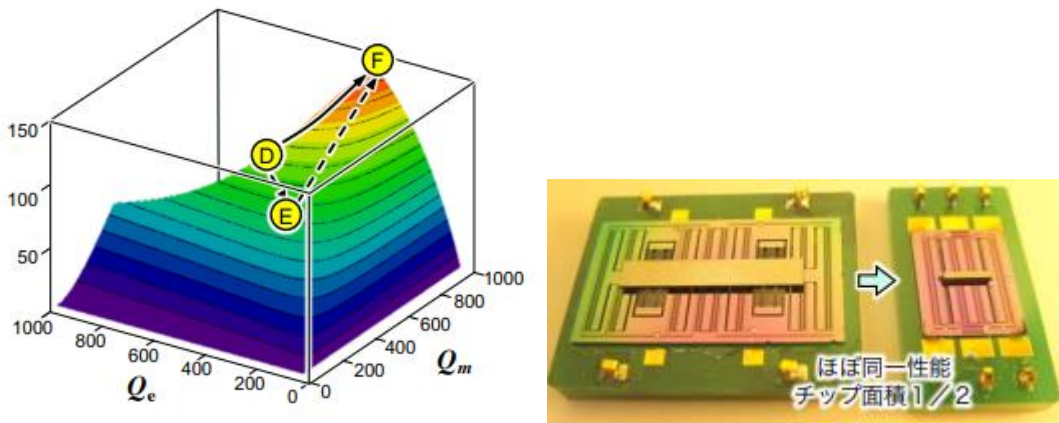


図 20. (左) 電気系と機械系の Q 値を最適化して最大発電量を得る設計手法の例、(右) 最大発電効率が得られる構造設計により、振動発電デバイスの面積が 1/2 になることを実証。

・電波発電

アンテナに入射する微弱電波を増幅して整流効率を高める圧電トランス(ジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜構造)を開発。[柳谷(さきがけ)]

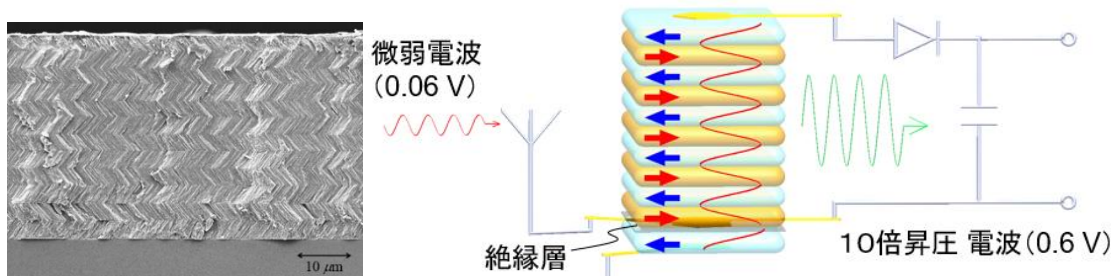


図 21. (左) ジグザク傾斜反転 ScAlN 薄膜構造(圧電トランス)の SEM 写真、(右) 圧電トランスを用いた整流回路。

②研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

Society5.0 では、いたるところに配置した膨大な数のセンサーからの情報をクラウドに収集し、そのビッグデータ解析を通して豊かで便利な社会の構築を目指している。将来的には電池に代わるエネルギーハーベスター(EH)を活用することが社会的・経済的に重要となる。本研究領域では、量産による低価格の EH や環境に優しい元素を使った材料の開発などに重点を置いて研究を進めてきた。

(i) 経済的な観点からの貢献

将来的には膨大な数のエネルギーハーベスター(EH)が社会実装されるため、安価な材料と量産性を念頭に置いて研究を進めてきた好例が集積回路製造プロセスを利用したシリコ

ンベースの平面型熱電デバイスである。インフラ監視などの IoT 無線センサーノードへの応用を目指している。[野村チーム(SU-CREST)]

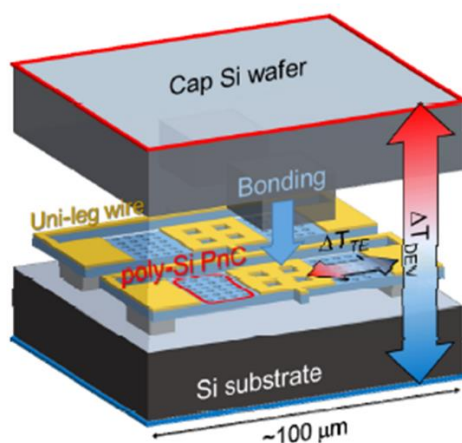


図 22. シリコンプロセスで作製する平面型フォトニックナノ薄膜熱電デバイスの構造。

塩見チーム(SU-CREST)もナノ構造、金属ドーピング、微量酸素の添加、などを組み合わせた高速焼結プロセスにより、高い熱電性能を有するバルクスケール・シリコンナノ複合焼結体を作製し、安価な熱電材利用の開発に成功した。

(ii) 持続可能な社会の実現に向けた貢献

膨大な数にのぼる環境発電デバイスの社会実装には使用する材料の安全性に特段の配慮が必要である。その好事例としては、 Bi_2Te_3 並みの熱電性能を有する有害物質 Te(レアメタル)を含まない熱電材料 Mg_2Sb_3 の開発がある。[李チーム(SU-CREST)]

神野チーム(SU-CREST)も有害物質の鉛を含まない圧電薄膜 KNN の性能向上を目指す研究を行い、漏れ電流を抑制する技術を開発して実用化に近づけた。

(iii) 早期の社会実装が期待できる技術

アカデミアで開発した技術の多くは社会実装されないまま闇に消えることが多い。この「死の谷」とよばれる課題を克服するため、SU-CREST では事業終了後に開発した技術がすぐに民間企業に移管できるよう指導してきたこともあって、年吉チーム(SU-CREST)では、本CREST 研究で構築した MEMS 振動発電素子のエレクトレット形成手法および MEMS 設計・製作手法を、主たる共同研究先の株式会社鷺宮製作所に技術移管しており、2024 年度の事業化に向けて製造ラインの整備を進めている。安価な振動発電デバイスの上市で急速な普及が期待できる。

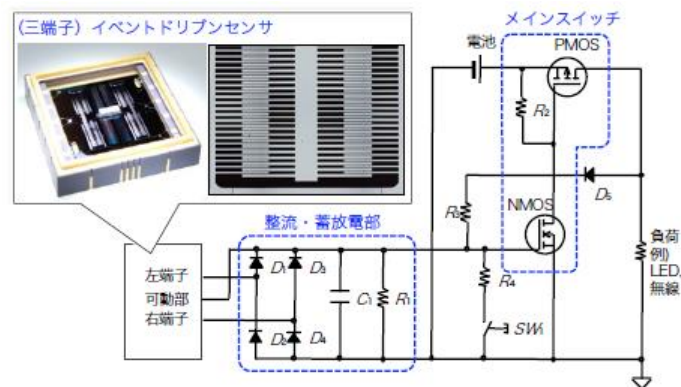


図 23. 特定の周波数における振動振幅が規定値を超えると警報を出すイベントドリブン振動センサー(年吉チームの研究成果を技術移管した鷺宮製作所において試作)

振動発電では磁歪ユニモルフ型デバイスの研究成果と 7 か国で権利化した振動デバイス構造の特許を基に V-GENERATOR(ベンチャー)を立ち上げて、デバイスのサンプル出荷を行っている。[上野チーム(CREST)]

③ 国際標準化への貢献

本研究領域メンバーの振動発電の特性評価方法の国際標準化に向けた意識は高く、鈴木(CREST)は IEC TC47 の活動に貢献し、神野(CREST)は IEC SC47F のプロジェクトリーダーとして圧電測定電気機械結合係数、及び、環境耐性に関する国際規格を提案し、それぞれ、IEC 62047-30、IEC 62047-36 が発行された。本研究で得られた知識を活かして、IEC TC47/WG7 にて、腕・手首装着型の振動発電機の試験方法の国際標準規格を提案し、審議を進めた。現在、CD(Committee Draft)まで順調に審議が進んでいる。

④ 研究成果の外部発信

本研究領域での研究成果は積極的に学会発表、特許申請、マスコミへの報道などを通して遍く社会への発信を心掛けた。

(i) 公開シンポジウム開催

環境発電デバイスの成果を世に問うため、本研究領域主催の公開シンポジウムも開催した。

表 17. シンポジウム・ワークショップ

No.	日程	名称	会場
1	2017年2月17日	第1回公開シンポジウム(ENEX2017) (熱電発電中心)	東京ビッグサイト(東京)
2	2017年7月7日	スピントロニクス材料・強相関物質	JST 東京本部別館(東京)

	日	を利用した発電技術に関するワークショップ	
3	2017年7月14日～15日	応用物理学会フォノンエンジニアリング研究グループ×JST「微小エネ」領域合同研究会	KKR ホテル熱海(静岡)
4	2017年11月14日～15日	さきがけ領域横断シンポジウム「ポスト新機能物質開発のための戦略会議」	東京大学 本郷キャンパス(東京)
5	2018年2月14日	第2回公開シンポジウム(ENEX2018)専用個室を準備し、デモ展示+ビジネスマッチングを開催	東京ビッグサイト(東京)
6	2018年11月7日～8日	第3回公開シンポジウム：講演+ポスター発表・デモ展示(約50件)+発電アイデアコンテスト(優秀デモ賞を表彰)※民間企業の参加者集めを積極的に行った。共同研究に結実した事例有。	早稲田大学 西早稲田キャンパス(東京)
7	2018年11月8日	国際会議：Energy Harvesting Technologies toward SDGs Goal 7～How to break the limit by cutting-edge material sciences?～	早稲田大学 西早稲田キャンパス(東京)
8	2019年10月15日	CEATEC 公開シンポジウム：つながるエネルギー：コネクティッド社会を支える振動発電技術	幕張メッセ(千葉)
9	2019年12月9日	国際シンポジウム：MRM 2019 Satellite Symposium International Symposium on Thermoelectric Energy Harvesting ～How to bring about thermoelectric evolutions in our smart societies?～	横浜シンポジア(神奈川)
10	2021年2月1日～3月14日	オンデマンドセミナー「はじめての熱電変換」	オンライン

(ii) 成果報告会の開催

本研究領域で得られた研究成果は表 10 の成果報告会において発信してきたが、コロナ禍以降のリモート会議のマンネリ化を回避すべく下記の工夫を取り入れて実施した。

○領域横断／令和 3 年度成果報告会・成果展開 VR シンポジウム

エネルギーハーベスティングの未来：2022 年 3 月 7 日

2020 年度から始まったコロナ禍により、Zoom や Teams 等、リモート会議の開催が当然のツールとなった。本研究領域では、さらに VR 空間を活用し、より効果的な情報発信を目指して、Zoom と Virbela を併用した成果報告会・成果展開 VR シンポジウムを 2021 年 3 月 7 日に開催した。VR 空間での一般公開シンポジウムの運営は、技術的にも困難を極めたが、開催 1 週間前の登録人数は 159 名(内、民間企業から 58 名)にも達した。

VR シンポジウムには、以下の研究領域他からも出展し、議論を深めた。

【ナノテクノロジー・材料】

[情報担体] 情報担体を活用した集積デバイス・システム

[熱制御] ナノスケール・サーマルマネジメント基盤技術の創出

【情報通信技術】

[コンピューティング基盤] Society5.0 を支える革新的コンピューティング技術

【終了領域】

[ナノエレクトロニクス] 素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成

【未来社会創造事業】 磁性を活用した革新的熱電材料・デバイスの開発

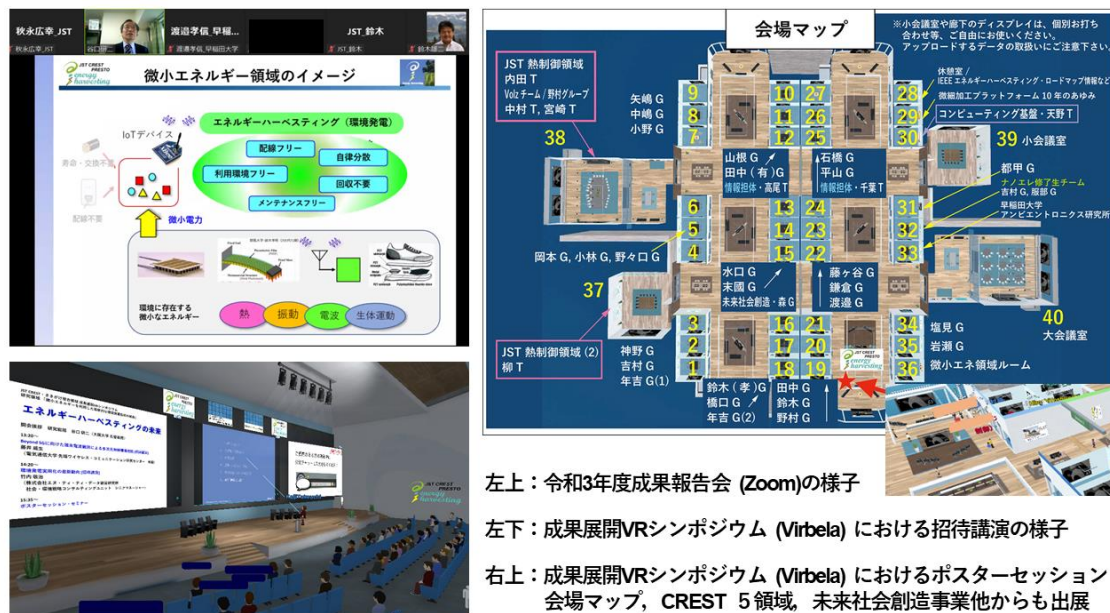


図 24. 令和 3 年度成果報告会・成果展開 VR シンポジウムの様子

(iii) アウトリーチ活動

表 18 の通り技術展示や技術相談会を開催して本研究領域の研究成果を企業関係者に伝えてきた。デバイスの実証を目指す後半フェーズでは、IT 技術とエレクトロニクスに関するアジア最大級の規模の国際展示会 CEATEC へ積極的に出展(含、オンライン開催時の動画配信)した。

表 18. 展示会

No.	日程	名称	会場
1	2017 年 2 月 15 日～ 17 日	nano tech 2017 国際ナノテクノロジー 総合展・技術相談会 ・ JST ブースに 2 件出展	東京ビッグサイト(東京)
2	2017 年 8 月 31 日～9 月 1 日	JST フェア 2017—科学技術による未来の産業創造展 ・ 4 件をデモ展示(振動発電)	東京ビッグサイト(東京)
3	2018 年 2 月 14 日～ 16 日	nano tech 2018 国際ナノテクノロジー 総合展・技術相談会 ・ JST ブースに 2 件出展	東京ビッグサイト(東京)
4	2018 年 8 月 31 日～9	JST フェア 2018—科学技術による未来の産業創造展	東京ビッグサイト(東京)

	月 1 日	・専用ブースを設置し、5 件のデモ展示	
5	2019 年 1 月 30 日～2 月 1 日	nano tech 2019 国際ナノテクノロジー 総 合展・技術相談会 ・JST ブースに 2 件出展	東京ビッグサイト(東京)
6	2019 年 10 月 15 日～ 18 日	CEATEC 2019 ・専用ブースを設置し、 7 件のデモ展示(振動発電)	幕張メッセ(千葉)
7	2020 年 10 月 20 日～ 23 日	CEATEC 2020 ・ヒトコネクションテクノロジー・オンラ インコンサート、5 件のバーチャル展示ブー スとプレゼンテーション	オンライン
8	2021 年 10 月 19 日～ 22 日	CEATEC 2021 5 件のバーチャル展示ブースと動画配信	オンライン
9	2022 年 10 月 18 日～ 21 日	CEATEC 2022 ・パートナーズパーク内に本研究領域のブ ースを設置し、振動発電、電波発電 3 チー ムからなる共同展示を行った。	幕張メッセ(千葉)

2019 年の CEATEC では、テクノロジーとアートの融合による感動を介して伝える試みを
(図 25 左)を行った。



図 25. 左: CEATEC で紹介した振動発電の応用としてダンサーによるデモを行った。
右: Youtube で配信している環境発電の宣伝動画

2020年には、「ヒトコネクションテクノロジー ～世界とつながる参加型オンラインコンサート～」(小野チーム)を、フランスの音楽グループ Pony Pony Run Run の協力を得て実現し、大きな反響が得られた。これらの動画を Youtube で配信した結果、新たな共同研究体制が構築され、CEATEC 2022 でのリアル展示に結実している。CEATEC 2022 では、内閣官房からデジタル田園都市構想の説明をいただき、その構想に応える展示を特設されたパートナーズパークにて行った。本研究領域ブースの共通テーマは「デジタル田園都市の公民館～やすらぎの場所～」とし、ウェアラブルセンシングによるスマート散歩/人とモノがつながるイベント駆動ディスプレイ/ヒトとヒトの繋がりを実感できる双方向型エンターテインメントの展示を行った。共通のデザインシンボルとして「蛍」を採用し、例えば、LEDを用いた電波発電の説明に努めた。その他、展示会場で、誤差 0.1℃の温度測定を実施しエネルギーハーベスターのみで長距離伝送を行う IoT センサー Beat Sensor の動作実験も行い、スマートフォンすら使いづらくなっている電波環境の会場でも問題なく動作することを実証した。

その他、特筆すべきこととしては、小野チームにおいては CEATEC での展示を重ねるたびに、システム設計技術が大幅に向上し、リアルタイム処理への道が開けたことが挙げられる。石橋チームに関しては、展示会準備における議論を経て、技術の成熟度が飛躍的に向上した。単なる研究成果の発表、普及、パートナー探しだけではなく、研究開発そのものの推進にも大きな効果が認められた。

本技術は、After/withコロナ時代において、たとえ人と人の触れ合いがサーバー空間を介したものであっても、その人間同士の心を共感でつなぐ「ヒト」コネクションを実現するものです。この技術は、社会における様々な分断が顕在化してきた中、ヒトの「芸術活動」を拡張することで、私たちの社会に Well-being をもたらすものになると信じています。心に孤独感や疎外感をお持ちの方、あるいは、視覚、聴覚、触覚に障害をお持ちの方であってもエンターテインメントに参加できる、そのような健康な社会を実現します。

4年間の
研究開発



(ver.2022)

CEATEC 2022
リアル開催

CEATEC 2019
リアル開催



ヒトコネクションテクノロジー
HUMAN CONNECTION TECHNOLOGY
(ver.2020)

CEATEC 2020
オンライン開催



(ver.2021)

CEATEC 2021
オンライン開催

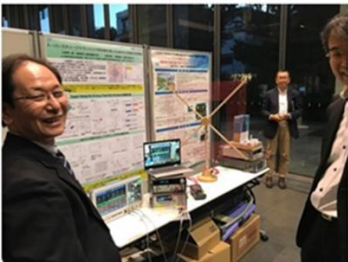
開発内容：AIを用いて動作種別や動作強度を判定するアルゴリズム。判別した結果を限りなく低パケットの動作情報に圧縮し、リアルタイムで情報を伝送する。

図 26. 小野チームにおける振動センシングシステム設計技術開発の推移。

展示会の機会活用
社会実装を推進するパートナーを見つけるだけでなく、
展示物を準備する過程で研究開発を大きく進展させる。



2.4GHz用メタマテリアルアンテナ:
小型 (4X30X66 mm), 高インピーダンス
(2 K Ω)を実現。金属板上での性能も確認
/2019.1 ナノテク展で展示



Cross Current 整流器を用いた、
AMラジオ波から発電/2018.10 領域公開シンポジウム

4年間の
研究開発



電波のエネルギーでホタルが光る・動く/2022.10 CEATEC
広報用電子パネル文章より抜粋:
電波のエネルギーを収集し、7色のLEDが光ったり、
電子ペーパーに表示された静止しているホタルが飛び立つ様子をお見せします。
開発したRFエネルギーハーベスティング技術は、
国内8つの企業と実用化に向けた共同研究を推進しています。

図 27. 石橋チームにおける電波発電研究の推移。

○オンデマンドセミナー「はじめての熱電変換」

開催日：2021年2月1日～3月14日

国際強化支援の一環として熱電変換の初学者対象にしたオンデマンドセミナー「はじめての熱電変換」を開催した。熱電変換やその関連技術に関する重要なトピックを網羅したセミナーで、世界中からアクセスがあった。

このセミナーで構築された国際的ネットワークをトリガーとし、欧州関係者からの依頼を受けて、熱電発電の分野の基礎から応用までを広く網羅した電子書籍を企画することになった。本報告書執筆段階において、ISTE Wiley SCIENCES “Thermoelectric generators” として最終校正の段階にある。



世界各国から、Webサイトにアクセス実績
(色が濃い程アクセス数が多い事を示している)

680名のご参加 (185人は海外30カ国より)

図 28. オンデマンドセミナー「はじめての熱電変換」の参加登録者の推移と地域分布。

(iv) 動画配信(Youtube)

日本熱電学会ゼーバック効果発見 200 周年記念動画コンテストにて最優秀賞を受賞した動画。

<https://www.youtube.com/watch?v=pBL-KV9fmrk>

<https://www.youtube.com/watch?v=na8cxXZBou8&t=6s>

「ヒトコネクションテクノロジー」に関する動画配信。

2019 年 CEATEC: <https://www.youtube.com/watch?v=7CVWJZTqe2U>

2020 年 CEATEC: <https://www.youtube.com/watch?v=8Tli330efQQ>

2021 年 CEATEC: <https://www.youtube.com/watch?v=jkaSiYZ9qmU>

2022 年 CEATEC: <https://www.youtube.com/watch?v=goHANwtfzr8>

(v) 主要な新聞・雑誌・テレビ等の報道

学術的な価値の高い新原理や新発見、実用化されると産業や社会に大きな変革をもたらす科学技術などについては、積極的に情報発信を奨励した。全期間で 40 件のプレスリリースを行った結果、下記の新聞・雑誌・テレビ等の報道に結実している。

日経エレクトロニクス

雑誌掲載：「一円玉大で 1mW 振動発電、液体使う新原理で 10mW も～エレクトレットと MEMS で実現、広い周波数振動を変換～」

2017年2月号(1月20日発行)、pp. 20-21.
日本経済新聞
「IoT向け極小電源発電」2017年4月21日
日経産業新聞
「東大と名大、内包物質を用いて単層カーボンナノチューブの熱伝導性を制御」2017年8月1日
北陸朝日放送
HAB スーパーJチャンネルのニュース内で振動発電を紹介 2018年2月9日
日経産業新聞
「微小電子素子で熱を電気に 早大など5年後メド技術確立」2018年6月20日
「磁気熱電効果が従来の10倍以上、環境発電に期待」2018年8月1日
北國新聞
「振動発電で工場設備監視 金大の上野准教授ら商品化推進 大学発ベンチャー」
2018年10月19日
日本経済新聞電子版
「東北大と金沢大など、Fe-Ga 単結晶の板材の低コスト量産製造技術を確立」2018年10月15日
日本経済新聞
「材料開発にAI革命」2019年2月17日
産経新聞
「経産大臣賞に鷺宮製作所・三屋さんら 先端技術大賞」2019年6月11日
朝日新聞
「電線つながなくてもLED光る 送電線の磁力使って発電」2020年11月16日
日本経済新聞
「ポリマー半導体の高性能化に向けた新たな分子デザイン手法を開発」2021年10月22日
日本経済新聞
「電子輸送性ポリマー半導体の高性能化に有望な π 電子系骨格を開発」2022年3月2日

⑤人材輩出と研究継続に向けた国家プロジェクト(国プロ)への採択状況

(i)人材の輩出

- ・CRESTでは、研究開始時点で各研究代表者は教授、グループリーダーとして活躍していることもあり、研究代表者の昇進は中辻(准教授→教授)と李(主任研究員→研究グループ長)の2名だったが、チーム内ではCREST研究期間中の昇進22名(助教:10名、准教授:6名、教授:6名)があった。
- ・SU-CRESTでは、研究代表者の昇進は野村(准教授→教授)と李(グループ長→首席研究員)の2名、主たる共同研究者については、小林伸彦(准教授→教授、森チーム)、柳谷(准教授→教授、石橋チーム)、山田(准教授→教授、神野チーム)、田中(助教→准教授)の4

名の昇進があった。

・「さきがけ」では、1期生9名のうち3名が教授、1名が准教授、1名が講師に昇進している。2期生では9名中4名が准教授に昇進しており、若手研究者の育成の効果が認められる。

(ii) 研究領域終了後の国家プロジェクトへの採択状況

各チームが開発した環境発電デバイスの実用化に向けた民間企業との共同研究は数多く計画されているが、ここでは国プロに限定して、採択された環境発電デバイスの実用化に向けた研究課題をリストアップする。熱電、振動、電波発電の各技術分野で領域終了後も製品化に向けた技術開発が継続している。

・ 熱電発電

大規模型未来社会創造事業(2019～2029)に採択された森(CREST 1期生)の課題「磁性を活用した革新的熱電材料・デバイスの開発」に塩見(SU-CREST)、野村(SU-CREST)、李(SU-CREST)が主たる共同研究者として参加し、本研究領域で開発した技術の実用化を目指す。

・ 振動発電

提案課題「グラニューール MEMS 振動発電」が 2022 年度 ACT-X 領域「リアル空間を強靱にするハードウェアの未来」[年吉チーム(SU-CREST)]、提案課題「自己バイアス式集積化 SAE-MEMS センサーの開発」が JST「A-STEP(育成型)」事業(2022～2025) [小野チーム(SU-CREST)]、提案課題「自立センサーノードのためのバイオミメティック汎用電源回路」が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「未踏チャレンジ 2050」事業(2022～2027) [小野チーム(SU-CREST)]、課題名「交流磁界と圧電素子による環境発電およびワイヤレス給電技術」が R4 年度の JST・START の起業活動支援プログラム [神野チーム(SU-CREST)]に採択されている。

・ 電波発電

課題名「完全ワイヤレス社会実現を目指したワイヤレス電力伝送の高周波化および通信との融合技術」が国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の Beyond 5G 研究開発促進事業(令和3年度)[石橋チーム]に採択されている。

⑥その他の特記事項

(i) 学会などの既存イベントを活用した特別企画の開催

- ・ 応用物理学会 Phonon Engineering G と JST「微小エネ」領域合同研究会
(2017年7月)
- ・ 応用物理学会エネルギーハーベスティング研究グループの発足 (2018年10月)
- ・ 応用物理学会春季講演会：シンポジウム
「エネルギーハーベスティングの新展開」(2019年3月11日)
- ・ 応用物理学会春季講演会でシンポジウム

- 「超スマート社会のためのエネルギーハーベスティングの発展」(2020年3月13日)
- ・応用物理学会春季学術講演会分科企画シンポジウム「ニューノーマル時代のDXを進めるIoT用創エネルギー材料・デバイス研究の新展開」2021年3月18日
- ・応用物理学会エネルギーハーベスティング研究グループ主催 オンラインセミナー「環境発電技術の最先端」2021年11月22日
- ・応用物理学会秋季学術講演会分科企画シンポジウム「エネルギーハーベスティングの新展開」2022年9月20日

(ii) 産業界や産業支援機関との連携企画

- ・一般社団法人電子情報技術産業協会(JEITA)との連携研究会
「IoT向けエネルギーハーベスティングの標準化に関する研究会」
開催日：2018年11月6日
「IoT向けエネルギーハーベスティングの動向と標準化セミナー」
開催日：2021年1月14日
- ・領域会議(表9. 領域会議一覧)を民間企業内で開催
見学会、若手研究者間のグループディスカッション等を実施

(iii) 論文誌に環境発電特集号を企画

- ・Science and Technology of Advanced Materialsのエネルギーハーベスト特集号
微小エネ領域関係者からの寄稿による特集号。
<https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1491165>
Review article 6報、Article 8報からなる。通常査読を経て出版された。
Review articleの内「Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation」は、Web公開から約1年(2019年12月末)で引用55回、Altmetric 43回、View 7,946回、約4年後(2022年12月15日)で、引用311回、Altmetric 88回、View 23,485回に達する等、大きなインパクトを与えている。この他にも、異常ネルンスト効果のレビューが引用77回、MEMS振動発電のレビューが61回、Siナノワイヤーの論文が30回他、数多くの良質な論文を輩出することができている。
- ・Applied Physics Letters Special Topics : Piezoelectric thin films for MEMS (2022年スタート)を企画。神野チームのメンバーが先導し、国際的なCo-Editor体制にて編集された。
<https://aip.scitation.org/toc/apl/collection/10.1063/apl.2022.PTFM2022.issue-1>

(iv) 領域ニュースレターの発行

本研究領域内の研究者に向けて、研究紹介、研究協力の声掛け、評価・計測技術の提供、成果応用例の紹介、卒業生便り、国際・国内会議案内、EH 関連の学会報告等の情報提供を目的として領域ニュースレターを発行した。2016年9月発刊以降、2023年3月(40号)まで続けた。領域内の情報共有等に一定の役割を果たした。

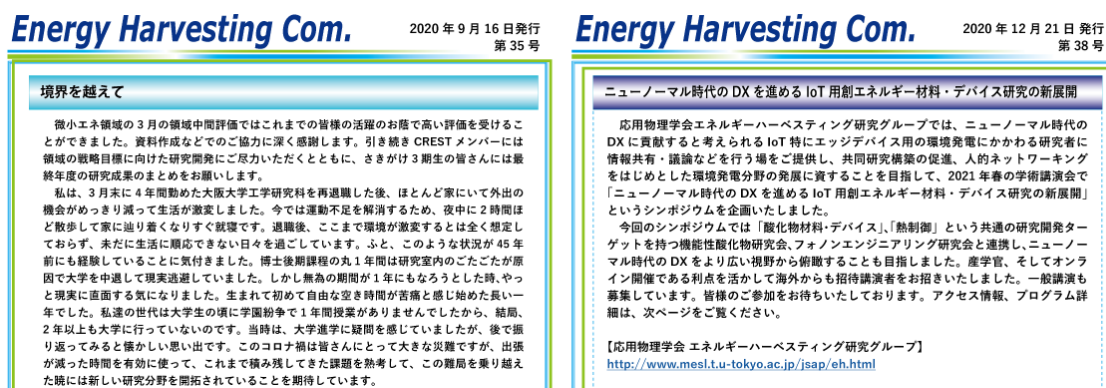


図 29. 領域ニュースレター (左)第 35 号、(右)第 38 号

(v)SciFoS(Science For Society)活動

JST がさきがけ研究者他、主に若手の研究者向けに提供しているプログラムで、「研究者自身が、研究成果を活用するエンドユーザーが誰か、何が研究成果に期待されるか、について仮説を立てた上で、関連する企業を訪問して仮説を検証。一連のプロセスにより、社会の中の科学という観点から自らの研究を振り返る機会を与える」活動である。SciFoS 活動の目的は、企業技術者との面談を通じて社会のニーズを知り、「出口」意識を持った研究をすることにある。一人当たり 2~4 社の企業を訪問し、インタビューを通して本人の研究の立ち位置を理解するのに役立っている。

本研究領域では積極的に SciFoS プログラムへの参加を勧めてきた。さきがけ研究者合計 12 名(1 期生 3 名、2 期生 5 名、3 期生 4 名)、CREST チームの若手研究者合計 5 名がこの活動に参加した。また、研究総括・副研究総括から訪問先企業紹介を行うという試みを行ってきた。JST のホームページに掲載されている報告書には、「IoT 関連エネルギー技術に対する関心の高さが確認できた」、「今後の研究のマーケット展開時の市場調査等に活用できる」、「学術論文からは見えにくい問題点を早期に把握することができ、その後の研究の道標になっている」、「NDA を締結し、共同研究の可能性を検討している企業がある」、「振動発電技術の応用先として玩具、エンターテインメント業界ともに強い関心があることが分かった」、「SciFoS 活動に別途時間を割くことは容易ではなかったが、労力以上の成果・知見・経験が得られた」などポジティブな意見が多くあり、研究者にも大変好評であった。

さきがけ研究者がすべて卒業した 2020 年以降も、コロナ禍のために企業訪問が難しい中、SciFoS 活動を継続して行ってきた。例えば、高橋(さきがけ)は、所属大学のある福島県に根ざした SciFoS 活動を実施した。リモートでの面談となったが、農業分野など身近なエン

ドユーザーを意識できる場合があった一方で、セットメーカーが別地域の場合にはエンドユーザーを想定することの難しさを実感したとのことであった。また、中嶋(CREST 主たる共同研究者)の SciFoS 活動では、例えば、聴覚に障害を持っている方に対して音楽を伝える方法等、その後の Well-being をも視野に入れた研究開発の展開を加速する経験が得られた。

(vi) さきがけ研究の水平展開

本研究領域のさきがけ研究者が中心となって、さきがけ事業を中心とした水平方向の人的ネットワークが構築されることを期待し、複数の「研究領域」にまたがった会合を企画した。より具体的には、半導体(「ナノエレクトロニクス」)や熱電変換材料(「微小エネルギー」)のように既に理論計算(「マテリアルズインフォ」)の恩恵を大きく受けているテーマをはじめとして、超伝導・スピントロニクス・イオニクス・表面界面のように計算手法のさらなる発展が待たれるテーマ(「超空間」、「元素戦略」、「相界面科学」)まで、横断的に議論を行う「ポスト新機能物質開発のための戦略会議」を2017年11月14日～15日に開催した。

(vii) 新型コロナウイルス感染に関する追加研究

表19に示すようにJSTの「新型コロナウイルス感染に関する研究」募集に応じた4課題がすべて採択され、総額4000万円で1年間の研究を行った。

- ・腕装着型の電池レス超音波距離センサーとスマートフォンから構成されるソーシャルディスタンス・アドバイザーの間での距離情報をクラウドに上げるシステムを開発
- ・ScAlNのジグザグ積層薄膜共振器を使用した抗原抗体反応検出センサーを開発し、民間企業と実用化に向けた共同研究に発展などの成果が得られた。

表19. 新型コロナウイルス感染に関する追加的研究

・CREST

研究チーム	研究者	研究課題
鈴木チーム	鈴木 雄二	Social distancing 維持のための電池レス・ウェアラブルアドバイザーの開発
石橋チーム	柳谷 隆彦	COVID-19 に対する横波モード傾斜配向 ScAlN 薄膜を用いた抗原抗体反応検出センサーの開発
神野チーム	神野伊策、前中一介、山田智明、吉村 武	COVID-19 の感染拡大防止に向けた所在追跡システムの開発

・さきがけ

研究者	研究課題

田中 有弥 山根 大輔	COVID-19 の感染防止に資する自己組織化エレクトレット マスクの開発
----------------	--

7. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメントについて

本研究領域の戦略目標を達成するため、課題の選考にあたっては、高い独創性・新規性、コラボレーションの可能性、提案者の明確な目的などを重視した。採択した CREST チームやさきがけ研究者は、研究総括・副研究総括・領域アドバイザーによる面談・サイトビジットおよび本研究領域独自の研究自己管理表「おにぎり」を用いた研究指導により、採択時に少々曖昧だった研究課題や研究内容を明確にした。さきがけの各研究課題に対しては担当アドバイザーを指名し、サイトビジットのほか、適切な助言などの支援を行った。さらに毎年2回の CREST さきがけ合同領域会議を通して、さきがけ研究者とその研究分野の CREST チームとの交流が深まり、初年度から研究の相互乗り入れや共同研究を展開することができた。

CREST チームの若手研究者やさきがけ研究者には合同領域会議などで CREST とさきがけの壁を越えた研究協力を強く要請し、研究成果の横方向展開を推し進めた結果、①異なる研究分野を専門とする研究者間での相互理解を深めて本複合領域の戦略目標を共有し、②各研究者が自らの立ち位置を環境発電全体の中で理解し、それを各自の研究に反映することができるようになったと考えている。

運営側の立場からの研究者間の相互協力を深める方策としては、(1) 共同利用可能な装置の購入などに研究経費を優先配分し、装置を介した研究領域内の共同研究を促し、(2) CREST チームの若手研究者・学生とさきがけ研究者などが積極的に交流できる CREST・さきがけ合同領域会議(合宿形式)を開催、(3) 領域メンバーの相互理解を深め、試料提供、試料作製や計測評価などの研究協力に関する情報を相互に提供すべくニュースレター(計40回)を発行、(4) テーマ別国際シンポジウムや領域会議ではポスターセッションなどで CREST チームの若手研究者(含大学院生)の発表の機会を与えて「若手研究者の見える化」を図る、などの配慮をした。

後半フェーズの SU-CREST 研究課題の募集では、「本研究領域が目指す革新的な基盤技術の創出に向けて、各研究課題が前半フェーズで創出した基盤技術を元に、研究領域内外の研究チーム及び研究者(CREST、さきがけを問わず)が相互に協働し、“異分野横断”や“相互補完的”な連携をした新たなチーム体制を構築し、課題解決に取り組む研究提案を期待します。」と SU-CREST の目的を明確に示した。採択審査の結果、前半フェーズの CREST チーム13 課題から最終的に 10 課題が残った。しかも、この中にはさきがけ研究生が立ち上げた 3 チームが含まれている。

採択課題に対しては、研究総括、及び、副研究総括の強い統率の下、「利用価値のある基礎研究」として、産業界との連携(協働)につながることを視野に入れた発展・強化に取り組むよう指導した。研究の成果については、民間企業などの技術革新につなげるため、一般公開の成果報告会を2019年以降、毎年実施した。

上記の通り、研究課題選考の配慮、複合領域の特徴を生かした運営、各種会議やアドバイザーによる助言などを通じた成果最大化に向けた取り組みや原著論文の発表、招待講演、さらには報告会などによる研究成果の展開を通じて科学技術の進歩に貢献したと考えている。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本研究領域では、論文誌に掲載された論文数は947件(内 CREST 692件、さきがけ 255件)、招待講演数1,069件(内 CREST 798件、さきがけ 271件)、特許出願数198件(内 外国出願 51件(内 CREST 126件(内 外国出願 35件)、さきがけ 72件(内 外国出願 16件))、のように科学技術への貢献として高い研究成果が得られた。

本研究領域の戦略目標は下記の3つのポイントに絞られる。

- ① 基本的な原理の解明や新物質・新構造デバイスの創製
- ② 基盤的解析・設計技術や理論的アプローチを含めた研究
- ③ 現在ある原理や変換材料を凌駕する環境発電の創出

さきがけ研究では①～③のいずれか1つ、CREST チームには①～③のすべてを含む研究を奨励してきたこともあり、いずれの項目においても数多くの研究成果が得られた。以下に各項目における特に顕著な研究成果をリストアップする。

- ・「基本的な原理の解明や新物質・新構造デバイスの創製」に該当する研究成果

野村(さきがけ)は、新しい学理「熱フォノンクス」の構築と並行してフォノンエンジニアリング(熱伝導制御)の新技术分野を開拓した。また、中辻チームは異常ネルンスト効果を熱電発電に利用する研究を行い、「トポロジー」の概念がエネルギー分野でも適用できることを示した最初の事例として評価される。

- ・「基盤的解析・設計技術や理論的アプローチを含めた研究」に該当する研究成果

年吉チームは、機械振動系と電気回路系の連成モデルを用いた振動発電の等価回路を構築し、発電デバイスの電力取り出し効率を最大化する設計手法を明らかにした。また、鈴木チームは、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、世界最高の表面電荷密度のポリマー・エレクトレット膜を開発した。この機械学習を用いたポリマー・エレクトレットの探索法は、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。

- ・「現在ある原理や変換材料を凌駕する環境発電の創出」に該当する研究成果

塩見チームは、薄膜基板に切り込みを入れて立体的に折り上げる切り紙巴型構造の優れた伝熱ヒートシンクを考案し、性能指数 $ZT=0.1$ の熱電材料でも温度センサーデータの無線送信が可能であることを実証した。

さらに開発したエネルギーハーベスターの社会実装に関しても、上野チームが振動デバイス構造の特許を基にベンチャー企業 V-Generator を立ち上げ、年吉チームは、MEMS 振動発電素子のエレクトレット形成手法および MEMS 設計・製作手法を株式会社鷺宮製作所に技術移管して 2023 年度の事業化に向けて製造ラインの整備を進めている。また、本研究領域に参画した各チームとも研究の成果が企業との多数の共同研究へと進展しており、本研究領域で開発された技術が社会実装されることが期待される。

上記の通り、学理追及型の基礎研究に基づく科学技術進歩への貢献ならびに各チームが開発した実証デバイスの有効性から判断して、当初設定した戦略目標は確実に達成されたと考える。

(3) 本研究領域を設定したことの意義

本研究領域が設定された 2015 年頃は、「数年後には年間 1 兆個ものセンサーが使われる時代(“The trillion sensor universe” : 2013 年 3 月提唱)になる」との発表を疑問視する人の数が多かったが、第 5 期科学技術基本計画(2016 年度～2020 年度)の中で「サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会」(Society 5.0)では IoT 技術が重要な基盤として位置づけられたことで、“The trillion sensor universe” も夢物語ではなくなってきた。2022 年に閣議決定されたデジタル田園都市国家構想の中では、少子高齢化、過疎化(東京一極集中)、地域産業の空洞化の問題を解決するためのハード・ソフトのデジタル基盤整備が進められる。ここでも人間の手を介さない各種データの自動収集のための IoT 技術が重要な鍵となる。Society 5.0 のビッグデータの源泉である IoT 技術への期待が高まる中、IoT ネットワークを支える基盤であるエネルギーハーベスター関連の研究領域に取り組んできたことは、時代の流れからは必然であったと言える。

IoT システムでは各種センサー、エッジ情報処理、データ通信などを行うための電源が必要であり、系統配電、使い捨ての一次電池、蓄電機能のある二次電池、エネルギーハーベスターなどが用途に応じて選択されて使用されることになる。これに関連して、EU では 2020 年の 3 月に「循環型経済行動計画」、12 月は「バッテリー規制改正案」が発表された。ポータブルバッテリーの回収とリサイクルが重要項目とされ、回収率の目標は 2023 年度までに 45%、2030 年までに 70%、さらに将来的に一次電池の使用を段階的に廃止する方向性も出されている。

少子高齢化社会の中で、電源配線の煩雑な工事やバッテリー交換/充電の煩わしさの解消(人件費削減)のため、将来的には IoT センサーネットワークはバッテリーレスに軸足が移るものと思われる。なお、本研究領域において研究が進められたエネルギーハーベスターは他分野にも広く転用できる共通基盤的なものでありその波及効果は目に見えない領域にまで及ぶものと期待される。

(4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

NEDO の報告書「エネルギーハーベスティング技術の用途の特定と市場動向・技術開発動向に関する分析」によれば、バッテリーレスセンサーシステムの市場として、2030 年には、①ホームセキュリティ 4.1 億個（ドア閉め忘れ検知、高齢者の行動把握）、②電力・都市ガス 0.77 億個（送電線やパイプラインモニタリング）、③宅配・運送 0.25 億個（配送の質向上、クール配送の環境モニタ）などへの導入が考えられている。現段階ではバッテリーレスのエネルギーハーベスターは限定的に使用されているが、最近のエネルギーハーベスターに対する期待の大きさから、実用レベルに近いハーベスターから順次、社会実装に移ると考えられる。これを受けて IEC (International Electrotechnical Commission) ではエネルギーハーベスター国際規格 (IEC-62830-1~7) が発表されている。また、自己給電ワイヤレス デバイス用の無線規格 (物理層 1) に関しても、500 社の会員企業から構成される非営利団体 EnOcean Alliance では、ISO/IEC 14543-3-10 (ヨーロッパ) 14543-3-11 (北米と日本) の使用を決定するなど、エネルギーハーベスターの社会実装への (道筋) 枠組みが概ね固まりつつある。

今後、新たに開発されるエネルギーハーベスターもこの世界の潮流の中で使われていくことになるが、その中で我が国の存在感を高めるには、①環境エネルギーの取込み機構、②エネルギー変換材料、③電力変換回路、などで世界最高レベルの技術開発を行い、発電量で差別化することが重要である。本研究領域では、項目①では高インピーダンスアンテナ (石橋グループ) や構造物の共振周波数変動に適応する動的制御法 (年吉グループ) を開発、項目②では過去 100 年もの間、熱電材料として君臨してきた Bi_2Te_3 に匹敵する性能の熱電材料の開発 (李グループ)、世界最高電荷密度のエレクトレット開発 (鈴木チーム、年吉チーム)、項目③では超低消費電力のコンバータの開発 (小野チーム) やサブ μW プロセッサの開発 (石橋チーム) に成功しており、今後、これらの技術を民間企業に移転するなどして、我が国の産業に貢献できるものと考えている。

さらに本研究領域がカバーする技術範囲を電池代替品の開発から IoT センサーシステムの応用まで広げると、極低消費電力の無線方式やデータ通信量を減らすための AI エッジ処理などが重要な課題になる。なかでも最大のボトルネックは無線通信で要求される mW 級の電力である。安全性の高い通信規格は、必然的に大電力となるが、これがエネルギーハーベスターの普及の足枷となっている。局所的な領域 (閉じた空間: 電磁遮蔽された工場や製造装置内など) での無線データ転送であれば、安全性を緩めた無線通信方法も可能である。また、送信頻度が低い場合には、ノイズに埋もれたデータでも復元可能な CDMA 通信なども考えられる。これらの極低電力無線通信技術が実用化すれば、エネルギーハーベスターの市場も大きく拡大すると期待できる。

さらに、本研究領域での研究の過程において、上で述べた電池の代替品としてのエネルギーハーベスター以外にも様々な利用方法があることも分かってきた。元々、エネルギーハーベスターには電力取得を兼ねたセンサーが備わっていることから、ある事象が発生したこ

とを知らせるイベント駆動型のデバイスでもある。例えば、燃え尽きることが前提の火災報知センサー（渡邊チーム）、橋梁の共振周波数の変動を感知して警告信号を送信するシステム（年吉チーム）、無線の問い合わせに応じてセンサー情報を伝える Back scatter 通信システム（石橋チーム）、既定の電力が蓄積される度に出す信号の頻度から故障を推定するシステム（小野チーム）など。これらは単なる電池代替品の開発に甘んじることなく、環境発電の応用にまで目を向けたイノベーションにも精力的に取り組んだ成果でもある。

本研究領域では数多くのエネルギーハーベスターの試作品（POC）による発電性能が実用に供し得る水準にあることが示されたが、これらのデバイスを実社会に実装するには、歩留まりの確保、コストの低減や信頼性向上などがあり実用化までには時間がかかるものも多い。今後、民間企業の協力を得てこれらの課題を克服しなければならない。一方、視点を変えると、インフラモニタのように厳格な信頼性がなくても使用できる応用もある。例えば、エンターテイメント会場でライブがある時にだけ使用し、その後は廃棄するようなエネルギーハーベスターもあり得る。実際、2022年 CEATEC（展示会）では毎日放送の協力の下で振動発電デバイスのエンタメ応用（小野チーム）を示すことができた。このような信頼性要求の緩い応用から始めて最終的にはインフラ系モニターにも使える高い信頼性のエネルギーハーベスターの上市を狙う展開も考えられる。

（5）所感、その他

本研究領域活動開始時には、エネルギーハーベスティングという学術分野が顕わには存在せず、実社会におけるハーベスターの市場は小さく、かつ電池による代替が可能と考えられていた。それでも本研究領域が JST 戦略的創造研究推進事業として開始され、研究計画変更を可能とする柔軟性、特に、「利用価値のある基礎研究」を推進する新しいステップアップ制度を取り入れた運営がなされたことにより、昨今の急激なエネルギーハーベスティング分野の勃興に先んじて、我が国の研究基盤強化を図ることができた。本研究領域は、奇跡とも思われる未来予測の成功例として記録されるべきものと考えている。その具体的な経緯を以下に述べる。

【研究領域開始時の困難】

本研究領域に係る戦略目標は、「我が国の強みを活かし、微小エネルギーの高効率変換・高度利用に資する革新的なエネルギー変換機能の原理解明及び新物質・新デバイスの創製等の基盤技術の創出に取り組むこと」にあった。よって、「新原理の解明及び革新的な物質・デバイスの創製」や「理論及び基盤的解析・設計技術の開発」を想定して、CREST、さきがけの採択がなされた。一方で、振動、熱、スピン、電波他、様々なエネルギー源から電気エネルギーへの変換を行う研究は、大学においては機械工学から応用化学ほどの広がりがあり、同じ振動発電においても発電量の定義が異なる程であって、領域会議を行っても共通言語を見出すことができないほどであった。しかしながら、本研究領域では、「For What」を意識した領域運営を行い、戦略目標達成の向こう側にあるユースケースを想定した基礎研

究を実施した。また、CREST・さきがけの境界を設けず、研究領域内全ての研究者の対話を徹底的に促した結果、加速資金で設置した評価装置の共通利用を介した相互理解や、ユースケースを想定した必要発電量を満たすためのKPI設定などが自発的になされた。そして、本研究領域の参画者が中心となって、2018年4月の早稲田大学アンビエントロニクス研究所の設立や、同年10月の応用物理学会・エネルギーハーベスティング研究グループの設立などがなされた。

【ステップアップ評価の実施】

本研究領域における制度上の最大の特徴が、融合加速方式「ステップアップ評価」であることは間違いない。前半フェーズの領域運営と並行して、この制度設計を進めた。領域開始時から、この後半フェーズは「革新的な新原理、新物質、新デバイスの検証・実証に向けて、これらの中から有力と判断される基盤技術の集積や応用先の開拓等に取り組む期間」とされていたものの、実際に、何を指標として、実施されている研究テーマの取捨選択や融合加速を進めるのか、その具体的な検討を重ねた。そして実際の「ステップアップ評価」では、融合加速の効果が期待されるだけでなく、基礎研究であっても利用価値やFor whatに向けた伸び代が期待できるかを含めて審査を行った。その結果、学術的に極めて優れた成果を輩出していたり、あるいは社会実装がスタートしつつあったにも関わらず、結果として採択を行わなかった事例がでるにいたり、きっとご理解いただけると信じて、断腸の思いで本方式による絞り込みを行った。さらに、当初は想定されていなかったこととして、内示後、正式契約に移行するまでの期間に、研究開発計画の作り込みを行ったことが、後半フェーズの領域運営を進める上で功を奏したと考えている。チーム内におけるグループの配置換えすら行った。本当にこれで良かったのか？その判断は難しいが、ステップアップ評価で高評点であったチームは全て、最終的な事後評価時にも高評点であったことから、この融合加速方式は有効に機能したと考えている。

【微小エネルギー領域のなしたインパクト】

研究分野が広範囲に広がっていたことから、領域アドバイザーの方々も、様々な分野からご参画いただいていた。一方で、そのようなメンバー構成であったからこそ、領域会議の機会などを利用して、研究開発だけではなく、領域運営に関するご意見も伺ってきた。最も印象的であったご意見は、「市場が小さいから研究しないと言われることも多いが、実は小さいからこそ研究する価値があるはず。エネルギーハーベスティングが研究領域になっただけでもすごいことであった。また、柔軟性を取り入れた新制度(ステップアップ評価のこと)がなかったら、エネルギーハーベスティング分野の立ち上がりには対応できなかった」という主旨のものであった。確かに、「微小エネルギー」領域中間評価報告書においては、「現時点の市場は小さく、電池による代替も可能と思われる。社会的・経済的インパクトについて、世の中が変わる期待感を得るには、新たな市場形成を待つ必要があると思われる。」という指摘がなされていた。また、SciFoS活動においても、2018年頃は、「電池で代替できるので、ハーベスターは不要」と言われてしまうことがあった。しかしながら、2020年

12月にEUで循環型経済に向けたバッテリー規制の改正(Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, ~)が提言され、2022年には6G(第6世代移動通信システム)の開発を目指すNext G Allianceの白書において、6G時代におけるエネルギーハーベスティング技術の重要性が指摘されるなど、世の中がエネルギーハーベスティング技術を必要とするようになってきた。その他、NEDO技術戦略研究センターレポート「自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて(2021年2月)」においても自律分散社会を実現する技術としてエネルギーハーベスティングにスポットライトがあたり、ISO IWA 39:2022「Gap analysis for standardization on sustainable and human-centred societies enabled with cyber physical systems」においても、時に相反してしまう複数のSDGs目標達成を両立させる技術としてエネルギーハーベスティングが特記されるに至っている。まさに、本研究領域は、先見の明によって実現したのであり、領域設定にたずさわった方々に深く感謝している。

【エネルギーハーベスティングが実現する社会像】

平成27年度戦略目標にて想定されていた社会像は、「IoT、ビッグデータの活用による次世代型の環境保全・ものづくりが実現している社会」であった。先述の通り、その後の社会情勢の変化により、デジタルトランスフォーメーション(DX)に加えて、グリーントランスフォーメーション(GX)が喫緊の全世界的な課題となっており、戦略目標における「環境保全」や「ものづくり」は、より広い概念としてとらえるべきものとなった。一方で、社会におけるWell-beingの視点も重要性を増すばかりである。本研究領域では、領域運営の中で、研究実施者、研究アドバイザー、JST関係者、そして研究領域外の方々との意見交換を進めてきた。2021年度第2回合同領域会議では、「環境発電技術の将来～Beyond 微小エネ領域～」というタイトルで集中的に議論を行い、その結果が図30のようにまとめられている。リアルIoT空間とサイバー空間とを健康的に接続する基幹技術としてエネルギーハーベスティングが発展していく未来を見据えたものである。図中には、上記社会課題の解決に向けたビジョンだけではなく、より具体的に、重点的に研究開発を進めるべき「知覚学習ロボティクス」等のターゲットや新しい研究開発の手法なども示されている。本研究領域が耕した土壌から芽生えた研究や人的ネットワークが、各方面で育ち、大木となって私たちの未来を支えるものとなることを願っている。

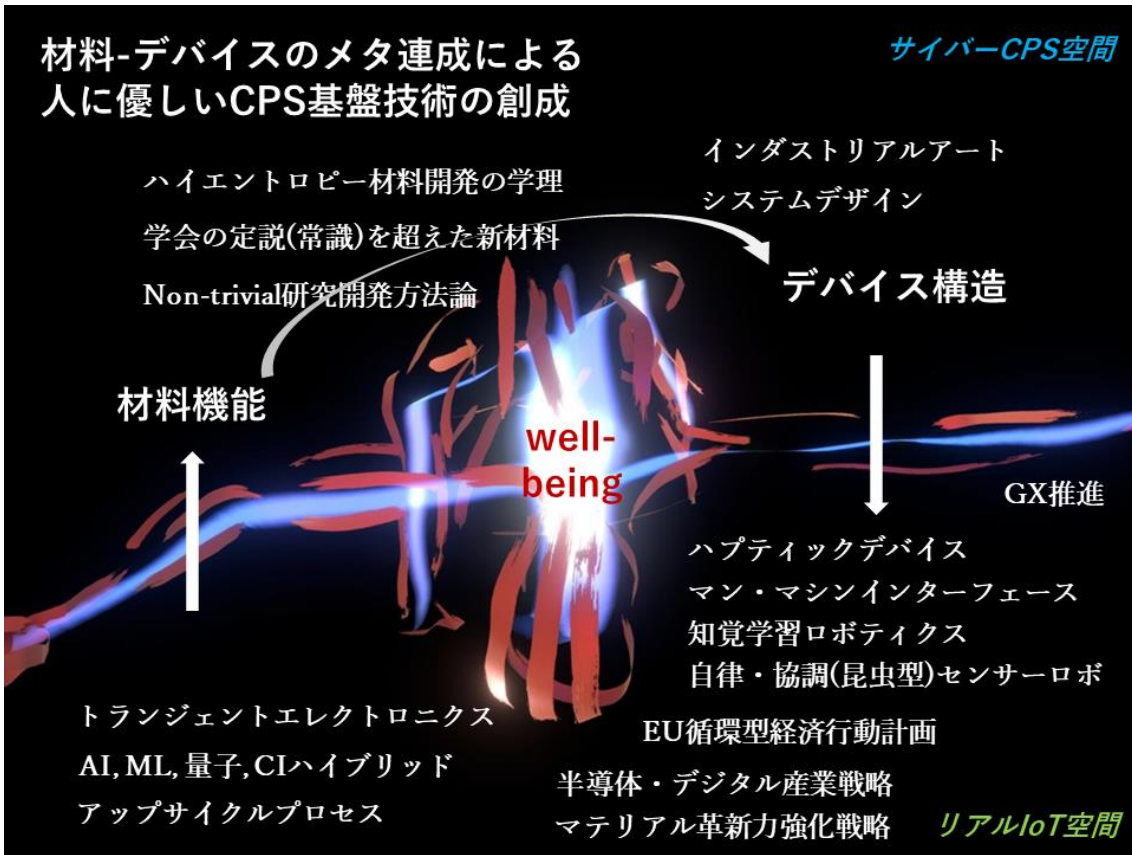


図 30. 2021 年度領域会議で取りまとめられた
「環境発電技術の将来 ～ Beyond 微小エネ領域 ～」

以上