

戦略的創造研究推進事業
—CREST・さきがけ複合領域—

研究領域「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」

複合領域事後評価用資料

研究総括：桜井貴康

副研究総括：横山直樹

2021年10月

目 次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	5
(3) 研究総括	6
(4) 採択研究課題・研究費	7
2. 研究領域および研究総括の設定について	12
(1) 研究領域選定の理由	12
(2) 研究総括指定の理由	12
3. 研究総括のねらい	15
(1) CREST	15
(2) さきがけ	15
(3) 複合領域として	16
4. 研究課題選考について	17
(1) CREST	17
(2) さきがけ	22
(3) 複合領域として	26
5. 領域アドバイザーについて	27
(1) CREST	27
(2) さきがけ	28
6. 研究領域のマネジメントについて	31
(1) CREST	31
(2) さきがけ	41
(3) 複合領域として	52
(4) 研究領域中間評価結果への対応	56
7. 研究領域として戦略目標の達成状況について研究を実施した結果と所見	58
(1) CREST	58
(2) さきがけ	70
8. 総合所見	84
(1) 研究領域のマネジメント	84
(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況	85
(3) 本複合領域を設定したことの意義	85
(4) 今後への期待、展望	86
(5) 所感、その他	86

1. 研究領域の概要

(1) 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」

①達成目標

従来のシリコンデバイスによる微細化、集積化が限界を迎える中、現在より2桁以上低い消費電力と2桁以上高速の情報デバイスを開発することを共通目標とし、将来のエレクトロニクス産業の基盤を確立するため、新規機能性材料の適用可能性の追求等による素材技術（先端材料や部材の開発及び活用に必要な基盤技術）の創出、新材料・新原理・新構造の論理素子・記憶素子の動作検証等によるデバイス技術の構築、先進的なナノテクノロジー等の実装に向けたナノシステム※最適化技術の創出、そしてそれら技術の融合に取り組むことにより、以下の目標を達成することを目指す。

- (i) 革新デバイスを下支えする新規機能性材料の創製及び適用可能性の追求による素材技術の創出
- (ii) 超低消費電力、超高速、超大容量等を可能にする新材料・新原理・新構造の論理素子・記憶素子等による革新デバイス技術の創出
- (iii) 異分野の要素技術を集積・統合・融合することによるナノシステムの最適設計に向けた基盤技術の創出

※本戦略目標においては、ナノテクノロジーを基軸として他分野の要素技術を集積・統合・融合し、全体として重要課題の解決に資する高度な機能を提供することが可能で、かつ社会的に認知される部品・装置・システムのことと定義する。

②将来実現し得る重要課題の達成ビジョン

本戦略目標において「①達成目標」に記載した研究成果を企業等の実用化研究につなげることにより、その諸技術を活用した革新的なデバイスが開発され、情報通信機器やシステム構成機器の超低消費電力化、高機能化や多機能化の実現が可能となる。

これにより、具体的には以下のような社会の実現につなげ、第4期科学技術基本計画（平成23年8月19日閣議決定）に掲げられた「エネルギー利用の高効率化及びスマート化」、「産業競争力の強化に向けた共通基盤の強化」、「領域横断的な科学技術の強化」等の達成に貢献することを目指す。

【1】あらゆる情報通信端末、情報デバイス等が超低消費電力化されることにより、省エ

エネルギー時代に適合した持続可能な高度情報通信ネットワーク社会の形成に大きく貢献する。

- 【2】新たな動作原理に基づくデバイスの融合による、タッチパネル、フレキシブルディスプレイ、太陽電池、バイオセンサ等、多方面での応用が可能となり、真のユビキタス社会が実現される。
- 【3】知識基盤社会、低炭素社会、高度情報化社会等に対応した社会的付加価値を有する最終製品を生み出すことにより、我が国の国際競争力を堅持し、新たな産業構造を切り拓（ひら）く基幹産業が育成される。

③具体的内容

（背景）

現在、半導体産業は世界的に厳しい競争に直面しているが、最近の予測※1 では、2012年の市場規模は 2,899 億ドルと過去最高であった前年度をわずかに下回ったものの、今後も緩やかな成長を継続していくと予想されており、その位置付けについては、例えば「半導体産業は「見えるインパクト」と「見えざるインパクト」を通して、日本の社会、経済、環境に大きな影響を与えている」と紹介※2 されるなど、産業競争力の基盤としての役割を果たしている。また、今後の本格的な IT 化に伴い、我が国の情報量は爆発的に増大（情報爆発）し、試算では 2025 年には現在の 100～200 倍もの情報がインターネット上を行き交う時代となり、こうした情報爆発に対応すべく、情報を処理する IT 機器の台数が大幅に増加するとともに、各機器の情報処理量が急増し、今後の IT 機器による消費電力量の急増が深刻な課題になると指摘されている（消費電力量が 2025 年には 2006 年比で約 5.2 倍、2050 年には 2006 年比で約 12 倍になると推計されている。）※3。また、民間調査機関の推計※4 によれば、世界の情報量は、2020 年には約 40 ゼタバイト（2010 年度時の約 50 倍）へ拡大する見込みであり、この増え続ける情報を処理するために、現在のシリコンデバイスの集積化、微細化は今後も必須の流れとなっている。しかし、現状のシリコンデバイスでは、集積化に伴う素子の消費電力増大、微細化の物理的限界、特性ばらつきの増大等が喫緊の課題となっている。これらの制約を突破する方策として、近年、世界的に進展の著しいナノエレクトロニクス技術を駆使して、従来の CMOS（相補性金属酸化膜半導体）技術に沿って新たな機能を持った材料及びデバイスを付加し性能向上を図る方向と、従来の CMOS を超える新しい動作原理に基づくデバイス及びシステムの実現を目指す方向とが模索されている。

（研究内容）

このような現状において、本戦略目標では、微細化・高速化や低消費電力・多機能化を個別に追及するのではなく、先進的なナノテクノロジー等の要素技術を糾合することにより、革新的なシーズを創出し、将来のエレクトロニクス産業の基盤を確立することを目的として、具体的には、以下のような研究を行う。なお、本戦略目標では、材料、デバイス、システム等、それぞれの分野の専門家がプロジェクトの早期の段階から連携・協働できる体制を

構築し、現在より2桁以上低い消費電力と2桁以上高速の情報デバイス（携帯電話、パソコン、ストレージ等をはじめとするICT機器全般）を開発するという共通目標の達成に向け、戦略的かつ機動的な研究を実施することが求められる。具体的には、以下の研究を想定する。

(i) 革新デバイスを下支えする新規機能性材料の創製及び適用可能性の追求による素材技術の創出

- ① 新規機能性材料の構造や物性に関する計測・解析・加工プロセス技術の創出
- ② 革新デバイスになることが期待されるグラフェン等の原子薄膜の結晶実現・機能解明・学理構築に関する研究

(ii) 超低消費電力、超高速、超大容量等を可能にする新材料・新原理・新構造の論理素子・記憶素子等による革新デバイス技術の創出

- ③ 優れた物性を有する新物質・新規機能性材料をデバイスに応用する技術に関する研究
- ④ 異種材料の接合等による新機能デバイスの提案と原理実証
- ⑤ 微細化・高集積化を可能とする革新的なデバイス・アーキテクチャ技術の創成

(iii) (i)、(ii)をはじめとする要素技術を集積・統合・融合することによるナノシステムの最適設計に向けた基盤技術の創出

- ⑥ デバイス機能を発現・最適化するための物質構造及びデバイス構造の設計及び計算機シミュレーション技術の創出・素材、回路等の様々な階層の連携・協調による超低消費電力化技術の創出

※1 世界半導体市場統計 (WSTS: World Semiconductor Trade Statistics)、「WSTS Semiconductor Market Forecast Autumn 2012」、2012.11

※2 一般社団法人半導体産業研究所 (Semiconductor Industry Research Institute Japan)、「半導体産業が日本の社会・経済・環境に与えるインパクトの社会科学分析 最終報告書」、2009.7

※3 経済産業省「情報通信機器の省エネルギーと競争力の強化に関する研究会」

※4 IDC、「Big Data, Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East」、2012.12

④政策上の位置付け（政策体系における位置づけ、政策上の必要性・緊急性等）

「第4期科学技術基本計画」では、エネルギー利用の高効率化及びスマート化に向け、「情報通信技術は、エネルギーの供給、利用や社会インフラの革新を進める上で不可欠な基盤的技術であり、次世代の情報通信ネットワークに関する研究開発、情報通信機器やシステ

ム構成機器の一層の省エネルギー化、ネットワークシステム全体の最適制御に関する技術開発を進める」こととされ、また、産業競争力の強化に向けた共通基盤の強化のため、「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」こととされている。

総合科学技術会議においても、「2013 年度科学技術重要施策アクションプラン」（平成24年7月19日総合科学技術会議 科学技術イノベーション政策推進専門調査会）において、「大幅なエネルギー消費量の削減を目指す「エネルギー利用の革新」」が政策課題として掲げられ、「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」が重点的取組とされた。また、「2013 年度重点施策パッケージの重点化課題・取組」（同上）では、我が国で発見されたカーボンナノチューブやグラフェン等のナノカーボン新材料を、世界に先駆け様々な部材・製品（熱交換器、電池、エレクトロニクスデバイス、複合材料等）へ応用することにより、幅広い産業で部材、部品及び製品の産業競争力を高めるとともに、新たな成長産業を創出することなどから、我が国の産業競争力の強化に向けた重点的取組として、「ナノカーボン新材料（CNT（Carbon Nano Tube）・グラフェン等）の様々な分野への応用/商用技術の開発」が提示された。

以上のとおり、「グリーンイノベーションの推進」や「我が国の産業競争力の強化」に向け、革新的な材料による省エネデバイスの開発が政策的にも求められているところである。

⑤他の関連施策との連携及び役割分担・政策効果の違い

大学等におけるこれまでの取組や既存の戦略的創造研究推進事業等の成果を積極的に活用するとともに、関連するプロジェクト間と緊密な連携を確保し、速やかに成果の実用化を図る。具体的には、本戦略目標において創出される成果については、将来のエレクトロニクス産業の基盤を確立する観点から、研究期間中であっても、知的財産を適切に確保した上で、研究成果の実用化を目指す産学連携事業等や民間企業のプロジェクトへ速やかに展開する。特に、幅広い産学官の研究者が集結する TIA（つくばイノベーションアリーナ）やその他の研究開発拠点等の枠組みを最大限に活用し、本戦略目標における基礎研究の成果を、我が国の産業競争力の強化に直結させる体制を構築する。

⑥科学的裏付け（国内外の研究動向を踏まえた必要性・緊急性・実現可能性等）

米国では2011年2月に改定された「米国イノベーション戦略」において重点項目として「ナノテクノロジーを加速化する」との表現が盛り込まれ、特にナノエレクトロニクスへの投資の必要性が謳（うた）われている。また、欧州においては、長期的かつ多額の資金が必要なハイリスク研究で、産業界の支援が明確な領域を優先的に支援する「ジョイント・テクノロジー・イニシアティブ（JTI）」を立ち上げており、その中に、「ナノエレクトロニク

ス」が含まれている。中国においては、国家中長期科学技術発展計画綱要（2006～2020年）に基礎研究分野の重点科学研究のテーマとしてナノテクノロジー研究が盛り込まれており、具体的な重点課題として「コンセプト及び原理段階のナノデバイス、ナノエレクトロニクス、ナノバイオ・医学」が挙げられている。

一方、我が国の現状については、「ナノエレクトロニクスでは日本は総じて高い水準を保つが、世界のアクティビティと比較すると必ずしも楽観できるものではない。特にナノエレクトロニクスを牽引（けんいん）するナノCMOS技術においては、世界的に研究開発の拠点化とアライアンスが進む中、日本メーカーの研究開発アクティビティは大幅に低下している。深刻なのはアカデミアの基礎研究・開発も他国に遅れ始めたことであり、今後、長期的観点に立った人材育成策や産学協同体制の構築を図らない限り、やがては韓国あるいは中国に追い抜かれることは避けられないだろう」と、諸外国との国際比較に基づき分析している※。

このような状況を踏まえ、本戦略目標を通じて、ナノエレクトロニクスに関わる研究開発が進展することで、大幅な低消費電力化、小型化、新機能を有するデバイスが実現し、ビッグデータ時代に不可欠な省エネシステムを達成するとともに、エレクトロニクス産業等の競争力強化を実現することが求められる。

(2) 研究領域

「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」
(CREST・さきがけ複合領域) 2013年度発足

本研究領域は、材料・電子デバイス・システム最適化の研究を連携・融合することにより、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を可能にする研究開発を進め、真に実用化しイノベーションにつなげる道筋を示していくことを目指している。

本研究領域で目標とするような、桁違いの情報処理エネルギー効率の向上と新機能提供の達成には、単に微細化技術の進展だけに頼るのではなく、革新的基盤技術を創成することが必要である。これらは、インターネットや情報端末などをより高性能化し充実してゆくのにも必須であるとともに、センサやアクチュエータなどを多用して物理世界と一層の係わりをもった新しいアプリケーションやサービスを創出するのにも役立つものである。

具体的な研究分野としては、新機能材料デバイス、炭素系や複合材料・単原子層材料など新規半導体や新規絶縁物を利用した素子、量子効果デバイス、低リークデバイス、新構造論理素子、新記憶素子、パワーマネジメント向け素子、物理世界インターフェイス新電子デバイス、非ブール代数処理素子などのナノエレクトロニクス材料や素子が考えられているが、これらに限定することなく、新規機能性材料や新材料・新原理・新構造デバイスの追求を進めていく。一方、これらを真のイノベーションにつなげるためには、アプリケーションやシステム、アーキテクチャ、回路技術などがシナジーを持って連携あるいは融合する必要

がある。そのために、実用化を見据えることによる、素材技術やデバイス技術の選別や方向性の最適化を積極的に推進する。

このような領域横断的な科学技術の強化ならびに加速によって、革新的情報デバイス基盤技術の創成を目指している。

(3) 研究総括

研究総括および副研究総括

研究総括（CREST 担当）： 桜井 貴康（東京大学 名誉教授）

副研究総括（さきがけ担当）： 横山 直樹（株式会社富士通研究所 名誉フェロー）

(4) 採択研究課題・研究費

①CREST

(百万円)

採択 年度	研究者	所属・役職	研究課題	研究費
		上段：研究終了時 下段：採択時		
2013 年度	内田 建	東京大学工学部 教授 慶應義塾大学理工学部 教授	極細電荷チャネルとナノ熱管理工学による極小エネルギー・多機能センサプラットフォームの創製	477
	高木 信一	東京大学大学院工学系研究科 教授 同上	極低消費電力集積回路のためのトンネルMOSFETテクノロジーの構築	513
	波多野 睦子	東京工業大学工学院 教授 同上	炭素系ナノエレクトロニクスに基づく革新的な生体磁気計測システムの創出	406
2014 年度	浅野 種正	九州大学大学院システム情報科学研究院 特任教授 同上	異種機能コデザインによるテラヘルツ帯ビデオイメージングデバイスの開発	355
	橋本 昌宜	大阪大学大学院情報科学研究科 教授 同 准教授	ビアスイッチの実現によるアルゴリズム・処理機構融合型コンピューティングの創出	379
	益 一哉	東京工業大学 学長 東京工業大学フロンティア研究機構 教授	ナノ慣性計測デバイス・システム技術とその応用展開	444*
2015 年度	高尾 英邦	香川大学創造工学部 教授 香川大学工学部 教授	繊細な触覚を定量的に検知する「ナノ触覚神経網」の開発と各種の手触り感計測技術への応用	317
	竹内 健	東京大学工学部 教授 中央大学理工学部 教授	デジタルデータの長期保管を実現する高信頼メモリシステム	282*
	樋口 昌芳	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 同上	超高速・超低電力・超大面積エレクトロクロミズム	303*
	富士田 誠之	大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授	共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶の融合によるテラヘル	393*

		同上	ツ集積基盤技術の創成	
			総研究費	3,869

研究費：2020年度上期までの実績額に2020年度下期以降の計画額を加算した金額

*新型コロナウイルス感染症により研究期間の延長を行った課題については、2020年度の実績額に2021年度の計画額を加算した金額

②さきがけ

(百万円)

採択年度	研究代表者	所属・役職 上段：研究終了時 下段：採択時	研究課題	研究費*
2013年度	青野 真士	東京工業大学地球生命研究所 特任准教授 同研究所 研究員	アメーバ計算パラダイム：時空間ダイナミクスによる超高効率解探索	21.5
	吾郷 浩樹	九州大学グローバルイノベーションセンター 教授 九州大学先端物質化学研究所 准教授	二次元原子薄膜の積層システムの創製とナノエレクトロニクスへの展開	37.0
	安藤 和也	慶應義塾大学理工学部 准教授 同学部 専任講師	スピンホールエンジニアリングによる省エネルギーナノ電子デバイスの創出	42.8
	井上 振一郎	情報通信研究機構未来 ICT 研究所深紫外光 ICT デバイス先端開発センター センター長 同研究所ナノ ICT 研究室主任研究員	有機・シリコン融合集積フォトニクスによる超高速電気光学デバイス	38.0
	大野 武雄	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 准教授 同上	極薄ナノ金属酸化膜をもつ抵抗変化型メモリ	36
	岡田 直也	産業技術総合研究所ナノエ	遷移金属内包シリコンクラス	33.6

		レクトロニクス研究部門 主任研究員 科学技術振興機構 さきが け専任研究者	ターを用いた低消費電力トラ ンジスタ材料・プロセスの創 出	
	戸川 欣彦	大阪府立大学大学院工学研 究科 准教授 大阪府立大学 21 世紀科学 研究機構 ナノ科学・材料 研究センター 特別准教授	カイラル磁気秩序を用いたス ピン位相エレクトロニクスの 創成	43.7
	原 祐子	東京工業大学工学院 准教 授 奈良先端科学技術大学院大 学 情報科学研究科 助教	階層融合型機能的冗長化によ る次世代低電力デバイス向け 高信頼化設計	34.1
	宮田 耕充	首都大学東京大学院理学研 究科 准教授 同上	単原子膜ヘテロ接合における 機能性一次元界面の創出とエ レクトロニクス応用	39.0
	望月 維人	青山学院大学理工学部 准 教授 同上	高いデバイス機能を有するナ ノスケールトポロジカル磁気 テクスチャの理論設計	31.1
	安武 裕輔	東京大学大学院総合文化研 究科 助教 同上	水素終端 4 族単原子層を用い た室温動作新機能素子の創成	38.0
	山田 浩之	産業技術総合研究所電子光 技術研究部門 主任研究員 同上	強誘電体と機能性酸化物の融 合による不揮発ナノエレクト ロニクス	33.1
	山本 倫久	東京大学大学院工学系研究 科 講師 同研究科 助教	単一電子量子回路の集積化へ 向けた基盤技術の開発	38.0
2014 年度	荒井 礼子	産業技術総合研究所スピン トロニクス研究センター 主任研究員 科学技術振興機構 さきが け専任研究者	スピンを利用したニューロモ ルフィックシステムの理論設 計	36.7
	河野 崇	東京大学生産技術研究所 准教授 同上	定性的モデリングに基づいた シリコン神経ネットワークプ ラットフォーム	35.6

	関 剛斎	東北大学金属材料研究所 准教授 同研究所 助教	磁性規則合金を用いた新機能 性スピントルク発振素子の創 製	41.4
	高橋 陽太郎	東京大学大学院工学系研究 科 准教授 同研究科 特任准教授	電気磁気創発現象による電磁 波制御デバイスの創生	40.8
	友利 ひかり	科学技術振興機構 さきが け専任研究者 同上	ひずみ誘起ゲージ場を用いた 単原子層膜の伝導制御とエレ クトロニクス応用	38.1
	長汐 晃輔	東京大学大学院工学系研究 科 准教授 同上	2層グラフェンのギャップ内 準位解析と複層化界面制御に よる準位低減	50.9
	長田 貴弘	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 研究者 同上	フッ化物ユニバーサル高誘電 体極薄膜材料の創出	32.1
	廣理 英基	京都大学化学研究所 准教 授 京都大学物質-細胞統合シ ステム拠点 准教授	超高強度テラヘルツ光のナノ 空間制御と物性制御技術への 応用	46.5
	福田 憲二郎	理化学研究所染谷薄膜素子 研究室 研究員 山形大学大学院理工学研究 科 助教	ナノ膜厚ポリマー絶縁膜を利 用した全印刷型基板レス有機 集積回路の創成	43.0
	山崎 歴舟	科学技術振興機構 さきが け専任研究者 東京大学先端科学技術研究 センター 助教	マイクロ波・光領域における 量子オプトメカニカルシステ ムの構築	40.4
2015 年度	赤井 恵	大阪大学大学院工学研究科 助教 同上	ポリマー配線を用いたニュー ラルネットワーク型情報回路 の創成	32.8
	太田 実雄	東京大学生産技術研究所 助教 同上	二次元窒化物半導体を用いた エピタキシャル積層構造の創 出と光電子機能デバイス応用	17.2
	後藤 太一	豊橋技術科学大学大学院工 学研究科 助教	極薄磁性酸化物中におけるス ピン波位相干渉を用いた多入	40.4

		同上	出力演算素子の開発	
	小林 正治	東京大学生産技術研究所 准教授 同上	超低消費電力動作に向けたゲート絶縁膜の負性容量による急峻スロープトランジスタ技術の開発とナノワイヤ構造への応用	35.7
	高橋 一浩	豊橋技術科学大学大学院工学研究科 准教授 同研究科 テニユアトラック講師	光干渉型分子間力センサによる高感度マルチバイオマーカー検出システム	32.7
	高橋 圭	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	高移動度二次元酸化物構造による非散逸電流デバイスの創成	35.0
	竹内 尚輝	横浜国立大学先端科学高等研究院 特任教員(准教授) 同上	極限的エネルギー効率を有する超伝導可逆計算機の開発	32.7
	服部 梓	大阪大学産業科学研究所 助教 同上	遷移金属酸化物のナノ空間3次元制御による省エネルギー駆動機能選択的相変化デバイス創製	34.7
	藤枝 俊宣	東京工業大学 生命理工学院 講師 早稲田大学 理工学術院 助教	移植用培養生体組織に搭載可能なナノエレクトロニクスの創成	37.4
	牧 英之	慶應義塾大学理工学部 准教授 同上	ナノカーボン光・電子量子デバイス開発と量子暗号通信応用	39.9
	吉村 哲	秋田大学大学院理工学研究科 附属理工学研究センター センター長・教授 同センター 准教授	電界書込み型の超低消費電力磁気メモリの開発	31.2
			総研究費	1,240.8

2. 研究領域および研究総括の設定について

(1) 研究領域選定の理由

本研究領域は、新規機能性材料の適用可能性の追求等による素材技術の創出、新材料・新原理・新構造の論理素子・記憶素子の動作検証等によるデバイス技術の構築、先進的なナノテクノロジー等の実装に向けたナノシステム最適化技術の創出、及びそれら技術の融合や連携により、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を目指す。

本研究領域では、上記の目標に対して、情報処理デバイスの微細化だけに頼るのではない、多岐にわたる研究テーマを対象としている。具体的なものとして、炭素系や複合材料・単原子層材料など新規半導体や新規絶縁物を利用した素子、新構造論理素子、新記憶素子、物理世界インターフェイス新電子デバイス、非ブール代数処理素子などの創製及び開発などが上げられる。加えて、材料やデバイス分野に留まらずに、アプリケーションやシステム、アーキテクチャ、回路技術などとの連携・融合、即ち、実用化を見据えた上で、素材技術やデバイス技術の選別や方向性の最適化も行う。このことから、研究推進体制としては、多種多彩な分野の研究者からなるチームの編成が可能な CREST を選定することは適切である。

一方で、素材・デバイス・回路等の個別技術において、従来にない全く斬新な発想による挑戦的な研究や、チーム型研究に比べてより中長期的視点に立った独創的な研究の推進も必要である。このような研究の推進体制としては、個人の独創的な着想を基に研究を推進することが可能なさきがけを選定することは適切である。そして、一人の研究総括が副研究総括とともに分野や知見等を補完しあいながら、CREST とさきがけを一体的に推進する体制とすることにより、チーム型研究と個人型研究の交流と連携が一層緊密で活発となり、その相乗効果からそれぞれの研究課題の効率的な推進とともに、より広範な分野での技術革新が期待できる。

以上のとおり、本研究領域は戦略目標達成に向けて適切に設定されている。総じて国際的水準の高いナノエレクトロニクス研究を基盤とし、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現への貢献を目指す取り組みであり、社会的要請のみならず、過去の関連施策による研究成果の発展や研究基盤の強化、ひいては新たな産業競争力の強化という観点においても、学界や産業界等からの要請や関心も高い。このことから、本研究領域に対しては、先見性を有する優れた研究提案が多数見込まれる。

これらを総合すると、多岐にわたる分野の独創的な研究者が、本研究領域で真に連携・融合を行うことにより、科学技術が社会・産業の要請に応える潮流を加速することが期待できる。

(2) 研究総括指定の理由

研究総括 桜井 貴康

桜井貴康氏はこれまでに、企業及び大学の立場から、低消費電力半導体集積回路設計や 3

次元集積回路設計などに関する第一線級の研究開発に従事し、卓越した研究業績を上げてきた。また最近では、新素材としての可能性に注目されている有機分子材料を用いた大面積エレクトロニクスシステム設計にも取り組んでいる。

これらの業績は国内外にも認められ、電子情報通信学会業績賞や IEEE Pederson 賞、IEEE ISSCC Leading Contributor 賞などを受賞するとともに、IEEE Fellow、電子情報通信学会フェローに選出されている。これらの点を踏まえると、本研究領域を推進するに必要な先見性及び洞察力を十分に有していると認められる。また同氏は現在、半導体集積回路に関する世界最高レベルの国際会議の一つである VLSI Symposia のエクゼキュティブ委員会委員長などを務めるなど、関連分野の研究者から信頼も厚く、適切な評価と公平な選考を行っていると認められる。

さらに同氏は、企業在籍時には半導体集積回路設計の開発責任者を、また大学においては 2009 年度から 2012 年度まで NEDO 極低電力回路・システム技術開発（グリーン IT プロジェクト）の統括テーマリーダー等を経験していることから、本研究領域での研究課題の効果的、効率的な推進を目指し、適切な研究マネジメントを行う経験、能力を有していると考えられる。

副研究総括 横山 直樹

横山直樹氏は、長年企業の立場から、主として化合物半導体や炭素系材料を用いた集積回路実用化の鍵となるデバイス製造技術を開発してきた。うち化合物半導体に関する成果は一時、世界最高速のスーパーコンピュータVPP500 に使用され、その後も、光通信用の高速集積回路や携帯電話用増幅器などにも使用されるようになった。

これらの成果は、卓越した業績として国内外から評価され、IEEE Morris N. Liebmann Memorial Award を受賞するとともに、IEEE Fellow、電子情報通信学会フェロー、応用物理学会フェローに選出されている。これらの点を踏まえると、本研究領域を推進するに必要な先見性及び洞察力を十分に有していると認められる。また同氏はこれまでに、SSDM 組織委員長・論文委員長、応用物理学会理事や IPAP（物理系学術誌刊行協会）監事、応用物理学会評議員などを歴任するなど、関連分野の研究者から信頼も厚く、適切な評価と公平な選考を行っていると認められる。

さらに同氏は、長年企業での研究開発およびマネジメントに係る要職を務め、また現在は最先端研究開発支援プログラム（FIRST）の中心研究者を務めている。JST では、2006 年から 2012 年までの間、さきがけ「ナノ製造技術の探索と展開」領域の研究総括を務め、研究課題の効果的、効率的な推進、適切な研究マネジメントを遂行するとともに、異分野連携・融合等を通じた若手研究者の育成についても積極的に取り組んだ。

以上を総合すると、素材技術・デバイス技術・システム最適化技術等の連携や融合、ひいては実用化側からの素材技術やデバイス技術の選別を図っていく本研究領域では、実用化

側に近い回路設計やシステム開発等により多くの知見のある桜井貴康氏を研究総括として位置づけ、素材技術やデバイス技術開発等により多くの知見のある横山直樹氏を副研究総括として位置づけることで、領域の適切な運営を図る。

(JST 記載；新規研究領域の事前評価

https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h25.pdf より抜粋)

3. 研究総括のねらい

本研究領域は、ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの技術レイヤーの融合による革新的な情報処理デバイス基盤技術創成を目指した。各レイヤー間の有機的連携や融合を促進するために、異なるレイヤーの研究者が協働して成果を出すことを前提に、領域を設定した。

これまで情報化社会を下支えしてきたシリコンデバイスは、近年その進歩の根源をなしていた微細化や集積化が限界を迎え始めている。それを踏まえ、本研究領域は微細化の進展だけに頼らずに、今後ともナノエレクトロニクスが情報化社会基盤の向上に貢献し続け、エネルギー環境問題、少子高齢化問題、健康安全社会の実現、インフラの老朽化など、わが国あるいはグローバルな社会的課題を解決する一助として活用されるよう、革新的なナノエレクトロニクス基盤技術の創成を目指した。また、このような努力を通じて産業の国際競争力を高めることを指向した。

(1)CREST

CRESTは、研究代表者がどのレイヤーを専門とすることも可能としつつ、他のレイヤーを専門とする共同研究者を組み込んでチームを構成することを必須とした。それによって、チームには、ナノ材料レイヤーあるいはナノデバイスレイヤーの研究者が参加していることを条件としている。単に異なるレイヤーの研究者が名を連ねているのではなく、研究者が有機的につながることによってシナジー効果が生まれることが期待されており、創出された基盤技術がどのようなアプリケーションやサービスを強化するのか、また新規創出につながるのかという、実用化やイノベーションを常に意識しながら研究内容を吟味し、選択し、修正しながら研究を推進することを想定した。

研究の最終フェーズでは、実システムによるデモンストレーションを必須とし、イノベーションを加速する上でも産業界の参画を強く推奨して領域を設定している。

(2)さきがけ

さきがけは、エネルギー効率の桁違いの向上に資する成果や、新原理に基づくエレクトロニクスのイノベーションに資する成果をねらった。非ノイマン型コンピューティングやスピントロニクスなどの分野が想定される。対象となる応用先は、情報処理分野（情報蓄積、情報伝送も含む）や、新規機能の実現（ヘルスケア、医療、パーソナルモビリティ、ヒューマン・インターフェイス）などエレクトロニクス全般であり、より広範に人々の生活に貢献できるような研究課題を想定した。また、エネルギーの高効率化により、自動運転や自動学習など高度な情報処理を低電力で行う技術シーズの創出も期待した。

科学技術を実用化し、真のイノベーションにつなげるために、アプリケーションに言及することも重要であり、さきがけでは実デバイスによるデモンストレーションを必須としないが、さきがけ終了後2年以内にデモンストレーションができるレベルの研究を期待した。

(3) 複合領域として

一人の研究総括が副研究総括とともに分野や知見等を補完しあいながら、CREST とさきがけを一体的に推進する体制とすることにより、チーム型研究と個人型研究の交流と連携が一層緊密で活発となり、その相乗効果からそれぞれの研究課題の効率的な推進とともに、より広範な分野での技術革新が期待できる。

本研究領域は戦略目標達成に向けて適切に設定されていると考える。総じて国際的水準の高いナノエレクトロニクス研究を基盤とし、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現への貢献を目指す取り組みであり、社会的要請のみならず、過去の関連施策による研究成果の発展や研究基盤の強化、ひいては新たな産業競争力の強化という観点においても、学界や産業界等からの要請や関心も高い。このことから、本研究領域に対しては、先見性を有する優れた研究提案も多数見込まれる。

これらを総合すると、多岐にわたる分野の独創的な研究者が、本研究領域で真に連携・融合を行うことにより、科学技術が社会・産業の要請に応える潮流を加速することが期待できる。

4. 研究課題選考について

(1)CREST

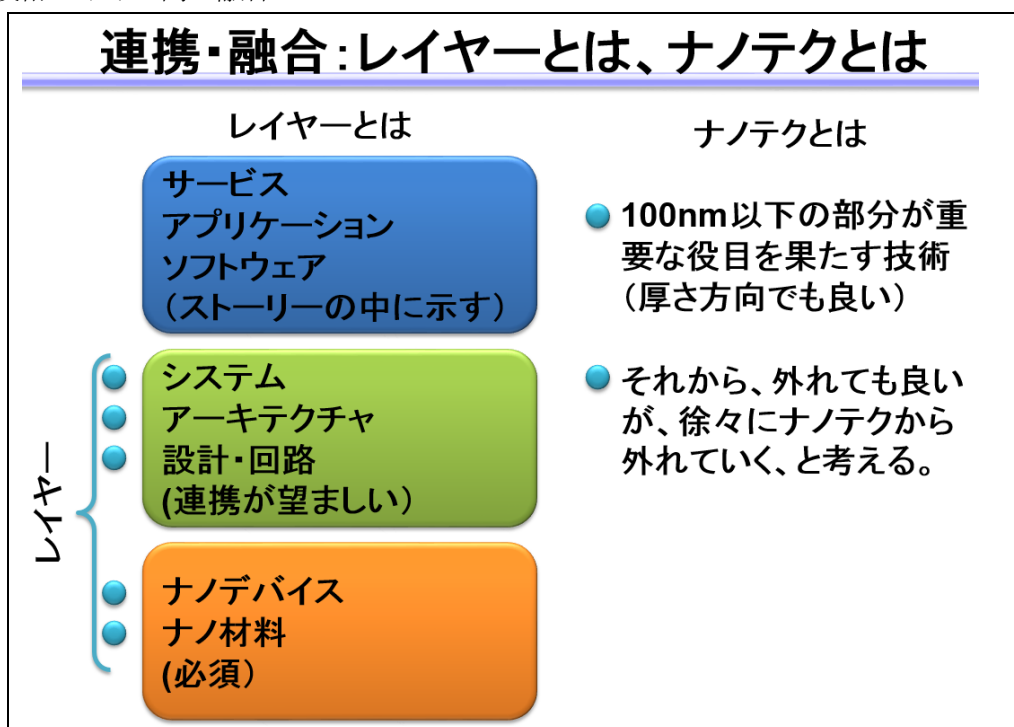
①選考方針

本複合領域は、ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの技術レイヤーの融合による革新的な情報処理デバイス基盤技術創成を目指している。取り分け CREST タイプ（チーム型研究）では、各レイヤー間の有機的連携や融合を促進するために、異なるレイヤーの研究者が協働して成果を出すことを推奨している。

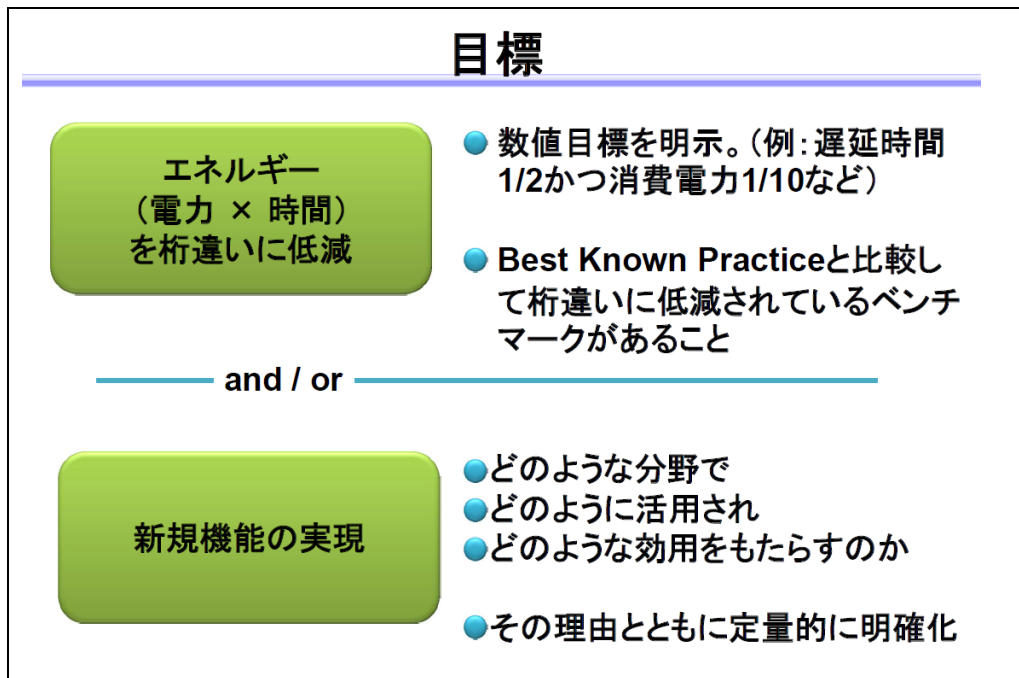
PI（研究代表者）はどのレイヤーを専門にしても可能としつつ、他のレイヤーを専門とする共同研究者を組み込んでチームを構成して提案することを必須とする。また、チームには、ナノ材料レイヤーあるいはナノデバイスレイヤーの研究者が参加していることも条件とする。単に異なるレイヤーの研究者が名を連ねているのではなく、研究者が有機的につながることによってシナジー効果が生まれることが研究提案書の中で明確化されていることが必要との考えである。レイヤーが異なると、最初に基盤に近いレイヤーの成果が出ないとそれを使用する上位技術レイヤーの研究ができないというタイミング的な齟齬が生じることもあるが、モデルやシミュレーションの活用、規模を徐々に拡大するなど、いくつかの工夫によってコンカレントな研究ができるよう配慮する必要がある、この配慮に関しても、研究提案書に明確化されていることを強く望んでいる。

なお、研究総括の方針を、下記のように明示して募集説明会で説明を行っている。

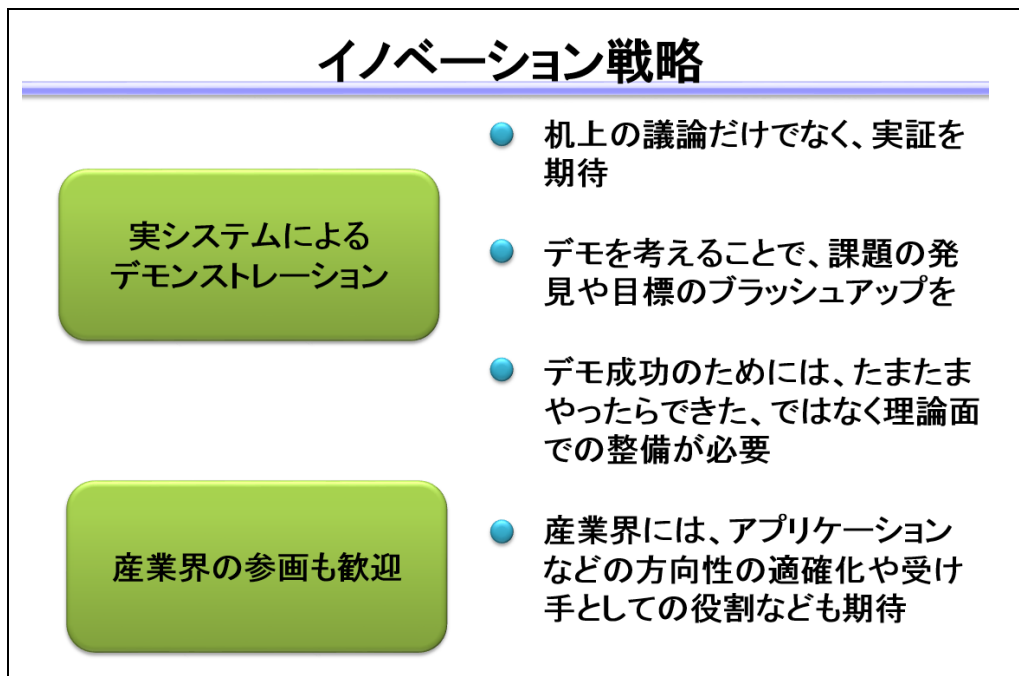
1) 技術レイヤー間の融合



2) 目標



3) イノベーション戦略

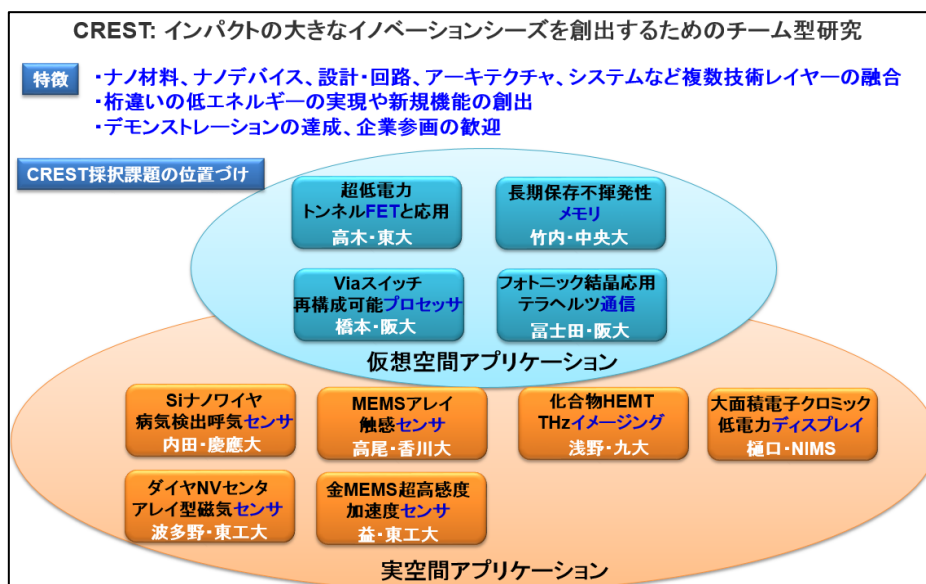
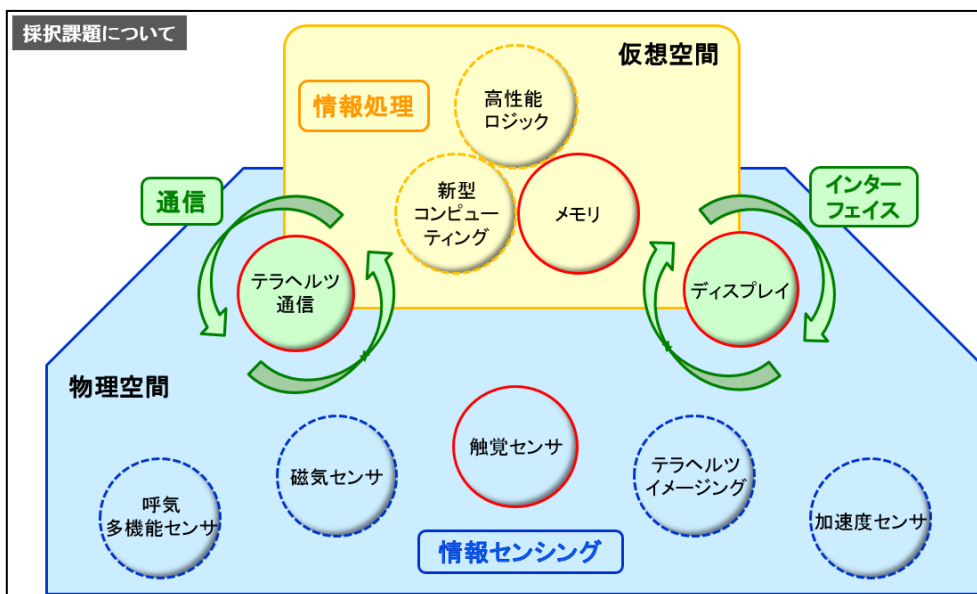


②採択状況

戦略目標にうたわれているように素材技術、デバイス技術、システム最適化技術等の各レイヤーを連携して革新的基盤技術を創成するため、①技術シーズとなるナノテクノロジー

が新規で明確か、②技術レイヤー間の連携・融合が有機的につながりシナジー効果が生まれるか、③アプリケーションが明確で研究の最終フェーズでデモンストレーションが可能か、という領域独自の評価視点として選考基準に加えて選考を行っている。

その結果、情報処理技術として、高性能ロジック、新型コンピューティング、メモリの3課題、情報センシング技術として、呼気多機能センサ、磁気センサ、触覚センサ、テラヘルツイメージング、加速度センサの5課題、通信・インターフェイス技術として、2課題、合計10課題の採択を行った（仮想空間アプリケーションとして4課題、実空間アプリケーションとして6課題、とも区分できる）。



研究課題・研究体制（採択当時）と戦略目標の具体的内容（1.③）との関係

平成 25 年度採択チーム

研究代表者	グループ	(i)素材		(ii)デバイス			(iii)システム
		①	②	③	④	⑤	⑥
内田 建	内田 Gr (慶大)		○	○	○	○	○
	柳田 Gr (九大)	○		○	○	○	○
	寺尾 Gr (東大)	○		○	○		
	石黒 Gr (慶大)					○	○
	黒田 Gr (慶大)						○
高木 信一	高木 Gr (東大)	○	○	○	○	○	○
	稗田 Gr (東芝)			○	○	○	○
	山本 Gr (住化)	○	○	○	○	○	○
	満原 Gr (NTT)	○	○	○	○	○	○
波多野 睦子	波多野 Gr (東工大)	○	○	○	○	○	○
	牧野 Gr (AIST)			○	○	○	○
	水落 Gr (京大)	○		○	○		
	原田 Gr (阪大)			○			○
	安田 Gr (ルネサツ)						○

平成 26 年度採択チーム

研究代表者	グループ	(i)素材		(ii)デバイス			(iii)システム
		①	②	③	④	⑤	⑥
浅野 種正	浅野 Gr (九大)			○	○		○
	前田 Gr (AIST)	○	○	○			
	池田 Gr (東大)						○
	小倉 Gr (IRspec)				○		○

橋本 昌宜	橋本 Gr (阪大)			○	○
	杉林 Gr (NEC)	○ ○	○ ○ ○		○
	密山 Gr (高知工大)			○	○
	小野寺 Gr (京大)			○	○
	越智 Gr (立命館大)			○	○
益 一哉	益 Gr (東工大)	○	○ ○ ○		○
	曾根 Gr (東工大)	○	○ ○ ○		○
	三宅 Gr (東工大)				○

平成 27 年度採択チーム

研究代表者	グループ	(i) 素材		(ii) デバイス			(iii) システム
		①	②	③	④	⑤	⑥
高尾 英邦	高尾 Gr (香川大)	○		○	○		○
	有本 Gr (岡山県大)					○	○
	三木 Gr (慶大)	○					
竹内 健	竹内 Gr (中央大)				○	○	○
	安原 Gr (パナ)			○	○	○	○
	内藤 Gr (AIST)	○	○	○	○	○	○
	上野 Gr (芝工大)	○	○	○	○	○	○
樋口 昌芳	樋口 Gr (NIMS)	○	○	○	○	○	
	大橋 Gr (早大)				○	○	○
富士田 誠之	富士田 Gr (阪大)	○		○	○	○	○
	金 Gr (ローム)			○	○	○	○
	鈴木 Gr (東工大)			○	○	○	○

(2) さきがけ

①選考方針

ナノ材料、ナノデバイス、それぞれ単独レイヤーでの提案も採択の対象とするが、設計・回路やシステムについても言及した提案を推奨している。さらに、設計・回路、アーキテクチャ、システム、それぞれのレイヤーでの提案も採択の対象とするが、それを実現するためのナノ材料やナノデバイス技術が現存、あるいは、近い将来手に入る可能性が高い提案を推奨している。

提案には、エネルギー効率の桁違いの向上の理由が定量的に記述されていることが望まれている。ここで、情報処理とは広義に解釈し、情報蓄積や情報伝送も含まれることとしている。一方、新規機能実現に関しては、情報処理基盤の向上やスマート社会の実現、スマートハウス、交通、ヘルスケア、医療、パーソナルモビリティ、ロボット、セキュリティやヒューマン・インターフェイスなどエレクトロニクスがより広範に人々の生活に貢献できるような提案を期待する（位置同定、時間同定、エネルギーハーベスト、無線給電、セキュアな短距離無線通信、神経インターフェイス、多様さに対応したハードウェアなどに資する基盤ナノエレクトロニクスなど）。提案では研究成果はどのような分野でどのように活用され、どのような効用をもたらすのかが、その理由とともに定量的に明確化されていることが望まれている。

現在、自動運転や自動学習など高度な情報処理を低電力で行う要求も高くなっている。リアルタイム性の向上、画像認識、暗号などのセキュリティ、ディープラーニングやデータストレージなど新たなアルゴリズムを低電力で行う情報処理デバイス基盤技術の提案も期待している。

科学技術を実用化し、真のイノベーションにつなげるために、アプリケーションに言及することも重要である。従って、創出された基盤技術がどのようなアプリケーションやサービスの強化や新規創出につながるかについても、その理由とともに記述されていることが望ましいと考えている。

②採択状況

戦略目標にうたわれているように素材技術、デバイス技術、システム最適化技術等の各レイヤーを連携して革新的基盤技術を創成するため、レイヤー間の連携が可能であるか、CREST との連携が可能であるか、実用化に向けた構想が示されているかを領域独自の評価項目として選考基準に加えて選考を行っている。

レイヤー間連携については、基礎・理論の提案、材料レイヤー、デバイスレイヤー、および回路システムレイヤーまで実用化を考えた優れた提案 34 件を採択している。

さがし採択者と研究テーマのレイヤー分類

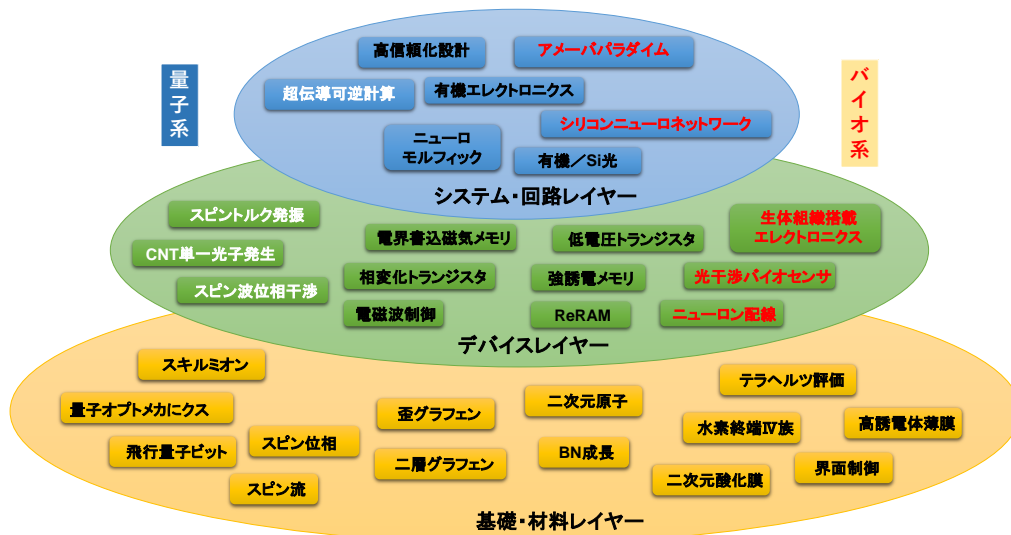
横軸: 研究者数

設計／回路	河野 (回路) 赤井 (回路)	竹内 (回路) 原 (設計)	福田 (有機)				
デバイス	安藤 (スピン) 戸川 (スピン)	関 (スピン) 後藤 (スピン)	吉村 (スピン) 服部 (酸化物)	山本 (量子) 山崎 (量子)	井上 (光) 牧 (量子)	廣理 (光) 高橋陽 (光)	小林 (CMOS) 高橋一 (ヘルス)
材料	吾郷 (2D薄膜) 宮田 (2D薄膜)	安武 (2D薄膜) 友利 (2D薄膜)	長汐 (2D薄膜) 太田 (2D薄膜)	大野 (酸化物) 高橋圭 (酸化物)	岡田 (CMOS) 長田 (CMOS)	山田 (強誘電体)	藤枝 (ヘルス)
理論	青野 (回路)	望月 (スピン) 荒井 (スピン)					

注. 材料レイヤーはすべてデバイスを志向した研究である。
赤字は女性。

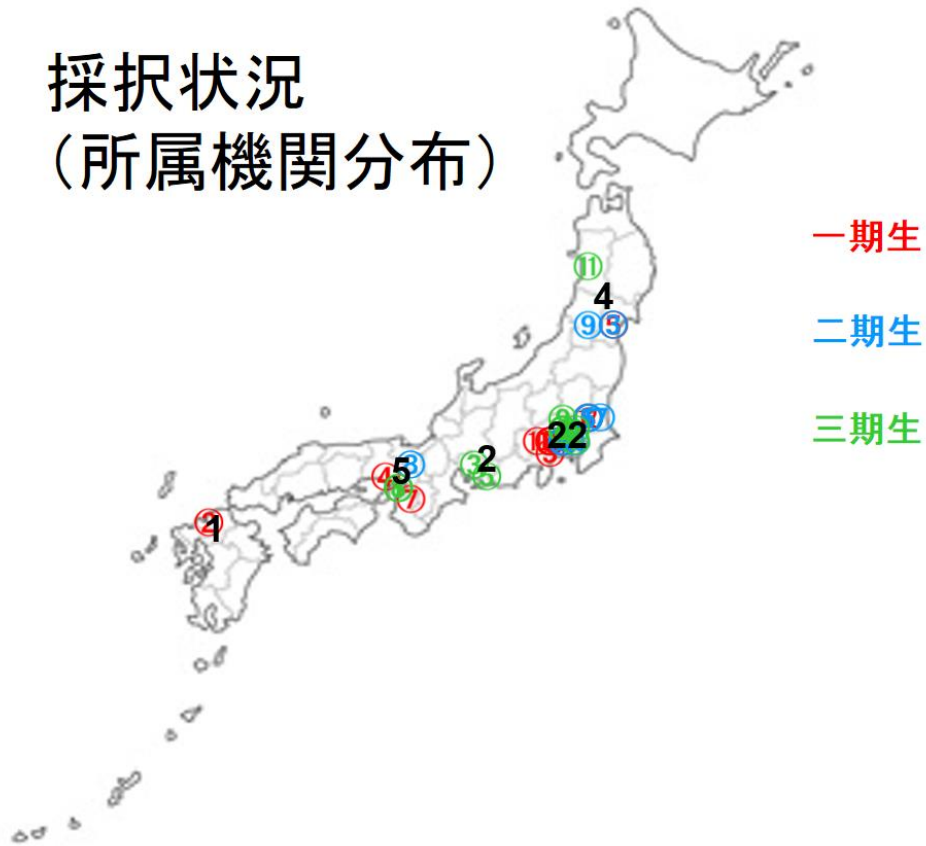
採択課題については下図のように量子・スピン関係のテーマからバイオにいたるまで当初から考えていた分野を広く採択している。これによって領域内の異分野交流も盛んになり多くの共同研究が行われるようになったと考えている。

さがし採択課題のキーワードの分類



選考では提案内容を第一に考慮し、評価が同程度であるときにダイバーシティーも考慮し女性5名、および地方大学からも採択している。採択時の所属機関分布を下図に示す。

採択状況 (所属機関分布)



戦略目標に資するという観点から、戦略目標の具体的内容 (1. ③) を意識し、各レイヤーの具体的目標に関連するテーマについて下表のように広く採択している。

研究者の研究課題と戦略目標の具体的内容 (1. ③) との関係

一期生 (2013 年度採択)

研究者名	(i) 素材		(ii) デバイス			(iii) システム
	①	②	③	④	⑤	⑥
青野 真士					○	○
吾郷 浩樹	○	○	○			
安藤 和也	○					
井上 振一郎			○	○	○	
大野 武雄	○		○			
岡田 直也	○	○	○			
戸川 欣彦	○	○	○			
原 祐子						○

宮田 耕充		○		○		
望月 維人			○			○
安武 裕輔	○	○				
山田 浩之			○			
山本 倫久	○					

二期生（2014年度採択）

研究者名	(i)素材		(ii)デバイス			(iii)システム
	①	②	③	④	①	②
荒井 礼子						○
河野 崇						○
関 剛斎			○			
高橋 陽太郎			○			
友利 ひかり	○	○	○			
長汐 晃輔		○				
長田 貴弘	○					
廣理 英基	○		○			○
福田 憲二郎	○					○
山崎 歴舟	○					

三期生（2015年度採択）

研究者名	(i)素材		(ii)デバイス			(iii)システム
	①	②	③	④	①	②
赤井 恵			○			○
太田 実雄	○	○				
後藤 太一			○		○	
小林 正治			○		○	○
高橋 一浩				○		
高橋 圭		○	○			
竹内 尚輝			○			
服部 梓	○		○			
藤枝 俊宣	○		○	○		○
牧 英之		○	○		○	
吉村 哲			○	○	○	

(3) 複合領域として

CREST とさきがけの交流を進めるため選考時においても研究テーマおよび目標とする指標において、レイヤー間の連携に限らず他のグループとの交流を進め易くするように考慮している。さきがけは個人研究であり目標とするテーマも多岐にわたることから、まずCRESTの選考を行って採択課題を決め、採択課題との連携可能性等も考慮してさきがけの選考を行っている。

ただし、選考においては応募課題の提案内容を第一に考慮し、同程度の評価であった場合に上述の点を考慮して採択課題を決定している。

5. 領域アドバイザーについて

(1)CREST

領域アドバイザー (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
石内 秀美	元先端ナノプロセス基盤開発センター (EIDEC)	代表取締役社長	2013年4月 ～2021年3月
井上 淳樹	元株式会社富士通研究所	特任研究員	2013年4月 ～2021年3月
河村 誠一郎	慶應義塾大学大学院理工学研究科	訪問教授	2016年4月 ～2021年3月
清水 徹	東洋大学情報連携学部	教授	2013年4月 ～2021年3月
高柳 万里子	東芝デバイス&ストレージ株式会社	部長	2013年4月 ～2021年3月
田原 修一	技術研究組合光電子融合基盤技術研究所	専務理事	2013年4月 ～2021年3月
知京 豊裕	物質・材料研究機構	副拠点長	2013年4月 ～2021年3月
津田 健二	セミコンポータル(編集長)	国際技術ジャーナリスト	2013年4月 ～2021年3月
中込 儀延	元ルネサス エレクトロニクス株式会社	技師長	2013年4月 ～2021年3月
西村 正	元(株)ルネサステクノロジ	取締役	2013年4月 ～2021年3月
久本 大	株式会社日立製作所	技術顧問	2013年4月 ～2021年3月

アドバイザーの人選に当たっては、以下を考慮して検討している。

ナノエレクトロニクス分野の研究は産業界とのかかわりが非常に重要であり、産業界で活躍している研究者および産業界出身の研究者を多く選定している。また、ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの技術レイヤーの融合を目指したチーム型研究を選定するため、後述する専門分野に精通したアドバイザーとしており、更にナノエレクトロニクス分野での応用や実用化を見据えて、市場や国際的な情勢などをアドバイスできるように、この分野に精通している国際技術ジャーナリストの津田 健二(セミコンポータル編集長)を選定して、9割にあたる10名(11名中)が産業界経験者となっている。

る。

また、領域運営上の工夫として、研究総括および副研究総括を補佐して CREST チームと密に支援できるように、下記の通り、各研究課題で担当アドバイザー制（主、副の 2 名体制）を導入して、各研究チームがより具体的・効果的なアドバイスを受けられる体制としている。

担当アドバイザー制

採択年度	研究チーム	主担当アドバイザー	副担当アドバイザー
2013 年度 採択チーム	内田チーム	知京 アドバイザー	久本 アドバイザー
	高木チーム	久本 アドバイザー	西村 アドバイザー
	波多野チーム	石内 アドバイザー	知京 アドバイザー
2014 年度 採択チーム	浅野チーム	中込 アドバイザー	石内 アドバイザー
	橋本チーム	清水 アドバイザー	津田 アドバイザー
	益チーム	井上 アドバイザー	中込 アドバイザー
2015 年度 採択チーム	高尾チーム	西村 アドバイザー	高柳 アドバイザー
	竹内チーム	河村 アドバイザー	清水 アドバイザー
	樋口チーム	高柳 アドバイザー	田原 アドバイザー
	富士田チーム	田原 アドバイザー	井上 アドバイザー

(2) さきがけ

領域アドバイザー名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
秋永 広幸 (ナノエレクトロニクス全般)	産業技術総合研究所	総括研究主幹	2013 年 4 月 ～2019 年 3 月
上田 大助 (パワー半導体)	京都工芸繊維大学	特任教授	2013 年 4 月 ～2019 年 3 月
楠 美智子 (応用物性・結晶工学)	名古屋大学	教授	2013 年 4 月 ～2019 年 3 月
笹川 崇男	東京工業大学	准教授	2013 年 4 月

(強相関電子系)			～2020年3月
高井 まどか (バイオインターフェース・バイオマテリアル)	東京大学	教授	2013年4月 ～2020年3月
平山 祥郎 (半導体ヘテロ構造・核スピントロニクス)	東北大学	教授	2013年4月 ～2019年3月
福島 伸 (ナノ材料・ナノデバイス)	(株) 東芝	首席技監	2013年4月 ～2019年3月
水谷 孝 (半導体電子デバイス)	中部大学	客員教授	2013年4月 ～2019年3月
武藤 俊一 (半導体ナノ構造・量子情報処理)	北海道大学	名誉教授	2013年4月 ～2019年3月
森村 浩季 (LSI 回路設計)	日本電信電話 (株)	プロジェクトマネージャ、 主席研究員	2013年4月 ～2020年3月

アドバイザーの人選に当たっては、以下を考慮して検討している。

これまでの枠にとらわれない新しい研究を採択する観点から広い研究分野を網羅するよう、そして若く優秀な研究者をアドバイスできる指導力を持っており将来のエレクトロニクス社会を見据えて研究を支援できる方を選んでいる。尚、ナノエレクトロニクス分野の研究は産業界とのかかわりが重要であり、産業界で活躍している研究者および産業界出身の研究者を多く選定している。結果、アドバイザー10名中7名が産業界経験者で7割になる。専門分野は前述のように、研究総括および副研究総括を補佐して研究者を丁寧に支援できる担当アドバイザー制をとるため、募集分野を広く網羅するように人選している。

なお、笹川アドバイザー、高井アドバイザー、森村アドバイザーの3名には、6.(2)で記載する新興領域研究会のメンタリングなどさきがけ研究後の研究展開へのアドバイスを期待し、さきがけ終了後も領域運営アドバイザーとして1年間ご助力いただいた。

担当アドバイザー制

一期生			二期生			三期生		
研究者	担当		研究者	担当		研究者	担当	
青野 真士	武藤		荒井 礼子	秋永		赤井 恵	森村	
吾郷 浩樹	水谷		河野 崇	森村		太田 実雄	上田	
安藤 和也	笹川		関 剛斎	笹川		後藤 太一	平山	
井上 振一郎	上田		高橋 陽太郎	上田		小林 正治	福島	

大野	武雄	秋永
岡田	直也	福島
戸川	欣彦	平山
原	祐子	森村
宮田	耕充	楠
望月	維人	笹川
安武	裕輔	平山
山田	浩之	福島
山本	倫久	武藤

友利	ひかり	楠
長汐	晃輔	水谷
長田	貴弘	福島
廣理	英基	武藤
福田	憲二郎	高井
山崎	歴舟	平山

高橋	一浩	高井
高橋	圭	笹川
竹内	尚輝	森村
服部	梓	秋永
藤枝	俊宣	高井
牧	英之	楠
吉村	哲	水谷

6. 研究領域のマネジメントについて

(1)CREST

①研究運営方針

ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの技術レイヤーの融合による革新的な情報処理デバイス基盤技術創成を目指した研究領域であり、各レイヤー間の有機的連携や融合を促進するために、異なるレイヤーの研究者が協働して成果を出すチームを採択している。

目的達成に向けて、チーム発足時の体制だけでなく、モデルやシミュレーションの活用、規模を徐々に拡大するなど、いくつかの工夫によってコンクリートな研究ができるように有益な助言・サポートができるように配慮しながら領域運営を行った。

研究チームには、研究の達成目標の明確化・ビジュアル化のために、2次元図の作成を必須としている。この図は、縦軸・横軸に任意の単位を設定し、研究当初および研究終了まで研究成果数値をプロットしていくものとして作成している。また、机上の議論だけでなく、実装を期待して、実システムによるデモンストレーションも各チームに課して研究を推進しており、研究終了時にデモをすることも必須としている。

②研究環境の整備における運営

(i)サイトビジット

各研究チームのサイトビジットを年2回のペースで実施した。研究代表者の研究場所を訪問するだけでなく、チームミーティングへの参加や、主たる共同研究者の研究場所の訪問も含めて、いままでに79回（2015年度：10回、2016年度：16回、2017年度：14回、2018年度：18回、2019年度：12回、2020年度：9回）開催している。実施方法としては、担当アドバイザー制として、それぞれにチームに主担当、副担当の領域アドバイザーを指名しており、主副の領域アドバイザーを中心に訪問を行い、訪問報告書を研究総括に提出する仕組みを導入している。

サイトビジット一覧

年度	日付	チーム名	場所	訪問者
2015年度	12月16日	内田チーム	慶應義塾大学 矢上キャンパス	知京アドバイザー、久本アドバイザー、JST 生嶋
	12月21日	波多野チーム	東京工業大学 大岡山キャンパス	石内アドバイザー、知京アドバイザー、JST 生嶋
	12月24日	高木チーム	東京大学 本郷キャンパス	久本アドバイザー、西村アドバイザー、JST 生嶋

	1月15日	益チーム	東京工業大学 すす かけ台キャンパス	井上アドバイザー、中込アド バイザー、JST 生嶋
	1月15日	橋本チーム	大阪大学 吹田キャン パス	清水アドバイザー、津田アド バイザー
	2月4日	樋口チーム	物質・材料研究機構 並木地区	高柳アドバイザー、田原アド バイザー
	2月26日	高尾チーム	香川大学 工学部	西村アドバイザー、高柳アド バイザー、JST 生嶋
	2月26日	富士田チーム	大阪大学 豊中キャン パス	田原アドバイザー、井上アド バイザー
	3月11日	浅野チーム	九州大学 伊都キャン パス	中込アドバイザー、石内アド バイザー、JST 生嶋
	3月14日	竹内チーム	中央大学 後楽園キ ャンパス	河村アドバイザー、JST 生嶋
2016 年度	7月12日	内田チーム	慶應義塾大学 矢上 キャンパス	知京アドバイザー、久本アド バイザー、JST 生嶋
	7月27日	波多野チーム	東京工業大学 大岡 山キャンパス	石内アドバイザー、知京アド バイザー、JST 生嶋
	8月18日	橋本チーム	NEC 玉川事業場	清水アドバイザー、津田アド バイザー
	8月26日	益チーム	東京工業大学 すす かけ台キャンパス	井上アドバイザー、JST 生嶋
	8月29日	浅野チーム	九州大学 伊都キャン パス	中込アドバイザー、石内アド バイザー、JST 生嶋
	9月6日	富士田チーム	東京工業大学 大岡 山キャンパス	田原アドバイザー、井上アド バイザー
	9月23日	樋口チーム	NIMS 並木地区	高柳アドバイザー、田原アド バイザー
	12月19日	竹内チーム	中央大学 後楽園キ ャンパス	河村アドバイザー、清水アド バイザー、JST 生嶋
	1月13日	高尾チーム	岡山県立大学	西村アドバイザー、高柳アド バイザー、JST 生嶋
	1月13日	益チーム	東京工業大学 すす かけ台キャンパス	井上アドバイザー、中込アド バイザー、JST 生嶋
	1月17日	樋口チーム	(株) 東芝 浜松町 ビルディング	高柳アドバイザー、田原アド バイザー、JST 生嶋

	1月18日	浅野チーム	産業技術総合研究所 つくば地区	中込アドバイザー、石内アドバイザー、JST 生嶋
	1月25日	高木チーム	東京大学 本郷キャンパス	久本アドバイザー、西村アドバイザー、JST 生嶋
	1月27日	橋本チーム	京都大学 吉田キャンパス	清水アドバイザー、津田アドバイザー、JST 生嶋
	1月30日	波多野チーム	京都大学 宇治キャンパス・吉田キャンパス	石内アドバイザー、知京アドバイザー、JST 生嶋
	3月1日	富士田チーム	ローム(株) 本社	田原アドバイザー、井上アドバイザー、JST 生嶋
2017 年度	7月31日	波多野チーム	産業技術総合研究所 つくば地区	石内アドバイザー、知京アドバイザー、JST 生嶋
	8月23日	益チーム	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	井上アドバイザー、中込アドバイザー
	8月28日	浅野チーム	東京大学 工学部	中込アドバイザー、石内アドバイザー、JST 生嶋
	8月30日	竹内チーム	JST 東京本部別館	河村アドバイザー、清水アドバイザー
	9月7日	樋口チーム	(株) 東芝 浜松町ビルディング	高柳アドバイザー、田原アドバイザー、JST 生嶋
	9月15日	橋本チーム	高知 中央公民館 (かるぽーと)	清水アドバイザー、津田アドバイザー、JST 生嶋
	9月26日	富士田チーム	東京工業大学 大岡山キャンパス	田原アドバイザー、井上アドバイザー
	10月16日	高木チーム	東京大学 本郷キャンパス	久本アドバイザー、西村アドバイザー、JST 生嶋
	12月20日	内田チーム	慶應義塾大学 矢上キャンパス	知京アドバイザー、久本アドバイザー、JST 生嶋
	1月19日	高尾チーム	香川大学 工学部	西村アドバイザー、高柳アドバイザー、田原アドバイザー、清水アドバイザー、JST 生嶋
	1月22日	波多野チーム	東京工業大学 大岡山キャンパス	桜井総括、横山副総括、石内アドバイザー、知京アドバイザー、JST 生嶋

	1月23日	益チーム	東京工業大学 すすかけ台キャンパス	井上アドバイザー、中込アドバイザー
	1月24日	竹内チーム	JST 東京本部別館	河村アドバイザー、清水アドバイザー
	2月9日	内田チーム	東京大学 駒場リサーチキャンパス生産技術研究所	桜井総括、横山副総括、知京アドバイザー、久本アドバイザー、JST 生嶋、泉
2018年度	4月11日	浅野チーム	九州大学 伊都キャンパス	石内アドバイザー、田原アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	5月28日	橋本チーム	NEC 玉川事業場	横山副総括、石内アドバイザー、井上アドバイザー、西村アドバイザー、JST 沼澤
	6月13日	樋口チーム	JST 東京本部別館	高柳アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	7月12日	高木チーム	東京大学工学部 10号館	西村アドバイザー、久本アドバイザー、JST 沼澤
	7月25日	高尾チーム	香川大学 創造工学部	井上アドバイザー、高柳アドバイザー、田原アドバイザー、西村アドバイザー、JST 沼澤
	7月26日	益チーム	東京工業大学 すすかけ台キャンパス	井上アドバイザー、JST 沼澤
	7月31日	波多野チーム	JST 東京本部別館	石内アドバイザー、知京アドバイザー、JST 沼澤
	8月2日	竹内チーム	JST 東京本部別館	河村、清水アドバイザー、JST 沼澤
	8月8日	富士田チーム	東京工業大学 大岡山キャンパス	井上アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	8月23日	内田チーム	東京大学 駒場第一キャンパス	知京アドバイザー、久本アドバイザー、JST 沼澤
	9月10日	高木チーム	東京大学 工学部	石内アドバイザー、西村アドバイザー、久本アドバイザー、JST 沼澤
	9月27日	竹内チーム	JST 東京本部別館	河村アドバイザー、清水アドバイザー、JST 沼澤

	10月5日	樋口チーム	東芝デバイス&ストレージ(株)	高柳アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	12月11日	内田チーム	九州大学 筑紫キャンパス	横山副総括、知京アドバイザー、久本アドバイザー、JST 沼澤
	1月8日	浅野チーム	東京大学 武田先端知ビル	石内アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	1月15日	橋本チーム	大阪大学 中之島センター	清水アドバイザー、津田アドバイザー、JST 沼澤
	1月23日	益チーム	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	井上アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	3月28日	富士田チーム	ローム(株)本社	井上アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
2019年度	4月20日	樋口チーム	多摩美術大学 プロダクトデザイン研究室	高柳アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	7月24日	浅野チーム	産業技術総合研究所 つくば中央事業第5事業所	横山副総括、石内アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	7月29日	益チーム	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	横山副総括、井上アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	7月29日	竹内チーム	JST 東京本部別館	河村アドバイザー、清水アドバイザー、JST 沼澤
	7月31日	高尾チーム	香川大学 創造工学部6号館	高柳アドバイザー、西村アドバイザー、JST 沼澤
	8月7日	富士田チーム	大阪大学 豊中キャンパス	井上アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	10月4日	橋本チーム	大阪大学 中之島センター	津田アドバイザー、西村アドバイザー、JST 沼澤
	11月21日	橋本チーム	大阪大学 吹田キャンパス	清水アドバイザー、JST 沼澤
	2月6日	益チーム	東京工業大学 すずかけ台キャンパス	井上アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	2月10日	樋口チーム	JST 東京本部別館	高柳アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤

	2月13日	浅野チーム	九州大学 伊都キャンパス	石内アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	2月14日	竹内チーム	中央大学 後楽園キャンパス	河村アドバイザー、清水アドバイザー、JST 沼澤
2020年度	7月14日	樋口チーム	オンライン	高柳アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	7月27日	益チーム	オンライン	井上アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤
	7月29日	富士田チーム	オンライン	井上アドバイザー、田原アドバイザー、JST 沼澤
	8月5日	高尾チーム	オンライン	高柳アドバイザー、西村アドバイザー、JST 沼澤
	8月7日	竹内チーム	オンライン	河村アドバイザー、清水アドバイザー、JST 沼澤
	11月6日	橋本チーム	オンライン	清水アドバイザー、津田アドバイザー、JST 沼澤、鈴木
	11月16日	益チーム	オンライン	井上アドバイザー、中込アドバイザー、JST 沼澤、鈴木
	11月18日	富士田チーム	オンライン	田原アドバイザー、井上アドバイザー、JST 沼澤、鈴木
	11月27日	竹内チーム	オンライン	河村アドバイザー、清水アドバイザー

(ii) 研究費の配分

CREST では、研究成果があがっている採択課題に予算を重点的に配分することを優先し、領域会議、ヒアリング会議、研究課題中間評価、サイトビジットにおいて研究進捗を確認し、研究費増額を行った。

この領域の特徴として、翌年度の研究計画の作成については、研究代表者（および主たる共同研究者）からヒアリングを実施しており、そのヒアリング会議にて研究総括および領域アドバイザーから研究計画や体制の見直し、予算計画に関するコメントを行い、その内容も加味して予算増額も行っている。

特に、研究課題中間評価においては、「選択と集中」の観点から、成果のあがっているテーマを加速するとともに、必要な場合には、研究体制の見直しや更なるアウトリーチにも言及した（体制見直し：2013年度採択・高木チーム、アウトリーチ言及：2014年度採択・浅野チーム、益チーム、橋本チーム）。

・採択時の配分

面接選考において採択候補者が決定した段階で研究費項目を精査し、不要な部分は減額した。また、2015年度（採択3期目）は、より多くの課題を採択するため、提案額の上限も3億円と設定して公募を実施した。

減額については、研究領域全体の予算が非常に少ない中、その予算内で課題を採択するために、提案金額より大幅な減額も行いながら予算配分を行っている。減額を行った課題は、採択時に研究代表者に通知し、その金額での実施可能性も含めて判断を行い、研究計画を作成している。

採択年度	減額した総額
2013年度	350百万円を減額
2014年度	230百万円を減額
2015年度	120百万円を減額

・予算見直しによる配分

年度途中に、研究計画の見直しを実施することにより、必要な研究費の変更（前倒し、増額等）を行った。研究総括は、申請があった研究費の内容を案件毎に確認し、予算増額希望については優先順位（特に装置の故障や成果加速、その他緊急時などは優先）をつけて、CREST全体予算から予算確保を行っている。年度によって異なるが、年2回ほど実施している。

CREST全体予算からの各年度の支援実績は下表の通りである。

年度	CREST 予算による増額
2013年度	約2.2百万円の増額／1チーム
2014年度	約5百万円の増額／1チーム
2015年度	約39百万円の増額／3チーム
2016年度	約40百万円の増額／5チーム
2016年度（中間評価）	33百万円の増額／3チーム
2017年度	約42百万円の増額／3チーム
2017年度（中間評価）	44百万円の増額／3チーム
2018年度	約108百万円の増額／7チーム
2019年度	約80百万円の増額／4チーム

・国際強化支援策

国際強化支援策として、JSTの制度を利用して国際交流も進めた。

2014年度には、内田チームにより、米国カリフォルニア大学・サンタバーバラ校と連携研

究を実施し、海外研究機関のポテンシャルを活用した研究加速を行っている。

また、2015-2016 年度には、波多野チームが欧州 Horizon2020 ナノテク分野へ欧州研究機関と共同応募を行った。

更に、2017 年度には、前年までに共同応募を行った欧州研究機関と波多野チームによるダイヤモンド NV センターに関するミニワークショップおよび共同研究を実施している。それ以外にも、海外研究者招へい制度や海外への研究者派遣制度を利用して、波多野チーム富士田チーム、樋口チームらが国際的なネットワーク構築や共同研究による研究加速を進めた。

・総括裁量経費による研究加速

採択時に減額を行った研究費は、当該年度の追加課題採択だけでなく、研究総括の総括裁量経費として、随時、研究成果の加速や突発的な増額必要性などの対応として再配分を行っている。

年度	総括裁量経費の増額
2014 年度	約 30 百万円の増額 / 2 チーム
2015 年度	約 66 百万円の増額 / 3 チーム
2016 年度	約 30 百万円の増額 / 5 チーム
2017 年度	約 13 百万円の増額 / 3 チーム
2018 年度	約 26 百万円の増額 / 5 チーム
2019 年度	約 7 百万円の増額 / 3 チーム
2020 年度	約 5 百万円の増額 / 3 チーム

・研究期間の 1 年延長および研究費の追加支援

CREST では、課題事後評価結果に基づき、研究費の追加ならびに研究期間延長によって研究加速が期待される課題に対し、追加支援を行っている。本研究領域では、以下の 3 課題がこの制度を利用し、研究成果の次フェーズへの橋渡し・成果の確証を図った。

対象チーム	追加支援額	延長目的
高木チーム	10 百万円	有望な TFET 構造の追加実験および成果発表
橋本チーム	10 百万円	深層学習を想定した FPGA のベンチマーク
益チーム	10 百万円	開発した慣性センサーモジュールの完成度向上

③進捗状況把握、評価、それに基づく指導における運営

(i) テーマ分類と担当アドバイザー

選考時に、戦略目標で定められている達成目標にある「素材」、「デバイス」、「システム」のそれぞれの分類をすべて網羅するように課題採択を行っている。

研究総括および副研究総括による全課題のチェックに加えて、領域アドバイザーが普段から適切な支援ができるように研究チームと専門分野に近いアドバイザーを担当アドバイザー（主副2名）として設置し、助言を行った。

(ii) アドバイザーサイトビジット

領域アドバイザーの中から同じ専門分野の担当アドバイザーを専任しており、その担当アドバイザーによるサイトビジットを2015年度より実施し、チーム毎に実施した。訪問時も議論を行っているが、訪問後に報告書の形でサイトビジットの議論内容をまとめ、研究総括に報告すると共に関係者で共有している。

サイトビジットでは、専門分野の担当アドバイザーに加えて、JST 研究領域担当も同行して、研究の進捗状況に加え、その研究環境を施設・設備（共用設備なども）、さらに人的構成等も含めて視察・確認を行うことで、研究課題に関する議論や予算運営面の基本的情報を得ている。

その視察の中で、具体的な助言から大きな進展があった事例は下記の通りである。

- ・波多野チーム（担当：石内アドバイザー、知京アドバイザー）

デバイスの作製で議論を行っていた中で、アドバイザーの研究室にある装置を使って試作を試してはどうかとの助言があり、チームの若手メンバーが研究室を訪問して実施している。

- ・樋口チーム（担当：高柳アドバイザー、田原アドバイザー）

エレクトロクロミック方式のデバイス応用として、方向性を模索していた中で、環境部材やアート・デザインに関わる展開を助言し、実際に、多摩美術大学との共同研究に発展して、成果プレスリリースも行っている。

- ・富士田チーム（担当：田原アドバイザー、井上アドバイザー）

テラヘルツ帯を用いた 8K 非圧縮無線伝送のデモ実施に向けて、研究期間内で実現可能な伝送方式について助言を行い、実際に MUX-DEMUX を実現し、世界初の 8K 無線伝送に成功している。

(iii) キックオフミーティング、領域会議、ヒアリング会議の運営

研究課題採択後に実施したキックオフミーティングで、さきがけの採択研究課題と併せて行うことで、さきがけのテーマを知るとともに、さきがけの領域アドバイザーからも幅広く指導してもらう機会を作った。

また CREST 領域会議には、さきがけの領域アドバイザーとさきがけ研究者の参加を促し、CREST の研究進捗の内容の把握だけでなく、さきがけ研究者とも密度の濃い研究議論や研究者相互の情報交換の機会とし、活用を図っている。

更に、毎年2月頃に1年間の研究進捗確認と、翌年度の研究計画の精査のために、ヒアリング会議を開催している。ヒアリングによって研究進捗の把握だけでなく、翌年度計画や予

算計画など詳細の情報を基に、適切なアドバイスとして、会議内の議論だけでなく、終了後の総括・副総括、領域アドバイザーの全員からコメントを文書として作成し、研究代表者に提供することにより、研究の方向性や最終デモに向けた取り組みなどのアドバイスを行った。

④研究交流、人材育成における運営

CREST では、研究開始時点で既に研究代表者は教授、グループリーダーとして活躍している方が大半であるが、准教授で採択された、橋本 昌宜（大阪大学）研究代表者は、2016 年度から教授へ昇進となっている。

また、CREST チーム内の研究者については、プロジェクト推進中の昇進や独立（他ファンド採択）も多数みられた。また、ポスドク育成にも注力しつつ、キャリアパスの支援を行っている。

具体的には、以下の表にみられるように各チームの若手研究者が JST さきがけ事業のような重要なファンドに採択されるなどキャリアパス形成が進んでいる。

チーム名	研究者氏名	さきがけ採択研究領域	採択年度
内田 T	長島一樹	人とインタラクションの未来	2019
内田 T	高橋綱己	革新的コンピューティング技術の開拓	2019
内田 T	細見拓郎	電子やイオン等の能動的制御と反応	2019
波多野 T	岩崎孝之	光の極限制御・積極利用と新分野開拓	2016
波多野 T	石綿整	量子技術を適用した生命科学基盤の創出	2017
益 T	山根大輔	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	2017

本研究領域のプロジェクトを通じて 47 名の博士課程修了者が生まれている。また、エレクトロニクス業界への就職者は 226 名（その内研究職 86 名）を数えている。近年博士課程離れやエレクトロニクス業界離れが懸念されるなか、本研究領域が当該分野において人材育成に果たした役割は非常に大きいと考えている。

(2) さきがけ

①研究運営方針

レイヤー間連携をうたっている本研究領域において、さきがけは個人型研究であるため各個人がすべてのレイヤーについて研究を遂行することは困難である。そこで領域全体としてレイヤー間連携ができるよう、各レイヤーからの研究提案を採択することとした。さらに提案において材料レイヤーの研究課題についてはデバイスレイヤーやシステムレイヤーでの展開を見据えた提案を、デバイスレイヤーやシステムレイヤーにおける提案についても同様に他のレイヤーを意識した研究提案を採択している。

さきがけ研究者間の連携や CREST との交流を通じて領域の目標であるエネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を目指すべく、研究状況を把握して研究成果最大化に向けて環境および研究方針について有効なアドバイスができるような運営を心がけた。

②研究環境の整備における運営

研究者がさきがけ研究を遂行するにあたり、採択当初から効率よく進められるように下記の支援を行った。

(i) 採択時サイトビジット

すべての研究者を訪問し、直上の教授や学科長などの上司の方に、それぞれの課題遂行にあたっての理解と支援を依頼すると共に、研究者と今後の研究遂行計画について打ち合わせを行い、研究計画と研究予算を決定している。このサイトビジットによって申請額を上回る予算を配分した研究者もいる。

また研究環境についても視察／見学し、状況把握に努めた。訪問日程および訪問場所は下表のとおりである。

一期生

日程	訪問研究者	訪問先
2013年10月4日	原祐子	奈良先端科学技術大学院大学
2013年10月4日	井上振一郎	情報通信研究機構
2013年10月5日	戸川欣彦	大阪府立大学
2013年10月7日	宮田耕充	首都大学東京
2013年10月7日	安武裕輔	東京大学
2013年10月7日	山本倫久	東京大学
2013年10月8日	望月維人	青山学院大学
2013年10月9日	山田浩之	産業技術総合研究所

2013年10月9日	岡田直也	産業技術総合研究所
2013年10月9日	安藤和也	慶應義塾大学
2013年10月10日	青野真士	東京工業大学
2013年11月15日	大野武雄	東北大学
2013年11月15日	吾郷浩樹	九州大学

二期生

日程	訪問研究者	訪問先
2014年10月3日	福田憲二郎	山形大学
2014年10月3日	山崎歴舟	東京大学先端研
2014年10月8日	廣理英基	京都大学
2014年10月14日	河野 崇	東京大学生産研
2014年10月15日	関 剛斎	東北大学
2014年10月16日	友利ひかり	筑波大学
2014年10月16日	荒井礼子	産業技術総合研究所
2014年10月16日	長田貴弘	物質材料研究機構
2014年10月17日	高橋陽太郎	東京大学
2014年10月17日	長汐晃輔	東京大学

三期生

日程	訪問研究者	訪問先
2015年10月7日	太田実雄	東京大学生産研
2015年10月7日	小林正治	東京大学生産研
2015年10月8日	高橋一浩	豊橋技術科学大学
2015年10月8日	後藤太一	豊橋技術科学大学
2015年10月19日	赤井恵	大阪大学
2015年10月19日	服部梓	大阪大学
2015年10月21日	牧英之	慶應義塾大学
2015年10月21日	竹内尚輝	横浜国立大学
2015年10月23日	吉村哲	秋田大学
2015年10月29日	藤枝俊宣	早稲田大学
2015年10月29日	高橋圭	理化学研究所

(ii) 研究費の配分

研究の状況を絶えず把握するように努め、成果最大化に向けてタイムリーな予算見直しによる研究費の増額を行った。領域終了まで52件で総額102,637,540円の増額を行って

る。特にさきがけ研究に支障が出る事が予想される緊急時や当初を上回る成果が期待される加速・発展の案件については増額を行っている。

- ・採択時の配分

面接選考において採択候補者が決定した段階で研究費項目を精査し、不要な部分は減額し、必要と思われるものには増額を行った。減額については採択後に研究者に通知し、増額については採択後のサイトビジットで必要性を考慮して必要額を増額している。

- ・予算見直しによる配分

JST での予算見直しによって必要な研究費の増額を申請して研究費の補充を適宜促した。またさきがけで購入した装置が破損した場合や、研究室移転で水質の悪化があった場合など、さきがけ研究に支障がでたときに緊急案件として研究費を増額して支援している。

- ・国際強化支援策

若手研究者の頭脳環境支援としての国際強化支援策で、研究者から応募のあった 2014 年度は安藤研究者が支援を受けて英国・グラスゴー大学に渡っている。翌 2015 年度は研究領域主導で副研究総括の裁量で支援し、岡田研究者が豪州・メルボルン大学へ渡航し、山崎研究者が英国・サセックス大学に渡航して、短期ではあるが、さきがけ研究を進めている。他に 2015 年度は CREST 研究領域「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」[二次元] から吾郷研究者と長汐研究者が支援を受けている。

JST の制度を利用して国際交流も積極的に進めた。

- ・総括裁量経費による研究加速

2014 年度から JST が認めた総括裁量経費について、さきがけ担当の副研究総括が妥当と判断した研究加速のための増額を行った。また、最終年度前に最後の研究計画を検討する際に必要な研究費を総括裁量経費から最終年度の研究費として増額を行っている。

採択時の配分を除き、研究費増額によって研究者を支援したのはこれまで 52 件になり、総額 102,637,540 円（ただし契約における研究費に含まれていない CREST [二次元] 領域からの国際強化支援による増額を含む。）になる。多くの新しい研究項目を支援した。

③進捗状況把握、評価、それに基づく指導における運営

(i) テーマ分類と担当アドバイザー

選考時からすべての提案を分類し戦略目標の達成項目を網羅するように努めた。採択後は広い分野にわたる研究テーマについて適切な支援ができるように研究者と専門分野に近いアドバイザーに担当アドバイザーとして助言をするようお願いした。

課題の分類

分類	研究者
二次元薄膜	吾郷浩樹、宮田耕充、安武裕輔、友利ひかり、長汐晃輔、福田憲二郎、太田実雄
酸化物	大野武雄、山田浩之、高橋圭、服部梓
光	井上振一郎、高橋陽太郎、廣理英基
スピン	安藤和也、戸川欣彦、望月維人、荒井礼子、関剛斎、後藤太一、吉村哲
量子	山本倫久、山崎歴舟、牧英之
CMOS	岡田直也、長田貴弘、小林正治
回路	青野真士、原祐子、河野崇、赤井恵、竹内尚輝
ヘルス	高橋一浩、藤枝俊宣

担当アドバイザー

一期生

研究者	担当
青野 真士	武藤
吾郷 浩樹	水谷
安藤 和也	笹川
井上 振一郎	上田
大野 武雄	秋永
岡田 直也	福島
戸川 欣彦	平山
原 祐子	森村
宮田 耕充	楠
望月 維人	笹川
安武 裕輔	平山
山田 浩之	福島
山本 倫久	武藤

二期生

研究者	担当
荒井 礼子	秋永
河野 崇	森村
関 剛斎	笹川
高橋 陽太郎	上田
友利 ひかり	楠
長汐 晃輔	水谷
長田 貴弘	福島
廣理 英基	武藤
福田 憲二郎	高井
山崎 歴舟	平山

三期生

研究者	担当
赤井 恵	森村
太田 実雄	上田
後藤 太一	平山
小林 正治	福島
高橋' 一浩	高井
高橋" 圭	笹川
竹内 尚輝	森村
服部 梓	秋永
藤枝 俊宣	高井
牧 英之	楠
吉村 哲	水谷

(ii) アドバイザーサイトビジットおよび終了年度前サイトビジット

研究者に対し、きめ細かな支援ができるよう、担当アドバイザーによる研究室訪問も行う

た。研究課題について深い知識と研究経験を持つアドバイザーと議論することにより新たな研究の方向性を見いだすケースもある。

アドバイザーによるサイトビジット

日程	研究者	アドバイザー
2014年5月29日	大野 武雄	秋永 広幸
2014年6月23日	青野 真士	武藤 俊一
2014年7月11日	安武 裕輔	平山 祥郎
2014年7月24日	吾郷 浩樹	水谷 孝
2014年9月22日	安藤和也	笹川 崇男
2014年10月10日	山本倫久	武藤 俊一
2016年2月9日	山田浩之（最終年度時に参加）	秋永 広幸
2016年2月17日	友利ひかり（担当外で）	秋永 広幸
2016年9月28日	廣理英基（担当外で）	笹川 崇男

さきがけ研究期間の最終年度前に、副研究総括がそれぞれの担当アドバイザーとともにすべての研究者に対してサイトビジットを行い、研究の進捗状況を把握して研究成果の最大化に向けて、最終年度の研究計画を確定、研究費の見直しも行った。

一期生

日程	研究者または 対象研究者	訪問先
2016年2月8日	望月維人	青山学院大学
2016年2月9日	岡田直也	産業技術総合研究所
2016年2月9日	山田浩之	産業技術総合研究所
2016年2月10日	井上振一郎	情報通信研究機構
2016年2月11日	戸川欣彦	大阪府立大学
2016年2月12日	吾郷浩樹	九州大学
2016年2月15日	山本倫久	東京大学
2016年2月16日	安藤和也	慶應義塾大学
2016年2月17日	安武裕輔	東京大学
2016年2月19日	大野武雄	東北大学
2016年2月22日	青野真士	東京工業大学
2016年2月22日	原祐子	東京工業大学
2016年2月23日	宮田耕充	首都大学東京

二期生

日程	訪問研究者	訪問先
2017年1月17日	河野崇	東京大学生産技術研究所
2017年1月17日	山崎歴舟	東京大学科学技術研究センター
2017年1月19日	福田憲二郎	理化学研究所
2017年1月24日	関剛斎	東北大学
2017年1月26日	友利ひかり	筑波大学
2017年1月27日	廣理英基	京都大学
2017年2月2日	荒井礼子	産業技術総合研究所
2017年2月2日	長田貴弘	物質・材料研究機構
2017年2月3日	長汐晃輔	東京大学
2017年2月3日	高橋陽太郎	東京大学

三期生

日程	訪問研究者	訪問先
2018年1月9日	小林正治	東京大学生産技術研究所
2018年1月9日	高橋圭	理化学研究所
2018年1月12日	吉村哲	秋田大学
2018年1月17日	藤枝俊宣	早稲田大学
2018年1月25日	高橋一浩	豊橋技術科学大学
2018年1月25日	後藤太一	豊橋技術科学大学
2018年1月31日	竹内尚輝	横浜国立大学
2018年1月31日	牧 英之	慶応義塾大学
2018年2月5日	赤井恵	大阪大学
2018年2月5日	服部梓	大阪大学

(iii) 領域会議の運営

本研究領域における領域会議の特徴として以下の3点を挙げられる。

- ・1年に2回、さきがけ研究生、領域アドバイザー、副研究総括が一堂に会し、さきがけ研究生の研究進捗を把握し情報交換を行う領域会議を開催した。研究テーマの分類およびアドバイザーの担当を考慮してスケジュールを組み、深く活発な議論ができるようにしている。予定を含むこれまでの開催日時・場所は以下のとおりである。

	日程	会場	特別講演
第1回	2014年 2月7日～8日	土佐ロイヤルホテル	横山副研究総括、 笹川アドバイザー
第2回	2014年	新横浜	外村理事、黒部研究総括、

	9月4日～5日	グレイスホテル	上田アドバイザー
第3回	2015年 1月13日～15日	チサンホテル神戸	津田アドバイザー (CREST)
第4回	2015年 7月6日～8日	ホテルクレセント	福島アドバイザー、 平山アドバイザー
第5回	2015年 11月26日～28日	アークホテル ロイヤル福岡天神	秋永アドバイザー、 笹川アドバイザー
第6回	2016年 5月12日～14日	アワーズイン 阪急シングル館	桜井研究総括
第7回	2016年 11月17日～19日	ロワジールホテル 豊橋	(なし)
第8回	2017年 5月18日～19日	オークラフロンティア ホテルつくば	(なし)
第9回	2017年 11月15日～17日	大阪コロナホテル	森村アドバイザー
第10回	2018年 5月17日～18日	秋田ビューホテル	高井アドバイザー
第11回	2018年 11月15日～17日	名古屋大学 名古屋クラウンホテル	天野先生から研究施設紹介 平山アドバイザー

(赤字はさきがけの領域アドバイザー)

・所属機関の見学等を企画して開催場所も所属機関所在地が多く、開催場所は全国に分布している。所属機関所在地がある都市の例として、横浜市、神戸市、仙台市、福岡市、東京都、豊橋市、つくば市、大阪市、秋田市、名古屋市で開催した。これまでの開催地分布は下図の通りである。

領域会議開催場所



(iv) 四半期報告

JST に提出する研究進捗報告とは別に、その中間時期に四半期報告を研究者から副研究総括に直接提出して、タイムリーなアドバイス等を行えるようにした。すべての研究者に対して、副研究総括がひとりずつ回答をしている。

研究の進め方や研究環境等について副研究総括、事務局だけでなく、専門的な知識を有する担当アドバイザーが対応した。

④ 研究交流、人材育成における運営

研究の異分野交流については領域会議やサイトビジットの際も助言や奨励をしてきており、自主的な交流においても活発に行われてきた。一期生の宮田研究者を代表として一期生の岡田研究者および三期生の小林研究者とともに CREST「二次元」領域に採択されるなど、交流による多くの成果が得られた。

(i) SciFoS 活動

JST のさきがけ研究者向け Science For Society (SciFoS) 活動の目的は、社会からの期待に触れる機会としてのインタビューを通じて、“出口から見た基礎研究”的な視点や様々

なニーズを知ることによって、新たな気づきを得て、自らの研究の位置づけを見つめ直し、“出口を見据えた基礎研究”である「さきがけ」研究のステップアップに繋げることである。

本さきがけ研究領域では積極的に SciFoS プログラムに参加しており、2014 年度は本さきがけ研究が疾患代謝領域とともに SciFoS 活動を行っている。それぞれの研究領域から 4 名の研究者が参加し、産業界関係者とインタビューを数回繰り返して、視野を広めている。研究者にも大変好評であり、JST のホームページに報告書が掲載されている。

より多くの研究者に参加しやすいよう活動内容が改善された「SciFoS 展開型活動」に対しても積極的に参画しており、2017 年度には関研究者、後藤研究者、高橋一浩研究者の 3 名、2018 年度には小林研究者、藤枝研究者の 2 名が参加した。

活動の具体例としては、三期生藤枝研究者が医療機器開発に関連する企業 3 社を訪問し、埋め込み型医療機器の現状課題と今後の展望に関するインタビューを行なった。循環器やがん治療分野における埋め込み型医療機器の現状課題や対策を調査するとともに、フレキシブルデバイスが役割を担うであろうアンメットメディカルニーズの抽出を試みている。また、活動の結果として、埋め込み型医療機器の開発では治験計画だけではなく承認後のビジネスモデルの重要であること、治療効果だけでなく患者の QOL も考慮した医療システムの創出も必要であることを再認識し、シーズと医療側の適切なマッチングに関しての価値仮説の修正、研究へのフィードバックが進んだ。

(ii) 外部機関との討論会

実用化の構想を示すことを課している本研究領域では企業との打合せを企画して研究成果の応用等についての視野を広げることを進めた。

外部機関との打ち合わせは研究者が個別に行うのも多くあるが、さきがけ担当の副研究総括は特に必要と思われる研究者に対して外部機関（主に産業界）との打ち合わせをアレンジして、研究内容およびその応用についての議論を通じて今後の研究活動に資するように心がけた。副研究総括がアレンジした主な打ち合わせは下記の表のとおりである。

年月日	内容	場所	打合せ機関
2016 年 12 月 22 日	井上研究者のテーマについて意見交換	産業技術総合研究所	PETRA
2017 年 1 月 16 日	赤井研究者のテーマについて意見交換	NTT コミュニケーション科学基礎研究所	NTT
2017 年 2 月 2 日	友利研究者の研究についての相談	NIMS MANA 棟	(株) コメット
2017 年 3 月 3 日	高橋陽太郎研究者のテーマの応用についての相談	浜松ホトニクス中央研究所	浜松ホトニクス

(iii) レイヤー間研究会

さきがけは、すべてのレイヤーについて研究を遂行することは困難であるが、選考において連携を意識した採択を行っている。異なるレイヤーの研究者が集まる領域会議ではレイヤーの連携を踏まえた議論も多く行われ、2016年度よりさきがけ研究者の有志によりレイヤー間研究会を開催してレイヤー間の交流を深めている。これまでの開催は下記の通りである。

	年月日	場所	話題提供者／演題	参加者
第1回	2016年 6月30日	東京工業大学・大岡山キャンパス 地球生命研究所・旧棟(ELSI-2)4階 407/409会議室	原祐子 特論：組込みシステム設計とは？ 竹内尚輝 アメーバ計算の実現	青野真士 大野武雄 戸川欣彦 山田浩之 服部梓
第2回	2016年 11月1日	東京工業大学・大岡山キャンパス 地球生命研究所・旧棟(ELSI-2)4階 407/409会議室	小林正治 デバイスの歩留まりとは 福田憲二郎 プリント有機デバイスの実情 青野真士 特論：アメーバ計算	服部梓 竹内尚輝 戸川欣彦
第3回	2017年 3月7日	東京工業大学・大岡山キャンパス 南3号館2階 第3会議室	戸川欣彦 材料が示す多値性は意味あるか？ キラル磁性体とスピンドバイスを題材に 服部梓 脳型トランジスタの動向と研究状況	青野真士 原祐子 大野武雄 山田浩之 竹内尚輝 福田憲二郎 小林正治 藤枝俊宣
第4回	2017年 7月21日	公益財団法人 新世代研究所	宮田耕充 CREST への道	戸川欣彦 原祐子 大野武雄 山田浩之 服部梓 竹内尚輝

				小林正治
第 5 回	2017年 12月15日	新世代研究所4階 会議室	藤枝俊宣 生体とエレクトロニクスと私 小林正治 シリコントランジスタの研究動向	大野武雄 戸川欣彦 原裕子 山田浩之 服部梓

(iv) 新興領域研究会

さきがけ研究者を主体として、本研究領域で創出されたナノエレクトロニクス技術のシーズを中心に、それらの展開可能性を検討し新興研究分野の創出を狙う研究会を実施した。具体的には、新興技術分野の概観や当該分野で世界をリードするための戦略策定検討を実施した。それらの検討内容は文部科学省や JST 関係部署にも共有し、令和 2 年度文部科学省戦略目標「情報担体と新デバイス」という新しいナノエレクトロニクス研究領域の創出にも貢献した。以下に研究会の実施状況を記す。

	年月日	テーマ・話題提供	参加者
第 1 回	2019年 2月22日	準備会合 新興領域研究会の方向性について議論	横山副研究総括、笹川 AD、原、長汐、福田、後藤、小林
第 2 回	2019年 5月7日	話題提供 ・横山副総括「近年の研究開発動向」 ・森村 AD「AI とリザバーコンピューティング」 ・笹川 AD「量子物質とナノエレクトロニクス」 ・高井 AD「バイオ・ヘルスケアの研究開発動向」	横山副総括、笹川 AD、高井 AD、森村 AD、赤井、後藤、小林、長田、原、福田、藤枝、JST
第 3 回	2019年 8月7日	・参加さきがけ研究者からの話題提供 ・リザバーコンピューティング、ヘルスケア応用、量子コンピューティングに関して、今後の展望等を議論	横山副総括、笹川 AD、高井 AD、森村 AD、青野、赤井、後藤、小林、長汐、長田、原、福田、藤枝、望月、JST
第	2019年	ヘルスケア関連研究会	横山副総括、高井 AD、

4 回	10月2日	ヘルスケア応用、フレキシブルデバイスについて、外部有識者（5名）を交えて研究会を開催	長汐、長田、福田、藤枝、JST、文部科学省
第 5 回	2019年10 月24日	リザーコンピューティングワークショップ リザーコンピューティングに関して、理論、デバイス、産業分野から有識者（6名）を交えて研究会を開催	横山副総括、森村AD、青野、赤井、後藤、小林、原、望月、JST、文部科学省

(v) 賞の推薦（受賞については7.(2)に記載）

受賞は研究者の研究成果を評価され認められることから人材育成の観点からも機会あるときは推薦を行った。これまで本研究領域から推薦して受賞に繋がったのは、日本学術振興会賞1件、文部科学大臣表彰若手科学者賞11件、本多記念研究奨励賞1件がある。

(3) 複合領域として

研究総括および副研究総括がそれぞれ CREST およびさきがけを担当し、アドバイザーも各々CREST またはさきがけを担当しているが、相互に補完しながら運営を進めて戦略目標に資する成果を最大化するために複合領域としての取り組みを積極的に行った。

①採択におけるポートフォリオ等の考慮

選考についての箇所でもふれたように、CREST、さきがけ全体のポートフォリオを考慮しながら選考を行った。さきがけではすべてのレイヤーを網羅している課題はほとんどないと考えられることから、CREST との交流および連携は研究を進めるうえで有効である。CREST としてもさきがけの独創的で挑戦的な構想は参考になる。

連携を考慮した選考の結果として、CREST 橋本チームのピアスイッチを用いたデバイス作成において、さきがけ一期生の原研究者との連携が進められたことや、CREST 竹内チームの超高信頼配線（グラフェンラップ Cu 配線）のために結晶性の良い単層グラフェン（SLG）を、さきがけ一期生の吾郷研究者が提供するなど、CREST とさきがけの連携が進んだ。

②合同キックオフミーティング

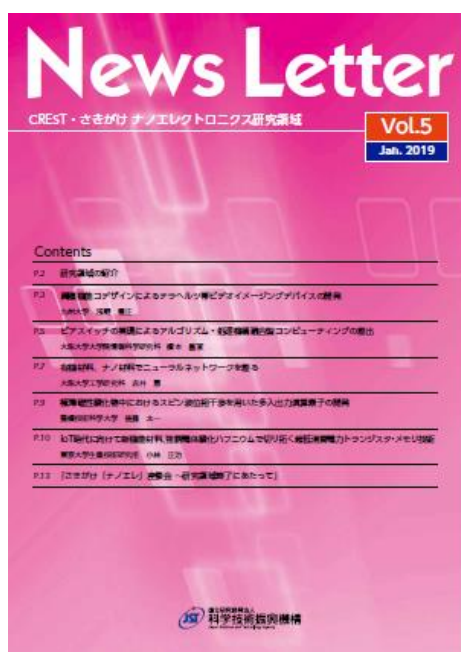
採択後の CREST キックオフミーティングでは、さきがけ採択者も加わり、合同で開催した。レイヤー間連携や研究交流を積極的に進めていく上で、採択後早期に領域内の研究者交流を促すために今後の研究についてお互いに周知し連携等を進める目的で企画した。

③ニュースレターの共同発行

情報発信を目的に CREST とさきがけ共同で採択概要、研究内容、および顕著な研究成果等を1回/年程度で発行している。配布対象は異分野の研究者など基礎的な科学知識のある

方を念頭に広く配布しており、現在までに第5巻まで発行している。





④ さきがけ研究者のテーマについて CREST 研究者等との討論

個人型研究であるさきがけは研究の方向について他の研究者の意見が重要になることがある。複合領域である利点を活かしてチーム型の研究を行う CREST の研究者およびアドバイザーと意見交換することで新たな展開が生まれる可能性がある。研究総括および副研究総括は積極的に意見交換の機会をつくり複合領域としての討論を推進した。主な討論は下記のとおりである。

年月日	会合目的	会場	参加者
2015年 8月15日	アメーバ計算についての意見交換会	東京本部別館 4F 会議室	桜井研究総括 横山副研究総括 武藤さきがけ担当アドバイザー 石内 CREST 担当アドバイザー 井上 CREST 担当アドバイザー 田原 CREST 担当アドバイザー 青野真士研究者
2016年 1月22日	CMOS-TFET のアーキテクチャ構成についての打合せ	東京大学生産技術 研究所桜井教授室	桜井研究総括 横山副研究総括 森村さきがけ担当アドバイザー 原祐子研究者 CREST 高木チーム (高木教授、東芝 G 関係者)

2017年 2月22日	河野研究者のテーマ について意見交換	東京大学生産技術 研究所桜井教授室	桜井研究総括 横山副研究総括 中込 CREST 担当アドバイザー 森村さきがけ担当アドバイザー 河野崇研究者
2017年 2月28日	関研究者のテーマに ついて意見交換	東京工業大学	横山副研究総括 笹川さきがけ担当アドバイザー CREST 波多野チーム（波多野教授、 他） 関研究者

⑤領域会議における交流

さきがけ領域会議での CREST との交流

年月日	日程	会場	CREST との交流の企画
2014年9月 4日～5日	第2回 さきがけ領域会議	新横浜グレイスホ テル	CREST「二次元」領域黒部研究総括 の特別講演
2015年1月 13日～15日	第3回 さきがけ領域会議	チサンホテル神戸	CREST 津田アドバイザーの講演
2016年5月 12日～14日	第6回 さきがけ領域会議	アワーズイン阪急 シングル館	CREST 担当の桜井研究総括の特別講 演
2016年11月 17日～19日	第7回 さきがけ領域会議	ロワジールホテル 豊橋	一期生課題評価のためCRESTア ドバイザーの参加
2017年11月 15日～17日	第9回 さきがけ領域会議	大阪コロナホテル	二期生課題評価のためCRESTアドバ イザーおよびCREST研究者の参加
2018年11月 16日～17日	第11回 さきがけ領域会議	名古屋クラウンホ テル	三期生課題評価のためCRESTアドバ イザーおよびCREST研究者の参加

CREST 領域会議でのさきがけとの交流

年月日	会合	会場	さきがけとの交流内容
2016年 9月7日	第1回 CREST 領域会議	東京グリーンパレ ス会議室ふじ	さきがけ担当アドバイザー6名、さ きがけ研究者2名が参加して討論
2017年 9月27日	第2回 CREST 領域会議	JST 東京本部別館 1階ホール	さきがけ担当アドバイザーおよびさ きがけ研究者も参加して討論
2020年 8月22日	第5回 CREST 領域会議	オンライン	さきがけ研究者も参加して討論

⑥さきがけ課題評価における CREST 担当アドバイザーの参加

さきがけでは、課題評価会を領域会議で行っている。さきがけ終了前最後の領域会議において下記の項目について口頭での説明を行い、その後ポスター発表で詳細に評価を行った。その際、CREST 担当のアドバイザーも参加して、新たな視点で評価を行っている。

CREST 担当アドバイザーの評価は、それまでのさきがけ内の状況にとらわれない新鮮な評価がなされ、研究者にフィードバックしている。

(4) 研究領域中間評価結果への対応

研究領域中間評価報告書では重要なコメントをいただいた。それらについての対応を以下にまとめる。

1) 知財の強化：

領域中間評価において、特に CREST を対象に「学術論文数や国際会議発表件数に比べると、特許出願件数は、現時点では多いとは言えないが、研究成果に基づいた技術の優位性は、着実に高まっており、権利化の一層の強化が望まれる。」とのコメントをいただいた。

【対応策】

各研究チームおよび研究者には領域発足当初から社会実装を意識し十分な特許出願、知財確保に努めるよう進言してはいたが、領域中間評価以降領域会議やサイトビジット等で知財状況についても成果と併せての進捗把握を強化した。領域後半で成果が充実してきたこともあるが、CREST では中間評価時の特許出願件数が 49 件であったが、領域終了の現時点では 105 件と増加している。また、質という観点でもデバイスとしての革新性を示す強い特許の確保に努めてもらうよう領域としてマネジメントを進めた。

2) 革新的なプロセス技術の開発：

領域中間評価において、「社会実装に向けた、革新的なプロセス技術の開発という観点は、十分とは言えない面もある。まずは関連分野の研究者との情報共有・連携からマテリアルズ・プロセスインフォマティクスの要素も取り入れる体制を検討し（中略）」というコメントをいただいた。

【対応策】

プロセス開発における本研究領域の戦略は、まずは圧倒的な性能を持つデバイスおよびシステムをプルーフオブコンセプトとして開発し、その後企業との共同研究や別のファンディングの中で量産化を視野に入れたプロセス開発に取り組むということを念頭に置いている。さらに CREST においては、レイヤーを超えた研究開発体制ということで企業と共同研究を進める研究チームも多数存在しており、基礎研究を進めるなかでも必然的に量産化を視野に入れたプロセスという点は加味されている。具体的には、触覚センサーを開発する高尾チームでは、CREST 研究で得られた知財をタッチエンス株式会社とライセンス契約することによって、量産化に向けた開発がスタートしている。

一方で、指摘いただいた企業では取り組めない真に革新的なプロセス開発という点では、エレクトロクロミック材料を開発する樋口チームにおいて、2019 年度より研究グループに産総研が加わることによって、マイクロ波を利用した合成時間の短縮化といったアプローチも進めた。

7. 研究領域として戦略目標の達成状況について研究を実施した結果と所見

(1)CREST

①研究総括のねらいに対する研究の状況

新規機能性材料の適用可能性の追求等による素材技術の創出、新材料・新原理・新構造の論理素子・記憶素子の動作検証等によるデバイス技術の構築、先進的なナノテクノロジー等の実装に向けたナノシステム最適化技術の創出、及びそれら技術の融合や連携により、情報処理エネルギー効率の劇的な向上や新機能の実現を目指した研究が実施されている。

そのため、各チームは産業界から共同研究機関（もしくは関係者）が参画した、複数技術レイヤーからなる研究チームを構築し、桁違いの低エネルギーの実現や新規機能の創出を目標と定めて、最終的なデモンストレーションを行うように研究チーム内で研究が進められている。

以下に、各研究チームの成果を記す。

内田チーム：

本研究課題は、LSI と融合し、生体および環境からの様々な情報を従来よりも 3 桁高いエネルギー効率で収集するセンサシステムの共通基盤技術を創製することを目的としており、半導体や酸化物で構成されるナノ細線、ナノシートで標的分子やガスを検出することに成功している。特に、細線に流れる微量の電流を制御することで自己発熱を安定化し、分子の吸着脱離が可能なセンサを開発した。この研究成果を使うことで、当初目標を超えて大幅に低消費電力で、気体中に含まれる少量の水素やアンモニア、窒素酸化物などの標的物質を選択的・電気的に認識することに成功している。また、酸化物半導体に有機修飾を施し、分子間相互作用を利用することで、肺がんマーカーであるノナナールを極低濃度で検出することに成功している。

これらのセンサは、材料からデバイス、システムまでが融合されることによってはじめて実現できるものであり、専門分野の異なるチームによる分野融合が功を奏している。

基礎研究の観点からは、化学反応とエレクトロニクスという異なる分野の融合を進めており、原理や素過程の理解による新しい学術領域を創成することに貢献している。また、データ解析の部分では深層学習を導入するなど、新しい知の融合にも成功している。

これらの成果をさらに発展させ、大規模なクロスポイント型分子センサやチップ上に異なる 3 種類のセンサを搭載し、それぞれが独立かつ高速に機能することにも成功するなど、実用化の観点からも優れており、当初の目標をはるかに超える成果を挙げている。今後も着実な基礎研究を続けるとともに社会実装に向けた研究プロジェクトや企業との本格的な共同研究への展開を期待する。

高木チーム：

本研究課題は、バンド間トンネル現象という全く異なる動作原理に変えたトランジスタ（トンネル FET：TFET）を実用化する技術を導くため、60mV/桁の S 値の壁を超えることを目標に、様々な材料とデバイス構造の組み合わせについて体系的な試作・実験を重ねることで様々な検討を行った。5.5年の研究終了段階において、化合物系材料で、InGaAs を用いた量子井戸構造と ZrO₂ ゲート絶縁膜を用いた TFET において、プレーナ型 III-V TFET としてチャンピオンデータとなる、S 値 50 mV/桁を観測するなど当該分野で世界をリードする成果を上げるとともに、これらの解析結果をもとに、新たなデバイス構造および開発指針の提案に成功している。1年間の延長研究として、良好なスイッチング特性及び相補型トランジスタとして総合的な性能が期待された酸化物半導体とIV族半導体ヘテロ界面を利用した bilayer 構造デバイスの実証に取り組み、デバイスの試作と特性評価を行った。目標とする S 値 60mV/桁という特性に届かなかったものの、同構造による n 型、p 型 TFET の両方の動作確認に成功しており、MOSFET 同様の相補的な回路構成実現のための設計指針を拓いたことは科学技術として高い評価に値する。

一方で、今後の実用化に向けては、既存技術に対する優位性を示すキラーアプリの探索や適切な産業界とのタイアップが引き続き課題として残っている。本テーマは、半導体の基幹デバイスとして永年の切望であり、本プロジェクトで明らかとなった設計指針を産業界と共有し、継続的な研究開発体制が構築されることを期待する。

波多野チーム：

本研究課題は、ダイヤモンド中の NV センタ（窒素-空孔中心）を利用した高感度、高分解能、かつ常温動作可能な 2次元磁気イメージセンサを研究開発し、その応用として革新的な生体磁気計測システムを創出することを目標としている。成果として磁場検出感度 1 nT/√Hz、空間分解能 10 μm を達成、研究開発開始時のセンサ性能を数桁向上させることに成功した。また、ナノスケールの生体応用やマクロスケール測定応用への適用も行われ、今後更なる発展を期待させる顕著な成果である。

具体的には、本研究ではダイヤモンド中の NV センタを高配向かつ高密度に生成する「NV 高配向アンサンブル」を実現することに成功し、それをベースにマイクロスケール、ナノスケール磁気センサを開発しており、実際にデバイス化に成功している。この過程で、NV センタが高配向となる物理的メカニズムについても理論的解明を進めるなど、独創性が高くかつ、国際的にも高い水準の研究成果が得られた。

また、当初計画では想定されていなかった NV センタによるデバイス内部の電界検出にも成功しており、パワーデバイス応用など新たな展開も視野に入った。その他、新たなカラーセンタとして GeV センタ、SnV センタの形成にも成功している。これらは量子光源として求められる発光強度の低さや発光波長の均一性といった課題の解決に貢献することが期待される。

基礎研究、応用研究ともに国内外の研究者との連携研究、特に分野をまたがったレイヤー間連携が有効に働いた。例えば、生体や細胞の計測分野においては、細胞内および生体内でのダイヤモンド微粒子の回転運動の観察、磁性微粒子による細胞計測に成功した。材料、デバイスと生体研究者との協働が功を奏した。これらの成果は研究代表者の強いリーダーシップや国際的な戦略性が優れていることを示しており、高い評価に値する。

NV センタによる磁気センサは、今後、脳磁計測をはじめ多くの応用が期待されている。将来の実用を確固たるものとするために、引き続き着実な基礎研究を進めるとともに関連企業等とのコンソーシアム構築などの研究開発環境の整備が期待される。

浅野チーム：

本研究課題はテラヘルツ領域の高感度・実時間イメージングデバイスの開発を目的としたものであり、1THz 近傍で高利得を有するアンテナ、高移動度半導体をガラス基板に実装した高感度検波素子、信号処理回路、を3次元集積したイメージャ用基本技術を開発するとともに、アンテナに関する基本特許取得、検波素子の最適化手法開発、などの成果を上げている。従来比 100 倍以上の感度目標(1pW/√Hz)に対し、それを超える感度達成を実験的に検証した。

アンテナや高感度検波素子をガラス基板上に集積する技術や 1THz 近傍での分光イメージングは科学技術に大きく貢献すると期待される。また、電波の持つ物質透過性、光の持つ屈折性、さらには分子間力の検知などを併せ持つ特徴を活かして、セキュリティ、社会インフラ保守、創薬などの分野で新規サービスが拓けることが期待される。

アンテナ、デバイス、回路、システム、各レイヤーは緊密に連携し、イメージャの性能確認を目指しており、早期にイメージングのデモが実現することが期待される。今後、他の研究機関の動きが活発化することが予想されるため、実用化をめざした研究プロジェクトの構想など継続的な研究開発体制の構築を期待するとともに、さらなる課題の抽出と改善技術の明確化、実用化に必要な特許の取得など今後の進展を期待する。

橋本チーム：

本研究課題はビアスイッチと呼ぶ不揮発性スイッチデバイスを基本素子としたビアスイッチ FPGA (Field Programmable Gate Array) とその上での論理回路設計技術を開発し、これにより従来の FPGA に比べて性能と面積効率が格段に向上した再構成可能チップを創出することを目標としている。従来の FPGA は、スイッチの構成に配線層とトランジスタ層を共に使用し、更に SRAM が必要である。ビアスイッチは、LSI デバイスの配線層だけで実現でき、スイッチあたりの専有面積も小さい。空いた配線層とトランジスタ層に、FPGA と共に演算器やメモリ等の機能モジュールを埋め込む余地も生まれる。

本研究では、ビアスイッチ FPGA を開発してその評価チップを試作し、基本動作を実証した。小規模なビアスイッチ FPGA だが従来の FPGA 比で 10 倍の面積効率を確認した。この成

果は ISSCC という当該分野で権威ある国際学会に採択されるなど、世界的に高く評価されている。あわせてビアスイッチに基づく FPGA の回路方式やレイアウト方式、プログラミング技術やテスト技術を新規に開発し、ビアスイッチ FPGA の実用化をイメージできるものにした。これらの成果はデバイスから回路、設計ツールまで多様なレイヤーの研究の有機的連携によるもので、その研究マネージメントを高く評価する。

FPGA を大規模化するとともに機能モジュールを効率よく混載し、これにプログラムを柔軟にマッピングできれば、アプリケーションのダイレクト・マッピングを実現する強力な手段となる。1年間の延長研究によりビアスイッチ 1300 万個を搭載した評価チップの試作を完了、各ビアスイッチのプログラミングや、ビアスイッチ経由の配線や基本機能モジュール (5 入力 LUT, Look-Up-Table) の実現が確認できた。更に、ビアスイッチ FPGA 向けマッピングと、AI 機能 (CNN, Convolutional Neural Network) の FPGA 向け実装に関する技術知見が得られている。これらの研究成果を組み合わせることにより試作チップ上にアプリケーション機能が実現できるが、実際の動作確認に向けた試作チップ評価が継続中である。

今後の実用化に向けてはビアスイッチ FPGA の信頼性、量産性の評価と、それに基づく半導体製造企業とのタイアップが不可欠である。本プロジェクトの期間中にプロジェクトメンバー (一部) により設立されたスタートアップ会社 (ナノブリッジ・セミコンダクター社) を核にして、このような製品開発と事業化の体制が構築されることを期待する。

益チーム：

本プロジェクトの目標は、これまでには実現されていない高感度な加速度センサ (デバイス単体で $100\text{nG}/\sqrt{\text{Hz}}$, システム全体で $100\ \mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$) を実現し、その応用として、パーキンソン病をはじめとする難病の早期診断を実現することである。このため、強度に問題があると考えられていた金を錘として用いた MEMS の加速度センサとフロントエンド回路を一体化した、CMOS-MEMS センサを実現するという難題に挑戦した。

材料面で不安のある金合金の製造過程と物性の関係を調べることにより、降伏強度 1.5GPa 曲げ強度 2.0Ga を超える高強度の金合金の実現に成功した。このような金合金に関しては過去にほとんど探求された例がなく、科学的知見として重要で、今後の材料開発の新領域を拓くものと考えられる。材料構造の基本特許の申請が行われており、戦略的に重要な成果になっている。

加速度センサの開発においては、センサと回路の総合性能として $44\ \mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ と高感度を実現し、目標値を達成した。これまでにない応用分野への利用の道を開いたことは意義深いと考えられる。

開発されたセンサを用いてさまざまな歩行障害を伴う難病の診断に応用し、歩行障害を測定することにより 96.3%の精度で複数の難病を分類することに成功し、加速度センサの有効性を実証した。

また、当初の計画では想定していなかった筋音の測定の成功は、人間の神経系の情報取得

の方法として、今後、医療応用に利用できる可能性を持っており、さらなるデータの取得と活用研究の深化が期待される。

本プロジェクトにおいては、材料、デバイス、応用の3つのレイヤーが強く連携して、研究開始当初から戦略的に研究が進められており、応用レイヤーでは外部の医療機関と、デバイス試作ではNTT-ATなどの産業界との幅広い連携と協力体制を築くことで推進されたことも特筆すべき点である。

本課題は、2020年4月より、期間を1年間延長しその後、新型コロナウイルス感染症の影響によりさらに研究期間を半年間延長し、CMOS-MEMS用モジュールの完成度向上と、応用展開のための筋音計測の発展と裏付けをとるための研究を行った。

その結果、 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS 弛張発振型容量検出回路上にMEMS加速度センサを形成するCMOS-MEMS化を実現、 4 mm 角のチップサイズで $92 \text{ nG} / \sqrt{\text{Hz}}$ のブラウニアンノイズを得るとともに、 $77 \mu\text{G}$ の分解能を実現できることを確認した。従来のCMOS-MEMS加速度センサと比較して、本CMOS-MEMS加速度センサは初めてマイクロGレベルのセンシングの可能性を示したことになる。更に、開発した $1 \mu\text{G}$ センサ単体を用いて、親指と人差し指、中指でつまむ動作中の短母子屈筋の微細筋音を計測する方法を開発し、短母子屈筋の高周波数帯における微細筋音の計測に世界で初めて成功した。また、振戦周波数帯($5 \sim 15 \text{ Hz}$)と筋音周波数帯($15 \sim 35 \text{ Hz}$)の比を用いることにより、パーキンソン病患者と健常者の筋音の差異を明確に見いだせることも発見した。

延長により、開発したセンサとデータの計測・分析方法がパーキンソン病の早期診断に対して大いに有効であることが明白となり、コロナ収束後に臨床試験によるデータを積み重ねることにより、早期診断システムの構築が期待される。

高尾チーム：

本研究は、MEMS技術による触覚センサとそのデータのAI処理を融合した触覚センサシステムを開発し、人の指の繊細な触覚を「識別」から「官能評価」まで定量的に表現しようとするものである。基本となる測定項目(空間解像力と摩擦力検知能)の目標は他所研究事例を大きく超える解像度 100 nm 、摩擦力 $50 \mu\text{N}$ に設定されたが、最終的に空間解像度 100 nm 未滿、摩擦力分解能 $17 \mu\text{N}$ を達成できた。

初めに高空間解像型と柔軟対象物用の二種類の触覚センサデバイスが開発され、データ処理については波形解析やカオス解析によって手触り感に結びつく有意な「特徴量」の抽出を行い、さらに深層学習による直接処理も可能にした。多数の実験協力者による検証を得て精度が向上された。事例として、10種類の布地を最高99.4%の精度で識別でき、また微妙な手触り差のある7種のティッシュペーパーを最高80.4%の精度で識別するなど、優れた識別能力を実現した。続いて、それらの成果をベースに指先の指紋を模したアレイ型(神経網型)触覚センサが開発され、二次元触覚分布画像が取得された。全接触子の信号情報を分析することで、「硬さ分布」の可視化や「滑り」の計測等、高度な触覚機能評価ができるよ

うになり、さらに冷温感評価にも着手している。以上のように、本研究は力触覚領域から未踏の官能触覚領域の探求手段の確立と評価に成功し、新しい研究領域を拓いたものと言える。

さらに本研究チームはセンサ表面を極薄フィルムで保護し、皮脂・汗・血液等が存在する困難な環境での接触評価も可能にした。この触覚センサを腹腔鏡鉗子に搭載し、ゼロ摩擦の(人工)臓器を「滑り」を知覚しながらつかむ様子を数値化、可視化することに成功した。スタート時から懸案であった医療応用に向けて端緒を開く成果である。

研究開発体制は4大学、6分野から構成され、密接な協調下で研究が実施され、早い時期から製紙、センサ企業、家電製造企業との共同研究もスタートした。他の企業からの問い合わせも増えつつある。触覚を数値化することで、個人差なく事象を把握し、また標準化することも容易になるので様々な産業への波及が期待される。研究中に得られた論文、知財とも優れた水準で、とりわけ招待講演数の多さが本テーマのユニーク性を裏付けている。

本センサは対象物に接触しかつ表面をなぞるように動かす点で、システムとしての信頼性やデータの再現性が懸念されたが、当初から視点を持って改善が進められた。ハンディな触覚センサシステム機が試作され、多数の一般参加者が触るような成果デモ会場でも安定した動作を示すまでになった。触覚センサの機能の魅力に加えて、一定のロバスト性を実証していることも関心を集める一因となっている。今後多様な共同研究・開発の中で信頼性の改善も一層進むものと期待できる。

竹内チーム：

本研究課題は、デジタルデータを100年以上の長期にわたって様々な環境で保管できる高信頼メモリシステムを開発することが目的である。

デジタルデータの超長期保管は、今後、耐久物のIoT化や重要情報の保存などが進む上で重要になるが、いまだ解決策は確立されていない。本研究課題は、そのような未踏領域の半導体メモリ実現を目指すもので、科学技術的のみならず社会的な価値が高い。

次世代メモリとして注目されているReRAMでは、一万回の書き換え回数と100年の保持性能の両立を達成した。また、長期保管メモリの最大の課題である精度の高い「寿命予測の定量モデル」を確立した。この成果は、大手メモリ製造企業にも認められており、その意義は高く評価される。

コールドストレージ向けフラッシュメモリでは、電荷移動やデトラップなどの不良現象を明確化し、不良現象を抑制する手法を提案した。さらにニューラルネットワークによる制御を導入することで、フラッシュメモリの寿命を10倍以上に延ばすことに成功した。

超長期保管が可能となるナノギャップメモリでは、高融点金属を電極材料にすることで、800°Cを超える超高温環境でもデータを保持できることを示した。

超長期保管メモリの実用化の鍵となる配線技術においては、銅の表面の耐湿信頼性を向上するためのグラフェンラップの有効性を実証するとともに、パッドの耐湿性向上に特化

し、グラフェン被覆よりも実用的な窒素添加のアモルファスカーボン被膜技術を開発した。試作メモリデバイスに関しては、研究後半で、微細化、大容量化を行い、現在ファンダリ導入検討を進めており、実用化を促進している。

この領域が目指す、材料技術、プロセス技術、デバイス技術、回路技術、システム技術の各レイヤー間の連携もうまく機能した。

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間期間を延長し、本研究の成果のReRAMの深層学習応用に関してフィージビリティスタディを実施するとともに、ReRAM保管劣化のカギを握る酸素拡散に関する研究とパッド電極の高信頼化に関する研究を進めた。

その結果、ReRAMに適した学習方法、Direct Feedback Alignmentの高効率に学習を行う手法を確立するとともに、酸素拡散につき第一原理計算と実測によりAl添加量に対する酸素原子の拡散エネルギーに関する知見が得られ、高信頼化のための最適なAl添加量が存在していることがわかった。

またパッド電極の高信頼化試験においては、膜厚15nmのa-C:Nをパッド電極に被覆、温度85℃、湿度85%RHの高温高湿保管試験100時間（寿命400年に相当）を実施した結果、試験後もワイヤボンドの電氣的接続が得られ、耐湿信頼性の向上を確認した。

延長により、ReRAMの深層学習応用とReRAM高信頼化に関し貴重な知見が得られ、今後のイノベーションに向けた展開をより一層後押しする成果が得られた。

樋口チーム：

本研究は、エレクトロクロミック（EC）の新素材であるメタロ超分子ポリマー材料技術と、本素材の特長を活かすデバイス構造の開発により、これまでにない表現が可能なデバイスの創生を目指したものである。特に多摩美大との連携によってアート（芸術）への応用を研究の出口として目指したことで、繰り返し耐性やメモリ性、省電力性、蓄電性に代表される電子デバイス特性と共に、カラーバリエーションや加工性・造形性が高いデバイスを実現し、全く新しい領域へのECデバイスの応用展開の可能性を示した。

具体的には、主にメタロ超分子ポリマーの設計（主に配位子）や二次元ナノシートによって「色」（バリエーションや透明性）を向上させると共に、デバイス開発において対極物質を最適化することで、耐久性やメモリ性の向上、0.8V駆動、大幅な低消費電力化を達成した。また低消費電力化の研究の過程で発見した、蓄電性能は、新たな使い方や応用への発展を期待させるものである。

並行して、企業と共同でメタロ超分子ポリマーの合成プロセスの確立と販売、また製造コストのさらなる低減や、調光ガラス応用でのサプライチェーンの構築と実証実験の開始など、産業応用での実用化に向けても着実に進めていたことも成果である。

本EC材料／デバイスは、複数の論文誌の表紙を飾るなど電気化学系の専門家の間では注目度が高いものとなっており、研究成果の集大成としての「色が変わる飛行体／飛翔体デモンストレーション」によって、デザインなど他領域の方の認知度も上がり、今後、多様な応

用へと広がっていくと共に更なる材料／デバイスとしての改善がなされていくものと期待している。

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間期間を延長し(1)3種類の金属種の精密配列の実現と4色エレクトロクロミズムの達成、(2)エレクトロクロミックデバイスにおけるメモリ性の向上、(3)浮遊しながら色を変える超軽量エレクトロクロミックデバイスの創製、の3項目を実施した。

その結果、逐次的な合成手法により、鉄、ルテニウム、オスミウムの3種類の金属イオンを同種が隣り合わないように精密に並べたメタロ超分子ポリマーの合成に成功、3種類の金属の異なる酸化還元電位に基づいて、ユニークな4色エレクトロクロミズムを発現させることに成功した。また、本合成手法を用いて、コバルト、ルテニウム、オスミウムの3種類の金属を含むポリマーや、亜鉛、ルテニウム、オスミウムの3種類の金属を含むポリマーの合成にも成功した。一方、メモリ性と超軽量性に関しては、新たに発見した蓄電機能を有するメタロ超分子ポリマーを用い、浮遊しながら色が変化する超軽量エレクトロクロミックデバイスの作製と実証に成功した。

延長により、従来の表示素子では実現不可能な新しい芸術表現として「浮遊しながら表示を変えるディスプレイ」に向けた展開をより一層後押しする成果が得られた。

富士田チーム：

本研究課題は、共鳴トンネルダイオード (RTD) とフォトニック結晶を融合させることで、電波と光波の間の未開拓の周波数を有するテラヘルツ (THz) 電磁波を活用した超高速かつ低消費電力な無線通信デバイス・システムの集積基盤技術を創成することが目的である。本期間中に、以下に代表されるような大きな成果を挙げた。

- ① RTDを送受信器として用いた0.3THz帯通信システムとして非圧縮4K映像伝送に成功
- ② RTDによる同期検波現象を見だし電子デバイス送受信器として過去最高の30Gbpsの通信速度を達成
- ③ 非圧縮8K映像の無線伝送に成功
- ④ フォトニック結晶を用いたTHz帯の、結合器、共振器、伝送路、合分波器などの開発に成功

特にTHz帯でデバイス単体の性能を高めるとともに、システムとして世界で初めて非圧縮8K画像のTHz伝送に成功したことは特筆すべき成果であり、Beyond 5G、Post 5Gの世界を、テラヘルツ通信により実現できる可能性を示した。

大阪大学、東京工業大学、ローム株式会社の連携により、デバイス領域からシステム領域へのネットワークを形成し、さらに海外との連携によりTHz帯におけるトポロジカルな電磁波の伝搬を世界に先駆けて実現した。

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受け、6ヶ月間期間を延長しRTD デバイスの多チャンネル化に向けた研究と1 THz帯における高出力化に関する研究を実施した。

その結果、多チャンネル化の研究では、シリコン配線中を伝搬するテラヘルツ波が空隙をまたいで別の構造に移るテラヘルツ波トンネリング現象を利用し、テラヘルツ波の経路を分ける 4 チャンネルの合分波器を実現し、各チャンネルにおいて 12 ギガビット毎秒以上、すなわち、合計 48 ギガビット毎秒以上の通信実験に成功した。本デバイスの大きさは約 4 cm² と極めて小型であり、テラヘルツ波を用いた超大容量通信の各種応用展開を切り拓く成果であるといえる。一方、高出力化の研究では、先に考案した MIM キャパシタが不要な空洞共振器構造の系統的な評価を進めるとともに、その過程で明らかになった大面積 RTD におけるバイアス電圧印加時の過度な発熱により破壊が起こるという課題に対し、RTD 層の下に挿入されていた熱抵抗が高い n+GaInAs 層を熱抵抗の低い n+InP 層に変更することによって発熱が抑えられる事を見いだした。これらにより、1 THz 帯高出力デバイス実現に向けた見通しが得られた。

延長により、RTD およびシリコンを用いた小型テラヘルツ機能デバイス実現への道がより明確となり、今後のサイバーフィジカルシステムの実現に向けた展開をより一層後押しする成果が得られた。

②科学技術の進歩への貢献

CREST 研究チームの、これまでの論文口頭発表特許件数を下に示す。

学術論文 865 件（国際 827 件、国内 38 件）、学会発表 1,713 件（国際 721 件、国内 992 件；うち招待講演 617 件（国際 322 件、国内 295 件））と極めて多数の研究成果を発表している。また特許についても、112 件（国内 67 件、国際 45 件）と多くの出願が行われた。

年度	論文			口頭発表			特許			プレス
	国内	国際	合計	国内	国際	合計	国内	国際	合計	
内田 チーム	4	98	102	152 (68)	85 (53)	237 (121)	4	0	4	2
高木 チーム	18	188	206	120 (27)	119 (57)	239 (84)	6	5	11	3
波多 野 チーム	1	56	57	143 (49)	129 (60)	272 (109)	8	7	15	3

浅野 チーム	4	69	73	85 (15)	58 (18)	143 (33)	2	1	3	-
橋本 チーム	0	24	24	43 (7)	18 (11)	61 (18)	6	3	9	1
益チ ーム *	1	151	152	70 (19)	62 (25)	132 (44)	9	1	9	-
高尾 チーム	5	44	49	69 (15)	41 (14)	110 (29)	6	4	10	1
竹内 チーム *	0	41	41	71 (40)	60 (19)	131 (59)	2	4	6	3
樋口 チーム *	0	49	49	99 (23)	40 (23)	139 (46)	14	16	30	5
富士 田チ ーム *	5	107	112	140 (32)	109 (42)	249 (74)	10	4	14	2
総計	38	827	865	992 (295)	721 (322)	1713 (617)	67	45	112	20

(特許は出願数、口頭発表のカッコ内は招待講演数を内数で記入)

(*新型コロナウイルス感染症により研究期間の延長を行った課題については、2021年8月集計結果)

③研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

採択課題は、レイヤー間連携を見据えた研究体制となっており、机上の議論だけでなく、実証を期待している。そのため、実システムによるデモンストレーションを終了時の要件としており、実際に各チームで基礎研究だけでなく、実証デモに向けた取り組みを研究期間内で進めてもらった。

チーム内で企業研究者が参加しているチーム（主たる共同研究者もしくは研究メンバー）は、高木チーム、波多野チーム、浅野チーム、橋本チーム、益チーム、高尾チーム、竹内チ

ーム、富士田チームの8チームであり、残りの内田チームも樋口チームも協力企業や、元企業研究者の参画があり、ほぼ全てのチームで産業界との連携を行っている。

④本研究領域に続く研究資金の獲得状況

本研究領域での研究成果シーズを発展もしくは間接的に展開することにより多くの研究プロジェクトが発足している。以下に継続的な基礎研究および実用を目指す応用研究として主要なプロジェクトを抜粋した。文部科学省が実施する「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」への波多野チームの参画をはじめとして、多くの大規模プロジェクトが展開しており、本研究領域が新たなナノエレクトロニクスの潮流を生み出す契機となったことの証左であると考えられる。

チーム名	研究代表者	研究種目	研究課題名	研究期間 (年度)
内田チーム	内田建	JST/CREST	時間的・空間的に局在化したナノ熱の学理と応用展開	2019～2024
内田チーム	柳田剛	科研費/基盤(S)	堅牢な分子識別センサエレクトロニクスの学術基盤創成	2018～2022
高木チーム	高木信一	科研費/基盤(S)	layer transfer による高移動度材料 3 次元集積 CMOS の精密構造制御	2017～2021
高木チーム	高木信一	JST/CREST	強誘電体分極と電荷の相互作用を利用した新デバイス・システム	2020～2025
高木チーム	竹中 充	JST/CREST	ハイブリッド光位相シフタによるプログラマブル光回路を用いた光演算	2020～2025
波多野チーム	波多野睦子	MEXT/Q-LEAP	固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出	2019～2027
波多野チーム	波多野睦子	MEXT/Q-LEAP	固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出	2018～2028
波多野チーム	馬場嘉信	MEXT/Q-LEAP	量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新	2020～2030
橋本チーム	橋本昌宜	科研費/基盤(S)	ミューオン起因ソフトウェア評価基盤技術: 実測とシミュレーションに基づく将来予測	2019～2023

高尾チーム	高尾英邦	JST/CREST	触覚の価値を創造する深化型マルチフィジックスセンシングシステム	2020～2025
竹内チーム	竹内 健	NEDO	イン不揮発性メモリ分散 Approximate コンピューティングの研究開発	2018-2021
竹内チーム	秋永広幸	NEDO	超高速・低消費電力ビッグデータ処理を実現・利活用する脳型推論集積システムの研究開発	2016-2020
富士田チーム	浅田雅洋	JST/ACCEL	半導体を基軸としたテラヘルツ光科学と応用展開	2017～2021

⑤顕彰、受賞

主な受賞としては、高木信一研究代表者の科学技術分野の文部科学大臣表彰（2015年4月）、紫綬褒章（2017年4月）や内田チーム（主たる共同研究者）による「高分子化学会 神奈川県大学高分子化学日立化成賞(2016年9月)」「平成29年度日本化学会 第35回学術賞」「電気学会優秀論文発表賞（2020年4月）」などがあげられる。それぞれのチームでは、産業技術に関する受賞も多く、「ベスト産業実用化賞(SATテクノロジーショーケース)」「STARC感謝状」などの受賞もこの研究領域の特徴と言える。

また、研究チーム内メンバーの受賞も多く、IEEE (IEEE EDS Japan Chapter Student Award、Excellent Presentation Award、IEEE SENSORS 2016 Best Industrial Paper Award、VLSI Best Demo Paper Award) や各学会の論文賞 (MTSA2017-OptoX Nano-Tera Nano Student Award 2017、応用物理学会優秀論文賞、応用物理学会講演奨励賞、電子情報通信学会 MWP 優秀学生論文賞)、ポスター賞 (応用物理学会集積化 MEMS 技術研究会優秀ポスター賞、Poster Award 第7回分子アーキテクトニクス研究会、SSDM Young Researcher Award 2019) など、若手研究者の活発な研究成果創出の現れと、今後のキャリア形成に寄与するものと考えられる。

(2) さきがけ

①研究総括のねらいに対する研究の状況

さきがけでは、従来にない全く斬新な発想による挑戦的な研究や、CREST に比べてより中長期的視点に立った独創的な研究の推進を進めることがねらいである。そのため、量子分野からバイオ分野までの研究課題を採択し分野間融合をはかるとともに、素材・デバイスから回路レイヤーまでの研究課題を採択しレイヤー間連携をはかった。

その結果、7(2)②の表にまとめたように、多くの成果物が出ており、特に国内外含めて460件を超える招待講演は、これらの成果が国内ばかりではなく世界的に高く評価されていることを示している。社会還元の観点から、メディア対応も積極的に行っており、戸川研究者（一期生）のスピン位相エレクトロニクスに関する研究成果（らせん結晶構造を持つ磁石のひねりの数の制御・検出に成功）が複数の新聞紙で紹介されるとともに、安藤研究者（一期生）の新しいスピン流発生技術（銅の自然酸化膜が白金よりも優れたスピン流発生源となることを実証）についてNHKの取材を受け放送され、福田研究者（二期生）の洗濯可能な超薄型有機太陽電池に関する成果は、日経、朝日、読売を含む10紙に掲載されTBSやテレビ東京で紹介され注目されている。また強誘電 HfO_2 トンネル接合を使った新メモリに関する成果を出した小林研究者（三期生）が、2019年度にIEEE EDSに創設されたLeo Esaki Awardの初代受賞者になったことは特筆すべき成果と言える。

レイヤー間連携では、領域会議以外に、研究者が自発的にレイヤー間連携をはかるための連絡会を開催し、チームを組みCRESTや科研費などの新しいファンドを獲得している。また、研究者に企業を訪問し研究成果の出口をさぐること（SciFoS活動）も推奨して進めており、青野研究者（一期生）のベンチャー企業設立に見られるように、研究総括の狙いどおりに進捗したと考えている。

以下に、特筆すべき成果を記す。

青野研究者（一期生）は、環境に効率的に適応する粘菌アメーバのユニークな並列処理法に学んだアルゴリズム「アメーバモデル(AmoebaSAT)」の理論研究とそのデバイス実証を行い、SAT問題（重要な組合せ最適化問題である「充足可能性問題」）でのベンチマーキングの結果、CPU時間では劣るが、反復回数では勝るといふ、アメーバの物理実装を肯定するデータを示した。他のさきがけ研究者との共同研究を推し進め、FPGA実装、組み合わせ回路実装、超伝導回路実装につき論文発表するとともに特許も出願、新しく採択されたNEDOプロジェクトにおいて、様々な応用で威力を発揮する超小型・超低消費エネルギーの非ノイマン型コンピュータの開発につながるものとして期待している。さきがけ終了後、Amoeba Energy株式会社を起業し、他のさきがけ研究者や産業界との連携を深め実用化を目指している。

望月研究者（一期生）は、2009年に発見されて間もないトポロジカル磁気テクスチャで

あるスキルミオンについて、これを情報担体として使うというデバイス応用へのアイデアを実験しやすい例示の形で理論展開し、スキルミオンの制御法確立への道筋を理論的に示した。具体的には、スキルミオンの熱的駆動、電場や磁場による書き込みなどを、先駆的なシミュレーション技術を活用して高いレベルで研究を進展させた。当初想定していなかった成果として、マイクロ波による巨大な整流効果の発見や、初のネール型磁気スキルミオンをもつ物質 (GaV_4S_8) の発見が特筆される。Science や Nature 系の雑誌に掲載され特許も取得し成果は高く評価される。さきがけ終了後、科研費(A)等を取得するとともに2020年度よりCRESTの共同研究者として研究を展開中である。

長汐研究者(二期生)は、Si MOSFETの短チャネル効果の課題を克服し得る素子として期待の高い二層グラフェンFETにおいて、電流オン/オフ比が小さい問題について、グラフェン/絶縁膜多層系における界面に着目し、界面の理解を進め、その理解に基づき理想的な界面を実現し、グラフェンの電子デバイス応用への展開を切り開くことを目的として研究を進めた。その結果、グラファイトバックゲート+機械剥離BN/grapheneのA11-2D(すべて2次元原子膜)高品質構造を実現することにより、 $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$ 比として20Kではあるが 4.6×10^5 を達成し、グラフェンが超短ゲートFETのチャネル材料として利用できる可能性を示した。さきがけ終了後東京大学工学部教授に昇格、原子層膜の研究分野で指導的立場にいる。

河野研究者(二期生)は、シリコン集積回路による神経ネットワーク(SNN)を実現するため、従来の人工ニューラルネットワークとは異なる脳神経系との互換性を意識したニューロモルフィックによる脳に近いAIの基盤技術確立を目指した。具体的には、複雑な神経活動と消費電力・集積度のトレードオフの課題を解決するため、イオンコンダクタンスモデルの数理構造を少数の多項式で記述した定性的神経モデリングをシリコンハードウェアに実現することをターゲットとした。その結果、単一チップSNNの構築:1000シナプス/ニューロン(次回試作で達成予定)、チップ間インタコネクタ技術:10チップ結合(次回試作で達成予定)、メモリ回路:SRAM+DACベースを達成し、STDP(Spike-timing dependent synaptic plasticity)によるノイズに埋もれたパターン抽出に成功した。ニューラルネットワークに代表される非ノイマン型情報処理技術は、今後大きなブレークスルーとなる可能性を秘めており、神経系を模倣した回路の機械学習応用は、エレクトロニクス分野における、今後のメインテーマの1つになる可能性が高い。さきがけ終了後、東京大学生産技術研究所教授に昇格している。

福田研究者(二期生)は、絶縁性のポリマーナノ薄膜を利用し、配線等をコストイフェクティブな印刷技術を用いて基板レスのフレキシブルな有機集積回路を創成する課題に取り組んだ。単にフレキシブルという既存のデバイスとの大きな違いは、エラストマー(ゴム弾性)による高伸縮性と、耐水性の両者の機能を持たせた厚さ約 $3\mu\text{m}$ 程度の薄膜デバイス構造である。これらの性質を特徴づける機能として洗濯が可能であることを示し、当初、バイオセンサ応用を想定していたが、フレキシブルな有機太陽電池という新しい方向性に切り換えた。さきがけのネットワークを活用し、企業との共同研究も積極的に行い、得られた成

果は、フレキシブルエレクトロニクス、ウェアラブルデバイスという、エレクトロニクスの新たな展開を見据えた研究として、新聞（朝日、読売、日経など）やテレビ（テレビ東京）に取り上げられ、さらに、インパクトの大きい学術雑誌に掲載された。現在理化学研究所専任研究員として、科研費/新学術領域研究、A-STEP 等のファンドを獲得し研究展開している。

小林研究者（三期生）は、低電圧動作する Steep Slope トランジスタの実現に向けて、負性容量 FET (NC-FET) のデバイスシミュレータの構築と設計手法を確立、HfO₂ 薄膜材料の開発、NC-FET のモデリングによる設計指針、速度限界明確化、NC-FET の動作実証に各項目にわたって世界の Steep Slope による低消費電力トランジスタ研究フィールドをリードする成果が得られた。特に NC-FET 動作のモデリングと設計指針の提案とスケラビリティの証明に関する成果については学会でも高く評価され APEX でのレビュー論文招待、Best Paper Award of IEEE Transaction on Nanotechnology の受賞など、この分野でのトップランナーとしての評価を得るに到っている。さらに、強誘電性 HfO₂ を用いた不揮発性 SRAM や新メモリに関する提案を行い、IEEE EDS に創設された Leo Esaki Award の初代受賞者となった。これらの成果は、JST SICORP や CREST にて研究展開中である。

②科学技術の進歩への貢献

外部発表等については下記のとおりである。論文投稿 442 件（国際 421 件、国内 21 件）、学会発表 1,081 件（国際 416 件、国内 665 件；うち招待講演 467 件（国際 221 件、国内 246 件））など極めて多くの成果を創出している。また特許についても、87 件（国内 65 件、国際 22 件）と多くの出願が行われた。上述したとおり、おもなプレスリリースは文部科学省でレクチャー付きで行い複数紙に掲載された戸川研究者、NHK の取材を受け放送された安藤研究者、朝日、読売を含む 10 紙に掲載され TBS やテレビ東京で紹介された福田研究者などの研究成果がある。

	論文		口頭		ポスター		出版物		著書		招待講演		合計	国内 出願	海外 出願	プレス
	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内				
一期生	175	6	157	247	51	74	0	27	5	5	85	119	747	27	12	14
二期生	98	1	112	151	39	9	0	11	3	3	52	46	427	11	0	6

三期生	148	14	147	267	104	50	1	14	2	5	84	81	752	27	10	10
合計	421	21	416	665	194	133	1	52	10	13	221	246	1926	65	22	30

赤字は口頭発表の中の招待講演であり、合計に加えられていない数字。(2020年10月15日集計)

戦略目標の具体的達成内容に該当する成果が出ているかまたは達成できる見通しがあるかについて触れる。具体的達成目標と研究課題の関係については研究課題選定についての項目で上げたとおりであり、以下に各目標について個別にあげる。

(i) 革新デバイスを下支えする新規機能性材料の創製及び適用可能性の追求による素材技術の創出に資する成果

安藤研究者(一期生)は、スピン軌道相互作用を用いたスピントロニクスデバイスの分野において、ある程度の知見が蓄積されていたバルクにおける効果から脱却して表面や界面に注目することで、電流-スピン流変換の効率が向上できることを見出した。特に、さきがけ開始時には~数10%であった電流-スピン流変換の効率を、巨大Rashbaスピン軌道相互作用に着目することにより、非磁性元素のBi/Ag界面において~50%まで上昇させることに成功したことは高く評価できる。加えて、銅を自然酸化するだけでスピン軌道トルク生成効率が2桁以上向上する効果を発見したことは、想定外の非常に重要な成果である。従来から用いられていた白金を凌駕する性能であり、技術的にも容易なアプローチの提示であることから、将来のスピントロニクス素子の実用化に向けた大きな貢献が期待される。

後藤研究者(三期生)は、スピン波位相干渉の原理に基づく論理演算素子を、絶縁体である磁性酸化物イットリウム鉄ガーネット(YIG)の薄膜を用いて実証し、電子の流れではなく、電子中の自由度の一つであるスピンの位相を情報キャリアとして伝える新しいスピントロニクスデバイスを実現することを目指した。膜厚10 μ m程度の比較的厚いYIG膜を用いて、センチメートルオーダーのデバイスを作製し、スピン波位相干渉がきちんと動作することを確認、四端子素子を作製して、スピン波の干渉に基づくAND・ORなどの演算動作を実証した。さらに、広い面積にわたりYIG薄膜単結晶を形成する技術を国際共同研究も役立てて確立し、世界的に見ても最高品質のYIG薄膜を実現した。この成果を利用して、膜厚100nm程度の薄膜YIG単結晶膜を用いてミクロンオーダーのスピン波干渉デバイスを作製し、スピン波位相干渉デバイスのサイズを大幅にスケールダウンできることを示した。Scientific Reportsに3件の論文を発表するなど質の高いジャーナルに多くの論文を発表、国際会議の招待講演、プレスリリース、特許出願も高いレベルで行われており、「さきがけ」期間中に、様々な学会の優秀論文賞や講演奨励賞を受賞している。新概念のスピン波位相干渉デバイスが低消費電力スピントロニクスデバイスとして今後発展していくことが期待され

る。

長汐研究者（二期生）の前述の「特筆すべき成果」で記述した成果は、ダブルレイヤのグラフェンに関し、界面を十分に制御できれば、電界を印加することにより実用的なバンドギャップを形成できることを示した成果であり、グラフェン等の原子薄膜の結晶実現・機能解明・学理構築に関する研究に資する成果といえる。また太田研究者（三期生）は、独自開発のパルス・スパッタ法で hBN 薄膜成長用の装置を開発、パルスのかけ方にも工夫することでサファイア基板の上に AlN バッファをはさんでウェハスケールの BN 薄膜を形成することに成功した。hBN をウェハレベルの高面積で、高速に薄膜作製できる技術の開発にも成功、作製した hBN 薄膜について、ラマン散乱で BN の形成を確認し、X 線回析などで高品質でヘキサゴナルであることを確認した。さらに室温 CL で欠陥に由来する発光に加えて、バンド端発光も確認した。hBN/GaN 構造の作製において低温成長にも成功、これは世界で初めて、GaN とのヘテロ接合を実現した成果である。

(ii) 超低消費電力、超高速、超大容量等を可能にする新材料・新原理・新構造の論理素子・記憶素子等による革新デバイス技術の創出に資する成果

望月研究者（一期生）のスキルミオンに関する成果と小林研究者（三期生）の NC-FET と強誘電性 HfO_2 を用いた不揮発性 SRAM や新メモリに関する提案がこれに相当し、新しい論理素子や記憶素子への展開が期待される。

高橋陽太郎研究者（二期生）は、ギガヘルツからテラヘルツ帯域の電磁波（光）において、振動磁場と振動電場の両者に応答するエレクトロマグノンという励起状態を実現できる新機能材料の開発と、その電気磁気光学効果と呼ばれる全く新しい原理に基づく室温動作の電磁波制御デバイス創成を目指した。その結果、Y-type ヘキサフェライトを開発しエレクトロマグノンの室温化に成功、室温下で THz 帯吸収材料、偏光素子として利用できることを示した。実用化の出口をみつけるべく企業訪問等を行っており、今後の展開に期待している。これに加えて、関研究者（二期生）は、 L_2 型ホイスラー合金材料の開発と同材料を用いたボルテックス型の磁気構造を利用したスピントルク発振素子の開発を行い、生体磁場の測定が可能な高感度磁場センサを開発することを目的とした。その結果、ホイスラー合金を用いたボルテックス型発振の実証に成功、素子の微細化が発振出力に対してメリットになることを示した。数値目標としては、発振線幅を狭めて高い Q 値を得ることに成功しており、 $\text{Co}_2(\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x})\text{Si}$ を用いた素子では、シングルボルテックス型で $Q=4000$ 、ダブルボルテックス型で $Q=23000$ を達成、目標である $Q=10000$ を上回る成果が得られた。ただし、出力については 10 nW オーダに留まっており、目標未達となっているが、ホイスラー合金という素材そのものについても検討を行った点、スピントルク発振器のノイズ特性を評価して MTJ と比べて GMR 系スピントルク発振素子のほうがノイズを抑制できる利点があることを実証した点は評価される。今後、ホイスラー合金のさらなる改善と素子構造の適正化により、高出力化が期待される。

また、荒井研究者（二期生）は、ニューロモルフィックシステムの特長を、「膨大で曖昧・不完全な情報を低消費電力で処理できる新しい情報処理基盤となりえること」と考え、スピントルクを利用したニューロモルフィックシステムの構築を目指した。具体的には、スピントルク発振器(STO)と磁壁型メモリをニューロンの機能を模倣する基本要素としてとらえ、それぞれの制御を行うための理論的な考察を進めた。そして STO 位相同期を利用した画像分離システムに関し同期実験まで達成した。磁気異方性に着目した STO と磁壁型メモリの制御方法の提案は、スピントロニクス分野における、着実な進歩として受け取られていると考えられる。まだ未完成な成果であるが、スピントルク発振器のニューロシステムへの応用可能性を示した成果として期待できる。宮田研究者（一期生）は CVD 法を用いた高品質遷移金属ダイコルコゲナイド (TMDC) 原子層合成技術をもとに、原子レベルで直線的接合界面を有する TMDC 面内ヘテロ構造の作製に成功している。独自に合成した $WS_2/Mo_{1-x}W_xS_2$ ヘテロ界面において、1 原子レベルでの急峻な界面が実現出来ていることを明らかにしている。特に、共同研究の実施体制を積極的に進めることによって、 WS_2 と MoS_2/WS_2 の二層積層構造の接合界面において、導電性原子間力顕微鏡および走査トンネル顕微鏡/分光を用い、価電子帯では閉じ込めポテンシャル、また伝導帯ではポテンシャル障壁が形成されることを見出している。これらのポテンシャル変調を「一次元界面」として捉え、極微細伝導チャンネルを目指した量子細線の一形態を提案した点は高く評価される。さきがけテーマの拡張内容でチームを組んで応募した CREST が採択されたことは、本さきがけ研究内容が認められたことを端的に示すものである。

(iii) (i)、(ii) をはじめとする要素技術を集積・統合・融合することによるナノシステムの最適設計に向けた基盤技術の創出に資する成果

特筆すべき成果であげた青野研究者（一期生）の課題は、粘菌アメーバのユニークな並列処理法に学んだ新しいアルゴリズム提案であり、そしてその実装化において、既存デバイスである FPGA を用いるだけではなく、竹内研究者（三期生）が進めている超伝導量子回路を用いた化学反応シミュレータの開発を進めている。さらに、ベンチャー企業を設立し、他のさきがけ研究者や産業界との連携を深めている。

加えて、井上研究者（一期生）は独自開発の有機電気光学 (EO) ポリマーと、シリコン 1 次元フォトニック結晶導波路とをハイブリッドした EO 光変調器を作製し、その動作を初めて実証している。特に、ナノオーダーの高い加工精度をもとに、有機 EO ポリマーとシリコンフォトニクスとの融合プロセス技術を開発し、EO 変調効率の向上、極めて大きな電気光学係数を達成した点で大きな成果に繋がったと評価される。電気光学変調デバイスにより、「超高速動作 (>100GHz)、LN 変調器の 1/1000 以下の素子サイズ (<100 μm)、低消費電力性を同時に達成する」という高い目標をほぼ実現しており、高く評価でき、インパクトの大きな成果と考える。ポリマーとシリコンで温度依存性が相反することを利用して温度無依存を実現したのはアピールできる成果である。企業との共同研究等により、実デバイスとし

での可能性を示すことが期待される。

③科学技術イノベーション創出に貢献する卓越した成果の見通し

科学技術イノベーションを創出するためには前項の科学技術の成果のみでは達成できず、その出口を見据えたレイヤー間連携が必須となる。また国際的な連携も必要である。

戸川研究者（一期生）はレイヤー間研究会を立ち上げるとともに、カイラルソリトンラティスの研究分野においてイギリス、ロシア、オーストラリア、カナダ、およびドイツの研究グループをまとめて国際コンソーシアムを立ち上げ世界をリードしている。カイラルソリトンが科学技術イノベーション創出に貢献することを期待している。

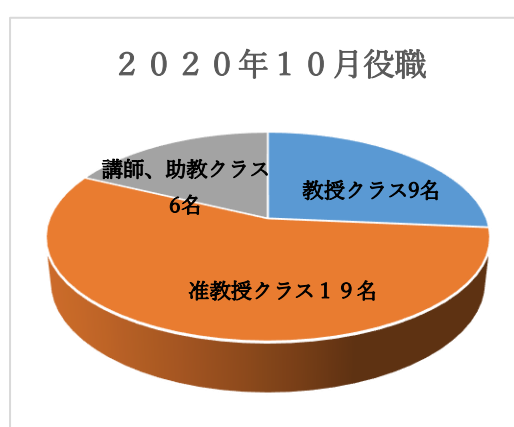
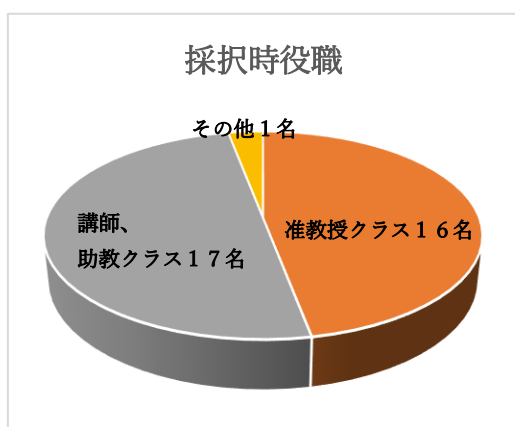
レイヤー間連携により CREST に採択された宮田研究者（一期生）については、二次元薄膜の横界面を利用する提案において卓越しており、新しいデバイス群がこの成果より生まれることを期待している。

また、山崎研究者（二期生）は、ナノメカニクスと量子情報操作技術を融合した新しい物理系として、量子オプトメカニカルシステムの構築を狙う一環として、超伝導量子ビットと結合するマイクロ波帯と通信波長帯の光をコヒーレントに結合する量子トランスデューサの実現に挑戦した。その結果、この量子情報の極めて重要な課題を機械系の振動を介して行うアイデアを考え、マイクロ波と光を結合するオプトメカニクス技術の開発に指針を与えるアプローチをいくつも示した。これは、将来量子コンピュータが実現したときに、そのネットワーク化を行うための必須の技術になると考えられ、今後の科学技術イノベーション創出への寄与が期待できる。また望月研究者（一期生）のスキルミオンの研究は、さきがけアドバイザーやさきがけ研究者と連携し新たなファンディングを獲得するとともに、理化学研究所との連携による CREST にも展開しており科学技術イノベーション創出につなげることを期待される。

④その他の特記事項

(i)昇進

採択時は教授クラスの研究者は一人もいなかったが、現在は9名となっており、本さきがけが日本のナノエレ研究をリードする人材を輩出したことの証左であると考えている。またさきがけを早期終了して海外の企業の部長待遇で就職した研究者も出ている。



採択時にパーマネントの役職ではなかった研究者は12名いたが、現在は9名が定職を得ている（下記の表参照。下線が定職）。

氏名	採択時所属機関	採択時役職	現所属	現役職
青野真士	東京工業大学	期限付き研究員	慶應義塾大学	特任教授
大野武雄	東北大学	准教授（WPI）	大分大学	准教授
岡田直也	筑波大学	大学院生	産業技術総合研究所	主任研究員
戸川欣彦	大阪府立大学	特別准教授	大阪府立大学	准教授 2014. 1 教授 2018. 4-
荒井礼子	産業技術総合研究所	特別研究員	産業技術総合研究所	主任研究員
高橋陽太郎	東京大学	特任准教授	東京大学	准教授
廣理英基	京都大学	特別拠点准教授	京都大学	准教授
山崎歴舟	東京大学	助教（任期付）	国際基督教大学	准教授
高橋一浩	豊橋技術科学大学	テニュアトラック講師	（採択時と同じ）	准教授

(ii) 受賞

サー・マーティン・ウッド賞1件、日本学術振興会賞1件、文部科学大臣表彰11件、本

多記念研究奨励賞 1 件、船井学術賞 4 件、日本女性科学者の会奨励賞 1 件を含めさきがけ採択後 70 件以上を受賞している。採択者の成果が広く評価されている証拠である。

(iii) さきがけ終了後の活躍状況

さきがけ終了後に研究者がどのように活躍しているかは、研究者にとってさきがけが人材育成の観点から重要であったことが判断できる。以下に特長的な事例をしめすが、国際会議の主催や昇進、他のファンディングを獲得するなど多くの活躍をしている。

青野真士	著書	「人工知能はこうして創られる」合原一幸・編著、牧野貴樹、金山博、河野 崇、青野真士、木脇太一著、ウェッジ社、2017。「第 5 章 ナチュラル・コンピューティングと人工知能—アメーバ型コンピュータで探る自然の知能」、青野真士, pp. 189-239。2017 年 9 月 20 日出版。 http://wedge.ismedia.jp/articles/-/10586
	昇進	2017 年 4 月 1 日、慶應義塾大学環境情報学部准教授（定年制） 2018 年 1 月 11 日、Amoeba Energy 株式会社を起業、代表取締役／CEO 兼任 2020 年 4 月 1 日、慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科 特任教授（任期制）、慶應義塾大学大学院 理工学研究科 特任教授（任期制）
	特許	1. 特開2018-166194, 発明者：“クロスバー構造および最適化問題解探索システム,” 出願日：2017年3月28日, 出願人：慶應義塾 2. PCT/JP2018/026997/特願2017-140272, “解探索装置およびプログラム,” 出願日：2017年7月19日, 出願人：横浜国立大学 3. PCT/JP2018/014799/特開2019-177465, “移動ロボット,” 出願日：2018年3月30日, 出願人：Amoeba Energy株式会社 4. 特開2019-198902, “デバイス,” 出願日：2018年5月14日, 出願人：北海道大学, Amoeba Energy株式会社 5. 特開2019-198903, “ロボット、ロボット制御方法、およびプログラム,” 出願日：2018年5月14日, 出願人：北海道大学, Amoeba Energy株式会社 6. PCT/JP2018/036691/特開2020-032865, “移動ロボット,” 出願日：2018年8月30日, 出願人：Amoeba Energy株式会社 7. PCT/JP2019/036433/特願2018-174258, “意思決定方法およびその装置,” 出願日：2018年9月18日, 出願人：慶應義塾, 産業技術総合研究所

		8. PCT/JP2019/050971/特願 2019-000307, “機械学習デバイス、及びその制御方法,” 出願日: 2019年1月4日, 出願人: 慶應義塾
	新たなファンディング	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) IoT推進のための横断技術開発プロジェクト「超高速・低消費電力ビッグデータ処理を実現・利活用する脳型推論集積システムの研究開発 (研究代表者: 秋永広幸)」, 研究分担者, 2016年6月-2020年2月, 期間総額 82,359千円 (直接経費: 69,946千円)
吾郷浩樹	クロスアポイントメント	産業技術総合研究所のクロスアポイントメントフェローに就任 (2018年1月から2020年12月まで)
	学会活動	二次元物質に関する国際会議 RPGR の International Advisory Board に就任 (2020年1月)
	書籍監修	「グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用」、NTS 出版、2020年3月を監修
	受賞	応用物理学会 第4回「薄膜・表面物理分科会 論文賞」を受賞 (2020年3月)
	シンポジウム企画	長汐先生と共同で第81回応用物理学会周期学術講演会において「二次元物質科学: 二次元物質と集積構造が拓く新しい科学と応用」を2020年9月に開催。300名を超える参加者
	学会開催	第59回フラーレンナノチューブグラフェン総合シンポジウムを執行委員長として2020年9月に開催。
戸川欣彦	シンポジウムを主催	国際 JSPS Core-to-Core project, Glasgow meeting, University of Glasgow, United Kingdom, September 4-6, 2017. χ -mag 2018, Nara Kasugano International Forum 麓 (IRAKA), Nara, Japan, July 25-28, 2018 .
		国内 IEEE Kansai/Shikoku Joint Sections Magnetism Society Chapter 「第3回関西四国磁性研究会」, 2017/6/24
	国際会議のチェアマン	JSPS Core-to-Core project, Glasgow meeting, University of Glasgow, United Kingdom, September 4-6, 2017. International Workshop “Dzyaloshinskii-Moriya Interaction and Exotic Spin Structure” (DMI2017), Peterho, RUSSIA, May 23-26, 2017.

	新たなフ ァンディ ング	日本学術振興会 科学研究費 基盤研究(B) 代表 「キラル磁性の物理と応用」 2017年4月-2020年3月 18,070千円(直接経費:13,900千円)
	国際交流 事業	日本学術振興会 外国人特別研究員 受入研究者(研究代表者) 「キララらせん磁性体を用いた超広帯域論理/干渉操作の実現」 2017年11月-2019年10月
		日本学術振興会 日露二国間交流事業 分担 「カイラル螺旋磁性体の構造とスピンドYNAMIX」 2017年4月-2019年3月 5,000千円
		日本学術振興会 研究拠点形成事業 A. 先端拠点形成型 分担 「スピンキラリティを軸にした先端材料コンソーシアム」 2015年4月-2020年3月 75,000千円
望月維人	昇進	2017年4月1日、早稲田大学理工学術院 先進理工学部 応用物理学 科教授 さきがけ研究者時代(～2017年3月31日)は、青山学院大学准教 授。
	新たなフ ァンディ ング	日本学術振興会 科学研究費 基盤研究(B) 代表 「トポロジカル 磁気テクスチャの非平衡ダイナミクスと量子輸送現象の理論研究」 2017年4月～2020年3月 直接経費 12,100千円
		日本学術振興会 科学研究費 基盤研究(S) 分担 「強相関物質設計と機能開拓 -非平衡系・非周期系への挑戦-」 2016年5月～2021年3月 直接経費 2,100千円
		日本学術振興会 科学研究費 基盤研究(A) 分担 「金属酸化物スピン軌道エレクトロニクス」 2019年4月～2022年3月 直接経費 2,400千円 ※安藤和也研究員(代表)と共同申請
		日本学術振興会 科学研究費 挑戦的研究(萌芽) 代表 「多自由度相関系における巨大負熱膨張現象の理論研究と物質探 索」 2019年4月～2021年3月 直接経費 2,200千円
		日本学術振興会 科学研究費 基盤研究(A) 代表 「スキルミオニクス創成に向けた基盤技術と材料の開拓」 2020年4月～2024年3月 直接経費 17,500千円 ※笹川崇男アドバイザー(分担)、安藤和也研究員(分担)と共同 申請
	三菱財団自然科学研究助成(一般助成) 代表	

		<p>「磁気スキルミオンを使った脳型コンピューティング素子の理論設計」</p> <p>2021年4月～2022年3月 直接経費 3,900千円</p>
		<p>科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST (分担) 領域: 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</p> <p>課題: Beyond Skyrmion を目指す新しいトポロジカル磁性科学の創出」</p> <p>2020年11月1日～2026年3月31日 直接経費 75,000千円</p>
	受賞	<p>早稲田大学リサーチアワード (国際研究発信力)</p> <p>https://www.waseda.jp/inst/research/news/67569</p>
	著書	<p>De Gruyter 社から出版される書籍「Multiferroic Materials - Fundamentals and Applications」の一章を依頼により単独執筆</p> <p>Chapter title: ``Dynamical magnetoelectric phenomena of skyrmions in multiferroics”</p>
		<p>Springer 社から出版される書籍「Chirality, magnetism, and magnetoelectricity: Separate phenomena and joint effects in metamaterial structures」の一章を依頼により単独執筆</p> <p>Chapter title: ``Microwave-driven dynamics of magnetic skyrmions under a tilted magnetic field: Magnetic resonances, translational motions, and spin-motive forces”</p>
		<p>エヌ・ティー・エス出版から出版されるハンドブック「スピントロニクスハンドブックー基礎から応用までー (仮題)」の「スキルミオン」の項目を依頼により単独執筆</p>
山本倫久	昇進	<p>東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 特任准教授 兼 理化学研究所創発物性科学研究センター 量子電子デバイス研究ユニット ユニットリーダーに昇進。(2017年8月1日)</p> <p>理化学研究所創発物性科学研究センター 量子電子デバイス研究チーム チームリーダーに昇進。(2020年4月1日)</p>
	受賞	<p>サー・マーティン・ウッド賞を受賞</p> <p>http://www.msforum.jp/about_sir_martin/</p> <p>受賞題目 「半導体ナノ構造における量子位相の検出と制御」</p>
	新たなフ ァンディ ング	<p>2018年度にCREST「半導体非局在量子ビットの量子制御」に採択。</p>

河野 崇	昇進	東京大学生産技術研究所教授に昇進 (2018年4月1日)
	国際交流 事業	日本学術振興会国際共同研究加速プログラムにて、フランス・ボルドー大学にゲスト研究員として1年間滞在 (2018年4月..2019年3月)
		ボルドー大学と東大生産技術研究所との共同研究 MoU 幹事 (2018年12月11日)
関 剛斎	新たなフ ァンディ ング	基盤 (A) (令和2年度~令和4年度) 研究代表者 「強磁性規則合金内のスピン変換を利用した高効率磁化制御」 28,700,000円
	受賞	・平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞 (平成31年4月17日) ・第40回本多記念研究奨励賞 (令和元年5月31日) ・第19回 2019年度 船井学術賞 (令和2年2月27日)
長汐 晃 輔	プレスリ リース	原子層厚さでの強誘電特性を実証~メモリやナノ発電実現へ新たな道を開拓~ 東大、関西学院大学、日経新聞、日経産業新聞 Nature commun., 2020, 11, 2428.
	昇進	2020年6月1日付けで東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻教授
	受賞	2019年2月 東京大学工学研究科長表彰(研究部門)
竹内尚輝	共著論文	1期生・青野真士先生、原祐子先生と論文を投稿、受理： <ul style="list-style-type: none"> • N. Takeuchi, M. Aono, and N. Yoshikawa, “Superconductor amoeba-inspired problem solvers for combinatorial optimization,” Physical Review Applied, vol. 11, no. 4, p. 044069, Apr. 2019. • Y. Hara-Azumi, N. Takeuchi, K. Hara, and M. Aono, “Digital bio-inspired satisfiability solver leveraging fluctuations,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. 4, p. 040603, Mar. 2020. N. Takeuchi, M. Aono, Y. Hara-Azumi, and C. L. Ayala, “A circuit-level amoeba-inspired SAT solver,” IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 67, no. 10, pp. 2139-2143, Oct. 2020.
藤枝俊宣		2018年度より二期生福田憲二郎先生 (理研) と新学術領域「ソフトロボット学の創成」で共同研究中。

新たなフ ァンディ ング	2018 年度より文部科学省卓越研究員に採択され、東京工業大学生命 理工学院にて独立研究室を運営。現在、テニユアトラック中。
	2020 年度に AMED 官民による若手研究者発掘支援事業（社会実装目 的型の医療機器創出支援プロジェクト）」に採択。さきがけ終了後 に開始。
共著論文	三期生高橋一浩先生（豊橋技科大）と共著論文を二報発表。

8. 総合所見

(1) 研究領域のマネジメント

本研究領域では、ナノ材料、ナノデバイス、設計・回路、アーキテクチャ、システムなどの技術レイヤーの融合による革新的な情報処理デバイス基盤技術創成を目指した。この目標を達成するために研究課題選考には次のような観点を重視した。

- i) 複数技術レイヤーの融合されたチーム構成
(さきがけでは、領域として複数レイヤーにまたがることを重視)
- ii) 研究目標として、桁違いの低エネルギーの実現または新規機能の創出
- iii) 最終デモンストレーションの記述
(さきがけでは、実デバイスによるデモンストレーションを必須としない)

CREST に関して必須とした最終デモンストレーションについては、本研究領域での基礎研究が後にイノベーションにつながるよう応募時にお願いしたものである。このような配慮によって、研究開始時から本研究領域の方向性にあった質も意識も高い研究者が集うことになった。また、さきがけは個人研究なので i) に関しては課題それぞれでは達成することはできないが、領域として複数レイヤーにまたがるよう研究課題選考時に考慮している。

研究領域運営は、何種類かの会議および総括・アドバイザーによるきめ細かい支援を中心に行った。このように総括・アドバイザー団による全般的な支援のほか、各課題に対して、特にその課題に適した担当アドバイザーをアサインし、サイトビジットほか、適切な助言でサポートを行った。

会議に関しては、採択されて間もなくキックオフ会議（CREST・さきがけ合同開催）を行い、領域の方針などになじんでいただくとともに、研究者間でのつながりを作った。また、毎年、次年度の研究方針、研究計画を議論する場を用意するためにヒアリング会議（CREST）を実施し、その他、領域会議を設定している。CREST では年に一度全チームが集合して、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、成果を報告することで緊張感を高めることに役立ったと研究者からも評価を得ている。さきがけの領域会議は2～3日の合宿形式で行われ、研究者同士で情報交換や刺激を与えあうことによって研究連携強化に効果を発揮した。CREST やさきがけの領域会議に、それぞれの研究者やアドバイザーも相互に参加しており、複合領域全体としての活性化を計った。

本研究領域のアドバイザーは企業出身者の割合が高いのが特徴で世界的にも活躍しているメンバーが揃っており、長い経験値からの助言やイノベーション創出の観点からの前向きなコメントを上述の各種会議でいただいた。会議だけでなく、複数回のサイトビジットを各課題に対して行うなど、研究がたゆむことのないよう、きめ細かい適切な指導や有益なアドバイスをを行い、各研究課題の成果最大化に貢献している。また、さきがけでも、領域会議

やサイトビジットだけでなく、四半期報告として普段の研究推進の段階から研究進捗の確認やアドバイスをを行い、さきがけ個人研究者の更なる飛躍のためにエンカレッジした。

また、研究成果を研究事業体や企業などに知ってもらい、イノベーションにつなげる努力として、News Letter の発行・配布（5回発行済）、プレスリリースなども積極的に行っている。CREST の中間評価時、およびさきがけの研究終了時などには、一般公開の成果報告会を毎年開催して、この分野に関係する産業界から多数の参加を頂いている。

以上のように、研究課題選考の配慮、複合領域の特徴を生かした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運営、論文発表のみならず報告会などによる成果の流布など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 1,307 件（内 CREST 865 件、さきがけ 442 件）、招待講演数 1,084 件（内 CREST 617 件、さきがけ 467 件）、受賞数 214 件（内 CREST 143 件、さきがけ 71 件）、特許出願 199 件（内 CREST 112 件、さきがけ 87 件）という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。

またイノベーションへの貢献という観点でも、CREST では樋口チームのメタロ超分子ポリマーの商業化、高尾チームの触覚センサの企業へのライセンス、橋本チームのピアスイッチ FPGA のベンチャー企業化による事業化推進など多くの動きが進んでいる。またさきがけにおいても、青野研究者のベンチャー企業設立や企業との多数の共同研究へと進展しており、さらなる飛躍が期待される。

人材輩出という観点では、さきがけ研究者のなかから 9 名の教授級の研究者が領域運営中に誕生しており、本研究領域が日本の当該分野のリーダーの輩出に大きく貢献したと考えている。また、CREST においては、多数の若手研究者が昇進やキャリアアップを果たしている。また、47 名の博士課程修了者が生まれ、エレクトロニクス業界への就職者は 226 名（企業研究職 86 名）を数えている。近年博士課程離れやエレクトロニクス業界離れが懸念されるなか、本研究領域が当該分野において人材育成に果たした役割は非常に大きいと考えている。

(3) 本複合領域を設定したことの意義

本研究領域は「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」と題されている。領域発足当時は言葉を聞くこともほとんどなかった IoT（Internet of Things）や AI（人工知能）といった科学技術の社会貢献期待が高まる中、エレクトロニクス分野はこれらすべての礎であり、本研究領域が設定されたことは意義深い。開始時点で、エレクトロニクス研究は微細化というテーマだけでは立ち行かなくなるのではないかと考え始められていたが、その後、益々その傾向が強まってきている。その意味で、いち早く微細化だけに頼らないナノエレクトロニクス研究という方向性を設定した本研究領域はエレ

クトロニクス研究方向に新たなベクトルを示したことになる。特に、素材やデバイスのみならずシステムまで含めたレイヤー連携といった考え方で大きな成果が得られていることは強調されるべきであろう。また、レイヤー間連携というコンセプトはその後のチーム型課題解決型基礎研究では基本的な考え方として浸透しており、今年度に JST で発足した CREST 「情報担体を活用した集積デバイス・システム」等でもマネージメント手法として取り入れられており、本研究領域の研究開発スタイルとしての波及効果も大きいととらえている。

ナノエレクトロニクス技術は、コンピューティングや通信などのサイバー空間アプリケーションのみならず、センサ・アクチュエータやエネルギー取得などの実空間アプリケーションにも適用されることに注目が高まっている。本研究領域も設定当初からこの潮流をとらえており、未踏領域センサなど多くの実空間アプリケーションを志向した研究課題を含んでいる。サイバー空間アプリケーション、実空間アプリケーションの両方を包含することで、今後のナノエレ・イノベーションが人々の安全・安心・豊かな暮らしを支えるサービス・エネーブリング・プラットフォーム (Service Enabling Platform) を構築できる要素が揃ったことになる。その意味で本研究領域は社会的、産業的貢献といった意義を捉えていると考えられる。

(4) 今後への期待、展望

CREST の研究課題に関しては、技術開発と並行して出口を見据えたアプリケーションの探索も進められ、イノベーションにつながる研究の方向性を明確化し、研究終了時までにはデモンストレーションを行った。このデモンストレーションやプレスリリースは企業も巻き込んで実用化研究に着実に移行している。感染症という新たな脅威に直面し、デジタル・トランスフォーメーションが叫ばれる中、エレクトロニクス分野への社会的要請はさらに高まるのは確実であり、社会実装への加速や不確実な社会情勢に対応できるようなコア技術の継続的な発展を期待する。

さきがけの研究課題に関しても、採択時には必ずしも注目されていなかった非ノイマン型コンピュータや量子コンピュータに関わる領域で多くの研究成果が得られている。また、新しい電子材料としての 2D 原子膜や極薄有機材料に関し、材料開発とその応用研究が進展している。これらの分野において、CREST などのより大規模なファンドの獲得や研究コミュニティの形成が進んでいる。何よりも、この研究領域の存続中にさきがけ研究者が大きく成長しており、各種受賞や昇進により形となって表れていることは、何よりも特筆すべきである。日本の将来のエレクトロニクス業界を支える集団になることが期待できる。

(5) 所感、その他

本複合領域を開始するにあたり、特にレイヤー連携という観点を重視している。微細化がエレクトロニクスの最大の研究領域だった過去の時代は材料やデバイス、回路やシステム、それぞれのレイヤーで微細化に向けて深堀する方向を決めることができた。しかし、微細化

技術が飽和しつつあり、微細化以外の研究に目を向けざるを得なくなった現在、それぞれの個別レイヤーだけでは、研究の方向性も決定しづらくなってきており、応用や出口を意識しながらでないとも研究意義も見失いがちになっている。このような時代的背景から、基礎研究を実施する上でもレイヤー連携を意識しながら相互にフィードバックを行うことで、研究の方向性をより明確化することが重要になってきている。レイヤー連携が大切という初期の目論見通り、本研究領域でナノエレクトロニクス研究が活性化され、将来のイノベーションの種となりそうな科学技術が創出され、そして中にはイノベーションにかなり近い研究成果まで出てきていることは喜ばしい。各プロジェクトチームに研究成果のまとめとしてデモンストレーションをお願いしたことは、このイノベーションにかなり近い研究成果を創出できたことにつながっており、この分野では適切な取り組みだったと考えられる。研究の過程でも、デモンストレーションをイメージし方向性を議論することなどで、チームがまとまり、デモンストレーションを考えることによって新たな研究課題を生み出すなど、有効に機能した。

開始当初はあまり意識しなかったが、このプロジェクトに応募あるいは参加しなかったら全く会話もしなかったであろう異分野あるいは異レイヤーの研究者同士の研究交流が多く進展している。研究実施者からも、このような異分野連携チームで研究に取り組めたことで大きな成果につながったという声を多く耳にした。このような人的ネットワークができたことは、今後の本分野の発展に長きにわたって貢献できると考えられる。

先に述べたように感染症に対する新たな生活様式のなかで、デジタル・トランスフォーメーションが浸透してきており、それを支えるエレクトロニクス分野への期待は益々高まっている。本研究領域で培われた研究シーズおよび人材が産業界とさらに対話を強化することによって、日本の当該分野の産業競争力向上に貢献し続けることを強く期待する。

2021年度は2期生1課題、3期生3課題の計4課題において、新型コロナウイルスの影響を受けて研究期間を6ヶ月間延長した。延長した全ての研究課題で、今後の研究展開を一層後押しする成果を得ることができた。

以上