

戦略的創造研究推進事業
CREST(チーム型研究)
追跡評価用資料

研究領域

「プロセスインテグレーションによる機能
発現ナノシステムの創製」
(2008 年度～2015 年度)

研究総括: 曾根 純一

2022 年 3 月

目次

要旨	1
第 1 章 研究領域概要.....	3
1.1 戦略目標.....	3
1.2 研究領域の目的.....	4
1.3 研究総括.....	4
1.4 領域アドバイザー.....	4
1.5 研究課題および研究代表者.....	5
第 2 章 追跡調査	8
2.1 追跡調査について.....	8
2.1.1 調査の目的.....	8
2.1.2 調査の対象.....	8
2.1.3 調査方法	9
2.2 追跡調査概要.....	10
2.2.1 研究助成金.....	10
2.2.2 論文	17
2.2.3 特許	20
2.2.4 受賞	22
2.2.5 招待講演	25
2.2.6 報道	25
2.2.7 共同研究や企業との連携.....	25
2.2.8 実用化・製品化.....	27
2.2.9 ベンチャー.....	27
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果.....	29
2.3.1 研究領域の展開状況(展開図).....	29
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献.....	33
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献.....	33
2.3.4 その他の特記すべき事項.....	34
第 3 章 各研究課題の主な研究成果.....	35
3.1 2008 年度採択研究課題	35
3.1.1 生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム（浦岡行治）.....	36
3.1.2 イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築（澤田和明）.....	37

3.1.3	電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用（西澤松彦）	38
3.1.4	自己組織プロセスにより創製された機能性・複合 CNT 素子による柔らかいナノ MEMS デバイス（畠 賢治）	39
3.1.5	自己組織化グラファイトシート上エレクトロニクスの開発（藤岡 洋）	40
3.1.6	機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製（宮原 裕二）	41
3.2	2009 年度採択研究課題	42
3.2.1	光神経電子集積回路開発と機能解析・応用（宇理須 恒雄）	43
3.2.2	拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成（北森 武彦）	44
3.2.3	バイオテンプレート極限加工による 3 次元量子構造の制御と新機能発現（寒川 誠二）	45
3.2.4	大面積ナノシステムのインタフェース応用（染谷 隆夫）	46
3.2.5	濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製（辻井 敬亘）	47
3.2.6	マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築（藤井 輝夫）	48
3.3	2010 年度採択研究課題	49
3.3.1	スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出（齊藤 英治）	50
3.3.2	生体分子 1 分子デジタル計数デバイスの開発（野地 博行）	51
3.3.3	エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー（樋口 昌芳）	52
3.3.4	新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立（山元 公寿）	53

要旨

本報告書は、戦略的創造研究推進事業の CREST(チーム型研究) の研究領域「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」(2008 年度～2015 年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST) 事業及び事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

研究終了後の研究進展を、以下のような目次に沿って、本報告書にまとめる。

第 1 章では、研究領域概要について、戦略目標、研究領域の目的、研究総括、領域アドバイザー、研究領域および研究代表者をまとめた。

第 2 章では、追跡調査の目的、対象および方法を記述し、研究助成金、論文、特許、受賞、招待講演、報道、共同研究や企業との連携、実用化・製品化およびベンチャー企業についてまとめた。また研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果について、研究領域の展開状況、研究成果の科学技術の進歩への貢献、研究成果の社会・経済への貢献および新たな展開や分野間融合をまとめた。

第 3 章では、各研究課題の研究期間中の主な研究成果と、その成果に基づいた研究終了後の展開について主な研究成果をまとめた。また、ベンチャー企業設立や企業との共同研究などの特筆すべき展開についてもまとめた。

研究成果の展開状況として、バイオとエレクトロニクスを融合したナノシステム関係では、野地が ImPACT で超高感度デジタル ELISA 計測システムの事業化を進めるとともに、環状 DNA、長鎖 DNA のマイクロアレイチャンバー内増幅等の「人工細胞リアクタ」基盤技術を確立した。宮原は SIP で超高感度センサシステムの研究開発を行うとともに、血糖値変化に対応してインスリン放出制御を行うインスリン投与デバイスを開発した。澤田は A-STEP で CMOS センサ技術と MEMS 技術を融合した高精細イオンイメージセンサ開発を進め、高解像度・高速動作イオンセンサアレイを開発した。浦岡はバイオナノプロセスを活用して、高変換効率の色素増感型およびペロブスカイト型太陽電池や高感度ガスセンサを開発した。宇理須は高品質イオンチャンネル電流の計測に成功し、4 個の細胞を同時計測可能な培養型プレーナーパッチクランプ装置のプロトタイプ機を製作するとともに、同装置の実用化を目指して(株)NANORUS を設立して実用化研究を進めている。

フレキシブル基板とエレクトロニクス・フォトンクス・エネルギーデバイスを融合したナノシステム関係では、染谷が ERATO で生体認証とバイタルサイン計測を同時に行えるセンサを開発した。西澤は AMED、A-STEP でオール有機物により生体親和性を有する頭蓋内電極を開発するとともに、薬剤浸透をマイクロ電流で促進するバイオ発電スキンパッチを開発した。藤岡は ACCEL、A-STEP で低温・低コストなパルススパッタ堆積法によるグラフェン上 GaN 結晶成長の実現および金属基板上 GaN LED の作製を実現した。樋口は CREST で耐熱性を有するエレクトロクロミックデバイスを開発するとともに、メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミックデバイスが蓄電機能を有することを発見して高エネルギー密度の

電池機能を実現した。畠は CNT シートを用いた柔軟で丈夫なトランジスタ、集積化マイクロキャパシタ、耐熱 0 リングおよび電磁波遮蔽コーキング材を開発した。

ナノ構造による化学反応場を利用したナノシステム関係では、辻井が ACCEL、A-STEP で濃厚ポリマーブラシのトライボロジー材料・システム基礎理論を確立するとともに、機械摺動部をはじめ燃料電池、バイオ・医療へ応用展開した。山元は ERATO で原子数を制御可能な金属原子クラスター形成方法によるサブナノ粒子高機能触媒を創製するとともに、高次ナノ物質の周期律を発見した。

ナノ構造における生体反応を利用したナノシステム関係では、北森が CREST でナノ流体デバイス作製技術とナノ流体工学基盤を確立するとともに、単一細胞分析技術およびフェムトリット液体クロマトグラフィを開発した。寒川は A-STEP でバイオテンプレートと低損傷中性ビームによる量子ナノ円盤構造作製技術を量子ドット太陽電池、LED および超撥水へ応用展開した。藤井は AMED で微小流路構造を用いた運動神経オルガノイド形成技術および液体生検が可能な血中循環腫瘍細胞 (CTC) 分離システムを開発した。

次世代ナノシステムの創製関係では、齊藤が ERATO で電子スピンと力学運動や熱を相互作用させる基本現象として、量子スピンゼーベック効果、反強磁性転移によるスピンゼーベック異常およびスピンゼーベック効果の力学的逆効果を発見した。

研究終了後もバイオとエレクトロニクスを融合したナノシステム関係、フレキシブル基板とエレクトロニクス・フォトニクス・エネルギーデバイスを融合したナノシステム関係、ナノ構造による化学反応場を利用したナノシステム関係、ナノ構造における生体反応を利用したナノシステム関係および次世代ナノシステムの創製関係の全ての研究課題で特色のある技術開発が進展し、それぞれの研究課題が本研究領域の戦略目標であった「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」に貢献したことが窺える。

第 1 章 研究領域概要

1.1 戦略目標

「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」

本戦略目標は、ナノテクノロジーを活用したプロセスの高度化と統合化を進めることによって、バイオとエレクトロニクスが融合したナノシステム、ナノ構造 による化学反応場を利用したシステム、自律的に機能する分子システムなど、MEMS (NEMS) 等を含む次世代ナノシステムの創製を目指す。

これまで、様々なデバイスやシステムの高速度化・集積化・小型化等は、トップダウンプロセス技術の発展に支えられてきた。それはシリコン CMOS の高集積化がフォトリソグラフィ技術の微細化によりなされてきたことに顕著に表れている。

フォトリソグラフィ等の加工精度は 2007 年現在で 45 nm レベルに達していたが、上記の革新的な機能をもつナノシステムの創製には、数 nm レベルまで加工精度を高めることが必要である。

また、自己組織化に代表されるボトムアッププロセスでは、1 nm をきる分子サイズレベルでの形成精度も実現可能であるが、現状では分子等を配列させるだけの技術レベルに止まっている。自己組織化の技術を、分子配置、分子構造等を時間的・空間的にダイナミックに制御して自在にナノ構造体を構築することのできるレベルまで高めるとともに、それらナノ構造体を組み合わせることで自律的に機能を創発する自己機能化のレベルまで発展させていくことが必要である。

本戦略目標では、従来からの技術的蓄積のあるトップダウンプロセスと、今後の発展が大いに期待されるボトムアッププロセスについて、それぞれの高度化を一層推進するとともに、それらプロセス技術の様々な組み合わせを試みることで、上記次世代ナノシステムの創製をはかることを目的とする¹。

我が国はトップダウンプロセスの代表例のフォトリソグラフィエッチング技術で世界の最先端を走っている。線源に EUV を使うなどして短波長化させることで、加工分解能の向上が可能になるが、EUV 線源については文部科学省のプロジェクトの 1 つとして取り組みが始まっている。また、量子相関を有するもつれ合い光子の特異な振る舞いを利用することでも、光の回折限界をはるかに超える加工分解能の実現が可能である。イオンビーム加工では、希ガスをを用いたイオン源の開発によって加工時の損傷を大幅に減少させることが期待される。また球面ならびに色収差補正技術の導入により、加工精度を数 nm レベルまで大幅に向上できると考えられる。この収差補正技術についても、我が国独自のシステムの開発が文部科学省のプロジェクトで進められている。

¹ なお、本戦略目標では、本 CREST 研究領域「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」(2008 年度～2015 年度)の他に、CREST 研究領域「プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出」(2008 年度～2015 年度)とさきがけ研究領域「ナノシステムと機能創発」(2008 年度～2015 年度)が設定された。

一方、ボトムアッププロセスの開拓についても日本は優れた要素技術をもっており、特に高分子工学・有機化学は世界の最先端を走っているとされる。本戦略目標に関連するものとして以下のものが挙げられる。

- ・デンドリマー等に代表される高分子ナノ空間制御材料や自己構造化ナノチューブ等の研究
- ・ウイルスを使った金 - 酸化コバルトのハイブリッドワイヤーの室温合成ならびにそれらの二次元制御によって薄く柔軟なりチウムイオン電池を作る研究
- ・人工物と生体分子に代表される異種材料間をハイブリッド接合する研究
- ・ナノサイズ粒子を表面張力等の利用により自己構造化させる研究
- ・ブロックコポリマーのマイクロ相分離によるパターンドメディアの加工プロセスの研究

これらの研究に、さらに高度化させたトップダウンプロセスを用いることで、より複雑な構造や高い機能を有する次世代デバイスの創製につながることを期待できる。

1.2 研究領域の目的

本研究領域は、フォトリソグラフィ等のトップダウンプロセスと自己組織化に代表されるボトムアッププロセスの高度化と統合化を進めることによって、革新的な機能を発現する次世代ナノシステムの創製を目指すものである。

具体的には、トップダウンプロセスによって作られた微細な電子回路、MEMS・NEMS等のナノ構造デバイスと、ボトムアッププロセスによって生成されたバイオ・有機材料、自己組織化材料等との融合を図ることにより新たな機能を発現させる研究、または機能を有するボトムアップナノ構造体を工学的に応用可能なシステムとして構築する研究を対象とし、従来にない機能、性能をもつセンサ、アクチュエータ、バイオチップ、電子・光デバイス、エネルギーデバイス等の基盤構築を目指す。さらに、これらを集積・最適化した次世代ナノシステムの構築まで念頭に置いて研究を推進する。

1.3 研究総括

曾根純一（国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 上席フェロー）

1.4 領域アドバイザー

本研究領域は異分野融合から生まれるセンサ、アクチュエータ、ナノバイオデバイス、エネルギーデバイス、電子・光デバイスなどに着目し、ボトムアッププロセスとトップダウンプロセスのインテグレーション等によりナノシステム創製のための展開と研究を進めた。この研究領域の概要に沿って研究を行うため、上記分野をカバーできる11人の領域アドバイザーを定め、研究者の指導にあたった。表1-1に領域アドバイザーを示す。

表 1-1 領域アドバイザー

領域 アドバイザー	所属	役職	任期
小野 崇人	東北大学大学院工学研究科	教授	2008年4月1日 ～2016年3月31日
栗原 和枝	東北大学原子分子材料科学高等 研究機構	教授	2008年4月1日 ～2016年3月31日
清水 敏美	(独)産業技術総合研究所	フェロー	2008年4月1日 ～2016年3月31日
出川 通	(株)テクノ・インテグレーション	代表取締役社長	2008年4月1日 ～2016年3月31日
鳥光 慶一	東北大学大学院工学研究科	教授	2008年4月1日 ～2016年3月31日
西本 清一	(財)京都高度技術研究所/ 京都市産業技術研究所	理事長/理事長	2008年4月1日 ～2016年3月31日
馬場 嘉信	名古屋大学大学院工学研究科	教授	2008年4月1日 ～2016年3月31日
板東 義雄	(独)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	フェロー/最高 運営責任者	2008年4月1日 ～2016年3月31日
冬木 隆	奈良先端科学技術大学院大学物質創 成科学研究科	教授	2008年4月1日 ～2015年2月28日
松本 和彦	大阪大学産業科学研究所	教授	2008年4月1日 ～2016年3月31日
大橋 啓之	早稲田大学ナノ・ライフ創新研究機構	教授	2009年4月1日 ～2016年3月31日

1.5 研究課題および研究代表者

研究課題(研究代表者)の公募は 2008 年度から 3 年間、3 期にわたり、総計 16 件の研究課題が採択された。表 1-2 に各期の研究代表者、研究課題、採択時の所属と役職、終了時の所属と役職並びに追跡調査時点の所属と役職を示した。また、表 1-3 に各研究チームの主たる共同研究者のリストを示した。

表 1-2 研究課題と研究代表者(第 1 期、第 2 期、第 3 期)

期 (研究期間)	研究課題	研究 代表者	採択時の所属・ 役職	終了時の所属・ 役職	追跡調査時の所 属・役職
第 1 期 (2008 年 10 月 ～2014 年 3 月)	生体超分子援用 フロンティアブ ロセスによる高 機能化ナノシス テム	浦岡 行治	奈良先端科学技術 大学院大学物質創 成科学研究科 准教授	奈良先端科学技術 大学院大学物質創 成科学研究科 教授	奈良先端科学技術 大学院大学先端科 学技術研究科 教授
第 1 期 (2008 年 10 月 ～2015 年 3 月)	イオンイメージ センサ技術を利用 した医療生体 ナノシステム構 築	澤田 和明	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授/エレクトロ ニクス先端融合研 究所 所長
第 1 期 (2008 年 10 月 ～2014 年 3 月)	電気化学的な異 種材料ナノ集積 化技術の開拓と バイオデバイス 応用	西澤 松彦	東北大学大学院工 学研究科 教授	東北大学大学院工 学研究科 教授	東北大学大学院工 学研究科 教授

期 (研究期間)	研究課題	研究 代表者	採択時の所属・ 役職	終了時の所属・ 役職	追跡調査時の所 属・役職
第1期 (2008年10月 ～2014年3月)	自己組織プロセスにより創製された機能性・複合CNT素子による柔らかいナノMEMSデバイス	畠賢治	産業技術総合研究所ナノチューブ応用研究センタースーパーグロースCNTチーム長	産業技術総合研究所ナノチューブ応用研究センター上席研究員/スーパーグロースCNTチーム長	産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センター研究センター長
第1期 (2008年10月 ～2015年3月)	自己組織化グラフィートシート上エレクトロニクスの開発	藤岡洋	東京大学生産技術研究所 教授	東京大学生産技術研究所 教授	東京大学生産技術研究所 教授
第1期 (2008年10月 ～2014年3月)	機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製	宮原裕二	物質・材料研究機構生体材料研究センター センター長/同 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 主任研究者	東京医科歯科大学生体材料工学研究所 教授	東京医科歯科大学生体材料工学研究所 所長・教授
第2期 (2009年10月 ～2015年3月)	光神経電子集積回路開発と機能解析・応用	宇理須恒雄	自然科学研究機構分子科学研究所 教授	名古屋大学革新ナノバイオデバイス研究センター 特任教授	(株)NANORUS 代表取締役会長
第2期 (2009年10月 ～2015年3月)	拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成	北森武彦	東京大学大学院工学系研究科 教授	東京大学大学院工学系研究科 教授	東京大学マイクロ・ナノ多機能デバイス連携研究機構 特任教授
第2期 (2009年10月 ～2016年3月)	バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現	寒川誠二	東北大学流体科学研究所 教授	東北大学流体科学研究所 教授	東北大学流体科学研究所 教授
第2期 (2009年11月 ～2012年3月)	大面積ナノシステムのインタフェース応用	染谷隆夫	東京大学大学院工学系研究科 教授	東京大学大学院工学系研究科 教授	東京大学大学院工学系研究科 教授/(国研)理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー
第2期 (2009年10月 ～2015年3月)	濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製	辻井敬亘	京都大学化学研究所 教授	京都大学化学研究所 教授	京都大学化学研究所 所長・教授
第2期 (2009年11月 ～2015年3月)	マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築	藤井輝夫	東京大学生産技術研究所 教授	東京大学生産技術研究所 教授	東京大学生産技術研究所 教授/東京大学 副学長
第3期 (2010年10月 ～2015年3月)	スピン流による熱・電気・動力ナノインテグレーションの創出	齊藤英治	東北大学金属材料研究所 教授	東北大学金属材料研究所 教授	東京大学大学院工学系研究科 教授
第3期 (2010年10月 ～2016年3月)	生体分子1分子デジタル計数デバイスの開発	野地博行	東京大学大学院工学研究科 教授	東京大学大学院工学研究科 教授	東京大学大学院工学研究科 教授
第3期 (2010年10月 ～2016年3月)	エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー	樋口昌芳	物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 独立研究者	物質・材料研究機構先端の共通技術部門 グループリーダー	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
第3期 (2010年10月 ～2016年3月)	新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立	山元公寿	東京工業大学資源化学研究所 教授	東京工業大学資源化学研究所 教授	東京工業大学科学技術創成研究院 教授

表 1-3 各研究チームの主たる共同研究者リスト

研究代表者	主たる共同研究者
浦岡 行治	渡部 平司(大阪大学大学院工学研究科 教授) 磯野 吉正(神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 教授) 熊谷 慎也(名城大学理工学部電気電子工学科 教授) 芝 清隆((公財)がん研究会がん研究所蛋白創製研究部 部長/東京歯科大学歯学部 客員教授) 富田 知志(東北大学高度教養教育学生支援機構 助教)
澤田 和明	櫻井 孝司(順天堂大学研究戦略推進センター URA)
西澤 松彦	神崎 展(東北大学医工学研究科 准教授) 安川 智之(兵庫県立大学大学院物質理学研究科 教授)
畠 賢治	-
藤岡 洋	石井 晃(鳥取大学工学研究科 教授)
宮原 裕二	片岡 知歩(物質・材料研究機構 主任研究員) 坂田 利弥(東京大学大学院工学系研究科 准教授) 大塚 英典(東京理科大学理学部第一部応用化学科 教授) 鈴木 孝治(慶應義塾大学理工学部 名誉教授) 神原 秀記(日立製作所 名誉フェロー)
宇理須 恒雄	下島 康嗣(産業技術総合研究所 主任研究員) 深澤 有吾(福井大学学術研究院医学系部門 教授) 石塚 徹(ブレインイノベーション(株)創薬・臨床開発部創薬研究センター センター長) 古谷 祐詞(分子科学研究所生命錯体分子科学研究領域 准教授/名古屋工業大学工学研究科 准教授)
北森 武彦	佐藤 香枝(日本女子大学 教授) 塚原 剛彦(東京工業大学科学技術創成研究院 准教授)
寒川 誠二	村山 明宏(北海道大学情報科学研究院 教授) 伊藤 公平(慶應義塾大学理工学部 教授)
染谷 隆夫	桜井 貴康(東京大学生産技術研究所 名誉教授)
辻井 敬亘	佐藤 貴哉(鶴岡工業高等専門創造工学科 教授/国立高等専門学校機構研究推進課 研究総括参事) 小林 尚俊(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 上席研究員)
藤井 輝夫	芝 清隆((公財)がん研究会がん研究所蛋白創製研究部 部長/東京歯科大学歯学部 客員教授) 阿久津 英憲(成育医療研究センター生殖医療研究部 部長)
齊藤 英治	前川 禎通(国立研究開発法人理化学研究所創発物性科学研究センター 上級研究員/国立研究開発法人日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 客員研究員) 高梨 弘毅(東北大学金属材料研究所 教授) 大江 純一郎(東邦大学理学部 教授)
野地 博行	太田 淳(奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 教授) 藤井 輝夫(東京大学生産技術研究所 教授/東京大学 副学長)
樋口 昌芳	森山 悟士(東京電機大学工学部 准教授) 牧 英之(慶應義塾大学理工学部 准教授)
山元 公寿	-

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は研究領域終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST(科学技術振興機構)の事業および事業運営の改善に資するために行うもので、研究終了後の研究者の研究課題の発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、CREST 研究領域「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」(2008 年度～2015 年度)を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年	研究代表者	CREST 研究期間	CREST 終了後の調査対象期間
第 1 期 (2008 年)	浦岡 行治	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2015 年 1 月～調査終了月
	澤田 和明	2008 年 10 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
	西澤 松彦	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2015 年 1 月～調査終了月
	畠 賢治	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2015 年 1 月～調査終了月
	藤岡 洋	2008 年 10 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
	宮原 裕二	2008 年 10 月～2014 年 3 月	2015 年 1 月～調査終了月
第 2 期 (2009 年)	宇理須 恒雄	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
	北森 武彦	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
	寒川 誠二	2009 年 10 月～2016 年 3 月	2017 年 1 月～調査終了月
	染谷 隆夫	2009 年 11 月～2012 年 3 月	2013 年 1 月～調査終了月
	辻井 敬亘	2009 年 10 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
	藤井 輝夫	2009 年 11 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
第 3 期 (2010 年)	齊藤 英治	2010 年 10 月～2015 年 3 月	2016 年 1 月～調査終了月
	野地 博行	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2017 年 1 月～調査終了月
	樋口 昌芳	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2017 年 1 月～調査終了月
	山元 公寿	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2017 年 1 月～調査終了月

2.1.3 調査方法

(1) 研究助成金

調査対象期間は、本研究領域の期間中を含めて調査対象月とし、本研究領域の研究代表者が研究の代表を務める研究助成金を調査した。その中から、原則、研究助成金の総額が1千万円/件以上のものを抽出した。

ただし、各研究課題の開始後に研究助成を受け、当該研究課題が終了する前に、その助成期間が終了してしまう事案および当該研究課題終了と同年度に助成期間が終了する事案に関しては対象外とする。

研究助成資金の獲得状況の調査については、主に以下のWEBサイトを利用した。

- ・調査対象研究代表者所属大学の研究者データベース
- ・調査対象研究代表者の所属する研究室、本人のWEBサイト
- ・競争的研究資金の機関データベース
(科学研究費助成事業データベース、厚生労働科学研究成果データベース)
- ・民間女性研究成果概要データベース(学術研究データベース・リポジトリ 国立情報学研究所[https://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/CsvSearch.cgi])
- ・公益財団法人助成財団センター(http://www.jfc.or.jp/grant-search/ap_search.php5)
- ・日本の研究.com(<https://research-er.jp/>)

(2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとしてScopusを用い、文献タイプはArticle, Review, Conference Paperを対象とした。研究期間中は研究代表者及び主たる共同研究者(あるいは研究終了報告書の成果論文で責任著者となっている研究者)が著者になっている論文、研究終了後は研究代表者が著者になっている論文を著者名検索により出力した。著者名から論文リストを作成し、①CRESTの成果と認められるもの、②CRESTの発展と認められるもの、③CRESTと無関係と考えられるものに分類し、論文数を求めた。また、CRESTの成果および発展に関する論文について、研究代表者が責任著者となっている論文数も調べた。著者名からは絞り込みの出来ない研究代表者については、CREST研究のキーワードで絞り込み検索を行った。

(3) 特許

特許出願および登録状況は、出願日(もしくは優先権主張日)が研究課題開始以降で、研究代表者が発明者になっているものを抽出した。また、その発明の名称からそれぞれの研究課題と関連していないと思われるものは除いた。使用データベースは、PatentSQUARE(パナソニック株式会社)である。

(4) 受賞、招待講演、報道、共同研究や企業との連携等

研究終了以降から現在至までの受賞、国内外の主要な会議における招待講演、報道、共同研究や企業との連携等について、ウェブ検索を用い、各研究代表者の研究室ホームページ、科学研究費補助金(科研費) ホームページなどを参考にし、それぞれのリストを作製した。さらに研究代表者の確認により追加した。

2.2 追跡調査概要

2.2.1 研究助成金

主な研究費の獲得状況からの研究の発展について、記載する。

研究助成金は調査対象者が研究の代表者でかつ研究費総額1千万円/件以上とする。ただし、研究代表者アンケートに記載があったものは採用する。

各助成金項目は研究課題開始年度の年次順に研究期間がわかるように記載し、出資元(JST、科研費、NEDO等)ごとに色分けする。

研究課題開始年度の年次順に記載し、データ取得年月日をテーブルの最後に付記する。

表 2-2 研究助成金獲得状況

科研費 ■ JST ■ 内閣府 ■ 文科省 ■ AMED ■ その他 ■

研究代表者	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	金額(1千万円)	
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
浦岡行治	2008～2013	JST (CREST)	生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム	■	■	■	■	■																			42.4	
	2016～2018	科研費(基盤研究(B))	超臨界水を活用した GaN パワー素子の高信頼性化技術									■	■															1.7
	2016～2017	トヨタ公募型共同研究	高圧水蒸気処理による高品質 Al2O3/GaN 異種接合界面の実現																									1.0
	2017～2018	内閣府/NEDO (SIP)	次世代パワーエレクトロニクス																									1.0
	2019～2021	科研費(基盤研究(B))	アモルファス酸化物半導体における熱輸送に着目した高性能フレキシブル熱電素子の研究																									1.7

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
澤田和明	2008 ～ 2014	JST (CREST)	イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築																						38.5	
	2012 ～ 2016	科研費 (基盤研究(S))	細胞機能解明のためのイオン・蛍光マルチモーダルイメージセンサシステム創製																						17.4	
	2014 ～ 2020	JST (CREST)	非標識神経伝達物質イメージセンサによる細胞活動可視化システム構築と脳機能の時空間解析																						15.0～ 49.8	
	2015 ～ 2020	JST (A-STEP)	CMOS センサ技術とMEMS 技術を融合した高精細イオンイメージセンサ開発																						30.0 (最大)	
	2018 ～ 2023 ※1	JST (OPERA)	物理・化学情報をミクロンレベルで可視化するマルチモーダルセンシング技術の創出																						66.0	
	2018 ～ 2022	科研費 (基盤研究(A))	神経伝達物質の相互作用の解明を目指すマルチモーダルイオンイメージセンサの実現																							4.5
西澤松彦	2008 ～ 2013	JST (CREST)	電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用																						24.9	
	2013 ～ 2016	科研費 (基盤研究(A))	導電性高分子ゲル電極による高効率な細胞刺激システムの開発																						4.2	
	2017 ～ 2018	JST (未来社会創造)	スマート健康パッチによる水分マネジメント																						2.0 (最大)	
	2018 ～ 2020	AMED (医療分野研究成果展開事業(先端計測分析技術・機器開発プロ	ハイドロゲルを基材とする頭蓋内有機物電極の開発																						6.6	

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		グラ ム))																				
	2018 ～ 2021	科研費 (基盤研 究(A))	ソフトウェッ電 極で創る生体親和 性デバイス																			4.3
	2020 ～ 2022	JST (A- STEP)	バイオ発電ニード ルパッチの開発																			3.8
畠 賢 治	2008 ～ 2013	JST (CREST)	自己組織プロセス により創製された 機能性・複合 CNT 素子による柔らか いナノ MEMS デバ イス																			20.5
藤 岡 洋	2008 ～ 2014	JST (CREST)	自己組織化グラフ アイトシート上エ レクトロニクス の開発																			32.1
	2014 ～ 2018	JST (ACCEL)	PSD 法によるフレ キシブル窒化物半 導体デバイスの開 発																			150.0
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術 領域研 究(研究 領域提 案型))	非平衡状態の時間 ドメイン制御によ る特異構造の創製																			13.0
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術 領域研 究(研究 領域提 案型))	特異構造の結晶科 学：完全性と不完 全性の協奏で拓く 新機能エレクトロ ニクス																			-
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術 領域研 究(研究 領域提 案型))	特異構造の結晶科 学：完全性と不完 全性の協奏で拓く 新機能エレクトロ ニクス(総括班)																			7.6
	2016 ～ 2020	科研費 (新学術 領域研 究(研究 領域提 案型))	特異構造の結晶科 学：完全性と不完 全性の協奏で拓く 新機能エレクトロ ニクス(国際活動 支援班)																			3.5
	2019	JST (A- STEP)	超高精細マイクロ LED ディスプレイ に適した InGaN モ																			1.0(最 大)

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			ノリシック RGB-LED 構造の開発																						
	2020 ～ 2024	JST (A-STEP)	高臨場感 VR/AR ディスプレイのための高輝度フルカラーモノリシック LED の開発																					45.0(最大)	
宮原裕二	2008 ～ 2013	JST (CREST)	機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製																					45.1	
	2013 ～ 2021	内閣府 (COI)	尿・唾液中マイクロ RNA による非侵襲予防診断デバイスの開発																					4.4	
	2014 ～ 2018	内閣府 (ImPACT)	機能性界面の創製と有害物質センシング技術の開発																					17.3	
	2018 ～ 2022	内閣府 /NEDO (SIP)	匂いセンサデバイスの研究開発																					4.1	
宇理須恒雄	2009 ～ 2014	JST (CREST)	光神経電子集積回路開発と機能解析・応用																					24.7	
北森武彦	2009 ～ 2014	JST (CREST)	拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成																					42.8	
	2013 ～ 2015	科研費 (基盤研究(A))	波動光学に基づいた拡張ナノ空間のための熱レンズ検出デバイスの創出																					4.6	
	2014 ～ 2019	JST (CREST)	拡張ナノ流体デバイス工学によるピコ・フェムトリットル蛋白分子プロセッシング																					15.0～ 49.8	
	2017 ～ 2019	科研費 (基盤研究(A))	拡張ナノ熱光学流体デバイスの創成と無標識一分子検出の実現																					4.4	
寒川誠二	2009 ～ 2015	JST (CREST)	バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現																					46.7	

研究 代表 者	研究 期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)		
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
				8	9	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	2	3	4	5	6	7
	2016 ～ 2018	科研費 (基盤研 究(B))	三次元量子ナノデ ィスクアレイによ るゼーベック係数 制御・熱電変換素 子																						1.7
	2020 ～ 2024	科研費 (基盤研 究(S))	無欠陥ナノ周期構 造によるフォノン 場制御を用いた高 移動度半導体素子																						
染 谷 隆 夫	2009 ～ 2011	JST (CREST)	大面積ナノシステ ムのインタフェー ス応用																						15.0～ 49.8
	2008 ～ 2012	科研費 (若手研 究(S))	ナノ印刷技術によ る伸縮自在な大面 積シート集積回路																						9.5
	2011 ～ 2017	JST (ERATO)	染谷生体調和エレ クトロニクスプロ ジェクト																						140.0
	2014 ～ 2016	科研費 (基盤研 究(B))	ビッグデータ向け 環境センサの基盤 を支える有機アナ ログ集積回路																						1.6
	2016	JST (ACCEL (FS))	伸縮性エレクトロ ニクスによる3次 元曲面センサシス テムの開発																						1.0 (最 大)
	2017 ～ 2018	JST (SICORP (フェーズI))	皮膚貼り付け型セ ンサによる高齢者 健康状態の連続モ ニタリング																						1.3 (最 大)
	2017 ～ 2021	JST (ACCEL)	スーパーバイオイ メージャーの設 計・試作・評価																						150.0
	2017 ～ 2021	科研費 (基盤研 究(S))	拍動する心筋細胞 シートを用いた伸 縮性多点電極アレ イによる薬物反応 の評価																						20.4
	2018 ～ 2022	内閣府 /NEDO (SIP)	ヒューマンインタ ラクションセンサ デバイスシステム 技術の開発																						137.5 (最 大)
	2019 ～ 2021	JST (SICORP (フェーズII))	皮膚貼り付け型セ ンサによる高齢者 健康状態の連続モ ニタリング																						19.5
辻 井 敬 亘	2009 ～ 2014	JST (CREST)	濃厚ポリマーブラ シの階層化による 新規ナノシステムの 創製																					27.3	

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)	
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				8	9	0	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	2	3	4	5	6	7
	2014 ～ 2016	NARO (異分野 融合共 同研究)	高分子分散剤による木材由来 NC の界面機能制御と樹脂複合材料への応用																					15.0 (最大)	
	2014 ～ 2018	内閣府 /JST (SIP)	モノリス構造を利用したナノブラシの階層化による革新的な高度潤滑																						5.0
	2015 ～ 2019	JST (ACCEL)	濃厚ポリマーブラシのレジリエンス強化とトライボロジー応用																						150.0
	2017 ～ 2019	科研費 (挑戦的 研究(開 拓))	ナノコンポジット材料におけるナノファイバーネットワークの重要性と卓抜機能の開拓																						2.6
	2019	JST (A- STEP)	濃厚ポリマーブラシ(CPB)の工業的製造方法の確立																						2.0
	2020 ～ 2022	JST (A-STEP 産学共 同[本格 型])	濃厚ポリマーブラシ(CPB)付与による高性能摺動部品の開発と装置への応用																						45.0 (最大)
藤井輝夫	2009 ～ 2014	JST (CREST)	マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築																					15.0～ 49.8	
	2013 ～ 2015	科研費 (基盤研 究(A))	マイクロハイドロリクスの基盤構築																					4.3	
	2016 ～ 2020	科研費 (基盤研 究(S))	マイクロ流体アプローチによる1細胞トランスクリプトーム解析とその応用展開																					17.8	
	2017 ～ 2021	AMED (再生医 療・遺 伝子治 療の産 業化に 向けた 基盤技 術開発 事業)	創薬における高次 in vitro 評価系としての Kidney-on-a-chip の開発																					25.7	

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2020	JSPS (外国人 招へい 研究者)	マイクロ流体を用 いた DNA ナノ粒子 結晶化の相図形成																			-	
齊藤英治	2010 ～ 2014	JST (CREST)	スピン流による 熱・電気・動力ナ ノインテグレーシ ョンの創出																			32.7	
	2014 ～ 2018	科研費 (新学術 領域研 究(研究 領域提 案型))	熱・力学的スピン 変換																			21.3	
	2014 ～ 2019	JST (ERATO)	齊藤スピン量子整 流プロジェクト																			120.0	
	2019 ～ 2023	科研費 (基盤研 究(S))	核スピン流の物性 科学開拓と核スピ ン熱電変換																			20.6	
	2021 ～ 2026	JST (CREST)	非古典スピン集積 システム																			30.0	
野地博行	2010 ～ 2015	JST (CREST)	生体分子 1 分子デ ジタル計数デバイ スの開発																			15.0～ 49.8	
	2015 ～ 2018	内閣府 (ImPACT)	豊かで安全な社会 と新しいバイオも のづくりを実現す る人工細胞リアク タ																			約 150.0	
	2019	JSPS (外国人 招へい 研究者)	単一ナノワイヤト ランジスタを用い た ATP 合成酵素の 1 分子プロトン輸 送活性計測																			15.0～ 49.8	
	2019 ～ 2021	科研費 (基盤研 究(A))	On-chip 統合デジ タルバイオアッセ イのための動的フ ェムトリアクタ技 術の開発																			4.6	
	2019 ～ 2023	科研費 (基盤研 究(S))	次世代型デジタル バイオアッセイの ための動的フェム トリアクタ技術																			18.0	
2019 ～ 2024	JST (CREST)	長鎖 DNA 合成と自 律型人工細胞創出 のための人工細胞 リアクタシステム																				15.0～ 49.8	

研究代表者	研究期間 (年度)	研究種 目	研究課題	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	金額 (1千万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2020 ～ 2022	AMED (HFSP)	Evolution of conformational and kinetic ensembles during functional transitions																			13.5(最大)
樋口昌芳	2010 ～ 2015	JST (CREST)	エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー																			22.6
	2015 ～ 2020	JST (CREST)	超高速・超低電力・超大面积エレクトロクロミズム																			15.0～49.8
山元公寿	2010 ～ 2015	JST (CREST)	新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立																			29.1
	2015 ～ 2019	科研費 (基盤研究(S))	精密無機合成を基盤とする超原子の創成と機能解明																			20.1
	2015 ～ 2023	JST (ERATO) ※2	山元アトムハイブリッドプロジェクト																			138.9(最大)

※1 2018年度～2019年度はFSフェーズ、2020年度～2023年度の4年間は、本格実施フェーズ

※2 継続期間を含む

2020年4月30日調査
2020年11月18日更新
2021年3月22日確認

2.2.2 論文

研究活動の成果を評価する指標としては、発表された論文の内容とともにその件数が重要であり、数値として評価・比較が容易な論文発表件数を以下にまとめた。

表2-3に、研究代表者の論文(原著論文)数をまとめた。図2-1には①CRESTの成果と認められる論文数、②CRESTの発展と認められる論文数およびTop10%以内論文数を、図2-2には各研究代表者の論文数分布、また図2-3には各研究代表者の①CRESTの成果、②CRESTの発展に関する論文数およびTop10%以内論文数を示す。

表2-3 CRESTの成果および発展の論文(原著論文)数

期 (採択 年度)	研究 代表者	①CRESTの成果							②CRESTの発展						
		論文 数	責任 著者 論文 数	平均 FWCI 値	TOP%論文				論文数	責任 著者 論文 数	平均 FWCI 値	TOP%論文			
					10%	1%	0.1%	0.01%				10%	1%	0.1%	0.01%
1期 (2008 年度)	浦岡 行治	126	1	0.99	11	1	0	0	17	2	0.33	0	0	0	0
	澤田 和明	94	4	0.73	3	0	0	0	38	4	0.41	0	0	0	0
	西澤 松彦	121	25	0.94	11	0	0	0	31	16	1.61	8	1	0	0

期 (採択 年度)	研究 代表者	①CREST の成果							②CREST の発展						
		論文 数	責任 著者 論文 数	平均 FWCI 値	TOP%論文				論文 数	責任 著者 論文 数	平均 FWCI 値	TOP%論文			
					10%	1%	0.1%	0.01%				10%	1%	0.1%	0.01%
	畠 賢治	107	34	3.08	30	8	2	0	67	8	0.98	6	0	0	0
	藤岡 洋	72	29	0.98	6	1	0	0	28	12	0.61	1	0	0	0
	宮原 裕二	158	2	1.09	20	0	0	0	47	13	0.98	4	0	0	0
2 期 (2009 年度)	宇理須 恒雄	67	8	1.06	6	0	0	0	7	3	0.89	0	0	0	0
	北森 武彦	90	44	1.07	11	1	0	0	135	66	0.61	7	1	0	0
	寒川 誠二	78	10	0.79	6	0	0	0	54	15	0.31	2	0	0	0
	染谷 隆夫	32	5	3.70	14	3	1	0	155	45	3.58	54	15	4	0
	辻井 敬亘	100	4	2.13	30	0	1	0	33	5	0.77	3	0	0	0
	藤井 輝夫	243	28	1.10	25	2	0	0	70	7	0.89	7	1	0	0
3 期 (2010 年度)	齊藤 英治	107	2	4.10	49	11	2	0	171	5	1.92	44	3	0	0
	野地 博行	64	23	1.18	8	1	0	0	47	22	1.00	5	0	0	0
	樋口 昌芳	48	39	1.10	6	0	0	0	29	26	0.76	3	0	0	0
	山元 公寿	37	28	1.69	4	1	0	0	47	31	1.11	7	0	0	0
領域全体		1513	286	1.52	237	29	6	0	974	280	1.46	151	21	4	0
		(31)			(3)				(2)						

1 各研究代表者の論文数は重複論文を含むため、領域全体の論文数の合計数は一致しない。()中の数値は重複論文数。領域全体の論文数には重複論文数は含めない。CREST の成果論文の重複は、浦岡と藤岡の共著が 12 報、浦岡と寒川が 9 報、藤井と野地が 5 報(計 31 報)、CREST の発展論文の重複は、寒川と山元が 1 報、浦岡と寒川が 1 報(計 2 報)あった。

2 責任著者とは Corresponding Author と同義。

3 平均 FWCI 値は、調査最終年マイナス 1 年まで(今回の調査では 2019 年末まで)の論文を対象とし、FWCI 値が得られる論文(FWCI 値=0 含む)で平均した数値とした。

4 Top%値は FWCI 値ベースとする。また Top%論文は「論文数」でリストアップした論文を対象とする。

5 各 Top%論文数は“以内”を意味し、例えば Top10%の欄には 1%以下も含む件数がカウントされる。

2020 年 5 月 25 日検索

2020 年 10 月 30 日更新

2021 年 3 月 22 日確認

(被引用数、FWCI、TOP%は 2020 年 11 月 25 日時点)

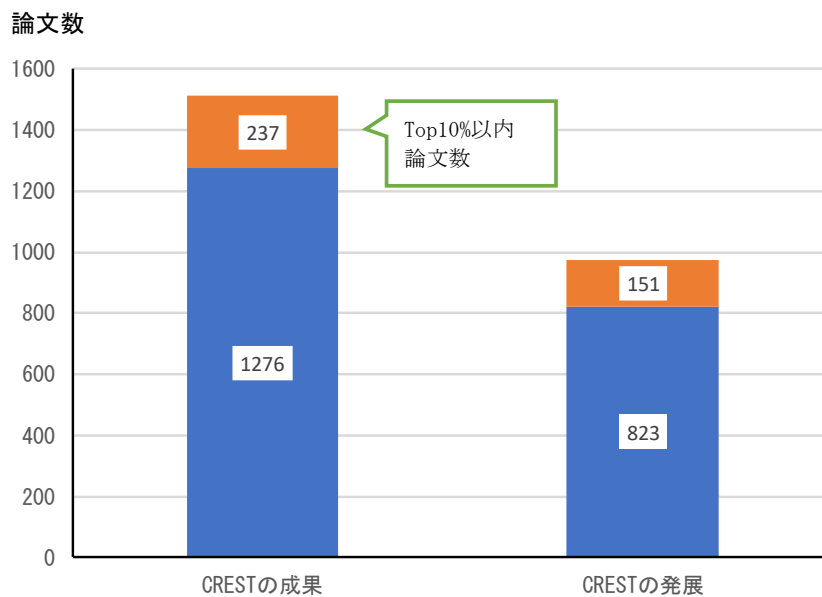


図 2-1 CREST の成果および発展に関する論文数

領域全体では、CREST の成果論文として 1513 報(このうち Top10%以内は 237 報)であり、発展論文は 974 報(このうち Top10%以内は 151 報)と論文数は多く、また CREST の発展論文に関しては、著者を研究代表者に絞っているにも関わらず、Top10%以内の論文数が増加している研究代表者も確認できる。特に染谷は FWCI の平均値が成果論文は 3.70、発展論文は 3.58 と非常に高い。

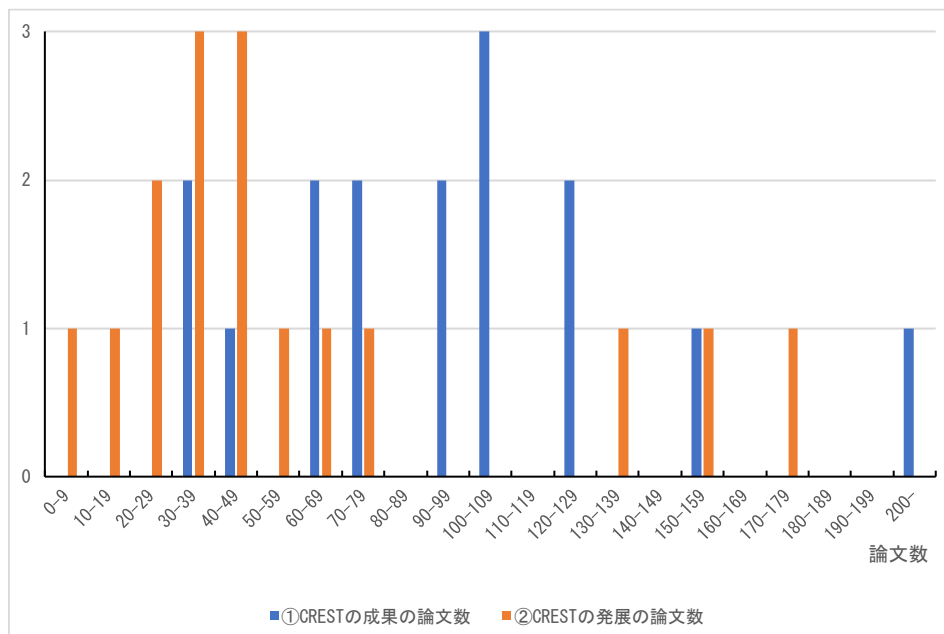


図 2-2 各研究代表者の論文数分布

研究代表者別では、各研究代表者間でばらつきはあるが、CREST の研究成果の論文を最も多く発表したのは、第 2 期の藤井で 243 報、次いで第 1 期の宮原が 158 報、第 1 期の浦岡が 126 報、西澤が 121 報であった。また、CREST の研究成果の継続と発展に関しては、第 3 期の齊藤が 171 報で最も多く、次いで第 2 期の染谷の 155 報、同じく 2 期の北森が 135 報であった。一方、CREST の研究成果の継続と発展に関して、Top10%以内の論文数は、染谷が 54 報、また齊藤が 44 報と群を抜いて多い。

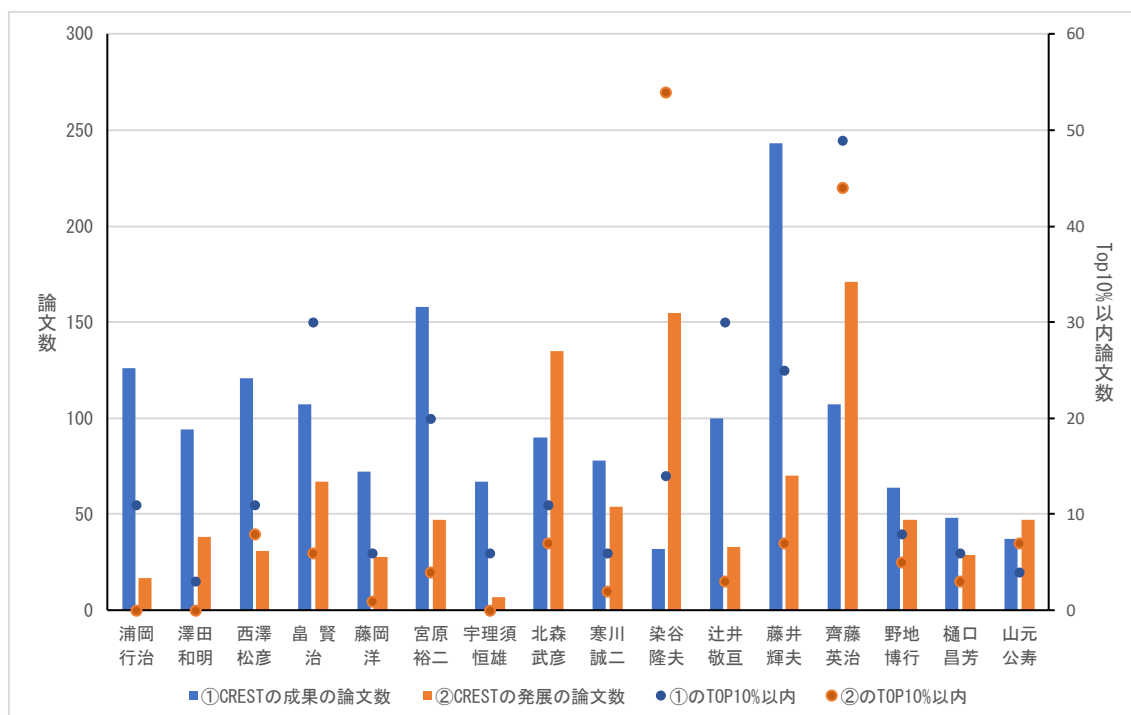


図 2-3 各研究代表者の研究領域期間中・終了後の論文数

また、本研究領域内での共著論文数は、研究期間中の CREST 研究成果の論文で 31 報、一方で研究終了後の CREST 研究成果の発展に関しては 2 報であった。寒川は山元、浦岡との共同研究を継続していることがわかる。

2.2.3 特許

特許は、基礎研究から産業への貢献を分析する指標となり、特許からさらに次の段階の研究が発展することから、研究活動の成果を評価する重要な指標である。

表 2-4 に研究代表者毎に特許の出願や登録数をまとめる。

表 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

期 (採択 年度)	研究代表者	研究期間中				研究終了後			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
		国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
第 1 期 (2008 年度)	浦岡 行治	16	8	7	3	3	0	0	0
	澤田 和明	19	12	10	7	7	5	4	2
	西澤 松彦	7	4	5	2	12	12	4	3
	畠 賢治	7	3	5	2	7	3	1	1
	藤岡 洋	5	4	3	2	4	2	1	0
	宮原 裕二	14	9	10	4	7	8	2	0
第 2 期 (2009 年 度)	宇理須 恒雄	5	4	4	4	1	0	0	0
	北森 武彦	4	1	2	1	8	6	3	1
	寒川 誠二	11	7	4	2	3	1	2	1
	染谷 隆夫	0	0	0	0	25	25	11	9
	辻井 敬亘	8	2	7	1	20	15	3	2
	藤井 輝夫	20	9	14	3	17	12	6	1
第 3 期 (2010 年 度)	齊藤 英治	9	8	8	4	10	4	1	0
	野地 博行	6	7	5	5	13	13	1	1
	樋口 昌芳	11	6	11	4	7	5	4	0
	山元 公寿	10	3	8	2	8	1	4	1
領域全体		145	81	97	44	152	112	47	22
重複		(7)	(6)	(6)	(2)				

- 1) PCT 出願、海外国への個別特許申請のいずれかがあれば、海外としてカウント。
- 2) 国内特許出願し PCT 出願あるいは直接 PCT 出願された場合は国内出願件数に含めてカウント。
- 3) 期間中の国内出願の重複は浦岡と藤井 4 報、西澤と畠 1 報、寒川と山元 1 報、辻井と澤田 1 報の 7 報。

2020 年 5 月 8 日調査
2020 年 11 月 28 日更新
2021 年 3 月 22 日確認

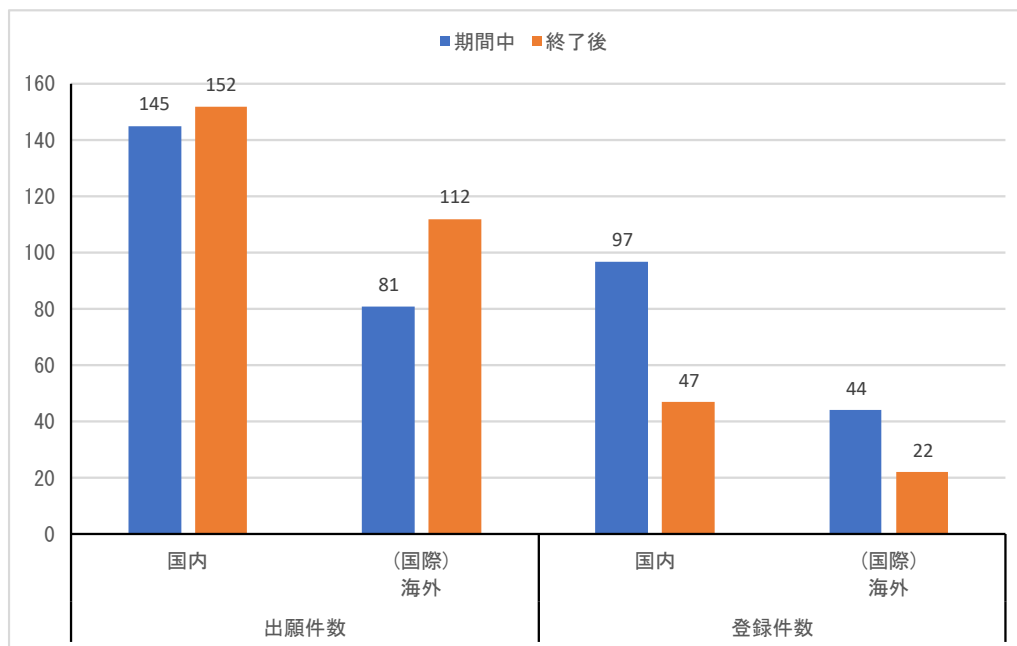


図 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

研究領域全体では、研究期間中の出願件数に比べて研究終了後の出願件数は、国内および海外ともに増加しており、特に海外出願数は 30 件ほど多くなっている。一方、登録件数は研究期間中に比べて研究終了後は、国内および海外ともに半減している。ただし、研究終了後の出願がこれから登録される場合もあると考えられる。

各研究代表者別では、研究期間中に最も多く出願かつ登録されているのは、第 2 期の藤井で、研究期間中に国内に 20 件、海外に 9 件出願し、それぞれ 14 件、3 件が登録され、終了後には国内に 17 件、海外に 12 件出願し、それぞれ 6 件、1 件が登録されている。研究終了後で出願、登録ともに最も多いのは第 2 期の染谷であり、国内に 25 件、海外に 25 件出願し、それぞれ 11 件、9 件が登録されている。なお染谷は期間途中で ERATO へ移行したためか期間中の出願はないが、他のすべての研究代表者は期間中に申請した特許の登録が進んでいる。

本研究領域では、全体として多くの出願がされ、審査が終了したと考えられる期間中の出願についての登録率は、国内で 67%、海外で 54%となっている。

2.2.4 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞が挙げられる。表 2-5 に研究終了後の研究代表者の受賞を示す。

本研究領域の研究代表者の多くは関連学会などの賞を受賞しているが、それ以外に文部科学省から、畠と野地が平成 28 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、齊藤が平成 29 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰、染谷が平成 31 年度文部科学大臣表彰をそれぞれ受賞し、内閣府から、畠が第 14 回産学官連携功労者表彰を受賞し、経済産業省から、染谷が

Innovative Technologies 2015 特別賞を受賞した。また、Highly Cited Researchers を齊藤が 4 回、染谷が 2 回受賞している。

表 2-5 研究終了後の受賞リスト

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
1	浦岡 行治	応用物理学会フェロー	公益社団法人応用物理学会	2016
2		Editorial Contribution Award	公益社団法人応用物理学会	2019
3		2021 SID Special Recognition award	Society for Information Display	2021
1	澤田 和明	ISPlasma2016/IC-PLANTS2016 Excellent Poster Presentation Award	The Japan Society of Applied Physics ISPlasma2016 / IC-PLANTS2016 Organizing Committee	2016
2		平成 30 年度電気学会 センサ・マイクロマシン部門総合研究会 優秀論文発表賞	一般社団法人電気学会	2018
3		第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム 五十嵐賞	一般社団法人電気学会	2018
4		電気学会優秀論文発表賞(IEEJ Excellent Presentation Award)	一般社団法人電気学会	2019
5		第 36 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (レドックス型非標識乳酸イメージセンサの製作と薬剤刺激による海馬からの乳酸放出のイメージング)	一般社団法人電気学会	2019
6		第 36 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム (シナプスレベルの活動観察に向けた 2 μm ピッチイオンイメージセンサの開発と 海馬スライス微小領域への応用)	一般社団法人電気学会	2019
7		2019 年度(第 37 回)永井科学技術財団 財団賞(技術賞)	公益財団法人永井科学技術財団	2020
1	西澤 松彦	平成 28 年度日本化学会 学術賞	公益社団法人日本化学会	2017
1	畠 賢治	平成 28 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰開発部門	文部科学省	2016
2		平成 28 年度全国発明表彰 21 世紀発明奨励賞	公益社団法人発明協会	2016
3		第 14 回 産学官連携功労者表彰 選考委員会特別賞	内閣府	2016
1	北森 武彦	Lund 大学名誉博士号	Lund University	2016
2		Simon-Widmer Award	Swiss Chemical Society	2017
3		IBM Faculty Award	IBM 社	2017
4		玉山学者	台湾教育部(文科省)	2019
5		化学とマイクロ・ナノシステム学会賞	一般社団法人化学とマイクロ・ナノシステム学会	2019

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
6		第 71 回日本化学会賞	公益社団法人日本化学会	2019
1	寒川 誠二	IEEE Fellow Award	IEEE	2018
2		IEEE Distinguished Lecturers	IEEE	2019
1	染谷 隆夫	ナノテク大賞(プロジェクト部門)	nano tech 実行委員会	2013
2		第 46 回 市村学術賞 功績賞	公益財団法人市村清新技術財団	2014
3		Highly Cited Researchers(高被引用論文著者)	トムソン・ロイター社	2014
4		Innovative Technologies 2015 特別賞	経済産業省	2015
5		第 4 回立石賞功績賞	公益財団法人立石科学技術振興財団	2016
6		Highly Cited Researchers	Clarivate Analytics 社	2019
7		平成 30 年度中谷賞大賞	公益財団法人中谷医工計測技術振興財団	2019
8		平成 31 年度 文部科学大臣表彰(科学技術賞 研究部門)	文部科学省	2019
9		2019 年(第 89 回)服部報公会「報公賞」	公益財団法人服部報公会	2019
10		第 16 回江崎玲於奈賞	一般財団法人茨城県科学技術振興財団	2019
1	齊藤 英治	平成 27 年度 日本磁気学会出版賞	公益社団法人日本磁気学会	2015
2		Highly Cited Researchers2017	Clarivate Analytics 社	2017
3		第 14 回本多フロンティア賞	公益財団法人本多記念会	2017
4		平成 29 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2017
5		IEEE(magnetism)	Distinguished Lecturer	2017
6		Highly Cited Researchers2018	Clarivate Analytics 社	2018
7		第 34 回(2017 年度)井上学術賞	公益財団法人井上科学振興財団	2018
8		Highly Cited Researchers2019	Clarivate Analytics 社	2019
9		Highly Cited Researchers2020	Clarivate Analytics 社	2020
1	野地 博行	読売テクノフォーラム第 21 回ゴールド・メダル賞	読売新聞	2015
2		平成 28 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2016
3		中谷大賞	公益財団法人中谷医工計測技術振興財団	2016
1	樋口 昌芳	SAT テクノロジーショーケース 2017 ベスト産業実用化賞	一般財団法人つくばサイエンスアカデミー	2017
2		茨城テックブラングランプリ ファイナリスト ユードム賞 オーディエンス賞	株式会社リバネス	2019
3		Startup Acceleration Tsukuba, Audience Award 2019	つくば市	2019

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
4		SAT テクノロジーショーケース 2019 ベスト・アイデア賞	一般財団法人つくばサイエンスアカデミー	2019
1	山元 公寿	2019 年度高分子学会賞	公益社団法人高分子学会	2019

2.2.5 招待講演

研究代表者の研究成果を、国際学会における招待講演として発表した件数が、研究終了後、合計 358 件に上った。特に、染谷が 99 件と多い。デバイス関係で主要な IEDM、ISSCC、IEEE や材料関係の MRS などからの招待講演はフレキシブル電子デバイスにおける染谷の研究成果についての国際的な注目度がうかがえる。次いで、齊藤が 52 件、北森が 47 件と招待講演が多い。齊藤は、基調講演が 5 件ありスピン流の先駆的研究が国際的に注目されていることがうかがえる。北森は、中国の大学や研究機関でのレクチャーシップ(招聘講演会)が 6 件あり、拡張ナノ流体デバイスへの展開が注目されていると思われる。

また、国内関係の招待講演は合計 172 件であり、国内でも染谷が 60 件と多い。エレクトロニクス、有機、高分子、バイオ、ディスプレイなど学会や産業界など様々な分野からの招待講演があり、幅広い応用が期待されていることを示している。次いで、澤田が 30 件、野地が 23 件と続く。澤田は地域の産業創出や「ものづくり」に関連する招待講演が 8 件あり、産業界からの期待が大きいことがうかがえる。野地は、人工細胞リアクタや 1 分子分析などについて産業界や医療からの招待講演 5 件あり、ImPACT での成果展開も含めて期待度を表していると思われる。

2.2.6 報道

研究終了後に報道機関から報じられた件数は、総数が 954 件に上った。研究代表者別では、染谷が 462 件で最も多く突出している。これは領域全体の半数近くにもおよぶ報道件数であり、特筆すべき報道件数と言える。フレキシブル電子デバイスの研究成果の応用範囲が広く身近なものであることから社会的にも注目されていることを示している。次いで、齊藤が 92 件と多く、スピン流という基礎的な現象から新原理を発見し、それを新機能デバイスへ展開していることが注目されている。澤田も 52 件と多く、ユニークな「かおりカメラ」を開発・製品化したことが注目されている。

2.2.7 共同研究や企業との連携

浦岡は、味の素(株)と太陽電池に関する共同研究を、また(株)デンソーとは熱電素子の共同研究を発展させた。

澤田は、国内 18 企業および米国ベンチャー企業と共同研究を行った。特に、自身が開発した半導体イメージセンサを活用して、愛知県内外の企業 4 社(東朋テクノロジー(株)、(株)アロマビット、浜松ホトニクス(株)、日本ケミコン(株))が設立したコンソーシアムである「CMOS Odor Sensor Consortium(COSCo(コスコ))」が「かおり」を可視化する技術を開発した。半導体イメージセンサ上に特殊な検出膜を塗布することで、「かおり」が吸着するこ

とによる電気信号の変化をとらえる技術の開発に成功し、かおりをパターン化して記録・表示できる「かおりカメラ」を実現した。COSCo は、澤田が推進した半導体イメージセンサの成果普及を目指す(一社)豊橋センサ協議会の呼びかけにより結成されたコンソーシアムである。

西澤は、国内 2 企業と共同研究を実施した。サンアロー(株)²とはバイオ発電パッチ「BIPP®」(Bio Iontophoresis Patch)を開発している。また(株)ユニークメディカルとは、ゲル製頭蓋内電極およびゲル製培養チャンバー³を開発した。

畠は、耐熱 0 リングについては、CNT 複合材料研究拠点からサンプル提供を開始し、2018 年 10 月から技術移管先企業であるサンアロー(株)より販売を開始した。民間企業に対し、歪みセンサの研究試料提供を行った。

藤岡は、パルススパッタ堆積法の実用化に向けて、数社の国内企業と共同研究および技術供与を実施した。

宮原は ImPACT でパナソニック(株)と共同研究を行った。また、SIP で(株)東芝と共同研究を行って、検出システムのガス透過膜の最適化を行い、情報を(株)東芝に移管した。その他、4 社との共同研究を進めている。

宇理須はエイブリック(株)と培養型プレーナーパッチクランプの増幅器について、共同で計算機シミュレーションを開始した。

北森は、(株)日立ハイテクノロジーズ、(株)ダイセル、(株)ダイキン、日本 IBM(株)とマイクロ・拡張ナノ流体デバイス関連技術開発で共同研究している。

寒川は長瀬産業(株)、リソテック(株)、SPP テクノロジーズ(株)とライセンス契約をした。また、石英ナノピラーの評価のため試作品を日産自動車(株)に提供し、石英ナノピラー超撥水性機能を長瀬産業(株)で実用化予定である。

染谷は指紋・静脈・脈波の同時計測を(株)ジャパンディスプレイとの共同研究により実現した。同社には有機半導体に関する技術を提供した。その他の民間企業にも、有機半導体を用いた電子デバイスの作成技術などについて成果物を提供した。

辻井は、ACCEL において民間企業 6 社との共同研究を実施した。

藤井は民間企業 4 社と 1 細胞解析デバイス、CTC 分離システムの確立を目指して共同研究を進めている。

齊藤は日本電気(株)、(株)アルバック、日産自動車(株)などと共同研究している。また、日本電気(株)へ技術移転し、2018 年に、小さな温度差でも電力を発生するスピン流熱電変換素子が開発された。

樋口は、民間企業 10 社以上と共同研究を実施し、実施許諾、技術移転を行った。

山元は民間企業 1 社と、金属単一元素および異種金属との合金による新機能の検証等について共同研究している。

²

<http://www.sunarrow.co.jp/info/%E6%9D%B1%E5%8C%97%E5%A4%A7%E5%AD%A6%E3%81%A8%E5%85%B1%E5%90%8C%E7%A0%94%E7%A9%B6%E3%81%97%E3%81%9F%E3%80%8E%E3%83%90%E3%82%A4%E3%82%AA%E7%99%BA%E9%9B%BB%E3%82%B9%E3%82%AD%E3%83%B3%E3%83%91%E3%83%83/>

³ https://www.t-technoarch.co.jp/content/licence_T09-194.html

2.2.8 実用化・製品化

澤田の超高感度シリコン CMOS 型イオンイメージングセンサ技術を基盤として(株)アロマビットは、6×3mm のシリコンチップ上に 80 素子(ニオイ感応膜 5 膜種類×1、膜種あたり 16 素子)を配したシリコン CMOS 型センサモジュール開発キットを 2021 年 1 月より製品化し、(株)アロマビット子会社の(株)アロマビットシリコンセンサテクノロジー⁴が販売している。

西澤は、(株)ユニークメディカルでゲル製培養チャンバーを製品化済みであり、ゲル頭蓋内電極は 2 年後に製品化予定である。また、サンアロー(株)でバイオ発電パッチ (BIPP®) をサンプル試供中である。

宮原は、トランジスタと一塩基伸長反応を組み合わせた DNA 塩基配列解析技術の特許を米国 Ion Torrent 社(現 Thermo Fisher Scientific 社)へ実施許諾し、2014 年 9 月に遺伝子解析システム「イオントレント(Ion Torrent) Ion PGM Dx」として製品化した⁵。

北森は、エピジェネティクス分析装置、微分干渉熱レンズ顕微鏡などを製品化している。

辻井は高性能摺動システムについて、産学連携コンソーシアムならびに 2019 年度採択の A-STEP 産学共同フェーズ(シーズ育成タイプ FS)で実用化検討中である。

藤井は、神経オルガノイドを用いたスクリーニングを実施許諾および技術移転しているベンチャー企業の(株)Jiksak Bioengineering でサービスを開始している。

野地は ImPACT プログラムマネージャーとして、アボットジャパン(株)(超高感度デジタル ELISA 計測システム)、凸版印刷(株)(遺伝子検査キット)、プレジジョン・システム・サイエンス(株)(全自動デジタル ELISA 装置)の実用化開発を推進した。また、デジタルインフルエンザウイルス計測法の実用化研究が、JST の START 事業に採択されたのに伴い、東京大学エッジキャピタル(UTEC)の支援を受け、ベンチャーの設立を目指している。

樋口は、(株)東京化成工業より 2020 年 6 月から鉄を含むメタロ超分子ポリマーの一般販売を開始した。また実証実験用にエレクトロクロミック調光ガラスを、つくば市の施設の窓に 2020 年 8 月納入している。

2.2.9 ベンチャー

澤田は市場開拓とベンチャー企業への普及をねらいとして、2016 年 9 月に一般社団法人豊橋センサ協議会を設立した。自身が研究開発したイオンイメージセンサの多面的な応用により、医療・化学・バイオ産業等の分野における実用化・事業化を目指すとともに、製品の規格や仕様を統一し標準化の推進を行い、イオンイメージセンサシステムの普及・発展を促進している。ここでは企業コンソーシアムを組織し、イオンイメージセンサを応用した「かおりカメラ」を発表した。さらにこの「かおりカメラ」の技術をもとに、(株)アロマビットシリコンセンサテクノロジー(資本金 1000 万円)を設立した。豊橋技術科学大学の大学発ベンチャー第 1 号として認定されその称号が授与された。同社は、超小型、低コスト、

⁴ <https://www.aromabitsst.com/>
<http://www.aromabit.com/category/news/>

⁵ <https://xtech.nikkei.com/dm/article/NEWS/20141128/391444/>

高ニオイ解像度を実現するシリコン CMOS 型次世代ニオイセンサを開発・事業化する(株)アロマビットの子会社である。澤田が開発した超高感度シリコン CMOS 型イオンイメージングセンサの基盤技術に(株)アロマビットが開発したニオイ受容体膜を応用することで、超小型、高ニオイ解像度なシリコン CMOS 型次世代ニオイセンサの開発に成功している。

宇理須は、2020 年 2 月に(株)NANORUS(ナノルス)⁶を設立した。自身は代表取締役会長に就任している。同社は培養型プレーナーパッチクランプ装置の実用化を目指して、岡崎市商工会議所の応援と、クラウドファンディングにより研究開発資金を得て設立された。筋萎縮性側索硬化症(ALS)の解明を目指して、2020 年に研究所が完成し 5 年後までに、本研究課題および 2014 年度採択の CREST⁷での成果をもとにイオンチャンネル電流計測と単一細胞解析の同時計測細胞点数を 16 に増やした装置を開発する予定である。

北森は、2001 年 5 月に東京大学と(財)神奈川科学技術アカデミー(現 地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所)発のベンチャー企業としてマイクロ化学チップ、その周辺機器及びシステム機器の製造・販売を行うマイクロ化学技研(株)⁸をすでに設立しており、自身も最高技術顧問に就任している。本研究課題の成果である拡張ナノ流体デバイスの実用化のため、同社は 2019 年 6 月から新たな拠点へ移動し、超微細なデバイスを作製するためのクリーンルーム、電子線描画装置、各種のプラズマドライエッチング装置など国内では数少ない拡張ナノデバイスの加工を行える設備を導入した。本研究領域の成果を基に、研究開発向けに拡張ナノ流体デバイスの試作品の提供を開始した。また、エピジェネティクス分析装置、微分干渉熱レンズ顕微鏡なども製品化している。

染谷は本研究課題とその研究発展である JST ERATO「染谷生体調和エレクトロニクス」プロジェクトの成果をもとに、2015 年 11 月に(株)Xenoma⁹を設立した。同社は東京大学・ERATO にて伸縮性エレクトロニクス開発を行い、スピンオフ起業し、同 ERATO のメンバーであった網盛一郎が代表取締役 CEO に就任している。一般的な布上に電気配線やセンサを形成し、自由に変形・伸縮可能な世界初の布状電子回路基板「Printed Circuit Fabric(PCF)」を開発した。そして、スポーツウェアなど高い柔軟性が求められる領域にも適用可能な引張耐久性と、100 回の洗濯にも耐えうる配線の絶縁性を持った布「e-skin®」の製造・販売をしている。この「e-skin®」を使うことで、普段の服と同じ感覚で着用可能な IoT の洋服(スマート

⁶ <https://www.big-advance.site/s/127/1580/company>

⁷ CREST 研究領域[統合 1 細胞解析のための革新的技術基盤](研究総括：菅野純夫)「多チャンネルプレーナ技術による生体組織分子解析とその神経疾患応用(研究代表者 高村禪)」(2014 年度～2019 年度)

⁸ <https://www.imt.co.jp/news/%e6%8b%a1%e5%bc%b5%e3%83%8a%e3%83%8e%e6%b5%81%e4%bd%93%e3%83%87%e3%83%90%e3%82%a4%e3%82%b9%e5%ae%9f%e7%94%a8%e5%8c%96%e3%81%b8%e8%a3%bd%e9%80%a0%e5%b7%a5%e6%b3%95%e3%81%a%e6%8a%80%e8%a1%93%e7%a0%94/>
<https://www.dreamnews.jp/press/0000195692/>

⁹ <https://www.utokyo-ipc.co.jp/2017/09/xenoma/>
<https://xenoma.com/>
<https://career-scope.jp/user/company/view/3>
<https://www.toyoshima.co.jp/news/detail/141>
<https://loanddeal.jp/list/6419>
<https://kigyolog.com/company.php?id=63>

アパレル)が実現し、着ている人の動きや体温、心拍等を遠隔から取得・モニタリングすることが可能となった。具体的な用途としては、高齢者・乳幼児の見守り、現場作業員の動作解析、プロアスリートのフォーム分析、ゲーム機コントローラなどを想定している。将来的には人の生体情報ビッグデータから予防医療や安心・安全な社会の実現に貢献することを目指している。

さらに、染谷は自身の提唱するスキんエレクトロニクスに関連技術を発展させるために、2018年11月にパラマウントベッド(株)と共同で、最先端のセンサ技術を活用した機器の開発・販売および情報サービスを提供する合弁会社サイントル(株)¹⁰(資本金 1000 万円)を設立した。同社では、生体情報を活用した見守りソリューションビジネスを実施予定である。

藤井は、自身の研究成果をもとに ALS などの発症の仕組みや治療の研究に役立つ新技術を活用した創薬事業を目指して、研究チームに参加した川田治良を代表取締役として 2017年2月に(株)Jiksak Bioengineering¹¹を設立した。生体内の運動神経組織に似た束状の形態を持つ神経オルガノイドの形成技術により ALS 疾患の原因遺伝子を特定するスクリーニングサービスを提供している。

2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

2.3.1 研究領域の展開状況(展開図)

本研究領域では、2008年から2010年にかけて合計16件の研究課題を採択し、途中で1課題がERATOへの移行のために終了したが、15件の研究課題は「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」という戦略目標の下で研究を遂行した。展開と発展の展開図として図2-5に示した。

戦略目標を実現するための達成目標は、次のように大別される。

- ・バイオとエレクトロニクスを融合したナノシステムの確立(浦岡、澤田、宮原、宇理須、野地)
- ・フレキシブル基板とエレクトロニクス・フォトリソグラフィ・エネルギーデバイスを融合したナノシステムの確立(西澤、畠、藤岡、染谷、樋口)
- ・ナノ構造による化学反応場を利用したナノシステムの確立(辻井、山元)
- ・ナノ構造における生体反応を利用したナノシステムの確立(北森、寒川、藤井)
- ・次世代ナノシステムの創製を目指す新たな研究分野の確立(齊藤)

以下、それぞれの研究代表者の展開状況と今後の展開および波及効果をまとめる。

浦岡は、バイオナノプロセスを活用して、高変換効率の色素増感型およびペロブスカイト型太陽電池や高感度ガスセンサを開発した。今後の展開は、生体超分子を活用した不揮発メモリ、太陽電池等の高性能化が予想され、今後の波及効果として、生体超分子を活用した不

¹⁰ <https://www.signtle.com/news/news002.html><https://hokensangyojiho.com/news/corporate-activities/811.html>

¹¹ <https://www.jiksak.co.jp/japanese>
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ022749230W7A021C1000000/>

揮発メモリ、太陽電池等の製品化が想定される。澤田は、A-STEP で CMOS センサ技術と MEMS 技術を融合した高精細イオンイメージセンサ開発を進め、高解像度・高速動作イオンセンサアレイを開発した。今後の展開は、細胞内のイオン動態など生体现象観察の実現が予想され、今後の波及効果として、生体関連物質の動きをリアルタイムで画像化する細胞レベルでの医療用診断システムの構築が想定される。宮原は、SIP で超高感度センサシステムの研究開発を行うとともに、血糖値変化に対応してインスリン放出制御を行うインスリン投与デバイスを開発した。今後の展開は、細胞の自己組織化を利用した電子細胞集積回路の開発が予想され、今後の波及効果として、インフルエンザ等の高感度セルフチェックの実用化が想定される。宇理須は、高品質イオンチャンネル電流の計測に成功し、4 個の細胞を同時計測可能な培養型プレーナーパッチクランプ装置のプロトタイプ機を製作した。今後の展開は、ES 細胞や iPS 細胞から誘導したヒト神経細胞ネットワークの確立が予想され、今後の波及効果として、神経難病に対する疾患モデルの構築とスクリーニング法の開発が想定される。野地は、ImPACT で超高感度デジタル ELISA 計測システムの事業化を進めるとともに、環状 DNA、長鎖 DNA のマイクロアレイチャンバー内増幅等の人工細胞リアクタ基盤技術を確立した。今後の展開は、1 分子デジタル ELISA の実用化が予想され、今後の波及効果として、感染症や疾病マーカー臨床検査の迅速化、高精度化が想定される。

また、西澤は、AMED、A-STEP でオール有機物により生体親和性を有する頭蓋内電極を開発するとともに、薬剤浸透をマイクロ電流で促進するバイオ発電スキンパッチを開発した。今後の展開は、生体反応計測や創薬に有効な抗体チップ、血球診断チップの開発が予想され、今後の波及効果として、生体に電気回路システムを埋め込み可能にする技術の開発が想定される。畠は、CNT シートを用いた柔軟で丈夫なトランジスタ、集積化マイクロキャパシタ、耐熱 0 リングおよび電磁波遮蔽コーキング材を開発した。今後の展開は、自由に張り付けて使用する電子機器の開発が予想され、今後の波及効果として、身の回りの柔軟でロバストな CNT デバイス、システムの実現が想定される。藤岡は、ACCEL、A-STEP で低温・低コストなパルススパッタ堆積法によるグラフェン上 GaN 結晶成長の実現および金属基板上 GaN LED の作製を実現した。今後の展開は、グラファイト上でのヘテロ接合 FET、LED、太陽電池の高効率化が予想され、今後の波及効果として、大面積、高放熱、安価な LED、パワー FET、太陽電池の開発が想定される。染谷は、ERATO で生体認証とバイタルサイン計測を同時に行えるセンサを開発した。今後の展開は、有機トランジスタ回路の応用拡大が予想され、今後の波及効果として、有機エレクトロニクスの実用展開が想定される。樋口は、CREST で耐熱性を有するエレクトロクロミックデバイスを開発するとともに、メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミックデバイスが蓄電機能を有することを発見して高エネルギー密度の電池機能を実現した。今後の展開は、書換可能なカラー電子ペーパーやメタロ超分子ポリマーによる湿度センサ、ガスセンサの開発が予想され、今後の波及効果として、メタロ超分子ポリマーによる多彩なエレクトロクロミック表示素子応用が想定される。

さらに、辻井は、ACCEL、A-STEP で、濃厚ポリマーブラシのトライボロジー材料・システム基礎理論を確立するとともに、機械摺動部をはじめ燃料電池、バイオ・医療へ応用展開した。今後の展開は、濃厚ポリマーブラシの応用拡大が予想され、今後の波及効果として、濃

厚ポリマーブラシ応用製品の効率向上および高性能化が想定される。山元は、ERATO で原子数を制御可能な金属原子クラスター形成方法によるサブナノ粒子高機能触媒を創製するとともに、高次ナノ物質の周期律を発見した。今後の展開は、金属単一元素ナノ粒子および異種金属との合金ナノ粒子による新機能の検証が予想され、今後の波及効果として、ナノ粒子触媒による化学反応効率の飛躍的向上が想定される。

また、北森は、CREST でナノ流体デバイス作製技術とナノ流体工学基盤を確立するとともに、単一細胞分析技術およびフェムトリットル液体クロマトグラフィを開発した。今後の展開は、単一細胞分析可能な拡張ナノ流体デバイスの開発が予想され、今後の波及効果として、クロマトグラフィ分離性能の向上による分析時間の短縮が想定される。寒川は、A-STEP でバイオテンプレートと低損傷中性ビームによる量子ナノ円盤構造作製技術を量子ドット太陽電池、LED および超撥水へ応用展開した。今後の展開は、量子ドットデバイスの効率向上が予想され、今後の波及効果として、量子ドットデバイスによる電力削減や工業製品の表面撥水性制御が想定される。藤井は、AMED で微小流路構造を用いた運動神経オルガノイド形成技術および液体生検が可能な血中循環腫瘍細胞(CTC)分離システムを開発した。今後の展開は、細胞から3次元的な組織の構築が予想され、今後の波及効果として、ガン細胞転移活性評価や再生医療への応用が想定される。

さらに、齊藤は、ERATO で電子スピンと力学運動や熱を相互作用させる基本現象として、量子スピンゼーベック効果、反強磁性転移によるスピンゼーベック異常およびスピンゼーベック効果の力学的逆効果を発見した。今後の展開は、各種スピン流効果を利用したデバイスの開発や電子スピンの成果をもとに核スピンの制御への発展が予想され、今後の波及効果として、スピンを利用した論理素子、記憶素子、測定素子等による高速化、消費エネルギー大幅低減が想定される。

戦略目標、達成目標	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム (short/mid-term)		アウトカム (long-term) /インパクト													
			～追跡調査時点	今後予想される展開	今後想定される波及効果													
<p>戦略目標： 「プロセスインテグレーションによる次世代ナノシステムの創製」 ナノテクノロジーを活用したプロセスの高度化と統合化を進め、トップダウンプロセスと、ボトムアッププロセス高度化を一層推進するとともに、それらプロセス技術の様々な組み合わせによって、バイオとエレクトロニクスが融合したナノシステム、ナノ構造による化学反応場を利用したシステム、フレキシブル基板と電子デバイスを融合したナノシステムなど次世代ナノシステムの創製を目指す。</p> <p>達成目標： (1)バイオとエレクトロニクスを融合したナノシステムの確立 (2)フレキシブル基板とエレクトロニクス・フォトリソグラフィ・エネルギーデバイスを融合したナノシステムの確立 (3)ナノ構造による化学反応場を利用したナノシステムの確立 (4)ナノ構造における生体反応を利用したナノシステムの確立 (5)次世代ナノシステムの創製を目指す新たな研究分野の確立</p>	<p>研究総括： 曾根 純一</p> <p>研究代表者 浦岡 行治 澤田 和明 西澤 松彦 畠 賢治 藤岡 洋 宮原 裕二 宇理須 恒雄 北森 武彦 寒川 誠二 染谷 隆夫 辻井 敬巨 藤井 輝夫 齊藤 英治 野地 博行 樋口 昌芳 山元 公寿</p> <p>16名</p>	<p>研究成果</p> <p>論文</p> <table border="1"> <tr> <td>①CREST研究成果の論文数</td> <td>②CREST研究成果の継続発展の論文数</td> </tr> <tr> <td>1513(237)</td> <td>974 (151)</td> </tr> </table> <p>()の値はTop10%以内論文数</p> <p>特許申請・登録</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>期間中</th> <th>終了後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>出願</td> <td>国内 145 国際 81</td> <td>152 112</td> </tr> <tr> <td>登録</td> <td>国内 97 国際 44</td> <td>47 22</td> </tr> </tbody> </table> <p>領域内共同研究</p> <p>「CNTを電極とするバイオ電池の開発」(西澤チーム/畠チーム) など計17件</p> <p>製品・サービス</p> <ul style="list-style-type: none"> 電気検出方式DNAシーケンサ (宮原、米国Life Technologies) ハイドロゲル刺激培養皿 (西澤、(株)ユニークメディカル) 耐熱リング (畠、サンアロー(株)) 鉄を含むメタロ超分子ポリマー (樋口、(株)東京化成工業) エビジェネティクス分析装置、微分干渉熱レンズ顕微鏡 (北森、マイクロ化学技研(株)) 神経疾患モデルスクリーニング (藤井、(株) Jiksak Bioengineering) <p>ベンチャー設立</p> <ul style="list-style-type: none"> (株)アロマビットシリコンセンサテクノロジー(澤田、イオンイメージセンサ) (株)NANORUS(宇理須、培養型プレーナーパッチクランプ装置) (株)Xenoma(染谷、IoT衣服) サイントル(株)(染谷、センサ技術活用機器) 	①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数	1513(237)	974 (151)		期間中	終了後	出願	国内 145 国際 81	152 112	登録	国内 97 国際 44	47 22	<p>科学技術的および社会・経済的な波及効果</p> <p>・バイオナノプロセスによる極微細メモリ、高変換効率太陽電池、高感度ガスセンサなど高性能半導体デバイスの基本動作の実証 ・イオンイメージセンサによる神経伝達物質の動的観察の実現、およびpHと圧力の同時計測可能なセンサの開発 ・生体分子/機能性材料/半導体からなる複合ゲート構造による新規DNAシーケンシング、ヒトインフルエンザウイルス検出、がんマーカー高感度検出等の技術開発およびインスリン投与デバイスの開発 ・培養型プレーナーパッチクランプ技術による高品質イオンチャンネル電流計測 ・環状DNA、長鎖DNAのマイクロアレイチャンバー内増幅および長鎖DNA合成等の人工細胞リアクタ基盤技術確立</p> <p>・ハイドロゲル電極による生体親和性の頭蓋内電極、バイオ発電スキムパッチ、筋肉細胞だけを刺激できる筋肉-電極ワイヤの開発 ・CNTシートを用いた柔軟で丈夫なトランジスタ、集積化マイクロキャパシタ、耐熱リング、電磁波遮蔽コーキング材の開発 ・低温・低コストなパルスパッチ堆積法によるグラフェン上GaIn結晶成長の実現および金属基板上GaIn LEDの作製 ・プラスチックフィルム上有機トランジスタ回路の大気中安定動作実現と、指紋・静脈・脈波の同時計測可能なイメージセンサの開発 ・メタロ超分子ポリマーによる黒色を含むマルチカラー表示素子、耐熱性/蓄電機能を有するエレクトロクロミックデバイスの開発</p> <p>・濃厚ポリマーブラシのトライボロジー材料・システム基礎理論確立と応用展開 → 機械摺動部、燃料電池、バイオ・医療 ・原子数を制御可能な金属原子クラスター形成方法によるサブナノ粒子高機能触媒の創製と高次ナノ物質の周期律の発見</p> <p>・ナノ流体デバイス作製技術とナノ流体工学基盤の確立および単一細胞分析技術、フェムトリットル液体クロマトグラフィーの開発 ・微小管路構造を用いた運動神経オルガノイド形成技術の開発 ・バイオテンプレートと低損傷中性ビームによる量子ナノ円盤構造作製技術の量子ドット太陽電池、LEDおよび超撥水への応用</p> <p>・電子スピンと力学運動や熱を相互作用させる基本現象として、量子スピンゼーベック効果、反強磁性転移によるスピンゼーベック異常およびスピンゼーベック効果の力学的逆効果の発見</p> <p>展開</p> <p>A-STEP 6件、CREST 5件、ERATO 3件、ACCEL 3件、SIP 4件、AMED 3件、ImPACT 2件、SICORP 1件、科研費21件 など計55件</p> <p>受賞</p> <p>計 11名、計 49件</p>	<p>今後予想される展開</p> <p>・生体超分子を活用した不揮発メモリ、太陽電池等の高性能化 ・細胞内のイオン動態など生体現象観察の実現 ・細胞の自己組織化を利用した電子細胞集積回路の開発 ・ES細胞やiPS細胞から誘導したヒト神経細胞ネットワークの確立 ・1分子デジタルELISAの実用化</p> <p>・生体反応計測や創薬に有効な抗体チップ、血球診断チップの開発 ・自由に張り付けて使用する電子機器の開発 ・グラファイト上でのヘテロ接合FET、LED、太陽電池の高効率化 ・有機トランジスタ回路の応用拡大 ・書換可能なカラー電子ペーパー ・メタロ超分子ポリマーによる湿度センサ、ガスセンサの開発</p> <p>・濃厚ポリマーブラシの応用拡大 ・金属単一元素ナノ粒子および異種金属との合金ナノ粒子による新機能の検証</p> <p>・単一細胞分析可能な拡張ナノ流体デバイスの開発 ・細胞から3次元的な組織の構築 ・量子ドットデバイスの効率向上</p> <p>・各種スピン流効果を利用したデバイスの開発 ・電子スピンの成果をもとに核スピンの制御への発展</p>	<p>今後想定される波及効果</p> <p>スマートでエコロジカルな社会実現へのデバイス・材料革新、健康・医療問題解決ヘラライフイノベーション、および独自の手法によるナノ構造体の創出と新応用分野の開拓</p> <p>・生体超分子を活用した不揮発メモリ、太陽電池等の製品化 ・生体関連物質の動きをリアルタイムで画像化する細胞レベルでの医療診断システムの構築 ・インフルエンザ等の高感度セルフチェックの実用化 ・神経難病に対する疾患モデルの構築とスクリーニング法の開発 ・感染症や疾病マーカー臨床検査の迅速化、高精度化</p> <p>・生体に電気回路システムを埋め込み可能にする技術の開発 ・身の回りの柔軟でロバストなCNTデバイス、システムの実現 ・大面積、高放熱、安価なLED、パワー-FET、太陽電池の開発 ・有機エレクトロニクスの応用展開 ・メタロ超分子ポリマーによる多彩なエレクトロクロミック表示素子応用</p> <p>・濃厚ポリマーブラシ応用製品の効率向上および高性能化 ・ナノ粒子触媒による化学反応効率の飛躍的向上</p> <p>・クロマトグラフィ分離性能の向上による分析時間の短縮 ・ガン細胞転移活性評価や再生医療への応用 ・量子ドットデバイスによる電力削減 ・工業製品の表面撥水性制御</p> <p>・スピンを利用した論理素子、記憶素子、測定素子等による高速化、消費エネルギー大幅低減</p>
①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数																	
1513(237)	974 (151)																	
	期間中	終了後																
出願	国内 145 国際 81	152 112																
登録	国内 97 国際 44	47 22																

図 2-5 CREST 研究領域の展開図

2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

以下に、研究成果の科学技術の進歩への貢献について幾つかの事例を示す。

染谷は、生体の炎症反応が極めて小さな導電性のゲル素材を用いた柔軟な有機増幅回路シートおよび生体認証とバイタルサイン計測を同時に行えるセンサ等を開発して、人間と機械を調和する伸縮性エレクトロニクスすなわちスキンエレクトロニクスの発展に寄与した。

澤田は、CMOS センサ技術と MEMS 技術を融合した高精細イオンイメージセンサ開発を進め、高解像度・高速動作イオンセンサアレイ、複数種類の神経伝達物質の分布を取得するイメージセンサおよびマウスの脳内 pH のリアルタイム観察可能な生体刺入型イオンイメージセンサを開発して、生体内の情報伝達解明に大きく貢献した。

山元は、原子数を制御可能な金属原子クラスター形成方法によるサブナノ粒子高機能触媒を創製するとともに、理論モデルにより、複数の原子からなる高次の物質の間にも、族、周期、類、種の四つの次元を有する周期律が存在することを発見し、触媒活性や光学特性、磁性などを持つ高機能なサブナノ粒子を予測し合成するのに役立つ「ナノ物質の周期表」として表すことに初めて成功した。

齊藤は、電子スピンと力学運動や熱を相互作用させる基本現象として、量子スピンゼーベック効果、反強磁性転移によるスピンゼーベック異常およびスピンゼーベック効果の力学的逆効果を発見して、スピン流 - 熱流相互変換の物理を体系的にまとめ上げると共に、熱スピン効果に基づくスピントロニクスの新たな応用展開を推進した。

2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

本研究領域開始時また期間中を含め、世界的に健康・医療・高齢化問題が注目を集めていてライフイノベーションへの期待が高まっていたことから、脳・バイオに関する研究を行う研究代表者が7名と多かった。また、生体測定やウェアラブルデバイスへの応用をめざしてフレキシブル基板上にエレクトロニクス・フォトニクス・エネルギーデバイスを融合する研究を行う研究代表者も5名と多かった。

澤田は、CMOS センサ技術と MEMS 技術を融合した高精細イオンイメージセンサ開発を進め、高解像度・高速動作イオンセンサアレイを開発するとともに、一般社団法人豊橋センサ協議会を設立してイオンイメージセンサの多面的な応用により、医療・化学・バイオ産業等の分野における実用化・事業化を目指している。さらに、大学発ベンチャーとして(株)アロマビットシリコンセンサテクノロジーを設立して、超小型、低コスト、高ニオイ解像度を実現するシリコン CMOS 型次世代ニオイセンサの開発・事業化を進めている。

野地は、超高感度デジタル ELISA 計測システムの事業化を進めるとともに、環状 DNA、長鎖 DNA のマイクロアレイチャンバー内増幅等の人工細胞リアクタ基盤技術を確立した。

染谷は、(株)Xenoma を設立し、一般的な布の上に電気配線やセンサを形成する伸縮性エレクトロニクスにより、高い柔軟性、引張耐久性、絶縁性を持った布の製造・販売を行っている。この布を使えば、普段の服と同じ感覚で着用可能な IoT の洋服(スマートアパレル)が実現し、着ている人の動きや体温、心拍等を遠隔から取得・モニタリングすることが可能と

なり、高齢者・乳幼児の見守り、現場作業員の動作解析、プロアスリートのフォーム分析、ゲーム機コントローラなどに応用でき、将来的には人の生体情報ビッグデータから予防医療や安心・安全な社会の実現に貢献できる。

藤岡は、低温・低コストなパルススパッタ堆積法によるグラフェン上 GaN 結晶成長の実現および金属基板上 GaN LED の作製を実現し、安価なガラス基板上に 500℃以下の低温で LED を作成する技術を開発した。しかも、これまで窒化物半導体の LED では困難とされていた赤色の発光も可能とし、青色と緑色を加えた RGB フルカラーLED を開発した。

辻井は、濃厚ポリマーブラシのトライボロジー材料・システム基礎理論を確立するとともに、低摩擦/高潤滑性と強靱/耐久性を両立する機械摺動部をはじめイオン伝導性を向上させた燃料電池や生体との相互作用を精密に制御したバイオ・医療などへ応用展開した。

2.3.4 その他の特記すべき事項

16 名の研究代表者のうち、終了後に研究所長や研究センター長になったもの 3 名、副学長になったものが 1 名いる(表 1-2 参照)。

第 3 章 各研究課題の主な研究成果

2.2.1 研究助成金では、研究代表者でかつ、総額が1千万円以上のものを示したが、この章の展開している事業は、上記条件に含まれなくても、研究を展開している事業については示した。

3.1 2008 年度採択研究課題

- ・ 生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム（浦岡 行治）
- ・ イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築（澤田 和明）
- ・ 電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用（西澤 松彦）
- ・ 自己組織化プロセスにより創製された機能性・複合 CNT 素子による柔らかいナノ MEMS デバイス（畠 賢治）
- ・ 自己組織化グラファイトシート上エレクトロニクスの開発（藤岡 洋）
- ・ 機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製（宮原 裕二）

研究課題名 生体超分子援用フロンティアプロセスによる高機能化ナノシステム
研究代表者名(所属・職位) 浦岡行治(奈良先端科学技術大学院大学 教授)
研究期間 2008年10月～2014年3月

展開している事業:
 科研費基盤(B)2 件、SIP、トヨタ
 公募型共同研究

CREST の成果:

自己組織化機能を持つ生体超分子を活用して、新規な半導体デバイス、プロセスを開発し、メモリ、LSI、TFT、センサ、太陽電池、熱電素子など幅広い半導体デバイス分野で新しい機能や性能を実証した。



発展:

1. 一次元ナノドット配列を使った極微細メモリの試作と動作実証確認¹

数 nm のフェリチンタンパクのコアを V 溝構造の底に 1 次元に配列した半導体メモリを作製し、電荷の充放電現象を確認した。自己組織化ナノドットを用いることで、低電圧動作(書込/消去: ±4V)とすぐれた閾値制御性を実現した(図 1)。

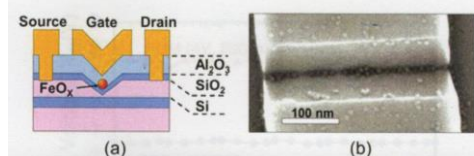


図 1. 一次元ナノドット配列を使った極微細メモリの模式図と走査電顕像¹

2. バイオナノプロセスを活用した高い変換効率を持つ色素増感太陽電池の形成²

熱的に安定な酸化チタンをコーティングしたマルチウォールカーボンナノチューブ(MWCNT)を用いて色素増感太陽電池を形成し、高い変換効率を確認した。自己組織化機能をもつタンパクのコアを触媒として利用することで、カーボンナノチューブ密度を制御できたことにより実現した(図 2)。

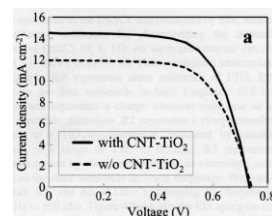


図 2. バイオナノプロセスによる色素増感太陽電池の変換効率の向上²

3. バイオナノプロセスを活用した高い変換効率を持つペロブスカイト型太陽電池の試作³

自己組織化機能をもつ生体超分子を活用して、高い変換効率をもつペロブスカイト型太陽電池を形成し、動作を実証した。酸化チタンでコーティングされた金ナノワイヤを主材料に用いることで、光励起電子を効率よく収集できたことにより実現した(図 3)。

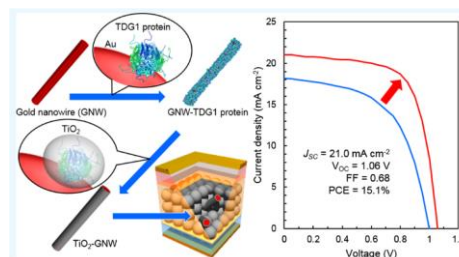


図 3. 高効率ペロブスカイト型太陽電池の製造方法と性能向上³

4. バイオナノプロセスを活用した高感度ガスセンサの開発⁴

バイオナノプロセスを活用することで MWCNT を高密度に集積した MEMS センサを作製し、0.011～1Pa の圧力において窒素ガスと水素ガスを高感度で検出できることを明らかにした。また、両者でダンピング特性が異なり、識別が可能であることを確認した(図 4)。

特記事項

味の素(株)と太陽電池に関する共同研究を、また(株)デンソーとは熱電素子の共同研究を進展させた。

ベンチャー企業(半導体未来研究所)を設立準備中である。

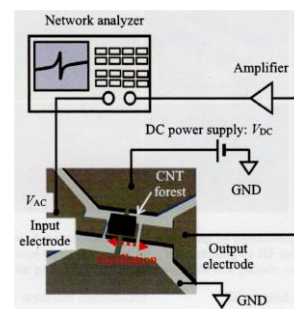


図 4. 高密度 MWCNT を用いた高感度ガスセンサの構成⁴

¹ Ban T. et al., Appl. Phys. Lett., 2015, 106(25), 253104. ² Inoue I. et al., Nanotechnology, 2015, 26(28), 285601. ³ Inoue I. et al., ACS Omega 2017, 2(9), 5478-5485. ⁴ Sugano K. et al., Journal of Micromechanics and Microengineering, 2016, 26(7), 075010.

研究課題名 イオンイメージセンサ技術を利用した医療生体ナノシステム構築

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 澤田和明(豊橋技術科学大学大学院工学研究科教授)

CREST、A-STEP(戦略テーマ重点タイプ)、OPERA(共創プラットフォーム育成型)、科研費基盤(S)、科研費基盤(A)

研究期間 2008年10月~2015年3月

CREST の成果:

イオンイメージセンサの高解像度化に成功し、神経伝達物質イオンイメージセンサの時空間分解能および生体適合性における実用性を向上させ、ナトリウム、カルシウム、カリウム、アセチルコリンなどのイメージングを可能にした。また、医療応用への展開を試みイオン I/O デバイスの基盤技術を確立した。



発展:

1. 高解像度・高速動作イオンセンサアレイの開発¹

高時間分解能(0.52msec)、高空間解像度(2 μ m)、低ノイズレベル(0.1pH)で駆動できるイオンイメージセンサおよび駆動システムを開発し、世界で最も微小領域のイオン分布計測が可能で最も高速に動作するイオンセンサアレイを開発した(図 1)。

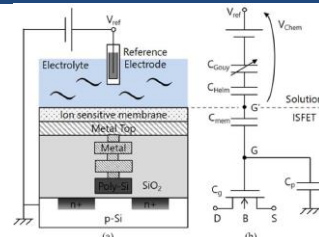


図 1. 高解像度・高速動作イオンセンサアレイの構成

2. 神経伝達物質イメージセンサの開発²

ATP、乳酸、グルタミン酸および GABA の神経伝達物質の動画像を非標識で取得する技術を確認し、時空間情報を保ったままで、複数種類の神経伝達物質(ATP、ACh、H⁺および K⁺)の分布を取得するイメージング技術を確立した(図 2)。

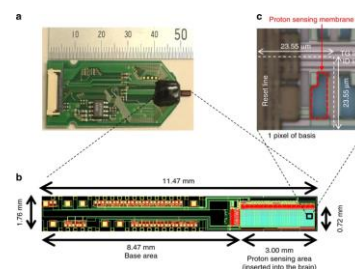


図 2. 神経伝達物質イメージセンサ 1 画素の構成²

3. 生体刺入型イオンイメージセンサの開発³

in-vivo 計測が可能で空間解像度および時間分解能に優れた生体刺入型センサシステムを開発し、Na⁺、K⁺、H⁺を同時に動画像として取得できるマルチ神経伝達物質イオンイメージセンサチップを製作してマウスの脳内 pH のリアルタイム観察に成功した(図 3)。

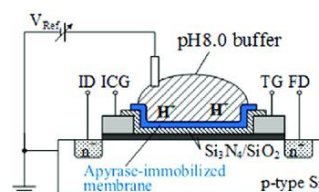


図 3. 生体刺入型イオンイメージセンサの構成³

4. pH と圧力を同時に計測可能な圧力センサの開発⁴

イオンイメージセンサ上に圧電薄膜を形成して pH と圧力を同時に計測可能な圧力センサを開発できた。今後、心筋細胞の活動状況の観察手段として有用であることが期待される(図 4)。

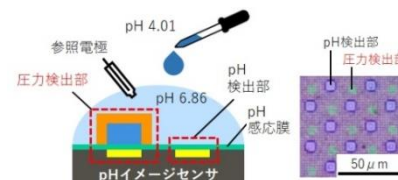


図 4. pH 圧力同時計測可能なセンサの構成⁴

特記事項

国内 18 企業および米国ベンチャー企業と共同研究を行った。(一社)豊橋センサ協議会を設立し、企業コンソーシアムを組織し、イオンイメージセンサを応用した「かおりカメラ」を発表した。この技術を基にベンチャー企業、(株)アロマビットシリコンセンサテクノロジーを設立した。この他に、イオンイメージセンサの一般販売を行うベンチャーを設立予定である。

¹ Y.-N. Lee et al., IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2019, 13(2), 352-363. ² Y.-N. Lee et al., Talanta, 2016, 161, 419-424. ³ H. Horiuchi et al., Nature Communications, 2020, 11(1), 712. ⁴ 辰巳幸弘 他、第 37 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2020 年 10 月 26-28 日および特開 2020-67282、化学・物理現象検出素子。

研究課題名 電気化学的な異種材料ナノ集積化技術の開拓とバイオデバイス応用

研究代表者名(所属・職位) 西澤松彦(東北大学大学院工学研究科 教授)

研究期間 2008年10月～2014年3月

展開している事業:

A-STEP、未来社会創造(ヒューメインなサービスインダストリーの創出)、科研費基盤(A)2件、科研費挑戦的研究(萌芽)4件、科研費(特別研究員奨励費)、AMED(要素技術)

CRESTの成果:

ハイドロゲルを基材とするオール有機物の柔軟な「ハイドロゲル電極」を生み出すとともに、カーボンナノチューブのフィルムや炭素繊維による布などに酵素を担持させる技術を独自に開発し、「柔軟な酵素電極」を実現することに成功した。これらによってウェアラブルデバイスへの応用可能性を示した。



発展:

1.オール有機物生体親和性電極の頭蓋内電極としての有効性実証¹

ハイドロゲルを基材とするオール有機物電極を開発した。生体に安全な柔軟性と物質透過性を有し、MRIなど画像診断を邪魔しない特長を有する。柔らかく濡れた凸凹の脳表面でも密着状態を保持し、脳波の計測精度が高い。難治性てんかんや脳機能マッピングなどの脳外科手術などに用いる頭蓋内電極としての有効性を確認した(図1)。

2.薬剤浸透をマイクロ電流で促進するバイオ発電スキンパッチの開発²

電気エネルギーによりイオン性薬物の経皮吸収を促進させる方法であるイオントフォレシスは病院や美容・育毛クリニックなどで広く利用されているが、これまでは外部電源が必要であった。そこで、酵素を電極触媒に用いるバイオ電池を用いた柔軟でメタルフリーの完全使い捨て型バイオ発電スキンパッチを世界で初めて開発した(図2)。

3.筋肉細胞で包んだ伸縮性の有機電極ワイヤーの開発³

運動により筋肉(骨格筋)が他の細胞・器官に影響を及ぼすマイオカインと呼ばれる様々なホルモン様物質を分泌することが分かっているが、筋肉だけを刺激してマイオカインの作用を調べることは困難であった。そこで、導電性高分子とポリウレタンの複合体である伸縮性の有機電極ワイヤーを開発し、これを筋肉細胞で包むことに成功した。筋肉細胞だけに電流を効率よく流すことができるため、他の細胞が共存しても筋肉細胞だけを刺激できる。この筋肉-電極ワイヤーを用いて、運動時に放出されるマイオカインが白血球を引き寄せを実証した(図3)。また、この電極を組み込んだゲル製の培養チャンバーが、iPS細胞から心筋細胞の分化を効率よく誘導することを示した。

特記事項

国内2企業と共同研究を実施した。サンアロー(株)とはバイオ発電パッチ「BIPP®」を開発し、(株)ユニークメディカルとは、ゲル製頭蓋内電極およびゲル製培養チャンバーを開発した。ゲル製培養チャンバーは製品化済みであり、バイオ発電パッチ(BIPP®)はサンプル試供中であり、ゲル頭蓋内電極は2年後に製品化予定である。

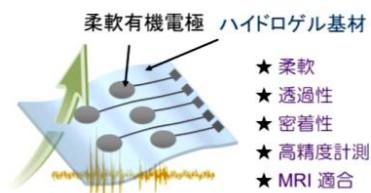


図1. オール有機物で生体親和性電極の特徴¹

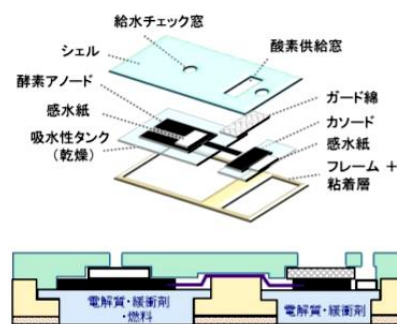


図2. バイオ発電スキンパッチの構造²

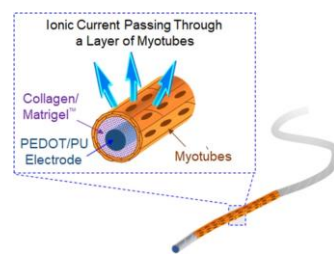


図3. 筋肉-電極ワイヤーの構造³

¹ 東北大学プレスリリース、2019年9月17日。² 東北大学プレスリリース、2020年1月29日。³ 東北大学プレスリリース、2018年2月5日、K. Nagamine et al., Scientific Reports, 2018, 8, 2253.

3.1.4 自己組織プロセスにより創製された機能性・複合 CNT 素子による柔らかいナノ MEMS デバイス (畠 賢治)

研究課題名 自己組織プロセスにより創製された機能性・複合 CNT 素子による柔らかいナノ MEMS デバイス

展開している事業:
科研費(特別研究員奨励費)

研究代表者名(所属・職位) 畠賢治(産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センター研究センター長)

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

CREST の成果:

柔らかいナノデバイスシステムの開発に向けて、カーボンナノチューブ(CNT)シートの貼り付け技術、CNT と異材料とのインテグレーション技術を展開、進展させ、CNT 歪みセンサ、CNT ねじりセンサ等の新しいデバイスを開発し、単層 CNT をゴムに分散させることで数百ナノメートル精度のゴム表面加工技術を開発した。また、西澤チームと共同で、酵素と高配向 CNT を混合した酵素電極シールを開発した。



発展:

1.衣類のように柔らかく、しかも丈夫なトランジスタの開発¹

柔らかい炭素系材料(単層 CNT、ゴム、ゲル)だけで構成され、自在に変形し、身体に与えるストレスも少ないトランジスタを開発した。生体センシングシステムや介護ロボットの皮膚、医療用モニタリング機器などへの応用が期待される(図 1)。



図 1. 洗濯できる柔らかく丈夫なトランジスタ¹

2.カーボンナノチューブ集積化マイクロキャパシタの開発²

高純度で比表面積の大きい単層 CNT を用いて、超小型集積化キャパシタを開発した。アルミ電解コンデンサの代替(体積 1/1000)、電子機器の軽薄小型化、超小型電子機器の電源への応用が期待される(図 2)。

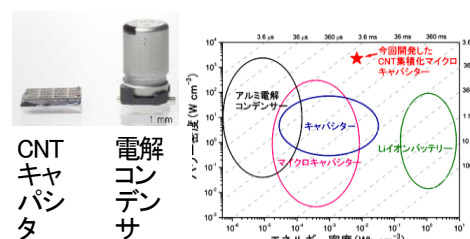


図 2. CNT キャパシタと他のエネルギーデバイスとの特性比較²

3.耐久性、経済性に優れた実用的な耐熱 O リングの開発³

フッ素ゴム(FKM)とスーパグロース法で作製した単層 CNT を複合化して、耐久性と経済性を満たした耐熱 O リングを開発した(図 3)。230 °C 程度までの高温域での耐久性を満たすための材料設計を行い、さらに、経済性を満たすために、低コスト量産プロセスを開発した。

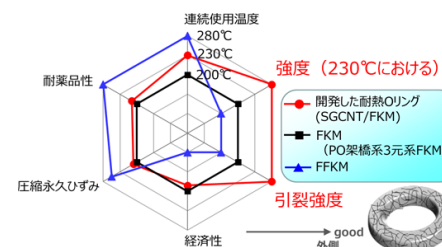


図 3. 耐熱 O リングの諸特性と模式図³

4.カーボンナノチューブを用いた電磁波遮蔽コーキング材の開発⁴

単層 CNT を添加材として、常温大気硬化型液状ゴム中に分散させた電磁波遮蔽コーキング材を開発した(図 4)。金属等の遮蔽材間の隙間や溝に密着性良く塗布・充填でき、硬化後は金属との接着性も高く、電磁波の侵入を防ぎ、また、遮蔽材間の隙間や溝の振動やひずみを吸収できる。

特記事項

世界で唯一 CNT 量産化技術を確立した日本ゼオン(株)は、2015 年 11 月量産プラントを竣工させ、世界初の量産を開始した。国内外約 100 社から問い合わせがあり、サンプル出荷や用途提案を行っている。耐熱 O リングについては、CNT 複合材料研究拠点からサンプル提供を開始し、2018 年 10 月から技術移管先企業であるサンアロー(株)より販売を開始した。民間企業に対し、歪みセンサの研究試料提供を行った。

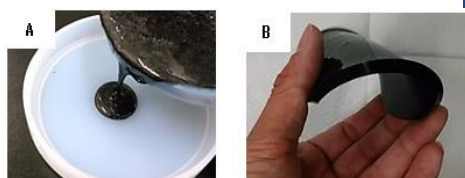


図 4. 開発した電磁波遮蔽コーキング材⁴
(A: 硬化前、B: 硬化後)

¹ 産業技術総合研究所プレスリリース、2015 年 8 月 12 日。 ² 産業技術総合研究所プレスリリース、2015 年 7 月 7 日。 ³ 産業技術総合研究所プレスリリース、2018 年 2 月 8 日。 ⁴ 産業技術総合研究所プレスリリース、2018 年 2 月 8 日。

研究課題名 自己組織化グラファイトシート上エレクトロニクスの開発
研究代表者名(所属・職位) 藤岡洋(東京大学生産技術研究所 教授)
研究期間 2008年10月～2015年3月

展開している事業:
 A-STEP 2 件、ACCEL、科研費(研究領域提案型(総括班)、(国際活動支援班))

CREST の成果:

低温・低コストな結晶成長法であるパルススパッタ堆積(PSD)法およびデバイス作製技術を開発し、グラファイトシート上に高品質な窒化物半導体薄膜結晶の成長を実現した。量子井戸構造の作製および素子形成の低温化によって、LED の低温製造プロセスを開発して、赤、青、緑の三原色 LED の試作に成功した。InN 薄膜を用いた金属-絶縁体-半導体構造電界効果トランジスタを試作した。



発展:

1. パルススパッタ堆積法による GaN 高濃度不純物ドーピング技術の開発¹

パルススパッタ堆積法による高濃度不純物ドーピング技術を用いて Si 濃度が $10^{20}/\text{cm}^3$ 台で、抵抗率が極めて低い n 型 GaN 結晶を実現した(図 1)。また、これを窒化物 LED 上のトンネル接合コンタクトとして利用して寄生抵抗の大幅な低減により素子特性の向上を実現した。

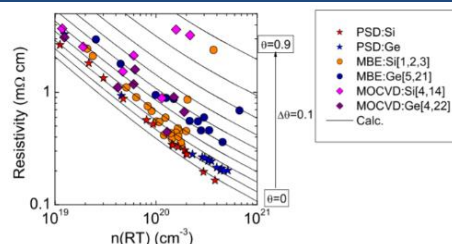


図 1. Si 濃度が極めて高い n 型 GaN の抵抗率¹

2. 高濃度不純物ドーピング技術の AlN 結晶成長への適用²

パルススパッタ堆積法による高濃度不純物ドーピング技術を AlN 結晶成長に適用して Si ドープ AlN 薄膜を作成し、良好な n 型伝導性および高い電子移動度(最大 $44\text{cm}^2/(\text{Vs})$)を実現し、高濃度不純物ドーピング技術の適用対象範囲を拡大した(図 2)。

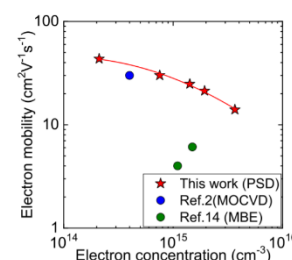


図 2. 高濃度 Si ドープ AlN 薄膜の n 型伝導性および電子移動度²

3. パルススパッタ堆積法による多層グラフェン上 GaN 結晶成長の実現³

パルススパッタ堆積法により、アモルファス SiO_2 上の多層グラフェンに GaN 結晶を形成した。さらに InGaN/GaN の多重量子井戸および p 型 GaN を成長させて、3 原色の LED を作製した。AlN 中間層を用いた場合に良好な GaN 結晶が得られ、大面積デバイスへの基礎技術を実現した(図 3)。

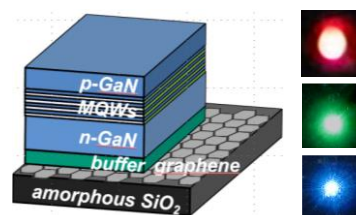


図 3. 多層グラフェン上 GaN 結晶成長により作製した RGB の LED³

4. パルススパッタ堆積法による金属基板上 GaN LED の試作⁴

GaN と格子整合し、良好な基板電極になるハフニウムフォイル上にパルススパッタ堆積法により、 400°C の低温で AlN/HfN バリア層を成長させた後に 700°C で n 型 GaN を成長させた。さらに InGaN/GaN の多重量子井戸および p 型 GaN を成長させて、これまで困難だった赤色を含め 3 原色のフルカラー LED の試作に成功し、安価、広視野角、曲げ可能、長寿命、大面積化容易なディスプレイ実現への道を開いた(図 4)。

特記事項

パルススパッタ堆積法の実用化に向けて、数社の国内企業と共同研究および技術供与を実施した。

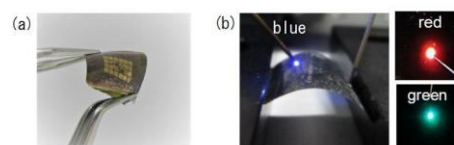


図 4. ハフニウムフォイル上に形成した窒化物 LED と発光の様子⁴

¹ K. Ueno, et. al., APL Materials 2017, 5, 126102. ² Y. Sakurai, et. al., APL Materials 2018, 6, 111103. ³ J. Ohta, et. al., IEICE Trans. Electron. 2017, E100-C, 161.

⁴ 東京大学生産技術研究所プレスリリース, 2017年6月8日.

研究課題名 機能化ナノ構造ゲートバイオトランジスタの創製

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 宮原裕二(東京医科歯科大学生体材料工学研究所 所長・教授)

ImPACT、SIP、COI

研究期間 2008 年 10 月～2014 年 3 月

CREST の成果:

生体分子/機能性材料/半導体からなる複合ゲート構造を構築し、異種材料間における界面ナノ構造を制御することにより、生体分子認識および細胞機能の発現過程を電気信号に変換するバイオトランジスタを創製した。



発展:

1. トランジスタを用いた DNA シーケンシング技術の開発¹

トランジスタと一塩基伸長反応を組み合わせた DNA 塩基配列解析技術を開発して特許を取得し、米国 Ion Torrent 社(現 Thermo Fisher Scientific 社)へ実施許諾を行い、世界初の半導体による電気検出方式 DNA シーケンサとして製品化された(図 1)。

2. ヒトインフルエンザウイルス検出技術の開発²

ヒトインフルエンザに特異的な糖鎖プローブを用いて、ヒトインフルエンザと鳥インフルエンザを識別して電気化学的に検出する技術を開発した(図 2)。

3. がんマーカー高感度検出技術の開発³

血液に含まれる微量ながんマーカーである microRNA を迅速かつ高感度に検出するため、精緻な固/液界面設計により、電極表面における生体分子認識反応を効率的に行うための機能性ナノ有機界面を創製し、恒温増幅技術と電気化学検出技術を融合した定量核酸検出デバイス技術を開発した(図 3)。

4. ボロン酸ゲルを用いたインスリン投与デバイスの開発⁴

血糖値変化に対応してインスリン放出制御を行う完全合成型の「人工膵臓」の開発を目指し、「水中で 2 ヶ月以上安定で、かつ血糖値依存的なインスリン供給性能が週単位で持続する」マイクロニードル型人工膵臓のプロトタイプを開発した(図 4)。

特記事項

ImPACT でパナソニック(株)と共同研究を行った。また、SIP で(株)東芝と共同研究を行って、検出システムのガス透過膜の最適化を行い、情報を(株)東芝に移管した。その他、4 社との共同研究を進めている。

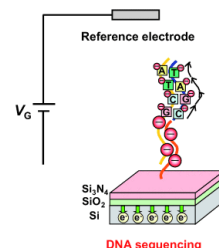


図 1. トランジスタを用いた DNA シーケンシング技術の原理¹

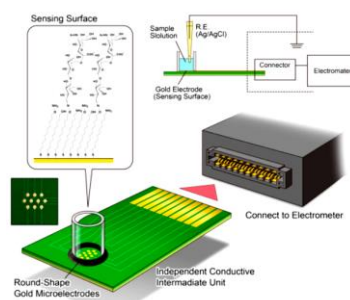


図 2. ヒトインフルエンザウイルス検出装置の構成²

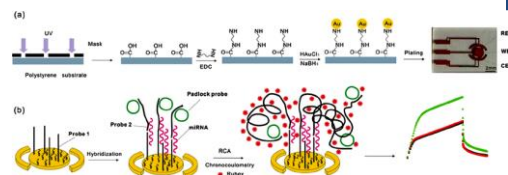


図 3. 環状プローブによる microRNA の増幅と認識プロセス³

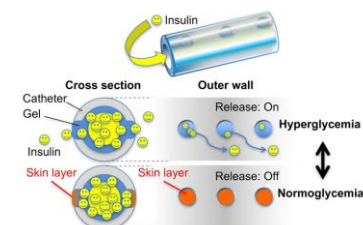


図 4. 血糖値に依存してインスリンを放出するデバイスの動作⁴

¹ T. Sakata et al., Angew. Chem. Int. Edn., 2006, 45, 2225–2228. ² Y. Horiguchi et al., Biosens. Bioelectron., 2017, 92, 234–240. ³ B. Yao et al., Chem. Commun., 2014, 50(68), 9704–9706. ⁴ A. Matsumoto et al., Science Advances, 2017, 3, eaq0723.

3.2 2009 年度採択研究課題

- ・ 光神経電子集積回路開発と機能解析・応用（宇理須 恒雄）
- ・ 拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成（北森 武彦）
- ・ バイオテンプレート極限加工による 3 次元量子構造の制御と新機能発現（寒川 誠二）
- ・ 大面積ナノシステムのインタフェース応用（染谷 隆夫）
- ・ 濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製（辻井 敬亘）
- ・ マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築（藤井 輝夫）

研究課題名 光神経電子集積回路開発と機能解析・応用

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 宇理須恒雄((株)NANORUS・代表取締役会長)

CREST

研究期間 2009年10月～2015年3月

CREST の成果:

プレーナーパッチクランプ方式で、神経系の難病の原因解明に重要な神経細胞のチャンネル電流計測に世界で初めて成功し、また、チャンネルロドプシンファーストレシーバーなど高効率な人工ロドプシンの製作やチャンネルロドプシンを発現したモデルラットの製作など、視細胞において主要な働きをするロドプシン研究の発展に貢献した。



発展:

1.高品質イオンチャンネル電流の計測¹

細胞播種密度を制御し、培養型プレーナーパッチクランプによりピペットパッチクランプ並みの品質のチャンネル電流記録に成功した(図1)。

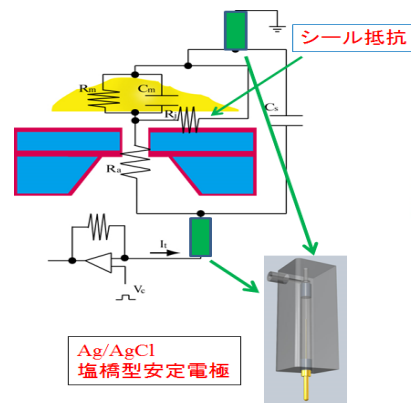


図1. ノイズの大幅低減を実現した培養型プレーナーパッチクランプの概要¹

2.イオンチャンネル電流計測と単一細胞解析の同時計測の検討²

培養型プレーナーパッチクランプ基板上に神経細胞ネットワークを形成し、セルケージ内の、単一細胞について、微細貫通穴を經由して、細胞内容物を吸引採取し、その中の mRNA や遺伝子の分布を、次世代シーケンサーで解析した。ほぼすべての mRNA や遺伝子を採取できることがわかった(図2)。

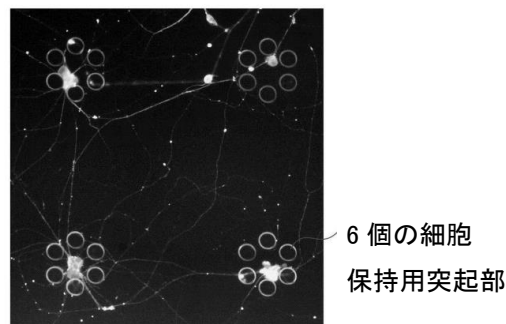


図2. プレーナーパッチクランプ基板上に形成された神経細胞ネットワーク²

3.培養型プレーナーパッチクランプ装置のプロトタイプ機製作³

培養型プレーナーパッチクランプ装置の実用化を目指して、4個の細胞を同時計測可能な4チャンネルプロトタイプ機を製作した。

特記事項

エイブリック(株)と培養型プレーナーパッチクランプの増幅器について、共同で計算機シミュレーションを開始した。

岡崎市商工会議所の応援により、培養型プレーナーパッチクランプ装置の実用化を目指して、2回のクラウドファンディングを実施して研究開発資金を得るとともに、ベンチャー企業、(株)NANORUSを2020年2月に設立して実用化研究を進めている。同年12月には、研究所(床面積計~120m²)が完成し、地元の自動車部品会社(金星工業(株))と協定を結び、装置設計やシステム制御技術の提供を受けて、5年後までに同時計測点数を16に増やした装置を開発する予定である⁴。

CREST 研究領域(研究総括:菅野純夫)「統合1細胞解析のための革新的技術基盤」の研究課題「多チャンネルプレーナ技術による生体組織分子解析とその神経疾患応用」(研究代表者:高村 禪)[2014年度~2019年度]で共同研究者として培養型プレーナーパッチクランプ方式の成果を展開している。

¹ 2015年2月 JST 新技術説明会資料. ² 特許第6624933号公報. ³ 2020年4月26日 東海愛知新聞 1面. ⁴ 2020年12月11日 中日新聞 18面.

研究課題名 拡張ナノ空間特異性を利用した革新的機能デバイスの創成

研究代表者名(所属・職位) 北森武彦(東京大学大学院工学系研究科 特任教授)

研究期間 2009年10月～2015年3月

展開している事業：

科研費基盤(A)2件、科研費萌芽研究、CREST

CREST の成果：

数 10～数 100nm の「拡張ナノ空間」は流体物性や化学特性に特異性が発現することを見だし、この特異性を活用した新しいデバイス工学として、化学、バイオ、エネルギーなどに貢献する新機能次世代ナノデバイスを実現した。また、検出や加工、表面修飾など、そのための基盤技術を確認した。



発展：

1. フェムトリットル、ピコリットル化学プロセスの実現¹

拡張ナノ空間における化学操作や流体操作を適切に組み合わせる技術を確認し、世界に先駆けてフェムトリットル、ピコリットルの体積で、化学実験やバイオ実験ができるツールを開発した。強力な科学研究ツールとして科学の展開に大きく貢献する(図 1)。

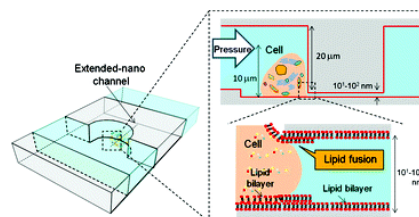


図 1. 1つの大動脈内皮細胞から 39 フェムト

2. ナノ流体デバイス基盤技術の確立とナノ流体工学の基盤確立²

拡張ナノ流体チャネル内での検出技術、表面修飾技術など機能デバイスに必須な基本技術を確認し、ナノ流体工学(ナノフルイディクス)の基盤を確認し、新たな学問分野発展の基礎を築いた(図 2)。

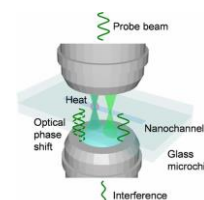


図 2.

紫外光励起を用いた位相シフト観察による非標識生体分子高感度検出法²

3. 単一生細胞タンパク分析デバイスの実現³

必要な全てのプロセス(細胞プロセス・分子プロセス)を1つのマイクロ・拡張ナノ流体デバイスに集積化することにより、単一生細胞から放出されるタンパク分子(サイトカイン)を個数レベルで分析することに世界で初めて成功した(図 3)。

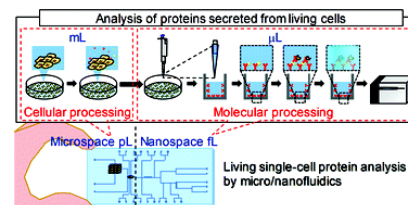


図 3. 集積化ナノ流体デバイスによる単一生細胞からのサイトカイン放出分析³

4. フェムトリットル液体クロマトグラフィの開発と生体関連分子の分離分析への展開⁴

クロマトグラフィの機能を持ったデバイスを発展させ、フェムトリットルのサンプル量で従来より 1桁高い分子識別性能を実現した。さらに、流体操作法の高度化により、移動相組成を連続的に変化させるバイオ医療研究に必須なグラジエント溶出法も取り入れて、超微量で分子同定できる新しい分析技術に展開した(図 4)。

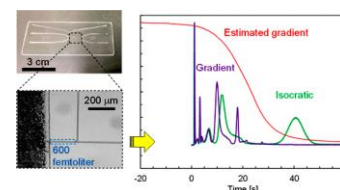


図 4. ナノ流体デバイスによるグラジエント溶出法液体クロマトグラフィ⁴

特記事項

(株)日立ハイテクノロジーズ、(株)ダイセル、(株)ダイキン、日本 IBM(株)とマイクロ・拡張ナノ流体デバイス関連技術開発で共同研究している。マイクロ化学技研(株)にて、エピジェネティクス分析装置、微分干渉熱レンズ顕微鏡などを製品化している。

¹ L. Lin et al., Analyst, 2017, 142, 1689–1696. ² H. Shimizu et al., Analytical Chemistry, 2017, 89, 6043–6049. ³ T. Nakao et al., Analyst, 2019, 144, 7200–7208. ⁴ H. Shimizu et al., Analytical Chemistry, 2019, 91, 4, 3009–3014.

研究課題名 バイオテンプレート極限加工による3次元量子構造の制御と新機能発現

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 寒川誠二(東北大学流体科学研究所/材料科学高等研究所教授/主任研究者)

科研費基盤(S)、科研費基盤(B)

研究期間 2009年10月~2016年3月

CRESTの成果:

バイオテンプレート極限加工により配置制御された量子ナノ円盤構造作製技術を確立した。3次元近接量子ドットによるバンド構造制御を実現し、高効率量子ドット太陽電池の設計指針を明確にした。化合物量子ドットによる発光現象を確認し、600nm~1.55μm 波長領域での量子ドットレーザー設計指針を明確にした。



発展:

1.量子ドット太陽電池の実証¹

4nm Si/2nm SiCを5層積層した量子井戸構造をバイオテンプレート極限加工により3次元ナノピラー構造に形成し、さらに原子層堆積技術を用いてピラー間にAl₂O₃を埋め込んだ量子超格子構造を吸収層とした太陽電池を試作した。Si量子ドットによる発電を初めて実証するとともに、変換効率が結晶Siを吸収層とする単接合太陽電池に比べて1.5倍になることを確認した(図1)。

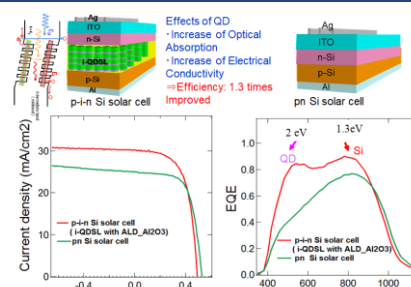


図1. 量子ドット太陽電池(左上)による性能向上(赤線)¹

2.量子ドットLEDおよびμ-LEDの実証²

量子井戸構造をバイオテンプレート極限加工した量子ナノ構造により、LEDの発光効率が10~100倍向上した(図2)。またバイオテンプレート極限加工により作成した6~40μmサイズのGaN μ-LEDにおいて発光効率の電流依存性が大面積のLEDと同等であることを確認した。

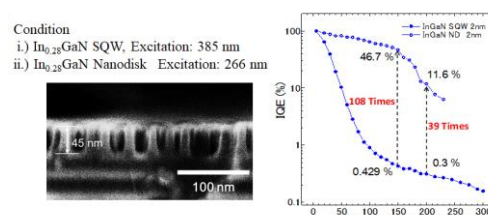


図2. 量子ドットLEDの構造と発光効率

3.Si/SiGe ナノピラー構造による熱伝導率の制御³

Si/SiGe積層ナノピラー構造にSiGeを埋め込んだ複合材料を用いてフォノンの輸送を制御し、Siに比べて熱伝導率を1/300まで低下することに成功した。この時、電子のフォノン散乱が抑制され、電気伝導率が向上して、熱電効率が大幅に向上することが分かった(図3)。

	Film thickness	Area density	S ² σ W/mK ²	κ ² W/m ² ·K	ZT
Si film	600 nm	—	1.6 × 10 ⁻⁷	140	3.5 × 10 ⁻⁷
SiNP-SiGe _{0.3} composite	10 nm	7.4 × 10 ¹¹	1.8 × 10 ⁻⁶	0.19	4.6 × 10 ⁻³
	100 nm	1.6 × 10 ¹¹	5 × 10 ⁻⁴	3.2	1.3
Si/SiGeNP-SiGe _{0.3} composite	100 nm	8.1 × 10 ¹¹	1 × 10 ⁻³	0.4	0.75

図3. ナノピラー構造埋め込みによる熱電特性の変化³

4.バイオテンプレート極限加工による石英ナノピラー超撥水性効果⁴

石英基板の表面にバイオテンプレート極限加工により形成したナノピラー構造のサイズ、間隔、深さを制御することで接触角(CA)が変化し、超撥水性機能を創生することができた(図4)。

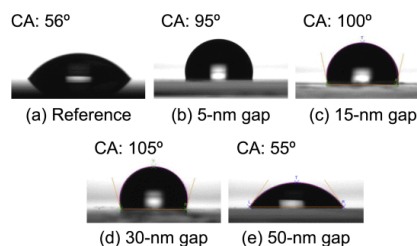


図4. ナノピラーの間隔による撥水性の変化⁴

特記事項

長瀬産業(株)、リソテック(株)、SPPテクノロジーズ(株)とライセンス契約をした。また、石英ナノピラーの評価のため試作品を日産自動車(株)に提供し、石英ナノピラー超撥水性機能を長瀬産業(株)で実用化予定である。

¹ Y.-C. Tsai et al., Nanotechnology, 2017, 28, 485401. および研究代表者からのアンケート回答. ² A. Higo et al., ACS Photonics, 2017, 4, 1851-1857. ³ T. Harada et al., Jpn. J. Appl. Phys., 2020, 59, SKKA08. および研究代表者からのアンケート回答. ⁴ D. Ohori et al., IEEE Open Journal of Nanotechnology, 2020, 1, 1-5.

3.2.4 大面積ナノシステムのインタフェース応用 (染谷 隆夫)

研究課題名 大面積ナノシステムのインタフェース応用

研究代表者名(所属・職位) 染谷隆夫(東京大学大学院工学系研究科 教授
(国研)理化学研究所創発物性科学研究センター チームリーダー)
研究期間 2009年11月～2012年3月

展開している事業:

SIP、ERATO、ACCEL(FS)、ACCEL、SICORP(フェーズ I, II)、科研費基盤(B)、科研費基盤(S)

CREST の成果:

折り曲げ可能なプラスチックフィルム上における有機トランジスタ集積回路の安定動作を行うことに成功し、大面積システム応用に向けたトランジスタ作製技術の開発を進め、センサシートやアクチュエータシートなどのヒューマンインターフェースを実現した。



発展:

1. 超柔軟有機 LED の大気安定動作に成功¹

超柔軟で極薄の有機 LED を作製し、保護層として SiON とパリレンの多層膜を用いることにより、大気中で安定に動作させ、さらに、極薄の高分子フィルム上に有機 LED と有機光検出器を集積化し、皮膚に直接貼り付けることによって、装着感なく血中酸素濃度や脈拍数の計測に成功した(図 1)。

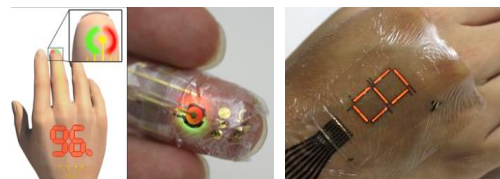


図 1. 超柔軟で極薄の有機光検出器と有機 LED¹

2. 生体適合性ゲル電極を持つ柔軟な有機増幅回路シートの開発²

生体の炎症反応が極めて小さな導電性のゲル素材を用いた柔軟な有機増幅回路シートを開発した。センサを長期間体内に埋め込むことが可能となり、微弱な心電信号でも安定して計測できるようになり、心臓の疾患部位を特定することに成功した(図 2)。

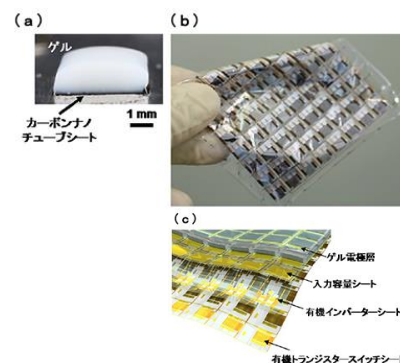


図 2. 生体適合性ゲル電極を持つ柔軟な有機増幅回路シート²

3. 世界で初めて 1 枚のシート型イメージセンサで、指紋・静脈・脈波の同時計測に成功³

高感度有機光検出器と低温ポリシリコン薄膜トランジスタを集積化して高空間解像度と高速読み出しを実現し、生体認証向けの指紋や静脈の撮像と高速読み出しが必要な脈波の分布計測を 1 つのイメージセンサで実現した。生体認証とバイタルサイン計測の同時計測により「なりすまし」や患者の取り違えを防止することが可能になる(図 3)。

特記事項

指紋・静脈・脈波の同時計測は(株)ジャパンディスプレイとの共同研究により実現した。同社には有機半導体に関する技術を提供した。その他の民間企業にも、有機半導体を用いた電子デバイスの作成技術などについて成果物を提供した。

2015年11月にERATO成果を実用化するためのベンチャー企業(株)Xenomaを設立し、2018年11月にパラマウントベッド(株)と共同で、最先端のセンサ技術を活用した機器の開発・販売および情報サービスを提供する合弁会社「サイントル(株)」を設立した。(株)Xenomaにおいては、カメラ不要のモーションキャプチャ用ウェアや幼児用の体温モニター用のウェアを実用化済みであり、サイントル(株)においては、生体情報を活用した見守りソリューションビジネスを実施予定である。

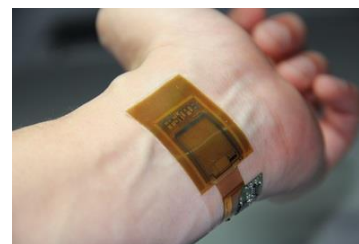


図 3. 高解像度と高速読み出しを両立するシート型イメージセンサ³

¹ Yokota T. et al., Sci Adv 2016, 2, e1501856. ² Sekitani T. et al., Nature Communications 2016, 7, 11425. ³ Yokota, T. et al., Nat Electron 2020, 3, 113-121.

3.2.5 濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製 (辻井 敬亘)

研究課題名 濃厚ポリマーブラシの階層化による新規ナノシステムの創製
研究代表者名(所属・職位) 辻井敬亘(京都大学化学研究所 所長・教授)
研究期間 2009年10月～2015年3月

展開している事業：
 SIP、ACCEL、A-STEP 2件、
 科研費挑戦的研究(開拓)、
 NARO(異分野融合共同研究)

CREST の成果：

精密重合・ナノパーツ合成技術等の革新により、濃厚ポリマーブラシの階層化を達成し、ナノシステムとして潜在的に優れる物性・機能をマクロ系デバイスとして利用することに成功し、その学術・技術基盤を確立した。

発展：

1. 革新的トライボロジー材料・システムの基礎理論確立と応用展開^{1,2}

ACCEL「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」(2015年度～2019年度)において、省エネ性能を1桁向上させた軸受けの評価等によって、濃厚ポリマーブラシの特徴を最大限に活かしたコンセプトである「ソフト&レジリエント・トライボロジー(SRT)」(相手面に「ならう」ことで低摩擦/高潤滑性と強靱/耐久性を両立するという新発想)を実証し、機械摺動システムとして実用化への扉を開いた(図1)。

2. 合目的高分子設計・合成による固体高分子形燃料電池への展開³

固体高分子形燃料電池高性能化のため、従来のイオン液体型カチオンポリマーとは異なり、移動性遊離カチオンが発電キャリアとなるように設計されたイオン液体型アニオンポリマーを新規合成し、イオン液体構造の導入と遊離イオン効果によるイオン伝導性の向上を実現した(図2)。この効果は濃厚ブラシ効果によりさらなる機能向上が見込まれる。

3. ポリマーブラシ技術のバイオインターフェース・医療材料応用^{4,5}

濃厚ポリマーブラシ効果を活かした材料設計を行い、生体との相互作用(生体不活性・生体活性)を精密に制御し得るバイオインターフェースの開発を行った。効果を有するボルトブラシを用いた塗布剤を開発し、海水中での長期安定性と海洋生物の付着抑制を実現した⁴。また、濃厚ポリマーブラシを被覆したナノ繊維と細胞との自己組織化に成功し、その再生医療用足場としての有用性を明らかにした⁵(図3)。

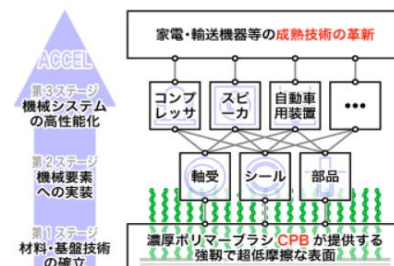


図1. 濃厚ポリマーブラシの開発ステージと産業上の利用可能性^{1,2}

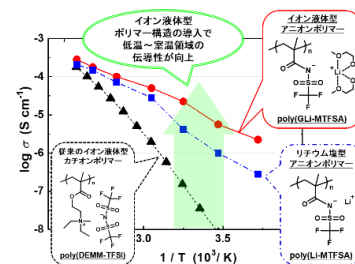


図2. イオン液体型アニオンポリマー構造の導入によるイオン伝導性の向上³

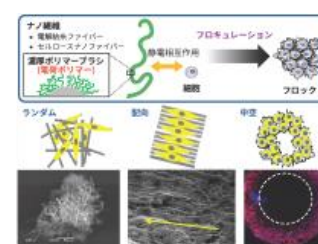


図3. 濃厚ポリマーブラシ被覆ナノ繊維と細胞との自己組織化⁵

特記事項

ACCELにおいて民間企業6社との共同研究を実施した。また、高性能摺動システムは、産学連携コンソーシアムならびに2019年度採択のA-STEP産学共同フェーズ(シーズ育成タイプFS)で実用化検討中である。

新規設計によるプロトン性イオン液体型アニオン濃厚ポリマーブラシを電極接合体に用いた非白金触媒無加湿中温駆動燃料電池用材料開発が科研費基盤研究(B)で採択された(研究期間2019年4月～2023年3月)。

¹ ACCEL 研究開発課題別中間評価結果「濃厚ポリマーブラシのレジリエンシー強化とトライボロジー応用」。² 産学連携コンソーシアム「SRT²プロジェクト」立ち上げ。³ 科研費基盤研究(C)研究成果報告書「中高温動作燃料電池の高性能化に資する新規イオン液体型アニオンポリマーの開発」。⁴ A-STEP(機能検証フェーズ)「海洋生物付着防止コーティングの開発」。⁵ 科研費基盤研究(C)2018年度実施状況報告書「軟骨組織再生のためのセルロースナノファイバー傾斜構造材料の創製」。

研究課題名 マイクロ・ナノ統合アプローチによる細胞・組織 Showcase の構築

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 藤井輝夫(東京大学生産技術研究所 教授/東京大学副学長)

科研費基盤研究(S)、科研費特別研究員奨励費 2 件、AMED、JSPS (外国人招へい研究者)

研究期間 2009 年 11 月～2015 年 3 月

CREST の成果:

細胞組織へのマイクロ流体アプローチを展開して、多能性幹細胞の分化誘導を時空間的に制御する方法を確立するとともに、エレクトロアクティブマイクロウェルアレイによる 1 細胞解析技術を確立した。



発展:

1. ヒト iPS 細胞由来運動神経オルガノイド形成技術の開発¹

微小流路構造を用いてヒト iPS 細胞由来運動神経を培養し、軸索の伸びる通路を狭くすることで、生体内の運動神経組織に似た束状の形態を持つ神経オルガノイドの形成に成功し(図 1)、この技術により ALS 疾患に関与する原因遺伝子の一つを見出した。

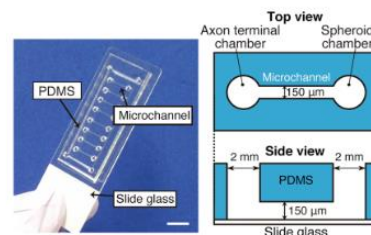


図 1. オルガノイド形成に用いた微小流路

2. 細胞培養環境の時空間制御技術の開発²

貫通穴構造を持つ薄膜に細胞塊をはめ込み、膜の上下で異なる液性因子を含む培養液で処理する技術を開発し(図 2)、iPS 細胞塊の部位特異的な分化誘導やがん細胞塊への部位特異的な抗がん剤処理に成功した。

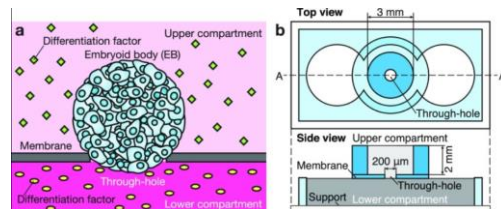


図 2. 貫通穴構造の細胞塊培養装置²

3. 1 細胞解析デバイスの開発³

細胞捕捉率向上のため、微小ウェルを捕捉用ウェルと反応用ウェルの二重構造として構造を最適化した 1 細胞解析デバイスを開発し、96%の高効率細胞捕捉率の達成と細胞内物質解析に成功した(図 3)。

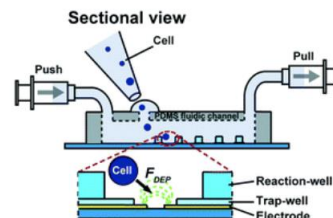


図 3. 1 細胞解析デバイスの構造³

4. 液体生検が可能な血中循環腫瘍細胞(CTC)分離システムの開発⁴

末梢血中の CTC の物理的特性と生物学的特性を両方利用する CTC 分離システムを開発し、がんマーカーに依存せず、混在する白血球を 99.999%除去することに成功した(図 4)。

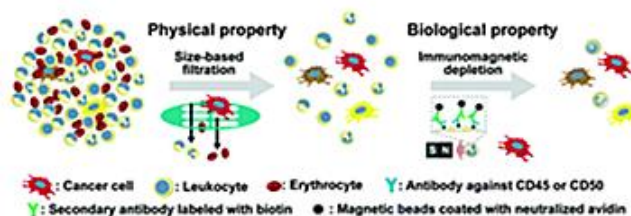


図 4. 物理的特性と生物学的特性を利用する CTC 分離システムの原理⁴

特記事項

民間企業 4 社と 1 細胞解析デバイス、CTC 分離システムの確立を目指して共同研究を進めている。また、神経オルガノイドを用いたスクリーニングは、実施許諾および技術移転しているベンチャー企業の(株)Jiksak Bioengineering でサービスを開始している。

¹ Kawada J. et al., Stem Cell Reports, 2017, 9, 1441-1449. および Akiyama T. et al., EBioMedicine, 2019, 45, 362-378. ² Kaneda S. et al., Biomicrofluidics, 2017, 11, 041101. および Kaneda S. et al., Biomicrofluidics, 2019, 13, 054111. ³ Kim S. H. et al., Lab on a Chip, 2016, 16, 2440. ⁴ Kim S. H. et al., Lab on a Chip, 2019, 19, 757.

3.3 2010 年度採択研究課題

- ・ スピン流による熱・電気・動カナノインテグレーションの創出（齊藤 英治）
- ・ 生体分子 1 分子デジタル計数デバイスの開発（野地 博行）
- ・ エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー（樋口 昌芳）
- ・ 新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立（山元 公寿）

3.3.1 スピン流による熱・電気・動カナノインテグレーションの創出 (齊藤 英治)

研究課題名 スピン流による熱・電気・動カナノインテグレーションの創出

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 齊藤英治(東京大学大学院工学系研究科 教授)

CREST、ERATO、科研費(新学術領域研究(研究領域提案型))、科研費基盤(S)

研究期間 2010年10月～2015年3月

CREST の成果:

電子スピントロニクスと機械工学技術を融合させた「スピントロニクス」、およびスピントロニクスと熱効果を融合させた「スピントロニクス」の学理の基礎を作った。



発展:

1. 量子スピントロニクス効果の発見¹

スピントロニクスの状態になる量子スピントロニクスと呼ばれる物質群において、電子やマグノンではなくスピノンと呼ばれる特殊な状態のスピントロニクスが存在することを明らかにし、量子スピントロニクス効果を発見した。この物質群は磁気秩序がないために周囲の回路やデバイスに磁気的影響を与えず、かつ原理的には原子レベルまでダウンサイズ可能であるなど、これまでの物質では実現できなかった新たな特徴を備えており、電流では不可能であった低消費電力での情報伝導、情報処理、エネルギー変換が可能になる(図1)。

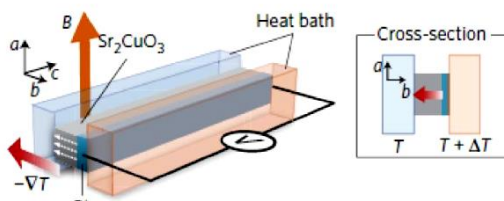


図1. 量子スピントロニクス効果の実験系

模式図¹

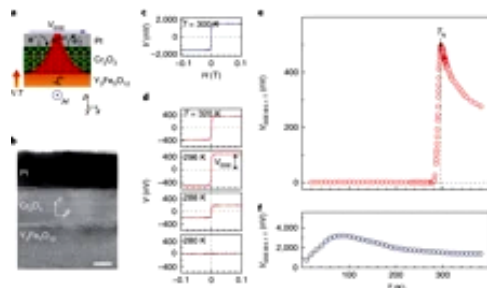


図2. スピントロニクス異常の測定系と測定結果²

2. 反強磁性転移によるスピントロニクス異常の発見²

反強磁性体 Cr_2O_3 が常磁性へと転移するネール温度近傍でスピントロニクス伝導度が2桁以上の大きな変化(スピントロニクス巨大磁気抵抗)を示すスピントロニクス異常を発見した。これにより、反強磁性体の相転移での振る舞いを利用してスピントロニクススイッチが実現できることを実証した(図2)。

3. スピントロニクス効果の力学的逆効果の発見³

磁性絶縁片持ち梁(カンチレバー)にスピントロニクスを注入した結果、電流による影響を排除した純粋なスピントロニクスのみでデバイスを振動させることに成功した。この結果からスピントロニクスが運ぶマイクロな回転がマクロな動力となることが実証され、スピントロニクス効果の力学的逆効果を発見したことになる。本デバイスでは、電気配線なしで振動を起こすことができるため、配線が困難なマイクロ機械デバイスの駆動手段に応用できる可能性がある(図3)。

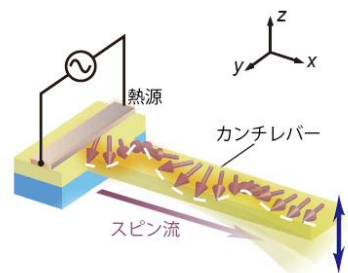


図3. スピントロニクス効果の力学的逆効果の測定系概要³

特記事項

日本電気(株)、(株)アルバック、日産自動車(株)などと共同研究している。また、日本電気(株)へ技術移転し、2018年に、小さな温度差でも電力を発生するスピントロニクス熱電変換素子が開発された。

¹ 東北大学プレスリリース、2016年9月28日。 ² Qiu Z. et al., Nature Materials, 2018, 17, 577-580. ³ JST等共同プレスリリース、2019年6月13日。

研究課題名 生体分子 1 分子デジタル計数デバイスの開発

研究代表者名(所属・職位) 野地博行(東京大学大学院工学系研究科 教授)

研究期間 2010 年 10 月～2016 年 3 月

展開している事業:

ImPACT、AMED(HFSP)、CREST、
科研費基盤(A)、科研費基盤(S)、
JSPS(外国人招へい研究者)

CREST の成果:

金ナノロッドの回転運動超高速イメージング法および 1 分子デジタル計数技術を確立した。脂質二重膜アレイチップおよび超並列 1 細胞解析を実現するエレクトロアクティブマイクロウェルアレイを開発した。CMOS イメージングデバイスと ELISA デバイスを統合してレンズ無しの検出器を開発した。

発展:

1.広範な応用分野で「人工細胞リアクタ」の基盤技術を確立¹

ImPACT 野地プログラム「豊かで安全な社会と新しいバイオものづくりを実現する人工細胞リアクタ」(2015 年度～2018 年度)のプログラムマネージャーとして 20 のプロジェクトを統括した。また、自ら研究開発責任者を兼任し、マイクロアレイチャンバーを用いた超高感度デジタル ELISA 法の開発に成功した(図 1)。



図 1. 人工細胞リアクタによるイノベーション¹

2.環状 DNA、長鎖 DNA のマイクロアレイチャンバー内増幅の成功および長鎖 DNA 合成の基盤技術開発²

CREST「人工ゲノムのセルフリー-On chip 合成とその起動」(2018 年度～2023 年度)の主たる共同研究者として、マイクロアレイチャンバー内でのゲノムスケール環状 DNA の増幅および長鎖 DNA 連結・増幅法(RA-RCR 法)の再現に成功し、1 分子のゲノムレベル DNA からの増幅を確認できた。また、CREST「長鎖 DNA 合成と自律型人工細胞創出のための人工細胞リアクタシステム」の研究代表者として、自律型人工細胞モデルの創出に向け、均一径微小リアクタ開発、界面機能化合成分子開発、人工細胞リアクタの遺伝子発現活性定量計測を行った(図 2)。

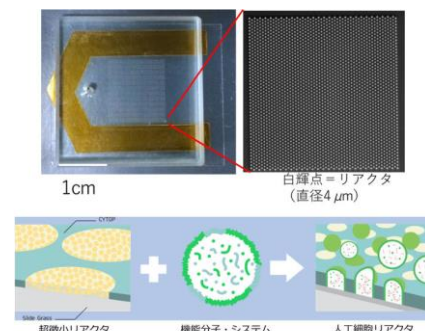


図 2. 微小リアクタの例と人工細胞リアクタのイメージ²

3.動的フェムトリアクタに関する基盤技術の検証³

科研費基盤(S)「次世代型デジタルバイオアッセイのための動的フェムトリアクタ技術」(2019 年度～2023 年度)の研究代表者として、動的 fL リアクタデバイスの基盤技術および On chip 統合型デジタルバイオ分析法の開発、分子個性の多次元解析と個性発現メカニズムの解明を進めた。また、必要なサンプル量、および実験操作の労力や実験コストを軽減できるよう一度に多項目の情報を取得できる多重均質デジタルイムノアッセイを開発した(図 3)。

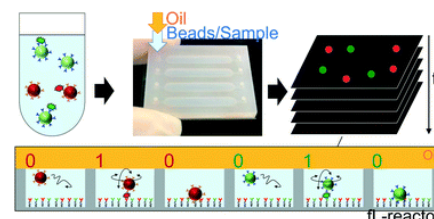


図 3. 多重均質デジタルイムノアッセイの構造と作用³

特記事項

ImPACT プログラムマネージャーとして、アボットジャパン(株)(超高感度デジタル ELISA 計測システム)、凸版印刷(株)(遺伝子検査キット)、プレジジョン・システム・サイエンス(株)(全自動デジタル ELISA 装置)の実用化開発を推進した。

¹ ImPACT 野地プログラム「豊かで安全な社会と新しいバイオものづくりを実現する人工細胞リアクタ」ホームページ。 ² EMIRA 「編集・合成のその先!『人工細胞リアクタ』がゲノム産業を飛躍させる」、2019 年 7 月 3 日。 ³ Akama K. et al., Lab Chip, 2020, Apr, 29, 32347266.

研究課題名 エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー

研究代表者名(所属・職位) 樋口昌芳(物質・材料研究機構 グループリーダー)

研究期間 2010年10月～2016年3月

展開している事業:

CREST、科研費(研究領域提案型)、科研費(特別研究員)

CREST の成果:

メタロ超分子ポリマーのエレクトロクロミック特性によるマルチカラー表示や黒色表示等を達成した。また、ポリマー構造を3次元化することで着色効率等のエレクトロクロミック特性の大幅な向上を実現した。さらに、フレキシブル電子ペーパーの作製に成功した。



発展:

1.黒色を含むマルチカラー表示の実現¹

鉄とルテニウムの2種類の金属イオンを含むメタロ超分子ポリマーを用いて、印加電圧により黒色を含むマルチカラー表示を示すエレクトロクロミック表示デバイスを作製した(図1)。

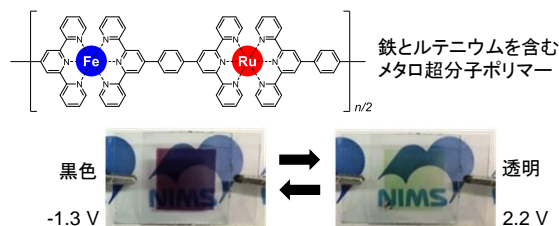


図1. メタロ超分子ポリマーによるマルチカラーエレクトロクロミック表示素子¹

2.強靱なエレクトロクロミック2次元ナノシートの開発²

鉄イオンの6配位8面体の配位構造を生かして、ビス(ピリジン)との錯体形成により、2次元的にポリマー鎖が広がったナノシートの作製に成功した。また、このナノシート状ポリマーが強靱かつ優れたエレクトロクロミック特性を有することを見出した(図2)。

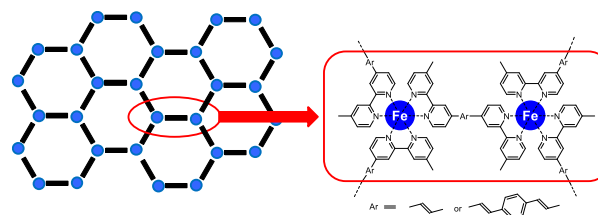


図2. エレクトロクロミック2次元ナノシート²

3.耐熱性を有するエレクトロクロミックデバイスの開発³

デバイス構造の改良および対極物質の導入により、メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミック表示デバイスにおいて100°Cを超える耐熱性を実現した(図3)。

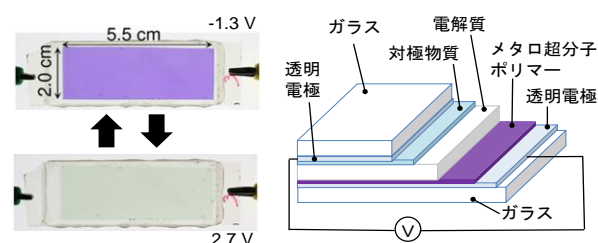


図3. 高耐熱性エレクトロクロミック表示デバイス³

4.蓄電機能を有するエレクトロクロミックデバイスの開発⁴

メタロ超分子ポリマーを用いたエレクトロクロミックデバイスが蓄電機能を有することを発見し、ポリマーや対極物質の改良により薄膜Liイオン電池を超える高エネルギー密度(10~18 mWh/cm³)および電解コンデンサと同等の出力密度(7W/cm³)を実現した(図4)。

特記事項

民間企業10社以上と共同研究を実施し、実施許諾、技術移転を行った。鉄を含むメタロ超分子ポリマーが、(株)東京化成工業より2020年6月に一般販売を開始した。

実証実験として、エレクトロクロミック調光ガラスを、つくば市の施設の窓に2020年8月納入した。

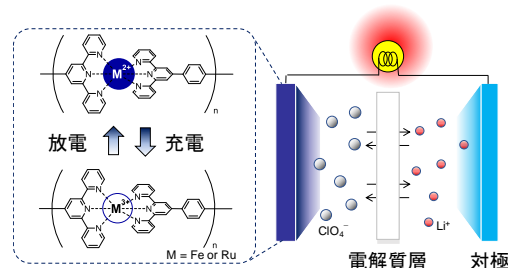


図4. エレクトロクロミックデバイスの蓄電機能⁴

¹ Hsiao L.-Y. et al., J. Mater. Chem. C, 2019, 7, 7554-7562. ² Bera M. K. et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 11893-11903. ³ Mondal S. et al., Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2019, 200, 110000. ⁴ Mondal S. et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, 12, 16342-16349.

研究課題名 新金属ナノ粒子の創成を目指したメタロシステムの確立

展開している事業:

研究代表者名(所属・職位) 山元公寿(東京工業大学科学技術創成研究院 教授)

ERATO、科研費基盤(S)

研究期間 2010年10月~2016年3月

CREST の成果:

サブナノ粒子の構成原子数によって触媒活性が劇的に変動することを初めて実験的に確認し、12-20 原子の白金サブナノ粒子のうちで 19 原子のものが最も高い酸素還元反応の触媒活性を有していることを発見した。19 原子のサブナノ粒子は市販白金触媒の 20 倍近い質量活性比を有しており、省白金触媒としての応用に道を開くものである。



発展:

1.高精度で金属原子を集積する方法の確立¹

原子数と元素組成比を原子精度で dendrimer に集積するアトムハイブリット法を確立し、67 種類の元素の集積を可能とした。また、異種元素集積を達成して、この多元素金属集積 dendrimer を還元し、他に類例のない 5 種元素を含む初めてのサブナノハイブリッド合金の合成に成功した(図 1)。

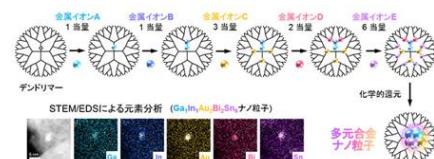


図 1. dendrimer を鋳型とする多元素合金ナノ粒子の合成法¹

2.サブナノ粒子による高機能触媒の創製とトルエン酸化変換^{2,3}

市販の白金担持カーボン触媒の 24 倍もの触媒活性を示す高活性三元金属サブナノ粒子触媒を開発した²。また、原子数 12、28、60 の Cu、Ru、Rh、Pd、Pt の 5 種類の金属元素、計 15 種の金属サブナノ粒子触媒を用いて、無溶媒条件下でトルエン酸素酸化反応を検討したところ Pt₁₂ が最も高い触媒活性を示した³。さらに、Pt について原子数を変化させると、Pt₁₉ の触媒回転頻度(TOF 値)は最高活性値である 3238atom⁻¹h⁻¹を与えた³(図 2)。

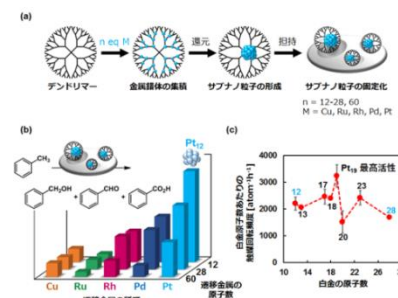


図 2. トルエン酸化での触媒活性比較³

3.超高感度ラマン分光法の開発⁴

シェル被覆金銀コアシェルナノ粒子を増強素子として高感度化した表面増強ラマン分光法を開拓し、サブナノ粒子の振動分光スペクトルの直接計測に成功し、サブナノ粒子の原子構造・表面組成を解析してサブナノ粒子の特異的な反応活性の起源を説明することに成功した(図 3)。

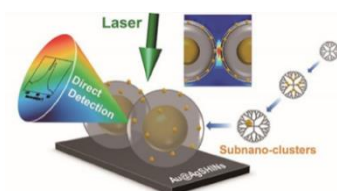


図 3. 超高感度ラマン分光法の概要⁴

4.高次ナノ物質の周期律の発見⁵

ナノ物質が持つ様々な幾何学的対称性に着目してナノ物質が持つエネルギー状態を記述する「対称適合軌道モデル」を開発した。さらに、この理論モデルにより、複数の原子からなる高次の物質の間にも、族、周期、類、種の四つの次元を有する周期律が存在することを発見し、「ナノ物質の周期表」として表すことに初めて成功した(図 4)。

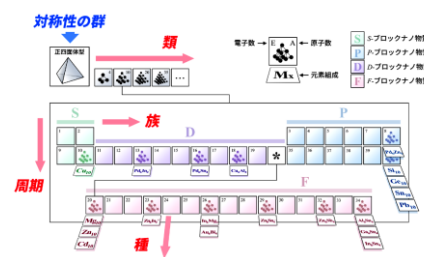


図 4. ナノ物質の周期表の例⁵

特記事項

民間企業 1 社と、金属単一元素および異種金属との合金による新機能の検証等について共同研究をしている。

¹ 東京工業大学プレスリリース、2018年9月25日。 ² Takahashi M. et al., Science Advances, 2017, 3, e1700101. ³ 東京工業大学プレスリリース、2018年11月16日。 ⁴ 東京工業大学プレスリリース、2019年12月16日。 ⁵ 東京工業大学プレスリリース、2019年8月28日。