

ERATO 染谷生体調和エレクトロニクスプロジェクト事後評価（最終評価）報告書

【研究総括】染谷 隆夫（東京大学 大学院工学系研究科／教授）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

太田 淳 （委員長；奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科／教授）

高橋 一 （オリンパス株式会社 CSR 企画管理部／部長）

角田 達彦 （東京医科歯科大学 難治疾患研究所／教授）

波多野 睦子 （東京工業大学 工学院／教授）

評価の概要

エレクトロニクスは、シリコンデバイスの微細化による機械の演算速度と記憶容量の向上を図り、現在の高度情報化社会の基盤を作り上げた。しかしながら、この「機械性能の向上」とは異なる「環境・人間との調和」を目指した次のフェーズの世界的競争が目下急速に立ち上がろうとしている。

この背景の中、本「ERATO 染谷生体調和エレクトロニクスプロジェクト」は、戦略目標「神経細胞ネットワークの形成・動作の制御構築の解明」の下、生体に適合する有機物を用いた「生体とエレクトロニクスを結びつけるデバイス」を開発し、神経細胞とエレクトロニクスを直接つなぐインターフェースの実現を目指し、2011 年度に発足した。本プロジェクトにおける、塗るだけで神経細胞に密着する生体プローブを作製できる「バイオゲルインク」、柔らかな材料の表面や内部に集積回路などの精密な配置を行う「バイオデジタルフォトリソ」、さらには電気信号と化学信号を同時にリアルタイムで計測し、何百万個もの生体プローブから信号を読み出す「バイオアクティブマトリックス」等の開発を目指した活動は、戦略目標に合致した合理的な設定であった。さらに、プロジェクトの進展に伴い、研究活動領域を、大学医学部（循環器系、脳神経外科、皮膚科 等）と連携した開発デバイスの医療応用検討、エレクトロニクスにおけるフレキシブル化やテキスタイル（衣服として自然に身につける事が可能）化の実用化検討へと広がっていった。その活動は、挑戦的であり、また新規コンセプトを創出する優れた全体構想を実現したと言える。

その結果、本プロジェクト活動により、フレキシブル有機デバイスの脳科学への応用を見据えた成果に加え、新たにヘルスケア・介護やヒューマンインターフェース分野へのフレキシブル有機デバイスの応用を意識した特筆すべき成果が多く出ており、高インパクトジャーナルへの数多くの採択・知的財産権の取得・若手研究者の育成等が、高いレベルで実現されている。なお、ヘルスケア関係の研究開発活動は、スウェーデンとの国際科学技術共同研究推進事業 SICORP「皮膚貼り付け型センサーによる高齢者健康状態の連続モニタリング」や、未来社会創造事業 ACCEL「スーパーバイオイメジャーの開発」へと展開しており、今後の成果が期待される場所である。

社会・経済への貢献という視点を強く意識した取り組みは、すでに実用段階レベルの研究成果や、研究開発支援を進めることにより実用化が射程距離に入るとされる研究成果を生み出しており、今後の科学・医療・産業領域を牽引するキーデバイスの一つになると期待できる。また、テキスタイル型情報通信端末の社会実装を目的に、2015 年 11 月にスピンアウトさせた ERATO 発ベンチャー「株式会社 Xenoma」では、出資型新事業創出支援プログ

ラム SUCCESS の下、プロジェクト成果事業化の先鋒を担っていることも注目したい。

以上を総合し、本プロジェクトは、世界に先駆けた新たな構想をもとに挑戦的な目標を掲げ、染谷総括の強力なリーダーシップの下に異分野融合・産学・国内外連携を進めた結果、戦略目標に資する成果を十分に得るとともに、新たなコンセプトを創成したものであり、今後もグローバルなレベルで一層の発展が期待できるものと評価される。新たな価値を創出しつつあり、新規市場開拓につながり、我が国の競争力強化へと発展することを期待する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

高度情報社会を支える基盤技術であるエレクトロニクスにおいて、従来のシリコンに代表される無機材料とは異なる、柔らかく、かつ生体との適合が期待できる有機材料を用いた次のフェーズの研究開発活動が、現在急速に広がりつつある。この有機材料の特異的な機能を生かしたバイオエレクトロニクス・バイオインターフェースの研究分野は、環境・エネルギー・医療・ヘルスケアなど幅広い分野への応用が可能であり、エレクトロニクスと環境や生体、ひいては人間と「調和」、「融合」する新しいデバイスの実現が期待されるため、開発競争が世界中で繰り広げられている。この開発競争において、既存のシリコンによる「固いデバイス」を、有機デバイスの特性を活かし補完する染谷らの独自手法は、この研究分野を制する新ビジョンとして世界から注目されている。一方、細胞間のネットワークを可視化できるインプラントブル（生体内への埋め込みが可能な）フレキシブル生体計測デバイスも、生体情報のモニタリング、医療診断をはじめ様々な応用分野に繋がることを期待され、国際的にも活発な研究開発が行われている。

この背景の中、染谷研究総括は、「生体とエレクトロニクスを調和・融合させる」という基本コンセプトを掲げ、生体内における神経細胞とエレクトロニクスを有機的に結びつける新しいデバイスの実現を目指した。具体的には、「生体適合性・密着性」、「大面積・高精細計測」、「マルチ信号入出力」の特徴を備えた「体内埋め込み型のフレキシブル生体計測デバイス」の開発を目指した。この神経細胞ネットワークを生体適合材料によるデバイスにより直接計測することを可能にする技術の開発、それを用いた神経細胞のネットワークの解明は、戦略目標「神経細胞ネットワークの形成・動作の制御機構の解明」に資するものであり、また脳科学等への影響は大きなものと期待されるものである。さらに、プロジェクト活動を上記当初目標のみに限定せず、プロジェクトの途中で有機デバイスの開発動向を見据え、人体の外側から生体情報をモニターする「ウェアラブルな（身につけられる）生体計測システム」へと研究領域を広げた。この判断は、本プロジェクトにおける特筆すべき優れた点と言えよう。

以上のように、インプラントブル／ウェアラブル・テキスタイル領域に適用可能なセンサー等、大面積かつ柔軟性・伸縮性を有する超薄型フレキシブル有機デバイスは、医療・福祉・健康・介護を含む人間を取り巻く様々なヒューマンインターフェース分野への貢献が期待される所であり、世界に先駆けた、挑戦的かつ新規コンセプトを創成した本「生体調和エレクトロニクス」プロジェクトの構想は、極めて意義深く優れたものと高く評価できる。

1-2. プロジェクトの目標・計画

本プロジェクトでは、「体内埋め込み型のフレキシブル生体計測デバイス」、「ウェアラブルな生体計測システム」の開発に必要な「超薄型フレキシブル有機デバイス」の特徴を、「生体適合性・密着性」、「大面積・高精細計測」、「マルチ信号入出力」であると明確に示した。その上で、これらの実現へ向け、プロジェクト発足当初から、細胞内の重要な情報伝達回路を担うカルシウムシグナリングや筋収縮等マクロな個体機能と密接に係わるカルシウムイオン応答性ハイドロゲルのインク化技術の開発、生体プローブの大規模な信号読み出しを実現するバイオアクティブマトリックス（超薄型読み出し集積回路）の開発、生体組織への親和性・安全性評価の研究も含めた、フレキシブルデバイスの生体埋め込みと神経細胞とのクロストークの実現等につき、極めて的確かつ効果的な研究計画を設けた。また、この計画遂行のために、研究総括らが従前から実施していた、柔軟で伸縮性をもつデバイス用部材としての導電材料研究をもとに、更に生体適合性を付与することで生体との親和性を持つフレキシブル部材の開発を行った。このような技術・方法論は、本プロジェクトの戦略的目標の実現へ向けた合理的な設定と言える。さらに、デバイスの研究開発と並行してその効果を確認・検証するステージを設け、当初の目標に加え、医用やヘルスケアやIoTの進展に対応した目標や計画を再設定したことは、適切な対応であったと言える。一方、基礎研究的な側面と実用化・産業化という側面を内包している本プロジェクトは、計画立案・遂行の難しさがあったが、これも個々のグループ目標設定により、適切に対応したと言える。

1-3. プロジェクトの運営

プロジェクトの運営体制として当初より設定した、バイオインクグループ（東京工業大学）・バイオ印刷グループ（東京大学）・生体調和イメージンググループ（東京大学）は十分に的確かつ効果的に機能した。これらのグループの活動は、2014年度に、バイオインクグループの名称を生体調和電子材料グループへと変更し、さらに、プロジェクト成果の実用化見極めを目的としたインターフェースグループ（東京大学）、医療現場でのデバイス評価を目的とした医用電子グループ（大阪大学）を新設した実施体制へと拡大した。さらに、サブテーマレベルとして、3つの委託研究（東大生産研、九州大学、東レ（株）先端材料技術研究所）を設定し、これらを含め研究開発色の強いテーマの推進には、海外の研究機関との共同研究を含めた大学を中心とした体制、応用・実用化へ向けてはインターフェースグループを中核とする民間企業が参画した産学連携体制、さらに、イメージングについては医学研究系組織が参画した医工連携体制を敷いた。これらの体制は、研究総括のリーダーシップの下、互いにビジョンを共有し、拠点間の連携や役割分担を明確にしなが、極めて的確かつ効果的に運用された。

プロジェクト遂行に相応しい人材についても適切に集められた。特に専門の異なる優秀な若手研究者を内外から結集し、活躍の場を与えた。国内外の研究者や産業界、臨床医グループとの連携もなされた。

外部発表に関しては、Nature、Nature sister 系ジャーナルへの多数の発表、半導体集積回路技術に関する国際会議であるISSCC（International Solid-State Circuits Conference）での3年連続発表など、ハイインパクトなジャーナル掲載や国際会議発表等での高い評価を得ており、達成度は十分である。知的財産権の取得に関しても、プロジェクト全体として方法論が良く考えられており、プロジェクトヘッドクォーターの知的財産権利

化支援の下、プロジェクト発足当初から検討を始める等、効果的に遂行した。今後も企業が期待する技術・システム応用に関するマーケティングの必要性を認識しつつ、デバイスや材料に対する性能や機能のニーズを先取りし、信頼性や寿命の向上にも差別化のアイデアを導入して、産業界の関心も高い実用化に繋げて頂きたい。

また、今後は海外との共同研究の進め方や、特に材料やデバイスのノウハウの提供についての戦略が更に重要となろう。ERATO の成果活用と潜在市場の掘り起こしを目指し設立した「フレキシブル医療 IT 研究会」も、法人会員 100 社以上と活動を行っており、今後の知財活用につながる事が期待される。また、現在、取り組み・拡大中の海外も含めたネットワーク構築を更に推進し、今後の研究プロジェクトのロールモデルになるであろう。

今後、分野間・レイヤー間融合を進めるとともに、医療応用に関しては、AMED（国立研究開発法人 日本医療研究開発機構）との情報共有も引き続き進めて頂きたい。

[研究プロジェクトの全体構想] [研究プロジェクトの目標・計画] [研究プロジェクトの運営]

a+（十分に的確かつ効果的である）

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. 生体調和電子材料グループ（旧バイオインクグループ）

本グループの目標は、生体適合性・導電性を有するバイオゲルインクの開発と、生体プローブへの応用であり、特に、生体組織に接触可能なフレキシブルデバイスに用いる化学センサー材料の開発は、挑戦的な課題と言える。また、本グループにおける検討課題である①基板上に固定化可能な高分子カルシウムセンサーの開発と、②トリプチン誘導体による高秩序な大面積分子集積膜の開発は、いずれもバイオセンシングゲル、有機エレクトロニクスの基盤技術として極めて高い水準の研究である。

課題①では、架橋剤添加量に依存して膨潤度を調節できるイオン応答性ハイドロゲルを合成しており、さらに高い膨潤率を示す架橋条件（＝低架橋度）で作製されたゲルでは、カルシウムイオンに対して選択的な蛍光増強現象し、見かけの解離定数 K_d は mM オーダーと、細胞外のカルシウムイオン濃度に応答することが特徴とされている。このゲルを用い、高濃度カルシウムイオン環境における微小な濃度変化が検出可能なゲル状センサーを実現し、マウス脳スライスでのカルシウムイオン検出・人工細胞外液中のカルシウムイオン濃度変化の検出に成功した。これは当初目標「カルシウムイオンなど特定のイオンに応答する色素をゲル化したインクを実現し、生体適合性シートにパターンニングを施す」を達成していると言える。更に、光-化学的作用による画期的なセンシングデバイスとしての発展も期待される。励起光波長の紫外から青色へ長波長化も検討しており、有機 LED 等を用いた集積化デバイスの発展が期待できる。また、テトラフェニルエテン（TPE）は、海外の企業が圧倒的に強い試薬ビジネス（消耗品ビジネス）において、日本発の高利益率のビジネスの商材になる可能性がある。

一方、細胞外（高いカルシウムイオン濃度環境下）における細胞活動由来のカルシウムイオン濃度変化は、更に極めて小さいものなので、これを捉えられることを明らかにすることが、本成果の生理学的あるいは病理学的な有意性を決定づける鍵になると考えられる。生体の細胞外カルシウムイオン濃度である mM オーダーの高濃度域にて微小な濃度変化を検出

できるゲル状カルシウムイオンセンサー材料において、生体内に存在する塩基性タンパク質に対しても同様に蛍光性を示すという課題への対応を進め、タンパク質との会合を抑制する方法として、カルシウムイオンセンサー材料自体の改良を行い、センシング部位をオリゴエチレングリコールアクリレートによる生体適合性セグメントで被覆したスターポリマーの設計により、非特異タンパク質吸着を抑制することに成功したことは、センサーとしての信頼性を高めるものであり実用化へ向けた取り組みとして高い評価に値する。

課題②は、半導体—電極界面の構造制御技術であり、高度な巨視的配向を有する結晶試料作製が *Science* 誌に掲載されるなど、国内外で高い評価を得ている。刺激応答性分子薄膜やオルガノゲルへの応用が意図されており、分子設計そのもののユニークさも相俟って興味深い。この分子薄膜の応用範囲は、生体応用可能な分子ナノアクチュエータへの展開も含め、広く発展も期待でき、そのための材料合成や特性解析を行ったことは高い評価に値する。

一方、大面積の有機分子薄膜形成と巨視的配向制御については、ERATO 國武プロジェクトの先駆的成果に対する、トリプチセン膜ならではの特徴の明確化も重要である。トリプチセン膜上に蒸着された有機半導体であるジナフトチエノチオフェン (DNNT) の構造規則性が増大するためにトランジスタ特性が向上するなどの興味深い知見も得られており、大変高く評価される。今後、トリプチセン膜上において DNNT の蒸着が速度論的、熱力学的にどのように制御されるかの更なる解析が待たれるところである。

2-2. バイオ印刷グループ

本グループの目標は、生体内あるいは生体表面とクロストークできるバイオ有機デバイスの作製である。1 μ 。厚のポリマー(PET、PEN)フィルム上に、厚み 19 nm のアルミウム酸化膜ならびに長鎖ホスホン酸からなるハイブリッドゲート絶縁膜を形成させる技術を確認し、有機トランジスタからなるアクティブマトリックススイッチアレイの作製に成功したことは、生体表面を追従可能なフレキシブルデバイス実現として、*Nature* 誌に掲載されるなど、極めてインパクトの高い優れた成果と評価される。本技術を用いた有機トランジスタは、熱的にも安定であり、高温滅菌処理に耐える構造（性能）であることも確認している。

また、ロタキサンゲル-PVA 複合体の粘着性ゲルを用いた有機トランジスタグリッドからなる粘着性ゲルセンサーは、ラットの心臓に装着して生理電気信号をモニタリングできることも実証されている。これらの成果は、有機フレキシブルデバイスの生体適用性を十二分に示しており、達成度は申し分ない。特に、オートクレーブ可能な有機トランジスタや、高いガスバリア性を持つパリレン/SiON 積層封止膜を適用した発光素子は、生体適用にとって極めて重要かつ特筆すべき成果である。

また、生体情報モニタリング用プリンタブルデバイス作製の要素技術としては、生体適合性の電極や、プリント可能な伸縮性の電子導体（導電性インク）、微弱生体信号を直下で増幅する有機アンプも要求される。生体適合性電極としては、縞状粘着性ゲルからなる水溶性の CNT ゲルを用いる手法を、導電性インクとしては、既存の材料や分散液を用いて導電性銀フレークの高密度層を形成する、伸張可能な高伝導性のインク作製手法を開発している。また、有機トランジスタを回路として集積化・システム化し、一つのアプリケーションとして提示したところは意義深い。透明圧力センサーアクティブマトリックスの開発や、プリンタブル体温計への応用、多点計測が可能な筋電検出用のフレキシブルアンプやワイヤレス有機センサーシステムの開発などは、ヘルスケア・介護への展開が期待される。生体内埋植と並んでこれらの応用はフレキシブル有機デバイスに適したものであり、有機 LED、有機太

陽電池への応用とならび新たな産業応用展開への道を切り拓いたと言える。

一方、システム構成時の、センシング・読み出しスピードや、解析スピード、電力効率や温度上昇への対策は、これからの検討課題と思われる。パリレン/SiON 積層封止膜も、有機材料のデバイス寿命を1週間以上向上できるキー技術であるが、応用面、特に医療用へのプロトタイプとしては、より一層の高寿命化・信頼性を、産業界や研究会・学会で議論・進展されることを期待する。材料、デバイス、出口イメージや新しいコンセプトの明確化まで、レイヤー間の連携・融合されており、特に、生体調和イメージンググループとの連携により超薄型有機イメージング素子を開発できたことは、出口応用の明確な成果であり、高い評価に値する。

2-3. 医用電子システムグループ

フレキシブルなインプラントデバイス医療現場でのニーズを、阪大医学部心臓血管外科ならびに脳神経外科との連携により明確にしなが、材料やデバイスの要求性能にフィードバックし、生体調和エレクトロニクス適用の可能性を追求していく本グループの研究の進め方は、他には無い特徴があり高く評価できる。超薄膜生体信号電極の開発は、医療デバイスとして期待できる顕著な成果と言える。心臓をはじめとする動く臓器については、本プロジェクトにおける直接部位に密着するデバイスが、より正確で高速なセンシング手段となると期待できる。また、研究の中で、デバイスの長寿命性に着目していることは、高い信頼性を確保するために良い視点である。

今後は、既存のフレキシブル電極アレイに対する優位性を示すとともに、長期完全埋植が可能で超多点電極をいかにして実現するかが課題となる。インプラント脳用柔軟電極として開発した、多チャンネル脳電位センサーシートと脳電位センサーニードルをラットの脳へ2カ月埋込み、脳活動電位計測に成功したことは、今後の実用化へと大きく前進したと言える。引き続き臨床医との連携をもとに実用化への発展と、機能性を付加した新たな技術の創出を期待する。

2-4. 生体調和イメージンググループ

フレキシブル有機デバイスについて、動物実験を通し、生体調和デバイスとしての有用性を明らかにすることを目的とし、体内埋め込みデバイスに必要な柔らかさや、細胞・生体分子の情報量に着目した質の高い研究を実施した。特にフレキシブル有機LEDによる神経の光刺激は新たな用途であり、柔軟な特徴を活かした面刺激ができる神経への光刺激デバイスとして、光ファイバーやGa₂N系LEDに比べて優位性がある。これらの成果は今後、光刺激と投薬の組み合わせによる機能回復等、医療現場や創薬試験などにも大きな貢献が期待できる。

一方、fMRI画像について、MRIの限界や解析方法も熟知した上で、生体密着型イメージングデバイスの開発と、MRIとの融合を目指している点で、着実な成果があがりつつあるが、脳のMRIと脳表面のオプトジェネティクスやカルシウムイオンセンシングの融合手法等の解析などは、近い将来の課題になる可能性がある。また、バイオ印刷グループが開発したフレキシブルなポリマーPTC温度センサーを用い、体温付近の温度を多点観測することに成功するなど、意義ある成果が得られていると判断する。さらに、皮膚に密着するレベルの高いフレキシブル性を有するイメージャー（スーパーバイオイメージャー）の開発を推進

し、血流に由来する脈波を、皮膚上で（皮膚に貼り付け）二次元マッピングできることを示したことは、本技術の応用として今後の応用の範囲の拡大を視差する大変重要な成果として未来社会創造事業 ACCEL 事業へと展開しており、広く実用化されることを期待したい。今後も医療関係者等との連携を継続し、医療やバイオの観点からも重要性の明確化を期待する。

2-5. インターフェースグループ

フレキシブルデバイスと周辺デバイスとのインターフェースは実用化にとって重要な課題であり、インターフェースグループがプロジェクト後半（2014年7月）に設立されたことは極めて効果的であり、Nature 主要誌をはじめとする多くの論文への掲載を果たすなど、国内外で高い評価を得ている。

また、耐久性の問題は残るものの、導電性インクによるテキスタイル伸縮性配線にも成功しており、重要なマイルストーンに到達している。さらに、「テキスタイル型生体情報通信端末」では、テキスタイル伸縮性配線とセンサーを組み合わせたシステム応用として、多点センサー実装のプロトタイプが試作され、着実に成果があがっていることが伺える。

さらに、メッシュ型生体融合センサーにおいて、皮膚呼吸が可能な皮膚貼り付け型ナノメッシュ電極の構造と生体適合性評価とデバイス応用の面で大きな進展があったことは喜ばしいことである。伸縮性を保ち長時間装着が可能であること、皮膚刺激や免疫反応を起こさないこと、大面積化が可能なこと、電極の接続の工夫など、本プロジェクトの直接の出口応用の高い可能性として、明らかな成果が得られている。

今後は、電源供給方法・コネクタの重量・センシングや読み出しのスピード・解析のスピードなどを考慮したシステム化が進められることを期待する。本プロジェクトの出口を担う重要なグループとして、実用化志向の強い、高い目標仕様に向けた研究開発が求められた本グループの活動成果が、強度や信頼性の高度化を進めた上で、ICT技術と融合することにより、立ち遅れているわが国のICT（医療に限らず）技術活用が一気に飛躍するチャンスをもたらすものと期待したい。

以上に基づき研究成果を俯瞰すると、生体とエレクトロニクスを強く調和させ融合する新しいデバイス開発という点で目標に対する達成度は十分と言える。生体内で微弱な電気・化学信号を伝達し合う神経細胞とエレクトロニクスを結びつける全く新しいデバイスは、生体内埋植という極めて厳しい環境への適用に果敢に挑戦し、超柔軟性・オートクレーブ可能・耐ガスバリア性の実現という有機デバイスの常識を打ち破る成果として結実している。特に、既存の技術と比較してフレキシブルデバイスとして大面積化が可能な技術の基盤が得られたことは極めて意義が大きい。

また、非侵襲性である皮膚に貼り付けるセンサーなど、生体外への応用、ヘルスケアや介護などへの適用とその有用性を実証したことは、新たな展開として特筆すべきことであり、本デバイスが社会より強く求められている分野と言えよう。ナノメッシュ電極の評価を行い、本方式の生体適合性が従前のものより優れていることが確認できたことは、今後の実用化に加速するのではないかと期待したい。

研究総括のリーダーシップの下、プロジェクト運営もスムーズであった。ビジョンを共有し、拠点間連携や役割分担も明確にしながら進められた。さらに本プロジェクトを通じて若手研究者の育成、異なる分野やレイヤーの融合、産学連携、海外研究機関との共同研究、なども強化された。

一方、将来開発デバイスにより取得したデータを解析するニーズも強くなろう。例えば、脳の MRI と脳表面のカルシウムイオンセンシングの融合手法などは、数理科学や計算科学の専門家との連携も有効であろう。同様に、医療応用に関し、スムーズな実用化を実現するためには、AMED による支援や海外との連携も今後重要になるであろう。

数多くのハイインパクトなジャーナルと国際会議での発表があり、論文および学会・会議での発表は十分に行われたと判断する。今後は海外との共同研究の進め方、特に材料やデバイスのノウハウの提供をどのように行うかなどの戦略も重要であろう。

知財権利化活動においては、国内・外国特許ともにバランスよく出願されており、知財権確保の取り組みとして、使う側（産業側）の興味の度合いも加味しながら出願するプロセスを採用するなど、強く価値の高い特許の獲得体制が機能した。今後も継続して、フレキシブル医療 IT 研究会活動等にて潜在市場を掘り起こし、知財活用に繋げることを期待する。特に、従来のコンソーシアムと異なり、技術のオープン化の重要性を認識しつつ海外も含む新たなネットワーク構築を進め、今後の研究プロジェクトのお手本になって頂きたい。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a+（十分に高い水準にある）

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

本プロジェクトで追求した、生体（人間）と親和性が高く、生体に負荷をかけないエレクトロニクス（特にセンサー）の実現は、自然のままの姿での生体センシングを可能とする。さらにフレキシブルデバイスからなる多数のセンサーの同時装着が実現できれば、単一のセンシングでは今まで見えてこなかった事象が見えてくる可能性も期待できる。その影響は、特定の科学領域に留まらず、様々な分野の研究において、多大な影響を与えるであろう。プロジェクト活動では、現時点におけるフレキシブルデバイスの極限の姿を、様々な学問分野の融合により明らかにしており、創出された多数の成果の、科学技術上のインパクトや、国内外の先行・競合研究と比較した際のレベル・重要度は、国際的に高く評価される先導的・独創的なものである。特にトリプチセン分子薄膜により表面修飾された有機トランジスタの特性向上とそれを支える材料・プロセス研究内容は、国際的にみても最高のレベルであり、先導的・独創的なものである。また、インプラント可能なゲル生体計測システムとその部材開発は、特に脳に代表される生体の様々な神経回路の応答特性や活動などを明らかにする際の一助としての貢献も期待される。なお、ヘルスケア関係の研究開発活動は、SICORP や、未来社会創造事業 ACCEL へと展開しており、今後の成果が期待される場所である。

以上のように、本プロジェクトは、フレキシブルデバイス研究における、革新的な科学技術の芽・或いは将来の新しい流れ・分野を生み出し、それを新たな科学分野への展開へと繋げたものと言え、科学技術への貢献は非常に大きいと評価できる。

3-2. 社会・経済への貢献

本プロジェクトで目指したフレキシブルデバイスは、人間社会を豊かにし、社会的課題の解決や新産業の創出とそれらに伴う経済発展へ貢献するポテンシャルを充分有する卓越した研究成果であると評価される。特に、脳神経回路の活動を詳細に調べ、科学的にも医療応用上でも、極めて広範かつ新たな領域を生むデバイスを開発したことは、今後、科学技術イ

ノーションに大きく寄与する展開が期待できる。さらに、ウェアラブル E-textile 生体計測システムや皮膚貼り付け型ナノメッシュセンサーも、本プロジェクトの出口応用として期待が大きい。ヘルスケアデバイスや介護用デバイス等は、生体との柔らかいインターフェースを実現する科学技術としての新たな産業の基盤になるとも期待される。また、本技術群は、人へのダイレクトな貢献に加え、医薬品のような間接的な人への貢献の可能性を有している点も評価したい。また、医薬品開発では、不必要な動物実験は避ける、あるいは最小限の動物個体数に抑えたいとの要求がある。人と親和性の高いエレクトロニクスを動物に適用することができれば、複数のセンサーをストレスなく実験動物に装着することで経時的・長期的、あるいは一度で複数種測定が可能となり、このような要望に応えることにつながるであろう。

これまで有機デバイスの特徴と言われてきたフレキシブル性を極限まで活かし、しかも耐久性・耐環境性を実現し、システムへの適用を可能とした点は、今後の新しい産業創出のてがかりとなる。基礎技術の開発はもとより、欧米で見られるような技術の組み合わせで一段と高いシステムを実証している点は、これまで基礎技術・基盤技術の研究開発が主であった日本の科学技術において極めて特異的なものである。

また、フレキシブル医療 IT 研究会の立ち上げなど、産学連携ネットワークを構築し、産業化の推進へ積極的に貢献しようとしている。既に複数の企業との共同研究契約を締結し、応用への可能性と課題について議論と実験を進めており、近い将来の経済的な貢献も期待される。なお、ERATO 発ベンチャー「株式会社 Xenoma」が、プロジェクト成果の一つであるテキスタイル型情報通信端末の社会実装を実施していることも、プロジェクトの大きな成果の一つと言えよう。

〔科学技術への貢献〕〔社会・経済への貢献〕 a+（十分な貢献が期待できる）

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

教授転出1名、講師昇任1名、助教昇任2名（以上、国内）、Assistant Professor 就任2名（海外）、グループリーダーの大型プロジェクトにおけるリーダーへの就任、本プロジェクト成果起業の為の転出者等、若手研究者の人材育成は成功している。また、分野融合的研究によるスキル向上は、若手研究員にとり重要な意義をもつであろう。さらに、学生との係わりでは、プロジェクト側と学生側双方のメリットとなる進め方（特に委嘱時の契約において厳格な守秘義務を課すことによる研究のプロとしての意識醸成等）や、それによって企業からの信用を得る姿勢を見せる等のやり方は、これまでの教育にはおよそ含まれることが少ない視点であり、意欲的な育成が進められていると評価出来る。

月1回のミーティング、年1回3日間の集中討議、プロジェクトリーダー自身が各グループを訪れる2週間に1回の個別ミーティング等や、海外から本プロジェクトへ多数参加しているポスドクとの研究活動における係わりは、若手研究者が研究動向を知り、自らを省みる機会として理想的であったと言える。

4-2. アウトリーチ活動

積極的なアウトリーチ活動が行われており、プレスリリース17回、展示会13回、多数の報道実績、一般・高校生・中学生に対する多くの出張授業／講演など、広く成果を社会に

普及させている。これらアウトリーチ活動の取り組みは、今後の科学技術を担う次世代の研究者・技術者に良い刺激があったものと推測する。

一方、市民講座・出張授業などの直接的なコミュニケーションに加え、Youtube の JST チャンネルなど優れたアウトリーチ活動を行っているので、これを今後も継続して欲しい。また、今後、産業化の推進を考えると、産業界へのドライブフォース拡大のために、コンソーシアム的な活動や個別企業との契約締結に加え、標準化など日本を中心にしながらも海外産業界も視野に入れると良いであろう。

5. 総合評価

戦略目標の達成に資する成果は十分に得られている。フレキシブル有機デバイスの脳科学への応用を見据えた成果も出ている。それに加え、新たに、ヘルスケア・介護の分野へのフレキシブル有機デバイスの応用が展開されており、特筆すべき成果が多く出ている。

産業的な視点でみると、すでに実用段階にあると思われるもの、さらに研究開発支援を行うことにより実用化が射程距離に入ると思われるものがあるが、どれも産業・科学技術への貢献を強く意識した取り組みであり、今後のわが国の科学・医療・社会ニーズが大きくなるであろうヒューマンインターフェース等の領域を牽引するひとつのキーデバイスになると期待する。

また、ハイインパクトなジャーナルに高品質の論文を掲載するなど、国際的にも高いプレゼンスを得ている。若い研究統括のもと、多くの優れた研究者が異分野融合における良い成果をあげており、プロジェクトとして大変よく機能していると思われる。個々のグループでみると、メインのバイオ印刷グループの活動成果は素晴らしいものがあり、数多くのハイインパクトジャーナル、著名な国際会議への採択や招待講演等は、高く評価される。生体調和電子材料グループ（旧バイオインクグループ）では、特にトリプチセン分子薄膜による表面修飾に関する成果は特筆すべきものであり、有機トランジスタの性能向上にとってキーとなる技術と言える。生体調和イメージンググループでは、オプトジェネティクスという重要な応用を見出している点が評価される。医用電子システムグループでは、フレキシブル有機デバイスの生体内埋植への応用を見据えた研究内容は素晴らしいものがあり、脳科学への応用はもちろん医療応用への展開も期待できる。インターフェースグループでは、皮膚呼吸が可能な皮膚貼り付け型ナノメッシュ電極の構造と生体適合性評価とデバイス応用の面で大きな進展があり、本プロジェクトの直接の出口応用の高い可能性が明らかな成果が得られている。

これらは、染谷研究総括の卓越した将来への洞察を原資とした挑戦的かつ独創性の高い構想に基づき、出口の大きな方向性と社会への展開を意識した研究戦略によるボトムアップ・シーズドリブンの研究が結実したものであると言えよう。

また、世界に先駆けた新たな構想であり、挑戦的な目標達成へ向け、異分野融合・産学・国内外の連携の下、新規コンセプトの創生へ繋げたことは高い評価に値し、本プロジェクトは、ERATO 制度の特徴を最大限に発揮したものであると評価する。今後は要素技術の連携・統合を一層進め、本分野をグローバル視点で考察し、さらなる発展と実用化への貢献を実現すること期待する。

〔総合評価〕 A+（戦略目標の達成に資する十分な成果が得られた）

以上