

## さきがけ研究領域「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」

### 追跡評価報告書

#### 総合所見

本研究領域は、シリコン CMOS を超える新しい原理を取り入れる「Beyond CMOS」に焦点を当てて材料開拓とプロセス開発を進めるという戦略目標を達成するうえで、①非シリコン系材料による次世代デバイス、②光・電気・磁気の融合・変換を利用した新規なデバイス、③ナノ・分子サイズの加工による新規なデバイス、④薄形、軽量で湾曲性・屈曲性・耐衝撃性をもつ携帯デバイスという 4 種のデバイスの開拓を目指す材料開発とプロセス開発を目標とした。この目標のもとに、採択・実施された 33 課題は、「さきがけ」としていずれも萌芽的、挑戦的な特色のある研究課題であり、いずれも研究終了後の継続研究に熱心に取り組む、研究期間中の成果をさらに発展させ、優れた研究開発成果へと繋がっている。具体的には、①新しいワイドギャップ半導体である酸化ガリウムを用いたトランジスタ、②電子スピンに関わる多くの新現象の発見やその制御と熱電変換への応用、シリコンゲルマニウムを利用した高速光変調、③半導体のコア・シェル構造をもつナノワイヤー形の微細トランジスタ、④カーボンナノチューブを利用したフレキシブルエレクトロニクスに関わる研究開発に特筆すべき発展が認められる。

企業と連携して応用を目指した研究開発については、研究期間中に得られた研究成果をベースに、民間企業によりレーザーテラヘルツ放射顕微鏡や小型 X 線管として実用化されている。社会的・経済的な波及効果に関しては報道発表件数が 366 件と多いことから十分に認められる。特許出願は研究期間中に国内・海外計 85 件(内登録 57 件)であったのに対し、研究終了後は国内・海外計 172 件(内登録 89 件)と倍増させた。さらに社会的にも大きな貢献として、スピントロニクスの教科書を出版するなど学問体系を確立したことが挙げられる。

研究期間中に得られたいくつかの傑出した研究成果は各々一つの分野を形成するほどに成長し、本研究領域の研究者は其中で指導的な役割を担い、分野を牽引していることから、若手研究者を育成するという重要な目的も十分に達成されている。実際に、33 名の内、26 名の研究者が 1 件当たり 1000 万円以上の研究助成金(計 82 件)を獲得して研究を継続・発展させた。発表論文数は研究期間中 583 報(このうち被引用数 Top10%以内は 139 報)、研究終了後 1058 報(同 164 報)と大きく増加させ、国際学会での招待講演も 733 件と際だった数である。さらに内閣府、総務省、NEDO などの実用化開発を支援する補助金を獲得して研究を進めている研究課題も多く、研究成果の社会実装に向けても積極的に取り組み、研究期間中の成果をベースにこれまでに複数の大型助成事業が進捗しており、本研究領域のメンバーがリーダーとして活躍している。

本研究領域では、次世代の科学技術を担う優れたリーダーとなる若手研究人材の発見と育成が行われ、その後のキャリアパスの開拓と継続的な研究資金の導入を可能にできる長

期的で卓越した研究成果が創出され、研究終了後 8 年～10 年の進展について極めて大きな成功を収めていると結論される。

以上より、各研究課題とも世界を先導する新学術の発展、あるいは実用化と社会実装に向けた取組を実施しており、本研究領域の成果は極めて高く評価できる。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

研究期間中に得られた高いレベルの研究成果を種として、研究終了後も非常に順調に研究が発展し、全般にわたって非常に生産的に研究が継続され、下記のように発展し、活用されている。

### ○発展状況：

研究終了後に出版した論文の合計は 1058 報であり、この数字は研究期間中の論文数の倍に近く、また、被引用数 Top0.1%論文が 4 報出しており、被引用数が 300 回を超えるものが 10 本以上あった。確実に分野を牽引する高インパクトの研究成果が順調に発表されている。また、メンバー全員で 733 件の招待講演を行っており、招待講演を 100 件近く行った研究者が 3 名もいることから若手研究者の育成を目的としている「さきがけ」としては期待通りの発展が認められる。また研究の質を測る指標の一つである受賞は、日本学士院学術奨励賞を筆頭に、5 名が日本学術振興会賞を受賞、2 名が文部科学大臣表彰されている。さらに、研究終了後に獲得した競争的資金は、ERATO が 1 件、SIP が 1 件、CREST が 3 件、科研費基盤 S が 4 件など大型の研究資金を得ており、「さきがけ」の個人研究成果をステップとして順調にグループ型の大きな研究が育っている。また、スピントロニクス分野においては新学術領域の総括班に複数メンバーが入り活躍していることも注目される。

### ○活用状況：

企業と連携した研究開発活動は多くのメンバーにより実施され、33 名中 24 名が何らかの形で企業との共同研究や共同開発を行っている。論文だけでなく特許に関しても、研究終了後の出願件数が研究期間中のほぼ倍に達しており、特筆すべきものとして、(株)明電舎との共同研究による CNT アレイ電子源を用いた小型 X 線管の実用化、(株)SCREEN ホールディングスとの共同研究による THz 波の計測イメージング装置の開発、研究成果をもとにしたベンチャー企業(株)ノベルクリスタルテクノロジーの設立などがあり、本研究領域の重要な成果として評価される。研究終了後の報道発表件数は 366 件あり、社会に向けての研究成果に関わる情報発信が十分に行われている。

この先 10～20 年で産業構造が大きく転換する中で、本研究領域の成果をベースとする更なる研究の新展開により、量子物質・新材料の開発を介してシリコン CMOS を超える新しい原理を取り入れる「Beyond CMOS」に焦点を当てた学術的なブレークスルーを実現すること、それらをベースとして、たとえば、量子情報処理技術、量子通信・量子中継処理技術、量子メモリー・量子センサー、への開発に繋げることにより、量子技術に基礎を置いた人工知能(AI)応用や現実的な問題を汎用的に解決するための基礎研究の重要な発展へと繋がるこ

とが期待される。

## 2. 研究成果から生み出された科学的・技術的および社会的・経済的な波及効果

### (1) 研究成果の科学的・技術的観点からの貢献

本研究領域で芽吹いた分野が研究終了後も順調に発展して育っており、いくつかの成果は世界的に見ても傑出しており、研究成果を通して科学的・技術的観点から貢献している。

#### ○科学的観点からの貢献：

「光・電気・磁気機能の多角的な融合・変換を利用した新規デバイス材料とプロセス」に関して、

- ①スピントロニクス関連の研究成果の進展がめざましく、齊藤らによる量子スピンゼーベック効果の発見やスピンゼーベック効果の力学的逆効果の発見があった。温度勾配の印加により、スピンゼーベック効果の結果生じるスピン流の生成と伝搬を観測し、生成したスピン流によって力学的振動が生じることを発見した。これらの成果は世界的規模で行われたスピントロニクスなどの研究やスピン流に関して発見された多くの新現象の基礎学理を提供した。齊藤らの研究論文の被引用回数は多く、世界的にも卓越した研究成果といえ、「誘電体スピントロニクス」という新しい研究分野の創出に繋がっている。
- ②村上らによるトポロジカル物質や、白石らの酸化物における新しいスピントロニクスにつながる重要な研究成果も出ており、本研究領域の成果を基盤として広範なスピントロニクス研究が展開されている。また、スピントロニクス以外では、水落らがダイヤモンド NV センターを用いた室温で稼働する超高感度磁場センサーを開発し、世界最高の感度を実現した。これらの成果は単電子スピン観測による量子情報処理技術への応用のみならず、MRI などへの応用を視野に入れた医療応用への波及効果が大きく、世界的レベルで注目されている研究成果である。また「さきがけ」の研究成果をベースにして NEXT, SCOPE, NEDO 等の多くの国家プロジェクト事業が行われている。

#### ○技術的観点からの貢献：

「非シリコン半導体による従来の CMOS を超える次世代デバイス用材料の開発とプロセス開発」に関して

- ①新型ワイドギャップ半導体酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) のパワーデバイス応用では、東脇らの成果が日本発の技術として世界的レベルで多くの論文引用があり、世界をリードし産業界への技術移転等にも活躍している。この成果は SIP のプロジェクトとして展開され、複数の研究機関、企業を巻き込んで応用に向けた技術開発が進められている。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  材料は日本が強いパワーデバイスにおいて GaN、SiC に代わる次世代材料として期待を集めており、研究終了後に東脇らが開発した MOSFET 構造がベースとなって、現在世界中で  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ -MOSFET の研究開発が活発に行われており、その波及効果は大きい。
- ②高橋有紀子らは磁性体研究の成果を元に、ハードディスクの高密度化の実現につながる技術を開発し、同技術を用いた製品が米国の大手ハードディスクメーカーよりサンプル

出荷されるに至っている。

以上より、研究期間中にスピントロニクス、新材料を中心にすでに新規分野を創出、牽引するような成果が複数出ていたが、研究終了後も、本研究領域で芽吹いた分野が順調に発展して育っている。研究成果は世界的に見ても傑出しており、2017年より3年連続でClarivate社のHighly Cited Researchers (Top0.1%) に選ばれたメンバー(齊藤)もいることは特筆に値する。

## (2) 研究成果の社会的・経済的観点からの貢献

本研究領域では、達成目標に沿った様々な新材料開発および新材料の応用研究を介して複数の社会実装に向けた取り組みが行われ、社会的・経済的観点から貢献している。

- ①新しいワイドギャップ半導体である酸化ガリウムは日本が強いパワーデバイスにおいてGaN, SiCに代わる新材料として期待を集めており、その広いバンドギャップと共に、作製コストの低さも応用側面で重要視されている。研究終了後、東協らが開発した技術が技術移転される方向で同材料の製造販売を行うベンチャー企業が設立され、SiCの1/3の価格での提供を目指しており、既に製造した基板で大電流動作素子製造が可能になっている。酸化ガリウムの研究開発は近年非常に活発化しているが、その中で同基板の製造販売を行うベンチャー企業をいち早く立ち上げたことで世界的な波及効果も期待される。
- ②野田らのカーボンナノチューブ研究の成果をもとに、カーボンナノチューブアレイ電子銃を用いた小型X線管に関する企業との共同研究開発が行われ、実用化される予定となっている。
- ③齊藤らが発見した新しい物理現象であるスピンゼーベック効果は熱電変換素子に応用でき、大面積、低コスト製造の可能性がある。IoTセンサー等の日常的な小型IT機器の電源への応用が期待されることから電機メーカーとの共同開発が開始され、本研究領域の成果の技術移転が行われている。また、同効果に関する技術開発の方向性を検討するアソシエーションを研究機関と産業界が協力して立ち上げている。
- ④計測・解析技術の応用に関しては、川山らがフェムト秒レーザーを材料に照射し、発生するTHz波を計測イメージングする技術を元に、メーカーと共同でレーザーテラヘルツ放射顕微鏡を開発している。この顕微鏡は既に太陽電池の表面電荷計測に応用されている。また、葛西らが開発したスピン計測・解析技術の一つはメーカーにおいて実用化に向けた研究開発が進行し、「揺らぎ」を利用した信号解析技術をベースにベンチャー会社とロボット制御の研究開発が行われた。

以上より、本研究領域は材料を中心とした基礎研究をベースとして上述のように数多くの応用に向けた取り組みが前進しており、重要な社会的・経済的な波及効果が認められる。

## (3) その他の特記すべき波及効果

本研究領域では33名のメンバーの内、18名が現在教授に昇進しており、そのうちの7名

は助教または講師からの昇格である。それらのメンバーは研究期間内に重要な研究成果を創出しており、人材のキャリアアップに重要な役割を果たした。メンバーのなかから「さきがけ」の研究総括や ERATO の研究総括を務める研究者も出ており、若手を育てる立場の研究者も着実に育っている。研究終了後の若手研究者個々の研究活動による発展と新しいキャリアパスへの転身のデータ、およびその結果から、「さきがけ」研究で培ったネットワーク型の共同研究や CREST、新学術領域（科研費）、ERATO などの次のステップに繋げた地道でダイナミックな研究を介して、世界に先駆けた「Beyond CMOS」のための中核的技術に到達出来るという大きな展望と可能性を感じさせる。さらに研究終了後にメンバーが連名でスピントロニクスに関する入門者向けの平易な日本語の教科書や専門家向けの英文教科書を出版しており、「さきがけ」研究者の連携によるスピントロニクス分野の啓蒙活動も進んでいることも特筆される。

### 3. その他

「さきがけ」研究の伝統的な研究環境は、高邁な目標に向かって大きく成長し、余裕のない現在のわが国の研究環境の中では特に希有なものであり、その伝統を維持・充実・発展させることが、人材育成を通じた将来の科学技術発展のためには極めて重要である。一方で、本研究領域では第一目的として「非シリコン系半導体による従来の CMOS を越える次世代デバイス用材料開拓とプロセス開発」を掲げているが、新材料を用いた新しいデバイス機能が実現したとしても、ギガ・バイトやテラ・バイトレベルでのシステム集積には、シリコン CMOS 半導体技術との融合を避けて通ることが出来ない。半導体デバイス技術の現状を深く理解した研究プロジェクトの企画立案を検討することが必要であり、このような観点からの研究目的を課すことにより、研究企画の幅を広げることが今後は重要となると考える。