

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」

複合領域中間評価用資料

研究総括: 谷口 研二

副研究総括: 秋永 広幸

2020年1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
④ 具体的な研究例	2
⑤ 国内外の研究動向	2
⑥ 検討の経緯	3
⑦ 閣議決定文書等における関係記載	3
⑧ その他	4
(2) 研究領域	4
(3) 研究総括・副研究総括	5
(4) 採択研究課題・研究費	6
① CREST	6
② さきがけ	9
2. 研究総括のねらい	14
(1) 本研究領域の対象とする技術分野	14
(2) 研究分野に応じた研究の指導方針	16
(3) 研究進捗管理に向けた「おにぎり」の活用	18
3. 研究課題の選考について	19
(1) CREST	19
(2) さきがけ	20
(3) 複合領域として	22
4. 領域アドバイザーについて	22
5. 研究領域のマネジメントについて	24
(1) 研究進捗状況の把握の時期	24
(2) 研究の進め方について	31
① CREST	31
② さきがけ	32
③ 複合領域として	32
(3) 研究費配分上の工夫	39
(4) 研究成果の発表	40
(5) CREST チームのステップアップ評価について	42

6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	49
(1) 研究総括のねらいに対する研究の状況.....	49
①CREST .....	49
②さきがけ .....	55
(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果.....	65
①CREST .....	65
②さきがけ .....	65
(3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献.....	66
①技術的な観点からの貢献.....	68
②科学的な観点からの貢献.....	70
(4) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献.....	70
(5) 顕彰・受賞 .....	71
①CREST .....	71
②さきがけ .....	73
(6) その他、主要な新聞・雑誌・テレビ等の報道.....	74
(7) 今後の期待や展望.....	75
(8) 複合領域として .....	75
①アウトリーチ活動.....	75
②人材輩出や成長の状況について.....	76
③その他の特記事項.....	76
7. 総合所見 .....	78
(1) 研究領域のマネジメントについて.....	78
(2) 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況.....	80
①振動・圧電発電.....	80
②熱電発電 .....	81
③電波発電 .....	81
(3) 本研究領域を設定したことの意義.....	82
(4) 今後への期待や展望.....	82
(5) 感想、その他 .....	83

## 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。

#### ④具体的な研究例

(i)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

熱、光、電波、振動、生体やフォノン、スピン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本的な原理の解明を行い、従来の特性や機能を飛躍的に凌駕する、優れた物性を有する新物質・デバイスを創生する。具体的には、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及びそれらを活用した新物質の創製や、無機化合物や有機化合物または無機・有機ハイブリッド化合物による機能性物質の創製、環境負荷の軽減を考慮した革新的なエネルギー変換に資する新物質の創製等を行う。

(ii)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

新原理の解明や革新的な材料創製のために必要な、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)の解析基準や新しい解析技術を創出する。具体的には、新原理・新物質創製に貢献する理論計算・計算機シミュレーション手法の確立や、新原理や新物質に基づいた革新的なデバイスの原理や設計指針の創成を行う。また、2つのエネルギー形態(例えばフォノンとスピン流の輸送)を独立に制御するなど相互作用の制御や、電子とフォノン、マグノンとフォノンの分離による解析等を行う。

#### ⑤国内外の研究動向

(i)国内動向

我が国では微小エネルギーの活用に注目した大型プロジェクトは実施されておらず、研究投資は大幅に出遅れている。一方で、我が国は、強誘電体等の物理分野や熱電変換をはじめとした変換材料等の基礎的研究開発に強みを持っていることから、異分野の融合、基礎分野と応用分野の融合により、革新的技術を創出するポテンシャルを有している。

(ii)国外動向

欧州では、多数の微小エネルギーの活用に関連する事業が進行中である。2014年、英国ではエマージング・テクノロジー7分野に対し、4年間で5,000万ポンド(約89億円)のフ

ァンディングを決定している。7分野にはエネルギー・ハーベスティングが含まれており、ワイヤレスセンサーや自立電源等の商品化を目指している。また、米国では、2013年にFairchild Semiconductor、University of California, Berkley校等が、毎年1兆個規模のセンサーを使う社会を目指すプロジェクト「Trillion Sensors Universe」を立ち上げ、産学連携の取組が加速している。

## ⑥検討の経緯

「戦略的な基礎研究の在り方に関する検討会 報告書」(平成26年6月27日)に基づき、以下の通り検討を行った。

(i)サイエンスマップ及び科学研究費助成事業データベースを用いた国内外の研究動向に関する分析資料の作成

「サイエンスマップ2012&2010」(平成26年7月31日科学技術・学術政策研究所)及び科学研究費助成事業データベースにおける情報を用いて、国内外の研究動向に関する分析資料を作成した。

(ii)分析資料を用いた専門家へのアンケートの実施及び注目すべき研究動向の作成

「科学技術振興機構研究開発戦略センター」や「科学技術・学術政策研究所科学技術動向研究センターの専門家ネットワークに参画している専門家」に対し、作成した分析資料を用いて今後注目すべき研究動向に関するアンケートを実施した。その後、アンケートの結果の分析等を行い、注目すべき研究動向として「小型・分散型電源構築に向けた高効率エネルギー変換・利用に係る基盤的技術の創出」を特定した。

(iii)ワークショップの開催及び戦略目標の作成

注目すべき研究動向「小型・分散型電源構築に向けた高効率エネルギー変換・利用に係る基盤的技術の創出」に係る産学の有識者が一堂に会するワークショップを開催し、特に注目すべき国内外の動向、研究や技術開発の進展が社会的・経済的に与え得るインパクトやその結果実現し得る将来の社会像、研究期間中に達成すべき目標などについて議論を行い、ワークショップにおける議論等を踏まえ、戦略目標を作成した。

## ⑦閣議決定文書等における関係記載

(i)第4期科学技術基本計画(平成23年8月19日閣議決定)

付加価値率や市場占有率が高く、今後の成長が見込まれ、我が国が国際競争力のある技術を数多く有している先端材料や部材の開発及び活用に必要な基盤技術、高機能電子デバイスや情報通信の利用、活用を支える基盤技術など、革新的な共通基盤技術に関する研究開発を推進するとともに、これらの技術の適切なオープン化戦略を促進する。

(ii) 科学技術イノベーション総合戦略(平成 26 年 6 月 24 日閣議決定)

さらなるエネルギー利用効率の向上のため、熱と電気を併産するコージェネレーションの活用や、これまで利用されていなかった低温排熱等のエネルギーを活用する技術の向上に取り組む。

### ⑧その他

以下の関連する研究開発と本戦略目標下で行われる研究の連携を確保しながら、微小エネルギーの高効率変換・高度利用に資する基盤技術の創出及び成果の実用化を目指すことが重要である。

平成 23 年度戦略目標「エネルギー利用の飛躍的な高効率化実現のための相界面の解明や高機能界面創成等の基盤技術の創出」、平成 24 年度戦略目標「環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築」、平成 25 年度戦略目標「選択的物質貯蔵・輸送・分離・変換等を実現する物質中の微細な空間空隙構造制御技術による新機能材料の創製」の下で行われている一部の研究では、エネルギー変換・輸送に関わる基盤的科学技術の創出に取り組んでいる。また、平成 26 年度戦略目標「二次元機能性原子・分子薄膜による革新的部素材・デバイスの創製と応用展開」の下で行われている一部の研究では、トポロジカル絶縁体を用いたデバイス設計技術の創出に取り組んでいる。その他、平成 25 年度戦略目標「情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成」の下で行われている研究では、新機能性材料・電子デバイス・システム最適化を連携・融合することに取り組んでいる。

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)においては、「クリーンデバイス社会実装推進事業」(2014 年から 2 年間)が実施されている。この事業の目的は、省エネルギーに資するクリーンデバイス(環境発電デバイス等の省エネルギーに資する革新的デバイス)が、従来利用を想定してきた機器等だけではなく、様々な製品・サービスへと新規用途の拡大を図ることにより、省エネルギー効果を最大限に活用することであり、デバイスの実装・実証および信頼性・安全性や標準化・共通化の方針策定がターゲットとなっている。

センター・オブ・イノベーション(COI)プログラムにおいては、「さりげないセンシングと日常人間ドックで実現する理想自己と家族の絆が導くモチベーション向上社会創生拠点」等でナノセンシングデバイスの開発及び活用などに取り組んでいる。

## (2) 研究領域

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

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、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、従来の特性或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、また研究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)

大阪大学大学院工学研究科附属オープンイノベーション教育研究  
センター 特任教授)

秋永 広幸

(産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 総括研究主幹)

(4) 採択研究課題・研究費

①CREST

表 1. CREST 採択研究課題と研究費の一覧表

※2019. 11. 5 時点(万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 上段：中間評価時 下段：採択時	研究課題	研究費※
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 同上	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	16, 145
	勝藤 拓郎	早稲田大学 理工学術 院 教授 同上	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	15, 700
	鈴木 雄二	東京大学 大学院工学 系研究科 教授 同上	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	20, 875
	年吉 洋	東京大学 生産技術研 究所 教授 同上	エレクトレット MEMS 振動・トライボ発電	12, 711
	中辻 知	東京大学 物性研究所 教授 同上	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	16, 250
	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 同上	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	17, 924

	渡邊 孝信	早稲田大学 理工学術 院 教授  同上	計算フォノンクスを駆 使したオン・シリコン 熱電デバイスの開発	17,449
2016年度 (2016年 度～2019 年度)	石橋 孝一郎	電気通信大学 大学院 情報理工学研究科 教 授  同上	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	15,680
	大野 雄高	名古屋大学 未来材 料・システム研究所 教授  同上	超薄膜材料を用いた電 解液流体発電技術の創 出	16,000
	河口 研一	富士通株式会社 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  富士通株式会社 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	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	14,200
	神野 伊策	神戸大学 大学院工学 研究科 教授  同上	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	16,730
	塩見 淳一郎	東京大学 大学院工学 系研究科 教授  同准教授	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	22,155
	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  同主任研究員	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	15,410

2019年度 (ステップアップ 評価採択 課題)	鈴木 雄二	東京大学 大学院工学 系研究科 教授  同上	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	16,118
	年吉 洋	東京大学 生産技術研 究所 教授  同上	MEMS 振動発電を用いた パーペチュアル・エレクトロニクス	16,200
	野村 政宏	東京大学 生産技術研 究所 准教授  同上	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	20,000
	森 孝雄	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  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	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	12,300
	渡邊 孝信	早稲田大学 理工学術 院基幹理工学部 教授  同上	プレーナ型スケラブル熱電発電機構の実証 と展開	17,193
合計				299,040

②さきがけ

表 2. さきがけ採択研究課題と研究経費の一覧表

※2019. 11. 5 時点(万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 上段：中間評価時 下段：採択時	研究課題	研究費※
2015 年度	黒崎 健	京都大学 複合原子力 科学研究所 安全原子 力システム研究センタ ー 准教授  大阪大学 大学院工学 研究科 准教授	変調ドーピング高効率バル クナノシリコン熱電材 料の開発	4,000
	黒澤 昌志	名古屋大学 大学院工 学研究科 物質科学専 攻 講師  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	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	3,743
	鈴木 孝明	群馬大学 大学院理工 学府知能機械創製部門 教授  同准教授	柔軟な 3 次元微細構造 を用いたポリマー振動 発電	4,010
	野村 政宏	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  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	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	4,000

	藤岡 淳	筑波大学 大学院数理 物質科学研究科 准教 授  東京大学 大学院工学 系研究科 講師	トポロジカル半金属に おける熱・スピン起電 力の開拓	3,660
	藤ヶ谷 剛彦	九州大学 大学院工学 研究院応用化学部門 教授  同准教授	半導体性単層 CNT から なる熱電変換シートの 創製	4,020
	松野 丈夫	大阪大学 大学院理学 研究科 教授  理化学研究所 石橋極 微デバイス工学研究室 専任研究員	5d 電子系酸化物のス ピン流誘起熱電変換	4,340
	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  同上	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	3,920
	吉田 秀人	大阪大学 産業科学研 究所 准教授  同上	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	3,570
2016 年度	片瀬 貴義	東京工業大学 科学技 術創成研究院 准教授  北海道大学 電子科学 研究所 助教	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	4,000
	酒井 英明	大阪大学 大学院理学 研究科 准教授  同上	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	4,000

高橋 竜太	日本大学 工学部 准教授 東京大学 物性研究所 助教	メンブレン単結晶を用いた振動発電デバイスの創製	4,420
中嶋 宇史	東京理科大学 理学部 第一部 准教授 同講師	柔構造制御に基づく機能性圧電ポリマーの創製	4,477
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 同上	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	2,510
野々口 斐之	奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 助教 奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 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	4,000
村田 理尚	大阪工業大学 工学部 准教授 京都大学 化学研究所 助教	$\pi$ 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	4,010
柳谷 隆彦	早稲田大学 電気・情報生命工学科 准教授 同上	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	4,010
山田 智明	名古屋大学 大学院工学研究科 准教授 同上	強誘電体ナノ構造の分極操作による巨大圧電膜の創製	4,095

2018 年度	衛 慶碩	産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門 主任研究員  同研究員	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	4,010
	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  同上	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	4,861
	小野 新平	(一財)電力中央研究所 材料科学研究所 上席 研究員  同上	イオン液体ゲルによる 新奇メカノエレクトロ ニック変換の解明と応用 展開	4,550
	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  同上	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	4,010
	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 グル ープリーダー  同主任研究員	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	4,000
	田中 有弥	千葉大学 先進科学セ ンター 助教  同上	極性分子配向薄膜を備 えた新規振動発電器の 創生	4,106
	都甲 薫	筑波大学 数理物質系 准教授  同上	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	3,110

	矢嶋 赳彬	東京大学 大学院工学 系研究科 助教  同上	抵抗変化素子を活用し た環境発電用回路技術 の創成	4,230
	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  同上	多層エレクトレット集 積型 CMOS-MEMS 振動発 電素子の創製	4,098
合計				107,760

## 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ている。

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・運営を行う。

### (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対象としている。

#### 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。

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物質、磁性体、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っている。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。

### 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手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。この種の材料を対象とした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。

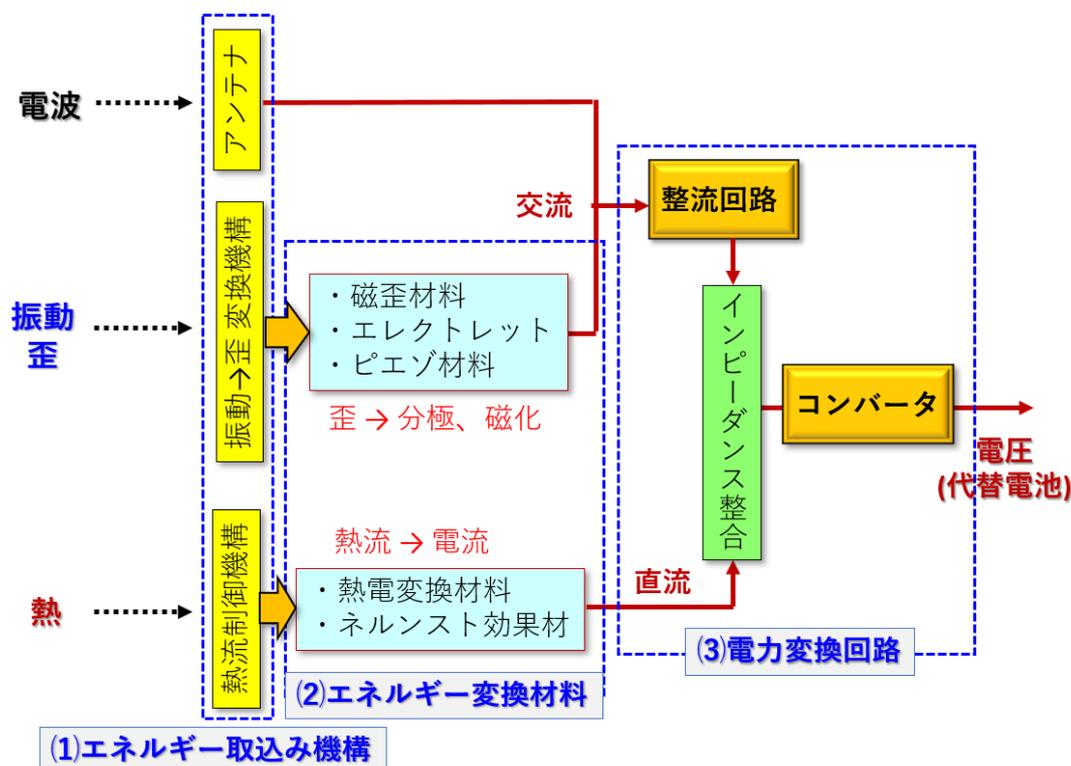


図1. 環境にある電波、振動(歪)、熱などのエネルギー源は、(1)エネルギー取込み機構、(2)エネルギー変換材料、(3)電力変換回路、を経て電力変換される。

上記の電波、振動、熱電発電以外にも、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も想定されるが、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、本研究領域の研究対象から除外した。

## (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ている。

## 材料研究分野の指導

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する。具体的には、物質の目標性能を達成するため、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、の活用を勧める。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の使用も積極的に取り入れるよう指導している。

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前向きな失敗例の報告を奨励している。

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いる。

## 設計領域の研究指導

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を用いて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て、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高くなり、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ファンドリーにデバイス試作を委託することも奨励している。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。さらにファンドリーで製造する特性ばらつきの少ない環境発電デバイスによって早期の社会実装が可能になるメリットがある。

### (3) 研究進捗管理に向けた「おにぎり」の活用

本研究領域では研究進捗の管理に図2に示す「おにぎり」を用いている。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いる。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になっている。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いる。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していく。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するようになる。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りつつある。

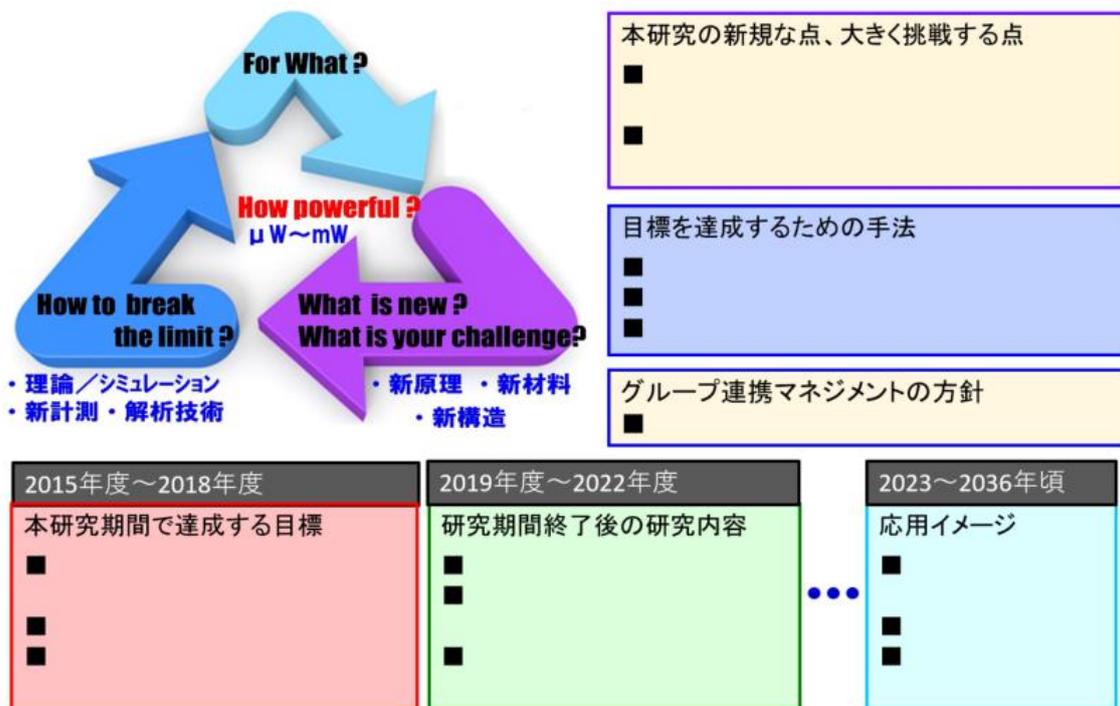


図2. 研究者自らが研究の位置づけを認識し、研究進捗を確認するために用いる「おにぎり」。領域会議や研究計画提出時などで繰り返し研究者自ら研究を振り返るために使用している。

### 3. 研究課題の選考について

#### (1) CREST

本研究領域では従来の複合領域の CREST と違って、CREST とさきがけの壁をほぼ完全に取  
り払った運営をすること、CREST の研究期間は前半フェーズと後半フェーズに分かれている  
こと、を認識してもらうため、CREST 研究課題募集の際に以下の募集要項(抜粋)に示す説明  
を加えている。そのポイントは

- ・ 研究期間は前半フェーズと後半フェーズに分かれていること
- ・ 後半フェーズに移行する際、研究総括・副研究総括の責任の下で研究課題の再編、強化し  
て、本研究領域の成果の最大化に向けた体制構築を行うこと  
にある。

表 3. 募集要項からの抜粋

#### ■ 研究期間と研究費

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。

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  
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。

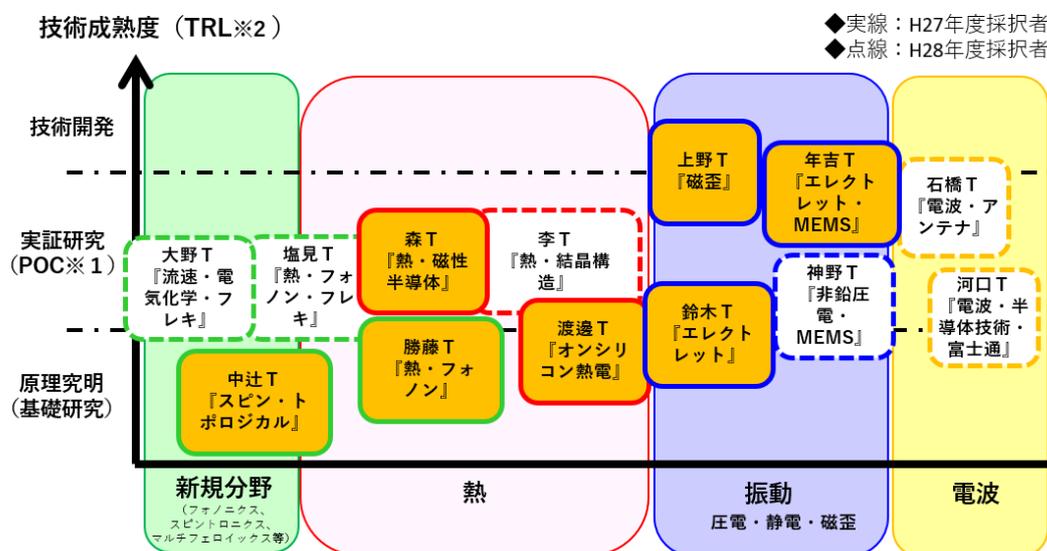
応募件数の年次推移は別添資料に記載した通り、2015年度41件、2016年度27件であった。書類選考では、各応募書類を3名の審査委員が専門の立場から、4段階(S, A, B, F)の評価を行った。また、独創性、新規性、優位性に加え、(1) 研究グループのシナジー効果(研究代表者のマネジメント力)、(2) シナリオ実現可能性も評価の視点に加えた。これらの審査結果をもとに面接対象者選考会で総括・副総括の領域運営の方針(特定の環境エネルギー発電に偏らない配慮)も考慮しながら最終採択件数の2倍程度の面接対象者を選出した。

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。

代表者の研究機関は大学が10チーム、国研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包含していることが分かる。

## CREST 採択課題 (13件)

H27採択1期生7件、H28採択2期生6件



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

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

### (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、サイエンスやテクノロジーの観点から環境発電に関する研究提案を募集した。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採択判断の基準とした。

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(目標達成にむけた道筋等から判断)、(3) 熱意(提案における、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。

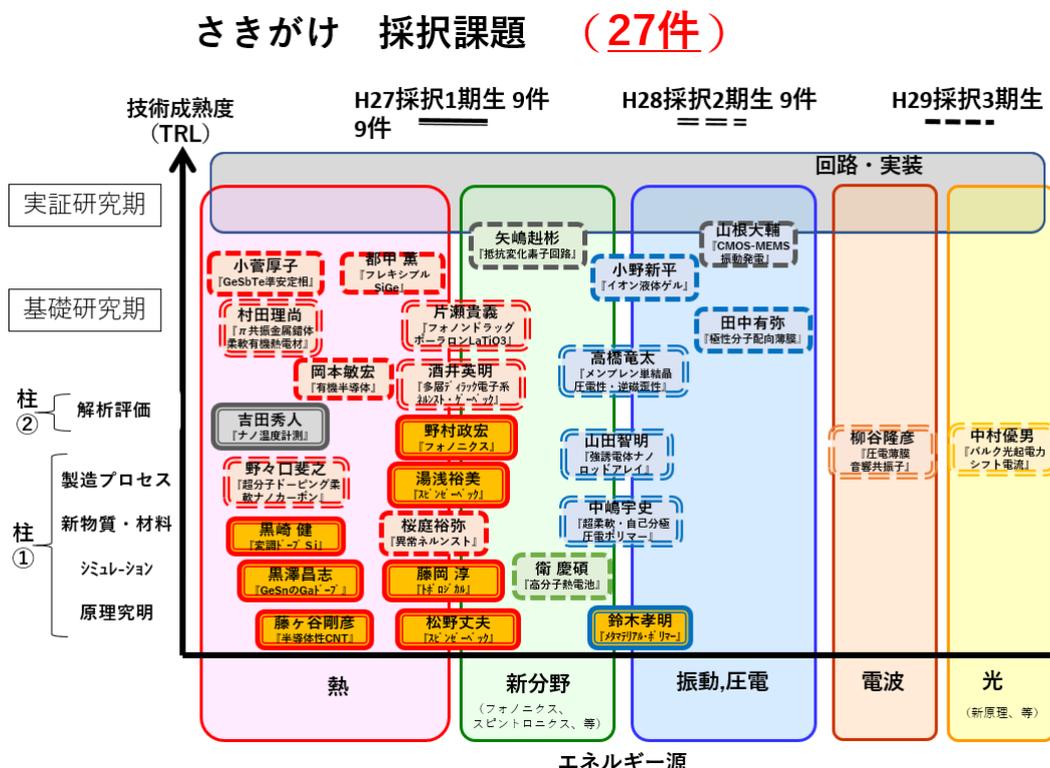


図4. さきがけ採択課題の技術成熟度(TRL)とエネルギー源の種類による分類

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名である。



図5. 採択されたさきがけ研究者の所属機関所在地(赤丸は女性研究者)

### (3) 複合領域として

本研究領域では、さきがけとCRESTの双方を合わせて一体的に運営する。CRESTとさきがけ双方の研究課題で、多岐にわたるエネルギー源(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。

過去3年間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

選任にあたっての考え方

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)、 piezo 材料(舟窪))に加えて、最終年度までに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研究者(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戦略コンサルタント(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。

表 4. 領域アドバイザー

領域アドバイザー名	終了時の所属	役職	任期
青合 利明	千葉大学 自然科学系教育研究機構	特任教授	2015 年 7 月～
大野 英男	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	東京大学 大学院工学系研究科	教授	2015 年 7 月～
篠原 真毅	京都大学 生存圏研究所	教授	2015 年 7 月～
白石 賢二	名古屋大学 未来材料・システム研究所	教授	2015 年 7 月～
高柳 万里子	東芝デバイス&ストレージ株式会社 技術企画部	参事	2015 年 7 月～
竹内 敬治	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～
藤田 博之	東京都市大学 総合研究所	教授	2015 年 7 月～
舟窪 浩	東京工業大学 物質理工学院 材料系	教授	2015 年 7 月～
宮野 健次郎	物質・材料研究機構	フェロー	2015 年 7 月～
山田 由佳	パナソニック株式会社 ビジネスイノベーション本部 事業開発センター	総括担当	2015 年 7 月～

領域の各アドバイザーはさきがけ研究者の担当も兼任し、研究指導や研究成果の社会実

装向けたアドバイスなどを行っている。

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	一期生	二期生	三期生
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 酒井 英明	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)	(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員については斎藤 AD が物性面、白石 AD が材料面で研究指導を分担。高橋研究員は台風洪水による被害のため、さきがけ研究を一年間延長して 3 期生の取り扱いも含めている。

## 5. 研究領域のマネジメントについて

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は変換効率、材料面の問題、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(一期生の場合、2015 年度～2018 年度)では多くの材料・技術の中から環境発電の可能性を探るため、特定分野に偏らない研究課題の採択を行い、研究の過程で対象とする材料や技術を絞り込む。プログラムの後半(2019 年度以降)は CREST のステップアップ評価を実施して、継続する研究課題に新メンバーを加えてデバイス実証に向けた研究を加速する方針で領域を運営する。

### (1) 研究進捗状況の把握の時期

採択研究課題の進捗管理については、①総括・副総括・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総括・副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ている。以下に示す図は上記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さきがけとCREST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、総括・副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ている。これらの結果、各年度の研究計画は、研究実施者と総括・副総括間の議論を元に、「作り込み」と「見直し」が繰り返されることになる。また、さきがけの評価会においては、発表前に、担当アドバイザーとの間で議論を行える期間を設けた。

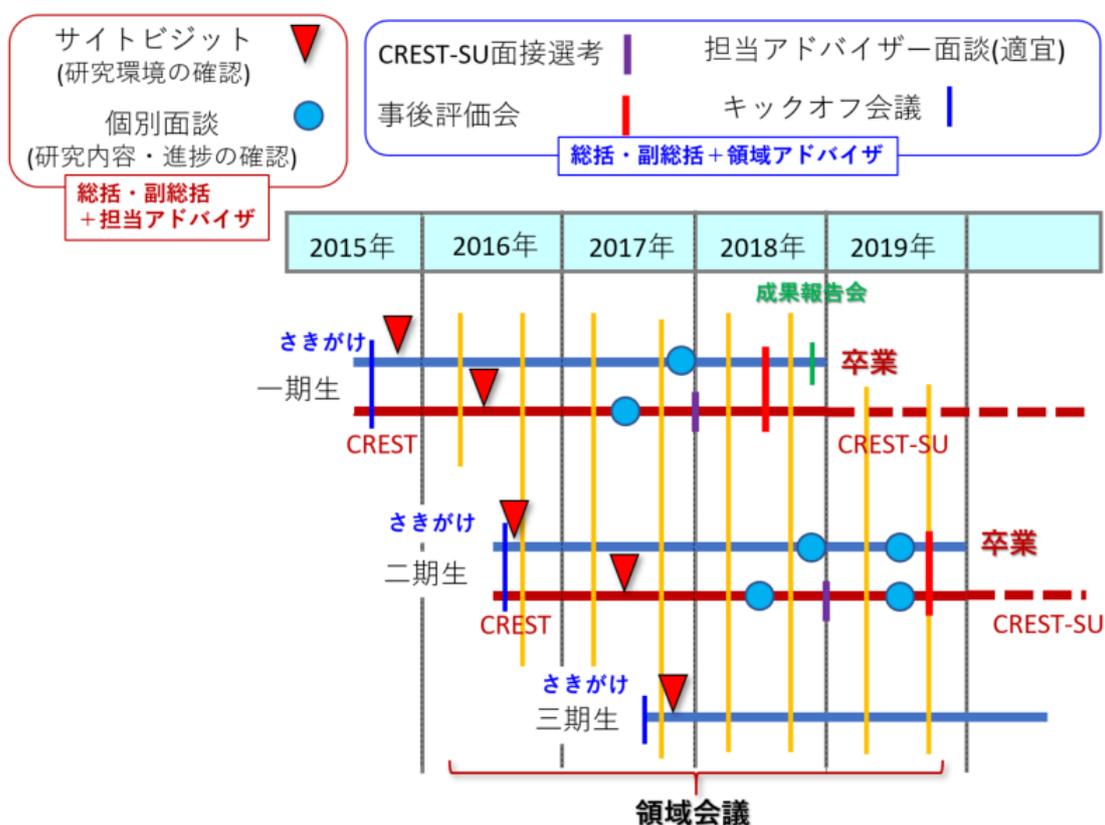


図 6. 研究者本人と議論できる形式の面談や会議の開催時期

まず採択課題の研究者(さきがけとCREST)は、キックオフ会議で採択研究課題の内容を紹介し、自己の研究を領域の全メンバーに公開する。その後のサイトビジット(参加者:研究総括・副総括、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「おにぎり」の記載項目に関する相談を受け、改訂に向けたアドバイスなどを行う。特に、さきがけ

研究者に関しては、研究開発に専念できる環境の整備を、所属機関関係者に対してご依頼することも行ってきた。その後は半期毎の領域会議で研究進捗を確認している。

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ている。

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 11 月 10 日	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 (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 月 15 日	柳谷隆彦	早稲田大学	秋永副総括、JST 笠井、JST 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
	2018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]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) 【見学会】 パナソニック株式会社 先端研究本部	・領域アドバイザー講演 －竹内敬治先生(NTT データ経営研究所)

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)

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)

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、上記③の提出書類審査による研究の進捗管理を併用している。図7は提出された研究計画書や研究進捗報告書に基づく

研究進捗状況確認の時期を示している。総括・副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総括・副総括合意の下で年度研究計画を承認している。

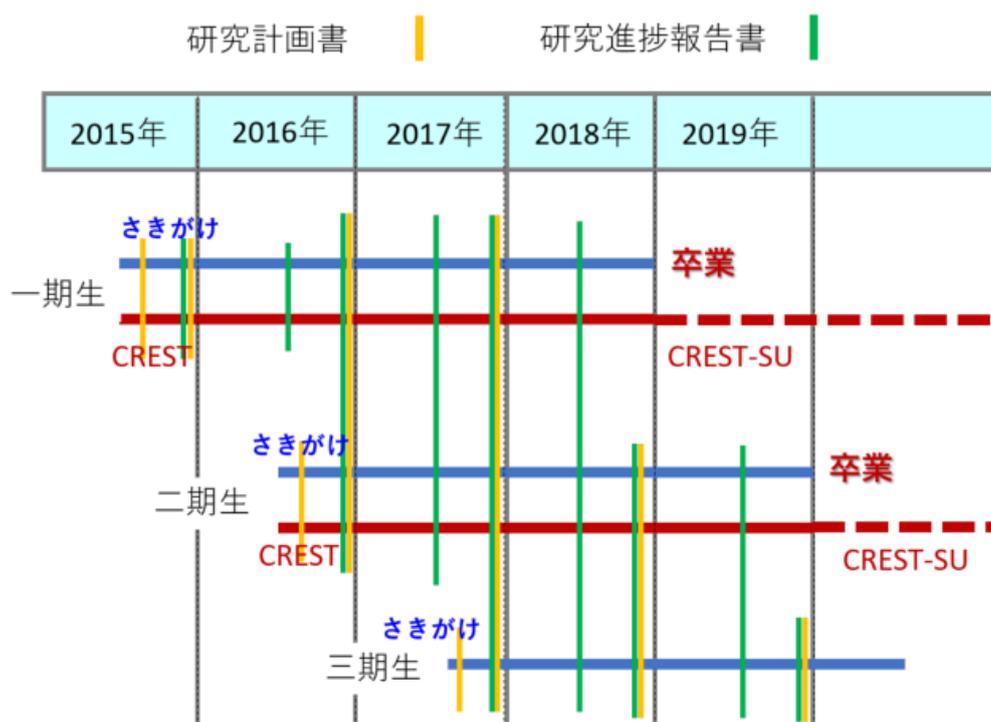


図 7. 提出書類(研究計画書、研究進捗報告書)をもとに研究の進捗を確認する時期

## (2) 研究の進め方について

### ①CREST

まず、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総括・副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則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づけ、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てきた。

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よう依頼するとともに、CREST・さきがけ完全融合型の領域運営の特長を生かして、代表者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 CREST チームには、最終段階での実証デバイスがスムーズに技術移転できるよう、あらかじめ知財獲得や民間企業との共同研究を積極的に進めるよう指示している。

## ②さきがけ

CREST と同様、研究代表者が作成した年度研究計画(案)を総括・副総括が確認し、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ている。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ている。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、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ている。

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をしている。これと並行して研究成果の社会還元を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てきた。

## ③複合領域として

本研究領域では、さきがけと CREST の垣根のない完全複合型のプログラム運営を心掛けている。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る。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プログラム運営の意図は、(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。

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)さきがけ研究者と CREST チームの若手研究者・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の発行(2019 年 11 月末時点で 31 号発刊)を行った。(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」を図っている。(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 8 に示すような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増加している。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の守備範囲が拡大しつつある。

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、さきがけの鈴木研究者や小野研究者、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ています。熱電発電では、塩見チーム、森チーム、李チーム、黒澤研究者、野村研究者、片瀬研究者、藤岡研究者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ことも分かる。後で述べるように、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。



- ・ 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)

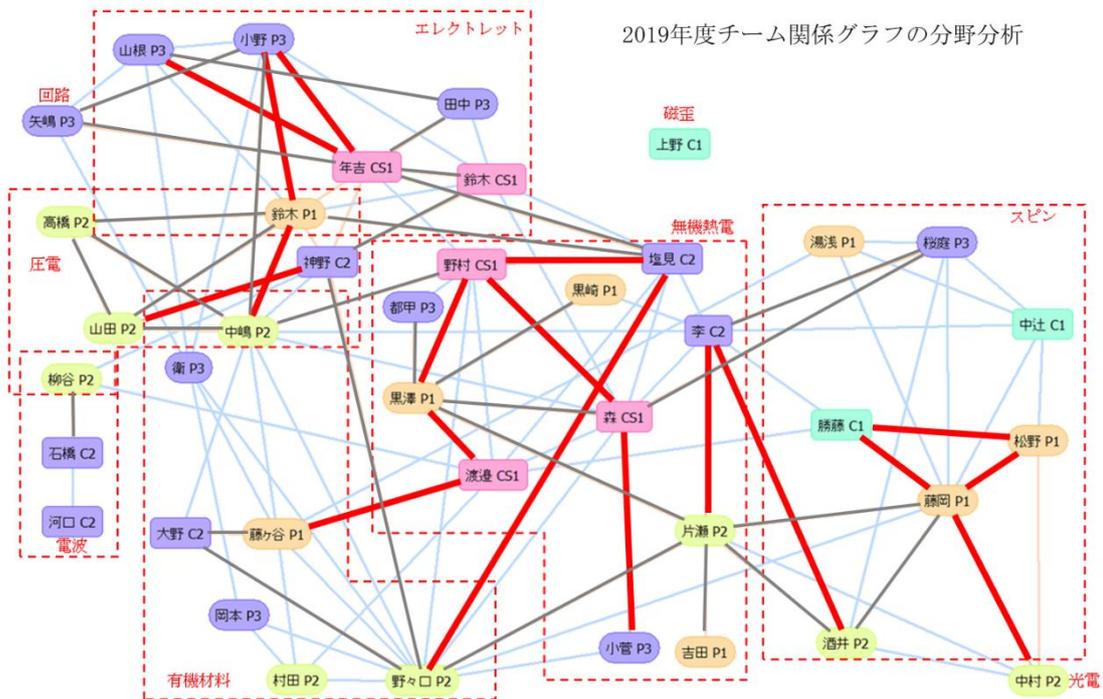


図 8. 研究者間の協力・連携の程度を表す相関図

名前の中の記号は、P “さきがけ”、C “CREST”、数字は期生を表している。CS (ピンク色) はステップアップ CREST である。連携の深さは下記の通り。

赤線：共著論文を作成するレベル、灰色：共同研究作業実施レベル、水色：情報交換レベル

(i) ネットワーク研究所として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

○ 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

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

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

・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

・海外への研究者派遣

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：Purdue大(アメリカ)

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 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 場所：横浜シンポジア(神奈川)

○ 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。

派遣者：三好 智也 東京大学大学院工学系研究科(鈴木チーム)特任助教

派遣先：ケント州立大学液晶研究所(米国)

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～2019年3月

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：Jožef Stefan Institute(スロベニア)

研究課題名：水系原料を用いた非鉛圧電体薄膜の造成

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：ブリストル大学(英国)

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

期間：2019年8月～2019年12月

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

期間：2018年4月2日～2018年7月20日

(ii) 領域内連携による共著論文

本研究領域では、さきがけとCRESTの壁を取り去った完全複合領域運営を行っており、さきがけ研究者同士や異なるチームに属するCRESTメンバー同士、さらにはさきがけ研究者とCRESTメンバーとの間で共同研究が進み、表11に示すように共著論文を16件発表している。

表11. 領域内連携に基づく論文リスト

<ol style="list-style-type: none"><li>1. 中辻 知(CREST 2015年採択)、李 哲虎(CREST 2016年採択) Masayuki Ochi, Ryotaro Arita, and Shinji Tsuneyuki, "Correlated Band Structure of a Transition Metal Oxide ZnO Obtained from a Many-Body Wave Function Theory," <i>Physical Review Letters</i>, vol. 118, Iss. 2, pp. 026402(1-6), 2017.</li><li>2. 中辻 知(CREST 2015年採択)、李 哲虎(CREST 2016年採択) K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, <u>Takeshi Kondo</u> and S. Nakatsuji, "Evidence for magnetic Weyl fermions in a correlated metal," <i>Nature Materials</i> 16, 1090-1095 (2017).</li><li>3. 勝藤 拓郎(CREST 2015年採択)、松野 丈夫(さきがけ 2015年採択)、藤岡 淳(さきがけ 2015年採択) J. Matsuno, J. Fujioka, T. Okuda, K. Ueno, T. Mizokawa, and T. Katsufuji, "Strongly correlated oxides for energy harvesting," <i>Sci. Tech. Adv. Mater.</i> 19, 899 (2018)</li><li>4. 李 哲虎(CREST 2016年度採択)、酒井 英明(さきがけ 2016年度採択) H. Masuda, <u>H. Sakai</u>, M. Tokunaga, <u>M. Ochi</u>, H. Takahashi, K. Akiba, A. Miyake, <u>K. Kuroki</u>, Y. Tokura, and S. Ishiwata, "Impact of antiferromagnetic order on Landau-level splitting of quasi-two-dimensional Dirac fermions in <math>\text{EuMnBi}_2</math>," <i>Phys. Rev. B</i> 2018, 98, 161108(R).</li><li>5. 森 孝雄(CREST 2015年度採択)、野村 政宏(さきがけ 2015年度採択) R. Yanagisawa, N. Tsujii, O. Paul, T. Mori, <u>M. Nomura</u>, "Importance of grain size for nanostructured poly-Si thermoelectric material," <i>J. Phys.: Conf. Ser.</i> 1052, 012010 (2018).</li><li>6. 塩見 淳一郎(CREST 2016年度採択)、野村 政宏(さきがけ 2015年度採択) Masahiro Nomura, Junichiro Shiomi, Takuma Shiga, and Roman Anufriev,</li></ol>
--

- “Thermal phonon engineering by tailored nanostructures,” Japanese Journal of Applied Physics 57, 080101 (2018).
7. 塩見 淳一郎 (CREST 2016 年度採択)、野村 政宏 (さきがけ 2015 年度採択)  
Jeremie Maire, Roman Anufriev, Takuma Hori, Junichiro Shiomi, Sebastian Volz, Masahiro Nomura, “Thermal conductivity reduction in silicon fishbone nanowires,” Scientific reports, 8, 4452 (2018).
  8. 森 孝雄 (CREST 2015 年度採択)、李 哲虎 (さきがけ 2015 年度採択)  
D. Song, G. Guélou, T. Mori, M. Ochi, K. Kuroki, H. Fujihisa, Y. Gotoh, Y. Iwasa, H. Eisaki, and H. Ogino, “Synthesis and Physical Properties of Layered Copper Oxytellurides  $Sr_2TMCu_2Te_2O_2$  (TM = Mn, Co, Zn),” J. Mater. Chem. C 6, 12260 (2018).
  9. 藤岡 淳 (さきがけ 2015 年度採択)、松野 丈夫 (さきがけ 2015 年度採択)  
Jobu Matsuno, Jun Fujioka, Tetsuji Okuda, Kazunori Ueno, Takashi Mizokawa and Takuro Katsufuji, “Strongly correlated oxides for energy harvesting,” SCIENCE AND TECHNOLOGY OF ADVANCED MATERIALS, VOL. 19, NO. 1, 899-908 (2018).
  10. 森 孝雄 (CREST 2019 年度ステップアップ採択)、野村 政宏 (CREST 2019 年度ステップアップ採択)  
A. George, R. Yanagisawa, R. Anufriev, J. He, N. Yoshie, N. Tsujii, Q. Guo, T. Mori, S. Volz, and M. Nomura, “Thermoelectric enhancement of silicon membranes by ultrathin amorphous films,” ACS Appl. Mater. Interfaces 11, 12027 (2019).
  11. 李 哲虎 (CREST 2016 年度採択)、酒井 英明 (さきがけ 2016 年度採択)  
T. Nishimura, H. Sakai, H. Mori, K. Akiba, H. Usui, M. Ochi, K. Kuroki, A. Miyake, M. Tokunaga, Y. Uwatoko, K. Katayama, H. Murakawa, and N. Hanasaki, “Large Enhancement of Thermoelectric Efficiency Due to a Pressure-Induced Lifshitz Transition in SnSe,” Phys. Rev. Lett. 122, 226601 (2019).
  12. 野村 政宏 (CREST 2019 年度ステップアップ採択)、藤岡 淳 (さきがけ 2015 年度採択)  
M. Masuko, J. Fujioka, M. Nakamura, M. Kawasaki, Y. Tokura “Strain-engineering of charge transport in the correlated Dirac semimetal of perovskite  $CaIrO_3$  thin films,” APL Materials 2019, 7, 081115.
  13. 藤岡 淳 (さきがけ 2015 年度採択)、中村 優男 (さきがけ 2016 年度採択)  
M Sotome, M Nakamura, J Fujioka, M Ogino, Y Kaneko, T Morimoto, Y Zhang, M Kawasaki, N Nagaosa, Y Tokura, N Ogawa, “Spectral dynamics of shift current in ferroelectric semiconductor SbSI,” Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 2019, 116, 1929-1933.

14. 藤岡 淳 (さきがけ 2015 年度採択)、中村 優男 (さきがけ 2016 年度採択)  
M Sotome, M Nakamura, J Fujioka, M Ogino, Y Kaneko, T Morimoto, Y Zhang, M Kawasaki, N Nagaosa, Y Tokura, N Ogawa, “Ultrafast spectroscopy of shift-current in ferroelectric semiconductor  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ ” Applied Physics Letters 2019, 114, 151101.
15. 三屋 裕幸 (CREST 2019 年度ステップアップ採択)、小野 新平 (さきがけ 2017 年度採択)  
C. Sano, H. Mitsuya, S. Ono, K. Miwa, H. Toshiyoshi, H. Fujita,  
“Triboelectric energy harvesting with surface-charge-fixed polymer based on ionic liquid,” Science and Technology of Advanced Materials 19 (2018) 317-323
16. 鈴木 孝明 (さきがけ 2015 年度採択)、小野 新平 (さきがけ 2017 年度採択)  
T. Iida, T. Tsukamoto, K. Miwa, S. Ono, and T. Suzuki, “Fabrication of solidified ionic liquid with 3D microstructures and its application to vibrational energy harvester,” Sensors and Materials 31(8), pp. 2527-2539 (2019)

### (3) 研究費配分上の工夫

本研究領域で採択した 40 課題(さきがけ 27 課題、CREST13 課題)の研究費総額は 40 億 6800 万円である。これに加え、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 2 億 9365 万円の追加配分を行った。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てきた。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)にも優先的に経費配分を行った。

表 12. CREST チームへの追加経費配分の内訳

CREST 追加配分経費	241, 314 (千円)
内訳	
総括裁量経費による加速支援	98, 605
国際強化支援	8, 554
見直し純増	115, 110
機械学習支援	2, 275
物品費増額	16, 770

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	52, 336 (千円)
内訳	
総括裁量経費による加速支援	12, 285
国際強化支援	3, 120
スタートアップ支援	4, 874
シーズ加速支援	7, 327
機械学習支援	780
追加加速支援	23, 950

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研究者に優先的に配分した。

以上、総括裁量経費からの増額は 1 億 1089 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 1 億 8276 万円である。

#### (4) 研究成果の発表

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てきた。さらに、本研究領域外に向けたアウトリーチ活動として、(1)表 14 に示す展示会などで環境エネルギー発電を紹介したり、(2)環境発電の社会実装を促すことを意図して YouTube で動画配信(図 9 右)したり、(3)振動発電の最先端の研究開発

成果を、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 CEATEC で行う (図 9 左) など、積極的に行っている。



図 9. 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

さらに本研究領域における環境発電デバイスの成果を世に問うための公開シンポジウムも開催している。

第 1 回公開シンポジウム(2017 年 2 月 17 日)では「微小“熱”エネルギーを利用した環境発電技術の創出」のテーマで熱電発電に焦点をあてた成果を報告し、第 2 回公開シンポジウム(2018 年 2 月 14 日)では「エネルギーをみんなに、そしてクリーンに」をテーマに成果報告を行った。CEATEC コンファレンス(2019 年 10 月 15 日)では「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」のテーマで振動発電に絞った研究成果の報告を行った。それぞれの会議の参加者(100~200 名)の状況から、環境発電の現状と将来展望を伝えられたと考えている。

表 14. シンポジウム・ワークショップ

#	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 を利用した発電技術に関するワー クショップ	JST 東京本部別館(東京)

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)

#### (5) 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。本研究

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、新 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ている。

表 15. 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"><li>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。</li><li>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。</li></ol> <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> <hr/> <p>※融合加速方式(戦略研究推進部)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 「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。</li><li>● 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。</li></ul>
---

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する。評価項目、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 16. 「ステップアップ評価：実施要領」より抜粋

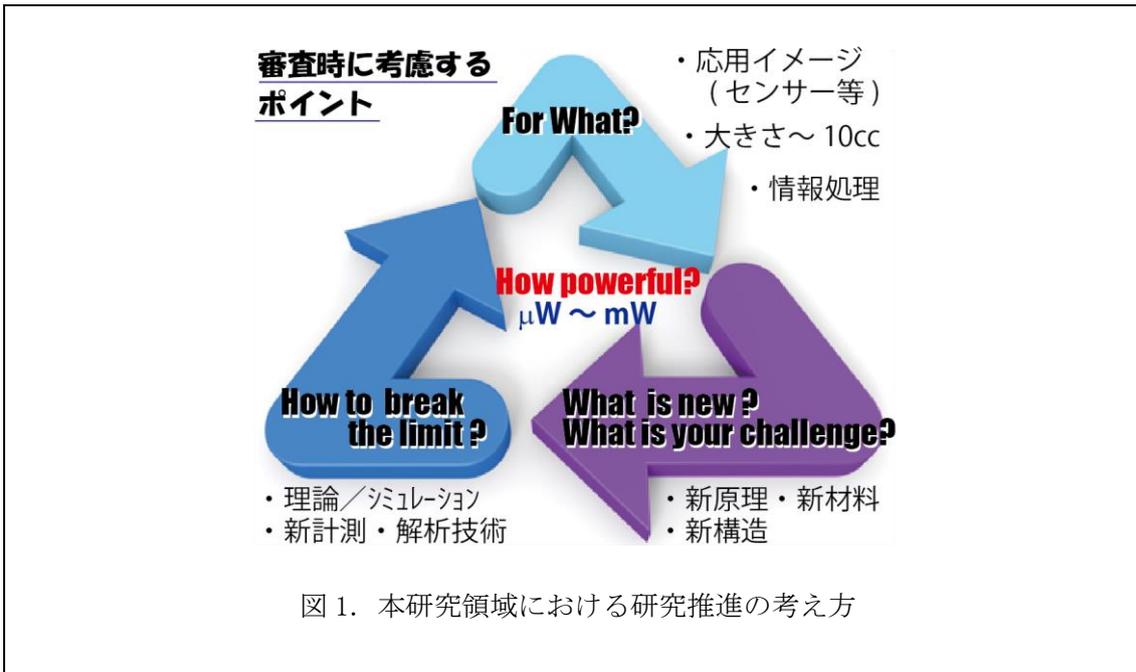
① 研究提案の、何が「融合」で、何が「加速」としての取組みなのか記載をお願い致します。

※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。

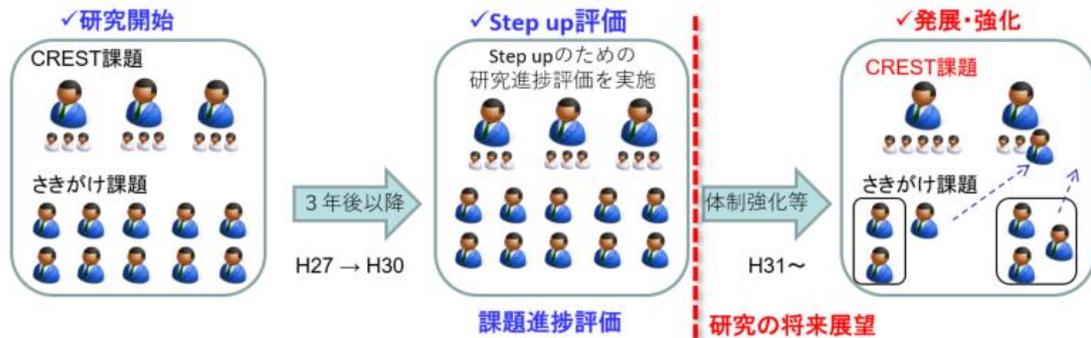
③ 図 1 を意識した記載をお願い致します。



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知能集団の形成を目指している。

一方、実用化に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。

## 領域マネジメント（融合加速方式）



### ◆タイムスケジュール

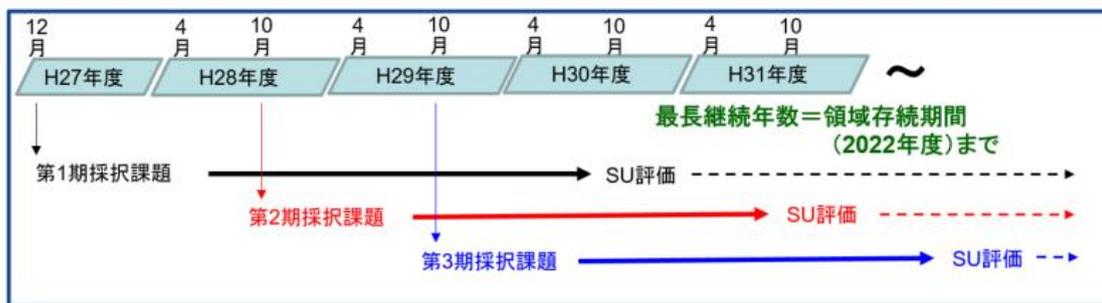


図 10. 融合加速方式によるステップアップ CREST のイメージ

### 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(3.5年経過後)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、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1~2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ている。

表 17. ステップアップ(SU)評価会

#	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)

### ステップアップ評価の結果(1期生)

ステップアップ評価には、CREST から6チーム、さきがけ研究者があらたに研究代表者と

なった 1 チーム、合計で 7 チームの応募があった。どのチームの提案も優れたものであったが、基礎研究を重視する研究事業等での実施が適切と判断された 1 チーム、速やかに産業界との連携を深めて製品開発をするフェーズにあると判断された 1 チームを除く 5 チームが採択となった。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】に分けることができた。以下に、採択されたチームの概要を示す。

・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を 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として、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  $\mu$  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を開発する。

・年吉チーム【融合加速型】

さきがけ一期生(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ための非共振・広帯域 MEMS 振動発電素子の研究開発を推進する。出力 500  $\mu$  W $\sim$ 1mW 級の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】

さきがけ一期生(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、本研究領域のさきがけ研究者、CREST 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)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ており、融合・加速を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【選択集中加速型】

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、これまで研究を進めてきた。しかし本年度の大規模プロジェクト型(技術実証研究)未来社会創造事業で新たな公募「センサー用独立電源として活用可能な革新的熱電変換技術」(期間最大10年程度、研究開発費の総額30~45億円/件)が始まり、本人から応募の相談を受けた。応募する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成果を持ち込み、さらに熱電材料の研究を発展させる計画で、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応募を了承した。後日、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、本研究領域からは卒業になったが、今後は本研究領域と連携の下、協力的に熱電材料の開発を進めていくことで了解が得られている。

大規模プロジェクト型(技術実証研究)未来社会創造事業「採択課題一覧・運営総括総評」より抜粋

大規模プロジェクト型		
運営総括: 大石 善啓(株式会社三菱総合研究所 常務研究理事/研究開発部門長)		
研究開発課題名	代表者氏名	所属機関・役職
技術テーマ「センサー用独立電源として活用可能な革新的熱電変換技術」 <sup>注6)</sup>		
磁性を活用した革新的熱電材料・デバイスの開発	森 孝雄	国立研究開発法人 物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 熱環境発電グループ グループリーダー

<sup>注6)</sup> 研究実施期間: 最大9年半、研究開発費総額 31億円上限(直接経費)

また、ステップアップに応募しなかった勝藤チームも、早稲田大学が平成30年度文部科学省「特色ある共同利用・共同研究拠点事～環境整合材料基盤技術共同研究拠点」に採択され、環境整合構造材料、環境整合機能性材料、環境整合材料物性、環境整合材料の設計評価を推進している。

## ステップアップ評価の結果(2期生)

CREST 2期生のステップアップ評価では応募のあった5チームのうち、4チームが後半フェーズに進むことになった。以下に、それらのチームの概要を示す。

### ・石橋チーム【融合発展型】

さきがけ二期生(柳谷)を主たる共同研究者に加え、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。領域外から、新たに主たる共同研究者を迎えるとともに、システム応用を志向した民間企業からなるアドバイザー会議を組織化する予定となっている。

・神野チーム【融合発展型】

新たにさきがけ二期生(山田)を主たる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、小型高強度圧電 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。共同研究チーム内で、研究参加者と主たる共同研究者を交替させたり、さきがけ二期生のグループに国際強化支援で構築された国際共同研究者を取り込むなど、特徴的なチーム作りが行われた。

・塩見チーム【選択集中加速型】

新たに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、パルスアニー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提案。

・李チーム【選択集中加速型】

ステップアップ採択後に、総括・副総括との研究計画の作り込みを行い、前半フェーズで行った熱電材料探索の結果として 3 種類に絞り込んだ熱電材料のさらなる熱電性能の向上を目指すこととなった。さきがけ一期生(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重心を移して熱電発電モジュールの実用化を進める。なお、絞り込まれた熱電材料の 1 つは、前半フェーズにおける個別面談の結果、総括裁量経費で研究加速を行ったことにより新たな合成法が開発されたものである。

## 6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

### (1) 研究総括のねらいに対する研究の状況

#### ①CREST

環境発電デバイスの開発やその基盤となる学術的な学理解明などの研究成果や達成度には研究者毎に質・量ともに濃淡があり、一般論として総括することは難しいが、本研究領域の多くの研究課題において戦略目標の達成に成果を上げている。この裏には研究者が自らの研究の立ち位置を意識すべく、頻繁に“For what?”，“What is new?”，“How to break the limit?”を自問自答する「おにぎり」の図を使った発表を義務付けたことで、おおむね明確な方向性を持って研究が実施されたからと判断する。

以下に、CREST 研究チームの研究成果と戦略目標の達成状況などを記す。

## CREST1 期生

### ・上野チーム

磁歪材料(FeGa 合金)の開発とそれを用いた振動磁歪型発電デバイスの設計に関する研究を実施してきた結果、

- (1) 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)の確立。
- (2) 永久磁石で磁気バイアスを印加した積層ユニモルフ構造の磁歪式振動発電デバイスの設計手法を開発。
- (3) 上記設計法に基づいて世界最高水準の発電能力を持つ実用的な磁歪振動発電デバイスを開発。その電力を使用してセンサー情報を 50m 先の受信機に無線(315MHz)で伝えることに成功した。

### その他特記すべき事項

磁歪振動発電デバイスの開発の過程で社会実装を意識した展示会などの出展を積極的に行った結果、磁歪発電デバイスの実用化に向けて数社との共同開発が始まっている。また、振動発電デバイス構造の基本特許を 7 개국で権利化しているなど、当初計画より前倒しで研究が進捗したことで本研究領域を早期卒業した。その後はベンチャー企業を起業し、磁歪振動発電デバイスをサンプル出荷するまでに至っている。

### ・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起電力の増大を目指す熱電材料の研究開発を進めた結果、

- (1) 広い温度範囲の応力下での熱電特性の実験より、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。
- (2) 遷移金属酸化物の n 型熱電材料として、唯一知られていた SrTiO<sub>3</sub> に匹敵する性能を有するホランダイト型 Ba<sub>x</sub>Ti<sub>8</sub>O<sub>16+δ</sub> を開発した。

研究対象の SrVO<sub>3</sub> に代表される遷移金属酸化物は、3d 軌道揺らぎによる熱伝導の抑制は認められ学術面での研究成果はあったが、熱電性能が低くオーミックコンタクト形成の難しさもあり熱電デバイスへの応用は、現時点では難しいと判断された。

### ・中辻チーム

反強磁性体に熱勾配を加えると、磁化と熱勾配の方向と垂直な方向に起電力が発生する異常ネルンスト効果を利用した新しい熱電発電の研究を実施し、

- (1) 異常ネルンスト効果を反強磁性体 Mn<sub>3</sub>X(X: Sn, Ge) で実験的に初めて明らかにし、その機構を解明するとともに熱電材料としての有効性を示した。
- (2) 反強磁性体(Mn<sub>3</sub>X) および強磁性体(Co<sub>2</sub>MnGa) で磁気ワイル粒子を観測し、ワイル磁性体の存在を実証した。室温で 6 μV/K の係数を持つワイル強磁性体 Co<sub>2</sub>MnGa の開発にも成功。
- (3) 異常ネルンスト効果を用いた熱電変換を実証し、トポロジカル物質で熱流センサー応用の可能性を示すなど、実用を念頭に置いた新物質開拓とメカニズム解明の両面において高い研究成果を得た。

また、論文発表も、質、量ともに期待を大きく上回っており、プレスリリース等、社会に向けた情報発信も積極的に行っている。国際研究協力の下で得られたスピン系物性物理解

野の研究成果は特筆すべきものである。

・鈴木チーム

第一原理計算に基づく高性能エレクトレット材料の開発およびウェアラブル・エレクトレット発電を目指す研究を行った結果、

- (1)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 ( $4\text{mC}/\text{m}^2$ ) を有するポリマー材料の開発に成功。
- (2)エレクトレット振動発電に適した新たな非線形電源管理回路 (Synchronized Switch Harvester on Inductor, SSHI) を考案し、これまでの 4 倍の発電出力を得た。
- (3)電極間に高い異方性誘電率を持つフッ素系ネマチック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。
- (4)実用レベルの発電量  $200\ \mu\text{W}/\text{rps}$  の回転型エレクトレット発電器を作製。今後は当該発電器を人体やロボットアームに装着した様々な応用が考えられる。

その他、溶射法オキシハイドロキシアパタイト (OHA) 薄膜形成技術は、エレクトレット成膜工程の量産化に道を拓いた。さらに研究代表者は振動発電の特性評価方法の国際標準化 (IEC TC47) に貢献している。

・年吉チーム

静電誘導発電型の MEMS エナジーハーベスター (体積電力密度  $10\text{mW}/\text{cm}^3$ ) の開発を目指し、新規材料、MEMS 構造の設計・製造技術を研究した結果、

- (1)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。
- (2)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た。
- (3)上記(1)の設計手法と(2)のエレクトレットを用いた  $35\text{mm}\times 20\text{mm}$  の振動発電デバイスを試作。出力  $439\ \mu\text{W}$ 、電力取り出し効率 90% の MEMS 振動発電を実証した。

新たに構築した振動発電デバイスの設計理論は、振動発電デバイス開発の技術的な参入壁を取り除く大きな成果である。また、連携先企業の技術者を受け入れて共同研究を進めており、民間企業へのスムーズな技術移転ができる体制ができている。なお(2)の研究成果に関しては、総括・副総括による個別面談を経て、白石 AD の元でカリウムイオンエレクトレットにおける電荷蓄積機構の理論的研究が実施されるなどの展開が図られた。

・森チーム

磁性熱電材料の高性能化に向けたメカニズムの解明とナノ構造制御による熱電性能向上、 $\text{mW}$  級の熱電発電を目指す磁性半導体熱電材料の研究を進めた結果、

- (1)Mn ドープ磁性半導体材料では、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) が熱電性能向上の要因であることを初めて明らかにした。
- (2)磁性イオンやナノ空隙などを取り入れた高い熱電性能 ( $ZT\sim 1.6$ :  $\text{CoSb}_3$  系スキュテルダイト) の熱電材料を開発。
- (3)金属強磁性体  $\text{Fe}_2\text{V}(\text{Al}, \text{Si})$  において、スピン揺らぎによって出力因子が 2 倍以上向上

することを実験的に初めて見出した。

(4) 安価な材料を主成分とする磁性半導体硫化物を用いた熱電発電モジュールで、最大 110mW(温度差約 90℃)の発電を実証した。

など、磁性半導体の熱電特性に及ぼす磁性元素の効果の解明と並行して、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開発により、すでに複数の企業と共同研究が始まっている。研究代表者の国際共同研究や国際学協会活動を先導する活躍で、当該研究分野における国際的求心力も向上している。

#### ・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の開発に取り組んできた結果、

(1) 作製したプレーナ型短レグ熱電デバイスで  $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (温度差 5℃)の高い熱電性能を得ている。シリコンベースのプレーナ型熱電デバイスとしては世界最高記録である。

(2) 微細化による発電密度のスケーリング則を提案し、プレーナ型熱電発電デバイスの設計法を示した。

(3) 表面電位顕微鏡(KFM)による Si ワイヤの局所温度計測技術を構築し、表面ポテンシャル分布と表面温度分布のデータから局所ゼーベック係数を評価できる見通しを得た。

集積回路と同一工程で作製できるプレーナ型熱電デバイスは、同一チップに昇圧回路や制御回路を組み込み、利便性に優れた超小型電源として期待できる。

その他特記すべき事項として、早稲田大学内に、本研究領域に関わる研究者(CREST 渡邊孝信、CREST 勝藤拓郎、CREST 塩見チーム岩瀬英治、さきがけ柳谷隆彦)が中心となって、早稲田大学 重点領域研究機構 として、アンビエントロニクス研究所が設立された(研究所長 渡邊孝信)。

### CREST2 期生

#### ・石橋チーム

Super Steep トランジスタと Meta Material アンテナを用いて微弱電波強度領域で高い電波電力変換効率を得る技術を開発してきた結果、

(1) 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) 上記 SOI FET(Super Steep FET)を用いて 30MHz の高周波まで 10mV の極微小信号の整流ができることを実証。

(3) 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。

SOTB(Silicon on Thin Buried Oxide) MOS による整流回路を用いた携帯 950MHz 帯の環境 RF 信号から平均  $2.77 \mu\text{W}$  の発電を得、pHEMT のトランジスタ整流回路を用いて 24%の発電効率(入力電力-30dBm)を確認したことで微弱電波発電の実現に向け大きく前進した。

IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM) 2018 で Selected paper に選ばれるなど、エレクトロニクス分野における高インパクトの成果があったと認められる。

・大野チーム

nmレベルの導電性カーボンナノチューブ(CNT)超薄膜を用いて、電解液流体から電気エネルギーを取り出すフレキシブル流体発電デバイスを研究した結果、

- (1)連続的流体発電では、流動電位による起電力と電極における電子交換による電流で取得電力量が決まることを明らかにし、CNT表面の修飾によって取得電力が増大することを見出した。
- (2)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。
- (3)小直径(1.0nm)の半導体CNTを用いて作製した15cm x 15cmの発電シート上で1.2  $\mu$ Wの発電出力を得た。

液滴発電において超低消費電力のセンシング・電界結合型無線送信システムを設計・試作し、計測した流体の流量や温度を無線で送信することに成功したが、発電シートを小型化すると発電量は小さくなり、センサー応用に向けた実用化の目処はたっていない。発電に関する成果発表の件数が少ないこともあって前半フェーズのみで本研究課題は終了とした。

・河口チーム

微弱マイクロ波を高効率良く電力変換する半導体ナノワイヤ・バックワードダイオード(BWD)の開発とそれに適したアンテナ・整合回路との融合による環境電波発電の原理実証の結果、

- (1)マイクロ波帯で動作するナノワイヤ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。
- (2)数十nm径のナノワイヤーでは先端の電極接続部で生じる空乏化現象により、BWDの順方向耐圧が理論限界を超えることが確認され、電波発電の性能向上に向けての利用が期待できる。
- (3)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。

ナノサイズ・バックワードダイオード(BWD)が電波発電に有効であることが実証され、BWDの今後の応用展開が期待される。その他特記すべき事項として、新聞、TV、科学雑誌などで「微弱電波からの発電」として紹介されるなど、広く微小エネルギー領域の狙いを喧伝することに貢献した。

・神野チーム

有害物質を含まない新しい圧電薄膜の圧電性能の向上とセンサー素子との集積を想定した圧電薄膜発電素子の開発を行ってきた結果、

- (1) 非鉛圧電薄膜(K, Na)NbO<sub>3</sub> (KNN)に MnO<sub>2</sub>を添加することでリーク電流を大幅に低下することを見出し、KNN の実用化に向けて大きく前進した。
- (2) Pt エピタキシャル Si 基板上に高品質なエピタキシャル成長 KNN 薄膜の形成技術を開発。
- (3) 低比誘電率材料 BiFeO<sub>3</sub> 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。

作製した多層 PZT 薄膜のエナジーハーベスターは、実環境に近いランダム振動の下で理論限界の 92.1%となる規格化発電量 6.1mW/G<sup>2</sup>を達成した。非鉛圧電薄膜において、PZT と同等の発電性能を得ることができたものの、強い厚膜依存性や環境耐性等に関する課題が顕在化し、その課題の解決は後半フェーズで探索する。今後、学術的な取り組みの強化を期待する。

その他、IEC SC47F のプロジェクトリーダーとして圧電測定 of 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 が発行されたのは特筆すべきことである。

#### ・塩見チーム

表面形状(粗面・曲面・伸縮面)への装着性(機械的特性、伝熱特性)の優れた熱電デバイスおよびナノ構造化と歪エンジニアリングを活用した低コスト Si 系熱電材料の研究を行った結果、

- (1) 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。
- (2) ポーラスナノワイヤーをプラズマ焼結するプロセスにより、ナノ多結晶、軟化粒界、ナノ細孔、ナノ析出層を階層的に有するナノ構造化膜材料を開発し、室温での ZT=0.3 を実現した。シリコンのみからできているバルク熱電材料の中では世界最高の性能を達成。
- (3) 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おり、熱電発電の低コスト化に向けて大きく前進した。また、ナノ構造の熱輸送を計算する手法とベイズ最適化手法を組み合わせ、ナノ構造内の原子の組成や構造そのものを記述子とすることで、全候補数の数パーセントの数の構造を計算するだけで最適構造を同定できる新しい技術を開発している。

チーム内や領域内で積極的に人事異動を進め、若手研究者のプロモーションを積極的に行っていることが高く評価される。

#### ・李チーム

①格子熱伝導率の低減方法と、②電力因子の増強方法に関する研究を通して、高性能新熱電材料の開発を行ってきた結果、

- (1) カゴ状構造のない平面配位の物質系において、その中心原子に化学的圧力を加えるとラットリングにより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。
- (2) 擬平面 5 配位の平面ラットリングが現れる  $\text{LnOPnCh}_2$  において、ニクトゲンをより軽い元素に、カルコゲンを重い元素に置換することで電子状態の一次元性の増強と急峻なバンド分散を同時に実現すると電力因子が向上することを明らかにした。
- (3) 実用的な熱電材料として  $\alpha\text{-MgAgSb}$  の溶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が得られている。

第一原理計算で探索しながら選択肢となる熱電材料を絞って研究を進めた結果、ラットリングとローンペアで熱電材料のマッピングができる新しい学術的な知見を得た。また、ローンペアもラットリングも含まないが、特性が有望と思われた MgAgSb の大量合成法の開発に成功し、低コスト熱電材料としての道を拓いた。

## ② さきがけ

環境発電デバイスの開発やその基盤となる学術的な学理解明などの研究成果や達成度には研究者毎に質・量ともに濃淡があり、一般論として総括することは難しいが、本研究領域の多くの課題が取り組み、それぞれの研究課題において戦略目標の達成に成果を上げている。

以下に、さきがけ研究者の研究成果と戦略目標の達成状況などを記す。

### さきがけ 1 期生

#### ・黒崎 健

シリコン系材料に変調ドーブ／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ブ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。研究成果として、①検討したシリサイドの中で最も熱電性能の良い材料  $\text{Si-Mg}_2\text{Si}$  を見出し、その ZT が Si の 4 倍程度になることを確認した、②  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  を超す出力因子を持つ  $\text{YbSiGe}$  を発見した、などが得られた。室温域で熱電性能が良好な新材料  $\text{YbSiGe}$  については、産業界との共同研究を進めている点は評価できる。ZT の向上や n/p 型層の形成法など課題はあるが、企業との共同研究を通して実用化に繋がることを期待したい。

国際会議における Keynote や invited の発表をはじめ、研究成果が著名な論文誌にも掲載されており、変調ドーブ／ナノ構造のアイデアは高く評価されている。

#### ・黒澤 昌志

Si-CMOS プロセスとの親和性の高い熱電材料を用いた自立電源の開発を目指して、IV 族元素系熱電変換材料の開発を行った。研究成果は、①Ge 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、③熱電物性の独立制御製

膜法を用いて GeSn 材料の高い熱電材料の可能性を示したこと、などである。

SiSn 系の研究では、Sn 固溶限(0.1%)を超える高濃度 Sn 組成(20%および 40%)薄膜形成に成功し、価電子帯端オフセット(VBO)を初めて観測するなど、IV族元素系薄膜の基礎物性評価面での成果が得られている。今後、Si-CMOS プロセスが使える熱電材料(IV 族半導体)の熱電素子と IoT エッジデバイスとの融合を図れば、その社会的な波及効果は大きいと思われる。

積極的に学会での基調講演や招待講演をしており、研究者としてのキャリアアップは図られている。

#### ・鈴木 孝明

独自の 3次元リソグラフィ技術で作製した 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、発電性能を実証したことは高く評価できる。様々な周波数の振動・歪に応じた振動発電デバイスの設計に道を拓いたことで振動発電デバイスの実用化に向けた大きな前進が認められる。社会実装には、使用環境下での耐久性を始めとして解決すべき課題はあるが、3D 構造の最適化を通してさらなる発電能力の向上が期待できる。

振動発電を専門としない本研究者が、単独でピエゾ材料から振動発電の原理、3D 構造の製作技術、発電デバイスの応用まで複数の技術分野横断的にバランスの良く研究し得たことは特筆に値する。国際会議における招待講演発表をはじめ、研究の成果は著名な論文誌にも掲載されている。

#### ・野村 政宏

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ことは卓越した成果と認められる。具体的には、①フォノン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し、ZT 値についても目標であった 0.1 程度を達成している、②熱のバリスティック伝導性を生かした集熱実証実験の結果、構造を工夫すれば熱の逆方向伝導を阻止するなど、熱伝導制御が可能なデバイスの設計ができることを示した。

また、さきがけ期間中に多数の招待講演など、さきがけ研究のイメージアップにも貢献した。研究成果が着実に論文投稿、特許出願、学会等での受賞に繋がっているなど、十分にキャリアアップに努めたと評価できる。国際会議での招待講演や受賞に見られるように、国際的にみて最高水準の研究成果が得られている。

令和元年に、新しく立ち上がった CREST の研究代表者として、更なるフォノンエンジニアリングの学理構築に努めるとともに、実用的な熱電発電を目指して 2~3 桁の性能向上に向けた努力を期待したい。

・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を目指す学術的な研究を行った。研究対象物質の候補としてはパイロクロア型イリジウム酸化物とペロブスカイト型イリジウム酸化物に絞り込み、結晶の作製と熱電変換性能を評価・検証した。パイロクロア型イリジウム酸化物においては、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した。ペロブスカイト型イリジウム酸化物においては、電子相関とスピン軌道相互作用によって一電子バンド幅が変化することで、ディラック点のエネルギー制御が可能な強相関ディラック半金属になることを示した。

新しく開発した強相関係物質で学術的に示唆に富む結果を得、スピン起電力の発現とその増大の可能性を示した。強相関トポロジカル物質の開発やその物性評価に関する研究成果をもとに国際会議での招待講演や論文発表を積極的に行ったことが評価されている。

・藤ヶ谷 剛彦

生体貼付け型 CNT フレキシブルシートの創製を目指し、n 型ドーパントの研究を行った結果、大気中で安定な単層 CNT を n 型に変えるドーパントを発見し、その発現メカニズムを解明したことは高く評価できる。この研究成果により、CNT 系のフレキシブル熱電デバイスの社会実装に向けた大きな一歩が踏み出した。①大気中で安定な n 型ドーパントの開発、②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、など、今後の CNT 熱電変換材料の社会実装に向けた技術的課題が着実に解決できている。

本研究者が主導して立上げた CNT 熱電研究会のネットワークを通じて多くの研究者との交流ができています。領域内の CREST チーム(渡邊チーム、大野チームなど)とも積極的に連携して異なるバックグラウンドの研究者とネットワークを作って共同研究を進めた結果、ステップアップ後の渡邊 CREST に主たる共同研究者として参画することになった。新 CREST チームの中で、本さきがけ研究の成果を応用した平面型素子の開発を進めてほしい。

・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難航したが、最終成果としてスピン流誘起熱電変換の最大の課題はスピン流の注入効率であることを明らかにした。この学術的な意義は大きく、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ことは評価できる。実験的には、 $\text{IrO}_2$  が高いスピンホール抵抗率を持ち、代表的な貴金属スピントロニクス材料である白金と比べておよそ 20 倍の性能を持つことを示し、YIG 上へのエピ成長が難しい 5d 酸化物薄膜の代替として  $\text{SrIrO}_3$  のエピ成長 ( $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$  上)に成功している。

領域横断的にさきがけ研究者との意見交換の場を設け、JST 内でのさきがけ事業への働きかけを行ったことは他研究者に大きな刺激を与えた。学際的な領域をまたぐ稀有の人材として、今後の活躍を期待したい。

・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の飛躍的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ている。具体的には、非磁性層としては Ta<sub>50</sub>W<sub>50</sub> 合金が有効であり、界面に挿入する材料として、①酸化抑制効果の高い Ru 金属、②磁気モーメント密度を高める磁性体薄膜、③スピンゆらぎを誘起する反強磁性体、などの実験を通してスピン流の注入効率が数倍増大することを確認している。この領域の発展につながる糸口を見出したことは、起電力増大への一助となる。社会実装に求められる熱電性能のハードルは依然として高いが、今後、スピン流制御の知見を生かした材料開発を通して他の応用分野への波及効果もあり得る。

当初の目標値が極めて挑戦的だったこともあり、学術的な原理解明との狭間でやや中途半端な研究になった印象があるが、国際会議の招待講演が 5 件の実績からは、この分野に与えた影響は大きいと判断している。

・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の開発を試みた研究。微細加工技術を駆使してマイクロヒータを組み込んだ温度計測試料を作製し、両端に温度差をつけた Al の架橋ワイヤ(12 μm 長)のプラズモンピークシフトを計測した結果、誤差約 ±5°C で温度の計測が可能であることを確認した。学術面では、ナノスケールの温度ムラの可視化は、その観察によってフォノン伝導状況などの計測と相俟って計測技術開発の意義は大きい。

当初の研究計画を前倒しで達成し、さきがけを早期卒業し、大阪大学の国際交流人材として一年間の海外派遣を経験する機会を得た。

本研究領域に参画することで、熱電変換の研究者との交流を通じて熱伝導や熱電材料、結晶成長などの知識を得、さらに微細加工技術の習得など、研究の守備範囲が広がり、キャリアアップにつながった。今後、技術分野横断型の研究経験を生かして学際分野での活躍を期待している。

## さきがけ二期生

・片瀬貴義

無次元性能指数  $ZT (=S^2 \sigma T/\kappa)$  の導電率  $\sigma$  と電力因子  $S$  のトレードオフに縛られないフォノンドラッグ効果(電子と格子振動の相互作用)を有効利用した新熱電材料を研究した結果、

- (1) LaNiO<sub>3</sub> 薄膜に圧縮歪を加えて出力因子を 10<sup>3</sup> 倍増加させることに成功した。
- (2) LaNiO<sub>3</sub> 膜の極薄化でフォノンドラッグ熱電能が約 5 倍増加する現象を見出した。
- (3) 実験と計算から、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。

室温で観測したフォノンドラッグ熱電能の増大の発現機構を解明したことは大きな成果。今後、さらなる発電量の増大に向けてバルク体での研究に期待している。

・酒井英明

磁化により熱勾配と垂直方向に熱起電力が発生する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。また、自発磁化を有する多層ディラック電子系磁性体 AMnX<sub>2</sub> (A: アルカリ土類、希土類金属、X: Bi, Sb) では特異なスピン・バレー状態に起因する巨大な異常熱磁気効果を見出した。これらの知見や学理は、様々なトポロジカル磁性体の物質設計に資すると期待できる。

CREST 李チームの理論グループとの共同研究の成果を共著論文にしており、本研究領域の CREST とさきがけ研究者間連携研究の良い例を示した。今後、当該分野をけん引する若手研究者としての活躍を期待している。

・高橋竜太

100Hz 以下の周波数振動に対して機械的な振動を効率よく電力変換する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。

- (1) SrTiO<sub>3</sub> (001) 基板上にパルスレーザー堆積法で積層した犠牲層 BaO 薄膜と BaTiO<sub>3</sub> 薄膜がともにエピタキシャルに成長していることを確認。
- (2) BaO 犠牲層上に堆積した BaTiO<sub>3</sub> エピタキシャルな薄膜を水に浸して SrTiO<sub>3</sub> (001) 基板から剥離し、ポリマーに転写する技術を開発した。
- (3) 剥離したメンブレン BaTiO<sub>3</sub> 単結晶膜を、導電体 ITO を塗布した PET 基板上に転写した振動発電デバイスに 5Hz の機械的振動を加えた結果、1 μW を超える電力を得た。

令和元年台風 19 号による洪水で研究室が水没し、装置類が使用できなくなったため、さきがけ期間を 1 年延期することになった。

中嶋宇史

圧電性高分子材料を用いて、①ウェアラブル超柔軟性圧電ポリマー、②塗布印刷向け自己分極型圧電ポリマー、③低コスト・大面積化の非フッ素系圧電ポリマー、を開発する研究を行った。

- (1) 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した。この材料の振動発電デバイスへの応用が期待される。
- (2) 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。
- (3) 柔軟性の高いシアン化ビニリデン系圧電膜の構造解析を進め、大きな圧電特性発現の原因は非晶性の微構造にあることを明らかにした。

さきがけ研究の当初から化学メーカーと共同で研究開発を進めてきた結果、優れた圧電性高分子膜の開発に成功し、展示会などで有機材料を用いた圧電デバイスの有効性を発表して社会的関心を喚起するなど、顕著な活躍をしてきた。

#### 中村優男

光照射によって結晶構造の空間反転対称性が破れた物質で生じるシフト電流の発生機構を実験的に検証しその学理を探究する研究を行い、下記の成果を得た。

- (1) 異なる金属電極を用いた実験から、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。
- (2) 超短パルスレーザーの励起で発生したシフト電流のダイナミクスをテラヘルツ放射分光で測定し、シフト電流がサブ psec の超高速応答を示すことを確認した。
- (3) 有機電荷移動錯体 TTF-CA(電子型強誘電体)で既報物質中最大のシフト電流発生がみられ、シフト電流光電変換材料として電子型強誘電性物質が有望であることを見出した。
- (4) 分子線エピタキシー法で分極軸が基板面に垂直に配向した  $Sb_2S_3$  と  $SbI_3$  化合物薄膜の作製に初めて成功し、その薄膜が期待通り強誘電性を示すことも確認した。

シフト電流による電力量は環境エネルギーとして利用するにはまだ微小だが、シフト電流の学理究明などの学術的な研究を通してさらなる電力量増大に期待している。

#### 野々口斐之

超分子ドーピング法による p/n 型極性変換、欠陥エンジニアリング、さらに半導体 CNT の分散技術など、CNT 材料の熱電機能と安定性を高める基盤技術を創出する研究を行った結果、

- (1) 表面錯体形成に基づく n 型 CNT の耐熱化

各種のドーパントの検討や、電気化学ドーピングによる電解質イオンのスクリーニングにより、優れた安定性を示す n 型カーボンナノチューブの設計指針を構築した。

- (2) 有機塩を用いた電子構造制御と熱電応用

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。

以上の研究の結果、CNTの電力因子がさきがけ研究の開始時よりも5倍程度増大し、熱電変換デバイスへの応用の目処をたてることができた。さきがけ研究の期間で行った招待講演22件は研究成果の注目度を反映しており、特筆に値する。

・村田理尚

高い電気伝導率を示す $\pi$ 共役ジチオラート錯体に $\pi$ 共役ユニットを導入するボトムアップ合成法とフレキシブル熱電材料膜の塗布技術を開発する目的で研究を行い、下記の成果を得た。

- (1) 4つの硫黄原子が1つのニッケル原子に結合した構造を含む金属錯体の $\pi$ 共役ユニットを含むジチオラートの汎用的な合成法を確立した。合成したジチオラート型ニッケル錯体の実験より、熱電特性には $\pi$ 共役ユニットが大きく影響することを見出し、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。
- (2) 溶液プロセスによる製膜が困難であったジチオラートにコアシェル型ポリスチレン微粒子を加えた新しい塗布法を開発し、高い性能 ( $PF = 13 \mu W m^{-1} K^{-2}$ )の熱電膜を得た。

これらn型熱電材料の設計指針ならびに製膜法に関する知見は、有機熱電材料の開発・応用の観点から評価できる。塗布可能で大気安定なn型材料の開発は、熱電モジュールの新しい方向への発展が期待できる。

・柳谷隆彦

電波発電のレクテナ応用を目指して、結晶配向制御技術を用いたGHz帯の圧電薄膜昇圧素子を開発してきた結果、

- (1) 斜入射スパッタ成長法によりc軸が傾斜しかつ高配向性を保ったScAlN薄膜の成長技術を用いて分極反転多層構造(12層ジグザク傾斜反転ScAlN薄膜)の形成に成功した。4層時の横波に対する電気機械結合係数として世界最高値を得た。
- (2) 基板付き共振構造の4層ジグザク傾斜反転ScAlN薄膜トランス共振子では入出力開放条件下で12倍の増幅を実現。さらにPZT圧電セラミックス板を積層させた昇圧素子(1MHz付近の周波数帯域)でも5倍を超える増幅を得た。
- (3) 分極反転構造の圧電トランス薄膜共振子のモデル化(等価回路モデル)に初めて成功。汎用回路シミュレータに組み込めるモデルの開発により、圧電トランスの社会実装に向けて大きく前進した。

特筆すべきは、さきがけ研究の期間で発表した論文数32件と学会発表155件である。本研究を通じて得られた成果をもとに電機メーカーや材料メーカーとの共同研究、受託研究が進んでいる。大面積の成膜ができればレクテナ素子に標準的に搭載される可能性があり、その波及効果は大きい。科学技術分野の文部科学大臣賞も受賞しており、顕著な活躍をしたと認められる。今後、共同研究者として参画するステップアップ後のCREST石橋チームでさ

さきがけ研究で得た圧電昇圧素子の有効性を実証することを期待している。

・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が生み出す特異な分極状態を利用して材料全体が示す巨大圧電応答の機構を解明する研究を行った結果、

(1) SrTiO<sub>3</sub> 基板上的の Pb(Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>)O<sub>3</sub> (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。分極モデルに基づくシミュレーションと実験結果から、ナノロッドの分極には静電相互作用が強く関与していることを明らかにした。

(2) 分極傾斜した(111) 正方晶 PZT ナノロッド膜ではサイズの減少により圧電応答が向上し、同組成のバルクに比べて最大で約 5 倍の圧電定数を示すことを見出した。熱力学現象論計算から、サイズの減少によって分極電荷の不完全遮蔽による脱分極電界の増大がその要因であることを明らかにした。

(3) 分極方位が異なる 2 つの PZT 組成を積層させた人工超格子ナノロッド膜で層厚が薄くなるほど圧電応答が増加し、両組成のバルクの圧電定数を上回ることが実験的に示した。

分極傾斜ナノロッド膜の巨大圧電応答の研究は国内外での評価は高く、複数の研究機関と共同研究を始める契機にもなっている。今後、主たる共同研究者として参画するステップアップ後の CREST 神野チームでさきがけ研究で得た研究の成果を実証することを期待している。

### さきがけ三期生

・衛慶碩

昼夜の温度差や低温排熱から発電する新規熱電デバイスを目指した研究を行い、伝導高分子膜 PEDOT/PSS 電極と電解液 K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>/(NH<sub>4</sub>)<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> 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。電解液にイオン伝導度の優れた (NH<sub>4</sub>)<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> を使用して出力抵抗低減を図り、大きな出力電力が得られている。さらに DC-DC コンバータで昇圧した電圧(4V) で動作するシステムを作製し、センサーで観測した湿度と温度のデータを Bluetooth 経由で無線送信できることを実証した。熱電気化学セルを使ったセンサーノードとしては世界初。

・岡本敏宏

有機半導体の単結晶薄膜を用いた熱電材料の基礎学理の構築と、デバイス応用を指向した高分子系有機熱電材料の開発を行った結果、低分子系半導体材料、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 8nm) の上に作製したボトムゲートトップコンタクト型トランジスタ構造の 0n-chip サーモメトリーデバイスの計測結果より、

90  $\mu\text{W m}^{-1} \text{K}^{-2}$  の良好なパワーファクター値が得られ、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た。

高分子系半導体材料、TPA-TFSI についても PBTTT 膜にして 27.1  $\mu\text{W m}^{-1} \text{K}^{-2}$  のパワーファクターを得た。また、圧縮配向法で得られた結晶性超薄膜 PBTTT (膜厚約 10nm) は高分子系半導体材料としては世界最高レベルの  $20\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  を超えるキャリア移動度と  $1500\text{Scm}^{-1}$  の伝導度を達成した。これら成膜法やドーピング手法などの一連の検討を通じて、熱電性能の向上のための半導体分子の新たな設計指針を得た。

#### ・小野新平

電極で挟んだ電解質とポリマー材料の混合物に電圧を印加して形成される電気二重層を化学的に固定化した電気二重層エレクトレットを開発。この材料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。2019 年 4 月から 1 年間にわたり Purdue 大(アメリカ)にて「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」を研究中。

当初、CREST 年吉チームの主たる共同研究者としてイオン液体電気二重層に関する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もあり、さきがけ 3 期生として応募し、採択に至っている。CREST・さきがけ完全融合型の領域運営の特長を、端的に示す好事例となっている。

#### ・小菅厚子

GeSbTe 系バルク状試料に着目し、低温域(室温から 100°C程度を想定)で高い熱電変換特性を有する材料を研究した結果、

無次元性能指数 ZT が 0.4~1.3 の高い熱電特性の p 型熱電変換材料の開発に成功した。高性能の要因は、①材料特有の共鳴結合による低い格子熱伝導率と②フェルミ準位近傍の特異なバンド構造による高い電気的特性である。なお、SPring-8 による放射光 X 線回折測定から、この材料が「立方晶に近い歪の少ない菱面体構造」を有しており、600K 程度の高温で構造や形成相が変化し、構造が不安定性になることがわかった。応用の観点からは、高い熱電特性を持ち高温でも安定な材料に改良する必要がある。

#### ・桜庭裕弥

反強磁性体において発現する異常ネルンスト効果を利用した熱電発電実現に向け、大きな内因性異常ホール効果をもつ  $\text{Co}_2\text{MnAl}$  や  $\text{Co}_2\text{MnGa}$  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た。

アーク溶解法によって作製したホイスラー合金材料  $\text{Mn}_2\text{CoAl}$  (大きな異常ネルンスト効果の可能性のある物質) の輸送特性の測定から、ギャップレス半導体的電子構造の証拠として

捉えられていた半導体的な電気抵抗率の温度依存性や、正の磁気抵抗効果が確認された。また、内因性異常ホール効果を有するホイスラー合金系の研究も並行して進め、 $\text{Co}_2\text{MnGa}$  ではフェルミ準位の位置によって劇的に異常ネルンスト効果が増大することがわかり、過去最高クラスの  $6\text{--}7\ \mu\text{V/K}$  の発電能が確認された。

・田中有弥

荷電処理を必要としないエレクトレット型の振動発電を実現すべく、極性分子が自発配向するエレクトレット薄膜(極性分子配向薄膜)の開発を試みている。真空蒸着のみで作成した TPBi の表面電荷密度は  $1.7\text{mC/m}^2$  で、CYTOP をコロナ荷電によってエレクトレット化した際の値 ( $2.0\text{mC/m}^2$ ) に匹敵する値を得た。また、TPBi の表面電位(赤実線)の 10%減衰時間(21 時間)より、ワイドバンドギャップ材料の TPBi を用いて劇的に改善できることが分かった。また、極性分子の  $\text{Alq}_3$  を用いて振動発電デバイスを作製し、コンセプト通りに動作することを確認した。

・都甲薫

金属・半導体の層交換技術を使ってプラスチック上にシリコンゲルマニウム(SiGe)膜を形成する技術の開発を目指している。層交換 SiGe 薄膜は低温で固溶限相当の不純物がドーピングされ活性化する特徴をもち、低温合成膜として優れた熱電特性(出力因子)を示すことが知られている。

Al 誘起層交換( $400\ \text{°C}$ の Al-induced layer exchange: ALILE)法で(111)面に配向した大粒径( $50\ \mu\text{m}$ )の  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 薄膜形成に成功し、高い出力因子( $\text{Si}_{0.4}\text{Ge}_{0.6}$  ガラス上で  $430\ \mu\text{W/mK}^2$ 、プラスチック(ポリイミド)上で  $190\ \mu\text{W/mK}^2$ )を得た。また、Zn 誘起層交換(Zn-induced layer exchange: ZILE)を新たに開発し、 $80\ \text{°C}$ 合成した p 型試料(正孔密度: $10^{20}\text{cm}^{-3}$  オーダー)の出力因子  $240\ \mu\text{W/mK}^2$  (@室温)は低温合成膜としては世界最高性能である。

・矢嶋 赳彬

環境発電の電力変換回路の消費電力を劇的に下げるため、CMOS デジタル回路を組み込んだ新規ニューロン回路を考案。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。

従来のクロック同期デジタル回路による制御を、イベント駆動(間欠動作)型ニューロン回路に変更することで、振動発電回路の整流と電圧変換のための無駄なエネルギー消費がほぼ完全になくなり、劇的な低消費電力動作回路として注目されている。

・山根大輔

従来のエレクトレット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、MEMS 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て機能する新しい振動発電デバイスの発電に成功した。この結果、任意の MEMS 構造に任意のエレクトレット材料を組み合わせによるエレクトレットと CMOS-MEMS デバイスの集積化も可能になると期待される。

また、Dickson 型チャージポンプ整流回路(動作周波数：～MHz)をベースにした環境振動の周波数帯(<1 kHz)で動作する低閾値電圧の整流昇圧回路を提案し、回路シミュレータ上で動作を確認した。従来のダイオード整流器では利用できなかった微小な振動エネルギーを電気エネルギーに変換する回路として期待できる。

## (2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

### ①CREST

振動発電デバイスに関して、上野チームは、Fe-Ga 結晶を利用した磁歪発電デバイスを試作し、センサー用電源としてデータを無線で送る実験に成功している。磁歪発電デバイスの設計法も構築できていることから、ステップアップ評価を経て早期卒業とした結果、新たに起業したベンチャー企業で磁歪発電デバイスのサンプル出荷を行っている。年吉チームは、センサー用電源として使用できるエレクトレット振動発電デバイスを開発し、第 33 回先端技術大賞で経済産業大臣賞と文部科学大臣賞をダブル受賞する栄誉に輝いている。

熱電発電に関しては、希少金属 Te を含まない熱電材料の開発を進めてきた結果、森チームは BiTe 系を超える CoSb<sub>3</sub> 系熱電材料の発見、李チームは高熱電性能材料  $\alpha$ -MgAgSb の溶液作製方法を確立することができた。また、開発した磁性半導体硫化物を用いた熱電発電モジュールで温度差 1°C で 1mW を超す実用レベルの電力取得にも成功している(森チーム)。

さらに効果的な熱エネルギー取り出し方法として、塩見チームは①フレキシブル熱電材料膜の塗布技術と、②任意の曲面に貼り付けて可能な折り紙方式の発電モジュール、を開発した。これまで平面もしくは円筒表面に置く前提で作られていた熱電発電モジュールが任意の面に設置できることで利用範囲が格段に広がった。

電波発電に関しては、石橋チームでは、電波エネルギーを取り込むため、広帯域のメタマテリアル MACKEY アンテナを開発。整流素子については、急峻な立ち上がり特性を有する Super Steep トランジスタを用いた微小交流電圧の整流に成功している。河口チームも世界最高感度のナノサイズ BWD(Backward Diode)の開発に成功しているなど、電波発電の研究成果は国際会議などでも高く評価されている。

### ②さきがけ

材料開発から環境発電デバイスの実証まで一貫貫型の CREST 研究に対して、さきがけ研究では、学術的な研究に代表されるサイエンスまたはデバイス開発のテクノロジーのどちらかを二者択一で研究するよう勧めている。

振動発電に関しては、小野が開発した新概念の振動発電材料(電気二重層エレクトレ

ト)を LED 発光に利用して CEATEC でダンサーによるデモを行い、振動発電デバイスの発展の普及に貢献した。また、振動発電の要素技術に関しては、三次元立体構造形成技術を用いて所望の周波数の振動を取り込めるカンチレバーを実証した鈴木の研究や、低コスト有機圧電膜の作製、自己分極膜の製造技術など、振動発電の発電量増加につながる材料開発を行った中嶋の研究が特筆に値する。

熱電発電関係では、野々口と藤ヶ谷が別々に発見したカーボンナノチューブ(CNT)を n 型化する安定なドーパントは、今後、熱電 CNT に使用される可能性が高い。低コスト VI 属シリコン系熱電材料としては、野村が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ことは卓越した成果と認められる。黒崎、黒澤、都甲らがそれぞれ保有する独自の技術で新規な VI 属系熱電材料を開発し、良好な熱電性能の成果を得ている。電波発電に関しては、結晶軸をジグザグに配置した多層膜圧電トランスを発明した柳谷の研究が特筆に値する。その他にも微弱電波のエネルギー取得に必要な要素技術の研究が着々と進んでおり、今後、電波発電の実用化に貢献するものと考えている。

### (3) 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

CREST 研究チームの、これまでの論文・口頭発表・特許件数を以下に示す。

表 18. 第 1 期 CREST チーム毎の論文・特許・口頭発表件数 (2019 年 9 月 30 日現在)

第 1 期生	論文			特許		口頭発表		
	合計	国内	国際	国内	国際	合計	国内	国際
上野チーム	18	6	12	3	1	100	85(10)	15(1)
勝藤チーム	42	0	42	0	0	89	63(0)	26(23)
鈴木チーム	19	1	18	1	1	89	55(20)	34(13)
年吉チーム	20	6	14	18	6	77	35(5)	42(7)
中辻チーム	35	7	28	1	1	152	48(8)	104(73)
森チーム	77	1	76	5	0	97	44(19)	53(41)
渡邊チーム	21	0	21	1	0	98	62(16)	36(13)
第一期生計	232	21	211	29	9	702	392(78)	310(171)

招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載。

表 19. 第 2 期 CREST チーム毎の論文・特許・口頭発表件数 (2019 年 9 月 30 日現在)

第 2 期生	論文			特許		口頭発表		
	合計	国内	国際	国内	国際	合計	国内	国際
石橋チーム	34	1	33	3	0	73	54(6)	19(8)

大野チーム	8	0	8	5	0	66	34(12)	32(25)
河口チーム	6	0	6	11	0	18	9(1)	9(2)
神野チーム	42	10	32	1	1	108	78(32)	30(10)
塩見チーム	27	0	27	2	1	62	38(12)	24(13)
李 チーム	46	1	45	2	0	161	98(35)	63(29)
第二期生計	163	12	151	24	2	488	311(98)	177(87)

招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載。

CREST13 チームの外部発表総数は論文 395 件と口頭発表 1,190 件を合わせて 1,585 件のぼり、後掲の通り招待講演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。

さきがけ研究者による、これまでの論文・口頭発表・特許件数を以下に示す。

表. 20 さきがけ一期生の論文・口頭発表・特許件数 (2019年9月30日現在)

第1期生 研究者	論文			特許		口頭発表		
	合計	国内	国際	国内	国際	合計	国内	国際
黒崎 健	12	0	12	3	0	11	3(1)	8(7)
黒澤昌志	11	1	10	0	0	36	22(6)	14(5)
鈴木孝明	9	1	8	1	0	26	21(9)	5(1)
野村政宏	11	2	9	2	0	77	38(15)	39(13)
藤岡 淳	12	0	12	0	0	5	1	4(4)
藤ヶ谷剛彦	4	0	4	1	0	27	17(7)	10(6)
松野丈夫	1	0	1	0	0	4	2(1)	2(2)
湯浅裕美	2	0	2	0	0	16	8(2)	8(5)
第一期生計	62	4	58	7	0	202	112(41)	90(43)

招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載。

表. 21 さきがけ二期生の論文・口頭発表・特許件数 (2019年9月30日現在)

第2期生 研究者	論文			特許		口頭発表		
	合計	国内	国際	国内	国際	合計	国内	国際
高橋竜太	4	1	3	0	0	7	5(2)	2(2)
山田智明	10	7	3	0	0	25	10(3)	15(5)
酒井英明	12	1	11	0	0	18	13(5)	5(3)
村田理尚	2	0	2	0	0	25	24(10)	1(1)

中村優男	13	0	13	1	1	19	17(8)	2(0)
中嶋宇史	16	4	12	9	0	53	40(4)	13(5)
片瀬貴義	15	0	15	0	0	39	23(6)	16(1)
野々口斐之	11	1	10	0	0	26	15(13)	11(9)
柳谷隆彦	32	1	31	2	3	155	101(12)	54(6)
第二期生計	115	15	100	12	4	367	248(63)	119(32)

招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載。

表. 22 さきがけ三期生の論文・口頭発表・特許件数 (2019年9月30日現在)

第3期生 研究者	論文			特許		口頭発表		
	合計	国内	国際	国内	国際	合計	国内	国際
衛慶碩	4	0	4	0	0	1	0	1
岡本敏宏	4	0	4	7	1	65	62(10)	3(1)
桜庭裕弥	4	2	2	0	0	11	8(4)	3(1)
山根大輔	2	0	2	0	0	7	4(2)	3
小菅厚子	7	0	7	1	0	25	19(4)	6(1)
小野新平	8	2	6	3	3	9	6(5)	3(3)
田中有弥	0	0	0	1	0	2	1	1
都甲薫	9	0	9	1	0	14	11(5)	3(1)
矢嶋赳彬	4	0	4	1	0	29	16	13
第三期生計	42	4	38	14	4	163	127(30)	36(7)

招待講演数は括弧で口頭発表数の内数として記載。

さきがけ研究者 27 名の外部発表総数は国際会議での 82 件の招待講演を含めて、論文 219 件と口頭発表 732 件を合わせて 951 件にのぼり、後掲の通り招待講演や受賞も多い。その結果、総じて国際的にみて最高水準の成果が得られたと評価できる。

### ①技術的な観点からの貢献

以下では本完全複合研究領域の特徴に沿って CREST とさきがけの区別をせずに、双方まとめて「科学的・技術的な観点からの貢献」について説明する。

図 1 に示すように、環境発電デバイスは、エネルギー取込み機構、エネルギー変換材料、電力変換回路の 3 つの構成要素から成り立っている。以下、各構成要素に対する研究成果の科学的・技術的観点からの貢献について説明する。

#### エネルギー取込み機構

鈴木(さきがけ)は、所望の周波数振動や歪に応じた振動発電デバイスに向けてリソグラ

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)の設計技術を開発し、複数の自由度の下でデバイス構造を最適化する道を拓いた。また、CRESTの鈴木チームは、電極間に高い異方性誘電率を持つフッ素系ネマチック液晶を入れたエレクトレット振動発電デバイスで60倍以上の大きな発電出力を得ており、振動発電デバイスの高出力化に大きな前進が認められる。

熱電発電に関しても塩見チームが提案した折り紙型熱電発電デバイスは、任意の表面形状(粗面・曲面・伸縮面)に対して熱抵抗の低減が可能であり、実効的に熱エネルギーの取込み効率が高まって、熱電デバイスの発電量が增加する。

### エネルギー変換材料

振動発電用の新規材料として、小野(さきがけ)は電解質とポリマー材料の混合物の電荷固定化処理による電気二重層エレクトレットを用いた接触・離反型の新構造発電デバイスを提案している。これは従来とは異なるメカニズムで動作する振動発電デバイスとして、その応用範囲の拡大が期待できる。また、中嶋(さきがけ)の開発した圧電性非フッ素系ナイロンフィルムや、鈴木チームが開発した高表面電荷密度( $4\text{mC}/\text{m}^2$ )のエレクトレット材料は、その高い性能から、今後、振動・圧電デバイスに組み込まれて発電効率の向上が期待できる。

熱電材料としては、森チームの磁性半導体熱電材料、李チームの $\alpha\text{-MgAgSb}$ 、村田(さきがけ)の開発した塗布型有機熱電材料は、安価な熱電発電デバイスの普及拡大に貢献する可能性の高い。また、カーボンナノチューブを熱電材料として使用する際には、藤ヶ谷(さきがけ)、野々口(さきがけ)が開発したn型ドーパント剤の使用は必須である。

受信した電波の電圧増幅ができる柳谷(さきがけ)の分極反転多層構造圧電トランスは、電波発電に貢献するものと思われる。

### 電力変換回路

石橋チームのSST(Super steep FET)や河口チームのBWD(Backward diode)は新しい概念に基づく整流デバイスであり、その動作検証も行われていることから電波発電の取得電力の増加に役立つ。矢嶋(さきがけ)が考案したCMOSデジタル回路を組み込んだニューロン回路は、環境発電デバイスの種類に関わらずデバイス横断的に使用される極微小電力動作回路として発展が期待されている。

### 環境発電デバイス設計法

多量の環境発電デバイスを社会実装するには、上記の環境発電デバイスを構成する3つの要素を高度化するだけでなく、所望の特性を有するデバイスの最適設計技術も重要となる。上野チームは永久磁石を使って積層ユニモルフ構造の磁歪式振動発電デバイスの電力が最大になる最適バイアス磁場の印加条件を明らかにし、年吉グループはエレクトレット発電で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ている。

熱電デバイスにおいても、渡邊チームは構造の微細化による発電密度のスケーリング則

を用いてプレーナ型熱電発電デバイスの設計法を示した。

このように環境発電デバイス設計の基盤となる解析モデルを構築して、本研究領域の終了時点では、コンピュータ上でデバイス特性が予測できるシミュレーション環境の下で、第三者によるデバイス設計の便宜を図りたい。

CREST では材料の研究開発に留まらず、終了時には環境発電を実証することを求めていることもあり、各チームは下記に示すように環境発電デバイスの実証に向けて民間企業との連携を深めている。

- 年吉チーム： 開発した振動発電デバイスを鷺宮製作所と共同で製品の量産化を検討中  
特許出願 18 件は CREST チームの中でも突出している。
- 鈴木チーム： 民間企業と共同で振動発電の製品化に向けた取り組みを開始。  
協力企業と共同で新エレクトレット材料の開発に成功。
- 野村チーム： 後半フェーズにおいて、企業メンバーが主たる共同研究者として本研究課題に参画し、共同で熱電発電デバイスを開発中。
- 河口チーム： 会社都合でステップアップ辞退になったが、BWD の実用化に向けた取り組みは富士通研究所で継続予定。
- 神野チーム： 10 社と圧電材料の実用化に向けた産学共同研究を展開中。  
企業メンバーが主たる共同研究者として本研究課題に参画している。
- 塩見チーム： 熱電発電デバイスを用いた IoT 農業センサーを北海道の農場で実験継続中。企業と連携して共同研究を行っている。
- 李チーム： 熱電性能材料  $\alpha$ -MgAgSb の低コスト製造法の確立。  
後半フェーズでは熱電材料研究から企業との連携の下、熱電モジュール開発へ。

このように、ほぼ全てのチームで産業界と連携して環境発電デバイスの開発を目指している。

## ②科学的な観点からの貢献

野村(さきがけ)が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。

中辻チームは日本発のワイル反強磁性材料を熱電発電に利用すべく、異常ネルンスト効果の研究に果敢に挑戦した。当該分野の日本のトップクラスの研究者が協力して得た学術的な成果は「トポロジー」の概念がエネルギー分野でも適用可能であることを示した最初の具体事例として後世に残るものと思われる。

## (4) 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。しかし、センサー駆動に必要な電力を、これまでのように乾電池に頼っているのは、電池の交換、廃棄処理やそれに伴う人件費などの負担が大きくなる。将来的には環境発電デバイスも併用してこれらの負担軽減を図ることが社会的・経済的に重要である。

この電池代替品としての振動発電では上野チームが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。また、年吉チームの鷺宮製作所がエレクトレット振動発電デバイスの商品化に向けてIoT無線センサーノードのフィールドテストを始めており、安価な振動発電デバイスの上市で急速な普及を目指している。

さらに環境発電デバイスの社会実装には材料のコストや安全性などで特段の配慮が必要と考えている。現在、有害物質の鉛を含むPZT(圧電材料)の代替として、神野チームでは非鉛圧電薄膜(K, Na)NbO<sub>3</sub>とBiFeO<sub>3</sub>を開発中であり、中嶋(さきがけ)も化学メーカーと共同で優れた圧電性を有するナイロン系高分子膜の開発に成功している。さらに熱電材料に関しても、有害物質Te(レアメタル)を含まない熱電材料の開発に取り組んでいる。なかでも森チームは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開発の研究成果を基に大型プロジェクト型未来社会創造事業(31億円上限)への採択・移行が決定しており、今後、熱電発電デバイスの社会実装がさらに加速されるものと期待している。この他、熱電材料のコスト低減を目指して、渡邊チーム、塩見チーム、野村チームはシリコンをベースとした熱電材料の開発を通して、安価で安全な熱電発電デバイスでSociety5.0の実現に貢献する。

環境発電デバイスのシステムレベルでの早期社会実装に向けて、民間企業や自治体と共同で環境発電デバイスの社会実験を実施している。例えば、JR東日本が主導するスマートシティ構想の中では、圧電デバイスと機械学習を用いて、駅構内の歩行者の流れを把握するシステムを開発中であり、葛飾区では4つの施設に複数の圧電センサー素子を設置して建造物の構造モニタリングを実施し、安心安全の町づくりを行っている。

この他、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。このことは本研究領域の振動発電の研究成果が振動発電の国際標準化に貢献していることを示している。

## (5) 顕彰・受賞

### ①CREST

本CRESTの主な受賞としては、森孝雄研究代表者のnano tech 大賞(2016)や年吉チームの第33回先端技術大賞<社会人部門>経済産業大臣賞(2019)、先端技術大賞<学生部門>

文部科学大臣賞(2019)、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(2017)、李チームの日本熱電学会進歩賞(2018)など産業技術に関する受賞が多いのもこの研究領域の特徴と言える。主な顕彰・受賞は以下の通りである。

#### CREST1 期生メンバー

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)  
 山田 駿介 第 33 回先端技術大賞<学生部門>文部科学大臣賞(2019)  
 三屋 裕幸 第 33 回先端技術大賞<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

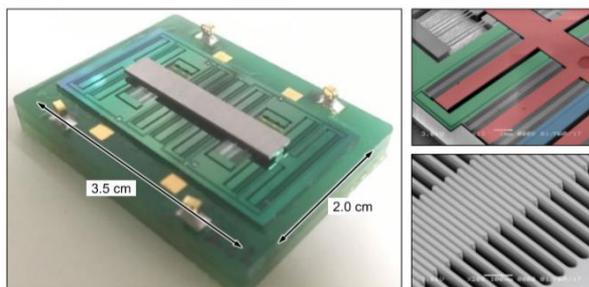


図 11. 先端技術大賞(経済産業大臣賞)を授与された振動発電デバイス(年吉チーム、2019 年)

#### CREST2 期生メンバー

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)

## ②さきがけ

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と考えられる。

### さきがけ一期生

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)  
日本機械学会第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム  
若手優秀講演表彰(2019)  
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)  
平成 28 年度顕彰 一般財団法人生産技術研究奨励会(2016)  
PCOS2016 Best Paper Award (2016)  
丸文研究奨励賞(2017)  
The Young Scientist Award,  
The International Symposium on Compound Semiconductor (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)  
平成 30 年度花王科学奨励賞 化学・物理学部門(2018)  
第 31 回 安藤博記念学術奨励賞(2018)  
東京工業大学 挑戦的研究賞・末松特別賞(2019)  
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)  
早稲田大学リサーチアワード(国際研究発信力)(2017)

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)

### (6) その他、主要な新聞・雑誌・テレビ等の報道

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～エレクトロレットと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(関連記事10件)

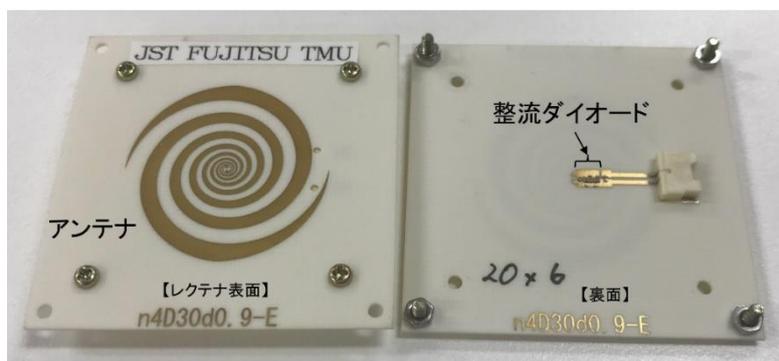


図 12. TBS の番組「未来の起源～若き研究者たちの挑戦～」で紹介された電波発電  
(2019 年 12 月 22 日)

### (7) 今後の期待や展望

CREST では、今後の研究論文発表などによる科学技術への貢献に努めるとともに、最終年度の環境発電デバイスの実証に向けて、技術革新(産業貢献)につながる研究に対して支援を続けていく。CREST の後半フェーズでは、さきがけ研究者も加わった新チーム構成の中で異分野技術の相乗効果により、世界に類のない高水準の成果が期待できると考えている。

### (8) 複合領域として

#### ①アウトリーチ活動

複合領域として企業技術者を対象とした技術展示や技術相談会を表 23 の通り開催してきた。

表 23. 展示会

#	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 月 1 日	JST フェア 2018—科学技術による未来の 産業創造展 ・ 専用ブースを設置し、5 件のデモ展示	東京ビッグサイト(東京)

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 ・JSTブース内に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)

## ②人材輩出や成長の状況について

・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 研究期間中に昇進22(助教:10名、准教授:6名、教授6名)があった。

・「さきがけ」では、一期生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。二期生では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。

## ③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

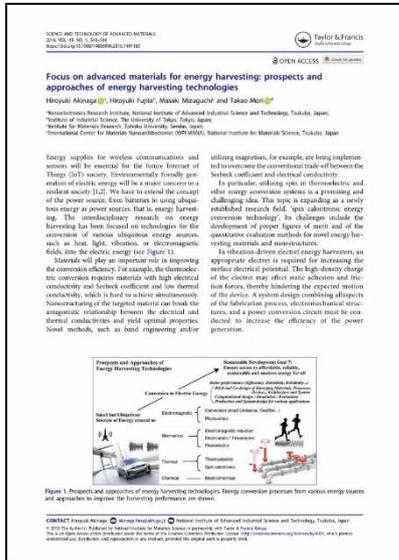
- ・応用物理学会 Phonon Engineering G と JST「微小エネ」領域合同研究会  
(2017年7月)
- ・応用物理学会エネルギーハーベスティング研究グループの発足(2018年10月)
- ・応用物理学会春期講演会: シンポジウム  
「エネルギーハーベスティングの新展開」(2019年3月11日)
- ・応用物理学会春期講演会でシンポジウム  
「超スマート社会のためのエネルギーハーベスティングの発展」(2020年3月13日)

### (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」  
(2018年11月6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。

Introduction 1

(<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 回に達する等、大きなインパクトを与えている。

(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 1~2 カ月毎に領域ニュースレターを発行している。2016 年 9 月発刊以降、32 号まで続いている。

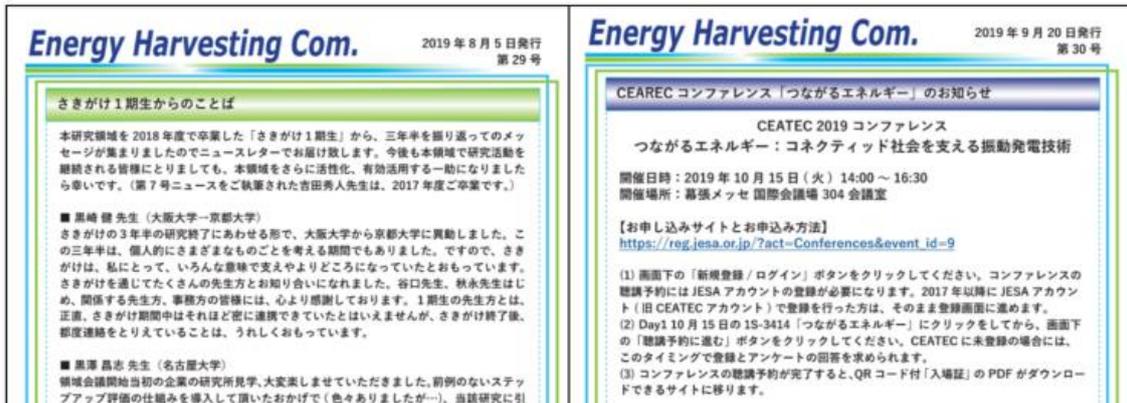


図 13. 領域ニュースレター (左)第 29 号、(右)第 30 号

(v) SciFoS(Science For Society)活動

JST がさがけ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おり、さきがけ研究者合計11名(一期生3名、二期生4名、三期生4名)、CREST チームの若手研究者合計4名がこの活動に参加している。また、領域総括・副総括からも訪問先企業紹介を行うという試みを行っている。JST のホームページに掲載されている報告書によれば、「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、その後の研究の道しるべになっている」、「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。

#### (vi) JST における新しい試み

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) 懸案事項

CREST・さきがけ複合領域として運営してきた本研究領域では、さきがけ研究者がすべて研究期間を終える2020年度末で複合領域としての機能がなくなることが懸案事項である。本研究領域では、今後さきがけ卒業生がエネルギーハーベスタの研究に関する情報交換ができる受け皿を提供すべく、応用物理学会エネルギーハーベスタ研究グループを立ち上げ(2018年10月)、春期講演会の時にシンポジウムを開催して卒業生の交流を続けている。さらにさきがけ卒業生をCREST領域会議に出席するよう要請し、情報交換できる機会を増やして環境発電に携わる人材の確保を継続していきたいと考えている。

## 7. 総合所見

### (1) 研究領域のマネジメントについて

本研究領域は超スマート社会(Society5.0)で必要な膨大な数の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)を研究開発することにある。研究対象はエネルギー源毎に異なるので、研究課題はきわめて幅広く分散することが想定されることから。本研究領域ではほぼすべての環境発電をカバーできるように研究課題を採択することにした。

公募の広報に関しては、ホームページによる紹介と、東京(3回)と大阪(2回)で開催した公募説明会で、本研究領域の意図するところや期待する研究分野を伝えた。こうした活動によって多くの研究課題の応募があった。採択にあたっては、応募者との面接選考において、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、などに重点を置いた。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広い学術・技術分野から、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。

本研究領域ではこれらの採択課題をバーチャルな研究所として運営するために、さきがけ研究と CREST 研究を“完全”一体化して運営することとした。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研究領域の研究目的を共有すること、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活かすこと、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、総括・副総括・アドバイザーのきめ細かな指導、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)で研究内容を領域メンバーに紹介し、研究者間をつなぐ契機とした。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。特に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同じように扱い、領域会議などに参加させ、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、さきがけ研究者と CREST 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でき、数多くの共著論文も発表されている。

また、会議やサイトビジットでは、世界的に活躍している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ている。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総括・副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や早期終了などの指導、さらには故障した実験設備の修理や研究状況に応じた予算措置を行

っている。

研究期間の終了の1年前にはアドバイザーを含む面談を行って、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、それらの問題を解決に導く努力をした。

また、2019年以降は卒業した第一期のさきがけ・CRESTの研究者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ている。これに関連して、本領域が終了する2022年以降もこの研究者集団の受け皿として応用物理学会に新しくエネルギーハーベスティング研究会(2018年10月)を発足させた。

本研究領域運営の最大の特長は、研究開始2年半経過後にCRESTのステップアップ評価を行い、過去の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。この結果、当初立ち上げた13チームのうち8チームが採択され、新規の“さきがけ”メンバー中心の1チームを加えた9チームが後半フェーズの研究を開始することが決定した。その後、ステップアップ採択の1チームが別のプログラムに移行し、来年度のCRESTは8チームに数が減っている。この本研究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。来年度のCRESTに参加しないチームについても、振動発電デバイスの実証を前倒しで進めてベンチャーの起業に至った上野チーム(「地域イノベーション・エコシステム形成プログラム」に採択)や、新原理・新材料に基づく熱電発電に果敢に挑戦し、その学理解明に関して世界最高水準の成果をあげた中辻チーム(新規CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」に採択)、磁性熱電発電デバイスのテーマで大型プロジェクト型未来社会創造事業(最大9年半、31億円上限)に採択された森チームなど、総じて高い水準の研究が行われてきたことを裏付ける結果となっている。

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の中間評価時やさきがけの研究終了時などには、一般公開の報告会と技術相談会を毎年開催して、この分野に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つながっている。

## (2) 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況

環境発電デバイスの開発やその基盤となる学術的な学理解明などに関して、さきがけやCRESTの研究成果や達成度には研究者毎に質・量ともに濃淡があり、一般論として総括することは難しいが、本研究領域の多くの研究課題において戦略目標の達成に成果を上げていると言える。エネルギー源毎の戦略目標の達成状況を以下に説明する。

### ①振動・圧電発電

振動発電デバイスに関しては、総じて実用的な水準に達している研究課題が多い。上野チ

ームは、Fe-Ga 結晶を利用した磁歪発電デバイスを試作し、センサー用電源としてデータを無線で送る実験に成功している。磁歪発電デバイスの設計法も構築できていることから、ステップアップ評価を経て早期卒業とした結果、新たに起業したベンチャー企業で磁歪発電デバイスのサンプル出荷を行っている。年吉チームはセンサー用電源として使用できるエレクトレット振動発電デバイスを開発し、第 33 回先端技術大賞で経済産業大臣賞と文部科学大臣賞をダブル受賞する榮譽に輝いている。さきがけ研究者の小野は新概念の振動発電材料(電気二重層エレクトレット)を LED 発光に利用して CEATEC(日本最大の先端技術見本市、参加者 14 万人)でダンサーによるデモを行い、振動発電がエンターテイメント分野他、様々な分野で活用できることを示した。

振動発電の要素技術としては、鈴木(さきがけ)は三次元立体構造形成技術を用いて所望の周波数の振動を取り込めるカンチレバーを実証している。この他、世界最高性能の有機エレクトレット膜の開発や低コスト有機圧電膜の作製、自己分極膜の製造技術など、振動発電の発電量増加につながる材料開発にも大きな成果が得られている。

その一方で圧電デバイス関連では、歴史のある PZT の性能を超える材料開発に難航しているが、多層構造などエネルギー取込み機構の工夫で発電量の増大を確認するなど、今後の研究の進捗に期待できる成果を得ている。

## ②熱電発電

現在、市販の熱電材料 BiTe には有害な希少元素の Te が含まれている。このため本研究領域では Te を含まない熱電材料の開発を進めてきた。その結果、BiTe 系を超える CoSb<sub>3</sub> 系熱電材料の発見や、高熱電性能材料  $\alpha$ -MgAgSb の溶液作製方法を確立することができた。また、開発した磁性半導体硫化物を用いた熱電発電モジュールで温度差 1°C で 1mW を超す実用レベルの電力取得に成功している。

さらに社会実装に向けた効果的な熱エネルギー取り出し方法として、①フレキシブル熱電材料膜の塗布技術の開発、②任意の曲面に貼り付けて可能な折り紙方式の発電モジュールの開発、により熱電発電デバイスの利用範囲を格段に広げることができたと考えている。

一方で、我が国発のトポロジーを利用した反強磁性スピントロニクス材料の熱電発電応用やスピンゼーベック効果の増強を目指した研究に果敢に挑戦した。いずれの材料もセンサー用電源で必要とされる発電量に達しない結果となったが、この分野における物性研究面の成果は著名な国際誌に掲載され、前者においては被引用数が 100 近くに至るなど、学術的には大きな貢献をしたと判断している。

## ③電波発電

電波発電のボトルネックは、電波エネルギーを取り込むアンテナと、高周波交流電流を直流変換する整流素子にある。前者については、導電体近傍でも使用でき、広帯域の電波を受けるメタマテリアル MACKEY アンテナを開発した。整流素子については、石橋チームは急峻

な立ち上がり特性を有する Super Steep トランジスタを用いた微小交流電圧の整流に成功している。河口チームも世界最高感度のナノサイズ BWD(Backward Diode)の開発に成功しているなど、本研究領域の電波発電の研究成果は国際会議などでも高く評価されており、特筆に値する。また、柳谷(さきがけ)はジグザグ構造の多層圧電膜の圧電トランスを発明し、狭帯域の電波を 12 倍に増幅する実験に成功している。このように微弱電波のエネルギー取得に必要な要素技術の研究が着々と進んでおり、これらが将来、電波発電の実用化に向けて貢献するものと考えている。

以上の研究成果は、さきがけ研究者や CREST 研究チームが「おにぎり」を意識しつつ研究課題に挑戦し、何がボトルネックであるか、を自問自答しながら研究してきた姿勢の賜物である。

上記の主要エネルギー源以外にも液体の流れを利用した発電や、空間反転対称性のない結晶でみられるシフト電流(光電効果)による発電など、極めて挑戦的なテーマにも取り組んだが、残念ながら、現段階ではセンサー用電源の利用に定常的に使えるほどの発電量は得られなかった。

### (3) 本研究領域を設定したことの意義

環境発電に関する技術開発は、NEDO(経済産業省)の国家プロジェクトの中でも実施されており、環境発電が将来の我が国にとって重要な技術になると期待されている。ただ、この国家プロジェクトでは環境発電のデバイス実証や実用化に重点が置かれているのに対して、本研究領域の基軸は独創性や革新性に比重を置きながら出口を見据えた学術面の学理究明と社会実装可能な環境発電デバイスの原理実証である。本研究領域の使命は、環境発電デバイスの研究開発の過程で得られる無数の実験データ(暗黙知)をデバイスの設計に生かせる普遍的な形式知にすることである。そのため、エネルギーハーベスター機能を支配する本質的な素過程を分離・解明し、その素過程をデバイス設計に資するモデルにする研究が環境発電デバイスの社会実装への近道だと考えている。環境発電デバイスの設計に関する形式知が揃っていれば、それを使って発電量を机上で見積もることができ、デバイスの試作期間も大幅に短縮できる。この意味で、発電機構に関する素過程の解明やエネルギー損失を抑える設計論を本研究領域で横断的に議論できた意義は大きかったと考える。また、環境発電デバイスの製品化を見据えて課題を抽出し、逆に製品側からバックキャストして課題の解決を進めるプロジェクト型研究の重要性が、本研究領域に参加している研究者の共通認識となったことも本研究領域を設けた意義である。

### (4) 今後への期待や展望

本研究領域では、発電量の増加につながる材料の開発に加え、効果的なエネルギー取得機構やエネルギー損失の少ない電力変換回路設計など、電力を高効率で環境から取得する研究を通じて世界的に高水準の研究成果が数多く得られた。その一方で、環境エネルギー発電

に関連する研究課題はほぼ無数にあることから、CRESTの13チームと27名のさきがけ研究者が3年半かけて研究しても、環境発電の一部を明らかにできたに過ぎない。この環境発電分野には、欧米のみならず中国や韓国は日本を上回る投資を行っていることから、今後、国際的な協業は不可避である。将来、本研究領域を終了したさきがけメンバーやCRESTチーム内で活躍した若手研究者が、国際的な水平分業を見据えて新たな展開をしてくれることを期待している。

#### (5)感想、その他

本研究領域が複合領域として策定された最大の効用は、若手研究者の育成とそのネットワーク作りにある。異なる専門分野の研究者が集まったバーチャル研究所の意味は大きく、若手研究者が普段出会うことのない分野の研究者との交流で、専門の垣根を取り払い、戦略目標の達成のための専門研究分野を超える共同研究体制を構築し、それを運用してきた経験を通して視野の広い研究者が数多く育ったと信じている。