

# 戦略的創造研究推進事業

## － 個人型研究（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」

## 研究領域事後評価用資料

平成25年3月5日

## 目次

1. 研究領域の概要 .....	1
(1) 戦略目標 .....	1
(2) 研究領域.....	1
(3) 研究総括.....	1
(4) 採択課題・研究費.....	2
2. 研究領域および研究総括の選定について.....	6
3. 研究総括のねらい.....	7
4. 研究課題の選考について.....	7
4-1. 選考についての考え方.....	7
4-2. 「募集・選考・研究領域運営にあたっての方針」 .....	9
4-3. 選考の進め方.....	11
5. 領域アドバイザーについて.....	11
6. 研究領域の運営の状況について.....	12
6-1. 研究環境に対する支援.....	12
6-2. 研究の方向性決定に対する支援.....	13
6-3. タイムリーな対応への取り組み.....	14
6-4. 情報発信.....	14
7. 領域のねらいに対する成果の達成状況.....	16
7-1. 科学技術の進歩への貢献.....	17
7-2. 具体的応用への展開.....	20
7-3. 将来の科学技術イノベーションに資する成果.....	23
7-4. チャレンジングな課題であり、将来性が見込まれる成果.....	25
8. 総合所見.....	26

## 1. 研究領域の概要

### (1) 戦略目標

「新原理・新機能・新構造デバイス実現のための材料開拓とナノプロセス開発」

この戦略目標は、2005年にITRSロードマップが半導体デバイスの微細化がハーフピッチ22nmの極限を迎えるに当たって掲げた3つの戦略、すなわち、Mooreの法則をさらに伸ばす「More Moore」、従来の半導体デバイスにない機能を付加する「More than Moore」、さらにシリコンCMOSを超える新しい原理を取り入れる「Beyond CMOS」のうち、beyond CMOSに焦点を当て、その材料開拓とプロセス開発を進めることを目標として策定されたものです。この中で文部科学省は、「戦略事業実施期間中に達成を目指す研究目標」として、(1)非シリコン系半導体(GaAs、InSbなどの化合物半導体、GaN、AlN、ダイヤモンドなどのワイドギャップ半導体)による従来のCMOSを超える次世代デバイス用材料、(2)光・電気・磁気機能の多面的な融合・変換を利用して新規なデバイスの構築を可能にする材料、(3)ナノレベル・分子レベルでの加工により新規なデバイスの構築を可能にする材料、(4)薄く、軽量で、湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する携帯デバイス用の材料の4項目について開拓とプロセス開発を進めることを求めました。

また、本戦略目標は既存のシリコンデバイスの特性を超越する新概念・新構造に基づく次世代デバイスの創製を目指すものであり、「ナノ・材料」分野の戦略重点科学技術のうち、次の3つに密接に関係いたします。

- ① イノベーションを生む中核となる革新的材料・プロセス技術
- ⑤ デバイスの性能の限界を突破する先端エレクトロニクス
- ⑨ ナノ領域最先端計測・加工技術

### (2) 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」(平成19年度発足)

この研究領域は、CMOSに代表される既存のシリコンデバイスを超える革新的な次世代デバイスを創成することを目標として、環境やエネルギー消費に配慮しつつ高速・大容量かつ高度な情報処理・情報蓄積・情報伝達を可能とする新しい材料の開拓およびプロセスの開発を図る挑戦的な研究を対象とするものです。

具体的には、高移動度ワイドギャップ半導体材料、スピントロニクス材料、高温超伝導体を含む強相関係材料、量子ドット材料、ナノカーボン材料、有機半導体材料などが挙げられますが、これらに限らず、将来のデバイス化を見据えた新しい材料または構造及びプロセスの開拓に向けた独創的な研究が含まれます。

### (3) 研究総括

氏名 佐藤 勝昭

(東京農工大学 名誉教授)

## (4) 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 上段：研究終了時 下段：応募時	研究課題	研究費※
平成 19年度	葛西 誠也	北海道大学 大学院 情報科学研究科 准教授 (同上)	確率共鳴を利用した新しい情報処理のためのナノデバイスと集積化	42
	齊藤 英治	東北大学 金属材料研究所 教授 (慶応義塾大学 理工学部 専任講師)	誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能	65
	白石 誠司	大阪大学 大学院 基礎工学研究科教授 (同上 准教授)	分子を介したスピン流の制御	49
	高橋 有紀子	物質・材料研究機構磁性材料センター 主幹研究員 (同上 主任研究員)	スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索	39
	谷山 智康	東京工業大学 応用セラミックス研究所 准教授 (同上)	スピン偏極の外的制御とチューナブルスピン源の創製	47
	塚本 新	日本大学 理工学部 講師 (同上)	フェムト秒パルス・レーザによる超高速スピン制御・計測	45
	深田 直樹	物質・材料研究機構 ナノアーキテクトニクス研究拠点 独立研究者 (物質・材料研究機構 半導体材料センター 主任研究員)	縦型立体構造デバイス実現に向けた半導体ナノワイヤの研究	47
	村上 修一	東京工業大学 大学院 理工学研究科 准教授	デバイス応用に向けたスピン流と熱流	28

		(東京大学大学院 工学系研究科 助教)	の結合理論	
	安田 剛	物質・材料研究機構 材料ラボ融合領域研究グループ 主任研究員 (九州大学 先導物質化学研究所 助教)	$\pi$ 共役高分子鎖内の超高速電荷輸送を利用した有機トランジスタ	4 2
	山口 明啓	慶応義塾大学 理工学部 助教 (同上)	ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明	4 0
	若林 克法	物質・材料研究機構 ナノアーキテクトニクス研究拠点 独立研究者 (広島大学 大学院 先端物質科学研究科 助教)	計算科学手法によるナノカーボン素子の設計と物性予測	3 2
平成 20年度	片山 竜二	東北大学金属材料研究所 准教授 (東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教)	極性ワイドギャップ半導体フォトリソナノ構造の新規光機能	4 7
	川山 巖	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 助教 (同上)	ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製	4 0
	寒川 義裕	九州大学応用力学研究所 准教授 (同上)	オンチップ光配線用窒化物基板の創製とシステム熱設計支援	4 0
	小林 航	筑波大学大学院数理物質科学研究科 助教 (早稲田大学高等研究所 助教)	サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発	3 3
	須崎 友文	東京工業大学応用セラミック研究所准教授 (同上)	ワイドギャップ酸化物における界面機能開発	4 0
	竹中 充	東京大学大学院工学系研究科 准教授 (同上)	光配線 L S I 実現に向けた Ge ナノ光電子集積回路の開発	5 1
	中岡 俊裕	上智大学理工学部 准教授	量子ドットを用いた単電子・スピン・光	3 9

		(東京大学生産技術研究所 特任准教授)	機能融合デバイス	
	浜屋 宏平	九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授 (同上 助教)	Si系半導体ナノ構造を基礎とした単一電子スピントランジスタの開発	45
	福村 知昭	(次世代最先端プログラムのため中断)	ワイドギャップ強磁性半導体デバイス	(38)
	水落 憲和	大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授 (筑波大学大学院図書館情報メディア研究科 講師)	ワイドギャップ半導体中の単一常磁性発光中心による量子情報素子	46
平成 21年度	海住 英生	北海道大学電子科学研究所 助教 (同上)	スピン量子十字素子を用いた新規な高性能不揮発性メモリの創製	52
	組頭 広志	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 教授 (東京大学大学院工学系研究科 准教授)	ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発	38
	高橋 和	大阪府立大学 21世紀科学研究機構 講師 (同上)	フォトリソニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザ-の開発	43
	富岡 克広	科学技術振興機構 さきがけ研究者 (北海道大学大学院 情報科学研究科 博士研究員)	Si/III-V族半導体超ヘテロ界面の機能化と低電力スイッチ素子の開発	36
	中野 幸司	東京農工大学大学院 工学研究院 講師 (東京大学大学院 工学系研究科 助教)	分子配列制御による有機トランジスタの高性能化	38
	中村 浩之	大阪大学大学院 基礎工学研究科 助教 (同上 特任助教)	誘電体トランジスタを用いたスピン操作	38
	西永 慈郎	早稲田大学高等研究所 准教授 (早稲田大学理工学術院 助教)	有機・無機半導体ヘテロ構造を用いた新規デバイスの開発	37
	野口 裕	千葉大学先進科学センター 助教	光制御型有機単一電子デバイスの開発	37

		(同上)		
	野田 優	早稲田大学先進理工学部 教授 (東京大学大学院 工学系研究科 准教授)	各種ナノカーボン構造体の自在実装	4 0
	東脇 正高	情報通信研究機構 未来 I C T 研究所 総括主任研究員 (同上 新世代ネットワーク研究センター 主任研究員)	Ⅲ族酸化物／窒化物半導体複合構造の界面制御とデバイス応用	3 5
	町田 友樹	東京大学 生産技術研究所 准教授 (同上)	グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現	3 4
	山本 浩史	自然科学研究機構 分子科学研究所 教授 (理化学研究所 基幹研究所 専任研究員)	電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発	4 3
			<b>総研究費</b>	<b>1 3 6 6</b>

※ 各研究課題とも3年間の見込みの総額

## 2. 研究領域および研究総括の選定について

戦略目標は beyond CMOS に焦点を当て、その材料開拓とプロセス開発を進めることでありました。研究領域は、研究者の独創的なアイデアを活かし、シリコン CMOS の延長ではない次世代エレクトロニクス・デバイスの実現に結びつく新しい材料の開拓、デバイス構造やプロセス開発を目指し、半導体・金属・セラミクスから有機材料までを扱う課題を幅広く採択することとしました。また、異なる材料を対象としている研究者間の相互交流を促進し、新しいアイデアが生まれる契機とするとともに、新しい原理・現象の発見・究明、それらに基づく新たなデバイスの創成を目指しました。

上記の実現には、幅広い分野に造詣が深く、関連分野の研究者からの信頼が厚い上、マネジメント能力を兼ね備えた人物を総括に選定する必要がありました。佐藤勝昭氏は、企業において光デバイスの研究開発に携わり、基礎研究と技術開発との連携の重要性を熟知していました。大学に移籍した後は磁気光学と半導体光物性を専門とし、結晶工学、超伝導体、青色発光材料、太陽電池、液晶材料など様々な研究に従事し、固体材料のみならず、有機材料について深い造詣がある上、専門外の分野にも寛容な人物でありました。また、東京農工大学理事・教育担当副学長、応用物理学会理事・評議員、応用物理学会論文誌出版委員を歴任されており、研究者からの信頼も厚く、公平な視点を持ち、マネジメント能力にも長けているとして総括として選定しました。

佐藤研究総括は課題募集時に当時あまり重要視されていなかった環境配慮型や低消費エネルギーにいち早く着目し、募集要項に明記した先見性がありました。選考ではデバイス応用を念頭に目利き能力を発揮し、挑戦的な課題を採択、3年間の募集で戦略目標の達成に資する課題を網羅しました。研究実施中は、サイトビジットなどを通じ、メンターとして研究内容の進捗確認だけでなく、研究者の上長にさきがけ研究の理解とともに研究環境の充実を依頼するなど研究者を支援しました。さきがけ研究者の研究者人生のことを考え、賞の推薦を積極的に行うとともに研究終了年度のサイトビジットではさきがけ期間中の研究の方向性とともに終了後の方向性も研究者に助言しました。また、マネージャーとして四半期毎に報告書を提出させ、きめ細かく研究状況を把握し、適時に予算配分できる体制を整え、研究の加速に貢献しました。異分野の交流促進では、当初はトップダウンの交流促進でありましたが、最終的には研究者が自主的にワークショップの開催を企画し、分野を超えた議論を深め、領域内外の共同研究が促進するところまでになりました。

佐藤研究総括の目利きおよびマネジメントの結果として領域として多くの成果が上がりました。

成果の代表例

齊藤研究者「絶縁体に電気信号を流すことに成功」

(2010年3月11日 JST プレス発表、13紙掲載 (JST 調べ))



富岡研究者「トランジスタの理論限界を突破―次世代省エネデバイス実現へ―」  
(2012年6月13日 JST プレス発表、12紙掲載 (JST 調べ))

### 3. 研究総括のねらい

現在、生活のすみずみに使われている半導体デバイスで、現在の主流となっているのは、シリコンのCMOSという集積回路です。これまでムーアの法則に従って、微細化・集積化が進んできました。しかし、これ以上高密度に集積化する限界が間もなくおとされます。エネルギーの消費を抑え高速な情報処理が行われるためのデバイスを開発するには新しいコンセプト、新しい材料、あたらしいプロセスが必要となります。

本戦略では、以下の技術領域における材料開拓とそれらのデバイス化に向けたプロセス開発により、次世代ナノエレクトロニクスデバイスの実現につながるイノベーションを創出することを目標としました。ターゲットは、Beyond CMOS (CMOSに代表される既存のシリコンデバイスを超える)の革新的な次世代デバイスを創成することを目標として、環境やエネルギー消費に配慮しつつ高速・大容量かつ高度な情報処理・情報蓄積・情報伝達を可能とする新しい材料の開拓およびプロセスの開発を図る挑戦的な研究を対象とするものです。具体的には、高移動度ワイドギャップ半導体材料、スピントロニクス材料、高温超伝導体を含む強相関係材料、量子ドット材料、ナノカーボン材料、有機半導体材料などが挙げられます。

そこで、「募集に当たっての研究総括の方針」を次のように設定しました。すなわち、「この研究領域は、CMOSに代表される既存のシリコンデバイスを超える革新的な次世代デバイスを創成することを目標として、環境やエネルギー消費に配慮しつつ高速・大容量かつ高度な情報処理・情報蓄積・情報伝達を可能とする新しい材料の開拓およびプロセスの開発を図る挑戦的な研究を対象とするものです。具体的には、高移動度ワイドギャップ半導体材料、スピントロニクス材料、高温超伝導体を含む強相関係材料、量子ドット材料、ナノカーボン材料、有機半導体材料などが挙げられますが、これらに限らず、将来のデバイス化を見据えた新しい材料または構造及びプロセスの開拓に向けた独創的な研究が含まれます。」として公募を行い、戦略目標に資する成果を目指しました。

### 4. 研究課題の選考について

#### 4-1. 選考についての考え方

選考については、戦略目標に沿って領域の概要にあるように広い分野から採択できるように配慮しました。

初年度は、研究総括の専門分野であるスピントロニクスに関する応募が7割をしめ、採択者もスピントロニクスに関するテーマの研究者が多くなりました。次年度は、領域アドバイザーを等通じて広くワイドギャップ半導体関係の研究者に周知していただ

き、その分野の応募が増えました。最終年度は採択者が少なかった分子および有機関係のテーマについて、積極的に公募を周知し、結果として有機／分子に関する研究テーマの課題を採択することができました。全体として、当初計画した研究分野の課題を網羅できました。下記に採択後の研究者とアドバイザーの研究分野に関する分類表を載せます。

また、研究提案が材料合成のみ等では不十分で、デバイスに結び付くビジョンがない場合は不採択としました。採択によって領域としての目標達成の60%が決まると考えます。

分類表

材料による 分類 研究分野 による分類	酸化物、 WG 半導体、 ダイヤモンド	半導体 ナノ構造	金属・合金・ 複合	分子、 有機	アドバイザー
強相関・超伝導エ レクトロニクス	川山				藤巻、岡本、 谷垣
フォトニクス・フ ォトスピニクス	片山	中岡、高橋_和	塚本	野口	五明、小森、 岡本
スピントロニク ス	齊籐、谷山、 福村、水落、 中村	浜屋	高橋_有、村上、 谷山、山口	白石、海住	高梨、栗野、 谷垣
ナノデバイス	須崎、組頭、 東脇	葛西、深田、 中岡、竹中、 富岡		若林、安田、 町田、野口、 中野、西永、 山本	五明、波多野、 小田、小森、 名西
サーモエレクト ロニクス	小林		村上	村上	波多野、栗野
プロセス	寒川	富岡		安田、野田、 中野	工藤、名西
アドバイザー	藤巻、岡本、 名西、栗野	小田、五明、 波多野、小森、	高梨、谷垣	工藤、岡本 栗野、谷垣	

#### 4-2. 「募集・選考・研究領域運営にあたっての方針」

戦略目標に沿った採択ができるように、年度ごとに以下の「募集・選考・研究領域運営にあたっての方針」を公開し、課題を募集するとともにアドバイザー等、関係者に働きかけて広く周知することに努めました。（下線部分が各年度のポイント）

##### (1) 平成19年度

CMOS に代表される既存のシリコンデバイスには微細化の限界が目前に迫っており、従来とは異なる革新的な原理に基づいた新規デバイスの開発が求められています。そこで、この研究領域では、CMOS の延長ではない次世代エレクトロニクス・デバイスの実現に結びつく新しい材料の開拓、デバイス構造やプロセスの開発に向けた独創的かつ挑戦的な研究提案を募集します。

上記の「エレクトロニクス・デバイス」とは、電荷を制御・輸送する従来型のデバイスにとらわれず、スピン、軌道状態、準粒子、ボルテクス、光位相などさまざまな物理量、あるいは、それらの複合体の制御・輸送・蓄積を行うデバイスを含めます。

対象となる材料は特に限定せず、半導体、金属、セラミクス、有機材料まで幅広く捉えています。

選考にあたっては、将来の産業化を見据えた提案であるかどうかを重視しますが、現行の技術水準をもってしては実用化が困難なデバイスを目指していても、将来のイノベーションを見越して産業化が可能な提案であれば対象となります。

## (2) 平成20年度

この研究領域では、平成19年度より、CMOSの延長ではない次世代エレクトロニクス・デバイスの実現に結びつく新しい材料の開拓、デバイス構造やプロセスの開発に向けた独創的かつ挑戦的な研究提案を募集しております。ここで対象とするのは、電荷輸送を制御する従来型のデバイスに加え、スピン、軌道状態、準粒子、ボルテクス、光位相などのさまざまな物理量、あるいは、それらの複合体の制御・輸送・蓄積を行うデバイスで、対象となる材料は、半導体、金属、セラミクス、ナノカーボン、有機材料など幅広いものを考えています。

昨年度は、材料の探索／製造からデバイス／ネットワークの構築にわたる広い範囲の応募がありましたが、スピネレクトロニクスの研究分野に偏っておりました。今年度はさらに視野の広い研究領域としていきたいため、応募の少なかつたワイドギャップ半導体や有機材料を用いた革新的デバイスをめざす研究課題についても積極的な提案を歓迎します。選考にあたって、産業化を見据えた提案であるかどうかを重視しますが、現在では実現／実用化が困難な提案でも、将来の進展によっては産業化が可能な提案など、従来の原理を超える独創的かつ挑戦的な提案を期待します。

## (3) 平成21年度

本研究領域は平成19年度より、既存のシリコンデバイスを超える革新的デバイスを実現するための材料・プロセスの探索を目指して募集してまいりました。これまで2回の募集を通じて、スピントロニクス材料を中心に、ワイドギャップ材料、ナノカーボン、半導体ナノ構造、有機半導体、超伝導、強相関、サーモエレクトロニクス、新原理デバイスなど広い範囲にわたる分野から、チャレンジングな21課題を採択することができ、すでにめざましい成果をあげつつあります。今年度の募集にあたっては、上記分野に加えて、昨年度応募の少なかつた有機・分子系デバイス材料についても意欲的な研究計画の応募をお待ちしております。

本領域では、選考にあたって、単なる材料・プロセスではなく、材料のどのような機能を活かして次世代デバイスの実現を目指すのかという出口イメージを明確にした提案を重視してきました。今年度においても、この基本方針のもとに、現在の状況では実現が困難な提案でも将来の産業化の可能性があれば積極的に評価しますので、挑戦的で独創的な提案をどしどしお寄せください。また、大学・国公立研究所だけでなく、産業界からの提案も歓迎します。ただし個人型研究であることには十分配慮してください。

#### 4-3. 選考の進め方

一課題につき3名の評価者をアサインして書類審査を行いました。評価者としては領域アドバイザー11名に加え、専門性や利益相反の観点から時には外部評価者数名に入ってもらいました。書類審査結果に基づき書類選考会議において面接選考の対象者を選考しました。書類選考では、評価者の平均点によらず、1つでもA判定があるものを重視することにより、リスクがあるが挑戦的な提案を拾い上げる努力を行いました。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補者を選定しました。面接選考に当たっては、単純な合議制をとらず、最終判断を研究総括の責任で行う形をとりました。ダイバーシティへの配慮も十分におこないましたが、女性研究者の応募が少数にとどまり、1名しか採択することができませんでした。また、企業の研究者の採択はありませんでした。真に採択に値する研究提案を考慮したこともあり、公平な選定を行った結果であります。

#### 5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	所属	現役職	任期
栗野 祐二	慶応義塾大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
岡本 博	東京大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
小田 俊理	東京工業大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
工藤 一浩	千葉大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
五明 明子	日本電気株式会社	キャリア・アドバイザー	平成19年6月～平成25年3月
小森 和弘	産業技術総合研究所	副研究部門長	平成19年6月～平成25年3月
高梨 弘毅	東北大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
谷垣 勝己	東北大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
名西 徳之	立命館大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
波多野 睦子	東京工業大学	教授	平成19年6月～平成25年3月
藤巻 朗	名古屋大学	教授	平成19年6月～平成25年3月

アドバイザーの人選に当たっては、以下を考慮して検討しました。

- ・領域のねらいに記載した研究の分野を網羅するように広い研究分野から選任する
- ・領域会議にできるだけ出席できる時間をとれる方
- ・若く優秀な研究者をアドバイスできる指導力を持っている方
- ・大学関係者だけでなく、企業、独法など広い研究機関の関係者
- ・女性を含めること

結果的にではありますが、さきがけ経験者3名（岡本、小田、谷垣）およびCREST経験者1名（小森）が含まれており、自身の経験を踏まえた適切なアドバイスをいただけ、領域運営に効果的でした。研究分野も、研究総括が把握するスピントロニクスを始め、半導体、ナノカーボン、強相関係、光、超伝導、有機など広い分野の研究者を人選でき、目的にかなったアドバイザーの参加を獲得できました。

## 6. 研究領域の運営の状況について

（概要）

これまでの5年間に、領域会議を11回開催しました。領域会議では、毎回、アドバイザーによる各分野の最新の展開についての特別講演を頂いたほか、積極的に他のさきがけ領域の研究者を招き情報交換に努めました。合宿形式の領域会議においては、研究者同士のディスカッションが非常に盛んで、しばしば予定時間をオーバーして議論が沸騰し、継続討論会として深夜まで熱く語り合いました。

さらに、研究者からの要請により、2-3名の講演者とアドバイザー・研究者を含め10~15名程度の少人数によるミニワークショップをこれまでに10回開催し、領域会議では十分に議論し尽くしていない内容を1時間の話題提供と1時間のディスカッションというゆったりした時間配分で議論してきました。これが研究の進捗に大きな効果を見せました。また、CRESTとの連携ワークショップを開催し、異なる研究スタンス間での議論を通じて領域研究者を支えました。

研究総括は、四半期報と半期に1度の報告を求め、研究状況の把握に努めました。報告された進捗状況に応じて、研究費の増減、前倒し・繰り越しなど柔軟な運営に努めました。また、採択時、研究者の異動時、および最終年度にはサイトビジットを行い、研究環境の把握、研究方針の相談などに応じました。特に最終年度においては、「決して結果を求めるのではなく、後になって、あのときさきがけでやっておいたことが役に立ったといえるように、きちんとしたことをやりなさい」と申ししてきました。

さきがけには、人材育成という側面があります。さまざまな表彰の機会があれば、可能な限り推薦に努めました。この結果のべ 57 にのぼる受賞がありました。

詳細は以下の通りです。

### 6-1. 研究環境に対する支援

#### (1) 研究開始時のサイトビジット

研究開始直後に所属する研究機関へ研究総括、技術参事、および事務参事が訪問（サイトビジット）し、今後の研究の進め方についてアドバイスをするとともに、上司の先生にさきがけ研究遂行における研究環境の確保について説明し、ご理解と協力をいただきました。若いさきがけ研究者は予算、業務、研究実施場所等について、自由にできないケースも多々あり、研究総括が訪問して研究機関の理解を得ることは、さきがけ研究スタートに当たり重要なことでありました。

#### 研究総括（または技術参事）の研究実施場所訪問

研究開始時：	33 回
異動、昇任時：	10 回
最終年度訪問：	29 回
その他：	7 回

最終年度サイトビジットについては6－2項に記載してあります。

#### (2) 研究費の見直し

研究費は研究環境を整え、研究目標を達成する上で欠くことのできないものであり、研究者の置かれた環境によっては研究費見直しはさきがけ研究を遂行して行く上で重要な位置を占めます。齊藤研究者は平成21年度に慶応義塾大学講師から東北大学教授に昇進した際、これまでさきがけ研究で使用していた共用電子スピン共鳴装置が使用できなくなり、さきがけ研究遂行に支障がでてきました。そこで、研究総括は当該装置購入のための増額申請によって研究環境を整える支援を行いました。これにより、以後、齊藤研究者は数々の大きな研究成果を上げることができました。

成果の出ている研究に対しては、研究者からの申請ではなく研究総括が主導して、研究を加速するために積極的に研究費を見直し増額等の申請、手続きを行い、支援しました。平成21年度の白石研究者や平成22年度の竹中研究者の例があります。

#### (3) 共同研究の推進

研究の可能性を広げるため、研究総括は共同研究の推奨を行いました。領域内の共同研究は領域会議、ミニワークショップおよび四半期報告の際にアドバイスや斡旋等を行いました。たとえば、スピントロニクスとネットワークについては後述のミニワークショップの議題にあげ、具体的な議論を通じて新しい方向性について討論を行いました。また、海外との交流（共同研究等）も盛んに行われ、ドイツ、アメリカ、スイスなど世界中の研究機関に及んでいます。

### 6－2. 研究の方向性決定に対する支援

#### (1) 領域会議

領域会議を11回開催しました。領域会議においては、アドバイザーによる特別講演を企画し、研究分野が異なった分野にも興味を持ち活発な意見交換ができるように試みました。さらに、他領域との交流も進め、合同領域会議1回、他領域の研究者招待5回（さきがけ4回、CREST1回）、他領域への研究者参加3回を行い、研究遂行において広く情報交換できる場をつくりました。領域会議での発表の様子はビデオ撮影し、研究者にフィードバックすることによって、

発表のわかりやすさ、質疑内容を自己チェックできるよう配慮しました。

総括は毎回の領域会議のはじめに、さきがけ研究の意味、領域の概要や JST の置かれている状況などを述べ、さきがけが単なるファンディングと違いバーチャルラボであることを研究者に徹底させました。会議の最後には、総括のまとめを行い、進展のあった研究を取り上げてエンカレッジしました。

## (2) ミニワークショップ

ミニワークショップを 10 回開催しました。

領域会議では 1 発表あたり 25 分しかなく、討論の時間が十分に取れないという不満が研究者にありました。そこで、研究総括のイニシアティブで、重要な話題については、十分な時間をとって議論するミニワークショップを開催することを研究者に提案しました。テーマ、発表者は、研究者からの自主的な提案によって決めました。ミニワークショップの場所は、主として JST 会議室でおこないました。研究者からの 1 時間程度の話提供に対しアドバイザー、研究者数名と 1 時間程度の議論を行って、研究の進め方等についてのアドバイスを行いました。

さらに、最終年度には、同じ戦略目標のもとで研究を進めている CREST「次世代デバイス」領域（渡辺久恒研究総括）との連携ワークショップを企画、開催し、立場の異なる制度間の議論により、研究推進の方向性についての理解を高めました。

## (3) 終了年度サイトビジット

終了年度に、研究のとりまとめのための打ち合わせ、およびアドバイスのため所属する研究機関を訪問して、個々の研究について議論を行う場をつくりました。研究が多方面に発散している場合がしばしば見受けられたので、総括は研究内容を絞るようアドバイスするなど、残期間の研究の方向性を決めるためのメンター的な役割を果たしました。このことは、成果をまとめる上でかなり有効であったと感じています。

## 6-3. タイムリーな対応への取り組み

### (1) 四半期報

さきがけ研究者は年に 2 回「半期報」の提出が義務づけられていますが、研究総括の提案により、これに加え四半期報の提出をお願いしました。これによって、総括は研究状況を常に把握し、進捗状況を見ながら必要に応じたサポートをおこないました。予算見直しや共同研究など、緊急性を要する対応に有効だったと思います。

## 6-4. 情報発信

### (1) ホームページ

領域のホームページに情報発信のためのページ（ニュースレターのページ）



を設け、広い情報発信に心がけました。また研究総括が独自に自分のホームページの中に「研究総括のページ」を設けて、活動状況の発信に努めました。

#### (2) 研究総括のアウトリーチ

研究総括が研究会、国際会議等で領域の紹介等を行い、広く広報活動に努めました。また、JST 内でも、プレスリリース、JST ニュース、JST 動画サイト（サイエンスニュース）などの場を通じて、研究成果のアウトリーチにつとめました。最終年度には、TIA(つくばイノベーションアリーナ)との意見交換会も行いました。

#### (3) 賞の推薦

研究総括宛にくる賞の推薦依頼にはできるだけ応じるよう努力し、総括判断で各賞に適切な研究者を選んで推薦文を書きました。主な受賞としては、サマーディンウッド賞 2 名、日本学術振興会賞 3 名、日本学士院学術奨励賞 1 名、および IBM 科学賞 2 名があげられます。領域存続期間内の延べ受賞件数は 57 件にのぼりました。

#### (4) 研究成果報告会

成果を広く関連する大学・産業界の研究者に知ってもらうため、第 1 回および第 2 回成果報告会を応用物理学会学術講演会のシンポジウムとして行いました。開催に当たっては、応用物理学会のシンポジウム運営方針および研究者の自主性を尊重し、第 1 回（2010 年秋季、長崎大学）は葛西研究者、第 2 回（2012 年春季、早稲田大学）は竹中研究者が企画責任者となり企画していただきました。また、運営に当たっては、技術参事、事務参事が事前に会場を下見し、現地実行委員会との調整を図るなど、万全の準備を整えました。2 回とも当日会場は終始立ち見がでる盛況となり、大きな反響を呼びました。

第 3 回成果報告会は領域最後となる集大成の報告会として、領域事務所主導で秋葉原のアキバホールにおいて成果報告会を行いました。スピントロニクス分野および半導体分野の著名な研究者 2 名に、次世代デバイス領域の研究の現状についての特別講演をお願いしたほか、終了した 1 期、2 期の研究者も含め、2 日間にわたって討議を行いました。単独開催にもかかわらず 140 名にのぼる研究者が参加し、質疑応答も多く行われ、参加者からは大変良かったという評価をいただきました。

なお、成果報告会の要旨集、リーフレット、およびポスターは、研究総括が自ら原稿の完全版下電子データを作成し印刷所に Web 入稿することによって大幅な経費節減につとめました。

#### (5) 知的所有権

バイドール法によって特許申請は原則として研究者の所属機関で行うべきものでありますが、昨今の大学の財政状況は、維持経費不足から特許取得に十分

な支援が得られないケースが多々あります。このため、いくつかの場合において、技術参事が間に立って、JSTにおいて特許出願するためのお手伝いをしました。特に、成果が大きなものについては包括的なパッケージを検討するなど、積極的に取り組みました。

#### (6) 学術図書の出版

佐藤総括の提案により、総括と齊藤研究者がエディターとなって、さきがけで得られた成果を中心に、スピントロニクス分野の学術図書を John Wiley & Sons (Blackwell Publishing Limited) から **"Spintronics for Next-Generation Innovative Devices"** という題名で、平成26年3月に出版する方向で進めています。

### 7. 領域のねらいに対する成果の達成状況

研究のアウトプットとしては、現在まで国際雑誌への論文掲載 339 件、国内雑誌への論文掲載 23 件、国際会議での発表 546 件（うち招待講演 195 件）、国内会議での発表 691 件（うち招待講演 122 件）、その他出版物、国際 7 件、国内 50 件、合計 1656 件、特許出願 68 件（うち海外出願 16 件）受賞は延べ 54 件となっています。これまで、齊藤研究者、福村研究者、組頭研究者、東脇研究者、富岡研究者、野田研究者らがプレス発表を行い、大きな反響がありました。

戦略目標に掲げられた4つの課題、(1) 非シリコン系半導体、ワイドギャップ半導体による従来の CMOS を超える次世代デバイス用材料、(2) 光・電気・磁気機能の多角的な融合・変換を利用した新規なデバイス材料、(3) ナノレベル・分子レベル加工による新規なデバイス材料、(4) フレキシブルかつ強靱な携帯デバイス用材料の開拓とプロセス開発のいずれについても大きな進展があり、戦略目標の達成に資する成果が得られたと考えています（下記概要）。

#### (1) 非シリコン系半導体による beyond-CMOS 材料の開拓

→ InAs ナノワイヤを用いた縦型トランジスタ(富岡)、Ge-nMOSFET(竹中)、C60 ドープ GaAs 薄膜(西永)、ダイヤモンド LED による単一光子発生(水落)、窒化物半導体の極性制御(片山)等々、戦略目標に資する成果が得られています。

#### (2) 光・電気・磁気機能の多角的な融合・変換を利用して新規デバイスの構築を可能にする材料の開拓

→ スピン流デバイス(齊藤)、シリコンスピントロニクス(浜屋)、高スピン分極率ホイスラー合金(高橋有)、室温強磁性半導体(福村)、高いスピン分極率材料(高橋)、超高速光磁気記録(塚本)、シリコンラマンレーザ(高橋和)等々、戦略目標で期待した以上に世界をリードするような成果が出ています。

#### (3) ナノレベル・分子レベルでの加工により新規なデバイスの構築を可能にする材料の開拓

→グラフェン量子ドット(町田)、ナノギャップ単電子デバイス(野口)、 ナノ十字素子(海住)など、戦略目標に資する成果であると考えています。

#### (4) 薄く軽量で湾曲性・屈曲性ならびに耐衝撃性を有する材料の開拓

→誘電体上のグラフェン成長(野田)、グラフェンスピントロニクス(白石)、アセン系有機半導体の設計と作成(中野)、有機強相関 FET(山本)など、新しいパラダイムを開くもので、戦略目標に資する成果であると考えています。

具体的な例は以下のとおりです。

### 7-1. 科学技術の進歩への貢献

- (1) 齊藤研究者は、応募前に逆スピンホール効果の考え方を提唱し、金属に注入されたスピンの流れを電気信号としてとりだすことに成功していましたが、本さがけ研究としては、あえて金属でなく「誘電体」においてスピンの流れを伝搬させるという困難な課題に取り組みました。

彼は、①スピンホール効果により電流をスピン流に転換→②スピントルク効果で金属から誘電体にスピン波を転送→③スピン波スピン流を誘電体に沿って伝搬→④スピンポンピングによって金属にスピン波を励起→⑤逆スピンホール効果で電圧として取り出す、というストーリーを立て、②、③、④を順次実証し、最終的にこれらを総合して、世界で初めて「スピン流を使って誘電体に電気を流す」ことに成功しました。

成果は、Natureに掲載されるとともに、JSTの広報からプレスリリースされ、国内17紙の紙面を飾りました。このような基礎的成果が、一般紙の一面に掲載されたことはまれなことです。米国物理学会誌にもトピックスとして取り上げられました。

彼は、さがけ2年目に慶大講師から東北大に教授として招聘されるという栄誉を得ましたが、JSTからの支援もあって、幸い研究をシームレスに続けることができました。領域会議では、彼は常にあらゆる研究に対しコメントし、領域全体を活性化してくれました。実験家でありながら理論に強く、理論家との密接な研究協力により、きちんとした理論的見通しの下にこの研究を進めたことが、この成果につながりました。

彼は、さらに金属磁性体において成功したスピンゼーベック効果が、磁性誘電体においても生じることを実証し、スピン流の学理と応用において世界をリードする立場を確立しました。

サー・マーティンウッド賞、学士院研究奨励賞はじめ、多数の賞を受賞したほか、22年度にはCRESTにも採択され、スピン流の研究をさらに発展させており、スピン流イノベーションの推進役として、さらなる活躍が期待されています。

(2) 福村研究者は、将来のエレクトロニクスに役立つと期待される酸化物半導体スピントロニクスの可能性を広げること为目标に、 $\text{TiO}_2:\text{Co}$  の室温強磁性の起源を明らかにして、電子の持つ電荷とスピンを電気的手法等により制御し、強磁性のスイッチングなど半導体スピントロニクスのデバイス実証に取り組みました。 $\text{TiO}_2:\text{Co}$  が室温強磁性は福村研究者が 2001 年に初めて見いだしました。当時はこの発見に懐疑的な見解（その室温強磁性がコバルト金属の析出によるものという指摘）が多く見られました。彼は、磁気光学効果を使ってこの批判を克服しましたが、室温強磁性の起源は不明のままでした。私は、この物質の室温強磁性は本物であると確信していましたから、ためらうことなくこの課題を採択しました。

福村研究者は、試料の品質の最適化や基礎物性の評価という段階から地道な実験を積み上げた結果、この材料の磁性がキャリア密度に関係することを明らかにしました。さらに、イオン液体の電気二重層を使って、強い電界を与えることで FET チャンネルのキャリアを制御し、電界制御で室温強磁性を誘起することに成功しました。磁性半導体の磁性の電界制御は、東北大学が  $\text{InMnAs}$  などで実証していましたが、20K という低温でしか観測できませんでした。これに対し、福村研究者の実験は室温で行われ、電界制御でキャリア密度が制御され、それに対応して磁性が制御されることを、世界で初めて明らかにしました。この結果はサイエンス誌に掲載され、プレスリリースも行われました。

彼は、2 年終了時で、若手最先端研究 (FIRST) に採択され、本領域から去りましたが、その後も領域会議等には継続的に参加し、最後までメンバーとして行動してくれました。彼の業績は、平成 21 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞「磁性酸化物半導体の合成と物性およびデバイスの研究」・平成 22 年度第 7 回日本学術振興会賞「磁性酸化物半導体の創成」・(財) トーキン科学技術振興財団 平成 20 研究奨励賞「磁性酸化物半導体の開発とその応用に関する研究」など数々の受賞をしており、内外から高く評価されています。

(3) 浜屋研究者は、シリコンスピントロニクス技術の開拓による次世代の超低消費電力量子スピン伝導素子の開発をめざし、シリコンをベースとした素子構造における革新的なスピン注入・検出技術の研究に取り組みました。当初、彼は、Si へのスピン注入を早期に達成し、量子ドット技術との融合までを研究計画に記載していましたが、この分野の急速な進展を考慮して、単なるスピン注入の実証例に留まらずデバイス応用を意識した包括的なスピン流物理の研究に掘り下げた研究を行いました。私は、この方針転換は適切で極めて時宜を得たものだと評価します。おそらく、領域会議・ミニワークショップなどでの熱い議論が彼をつき動かしたと思っています。

浜屋研究者は、大きく見て 4 つの仕事をしました。それらは、①世界唯一のショットキートンネル型スピン注入技術の確立、②デバイス構造におけるスピン検出感度の重要性の確認とその理解、③室温スピン注入信号の電氣的検出、④スピン蓄積信号

の電界制御です。

これまでの世界中で行われた強磁性電極からシリコンへのスピン注入は、縮退した金属伝導性のシリコンにおいてのみ観測されていました。これでは、ゲートによる制御など「半導体動作」が期待できません。彼は、あくまで低ドーピングの半導体シリコンにこだわり、世界で唯一のショットキー接合を使ったスピン注入に取り組み試みしました。このためには、①強磁性体/Si 界面が原子層レベルで高品質であること、②ヘテロ界面付近のみに $\delta$  関数的に高濃度ドーピングを施し、チャンネルは半導体であることの2点が必要です。この2点はSi(111)面を使いSbの $\delta$ ドーピングとSi(111)低温エピタキシャル層の形成によって実現することができました。このショットキー接合電極をもちいて3端子素子を作り、室温で明瞭な Hanle 効果（磁界印加で半導体中のスピン偏極状態が緩和する現象）を見いだしました。また、MOSFET 構造をつくり、スピン蓄積量がゲート電極に加える電圧によって制御できることも確認しました。これらは、半導体グレードのシリコンでスピン蓄積効果を観測した世界初のデータです。国際的にも高く評価されることは、Appl. Phys. Lett.誌の Research Highlight に選出されたことから伺えます。彼の研究業績は、平成 23 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞、船井情報科学奨励賞、安藤博記念学術奨励賞をはじめ、各種学会の論文賞等を得ています。

本研究の成果は、スピントロニクス of 永年の夢であるスピントランジスタの実現に向けた大きな一歩であり、今後のデバイス応用への発展が期待できるという点で、特に高く評価されます。

- (4) 白石研究者は、炭素でできたグラフェンにスピンを流すという非常に挑戦的な課題に取り組んできました。

彼は、多層グラフェンにおいて4端子非局所法を使った地道で慎重な実験によって、世界で初めて信頼性のある純スピン流の注入と、それによる巨大磁気抵抗効果を室温で検証しました。以前からグラフェンを使った磁気抵抗効果の実験結果は多数発表されていましたが、それらは、電極に使った磁性材料にもとづく異方性磁気抵抗効果を測定していたので信頼性がないことも指摘しました。さらに単層グラフェンでも純スピン流の注入に成功し、ゲート電圧によってスピン注入電流が制御できるというスピントランジスタ動作にも成功しました。スピン拡散長が予想されるより、かなり短いという謎は期間中に解明には至りませんでした。所期の成果は十分得られたといってもよいでしょう。

彼は、さらにルブレンなど有機分子にスピン流を流す研究に挑戦をつづけていますが、なかなか実現の道のは遠いようです。その代わり、副産物として、フラーレン・コバルト微粒子ナノコンポジット材料で、低温ながら磁気スイッチング現象と140万%におよぶ巨大磁気抵抗効果を発見しました。

彼は、素粒子物理学を専攻したのち、企業での半導体研究開発に転じ、海外での

研究生生活を経て、大学に職を得たという異色の存在で、その豊富な経歴に裏打ちされた幅広い知見とプロ意識は、齊藤研究者とともに、領域会議での議論を活性化し、ある意味の緊張感を与え、領域運営に大いに貢献しました。今後とも、世界の分子スピントロニクスのパイオニアとして、この分野を引っ張ってってくれるものと大いに期待しています。

## 7-2. 具体的応用への展開

- (1) 竹中研究者は、Si 基板上に高い移動度をもつ Ge をチャネル材料とした高性能 MOS トランジスタと Ge フォトディテクタをモノリシックに集積化することで、ポストスケリング時代においても高性能化を可能とする光配線 Ge LSI の実現を目指して研究を進めました。

これまで Ge の n 型 MOS トランジスタは性能が悪く、そのため Ge で CMOS は作れないと考えられていましたが、その原因は、ドーピングによる損傷を通じたリークと界面の不活性化がむずかしいということにありました。竹中研究者は、高温熱酸化で形成した GeO<sub>2</sub> によって Ge MOS 界面を不活性化するとともに、従来のイオン注入法ではなく気相拡散法で形成したソース/ドレイン接合を用いたトランジスタを作製することによって、これらの課題を解決し、世界最高の 5 桁以上のオン・オフ比をもち Si を上回る実効移動度を示す高性能 Ge n 型 MOS トランジスタを実現することに世界で初めて実証することに成功しました。これは高性能 Ge CMOS の実現に道を開くもので、その功績は大です。

一方、Ge のフォトディテクタについては、これまで暗電流が大きいことが問題で、実用化を阻んでいました。竹中研究者は、気相ドーピングによって接合リーク電流を従来のイオン注入法と比較して 2 桁程度抑制しました。また、熱酸化 GeO<sub>2</sub> を用いて Ge 表面を不活性化することで、Ge フォトディテクタの暗電流を 1 nA 以下に抑制することができることを世界で初めて示しました。

竹中研究者は、さらに、酸化濃縮を用いて高品位 Ge 膜を Si 基板上に集積する技術の確立にも成功しましたので、光配線 Ge LSI を実現するすべての要素技術を確立したといえます。この研究成果は、材料とデバイスプロセスの革新によって次世代デバイスをめざすという本領域本来の目標に極めて近いもので、研究室レベルとはいえ、世界最高性能の Ge 光電子集積回路の基盤を確立したことを高く評価します。昨今、Nature, Science を飾る理学的基礎研究が脚光をあびる傾向にありますが、竹中研究者のような地道な工学的研究に、もっと光を当てるべきではないでしょうか。なお、2 期生成果報告会を応用物理学会のシンポジウムの中で行うに当たって、彼は申請者となって大変な努力をしてくれました。

- (2) 塚本研究者の研究課題は、彼がオランダのグループと共同で見いだしたサブピコ秒の超高速の光磁気記録のメカニズムを解明し、次々世代の磁気記録デバイスの記録

原理を確立することにあります。

外国からの脱却を図るため、当該装置と同等またはそれ以上の性能のレーザー光学系を彼の所属する日大の研究室に設置し、きちんと動作させるところからスタートするというハンディを背負っての出発でした。また、私立大学での厳しい教育業務の中で、このような意欲的研究を3年という短時間内に実施することにはかなりの困難があることは、採択の時点で予想されたことでありました。塚本研究者は、そのような厳しい状況を乗り越え、独特の粘り強さを発揮し、(1) フェリ磁性体補償点利用スピン動特性制御、(2) 極短時間加熱利用超高速スピン制御、(3) 光・スピン直接制御による非熱利用超高速磁化反転の3課題に取り組み、いずれも所期の成果を得ました。

塚本研究者は、希土類遷移金属の光磁気記録技術をバックグラウンドとした工学系の研究者でしたから、基礎研究的な知識と考え方には、必ずしもなじんでおりませんでした。しかし、領域会議で、きちんとした基礎的アプローチの重要性を強く認識し、また、アドバイザーから多くの示唆をもらい、最後は、かなりの程度本領域の趣旨に沿った研究発表が行われるようになりました。その結果、当初設定された研究テーマで重要な結果が得られただけでなく、高速磁化反転時の磁気モーメントの挙動では当初予想を超える興味深い結果が得られました。とくに、超短パルス光照射によってピコ秒オーダーの超高速プリセッションスウィッチングができることを実証したことは、 $2\text{Tbit/in}^2$ を超える超高密度磁気記録のキーテクノロジーである光アシスト磁気記録にひとつの方向性を与えたものと評価でき、今後、日本における超高速磁気記録技術を先導する存在になるものと期待します。今後、光・スピン直接制御による非熱利用超高速磁化反転の光波長依存性の測定など、やり残した基礎研究部分を継続して進め、理論家との共同研究などを通じて、超高速光磁気現象の学理の確立にも尽くされるよう願ってやみません。

- (3) 富岡研究者は、JST の専任研究者として北大集積センターの福井教授のもとで研究を進める化合物半導体デバイスの研究者です。彼は InAs のナノワイヤを用いたトンネル接合型電界効果トランジスタをシリコン基板上に作製するという提案によりさきがけに採択されました。

シリコン LSI は、リソグラフィの微細化の限界、スイッチ速度の限界、消費電力低減の限界などにより、高集積化の転機を迎えています。これを克服するための方法として、富岡研究者は化合物半導体でナノサイズの縦型トランジスタを作るとともに、化合物半導体/シリコン界面のバンド不連続性を利用したトンネル接合を用いて立ち上がりの急峻なスイッチ特性を得ることを提案しました。

はじめに、シリコン基板上に選択成長した InAs、GaAs、InGaAs ナノワイヤと基板との接合界面の結晶評価を行い、微小直径からなる一次元ナノ構造の接合の場合において、格子不整合によるミスフィット転位のないコヒーレント成長を生じることを、

実験的に証明しました。

つぎに、ナノワイヤアレイの縦型二端子電流電圧特性を調べた結果、選択成長法により接合界面に生じる転位・欠陥の発生を抑制した **p-Si/III-V** ナノワイヤの接合界面を従来の化合物半導体ヘテロ接合のように機能化することで新しいデバイス原理に应用することができること、それらを利用した **Si/III-V** ヘテロ接合界面を応用したトンネル FET を作製できることを明かにしました。

これを受けて、**Si** 基板上の **III-V** 半導体コアシェル構造のナノワイヤで、世界にさきがけて HEMT 構造を実現し、**Si** 上縦型トランジスタで **Si-MOSFET** のスイッチング特性を上回る性能を示すことを実証しました。さらに、**Si** 基板上の **InAs** ナノワイヤについて、**Si/InAs** 固相界面を利用したトンネルトランジスタの動作実証を行い、従来の MOSFET の物理限界( $SS=60\text{mV/dec}$ )をはるかに超える最小  $SS = 12 \text{ mV/dec}$ , 平均  $SS = 21 \text{ V/dec}$  という急峻なスイッチ特性が得られること、これにより従来の 1/10 の省電力化が図れることを明らかにしました。この成果は、新聞等で大きく報道されるとともに、インテル、IBM はじめ世界の半導体産業に大きなインパクトを与えました。

このように、富岡研究者の研究は、結晶工学的基礎研究をベースに、匠の技ともいうべき半導体プロセス技術を駆使して、世界最高レベルの半導体特性を実現したもので、真のイノベーションにつながる研究成果として極めて高く評価されます。この成果は、JST 直雇用という研究に専念できる環境があればこそできたものであるという点にも注目すべきでしょう。

(4) 町田研究者は、ナノ加工したグラフェンドットを使った様々な機能デバイスの研究に取り組みました。まず、グラフェンナノ構造の作製および **h-BN** 上へのグラフェン転写という2つの重要な素子作製技術を確立し、これを用いて単電子トンネリング、バリスティック伝導などの量子輸送現象を観測しました。さらにサイクロトロン吸収による高感度光検出に成功したほか、独自のトンネルバリア構造を利用したスピン注入を実現しました。

技術的な側面では、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた局所酸化手法を確立し、グラフェン及び酸化グラフェンナノ構造の作製を行いました。また、高移動度グラフェンを **h-BN** 基板上に作製し、**SiO<sub>2</sub>** 基板上的グラフェンの 10 倍以上のキャリア移動度を実現しました。

量子輸送現象については、磁界下でキャリアが集束する効果および磁気整合効果を観測することができ、グラフェン中でバリスティック伝導が起きていることを実証しました。伝導チャネルにおけるバリスティック伝導とチャネル端における拡散的散乱の結果として、サイクロトロン半径と伝導チャネル幅の整合に起因する特異な磁気抵抗効果を見だし、グラフェンにおける整合係数は半導体二次元電子系の場合とは異なる値を取り、グラフェンに固有な端散乱があることを見いだしました。

新機能素子応用については、ディラックフェルミオンが磁場中で形成するランダ



ウ準位間のサイクロトロン共鳴を利用することにより、実用温度領域である 77 K 以上での高感度光検出を実現しました。

また、グラフェンへの高効率スピン注入を実現するため、(1)ALD により堆積した  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{PTCA}$  トンネルバリア、(2)ホイスラー合金電極、(3)2 原子層 h-BN トンネルバリアという 3 種類のトンネルスピン注入手法を実現しました。これによって、トンネル抵抗の制御が可能になり、明瞭な磁気抵抗効果が観測され、グラフェンへのトンネルスピン注入を実現しました。またスピン緩和のメカニズム解明のため磁場によって抵抗が変調される効果 (Hanle 効果) の観測に成功し、スピン緩和時間を実験的に決定しました。このような結果は、BN 上に作製しなければ見られなかったもので、すばらしい成果だと思います。

町田研究者は、当初の計画をほぼ実現しただけでなく、一部は計画以上の成果を得ることができたという点で大いに評価されます。しかし、これだけ多くの研究成果が出ているにもかかわらず、第一著者論文、学会発表、特許がやや少ないので、早いうちにきちんとまとめたものを発表されることを期待します。

### 7-3. 将来の科学技術イノベーションに資する成果

- (1) スピントロニクス用電極材料として、現在使われている鉄・コバルト合金に比べて理論的に高いスピン偏極率が期待されるハーフメタルの研究開発が進められています。ハーフメタルでは、フェルミ準位におけるスピン偏極率が理想的には 100% となります。ハーフメタルとしては、コバルト鉄ベースのフルホイスラー合金を中心に研究が進められており、実際低温では 500% を超える MR 比が報告されていますが、室温では 100% 程度の MR 比しか得られていません。

高橋有紀子研究者は、高温で MR 比が低下する原因が、理想的な  $\text{L}2_1$  構造より規則度の劣る  $\text{B}2$  構造ができていることにあると見て、熱力学的に  $\text{L}2_1$  構造が安定かつバンド構造から高い偏極率の期待される 4 元ホイスラー合金を数十種類合成し、PCAR 法によるスピン偏極度の評価を行いました。PCAR 法というのは、超伝導体と磁性常伝導体の接合を利用して偏極度を評価する手法で、高橋研究者が日本では唯一実績をもっています。しかし、PCAR 法で評価した偏極度は、TMJ デバイスを用いた偏極度に比べて低いという問題がありました。高橋研究者は、不動態酸化膜をつくって合金表面を保護し PCAR の探針で酸化膜を破って測定する方法を開発しこの問題を克服しました。

3 元系のホイスラー合金に第 4 元素を添加することにより、フェルミ準位の位置を制御して、60% を超えるような高いスピン偏極率を示す 4 元系ホイスラー合金を 20 種類以上開発することができました。CMGG[ $\text{Co}_2\text{Mn}(\text{Ge}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})$ ]においてスピン偏極度の世界最高値 74% を達成したことは、特筆に値します。さらに、69% のスピン偏極率を示す CFGG[ $=\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{0.5}\text{Ge}_{0.5})$ ] を用いて MgO 基板

/Cr(10nm)/Ag(100nm)/CFGG/Ag(5nm)/CFGG/Ag(5nm)/Ru(8nm)という CPP-GMR 素子をつくり、室温で、MR = 41.7%、 $\Delta RA = 9.5 \text{ m}\Omega \mu\text{m}^2$ 、10 KではMR = 129.1%、 $\Delta RA = 26.4 \text{ m}\Omega \mu\text{m}^2$ と、いずれも CPPGMR として世界最高の値を得ることに成功しました。高橋研究者は、本領域唯一の女性研究者です。育児と研究を両立させ、上記のようなすばらしい成果が得られたことは、賞賛に値することです。昨年は本多記念賞、本年は文部科学大臣表彰を受賞しました。今後、一層の発展が期待されます。

(2) 野田研究者は、ナノカーボンの化学プロセス技術の専門家です。ナノカーボンの半導体集積回路への導入のためには製造／実装プロセスの階層的な開発が重要となっています。野田研究者は独自のコンビナトリアル手法を援用し、分子構造の作り分けと構造体の自己組織形成法の開発を進めたほか、ボトムアップとトップダウンの融合を実践し、ナノカーボン構造体を自在に形成して実装する技術基盤の構築を目指しました。

カーボンナノチューブを高密度に生成するためには、基板上に触媒粒子高密度に分散させる必要がありますが、野田研究者は、触媒粒子を核生成・成長させ、粒子同士が接する手前で成長を止めることで、触媒粒子を密に得る方法を考え、Ni 触媒粒子を  $2.8 \times 10^{12}$  個/cm<sup>2</sup> という高密度で堆積することに成功、これを用いてこれまでより数十倍も高密度にカーボンナノチューブ垂直配向膜を得ることができました。この技術は現在デバイスの専門家と共同研究して実用化を進めています。

また、大面積にわたって高速にカーボンナノチューブを形成するために、ガラス上にリソグラフィでパターン電極を作製その上に触媒を置き、炭素原料供給下で電極に短時間通電して加熱することによってナノチューブを形成するオリジナル技術に取り組み、通電を 1 s と短時間にパルスで行うことで、ガラスを損傷せずに電極上にカーボンナノチューブ・エミッタアレイを瞬間実装することに成功しました。

次に野田研究者は、グラフェンの直接析出法に取り組みました。誘電体基板上に金属と炭素の固溶膜を形成し、加熱状態で金属をエッチング除去しグラフェンを誘電体上に直接析出させる新たな手法“エッチング析出法”を考案しました。この方法によって、石英ガラス上に直接金属フリーグラフェンの形成に成功しました。世界中で最適化の進んでいる触媒金属上の CVD グラフェンと比べ膜質では劣るが、誘電体上への直接形成という世界中で望まれる技術を実現できたことは画期的でしょう。

これらの研究成果はいずれも世界初のオリジナルなものであり実用上も注目され、多数の国際学会での招待を受けているほか、知的所有権の確立にも努力している点が評価されます。ただ、野田研究者の研究手法はあまりにもプロセス技術に偏っており、デバイス実用化のために必要な物性評価が不十分であったことは残念なことです。デバイス研究者とのより深い共同研究を志向されるとよいでしょう。また、トップオナーの論文もきちんと残して欲しいと思います。

#### 7-4. チャレンジングな課題であり、将来性が見込まれる成果

(1) 野口研究者は、有機分子が原子スケールで均一な構造を持つ優れたナノ構造体である点に着目し、これを単一電子素子に利用することで、その高機能性を引き出すことをねらいとし、化学合成により得られる直径数 nm の金ナノ粒子をクーロン島、金粒子を被覆する有機分子をトンネル層、微小有機分子をフローティングゲートとして利用したナノ粒子単電子素子を提案しました。

このため野口研究者は、直径数 nm の金微粒子を有機分子層で被覆したナノ粒子を金のナノギャップ電極中に溶液プロセスを介して吸着させて単一電子デバイスを作成しました。なお、ナノギャップは細線に電流を流して切断するエレクトロマイグレーション法で作製したものです。野口研究者自身は電気系の背景をもつ研究者ですが、化学合成系の研究者との共同研究を通じてさまざまな分子を作製し、それを用いたデバイスを探索しました。試行錯誤の結果、金に対して安定な化学結合を形成するチオール基を分子両端に有し、可視域に光吸収を持たないオクタンジチオール：C8DT を金ナノ粒子の被覆分子に用いることで、安定な単一電子デバイスを作製することに成功しました。この素子の  $dI/dVD$ -VD-VG 特性には、いわゆるクーロンダイヤモンドと呼ばれる単一電子デバイス特有のパターンが明瞭に見られました。また、特性から見積もられるクーロン島の帯電エネルギーは、素子構造から予想される値と概ね一致し、狙いどおりの構造が作製できていることがわかりました。金粒子を被覆している有機分子長を制御することで単一電子デバイスの課題である高温動作への発展も期待できます。

金微粒子単一電子デバイスの確立を受けて、これに銅フタロシアニン (CuPc) という色素分子を少量添加することで分子フローティングゲートを付加しました。この結果、この素子に光を照射すると、クーロンダイヤモンドのパターンがゲート電圧軸に沿って負方向にシフトしている様子が見られ、ゲート電圧を増加させていくと 0.67 V 付近でコンダクタンスが不連続に変化し、暗状態にもどるという光スイッチング現象が見られました。この色素ドープ単一電子デバイスでは、色素分子と電極との接続を必ずしも必要としないので素子構造が簡略化され、素子特性の再現性は大きく向上することが期待できます。

地方大学という制約の中で、有機分子を利用して再現性の高い機能デバイスを実現し、応用物理学会誌から寄稿を依頼されるまで研究レベルを高めた野口研究者の着眼点と努力には賞賛すべきものがあります。なお、せっかくの成果をイノベーションにつなげるために、知的所有権の取得にも力を注いでほしいと思います。

(2) 西永研究者は、分子線エピタキシー (MBE) 法により、C<sub>60</sub> doped GaAs 薄膜を作製し、その結晶学的評価と物性評価、デバイス応用を行いました。

C<sub>60</sub> 結晶は GaAs 基板上に良好なエピタキシャル成長をすることが知られており、GaAs 表面再構成上にて、C<sub>60</sub> 分子が周期的に配列することが走査トンネル顕微鏡など

から確認されていきました。西永研究者は、GaAs 結晶の MBE 成長中に C<sub>60</sub> 分子を供給することによって GaAs 結晶に転位を発生することなく均一に C<sub>60</sub> 分子を添加することに成功しました。添加された C<sub>60</sub> 分子は GaAs 結晶中にて電子トラップとして機能し、GaAs 結晶を高抵抗化させることがわかりました。この電子トラップに電界を印加したところ、トラップされていた電子が放出されることから、C<sub>60</sub> 分子が無機半導体中にてサイズが均一な量子ドットとして機能していると考えられ、電荷の蓄積・放出を利用した新規デバイス作製の可能性があることを明らかにしました。

西永研究者は研究総括との話し合いの中で、デバイスに挑む前に C<sub>60</sub>-doped GaAs の結晶学的諸物性や化学結合・電子的な諸物性を明らかにする必要性を認識しました。そこで、TEM、EELS、XRD 逆格子マッピング、STEM などの基礎データを調べ C<sub>60</sub> 分子の導入は母体結晶に局所的なひずみを与えるだけで、転位などの欠陥を生じないこと、C<sub>60</sub>/GaAs ヘテロ界面には化学結合が形成されず、添加された C<sub>60</sub> 分子は本来の分子軌道（占有軌道と空軌道）を有していること、C<sub>60</sub> 分子は Ga ボンド 14 個、As ボンド 14 個によって囲まれ不対電子が同数存在し、これらが再構成して安定化することなどを明らかにしました。また、C<sub>60</sub>-doped GaAs 薄膜の電子線ホログラフィー像は、C<sub>60</sub> に電子がトラップされることでポテンシャルが変調され、エネルギーバンド構造が変化するというモデルで説明することができました。

このような基礎データが蓄積されたので、今後は、HEMT 構造の 2 次元電子ガスを C<sub>60</sub> 電子トラップによって変調し、on/off 比の高い HEMT デバイスを実現させるなどこれらの機能を利用した電子デバイスへの応用展開につながるものと期待しています。

西永研究者の研究は、有機・無機ヘテロ構造というユニークな研究に取り組み、その物性を基礎的に明らかにし、今後のデバイス設計のための指針を提供したという点で、大いに評価出来ます。

## 8. 総合所見

以上述べたように、本領域は、戦略目標に資するあるいは、それ以上の成果を打ち立てることができましたが、戦略目標に沿った形で極めてタイムリーに研究領域を選定することができ、また、この領域を推進するために適切な研究総括を選定することができたことが、本領域の成功につながったと考えます。戦略目標が立てられた時点では、半導体の微細化はハーフピッチ 32nm 以下は難しいとされましたが、現在では 22nm が当たり前になり、実験室レベルでは 8nm というのまで現れていますが、戦略目標に示された beyond-CMOS の必要性は決して無意味なものではなく、真に微細化の限界が来ている今こそこの領域を設定したことの重要性を増していると考えています。

研究領域のマネージメントは、課題の採択、領域の運営、成果のアウトリーチ、すべての面で適切に行われました。

まず、3期にわたる選考を通じて採択された課題は、戦略目標に記された分野をほぼカバーするように配慮されただけでなく、研究総括のリーダーシップのもと、beyond-CMOS を意識した未来志向でチャレンジングな課題が選ばれており、平均 35 歳という理想的な年齢構成によって、研究者間にある種の競争意識と、共通認識が醸成されたと思います。

次に、毎回の領域会議において、研究総括が「領域の位置づけと方向性」を示し、アドバイザー・技術参事が研究者間の活発な意見交換が進むよう配慮した自由度の高い運営をしたことが、他領域から招いた研究者が異口同音に驚くようなエキサイティングな領域会議につながり、全体が活性化したと感じています。また、「ミニワークショップ」という独自のミーティングを研究者の自主性に任せて運営したこと、1期・2期の成果報告会を研究者のイニシアティブによって応用物理学会のシンポジウムとして開催したこと、研究者の状況を四半期報で把握し、タイムリーな支援をおこなったことも、本領域の活性化につながったと感じています。

科学技術の進歩に資する成果としては、デバイスを意識したからこそ得られた数多くの発見がありました。絶縁性磁性体の中を伝わるスピン流の概念の確立、単層グラフェンへのスピン注入現象の理解、室温磁性半導体における磁性の起源解明、有機分子におけるモット転移の電氣的制御などです。

具体的応用につながった例としては、確率共鳴を用いた高い応答性をもつ電子回路が自動車会社等との共同研究に発展していること、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  を用いたパワーデバイスが NEDO の助成を得て進められていること、高密度の CNT がビア配線に应用されることなど数多くありますが、製品化されたものはありませんし、さきがけに製品化までを求めるべきではないでしょう。

イノベーションに資する成果としては、シリコン基板上に選択成長した InAs ナノワイヤを用いた縦型のトンネル FET で  $\text{SS}=21\text{mV/dec}$  という従来法での理論限界を超える世界最高のトランジスタ特性を達成したこと、困難だと考えられていた Ge の n-MOS-FET ができたこと、スピンゼーベック効果を用いたエネルギーハーベスティングの可能性が示されたこと、高い Q 値をもつフォトリック結晶を用いてシリコンでラマンレーザーが発振したこと（非公開）などがあげられます。これらは、いずれも、従来のコンセプトを根本的に変える成果ですから、必ずイノベーションにつながると期待しています。

本領域で育った研究者たちは、皆さん採択時に比べ自信に満ち、たくましく成長しました。3年半という短い期間にこれだけの成果を上げた実績は必ずや、今後につながり、いっそうの成長をするものと信じています。

今後、彼らの研究の受け皿となるようなファンディングが設定されることを願ってやみません。

最後になりましたが、本領域をサポートしていただいた戦略的創造事業推進部の各位、

アウトリーチ活動を支援いただいた広報担当者・科学コミュニケーション関係者各位に深く感謝します。

以上