

戦略的創造研究推進事業
さきがけ(個人型研究)
追跡評価用資料

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」
(2007 年度～2012 年度)

研究総括: 佐藤 勝昭

2021 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	3
1.3 研究総括	3
1.4 領域アドバイザー	4
1.5 研究課題及び研究者	4
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	8
2.2 追跡調査概要	10
2.2.1 研究助成金	10
2.2.2 論文	24
2.2.3 特許	27
2.2.4 受賞	29
2.2.5 招待講演	37
2.2.6 報道	37
2.2.7 共同研究や企業との連携	37
2.2.8 実用化・製品化	39
2.2.9 ベンチャー	39
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	40
2.3.1 研究領域の展開状況(展開図)	40
2.3.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献	42
2.3.3 研究成果の社会・経済への波及効果	57
2.3.4 その他の特記すべき事項 (新たな展開や分野間融合、またキャリアアップなど)	58
第3章 各研究課題の主な研究成果	59
3.1 2007年度採択研究課題	59
3.1.1 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 (葛西誠也)	60
3.1.2 誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能(齊藤英治)	61
3.1.3 分子を介したスピン流の制御(白石誠司)	62
3.1.4 スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索(高橋有紀子)	63
3.1.5 スピン偏極の外的制御とチューナブルスピン源の創製(谷山智康)	64

3.1.6	フェムト秒パルス・レーザによる超高速スピン制御・計測(塚本新).....	65
3.1.7	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(深田直樹)...	66
3.1.8	デバイス応用に向けたスピン流と熱流の結合理論(村上修一).....	67
3.1.9	π 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(安田剛)	68
3.1.10	ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明(山口明啓).....	69
3.1.11	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(若林克法).....	70
3.2	2008年度採択研究課題.....	71
3.2.1	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(片山竜二)	72
3.2.2	ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製(川山巖).....	73
3.2.3	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(寒川義裕)...	74
3.2.4	サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発(小林航).....	75
3.2.5	ワイドギャップ酸化物における界面機能開発(須崎友文).....	76
3.2.6	光配線 LSI 実現に向けた Ge ナノ光電子集積回路の開発(竹中充).....	77
3.2.7	量子ドットを用いた単電子・スピン・光機能融合デバイス(中岡俊裕).....	78
3.2.8	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 (浜屋宏平).....	79
3.2.9	ワイドギャップ強磁性半導体デバイス(福村知昭).....	80
3.2.10	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 (水落憲和).....	81
3.3	2009年度採択研究課題.....	82
3.3.1	スピン量子十字素子を用いた新規な高性能不揮発メモリの創製(海住英生)	83
3.3.2	ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発(組頭広志).....	84
3.3.3	フォトリソ結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発(高橋和).....	85
3.3.4	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 (富岡克広).....	86
3.3.5	分子配列制御による有機トランジスタの高性能化(中野幸司).....	87
3.3.6	誘電体トランジスタを用いたスピン操作(中村浩之).....	88
3.3.7	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(西永慈郎).....	89
3.3.8	光制御型有機単一電子デバイスの開発(野口裕).....	90
3.3.9	各種ナノカーボン構造体の自在実装(野田優).....	91
3.3.10	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(東脇正高)	92
3.3.11	グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現(町田友樹).....	93
3.3.12	電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発(山本浩史).....	94

要旨

本報告書は、戦略的創造研究推進事業のさきがけ（個人型研究）の研究領域「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」（2007年度～2012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。

本研究領域では、文部科学省の戦略目標「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」に基づいて、「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の開拓とプロセス開発」、「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の開拓とプロセス開発」、「ナノレベル・分子レベルでの加工による新規なデバイスの構築を可能にする材料開拓とプロセス開発」、「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の材料の開拓とプロセス開発」の4つを達成目標として研究が実施された。

研究終了後の発展としては、「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の開拓とプロセス開発」に関する研究内容が多い。33人の研究者の約半数がこれに関する研究を行っており、その中でもスピントロニクスに関する研究が9人と多い。

研究終了後に研究成果が発展し発表された学術論文の総数は、402報であった。特許出願は、研究期間中に、国内61件、海外24件、研究終了後は、国内115件、海外57件であった。研究開始後、今日までに、国内99件、海外47件特許登録されている。また研究終了後の受賞は129件あり、招待講演については733件であった。

研究終了後、本研究領域の研究者は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）のCRESTに3件、JSTのさきがけに1件、JST ERATOに1件、JST先端的低炭素化技術開発（ALCA）に1件、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）に1件、総務省戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）に6件、内閣府最先端・次世代研究開発プログラム（NEXT）に2件、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に1件、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の先導的産業技術創出事業などに3件、文部科学省科学研究費新学術領域研究に9件が採択され、研究を発展させたのみならず、いくつかの分野では、我が国の研究開発を先導する役割を果たしつつある。特に、科学研究費新学術領域「ナノスピントロニクス変換科学」（代表：大谷義近）では、本さきがけ領域の齊藤、白石、村上が総括班のメンバーとなり新しい学術領域の創成に寄与した。

上記のような研究終了後の進展を、以下の構成に沿って報告書にまとめた。

第1章は、研究領域の戦略目標、研究領域の目的、研究総括、領域アドバイザー、研究課題と研究者の情報をまとめた。

第2章は、各研究者について研究期間中及び研究終了後の一連の研究成果やその展開状

況を調査した結果をまとめた。2.1項で本調査の目的、対象と調査方法を記載した。2.2項は、追跡調査概要で、各研究者が研究開始後に、獲得した研究助成金、発表した原著論文、出願及び登録した特許、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、ベンチャー情報をまとめた。さらに、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（展開図）とともにまとめた。また、研究者間の共同研究は、さきがけ研究期間中から行われてきたが、研究終了後も引き続き行われて共著論文として成果が発表されている状況にも触れた。

第3章は各研究課題について研究者ごとに、研究期間中の研究成果、研究終了後の発展状況、科学技術への波及効果、社会経済への波及効果を、分かりやすく1枚にまとめた。

第1章 研究領域概要

1.1 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年のITRSロードマップで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三つの戦略、すなわち、Mooreの法則を更に伸ばす「More Moore」、従来の半導体デバイスにはない機能を付加する「More than Moore」、更にシリコン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ある。

1.2 研究領域の目的

下記の技術領域における材料開発と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具体的目的としている。

- (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の開拓とプロセス開発
- (2) 光・電気・磁気機能の多元的な融合・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の開拓とプロセス開発
- (3) ナノレベル・分子レベルでの加工による新規なデバイスの構築を可能にする材料開拓とプロセス開発
- (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の材料の開拓とプロセス開発

1.3 研究総括

佐藤勝昭

東京農工大学 名誉教授

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 特任フェロー

文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業プログラムディレクター

1.4 領域アドバイザー

本研究領域の幅広い技術範囲をカバーするため、領域の狙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11名を領域アドバイザーとした。表1-1に領域アドバイザーを示す。なお領域アドバイザーの中には、さきがけ経験者3名(岡本、小田、谷垣)及びCREST経験者2名(小森、藤巻)と、企業の研究関係者1名(就任時点では3名、栗野(株式会社富士通研究所)、波多野(株式会社日立製作所)、五明(日本電気株式会社))、女性の研究関係者2名(波多野、五明)が含まれている。

表1-1 領域アドバイザー

氏名	所属	役職	任期
栗野 祐二	慶應義塾大学	教授	2007年6月～2013年3月
岡本 博	東京大学	教授	2007年6月～2013年3月
小田 俊理	東京工業大学	教授	2007年6月～2013年3月
工藤 一浩	千葉大学	教授	2007年6月～2013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	2007年6月～2013年3月
小森 和弘	産業技術総合研究所	副研究部門長	2007年6月～2013年3月
高梨 弘毅	東北大学	教授	2007年6月～2013年3月
谷垣 勝己	東北大学	教授	2007年6月～2013年3月
名西 徳之	立命館大学	教授	2007年6月～2013年3月
波多野 睦子	東京工業大学	教授	2007年6月～2013年3月
藤巻 朗	名古屋大学	教授	2007年6月～2013年3月

(注)所属と役職はさきがけ終了時点に記載

1.5 研究課題及び研究者

研究者として、第1期11名、第2期10名、第3期12名を採択した。第1期の高橋有紀子は、ライフイベントのため研究期間が延長され、2011年6月に終了している。第2期の福村知昭は、内閣府の最先端・次世代研究開発プログラム(NEXT)に採択され2年終了時の2011年3月に終了している。

本追跡調査の対象とする研究者名と研究課題、及び採択時、終了時、追跡調査時(現在)の所属と役職を表1-2に示す。

表 1-2 研究課題と研究者(第 1 期、第 2 期、第 3 期)

期 (研究期間)	研究課題	研究者	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 (2007 年 10 月～2011 年 3 月)	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	葛西 誠也	北海道大学大学院 情報科学研究科 准教授	北海道大学大学院 情報科学研究科 准教授	北海道大学量子集 積エレクトロニク ス研究センター 教授
	誘電体スピントロニクス材 料開拓とスピン光機能	齊藤 英治	慶應義塾大学理工 学部 専任講師	東北大学金属材料 研究所 教授	東京大学大学院工 学系研究科物理工 学専攻 教授
	分子を介したスピン流の制 御	白石 誠司	大阪大学大学院基 礎工学研究科 准 教授	大阪大学大学院基 礎工学研究科 教 授	京都大学大学院工 学研究科電子工学 専攻 教授
	スピントロニクスデバイス 用室温ハーフメタルの探索	高橋 有紀子	物質・材料研究機 構磁性材料センタ ー 主任研究員	物質・材料研究機 構磁性材料センタ ー 主幹研究員	物質・材料研究機 構磁性・スピント ロニクス材料研究 拠点磁気記録材料 グループ グルー プリーダー
	スピン偏極の外的制御とチ ューナブルスピン源の創製	谷山 智康	東京工業大学応用 セラミックス研究 所 准教授	東京工業大学応用 セラミックス研究 所 准教授	名古屋大学大学院 理学研究科 教授
	フェムト秒パルス・レーザ による超高速スピン制御・ 計測	塚本 新	日本大学理工学部 講師	日本大学理工学部 講師	日本大学理工学部 教授
	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	深田 直樹	物質・材料研究機 構半導体材料セン ター 主任研究員	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 構国際ナノアーキ テクトニクス研究 拠点(MANA)ナノマ テリアル分野半導 体ナノ構造物質グ ループ グループ リーダー
	デバイス応用に向けたスピ ン流と熱流の結合理論	村上 修一	東京大学大学院工 学系研究科 助教	東京工業大学大学 院理工学研究科 准教授	東京工業大学理学 院物理学系 教授
	π 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	安田 剛	九州大学先端物質 化学研究所 助教	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	物質・材料研究機 構機能性材料研究 拠点分子機能化学 グループ 主幹研 究員
	ナノ磁性体集結群の新奇な 磁気特性の究明	山口 明啓	慶應義塾大学理工 学部 助教	慶應義塾大学理工 学部 助教	兵庫県立大学高度 産業科学技術研究 所 准教授
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	若林 克法	広島大学大学院先 端物質科学研究科 助教	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	関西学院大学理工 学部先進エネルギ ーナノ工学科 教 授	
第 2 期 (2008 年 10 月～2012 年 3 月)	極性ワイドギャップ半導体 フォトニックナノ構造の新 規光機能	片山 竜二	東京大学大学院新 領域創成科学研究 科 助教	東北大学金属材料 研究所 准教授	大阪大学大学院基 礎工学研究科 教 授
	ナノ構造制御した光生成磁 束量子デバイスの創製	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	大阪大学レーザー エネルギー学研究 センター 助教	京都大学大学院エ ネルギー科学研究 科 准教授
	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	寒川 義裕	九州大学応用力学 研究所 准教授	九州大学応用力学 研究所 准教授	九州大学応用力学 研究所 教授
	サーモエレクトロニクスを 指向した基礎材料の開発	小林 航	早稲田大学高等研 究所 助教	筑波大学大学院教 理物質科学研究科 助教	筑波大学物理学域 助教

期 (研究期間)	研究課題	研究者	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
	ワイドギャップ酸化物における界面機能開発	須崎 友文	東京工業大学応用セラミックス研究所 准教授	東京工業大学応用セラミックス研究所 准教授	三菱ケミカル株式会社 Science & Innovation Center Inorganic Materials Laboratory 主席研究員
	光配線 LSI 実現に向けた Ge ナノ光電子集積回路の開発	竹中 充	東京大学大学院工学系研究科 准教授	東京大学大学院工学系研究科 准教授	東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 准教授
	量子ドットを用いた単電荷・スピン・光機能融合デバイス	中岡 俊裕	東京大学生産技術研究所 特任准教授	上智大学理工学部 准教授	上智大学理工学部機能創造理工学科 教授
	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	浜屋 宏平	九州大学大学院システム情報科学研究科 助教	九州大学大学院システム情報科学研究科 准教授	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
	ワイドギャップ強磁性半導体デバイス	福村 知昭	東北大学金属材料研究所 助教	東北大学金属材料研究所 准教授	東北大学材料科学高等研究所 教授
	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	水落 憲和	筑波大学大学院図書館情報メディア研究科 講師	大阪大学大学院基礎工学研究科 准教授	京都大学化学研究所 教授
第3期 (2009年10月～2013年3月)	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	海住 英生	北海道大学電子科学研究科 助教	北海道大学電子科学研究科 助教	慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 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	組頭 広志	東京大学大学院工学系研究科 准教授	高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 教授	東北大学多元物質科学研究所 教授
	フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発	高橋 和	大阪府立大学 21世紀科学研究機構 講師	大阪府立大学工学研究科 講師	大阪府立大学大学院工学研究科電子数物系 准教授
	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	富岡 克広	JST さきがけ 専任研究者	JST さきがけ 専任研究者	北海道大学大学院情報科学研究科 准教授
	分子配列制御による有機トランジスタの高性能化	中野 幸司	東京大学大学院工学系研究科 助教	東京農工大学工学研究科 講師	東京農工大学大学院工学研究科応用化学部門 准教授
	誘電体トランジスタを用いたスピン操作	中村 浩之	大阪大学基礎工学研究科 特任助教	大阪大学大学院基礎工学研究科 助教	University of Arkansas Assistant Professor
	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	西永 慈郎	早稲田大学理工学術院 助教	早稲田大学高等研究所 准教授	産業技術総合研究所太陽光発電研究センター 主任研究員
	光制御型有機単一電子デバイスの開発	野口 裕	千葉大学先進科学センター 助教	千葉大学先進科学センター 助教	明治大学理工学部 専任准教授
	各種ナノカーボン構造体の自在実装	野田 優	東京大学大学院工学系研究科 准教授	早稲田大学理工学術院 教授	早稲田大学理工学術院 教授
	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	東脇 正高	情報通信研究機構 主任研究員	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 総括主任研究員	情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 グリーン ICT デバイス先端開発センター センター長
	グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現	町田 友樹	東京大学生産技術研究所 准教授	東京大学生産技術研究所 准教授	東京大学生産技術研究所 教授

期 (研究期間)	研究課題	研究者	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
	電子相関を利用した新原理 有機デバイスの開発	山本 浩史	理化学研究所加藤 分子物性研究室 専任研究員	分子科学研究所 物質分子科学研究 領域 教授	分子科学研究所協 奏分子システム研 究センター機能分 子システム創成研 究部門 教授

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、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の事業及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、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(2007年度～2012年度)」の研究者を対象とする。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

	さきがけ研究期間	さきがけ終了後の調査対象期間	研究課題数
第1期	2007年10月～2011年3月	2011年4月～2019年調査終了月	11
第2期	2008年10月～2012年3月	2012年4月～2019年調査終了月	10
第3期	2009年10月～2013年3月	2013年4月～2019年調査終了月	12

2.1.3 調査方法

(1) 研究助成金

本研究領域の研究者が研究代表者となっているものを中心に調査した。その中から、研究助成金の総額が1,000万円/件以上のものを抽出した。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。

- ・調査対象研究者所属大学の研究者データベース
- ・調査対象研究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)
- ・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、研究者が特定できる論文データベース(Scopus(エルゼビア社))を用い、研究者の所属機関と著者名検索により論文リストを出力し、article、review、conference

paper に絞り込み、研究期間中及び研究終了後の論文数を求めた。研究終了後から現在に至るまでの各研究課題の発展・展開概要を把握するため、研究期間中及び研究終了後の全ての論文に対して、以下の分類を行った。

- ① さきがけの成果と認められるもの
- ② さきがけの発展と認められるもの
- ③ さきがけと無関係と考えられるもの

①は、原則として研究者の課題事後評価書に記載の論文、また著者所属機関に「さきがけ・PRESTO」を含むものとした。論文の区分けは、各研究者に提示して、確認してもらうことによって決定した。加えて、Field Weighted Citation Impact (FWCI) 値¹を記した。

また、各論文の書誌 ID を入手し、調査時点での被引用数、被引用数の当該分野における Top0.1%、Top1%、Top10%、10%圏外のランク情報を入手した。

更に、②の論文について責任著者として、研究者が First 又は Last Author、あるいは連絡先著者となっている論文数を調べた。なお、著者名からは絞り込みできない研究者については、さきがけ研究のキーワードで、絞り込み検索を行った。

(3) 特許

特許出願及び登録状況は、特許データベース Shareresearch(株式会社日立製作所)を用い、出願日(若しくは優先権主張日)が研究課題開始以降で、研究者が発明者になっているものから、出願人名や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を除いて抽出した。

(4) 受賞、招待講演、報道、共同研究や企業との連携等

受賞、国際学会の招待講演、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成した。更に各研究者の確認により、修正・追加した。なお、これらはいずれも研究終了後を対象とした。

なお、追跡調査に当たっては、各研究者に依頼して、各リスト(研究助成金、論文、特許、受賞、招待講演、ベンチャー、報道)及び調査報告書の草稿の確認を可能な限り御協力いただいている。

¹ FWCI 値とは、当該文献の被引用数を、同じ出版年・同じ分野・同じ文献タイプの文献の世界平均で割った値である。すなわち、この論文が類似の論文と比較してどの程度引用されているかを示す指標で、FWCI 値が 1 を上回る論文は、平均よりも多く引用されていることを意味する。

2.2 追跡調査概要

2.2.1 研究助成金

研究者が研究代表者として獲得した研究助成金のうち、原則としてさきがけ採択以降に実施したもので、その総額が1,000万円/件以上の案件について、表2-2に示す。研究者は、これらのほかにも助成金(研究分担者として、あるいは研究代表者ではあるが1件1,000万円未満)を獲得して研究を進めている。

表2-2 研究助成金獲得状況

JST ■ 科研費 ■ 日本学術振興会 ■ 内閣府 ■ NEDO ■ 総務省 ■ 文部科学省 ■ その他 ■

さきがけ採択以降に開始されたプロジェクトで、助成金総額が1,000万円/件以上のもののみを記載。

研究者	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	金額 (百万 円)	
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
				7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3
葛西誠也	2007～2010	さきがけ	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	■	■	■														40.0
	2010～2012	科研費 基盤研究(B)	半導体ナノワイヤ3分岐接合デバイスの非線形メカニズムの解明と制御				■	■	■											18.3
	2013～2017	科研費 新学術領域研究「分子アーキテクト」(研究領域提案型・計画研究)	単一分子集積ネットワークによる情報処理機能実装と信頼性向上							■	■	■	■							98.4
	2018～2020	科研費 基盤研究(B)	使い易いマン・マシンインターフェースのための適応型非線形筋電検出技術の開拓												■	■	■			17.4
	2018～2020	NEDO ; 高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発	AI エッジデバイスの横断的なセキュリティ評価に必要な基盤技術の研究開発/電氣的読出し技術													■	■	■		54.3

研究者	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	金額 (百万円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
齊藤 英治	2007～2010	さきがけ	誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能																40.0	
	2009～2011	科研費 基盤研究(A)	スピンゼーベック効果と熱流-スピン相互利用の系統的研究																47.8	
	2009～2011	NEDO；産業技術研究助成 事業費助成金(若手)	熱材料技術とスピントロニクスの融合による超高効率な熱電変換技術の開発																30.0	
	2010～2015	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																150.0 ～ 498.0	
	2012～2014	科研費 基盤研究(A)	絶縁体スピントロニクスの構築と体系化																47.8	
	2014～2019	ERATO	齊藤スピン量子整流プロジェクト																1200.0	
	2014～2018	科研費 新学術領域研究「スピン変換」(研究領域提案型)	熱・力学的スピン変換																212.9	
	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																206.3	
白石 誠司	2007～2010	さきがけ	分子を介したスピン流の制御																40.0	

研究者	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	金額 (百万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	2010～2012	科研費 基盤研究(B)	分子性半導体におけるスピン輸送特性・緩和機構の精密測定																	19.6
	2013～2015	科研費 基盤研究(A)	シリコン中の蓄積スピンと純スピン流物性の研究																	47.2
	2014～2018	科研費 新学術領域研究「スピン変換」(研究領域提案型)	電気的スピン変換																	247.3
	2016～2020	科研費 基盤研究(S)	半導体スピントロニクス																	174.7
	2016	科研費 基盤研究(A)	シリコンスピントランジスタの高性能化と高機能化に関する研究																	15.3
高橋有紀子	2007～2011	さきがけ	スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索																	40.0
	2011～2013	科研費 若手研究(A)	エネルギーアシストによるFePt垂直媒体の磁化反転制御																	21.8
	2014～2016	科研費 基盤研究(B)	超高密度磁気記録のためのエネルギーアシスト垂直媒体の開発と磁化反転制御																	16.1
	2018～2021	科研費 基盤研究(A)	高異方性垂直磁化膜の創製と磁化反転制御																	40.3

研究者	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	金額 (百万円)		
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	
谷山 智康	2007～2010	さきがけ	スピン偏極の外的制御とチューナブルスピンの創製																		40.0	
	2009～2012	NEDO；先導的産業技術創出事業(若手研究 Grant)	超低電力電圧駆動型スピン偏極・配向化技術の開発																			50.0
	2010～2012	科研費 基盤研究(B)	スピン流を介した量子構造の磁気秩序化ダイナミクス																			19.1
	2011～2013	東レ科学振興会；東レ科学振興会科学技術研究助成	相補的光学アプローチを利用した界面スピン伝導の機構解明																			13.0
	2014～2016	科研費 基盤研究(B)	スピン流によるスピン波変調と磁気秩序制御の原理実証																			16.5
	2015～2016	科研費 新学術領域研究「スピン変換」(研究領域提案型)	メタ磁性転移物質を舞台とした磁気界面マグノン変換と伝播・位相制御																			10.4
	2017～2019	科研費 基盤研究(B)	界面スピン-軌道結合制御と反強磁性スピンメカニクスの学理構築																			18.2
	2017	旭硝子財団継続型 Grant(ステップアップ助成)	マルチフェロイク・マグノニクス技術の開発																			13.3
	2018～2023	CREST	界面マルチフェロイク材料の創製																			130.0

研究者	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	金額 (百万 円)									
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0							
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
安田剛	2007～2010	さきがけ	π 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																									40.0	
	2007～2010	さきがけ	ナノ磁性体集結群の新たな磁気特性の究明																										40.0
山口明啓	2013～2015	科研費 基盤研究(B)	表面弾性波変調機構を用いたスピン波による情報伝達の提案																										18.1
	2016～2017	総務省 SCOPE	ユビキタス・分子センシングのための高次ナノ構造体の創製と応用展開の研究開発																										20.0
	2017～2020	科研費 基盤研究(B)	細胞内情報伝達の仕組みを究明する統合ナノマイクロシステムの創製																										18.2
若林克法	2007～2010	さきがけ	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																										40.0
	2011～2013	科研費 基盤研究(B)	グラフェン関連物質における境界面効果の電子物性理論																										18.2
	2018～2020	科研費 基盤研究(B)	原子膜物質におけるバレー流の熱・光学制御、新規トポロジカル材料の設計																										15.7
片山竜二	2008～2011	さきがけ	極性ワイドギャップ半導体フォトリックナノ構造の新規光機能																									40.0	

研究者	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	金額 (百万円)		
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	
浜屋 宏平	2008～2011	さきがけ	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																		40.0	
	2009～2012	NEDO；先導的産業技術創出事業(若手研究 Grant)	次世代半導体 Ge チャネルを利用した超低消費電力スピントランジスタの開発																			50.0
	2010～2012	科研費 若手研究(A)	強磁性合金上へのシリコンゲルマニウム単結晶成長と縦型スピン素子への応用																			25.9
	2012～2014	総務省 SCOPE	純スピン流を利用した半導体不揮発多値メモリの要素技術開発																			60.0
	2013～2015	科研費 基盤研究(A)	縦型ショットキースピントランジスタの創製																			42.3
	2016～2019	科研費 基盤研究(A)	純スピン流伝導の光・電界制御																			44.5
	2018～2020	科研費 国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))	ホイスラー型新機能スピントロニクス材料の薄膜実証とその応用																			17.9
	2019～2023	科研費 基盤研究(S)	ゲルマニウムスピン MOSFET の実証																			202.2
福村 知昭	2008～2010	さきがけ	ワイドギャップ強磁性半導体デバイス																		40.0	

研究者	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	金額 (百万円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	2010～2013	NEXT	透明半導体スピントロニクス基礎と応用																	154.7
	2014～2018	科研費 新学術領域研究「3D 活性サイト」(研究領域提案型)	先端半導体・先端機能材料の 3D 活性サイト創製																	118.0
	2018～2021	科研費 基盤研究(A)	強い磁化をもつ室温強磁性酸化物半導体を用いた希土類酸化物スピントロニクスの開拓																	45.0
水 落 憲 和	2008～2011	さきがけ	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																	40.0
	2011～2013	科研費 若手研究(A)	量子ネットワーク構築のための固体における単一発光中心の研究																	28.0
	2012～2013	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	ダイヤモンド NV 中心における量子情報の電氣的制御に向けた研究																	11.7
	2014～2015	総務省 SCOPE	ダイヤモンドを用いた次世代量子暗号用素子の基盤技術開発研究																	60.0
	2015～2019	科研費 新学術領域研究「ハイブリッド量子」(研究領域提案型)	フォトンハイブリッド量子科学の研究																	206.4
	2016～2018	科研費 基盤研究(A)	ダイヤモンドによる超高感度・超高分解能量子ナノセンサ																	43.0

研究者	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	金額 (百万円)						
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0				
				7	8	9	0	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	2	2	2	3	
海住英生	2009～2012	さきがけ	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																						40.0	
	2015～2017	科研費 基盤研究(B)	強磁性ナノ接合を用いた巨大磁気キャパシタンス効果素子の創製																							17.0
	2018～2020	科研費 基盤研究(B)	磁気トンネル接合における電圧誘起型巨大磁気キャパシタンス効果の発現																							17.3
組頭広志	2009～2012	さきがけ	ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発																							40.0
	2013～2016	科研費 基盤研究(B)	酸化物量子井戸構造を用いた強相関電子の量子化状態の研究																							19.2
	2016～2019	科研費 基盤研究(A)	酸化物量子井戸構造に誘起される新奇な2次元電子液体とその機能																							41.6
	2017～2019	科研費 国際共同研究 加速基金 (国際共同研究強化)	高輝度放射光を用いた強相関酸化物表面・界面解析プラットフォームの構築 (国際共同研究強化)																							15.0
高橋和	2009～2012	さきがけ	フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発																							40.0
	2011～2014	科研費 若手研究(A)	シリコンフォトニック結晶ナノ共振器の性能向上と非線形光学効果の増強																							27.0

研究者	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	金額 (百万 円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
富岡 克広	2014～2016	旭硝子財団 ステップア ップ助成	高Q値フォトニック結 晶ナノ共振器を用いた ラマンシリコンレーザ ーの高出力化																	15.0
	2014～2016	東レ科学振 興会；東レ 科学技術研 究助成	超低閾値シリコンラ マンレーザの高効率化																	15.0
	2015～2017	科研費 若 手研究(A)	ナノ共振器シリコンラ マンレーザの光利得 機構の解明と発振特性 評価																	24.6
	2018～2020	科研費 基 盤研究(B)	高品質フォトニック結 晶素子におけるインコ ヒーレント光励起誘導 ラマン利得の研究																	17.6
	2009～2012	さきがけ	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																	40.0
	2012～2015	さきがけ	新しい半導体固相界面 による新規グリーンデ バイスの開発																	40.0
	2016～2018	科研費 若 手研究(A)	IV族/III-V族ヘテロ接 合の界面欠陥制御に基 づく低電圧スイッチ素 子の回路																25.0	
	2018～2020	東電記念財 団	新しい半導体接合を用 いた低電圧スイッチ素 子の高性能化																10.0	
	2019～2021	科研費 基 盤研究(B)	Si III-V異種接合による ナノワイヤ縦型トンネ ル FET 立体集積回路技 術の確立																17.7	

研究者	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	金額 (百万円)								
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0						
				7	8	9	0	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2
中野 幸司	2009～2012	さきがけ	分子配列制御による有機トランジスタの高性能化																								40.0	
中村 浩之	2009～2012	さきがけ	誘電体トランジスタを用いたスピン操作																									40.0
西永 慈郎	2009～2012	さきがけ	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																									40.0
野口 裕	2009～2012	さきがけ	光制御型有機単一電子デバイスの開発																									40.0
野田 優	2009～2012	さきがけ	各種ナノカーボン構造体の自在実装																									40.0
	2010～2015	ALCA	超省資源ナノチューブフレキシブルエレクトロニクス																									114.1
	2013～2016	科研費 基盤研究(A)	3次元ナノ界面の大規模創製と、蓄電デバイス電極への展開																									43.0
	2016～2020	科研費 基盤研究(S)	簡易・高速プロセスによるソフト電池の創製と、構造変化の可逆化による容量革新																									
東脇 正高	2009～2012	さきがけ	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																									40.0

研究者	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	金額 (百万円)
				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
				7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	2013～2016	科研費 基盤研究(B)	ワイドギャップⅢ族酸化物/窒化物半導体ヘテロ構造作製のための基盤技術開拓																	17.6
	2014～2018	内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム	酸化ガリウムパワーデバイス基盤技術の研究開発																	236.9
	2018～2019	総務省 SCOPE	マイクロ波帯酸化ガリウムトランジスタの研究開発																	10.9
	2019～2021	科研費 基盤研究(B)	パワーデバイス応用に向けた酸化ガリウム/IV族半導体直接接合界面形成																	17.4
町田友樹	2009～2012	さきがけ	グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現																	40.0
	2015～2020	CREST	ファンデルワールス超格子の作製と光機能素子の実現																	300.0
山本浩史	2009～2012	さきがけ	電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発																	40.0
	2016～2018	科研費 基盤研究(B)	溶液プロセスによる二次元単分子層接合デバイスの創成																	17.9
	2019～2022	科研費 基盤研究(A)	有機強相関電子デバイスによる伝導性と磁性の制御																	45.5

2019年7月3日調査

2.2.2 論文

本研究領域の研究者が研究期間中及び研究終了後に発表した原著論文の数を表 2-3 にまとめた。研究期間中の成果論文は表 2-3 中の①に、研究終了後の成果論文は表中の②に示した。更に研究終了後の論文については、研究者が責任著者となった論文数を示した。

①のさきがけの研究成果の論文では、谷山と浜屋の共著論文が 1 報、谷山、浜屋、町田の共著論文が 1 報、若林と村上の共著論文が 1 報、高橋(有)と浜屋の共著論文が 1 報、小林と齊藤の共著論文が 1 報、寒川と若林の共著論文が 1 報あるため、各研究者の論文数の合計と領域全体の論文数は一致しない。②のさきがけの研究成果の継続と発展に関する論文では、谷山と浜屋の共著論文が 2 報、白石と浜屋の共著論文が 1 報、高橋(和)と町田の共著論文が 1 報、村上と白石の共著論文が 1 報、町田と浜屋の共著論文が 1 報、山本と齊藤の共著論文が 1 報、白石と齊藤の共著論文が 1 報、白石と須崎の共著論文が 1 報あるため、各研究者の論文数の合計と領域全体の論文数は一致しない。

図 2-1 には①さきがけの研究成果、②さきがけの研究成果の継続と発展に関する論文数及び Top10%以内論文数を、図 2-2 には各研究者の論文数分布、図 2-3 には各研究者の①さきがけの成果、②さきがけの研究成果の継続と発展に関する論文数及び Top10%以内論文数を示した。

表 2-3 研究期間中、及び研究終了後の論文（原著論文）数と Top%論文数

期 (採択 年度)	研究者	①さきがけの 研究成果の論 文数	①の Top%論文数			②さきがけの研究成 果の継続と発展に関 する論文数		②の Top%論文数		
			0.1%	1%	10%	論文数	【責任著 者】	0.1%	1%	10%
第 1 期 (2007 年度)	葛西 誠也	22				32	【20】			2
	齊藤 英治	54	1	8	19	144	【10】	1	13	30
	白石 誠司	17			3	53	【31】			16
	高橋 有紀子	26			8	34	【2】			9
	谷山 智康	23		1	6	30	【15】			4
	塚本 新	7		2	3	47	【5】		2	5
	深田 直樹	36			2	46	【30】			5
	村上 修一	25		1	10	30	【15】		2	6
	安田 剛	15			1	42	【13】			6
	山口 明啓	25				27	【24】			
	若林 克法	34			4	31	【18】		2	2

第2期 (2008 年度)	片山 竜二	2				15	【0】			3
	川山 巖	6				48	【8】			4
	寒川 義裕	8				2	【2】			
	小林 航	9			3	6	【1】			1
	須崎 友文	13			1	12	【5】			1
	竹中 充	49		5	11	143	【25】		2	16
	中岡 俊裕	9				4	【2】			
	浜屋 宏平	34		1	15	60	【43】			2
	福村 知昭	15		1		8	【4】			1
	水落 憲和	6	1	1	2	34	【11】			4
第3期 (2009 年度)	海住 英生	14				6	【6】			
	組頭 広志	27			5	31	【5】			2
	高橋 和	10		3	1	20	【9】			1
	富岡 克広	33		2	8	21	【9】			1
	中野 幸司	2		1	1	7	【6】			1
	中村 浩之	6			1	3	【2】			
	西永 慈郎	11				1	【1】			
	野口 裕	5				4	【4】			
	野田 優	12			1	25	【20】			1
	東脇 正高	12	1	3	2	39	【17】	3	6	7
	町田 友樹	12			3	39	【32】			4
山本 浩史	9				23	【12】			1	
領域全体	583 (6)	3	29	107 (3)	1058 (9)	【402】 (5)	4	27	133 (2)	

2019年9月11日調査

(注)各研究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。

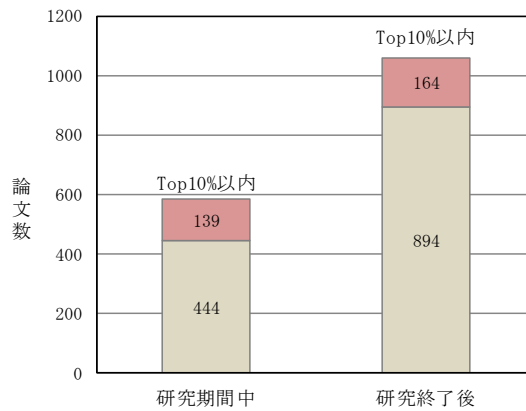


図 2-1 さきがけ研究期間中・終了後の論文数

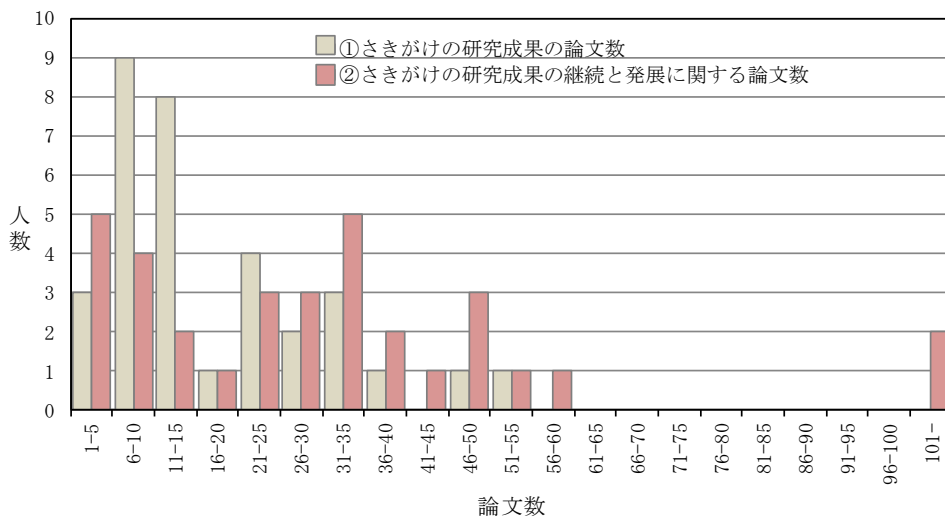


図 2-2 各研究者の論文数分布

領域全体では、研究期間中の発表論文は 583 報(このうち Top10%以内は 139 報)であり、終了後は 1058 報(このうち Top10%以内は 164 報)と大きく増加し、また Top10%以内の論文数の増加も確認できる。各研究者の論文数分布は、ばらつきがあるが、全体として研究期間中に対して研究終了後は論文数増加にシフトしており、活発に研究活動が展開されている様子がうかがえる。また論文数 30 報以上の研究者数は、研究期間中で 6 名、研究終了後で 17 名である。

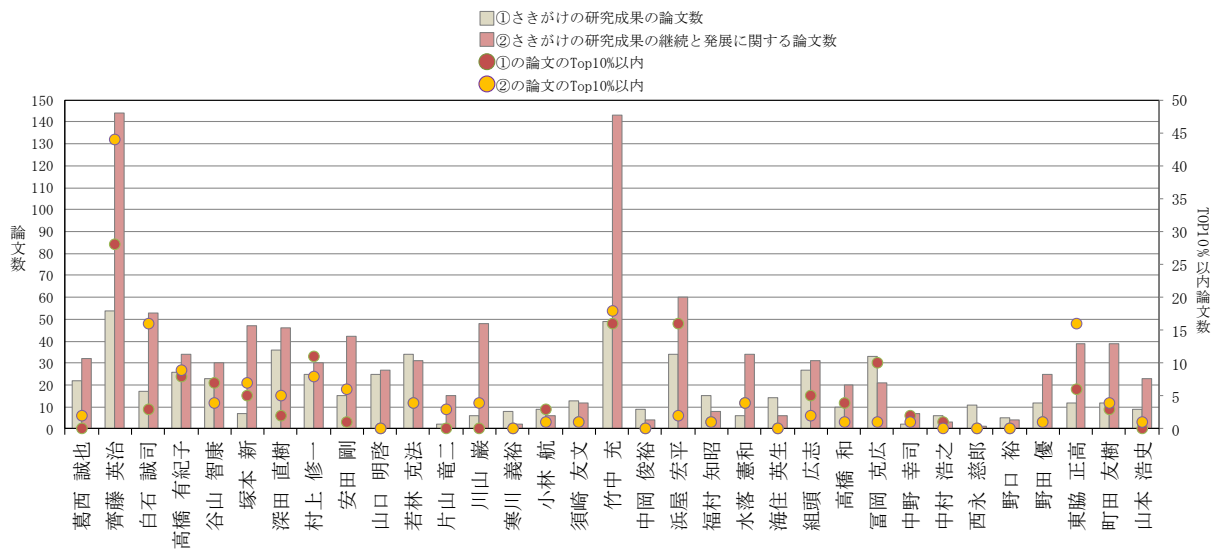


図 2-3 各研究者の研究期間中・終了後の論文数

研究者別では、各研究者間でばらつきがあるが、さきがけの研究成果の論文を最も多く発表したのは、第 1 期の齊藤の 54 報で、次いで第 2 期の竹中の 49 報、第 1 期の深田の 36 報、第 1 期の若林の 34 報、第 2 期の浜屋の 34 報であった。また、さきがけの研究成果の継続と発展の論文に関しては、第 1 期の齊藤の 144 報が最も多く、次いで、第 2 期の竹中の 143 報、第 2 期の浜屋の 60 報、第 1 期の白石の 53 報であった。一方、さきがけの研究成果の継続と発展の論文に関して、Top10%以内の論文数は、第 1 期の齊藤が 44 報と最も多く、次いで第 2 期の竹中の 18 報、第 1 期の白石の 16 報、第 3 期の東脇の 16 報であり、Top0.1%以内の論文では、第 1 期の齊藤の 1 報、第 3 期の東脇の 3 報があった。

2.2.3 特許

特許出願、公開及び登録は、研究目的と段階によりその数は異なるが、研究が最終的に一定の成果を収め、実用化に向けた社会貢献につながる段階に達したことを示す重要な指標である。本研究領域の研究者別の特許出願件数及び登録件数の結果を表 2-4 に示す。

表 2-4 研究期間中・終了後の特許の出願と登録状況

期 (採択年度)	研究者	研究期間中				研究終了後			
		国内		海外 (国際)		国内		海外 (国際)	
		出願 件数	登録 件数	出願 件数	登録 件数	出願 件数	登録 件数	出願 件数	登録 件数
第 1 期 (2007 年度)	葛西 誠也	2	2	2 (2)	1 (1)	6	2	2 (2)	1 (1)
	齊藤 英治	7	7	5 (5)	5 (5)	17	8	10 (10)	3 (3)
	白石 誠司	0	0	0	0	1	0	0	0

	高橋 有紀子	6	3	0	0	9	6	7 (7)	5 (5)
	谷山 智康	2	0	0	0	0	0	0	0
	塚本 新	1	1	1 (1)	0	0	0	0	0
	深田 直樹	7	2	0	0	5	5	1 (1)	0
	村上 修一	0	0	0	0	0	0	0	0
	安田 剛	1	1	0	0	3	2	0	0
	山口 明啓	2	0	0	0	3	2	0	0
	若林 克法	0	0	0	0	0	0	0	0
第2期 (2008年度)	片山 竜二	0	0	0	0	1	0	0	0
	川山 巖	2	2	1	1	18	14	10 (1)	9
	寒川 義裕	2	2	0	0	0	0	0	0
	小林 航	0	0	0	0	2	1	1 (1)	0
	須崎 友文	3	2	2 (1)	2 (1)	3	1	0	0
	竹中 充	1	0	0	0	7	1	3 (2)	2 (1)
	中岡 俊裕	0	0	0	0	0	0	0	0
	浜屋 宏平	1	1	1 (1)	1 (1)	0	0	0	0
	福村 知昭	1	1	0	0	0	0	0	0
	水落 憲和	0	0	0	0	6	4	2 (2)	1 (1)
第3期 (2009年度)	海住 英生	3	2	1 (1)	0	0	0	0	0
	組頭 広志	0	0	0	0	0	0	0	0
	高橋 和	1	1	1 (1)	1 (1)	1	0	0	0
	富岡 克広	3	3	3 (3)	3 (3)	4	3	3 (3)	3 (3)
	中野 幸司	2	0	0	0	0	0	0	0
	中村 浩之	1	1	0	0	0	0	0	0
	西永 慈郎	0	0	0	0	0	0	0	0
	野口 裕	1	1	0	0	0	0	0	0
	野田 優	5	2	1 (1)	1 (1)	6	1	6 (6)	0
	東脇 正高	7	6	6 (6)	2 (2)	23	9	12 (10)	6 (5)
	町田 友樹	0	0	0	0	0	0	0	0
山本 浩史	0	0	0	0	0	0	0	0	
	領域全体	61	40	24 (22)	17 (15)	115	59	57 (45)	30 (19)

2019年10月28日調査

(注)PCT 出願された特許は海外出願件数1件としてカウントし、各国出願分は含めない。海外登録件数は、いずれかの国で登録されれば1件とカウント。()内は国際を示す。

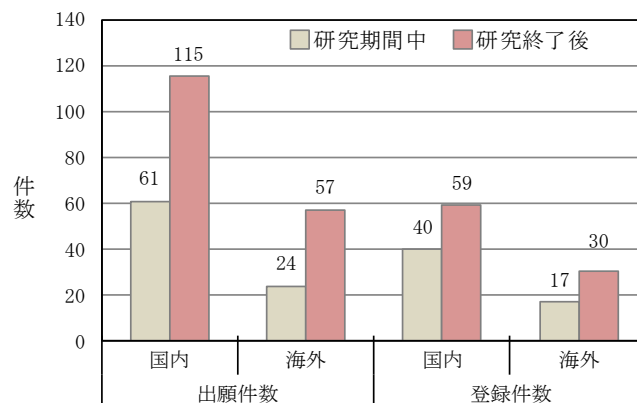


図 2-4 さきがけ研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

領域全体では、研究終了後に、国内・海外の出願件数は大きく伸びており、国内・海外の登録件数も伸びている。実用化に向けて活発に活動していることがうかがえる。

研究者別では、最も多く出願かつ登録されているのは、第3期の東脇で、研究期間中に国内7件、海外6件を出願し、国内6件、海外2件を登録しており、研究終了後に、国内23件、海外12件を出願し、国内9件、海外6件を登録している。次いで第1期の齊藤が多く、研究期間中に国内7件、海外7件を出願し、国内5件、海外5件を登録しており、研究終了後に、国内17件、海外10件を出願し、国内8件、海外3件を登録している。本研究領域は、基礎研究の研究課題が多かったためか、特許出願していない研究者が7名、研究期間中、又は研究終了後に1件のみ出願した研究者は2名である。

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。研究終了後の各研究者の受賞リストを表2-5に示す。

文部科学省より、文部科学大臣表彰若手科学者賞を、齊藤、中岡、富岡が受賞しており、文部科学大臣表彰科学技術賞を、齊藤、白石が受賞している。

日本学士院から学術奨励賞を、齊藤が受賞している。

日本学術振興会より日本学術振興会賞を、齊藤、村上、若林、富岡、東脇が受賞している。

米国物理学会より米国物理学会フェローを、村上が受賞している。

日本物理学会より、日本物理学会若手奨励賞を、齊藤、山口、若林が受賞している。

日本化学会より日本化学会学術賞を、山本が受賞している。

IEEEより、Distinguished Lecturerを齊藤が受賞している。

IEEEより、IEEE EDS Paul Rappaport Awardを竹中が受賞している。

齊藤は、クラリベート・アナリティクス社より、2017、2018、2019年と3年連続して Highly Cited Researchersを受賞している。

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.	葛西 誠也	MNC2013 Award for Outstanding Paper	International Microprocesses and Nanotechnology Conference	2014
2.		平成 26 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞	情報処理学会高度交通システムとスマートコミュニティ研究会	2015
3.		第 18 回発表奨励賞受賞者	応用物理学会北海道支部	2015
4.		2015 年度 エレクトロニクスソサイエティ活動功労表彰	電子情報通信学会	2016
5.		第 63 回応用物理学会春季学術講演会 Poster Award	応用物理学会	2016
6.		第 33 回(2017 年度) テレコムシステム技術賞	電気通信普及財団	2018
7.	齊藤 英治	第 7 回 日本学士院 学術奨励賞	日本学士院	2011
8.		第 7 回 日本学術振興会賞	日本学術振興会	2011
9.		第 5 回 日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	2011
10.		2011 年 文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2011
11.		第 10 回 船井学術賞	船井情報科学振興財団	2011
12.		第 25 回 日本 IBM 科学賞 (物理学分野)	日本アイ・ビー・エム株式会社	2011
13.		第 11 回 ドコモモバイルサイエンス賞	モバイル・コミュニケーション・ファンド	2012
14.		第 5 回 シリコンテクノロジー分科会論文賞	応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会	2014
15.		第 20 回 読売テクノフォーラム・ゴールドメダル	読売テクノ・フォーラム	2014
16.		2015 年 日本磁気学会 出版賞	日本磁気学会	2015
17.		2017 年 IEEE (magnetics), Distinguished Lecturer	IEEE	2017
18.		2017 年 文部科学大臣表彰科学技術賞	文部科学省	2017
19.		第 14 回 本多フロンティア賞	本田記念会	2017
20.		2017 年 Highly Cited Researchers (Clarivate Analytics)	クラリベート・アナリティクス社	2017
21.		第 34 回 井上学術賞	井上科学振興財団	2018
22.		2018 年 Highly Cited Researchers (Clarivate Analytics)	クラリベート・アナリティクス社	2018

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
23.		2019年 Highly Cited Researchers (Clarivate Analytics)	クラリベート・アナリティクス社	2019
24.	白石 誠司	第2回 RIEC Award	東北大学 電気通信研究所	2012
25.		第2回 大阪大学総長顕彰	大阪大学	2013
26.		2013年 日本磁気学会 優秀研究賞	日本磁気学会	2013
27.		第5回 シリコンテクノロジー分科会 論文賞	応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会	2014
28.		第7回 シリコンテクノロジー分科会 論文賞	応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会	2016
29.		2017年 文部科学大臣表彰 科学技術賞	文部科学省	2017
30.		第36回 大阪科学賞	大阪府、大阪市、大阪科学技術センター	2018
31.	高橋 有紀子	2012年 日本磁気学会 優秀研究賞	日本磁気学会	2012
32.		2018年 金属学会功績賞	日本金属学会	2018
33.	谷山 智康	応用セラミックス研究所長賞 (研究業績部門)	東京工業大学応用セラミックス研究所	2011
34.		2013年 New Product & Novel Technology Award	International Conference on Ferrites	2013
35.		13th Joint MMM-Intermag Best Poster Award	Joint MMM-Intermag	2016
36.		第46回 (2019年春季) 応用物理学会 講演奨励賞	応用物理学会	2019
37.		第20回 粉体粉末冶金協会 論文賞	粉体粉末冶金協会	2019
38.		日本磁気学会 令和元年度優秀研究賞	日本磁気学会	2019
39.	塚本 新	2013年 日本磁気学会論文賞	日本磁気学会	2013
40.		電気学術振興賞 (進歩賞)	電気学会	2014
41.		2016年 日本磁気学会 優秀研究賞	日本磁気学会	2016
42.		Best Poster Award	MORIS2018	2018
43.	深田 直樹	The 8th International Nanotechnology Conference (INC) Japan Nano Day Best Poster Award	International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation	2012
44.		SAT テクノロジーショーケース ベスト新分野開拓賞	つくばサイエンス・アカデミー	2013
45.		第8回 NIMS 理事長賞 研究奨励賞	物質・材料研究機構	2013

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
46.	村上 修一	第 25 回 日本 IBM 科学賞 (物理分野)	日本アイ・ビー・エム株式会社	2011
47.		第 9 回 日本学術振興会賞	日本学術振興会	2013
48.		2015 年 日本磁気学会 出版賞	日本磁気学会	2015
49.		第 33 回井上学術賞	井上科学振興財団	2017
50.		米国物理学会フェロー	米国物理学会	2018
51.	山口 明啓	第 6 回 日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	2012
52.		電気学会 優秀論文発表賞	電気学会	2012
53.		第 30 回 エレクトロニクス実装学会 春季講演大会 講演大会優秀賞	エレクトロニクス実装学会	2017
54.		電気学会 センサ・マイクロマシン 部門 優秀論文発表賞	電気学会	2017
55.	若林 克法	第 6 回 日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	2012
56.		第 13 回 日本学術振興会賞	日本学術振興会	2017
57.	片山 竜二	応用物理学会ポスターアワード	応用物理学会	2013
58.		電子材料シンポジウム EMS 賞	電子材料シンポジウム実行委員会	2014
59.		研究奨励賞	日本結晶成長学会 ナノ構造・エ ピタキシャル成長分科会, 第 6 回 窒化物半導体結晶成長講演会	2014
60.		講演奨励賞	第 75 回 応用物理学会秋季学術講 演会	2014
61.		優秀ポスター賞	第 128 回 東北大学金属材料研究 所所内講演会	2014
62.		講演奨励賞	第 19 回 応用物理学会東北支部学 術講演会	2015
63.		Yamaguchi Masahito Award	第 3 回 発光素子とその産業応用 に関する国際学会 LEDIA' 15	2015
64.		Young Scientist Award	The 6th International Symposium on Growth of III- Nitrides (ISGN-6)	2015
65.		講演奨励賞	第 20 回 応用物理学会東北支部学 術講演会	2016
66.		育志賞	日本学術振興会	2016
67.		研究奨励賞	第 9 回 日本結晶成長学会 ナノ構 造・エピタキシャル成長講演会	2017
68.		Best Young Scientist Award	紫外発光材料及びデバイスに関する 国際ワークショップ IWUMD2017	2017

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
69.		Yamaguchi Masahito Award	第6回 発光素子とその産業応用に関する国際学会 LEDIA' 18	2018
70.		発表奨励賞	第10回 日本結晶成長学会 ナノ構造・エピタキシャル成長講演会	2018
71.		講演奨励賞	第79回 応用物理学会秋季学術講演会	2018
72.		Student Award	第10回 窒化物半導体に関する国際ワークショップ IWN2018	2018
73.		菅田・Cohen 賞	大阪大学 工学研究科 電気電子情報工学専攻	2019
74.		Yamaguchi Masahito Award	第7回 発光素子とその産業応用に関する国際学会 LEDIA' 19	2019
75.	川山 巖	大阪大学 平成24年度大阪大学総長顕彰・総長奨励賞（研究部門）	大阪大学	2012
76.		大阪大学 平成27年度大阪大学総長顕彰・総長奨励賞（研究部門）	大阪大学	2015
77.	寒川 義裕	Photo Contest Award in The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016
78.		APEX/JJAP Editorial Contribution Award, The Japan Society of Applied Physics,	応用物理学会	2018
79.	小林 航	2017-01 筑波大学若手教員奨励賞	筑波大学	2017
80.	竹中 充	IEEE EDS Paul Rappaport Award	IEEE	2014
81.		第9回シリコンテクノロジー分科会論文賞	応用物理学会	2018
82.	中岡 俊裕	科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞	文部科学省	2012
83.	浜屋 宏平	第13回 船井学術賞	船井情報科学振興財団	2014
84.		第9回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会論文賞	応用物理学会	2017
85.		第40回（2018年度）応用物理学会論文賞「応用物理学会優秀論文賞」	応用物理学会	2018
86.	水落 憲和	永瀬賞最優秀賞, 第2回フロンティアサロン「ダイヤモンドを用いた量子情報素子の研究」	フロンティアサロン財団	2012
87.		第2回大阪大学総長奨励賞	大阪大学	2013
88.		第3回大阪大学総長奨励賞	大阪大学	2014

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
89.		第4回大阪大学総長奨励賞	大阪大学	2015
90.		応用物理学会優秀論文賞	応用物理学会	2016
91.	海住 英生	Material Research Society Spring Meeting 2014 Best Poster Presentation Award	Material Research Society	2014
92.		平成26年度 日本磁気学会学術奨励賞(内山賞)	日本磁気学会	2014
93.		応用物理学会 第77回応用物理学会秋季学術講演会 Poster Award(筆頭:学生)	応用物理学会	2016
94.		第64回応用物理学会 春季学術講演会 Poster Award	応用物理学会	2017
95.		第53回応用物理学会北海道支部発表奨励賞(筆頭:学生)	応用物理学会	2018
96.		日本材料科学会 第4回マテリアルズ・インフォマティクス基礎研究会 講演最優秀賞(筆頭:学生)	日本材料科学会	2018
97.		The 6th Japan-Korea International Symposium on Materials Science and Technology 2019 (JKMST 2019) Best Poster Award(筆頭:学生)	日本材料科学会	2019
98.	高橋 和	平成25年度 丸文学術賞	丸文財団	2014
99.		第37回 レーザー学会優秀論文発表賞(筆頭:学生)	レーザー学会	2017
100.		Optics Express Editor's pick Optics Express 25, 18165 (2017)	Optical Society of America	2017
101.		第78回 応用物理学会秋季学術講演会 Poster Award(筆頭:学生)	応用物理学会	2017
102.		Excellent Poster Presentation Award	Joint Symposium of Asia Five Universities	2017
103.		第9回 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会研究奨励賞(筆頭:学生)	応用物理学会シリコンテクノロジー分科会	2018
104.		CLEO Pacific Rim 2018 Best Student Paper Award(筆頭:学生)	Optical Society of America	2018
105.		応用物理学会関西支部平成30年度第3回講演会 優秀ポスター賞(筆頭:学生)	応用物理学会関西支部	2019

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
106.		Best Poster Award (筆頭：学生)	The 8th Joint Symposium on Advanced Materials and Applications (台湾)	2019
107.		Excellent Poster Presentation Award (筆頭：学生)	The 4th FZU-OPU Joint Symposium (中国)	2019
108.	富岡 克広	電子・情報・システム部門 技術委員会奨励賞	電気学会	2013
109.		エレクトロニクスソサイエティ招待論文賞	電子情報通信学会	2014
110.		第 17 回丸文研究奨励賞	丸文財団	2014
111.		第 27 回安藤博記念学術奨励賞	安藤研究所	2014
112.		科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞	文部科学省	2015
113.		研究開発奨励賞優秀賞	エヌエフ基金	2015
114.		第 5 回 RIEC Award	東北大学 電気通信研究所 (RIEC)	2015
115.		平成 27 年度 研究総長賞(奨励賞)	北海道大学	2016
116.		国際固体素子・材料国際会議論文賞 (SSDM Paper Award)	国際固体素子・材料国際会議	2016
117.		第 13 回 (平成 28 年度) 日本学術振興会賞	日本学術振興会賞	2016
118.		第 16 回船井学術賞	船井情報科学振興財団	2017
119.		Material Research Society Symposium Best Paper Award	Material Research Society	2017
120.	中野 幸司	コニカミノルタ 研究企画賞	有機合成化学協会	2014
121.	西永 慈郎	第 32 回電子材料シンポジウム EMS 賞	電子材料シンポジウム	2013
122.	野田 優	早稲田大学 早稲田大学ティーチングアワード 材料プロセス工学	早稲田大学	2014
123.		Department of Chemical Engineering, Hiroshima University Distinguished Lecture in Chemical Engineering, Hiroshima University	広島大学	2014
124.		早稲田大学 早稲田大学ティーチングアワード 材料プロセス工学	早稲田大学	2016
125.	東脇 正高	第 27 回 独創性を拓く先端技術大賞「特別賞」	フジサンケイ ビジネスアイ	2013
126.		第 11 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2015

No.	受賞者	賞の名称	授与機関	受賞年
127.		Nakamura Lecturer Award	カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (米国)	2018
128.		第 34 回井上學術賞	井上科学振興財団	2018
129.	山本 浩史	平成 30 年度日本化学会學術賞	日本化学会	2019

2.2.5 招待講演

研究者の研究成果を、研究終了後に国際学会における招待講演として発表した件数は 733 件である。特に村上が 102 件、齊藤が 93 件、東脇が 90 件と多い。

村上是、2016 年 17 件、2017 年 16 件、2018 年 15 件と多く、トポロジカル相転移に関する招待講演が多数ある。

齊藤は、2013 年 16 件、2014 年 14 件、2017 年 21 件と多く、スピン流現象とスピン流発電に関する招待講演が多数ある。

東脇は、2016 年 18 件、2017 年 17 件、2018 年 17 件と多く、 Ga_2O_3 のデバイスに関する招待講演が多数ある。

2.2.6 報道

研究成果の社会・経済への波及効果を促す媒体として新聞等の報道がある。

研究終了後に報道機関から報じられた件数は、総数 366 件である。特に齊藤が 91 件、東脇が 43 件、白石が 35 件と多い。

齊藤は、日本 IBM 科学賞、読売テクノ・フォーラム・ゴールドメダル賞、本多フロンティア賞等受賞の報道とともに、超伝導体を利用した環境発電機能実証に関する報道が多く注目されていることが分かる。

東脇は、次世代半導体デバイスとしての Ga_2O_3 を取り上げている報道が多く、実用化に向けて注目されていることが分かる。

白石は、シリコンスピン素子開発とシリコンスピントランジスタを利用した熱流からスピン流へのエネルギーハーベストに関する報道が多く、注目されていることが分かる。

2.2.7 共同研究や企業との連携

共同研究や企業との連携は数多く見られる。

葛西は、Amoeba Energy 株式会社(慶應義塾大学発ベンチャー企業)と粘菌に倣った揺らぎを利用するコンピューティングとロボット制御応用に関する共同研究を行った。

齊藤は、スピン流に関する研究で、日本電気株式会社(NEC)、株式会社アルバック(ULVAC)、カイザーラウテルン大学(ドイツ)、マインツ大学(ドイツ)、フローニンゲン大学(オランダ)などと共同研究を行った。

白石は、TDK 株式会社にスピン計測技術・解析手法を提供し、実用化に向けた研究開発を推進した。

深田は、ジョージア工科大学と共同で、リチウム二次電池用の負極材として、金属基板上にシリコン系金属化合物のナノ粒子を形成し、この負極材を組み込むことで 2 倍近い高容量と長いサイクル寿命を実現している²。

² Nano Energy, 2016, 26, p. 37-42

高橋(有)は、株式会社東芝と国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の戦略的省エネルギー技術革新プログラムでスピントロニクス新型 HDD 磁気再生ヘッド素子の開発で共同研究を行った。

谷山は、Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf(ドイツ)と鉄ロジウム合金の強磁性共鳴について国際共同研究を行った。

塚本は、株式会社サムスン日本研究所と磁化動特性評価技術に関する受託研究を行った。

村上は、北京大学とマグノニック結晶及びマグノンホール効果に関する共同研究を行った。シンガポール大学とスピントロニクスにおけるゲージ場のもたらす物性に関する共同研究を行った。

若林は、グラフェンの電子伝導解析に関するプログラムコード、光物性解析に関するコードを、IISER Tirupati(インド)、エクセター大学(英国)の共同研究先に提供している。

片山は、東北大学と光源集積型波長変換による深紫外レーザーの超小型化に関する共同研究を行っている。

寒川は、高温液体/固体界面のリアルタイム観測システム開発と固体ソース AlN 溶液成長への応用で、JFE ミネラル株式会社やフランホーファー研究機構と共同研究を行った。

須崎は、株式会社クレストックと薄膜電子源の開発で共同研究を、浜松ホトニクス株式会社と薄膜試料の二次電子放出特性の共同研究を行った。

竹中は、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所(PETRA)と共同研究を進め、歪み SiGe を用いた Si 光変調器の着想を得て原理実証に成功した。

浜屋は、英国ヨーク大学とホイスラー合金/半導体ヘテロ界面の高品質形成やそれを用いたスピン注入技術に関して共同研究を行った。

福村は、台湾 National Synchrotron Radiation Research Center とコバルトドープ酸化チタンの X 線磁気円二色性分光測定について共同研究を行った。

水落は、日本電信電話株式会社(NTT)物性科学基礎研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)や、複数の民間企業と共同研究を行った。

海住は、東北大学、東京工業大学や茨城大学とスピン量子十字デバイスに関する共同研究を行った。

組頭は、パナソニック株式会社や日亜化学工業株式会社と素子材料の放射光解析に関する共同研究を行った。

中村は、英国 Diamond Light Source と WSe₂ 単層膜の構造解析で共同研究を行った。

西永は、筑波大学とナノ炭素物質と無機半導体から成る複合構造におけるナノ界面物性の解明に関して共同研究を行った。

野口は、東京工業大学、京都大学と分子フローティングゲート単一分子トランジスタの動作機構解析に関する共同研究を行った。

野田は、株式会社デンソーと放熱デバイス向け Al シート上のカーボンナノチューブ (CNT) フィンアレイ合成で共同研究を行った。また、富士フイルム株式会社と単層 CNT の火炎合成で共同研究を行うなど企業との共同研究が多い。

東協は、三菱電機株式会社との共同研究で Ga_2O_3 デバイスを提供し、先方にてデバイス特性評価を行った。

山本は、東京大学と有機モット絶縁体を用いたスピントロニクスについて共同研究を行った。

2.2.8 実用化・製品化

野田は、株式会社明電舎との共同研究を行い、明電舎より CNT アレイ電子源を用いた小型 X 線管が実用化される予定である。川山は、株式会社 SCREEN ホールディングスと共同で実証機開発を行い、フェムト秒レーザーを半導体材料・デバイスに照射して発生する THz 波を計測イメージングする装置を、産総研福島再生可能エネルギー研究所に設置している。

2.2.9 ベンチャー

東協の研究成果を基に、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) からの技術移転ベンチャーとして、2015 年 6 月に株式会社ノベルクリスタルテクノロジーが設立された。酸化ガリウムエピタキシャル膜付基板の製造販売、酸化ガリウム単結晶及びその応用製品の製造販売等を行っている。

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、2007年度から2009年度にかけて合計33件の研究課題を採択し、途中で1課題が内閣府の最先端・次世代研究開発プログラム(NEXT)への移行のために終了した。32件の研究課題は、「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」という戦略目標の下で研究を遂行した。本研究領域の研究の展開と発展の状況をまとめた展開図を図2-5に示す。

達成目標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の開拓とプロセス開発」に関しては、東脇が内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)や総務省戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)で、新ワイドギャップ半導体のGa₂O₃デバイスの研究開発を進展させている。

達成目標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の開拓とプロセス開発」に関連して、多数の研究開発が進展している。国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のCREST、ERATOでは齊藤が、内閣府NEXTでは福村が、総務省SCOPEでは浜屋が、科学研究費新学術領域研究では中岡、齊藤、白石、村上、谷山が、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の先導的産業技術創出事業などでは齊藤、谷山、浜屋が、スピンに関する新規なデバイスの研究開発を展開している。また、CRESTでは町田と谷山が、総務省SCOPEでは竹中と片山が、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業では塚本が、新規な光デバイスの研究開発を進展させている。総務省SCOPEと科学研究費新学術領域では水落が、ダイヤモンドを用いた新規なデバイスの研究開発を進展させている。

達成目標3「ナノレベル・分子レベルでの加工による新規なデバイスの構築を可能にする材料開拓とプロセス開発」に関して、内閣府NEXTでは深田が、さきがけでは富岡が、総務省SCOPEでは山口が、科学研究費新学術領域では葛西が、ナノレベル・分子レベルでの加工や新規なデバイスの研究開発を進展させている。

達成目標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の材料の開拓とプロセス開発」に関して、JSTの先端的低炭素化技術開発(ALCA)で野田がカーボンナノチューブを用いたフレキシブルエレクトロニクスの研究開発を進展させた。

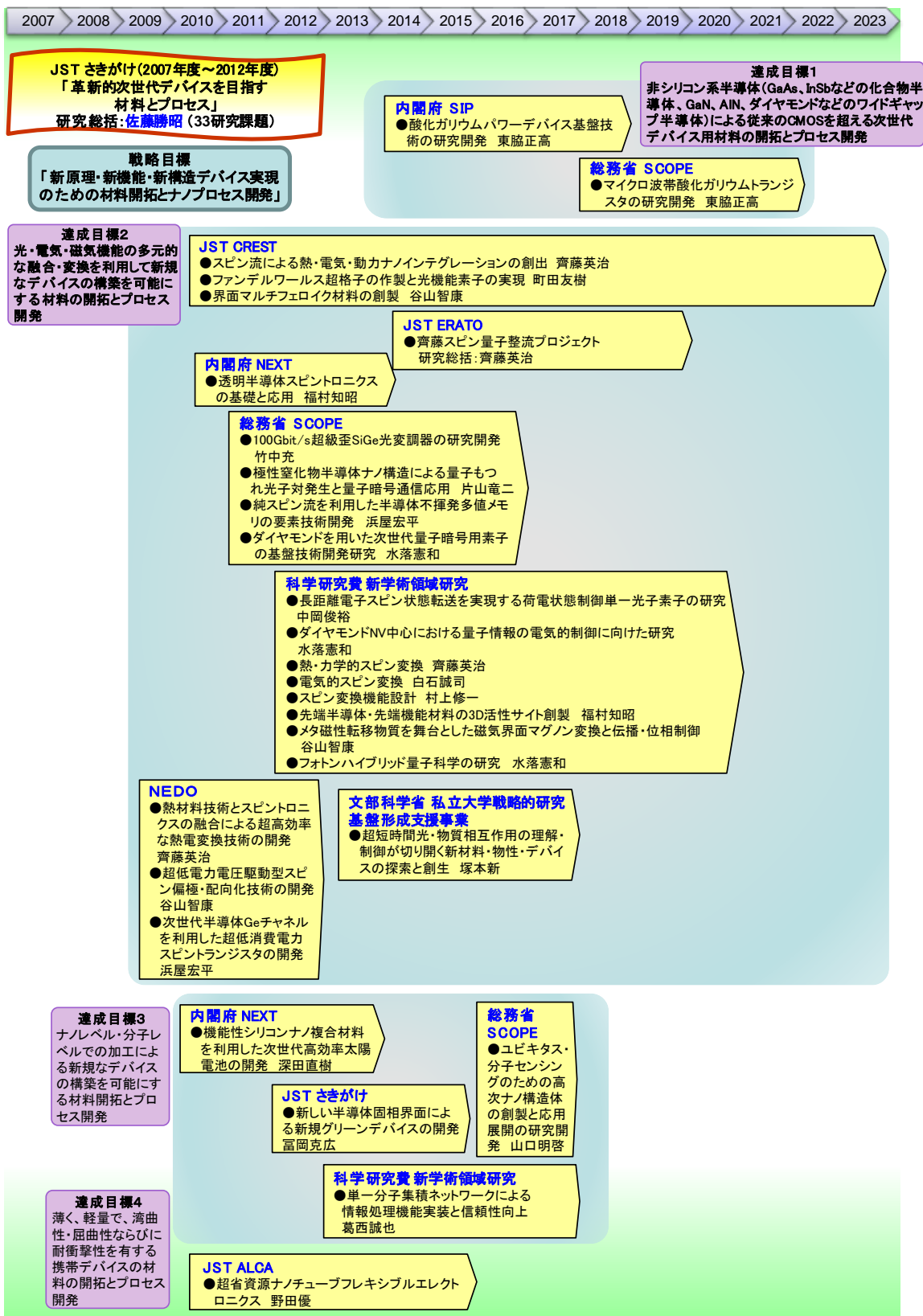


図 2-5 研究領域の展開図

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。

齊藤は、研究期間中に、例えばプラチナなどのように強いスピン軌道相互作用を有する金属にスピン流(スピン角運動量の流れ)を注入すると、プラチナ中にスピン流と垂直の方向に電流が生じる現象(逆スピホール効果)を世界で初めて実験的に見だし、スピンポンピング³、スピン波スピン流⁴を組み合わせる誘電体スピントロニクスへの道を開いた。その延長として、温度勾配のある磁性体において生じるスピン流によって電圧を生じるスピントロニクス効果を見いだすとともに、従来全く不可能であった絶縁体による熱電変換への応用を提案した。

研究終了後は、これらの成果を基に、これまでの基礎物性物理に欠けていた「スピン流」の基礎学理を構築し、新たな学問領域を展開し、スピン流に関する現象の大多数の発見を成し遂げてきた。例えば、量子スピントロニクス効果の発見やスピントロニクス効果の力学的逆効果の発見が主な研究成果として挙げられる。

量子スピントロニクス効果の発見では、「量子スピン系」と呼ばれる物質群において、スピン流が電子ではなく「スピノン」と呼ばれる特殊な状態により運ばれていることを明らかにした。具体的には、スピノンの存在が既に確認されている化合物 Sr_2CuO_3 の結晶の特定方向に温度勾配を加え、スピントロニクス効果によってスピン流の生成・伝搬が生じることを発見した(図 2-6)。スピンには、電子のバンドギャップに相当するスピントロニクスギャップが存在するが、 Sr_2CuO_3 の Cu イオンのように 1 次元に並んでいると量子揺らぎが強くなっていき、磁気秩序が消えてしまう量子スピン液体状態になる。この状態ではスピン同士で互いに向きを知ったまま揺らいでいる。この揺らぎに対応した励起がスピノンであり、このスピノンがスピン流を伝播する。量子スピントロニクス効果の発見は、この状態での量子力学的揺らぎによるスピン伝搬を示したものである。

また、スピントロニクス効果の力学的逆効果の発見では、磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット(YIG)でできたカンチレバーの根本付近に付けた白金細線に熱をかけることにより、スピントロニクス効果で生じたスピン流によってカンチレバーが振動することを示した。これはクローン力を用いずスピン流を用いて力学的駆動ができることを示したものである。

齊藤が研究期間中に示したスピン流の生成、検出などの実験手段は、世界中で行われているこの分野の実験のほとんどに影響を与え、スピン流に関して見付かった新現象の多くの発見に寄与している。そのため、論文の被引用数も 3 年連続して 0.1%以内を維持しており、クラリベートの Highly Cited Researcher に選ばれている。

研究終了後は、CREST や ERATO などの大型プロジェクトで研究成果を発展させている。本研究領域では、電気伝導はないがスピン流は流れる材料である YIG を使って、スピン流を取り込めていないマクスウェル方程式に基づいた物質の分類の問題点を示したが、

³ 強磁性体の磁化が歳差運動を行うことによってスピン流が生成される現象

⁴ 磁性絶縁体などで磁化の波動運動であるスピン波が流れる現象

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」の研究課題「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」では物質の範囲を広げ、流体力学で用いられるナビエ Stokes 方程式が、角運動量保存則を考えていないことを示した。更に研究総括を行っている ERATO 研究領域「齊藤スピン量子整流プロジェクト」では、一般的な学問体系として、スピン流などの角運動量を軸とする物質科学を確立しようとしている。

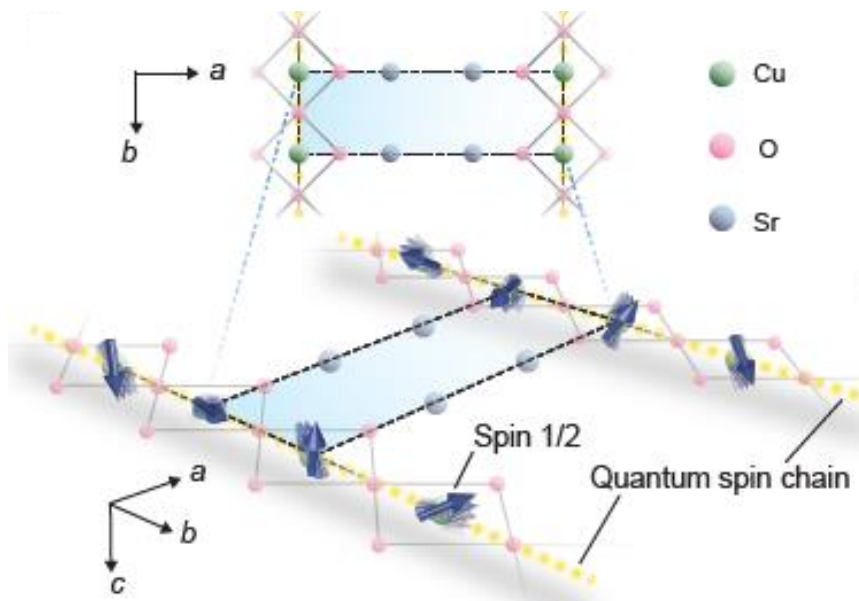


図 2-6 量子力学的揺らぎによるスピンの伝搬⁵

村上は、研究期間中に、熱流とスピン流の関係を明らかにすることを目的としてトポロジカル絶縁体での熱電輸送の理論研究を行った。2次元トポロジカル絶縁体のエッジ状態や3次元トポロジカル絶縁体の結晶の転移に伴う1次元ギャップレス状態⁶において、そのパスに非磁性不純物があっても電子の弾性散乱が起きない完全伝導チャンネルを形成し、熱電輸送を向上させることを示した。またスピン波スピン流の熱輸送に着目し、先行理論にマグノン⁷の軌道運動に関連する項が抜けていることを発見し、これを補完する新しい理論を打ち立てた。

研究終了後は、スピントロニクス基礎理論研究とトポロジカル物質の基礎理論研究を2本の柱として研究を展開しており、トポロジカルマグノン結晶の理論提案、熱流によるフォノン角運動量誘起の理論提案などの研究成果を上げている。

まず、強磁性体物質の構造を人工的にコントロールしたトポロジカルマグノン結晶において、トポロジカル状態の理論を構築した。例えば強磁性体のディスクを周期的に配置

⁵ 出典：Nature Physics, 2017, 13, 1, p31 の図 1

⁶ 結晶の転移に生じる1次元的な金属状態

⁷ スピン波を量子化して得られる準粒子

した構造に交流磁場をかけると、周辺だけを一方向にマグノン(スピン波)が流れ、トポロジカル絶縁体に似た性質が現れることを示し、強磁性体をトポロジカルな性質を持つように設計できることを明らかにした(図 2-7)。

熱流によるフォノン角運動量誘起の理論提案では、スピン流と熱流の相関結合を明らかにした。結晶中のフォノンが角運動量を持っており、結晶の片面だけを温めて熱流を流すと角運動量が発現する、すなわち結晶が回転することを理論的に予測した。

研究終了後、JST のさきがけ研究領域「トポロジカル材料科学と革新的機能創出」を研究総括として推進しており、トポロジカル材料科学の構築と革新的な新規材料・新規機能創出を目指している。

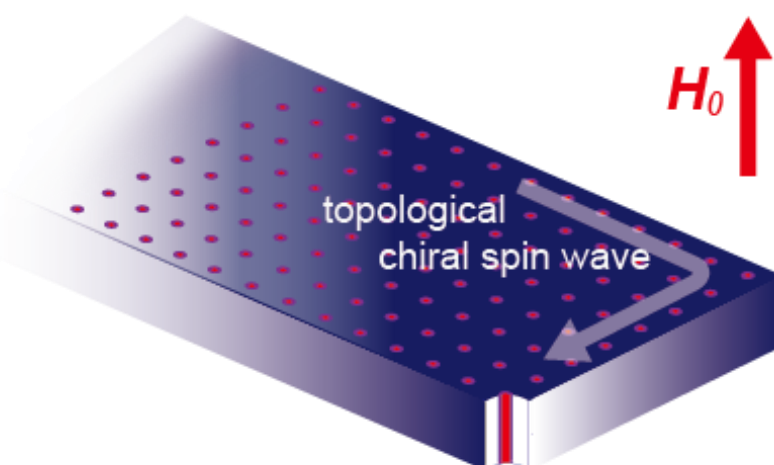


図 2-7 トポロジカルマグノンニック結晶の理論提案⁸
トポロジカルなスピン波が縁に沿って時計回りに流れる。

東協は、研究期間中に、III族酸化物/窒化物半導体複合構造の作製に取り組み、窒化物半導体のバンドエンジニアリングの新たな可能性を探求した。新ワイドギャップ半導体 Ga₂O₃ 系デバイスは、東協が開拓した分野であり、現在でも世界の最先端を走っている。本研究領域の研究成果として発表した Ga₂O₃ MESFET に関する東協の論文⁹が、その後、各国で発表された多数の論文に引用されており、日本発の技術といえる分野である。

研究終了後は、Ga₂O₃ を用いた電子デバイスに関する研究を更に発展させ、Ga₂O₃ 系デバイスとして世界初の Ga₂O₃ MOSFET を実現し優れた特性を実証¹⁰している。この MOSFET 構造が現在世界中で行われている横型 Ga₂O₃ MOSFET 開発のベース構造となっている。また、フィ

⁸ 出典：村上先生御提供

⁹ Applied Physics Letters, 2012, vol. 100, pp. 013504-1-3 被引用数 509

¹⁰ Applied Physics Letters, 2013, vol. 103, pp. 123511

ールドプレートの採用による Ga_2O_3 MOSFET の高耐圧化(図 2-8)や、 Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードの 1kV 超への高耐圧化¹¹に成功している。これらは Ga_2O_3 のパワーデバイス半導体材料としての高いポテンシャルを広く周知することにつながっている。更に、イオン注入によるドーピングを用いた縦型 Ga_2O_3 トランジスタを世界で初めて試作して動作実証に成功¹²し、汎用性、生産性の高いイオン注入プロセスを使用できることを示した。

Ga_2O_3 基板は融液成長が可能のため、昇華法で作る SiC 基板に比べコストメリットが出るのが期待されている。また、 Ga_2O_3 は SiC や GaN よりバンドギャップが大きく、ブレークダウン電界も高いため材料としても有望であるが、他の材料と比較すると電子デバイス用の材料としての研究の歴史が浅く、今後の更なる研究の進展が期待される。

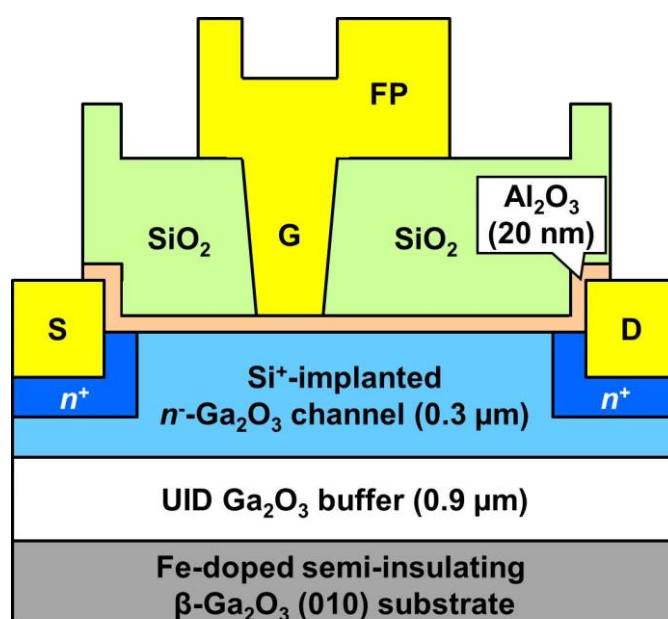


図 2-8 フィールドプレート (FP) を用いた Ga_2O_3 MOSFET の断面図¹³

水落は、研究期間中に、室温で初めての電流注入による単一光子発生、ダイヤモンド中の単一量子ビット系における量子情報処理、ダイヤモンド・超伝導量子ビットハイブリッド系の量子状態制御の研究などで成果を上げた。

本研究領域では量子情報分野の提案で研究を始めたが、医療応用など波及効果の大きいセンサの分野に関心があり、研究領域をシフトしている。研究終了後は、ダイヤモンド中の NV 中心に関する成果を以下のように発展させた。

¹¹ Applied Physics Letters, 2017, vol.110, 10, pp.103506

¹² IEEE Electron Device Letters, 2019, vol.40, no.3, pp.431

¹³ 出典：東脇先生御提供

水落は単一 NV ダイヤモンドを用いた量子センサを開発しており、世界最高の感度を実現した¹⁴。N 型のリンドーピングしたダイヤモンドではコヒーレンス時間(T2)が劣化するとされていたが、国立研究開発法人産業技術総合研究所(産総研)との共同研究で、リン濃度を変えたサンプルを系統的に調べた結果、あるリン濃度で T2 が非常に長くなることを見いだした。量子センサでは T2 が長いほど感度が良くなるので、単一 NV 中心を用いた量子センサでは世界最高の磁場感度を実現できた(図 2-9)。NV 中心による量子センサは室温で、1 個の NV 中心で計測できるので、空間分解能を極限まで小さくすることができる。また一度に計測する NV 中心の数を増やすことで感度を上げることができる。原理的には、極低温で SQUID(超伝導量子干渉計)を用いないと達成できないレベルの感度に室温で到達することができ、室温での量子センサ実現に向けた重要な研究成果である。

水落は量子センサの感度を改善するために、NV 中心の N-V 軸方向の制御にも成功している。N-V 軸は、ダイヤモンド中で 4 方向にランダムに配向されるが、CVD 法でダイヤモンドをゆっくり成長(ステップフロー成長)することで、N-V 軸を一つの方向に 99%以上という高い割合でそろえられることを発見した¹⁵。N-V 軸を一つの方向にそろえることで、NV 中心を用いた磁気センサの感度をランダム配向に比べ 4 倍に向上できると期待される。この成果で 2016 年度の応用物理学会優秀論文賞を受賞した。

¹⁴ Nature Communications, 2019, 10, 3766

¹⁵ Applied Physics Express, 2014, 7, 055201

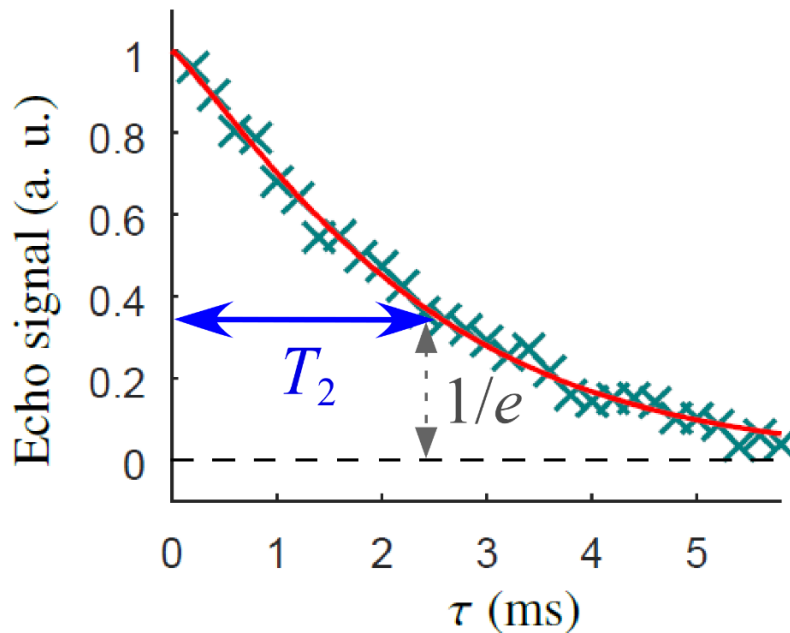


図 2-9 ハーンエコー信号¹⁶の測定結果 $T_2=2.43 \pm 0.06 \text{ms}$ ¹⁷

山本は、研究期間中、有機モット絶縁体のデバイス作製技術の開発と動作原理の解明を行った。その結果、世界初となる相転移トランジスタを2種類開発した。研究終了後は、研究成果を以下のように発展させ、強相関超伝導相図の決定、光誘起超伝導の実現などの成果を上げた。

山本は、有機モット絶縁体に静電キャリアドーピングと歪み制御を行い、2次元の基底状態相図(強相関超伝導相図)を決定した。電界効果によりキャリア濃度を変えることでバンドフィリングをスキャンし、理論予測を初めて実証した。高温超伝導材料である銅酸化物はドーピングのために混ぜ物をするので、結晶構造が変わるので、超伝導のメカニズムの解釈が難しいが、山本が用いた有機モット絶縁体(κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Cl)は、ドーピングが不要なため、結晶構造を変えずに相図におけるバンドフィリングの軸方向の状態を実測できた(図 2-10)。この相図が今後の理論的研究の進展に貢献すると期待され、次の超伝導材料の開発につながる可能性がある。

また、山本は、光に応答して電氣的に分極する有機分子の薄膜と有機モット絶縁体を組み合わせることによって、光による超伝導スイッチ(光誘起超伝導)を実現している¹⁸。超伝導を光で制御することに成功した世界初の例である。RSFQ(rapid single-flux-quantum)回路¹⁹は古典的コンピュータを高速化することが期待されているが、実用化には超伝導回路への光入力が必要とされており、本技術の適用が有効と考えられる。

¹⁶ 歳差スピン磁化の共鳴放射パルスによるリフォーカス信号

¹⁷ 出典：水落先生御提供

¹⁸ Nature Materials, 2017, 16, p1100-1105

¹⁹ 超伝導論理回路、超伝導ループ内に存在する磁束量子の有無を2進値に対応させる演算方式

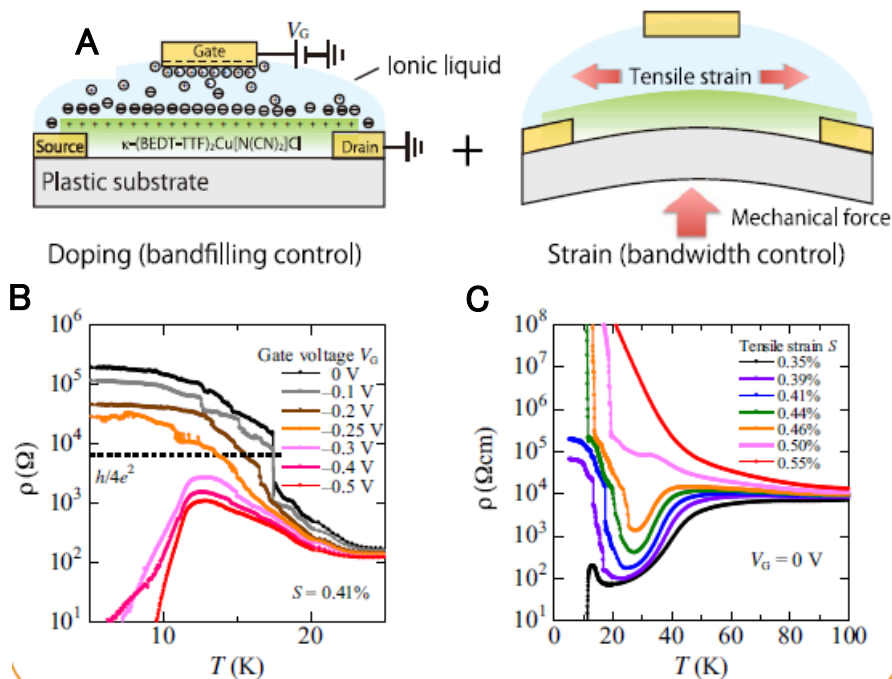


図 2-10 同一サンプルでのフィリングとバンド幅制御²⁰

A : デバイス構造、B : Doping (Bandfilling)、C : Strain (Bandwidth)

白石は、研究期間中に、多層グラフェンにおいて、純スピンの注入とそれによる巨大磁気抵抗効果の世界で初めて室温で検証した。また単層グラフェンでも純スピンの注入に成功し、ゲート電圧によってスピン注入電流を制御するスピントランジスタの動作にも成功した。研究終了後は、研究成果を以下のように発展させた。

LaAlO₃ と SrTiO₃ の二つの酸化物絶縁体を貼り合わせた界面には、2次元電子ガス(2DEG)層ができる。この層の上に強磁性電極として Ni と Fe の合金(Py)を、スピン輸送信号の計測のために非磁性電極(NM)を一定の距離に形成し、Py にマイクロ波と磁場を印加して強磁性共鳴を起こして 2DEG にスピン角運動量を注入、スピン流として伝播した電圧を NM で観測した。これはスピン輸送を表す結果であり、2DEG において世界初の室温スピン輸送を実現できた²¹。これをきっかけに酸化物スピントロニクス分野が開拓される可能性がある。

また、シリコンスピン MOSFET において、シリコン中を輸送させるスピンを磁性体電極である鉄(Fe)から注入するために電流を流すと、Fe とシリコンの間に生じる温度差(廃熱)によりスピン流が発生するが、それを磁気抵抗効果を用いて、電気信号に再利用することに成功した(図 2-11)。デバイス中で発生した熱を再利用できることから、半導体デバイスで問題となる発熱・廃熱問題解決にむけた新しいテクノロジーを示したと言える。

²⁰ 出典 : Science Advances, 2019, 5, eaav7282, p2 の図 1

²¹ Nature Materials, 2017, 16, p609-615

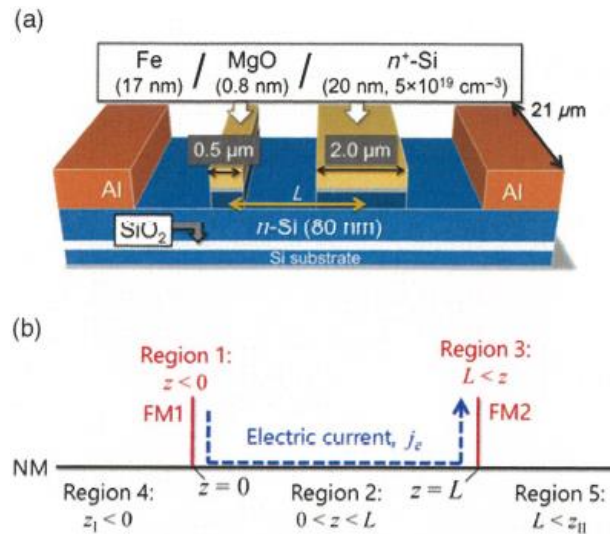


図 2-11 シリコントランジスタを用いた熱流からスピン流への変換に関する実験装置
熱スピン信号の大きさの概略図²²

竹中は、研究期間中に、光配線 Ge LSI の実現を目指し世界で初めて Si の性能を上回る Ge n 型 MOS トランジスタや、世界最小レベルの暗電流密度を持つ Ge フォトディテクタの実証に成功した。

研究終了後、Ge 光電子集積回路の発展的研究を進め、ウエハボンディングを用いた Ge-on-Insulator (GeOI) 基板の作製に成功し、世界に先駆けて GeOI プラットフォームを用いた中赤外光集積回路の動作実証に成功した(図 2-12)。

また、本研究領域での研究を通じて、歪み SiGe を用いた Si 光変調器の着想を得て、研究終了後に原理実証に成功した²³。歪み SiGe ではホールの有効質量が軽く、自由キャリア効果が増大するため高性能の光変調器を実現できる。この技術は技術研究組合光電子融合基盤技術研究所(PETRA)と共同で、実用化を目指して開発を進めている。

さらに、NEDO の「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム開発」プロジェクトのもと、PETRA との共同研究で Si 光導波路上に化合物半導体(InGaAsP)を貼り合わせることで世界最高性能の半導体光変調器の実証に成功した。InGaAsP 中の電子により誘起される屈折率変化のみを用いて光変調するため、光変調器の効率と損失を大幅に改善することができた²⁴。この技術は PETRA に移管して、実用化に向けた研究を進めている。

²² 出典：Physical Review Applied, 2018, 9, p054002-2 の図 1

²³ Scientific Reports, 2014, vol.4, 4683

²⁴ Nature Photonics, 2017, vol.11, no.8, p486-490

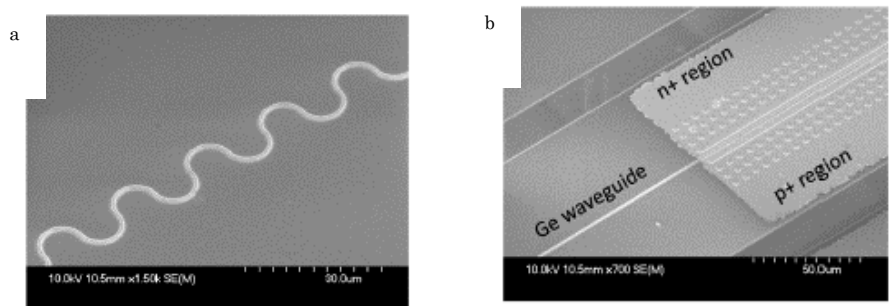


図 2-12 GeOI プラットフォームを用いた中赤外光集積回路²⁵

a : Ge bend、b : Ge optical modulator

富岡は、研究期間中に、Si 基板上のⅢ-V 半導体コアシェル構造のナノワイヤの HEMT (High Electron Mobility Transistor) 構造を作製し、Si-MOSFET のスイッチング特性の物理限界 (Subthreshold Swing (SS)=60mV/dec) に近い性能を実証した。またトンネル効果を起こしやすい界面をシリコンと InAs ナノワイヤの接合で実現した新型トンネルトランジスタで、従来の MOSFET の物理限界を上回る SS=12mV/dec のスイッチング特性を実証した。

研究終了後は、半導体ナノ構造の新規ドーピング法 (補償ドーピングや高濃度ドーピング技術) を確立し、Ⅲ-V ナノワイヤ縦型トランジスタや InAs/Si 接合型トンネル FET の閾値制御を実現した (図 2-13)。また Ge 基板上に垂直に配向したⅢ-V ナノワイヤ選択成長技術確立し、Ge/Ⅲ-V ナノワイヤ混載 CMOS 集積構造の提案や InAs ナノワイヤ縦型トランジスタを実現した。

研究期間中の 2012 年 10 月に別のさきがけ研究領域「エネルギー高効率利用と相界面」に採択され、研究課題「新しい半導体固相界面による新規グリーンデバイスの開発」で研究を継続し、Ⅲ/V 族半導体をベースとして、ナノワイヤを用いたトンネル型 HEMT を作製しデバイス特性を実証した。

²⁵ 出典 : Optics Express, 2016, vol. 24, no. 11, p11862-11863 の図 6、8

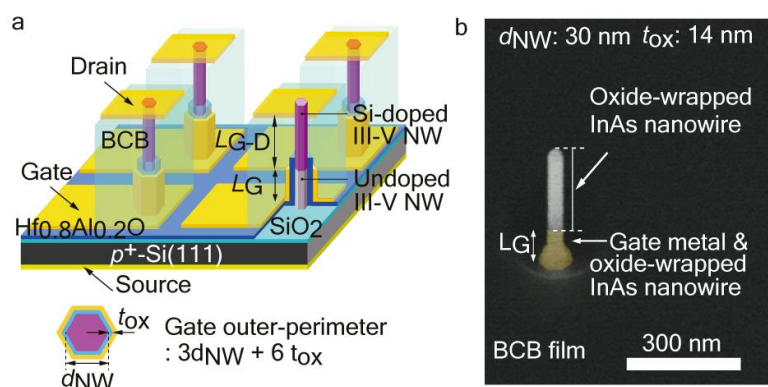


図 2-13 パルスドーピングした InAs/Si 接合型トンネル FET 素子²⁶

(a) 構造図と (b) 作製した素子構造の電子顕微鏡写真

塚本は、研究期間中に、サブピコ秒の超高速の光磁気記録のメカニズムの解明と次々世代の磁気記録デバイスの記録原理の確立を目指して、高速応答材料としてフェリ磁性体²⁷の示す角運動量補償現象²⁸が重要な原理となること、パルス光照射によるピコ秒オーダーの極短時間加熱で高速スピン制御できること、光のみによるスピン直接制御で非熱利用の超高速磁化反転ができることを示した。

研究終了後は、京都大学や UCLA との共同研究で、フェリ磁性体 GdFeCo において、角運動量補償温度²⁹(図 2-14 の青帯)付近での磁壁移動の機構を見だし、磁壁移動速度が従来の数倍(2km/s)になることを明らかにした。角運動量補償温度では、磁壁が歳差運動せずに磁壁内部の磁化が固定されて磁壁が移動することが分かり、フェリ磁性体を用いることで超高速な磁壁メモリが実現可能であることを示した。

²⁶ 出典：富岡先生御提供

²⁷ 異なる大きさの磁気モーメントが互いに反対方向に配向しており、その磁気モーメントの差だけ磁化を発生する物質

²⁸ 磁化の角運動量の総和は打ち消しあっているが、磁気モーメントが有限値を取る状態

²⁹ 磁化の角運動量の総和は打ち消しあっているが、磁気モーメントが有限値を取る状態の温度

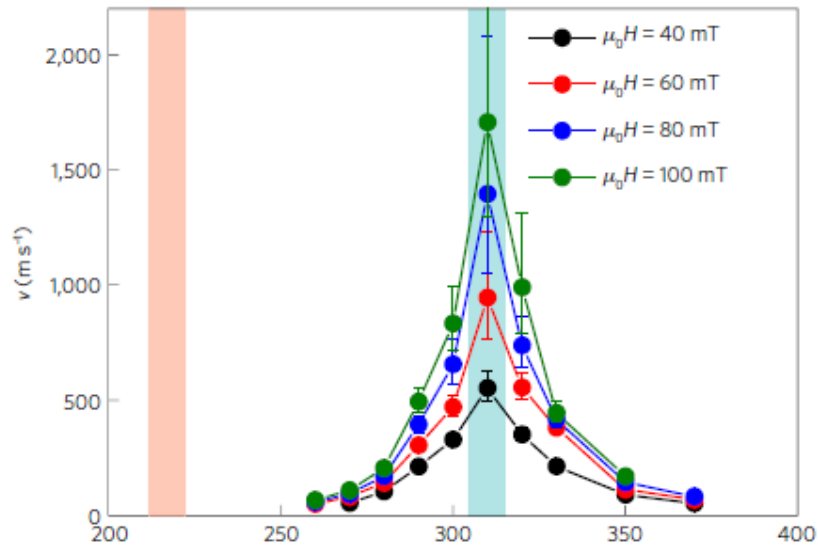


図 2-14 フェリ磁性体中の磁壁移動速度の温度依存性³⁰

深田は、研究期間中に、半導体集積回路の更なる高密度化のアプローチとして、半導体ナノワイヤを用いた縦型の電界効果トランジスタを高密度に作成する技術に取り組み、ナノワイヤの直径制御とともに、p型、n型のドーピングにも成功した。更にラマン分光法によって、ドーピングしたナノワイヤ中の微量なドーパントの濃度測定や活性化を定量的に評価する技術を確立した。

研究終了後は、Si と Ge のコアシェル構造から成る特殊なナノワイヤにおいて、不純物のドーピング領域とキャリアの輸送領域の分離を実証することに成功した。具体的には、コア部分が不純物をドーピングしていない Ge ナノワイヤ、シェル部分が p 型不純物のボロンをドーピングした Si シェル層から成るコアシェルナノワイヤ構造を、化学気相堆積 (CVD) 法により形成し、コアシェル界面の酸化層の形成を抑制し、かつ Ge と Si の混じり合っていない界面を形成し、ラマン分光法による分析で、Ge 層にキャリアが発生していることを実証した (図 2-15)。

³⁰ 出典 : Nature Materials, 2017, 16, 12 p1190 の図 3

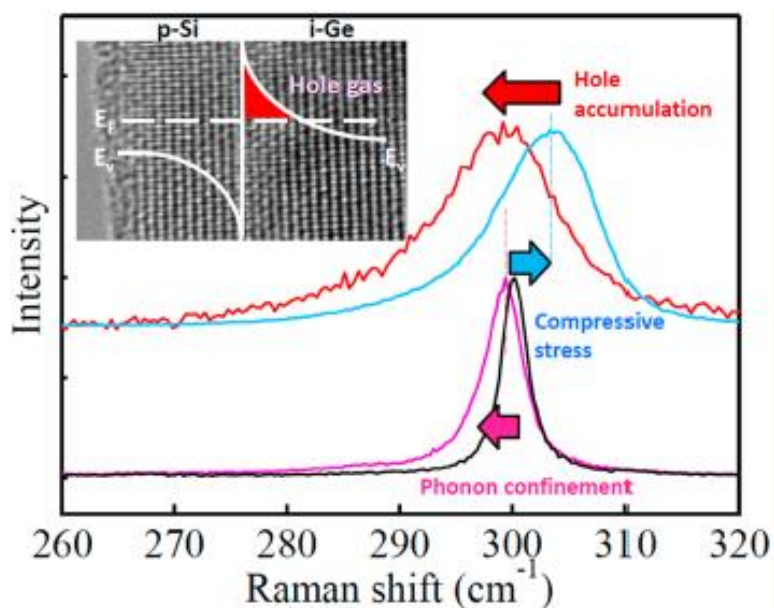


図 2-15 Si-Ge 系材料におけるホールガス蓄積の分光学的実証³¹

安田は、研究期間中に、高分子の配向方法である延伸配向法により、結晶、液晶、アモルファス性薄膜のいずれにおいても偏光吸収の異方性を示し、延伸配向法が配向薄膜製法として極めて優れていることを示した。また、 π 共役高分子³²配向膜のバルクで、延伸前と比べ、光学、電気特性を大きく向上させることに成功した。

研究終了後は、有機薄膜太陽電池に用いる高分子材料の新しい合成法を開発した。有機薄膜太陽電池の構成材料の一つである π 共役高分子は、これまで主にクロスカップリング反応³³を利用して合成され、スズやホウ素などの化合物を用いるため、これらに関連した副生成物を反応後に除去する必要があった。新しい合成法では、C-H 結合を反応点としたカップリング反応³⁴で、スズやホウ素などの化合物を必要とせず合成することで精製のプロセスを簡略化でき、低コストで高純度の化合物が得られた。更に欠陥の減少と分子設計による特性改善により、有機薄膜太陽電池の高効率化・長寿命化に寄与した³⁵(図 2-16)。

³¹ 出典：ACS NANO, 2015, 9, p12182 の Abstract の図

³² ベンゼンやチオフェンなどの共役分子が直接連結された構造を持つ高分子

³³ 異なる二つの芳香族化合物の結合形成を行う反応

³⁴ 従来のクロスカップリング反応とは異なり、ハロゲン化された芳香族化合物と活性な C-H 結合を有する化合物の間の結合形成反応

³⁵ Advanced Functional Materials, 2014, 24, 3226-3233

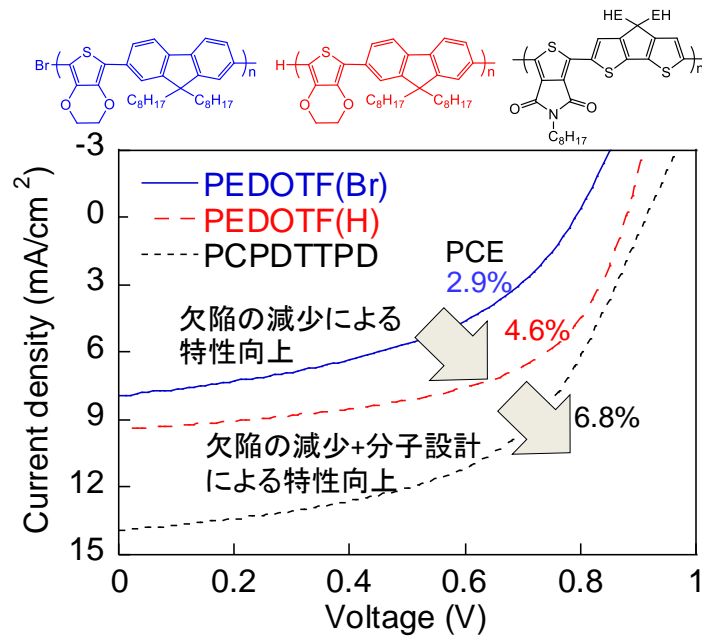


図 2-16 高分子の高純度化、分子設計により太陽電池を高効率化³⁶

浜屋は、研究期間中に、超低消費電力量子スピン伝導素子の開発を目指し、半導体 Si をベースとした素子構造において、世界唯一のショットキトンネル接合を介したスピン注入技術の確立、室温スピン注入信号の電氣的検出、スピン蓄積信号の電界制御などの研究成果を出した。

研究終了後は、スピントロニクス材料(ホイスラー合金)と Ge への原子層不純物ドーピング技術を併用した独自のスピン注入・検出技術により、世界で初めて Ge 素子における室温スピン伝導の観測に成功した。スピン伝導を理論考察し、Ge 中のスピン散乱現象と不純物ドーピング量の間係を考慮した素子構造設計により実現した(図 2-17)。Ge スピントロニクス素子の室温応用の可能性を示す成果である。

³⁶ 出典：安田先生御提供

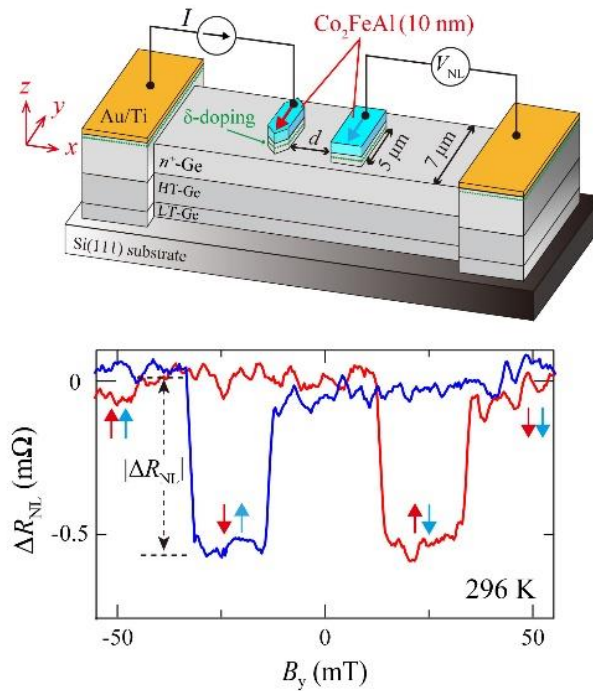


図 2-17 Ge 中の室温スピン伝導の観測³⁷

若林は、研究期間中に、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を行い、ナノスケールまで小さくなった系の端の形状の違いが、ナノカーボン材料の物性、特に電子輸送特性に大きな影響を与えることを明らかにした。

研究終了後、トポロジカル位相の視点からグラフェン及び関連原子膜物質の材料探索の理論研究を進め、高次のトポロジカル状態における新しい電子伝導の制御機構を提案した。高次のトポロジカル状態を持つ物質では、エッジに沿って電流が散逸せずに完全に伝導する機構があるだけでなく、その逆の極限である電子をコーナーに強く局在させる機構も併存させることが可能であることを提示した。散乱を受けにくい電流が表面やエッジを流れるため、低消費電力のデバイスへの応用と共に、コーナー状態を利用することにより光や電子を空間的に閉じ込める量子ドットや光共振器を設計できることを示した(図 2-18)。

³⁷ 出典：Applied Physics Express, 2017, 10, p093001-2 の図 1

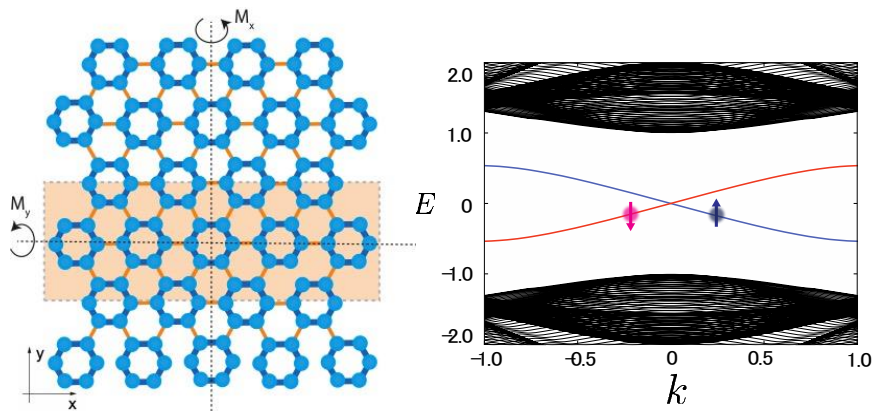


図 2-18 高次トポロジカル状態を有する物質の設計とヘリカルスピンの流れ³⁸

谷山は、研究期間中に、スピンを配向制御して注入するスピン源の開発と、その基本原理の実証を目指して、鉄ロジウム合金細線にコバルト細線を接合して、スピン配向した電流を注入し、反強磁性—強磁性磁気相転移を誘導することに成功した。また、金電極／マグネタイト／半導体量子井戸というヘテロ構造において、半導体中に注入された電子スピン偏極度が 44%に達することを見いだした。

研究終了後、鉄ロジウム合金の鉄組成による磁性特性変化を調査し、鉄組成を増加させた領域で、金属材料としては極めて小さなスピンドamping定数³⁹が実現されることを実証した(図 2-19)。鉄ロジウム合金を利用するハードディスクドライブ(HDD)、MRAM、センサなどのスピントロニクスデバイスでの低消費電流動作の可能性を示した。

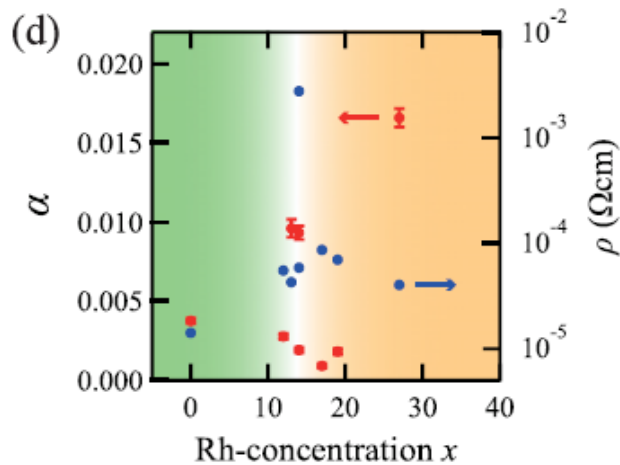


図 2-19 Fe-Rh 合金のギルバートダンピング α と電気抵抗率 ρ の Rh 組成依存性⁴⁰

³⁸ 出典：若林先生ご提供

³⁹ スピン運動の磁場等外部環境によるスピン反転の耐性の大きさ

⁴⁰ 出典：Applied Physics Letters, 2019, 115, p142403-3 の図 3

2.3.3 研究成果の社会・経済への波及効果

齊藤のスピンゼーベック効果を使った熱電変換素子は、シンプルな構造なので広い面積を利用した発電ができ、製造プロセスの低コスト化が見込めることから、IoT センサの電源応用などを目指すエネルギーハーベストへの利用が期待されている。研究終了後すぐに、日本電気株式会社と共同研究を開始しており、スピンゼーベック効果に関する技術移転を行っている。また、齊藤は、2016 年に「スピン量子整流・スピンゼーベックアソシエーション」を設立し、スピンゼーベック効果に関し、大学等研究機関及び産業界と情報共有を行い、今後の技術開発の方向性について検討することを目的として活動している。

葛西は、Amoeba Energy 株式会社(慶應大学発のベンチャー企業)と、粘菌に倣った揺らぎを利用するコンピューティングとロボット制御応用に関する共同研究を行った。Amoeba Energy は、その成果を発展させて独自の組合せ最適化コンピュータを開発し、柔らかな体で階段を上り下りできるソフトロボットを開発した⁴¹。

白石は、TDK 株式会社にスピン計測技術と解析手法を提供し、TDK にて実用化に向けた研究開発が行われている。

高橋(有)は、ハードディスクドライブ(HDD)などの記録媒体の高密度化を実現するために、FePt に着目し、FePt-C において均一な微粒子組織と高い磁気特性を得ることに世界に先駆けて成功した。FePt 媒体の HDD は、Seagate 社より 2017 年からサンプル出荷されている⁴²。

東協の研究している Ga₂O₃ 系デバイスは、SiC 系材料との競合が考えられるが、SiC 基板が昇華法で製造されるのに対して、Ga₂O₃ 基板は、融液成長により簡便に大口径ウエハーが製造できるので、原理的にはコストメリットが出てくると期待されている。情報通信機構から技術移転したベンチャー企業の株式会社ノベルクリスタルテクノロジーは、2017 年 9 月に 2 インチ Ga₂O₃ エピウエハの量産を開始し、将来的には SiC エピウエハの 1/3 の価格で提供する予定と発表した。2017 年 11 月には、世界初の Ga₂O₃ エピ膜を用いたトレンチ MOS 型パワートランジスタの開発に成功、2019 年 4 月には、高品質 β Ga₂O₃ エピウエハを開発し、数 10A 級の大電流素子の製造が可能になったと発表した⁴³。

川山は、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡を株式会社スクリーンホールディングスと共同で開発した。フェムト秒レーザーを観測材料に照射し、発生する THz 波を計測・イメージングする装置で、材料の表面を原子レベルで観測することができる。この装置を使い 2017 年には、産総研とともに、コロナ放電による表面電荷を制御する技術と組み合わせて太陽電池の表面電場を計測する手法を開発している。太陽電池だけではなく半導体表面上に絶縁膜を形成する各種デバイスの界面電荷の測定法として期待される。

⁴¹ <https://amoebaenergy.com/>

⁴² http://www.sgkz.or.jp/prize/science/51/document_08.html

⁴³ <https://www.novelcrystal.co.jp/archives/1047>

高橋(和)は、産総研とともに、フォトリソグラフィを用いることで、100 万以上の Q 値⁴⁴を有するフォトニック結晶⁴⁵光ナノ共振器⁴⁶の大量生産に成功した⁴⁷。シリコンレーザーや光メモリ、医療診断センサ等への応用が期待される。

野田は、株式会社明電舎との共同研究を行い、同社より CNT アレイ電子源を用いた小型 X 線管が実用化される予定である。

2.3.4 その他の特記すべき事項(新たな展開や分野間融合、またキャリアアップなど)

33 名の研究者のうち、12 名が研究終了後にキャリアアップして教授に昇進した。そのうち 7 名が採択時の助教、講師から教授の職に就いている。また、7 名が研究終了後に准教授に昇進した。

研究終了後 2014 年に、齊藤と村上が、本研究領域の研究成果に基づきスピントロニクス入門書として「スピン流とトポロジカル絶縁体；量子物性とスピントロニクスの発展」⁴⁸を出版した。また 2015 年には、佐藤総括と齊藤が、本研究領域の研究をベースにスピントロニクスの基礎科学から応用までをまとめた教科書として“Spintronics for Next Generation Innovation Devices”⁴⁹を出版した。この本の著者には本研究領域アドバイザーの高梨、研究者の高橋、村上、山口、谷山、白石、浜屋、福村、水落、塚本が含まれている。

⁴⁴ 共振器が光を閉じ込める強さを表す値。Q 値が大きいほど光を長時間蓄えられ共振スペクトルの線幅が狭くなる。

⁴⁵ 光が波である特性を利用して光を制御する特徴を持つ光素子

⁴⁶ フォトニック結晶により実現した数百 nm の非常に小さな領域に光を閉じ込めた共振器

⁴⁷ <https://www.osakafu-u.ac.jp/press-release/pr20160316/>

⁴⁸ 齊藤英治、村上修一、「スピン流とトポロジカル絶縁体；量子物性とスピントロニクスの発展」、2014、共立出版

⁴⁹ Katsuaki Sato, Eiji Saitoh, “Spintronics for Next Generation Innovation Devices”, 2015, John Wiley&Sons

第3章 各研究課題の主な研究成果

各研究者のさきがけ研究終了後の発展を、1人1ページとして以降のページに記載した。

3.1 2007年度採択研究課題

- 3.1.1 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
(研究者 葛西誠也)
- 3.1.2 誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能
(研究者 齊藤英治)
- 3.1.3 分子を介したスピン流の制御
(研究者 白石誠司)
- 3.1.4 スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索
(研究者 高橋有紀子)
- 3.1.5 スピン偏極の外的制御とチューナブルスピン源の創製
(研究者 谷山智康)
- 3.1.6 フェムト秒パルス・レーザによる超高速スピン制御・計測
(研究者 塚本新) (塚本先生のご確認未)
- 3.1.7 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
(研究者 深田直樹)
- 3.1.8 デバイス応用に向けたスピン流と熱流の結合理論
(研究者 村上修一)
- 3.1.9 π 共役高分子鎖内の超高速電荷輸送を利用した有機ランジスタ
(研究者 安田剛)
- 3.1.10 ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明
(研究者 山口明啓)
- 3.1.11 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
(研究者 若林克法)

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

葛西誠也(北海道大学量子集積エレクトロニクス研究センター・教授)

研究期間2007年10月～2011年3月

展開している事業

科研費基盤研究(B)*2

科研費新学術領域研究(研究領域提案型・計画研究)

NEDO「高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピュータシステムの技術開発」(2018-2020)

さきがけの成果

生物の感覚器にみられる、雑音によって微弱信号に対する応答が高まる現象「確率共鳴」を、半導体ナノデバイスを使って引き起こし、現象を電子的に利用可能にした。

発展

1. 確率共鳴現象の第3のメカニズムの発見
確率共鳴において雑音により感度が向上する起源が、ガウス雑音の確率密度関数の特異性(分布の裾において相対変化率が発散)にあることを、数理的・実験的に説き明かした。
2. 高感度・高安定非線形表面筋電検出技術の開発
非線形デバイスと最適化により微弱な表面筋電位を高感度で安定に検出する技術を開発し、手軽な表面電極装着法でも安定した筋電検出を可能にした。
3. 粘菌に倣ったゆらぎを利用し最適化問題を解く計算システムの創出
粘菌の挙動を簡単な電子回路をもちいて電子的に模倣することで最適化問題を効率的に解く新しい電子計算システムを創出した。D-waveなどの量子アニーリングマシンと同じ問題を容易にマッピングし解くことができる(図1)。
4. 分子電荷・局所表面電荷ダイナミクス検出技術の開発
高い表面電荷感度をもつ半導体ナノワイヤと金属短針との容量結合による感度向上機構を組合せ、ナノ領域の電荷ダイナミクスをとらえる技術を開発し、個々の表面準位や分子電荷の動的振る舞いを観測可能にした(図2)。

特記事項

- ・Amoeba Energy (株)(慶應義塾大学発ベンチャー企業)と粘菌に倣ったゆらぎを利用するコンピューティングとロボット制御応用に関する共同研究を行った。
- ・2014年、教授に昇進している。

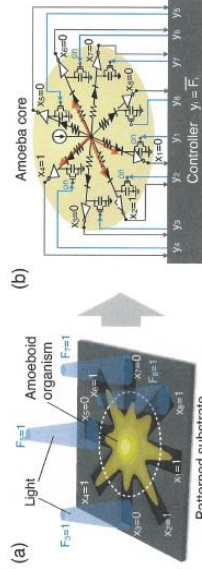


図1 アメーバを使ったコンピュータ(a)と電子アメーバ(b)の概念図 [1]

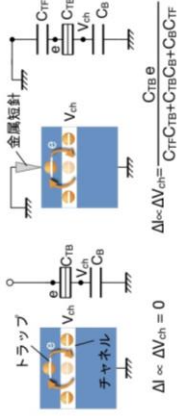
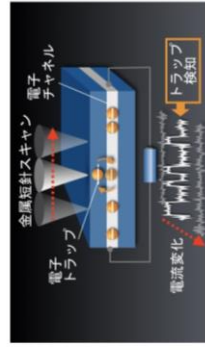


図2 半導体表面トラップにおける電荷ダイナミクス検出技術の概念図 [2]

誘電体スピントロニクス材料開拓とスピン光機能

齊藤英治(東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻・教授)

研究期間2007年10月～2011年3月

展開している事業
 科研費基礎研究(S)
 科研費基礎研究(A)*2
 科研費新学術領域研究(研究領域提案型)
 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」
 ERATO「スピン量子整流プロジェクト」
 NEDO 産業技術研究助成 事業費助成金(若手)

さきがけの成果

誘電体スピントロニクスを提唱・開拓した。本研究で発見・開拓した誘電体中のスピン伝導やスピnzeーベック効果、スピン良伝導体YIGは、それぞれスピン伝導体やスピン生成現象や典型物質として、世界中で広く利用されている。

発展

基礎物性物理学において、これまでなかったスピン流の概念を導入し、新たな学問領域を形成した。現在、世界中でスピン流の研究が行われるまでに発展している。

1. YIG誘導体スピントロニクスの学理構築
 さきがけで提唱・開拓したスピnzeーベック効果を含めた、YIG誘導体のスピントロニクスの学理を構築した。(教科書も執筆)
2. 量子スピnzeーベック効果の発見
 量子力学的揺らぎによって、スピンの伝搬が生じる量子スピnzeーベック効果を発見した。新しいスピンの輸送形態を示したものである(図1)。
3. 反強磁性転移によるスピnzeーベック異常の発見
 反強磁性転移により、スピン伝導度を大きく変化させることができることを利用して、スピンスイッチとして応用できることを示した。
4. スピnzeーベック効果の力学的逆効果の発見
 YIGでできたカンチレバーの片端に熱をかけることにより、スピン流によってカンチレバ一がたわむことを示し、スピnzeーベック効果の力学的逆効果の発見した(図2)。

特記事項

- ・NEC、ULVACなどと共同研究を行い、NECへ技術移転を行った。
- ・カイザー・スラウテルン大学(ドイツ)、マインツ大学(ドイツ)、フローニンゲン大学(オランダ)などと共同研究を行った。
- ・日本学士院学術奨励賞、文部科学大臣表彰科学技術賞など、数多くの受賞がある。

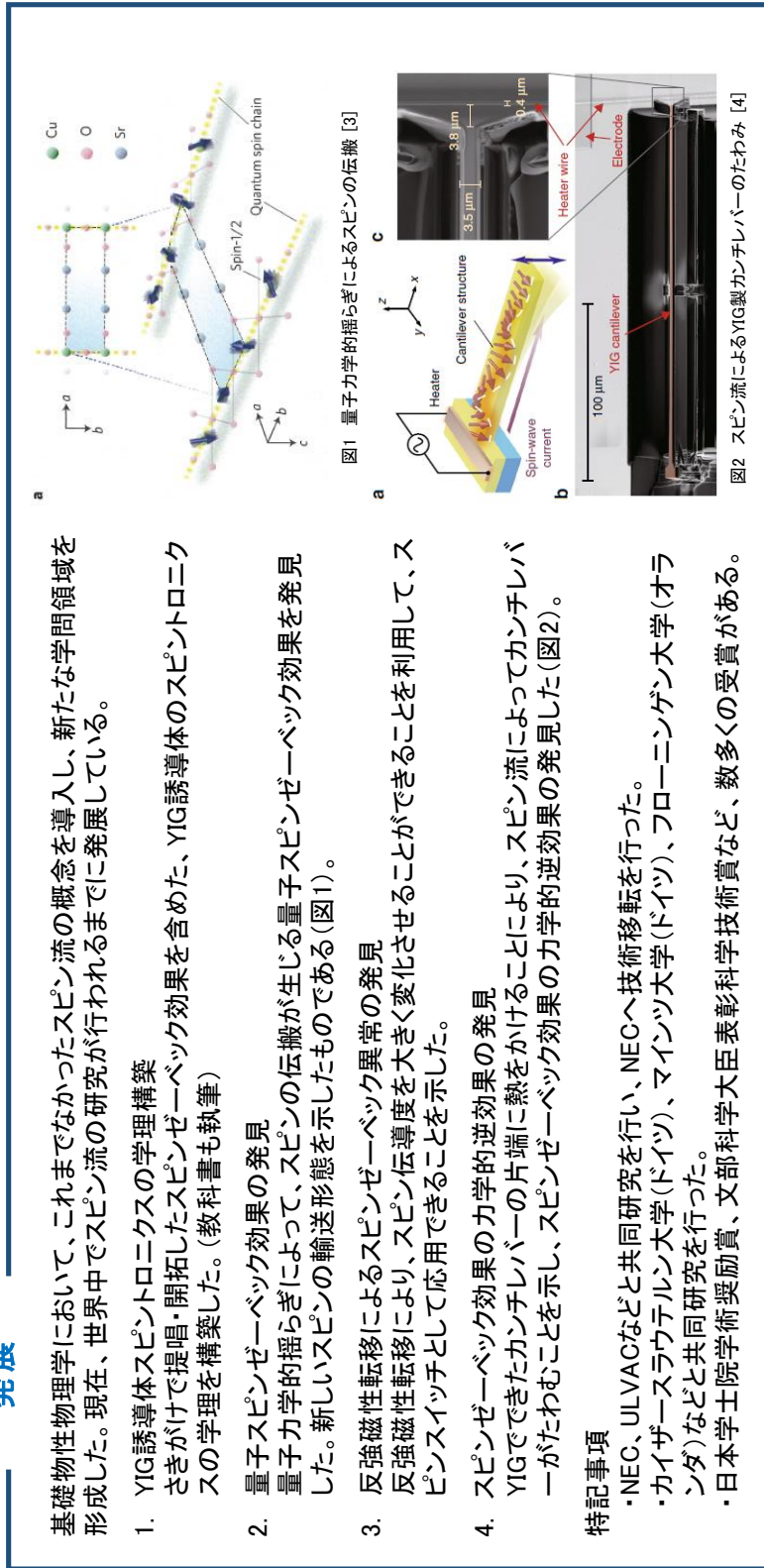


図1 量子力学的揺らぎによるスピンの伝搬 [3]

図2 スピン流によるYIG製カンチレバーのたわみ [4]

分子を介したスピン流の制御

展開している事業
 科 研 費 基 盤 研 究 (S)
 科 研 費 基 盤 研 究 (A)*2
 科 研 費 基 盤 研 究 (B)
 科 研 費 新 学 術 領 域 研 究 (研 究 領 域 提 案 型)

白石誠司(京都大学大学院工学研究科電子工学専攻・教授)

研究期間2007年10月～2011年3月

さきがけの成果

グラフェン中の純スピン流の生成と制御。他の有機分子を介した巨大磁気抵抗の発現。



発展

1. トポロジカル絶縁体のスピン機能発現
トポロジカル絶縁体の表面スピン偏極の電氣的計測に成功した(図1)。
2. イオントロニクスとの融合による新規スピンオンポトロニクスの開拓
金属を超薄膜化することでイオンゲートによる強電界印加を通じたスピンホール伝導度の非線形かつ巨大な変調に成功した。
3. シリコンスピントランジスタを利用した熱流からスピン流へのエネルギーハーバーベス
テイングな変換の実現
従来型のトランジスタで廃熱として無駄にしていた余剰な熱をスピン依存ゼーベック効果を用いてスピン信号に変換することに成功した(図2)。
4. 酸化物2次元電子系における室温スピン輸送の実現
LaAlO₃とSrTiO₃という酸化物絶縁体の界面に誘起される2次元電子ガスにおける世界初の室温スピン輸送を実現した。

特記事項

- ・TDK(株)にスピン計測技術・解析手法を提供し、同社にて実用化に向けた研究開発が推進されている。
- ・(株)村田製作所に研究成果を提供した。
- ・2017年、半導体スピントロニクスにおける先駆的研究で、文部科学大臣表彰科学技術賞を受賞している。

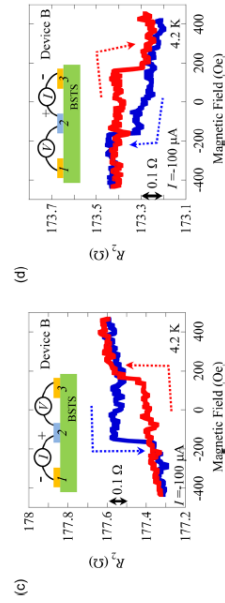


図1 トポロジカル絶縁体(BiSbTeSe)の表面スピン偏極の計測 [5]

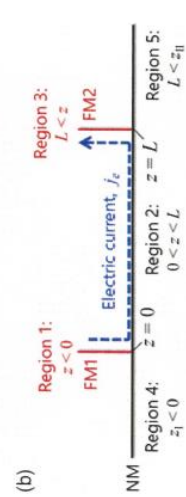
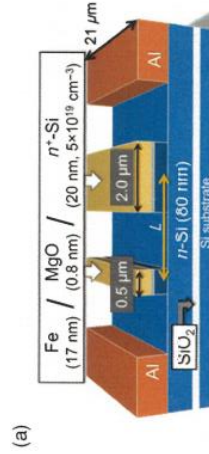


図2 シリコントランジスタを用いた熱流からスピン流への変換に関する実験装置と熱スピン信号の大きさの概略図 [6]

スピントロニクスデバイス用室温ハーフメタルの探索

展開している事業
 科研究費若手研究(A)
 科研究費基盤研究(A)
 科研究費基盤研究(B)

高橋有紀子(物質・材料研究機構・グループリーダー)

研究期間2007年10月～2011年6月

さきがけの成果

高いスピン偏極率材料の探索を行い、低温で70%を超えるスピン偏極率を示す材料を見出した。その材料を使ったスピントロニクス素子にて、世界最高の出力を実現した。



発展

1. ハードディスクドライブの再生素子に利用可能な素子抵抗領域で高い磁気抵抗比を実現
 高スピン偏極材料である $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{GaGe})$ と半導体スペーサを用いて磁気抵抗素子を作製し、ハードディスクドライブの再生素子に利用可能な素子抵抗領域で高い磁気抵抗比を実現した。
2. 界面清浄化により面内スピンバルブ素子において高いスピン信号を実現
 高スピン偏極材料である $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{GaGe})$ とCuの界面を清浄に保つことにより面内スピンバルブ素子において世界最高のスピン信号 $17.3\text{m}\Omega$ (室温)を実現した(図1)。
3. 高規則度化により高い磁気抵抗比を実現
 高スピン偏極材料である $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{GaGe})$ において高い規則度を実現することにより、世界最高の磁気抵抗比57%を実現した(図2)。

特記事項

- ・(株)東芝と、NEDO 戦略的省エネルギー技術革新プログラム(スピントロニクス 新型HDD磁気再生ヘッド素子の研究開発)で共同研究を行った。
- ・Seagate社と次世代磁気センサーの開発に関して共同研究を行った。
- ・アラバマ大学(米国)と巨大磁気抵抗素子のバンドマッチングで共同研究を行った。

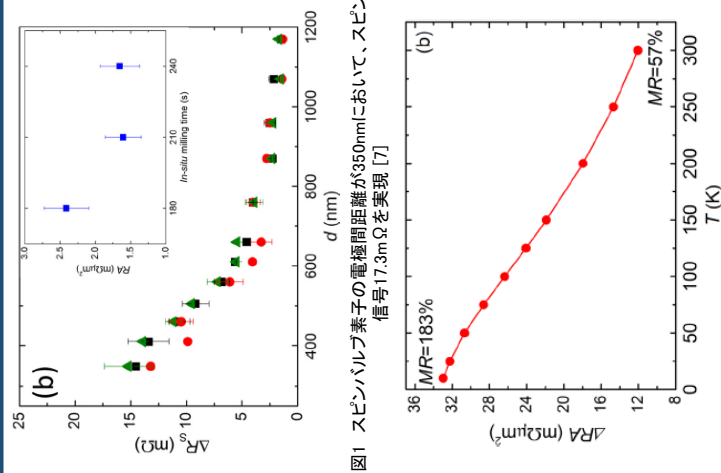


図2 $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{GaGe})$ 材料の磁気抵抗比の温度依存性 [8]

スピンの外的制御とチューナブルスピンの創製

谷山智康(名古屋大学大学院理学研究科・教授)
 研究期間2007年10月～2011年3月

展開している事業
 科研費基礎研究(B)*3
 科研費新学術領域研究(研究領域提案型)
 CREST「実験と理論・計算・データ科学を融合した材料開発の革新」
 NEDO 先導的産業技術創出事業(若手研究 Grant)
 旭硝子財団 継続型 Grant(ステップアップ助成)
 東レ科学振興会 科学技術研究助成

さきがけの成果

鉄ロジウム合金にスピン偏極電流を注入することで、反強磁性-強磁性相転移を誘導することに成功した。また、金電極/マグネタイト/半導体量子井戸ヘテロ構造において、半導体中に注入された電子スピンの偏極度が44%にも達することを見出した。



発展

1. スピン注入による磁気相転移の実証
 鉄ロジウム規則合金においてコバルトからスピン偏極電流を注入することで反強磁性-強磁性相転移を実証することに成功した。また、磁気転移が電流値の増加とともに不連続に進行することを見出した(図1)。
2. 歪み誘導磁気相転移の実証
 鉄ロジウム規則合金にガリウムを添加した規則合金と強誘電体とのヘテロ構造において圧縮格子歪みが強磁性状態から反強磁性状態への磁気秩序の変化を誘導することを実証した。
3. 反強磁性メモリ機能の実証
 鉄ロジウム合金の反強磁性状態において、電流を通電することで、反強磁性磁化の配向方向を制御することに成功した。また、配向方向に依存した電気抵抗のメモリ機能を実証した。
4. 強磁性規則合金における低スピンドャンピングの観測
 鉄ロジウム規則合金の鉄組成が過剰な領域で、金属材料においては極めて小さなスピンドャンピング定数を実現されることを実証した。これにより、鉄ロジウム規則合金のスピンドャンピング伝送媒体として利用する低消費電力デバイスへの応用の途が拓かれた(図2)。

特記事項

- ・Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf(ドイツ)と鉄ロジウム合金の強磁性共鳴についての国際共同研究を行った。
- ・2018年、教授に昇進している。

3.1.5 スピン偏極の外的制御とチューナブルスピンの創製

(研究者 谷山智康)

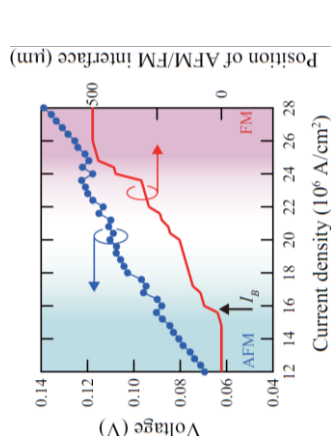


図1 Co/Fe-Rh系合金の電流注入による磁気相転移の電流値依存性 [9]

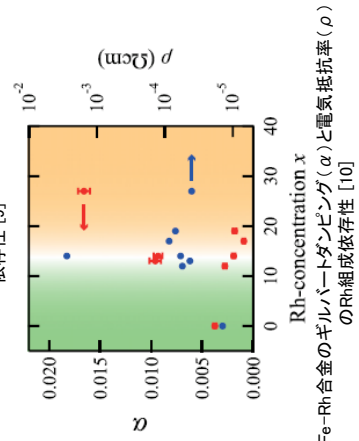


図2 Fe-Rh合金のギルバートダンピング(α)と電気抵抗率(ρ)のRh組成依存性 [10]

フェムト秒パルス・レーザーによる超高速スピン制御・計測

展開している事業

文部科学省 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「研究拠点を形成する研究」

塚本新(日本大学理工学部・教授)

研究期間2007年10月～2011年3月

さきがけの成果

超短パルス光を利用し、フェリ磁性体角運動量補償点近傍における磁気応答の高速化現象、光照射による超高速歳差スイッチング誘起、超高速磁化反転誘起の実証を行った。

発展

1. ナノサイズの解像度を持ったプラズモン層で選択可能な磁化スイッチング異種物質界面でのプラズモン・ポラリトン励起特性を設計した磁性2層膜を作製し、全光型磁化反転を誘起する層を入射パルス光の偏光により選択可能である事を実証した(図1)。
2. TbFeCoの全光磁気スイッチングのナノスケール閉じ込めと不均一性金ナノ・アンテナを利用し、光回折限界を大幅に超える極微小領域に集光する事で、50nmスケールで単一超短パルス光による全光型磁化反転制御が可能である事を、元素選択的共鳴X線ホログラム法によるアンテナ下磁化分布観察により明らかにした。
3. 超高速レーザー励起後の非局所角運動量移動によるナノスケール反転超短パルス光照射による全光型磁化反転過程のX線回折を用いた元素識別時間分解計測により、数十nmスケールで、超高速非局所角運動量移行現象が存在する事を明らかにした。
4. フェリ磁性体の角運動量補償温度付近での高速磁壁運動細線状GdFeCoフェリ磁性体内での磁壁移動速度が、角運動量補償点近傍において飛躍的に増大し2km/sに達する事を明らかにした(図2)。

特記事項

- ・(株)サムスン日本研究所と磁化動特性評価技術に関する受託研究を行った。
- ・さきがけ終了時には日本大学理工学部講師であったが、2012年4月に准教授、2015年に教授に昇進。

3.1.6 フェムト秒パルス・レーザーによる超高速スピン制御・計測 (研究者 塚本新)

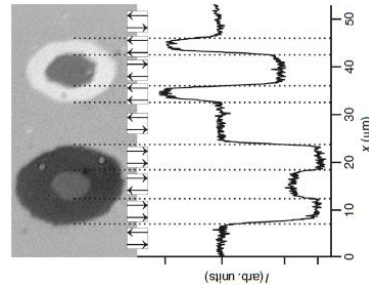


図1 GdFeCo磁性2重膜を用いた入射パルス光の偏光による磁化スイッチング [11]

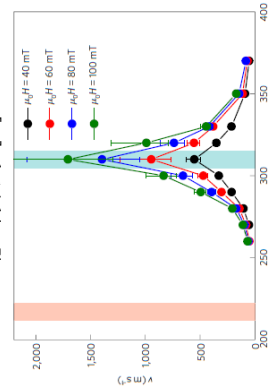


図2 フェリ磁性体中の磁壁移動速度の温度依存性 [12]
赤帯が磁化補償温度、青帯が角運動量補償温度。

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

展開している事業
 科研費基盤研究(A)
 内閣府 NEXT

深田直樹(物質・材料研究機構・グループリーダー)

研究期間2007年10月～2011年3月

さきがけの成果

次世代MOSFETの基幹材料として期待されているSi及びGeナノワイヤの成長、p型/n型制御、ナノワイヤ中の不純物の状態評価法を確立した。更に、不純物散乱のない究極のチャネルとなるSi/Ge(Ge/Si)コアシェルナノワイヤの成長と位置制御ドーピングを確立した。



発展

1. Si-Ge系コアシェルナノワイヤ形成によるホールガス形成の実証
 位置制御ドーピングされたSi-Ge系コアシェルナノワイヤにおいて不純物未ドーピング層へのホールガスの蓄積を分光学的に初めて実証することができた。本構造は次世代高移動度トランジスタチャネルの実現に繋がる重要な成果といえる(図1)。
2. Si-Fe系ナノ構造の形成制御による高容量・高寿命リチウムイオン二次電池負極材の開発
 Si材料は現行の炭素系材料の10倍以上の容量を持つが、サイクル寿命が圧倒的に短い。そこで、Siナノ構造体の形成時に基板からFe及びNiを取り込みNiで表面が被膜されたSi-Feナノ構造の集合体を形成し、現行炭素材の2倍の容量で、高耐久性を示す新材料の形成に成功した。
3. Si系ナノ構造の機能化による新規エネルギー関連材料の開発
 ナノワイヤ内部の直径方向にpn接合を形成したナノワイヤ型太陽電池にSiナノ結晶によるエネルギー移動機構という新規物理現象を活用することで14.3%まで変換効率を向上できた(図2)。
4. 高移動度・直接遷移を可能にするGeSnナノワイヤの成長機構の解明
 GeSn合金では、理論的にSn濃度9%以上で直接遷移化する。Au-Sn合金触媒を利用することで、Ge中のSnの固溶度1%を圧倒的に凌ぐ約7%を実現するGeSnナノワイヤの成長に成功し、Sn濃度と成長方位依存性の関係を説明する成長機構を解明した。

特記事項：国内企業に蛍光発光性シリコンナノ粒子を含有したフレキシブルシート、及びナノワイヤを利用したリチウムイオン二次電池用負極材料を提供した。

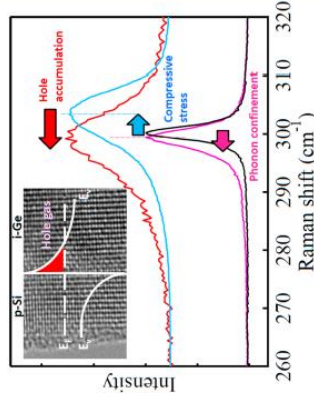


図1 Si-Ge系材料におけるホールガス蓄積の分光学的実証 [13]

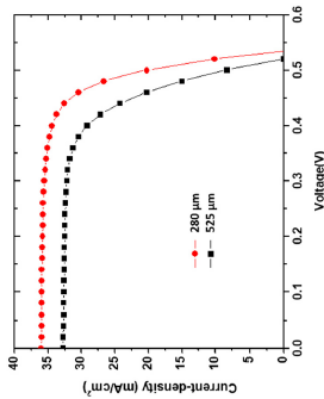


図2 Siナノベンシル太陽電池のJ-Vカーブ [14]
 ウエハ厚さ280 μmで変換効率14.3%を達成。

デバイス応用に向けたスピンの流と熱流の結合理論

展開している事業
 科研費基盤研究(A)
 科研費基盤研究(B)
 科研費新学術領域研究(研究領域提案型)

村上修一(東京工業大学院物理学系・教授)
 研究期間2007年10月～2011年3月

さきがけの成果

マグノン(スピン波)の熱ホール効果の理論構築・トポロジカル絶縁体の熱電輸送の理論構築。



発展

1. トポロジカルマグノンニック結晶の理論提案
 古典的な強磁性体をうまく空間的に周期的に配置することにより、双極子相互作用の働き方を調整して、スピン波(マグノン)に対して量子ホール系同様のトポロジカルな状態が実現されることを示した(図1)。
2. 空間反転対称性の破れた半導体に普遍的に現れるトポロジカル相転移の発見
 空間反転対称性の破れた非磁性半導体では、系のパラメータを変化させてバンドギャップを閉じると、その後にはワイル半金属などのトポロジカル半金属になることを示し、それを用いてトポロジカル半金属の新物質を提案した。
3. 高圧下のアルカリ土類金属でのノーダルライン半金属実現の理論提案
 カルシウムなどのアルカリ土類金属が高圧下ではノーダルライン半金属になるとを第一原理計算で示し、さらにそのノーダルラインのトポロジカルな性質から、表面に分極電荷が生じることを示した。
4. 熱流によるフォノン角運動量誘起の理論提案
 空間反転対称性の破れた非磁性体では、熱流を流すことでフォノンの角運動量が誘起されることを示した。さらに第一原理計算で、極性物質やカイラルな物質における効果の大きさを計算し、実験での実証方法を提案した(図2)。

特記事項

- ・北京大学の進藤龍一とマグノンニック結晶およびマグノンホール効果に関する共同研究を行った。また、国立シンガポール大学のJailiらとスピントロニクスにおけるゲージ場のもたらす物性に関する共同研究を行った。
- ・2012年、教授に昇進している。2018年、米国物理学会フェローを受賞している。

3.1.8 デバイス応用に向けたスピン流と熱流の結合理論 (研究者 村上修一)



図1 トポロジカルマグノンニック結晶の理論提案 [15]
 トポロジカルなスピン波が縁に沿って時計回りに流れる。

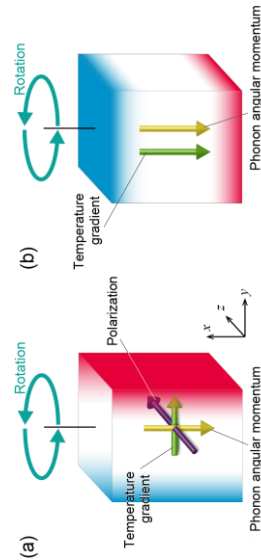


図2 熱流により生成した剛体回転 [16]
 (a)ワルツ調型GaN極性結晶 (b)Te、Seの結晶。

3.1.9 π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
(研究者 安田剛)

π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

安田剛(物質・材料研究機構・主幹研究員)

研究期間2007年10月～2011年3月

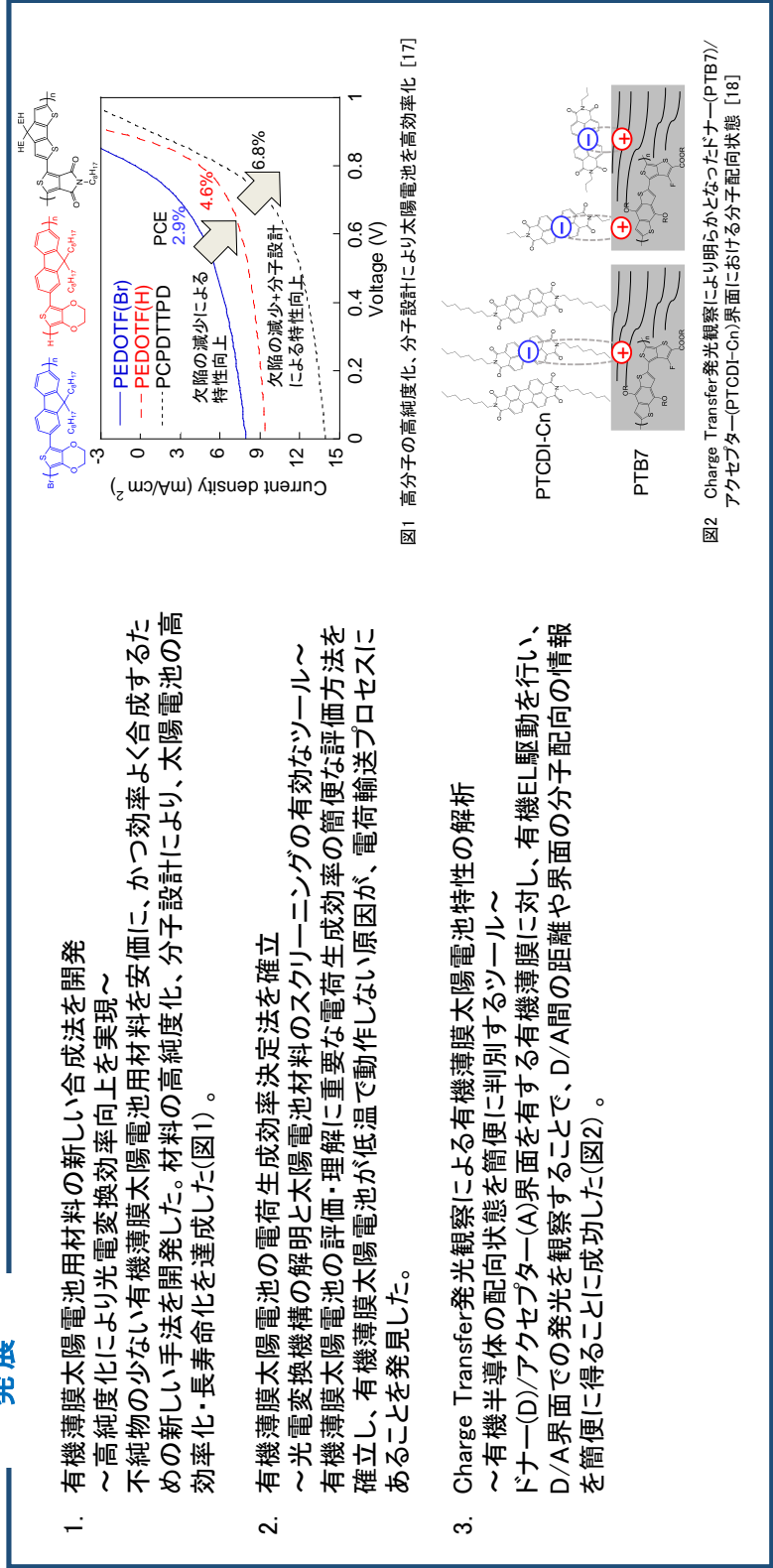
さきがけの成果

延伸配向により、共役高分子の結晶、液晶、アモルファス性薄膜いずれにおいても偏光吸収の高い2色比での配向、正孔移動度の向上に成功し、延伸法が配向薄膜作製法として極めて優れていることを証明した。



発展

1. 有機薄膜太陽電池用材料の新しい合成法を開発
～高純度化により光電変換効率向上を実現～
不純物の少ない有機薄膜太陽電池用材料を安価に、かつ効率よく合成するための新しい手法を開発した。材料の高純度化、分子設計により、太陽電池の効率化・長寿命化を達成した(図1)。
2. 有機薄膜太陽電池の電荷生成効率決定法を確立
～光電変換機構の解明と太陽電池材料のスクリーニングの有効なツール～
有機薄膜太陽電池の評価・理解に重要な電荷生成効率の簡便な評価方法を確立し、有機薄膜太陽電池が低温で動作しない原因が、電荷輸送プロセスにあることを発見した。
3. Charge Transfer発光観察による有機薄膜太陽電池特性の解析
～有機半導体の配向状態を簡便に判別するツール～
ドナー(D)/アクセプター(A)界面を有する有機薄膜に対し、有機EL駆動を行い、D/A界面での発光を観察することで、D/A間の距離や界面の分子配向の情報を簡便に得ることに成功した(図2)。



ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明

展開している事業
 科研費基盤研究(B)*2
 総務省 SCOPE

山口明啓(兵庫県立大学高度産業科学技術研究所・准教授)
 研究期間2008年10月～2011年3月

さきがけの成果

ナノ磁性体集結群の新奇な磁気特性の究明を行い、その磁気特性や物理特性を明らかにして、ナノ磁性体のダイナミクス測定の手法として確立した。さらに、ナノ構造やマイクロ構造を創製することで、新しい機能性を創出することを示し、新しい材料創製の扉を開いた。



発展

1. 高次ナノ構造体の創製と分子センシングへの適用
 高次ナノ構造体の創製を行い、巨大応答を実現し、単分子検出も可能な表面増強ラマン散乱性構造を電極に構築したり、能動的に電圧制御で作製したり分解できるシステムを創製した(図1)。
2. 立体回路の創製と電磁波伝搬特性の変調構造の創製
 PTFE(テフロン)の熱化学昇華反応機構を発見・究明し、それを利用して、微細加工することで、伝送路を創出したり、マイクロ波加熱などを行うシステムを創製した。
3. ナノ磁性体の磁気ダイナミクスの高感度測定法の確立と磁気ダイナミクスの究明
 ナノ磁性体の磁気ダイナミクスを電氣的に高感度で検出し、その動的挙動を理論モデルと比較して明らかにした(図2)。

特記事項

- ・磁気ダイナミクスの高感度測定手法の確立を行い、世界中の研究機関において、利用されている。
- ・KAIST(韓国)との共同研究、ヘルムホルツ研究所(ドイツ)との共同研究、デンマーク工科大学との共同研究、及びルンド大学(スウェーデン)とヨーク大学(イギリス)との共同研究を進めている。
- ・2012年、准教授に昇進している。

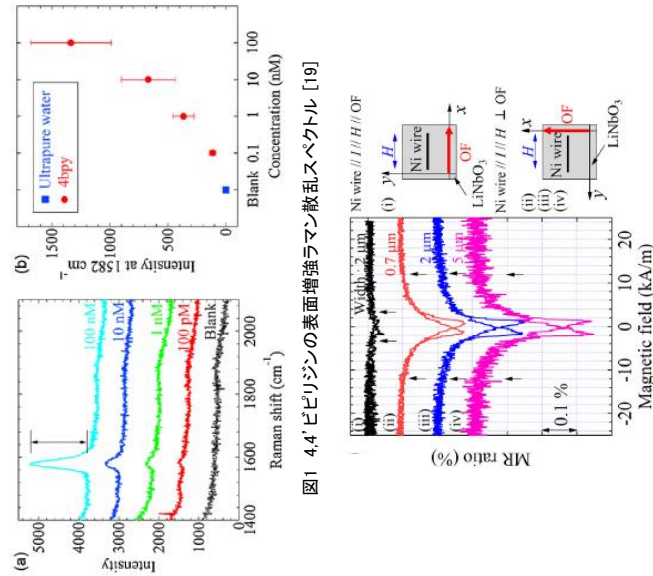


図1 4,4'ピリジンの表面増強ラマン散乱スペクトル [19]

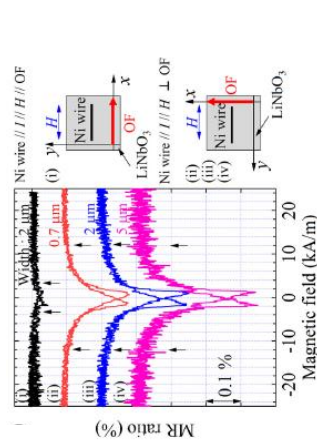


図2 Niナノワイヤの軸方向に磁場をかけた際の磁気抵抗の磁場強度依存性 [20]

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

展開している事業
科 研究費基盤研究(B)*2

若林克法(関西学院大学院工学部先進エネルギーナノ工学科・教授)

研究期間2007年10月～2011年3月

さきがけの成果

グラフェン・原子膜の電子状態・輸送特性・磁性を計算物理の手法により解析し、原子膜特有の物理特性を用いた電子スピン素子の設計指針を得た。



発展

1. グラフェンナノデバイスの電子輸送特性解析を高効率でかつ、大規模系へスケールアップできる理論手法の開発
2. グラフェンリボンにおける伝導モードとエバネッセントモードの解析的な分解によるグリーン関数を構築した。これによる高効率の伝導解析コードを開発(図1)
3. 遷移金属ダイカルコゲナイド系薄膜デバイスの電子輸送特性を系統的に解析できる現象理論の構築
4. トポロジカル位相(特にザック位相)の視点からグラフェンおよび関連原子膜物質の材料設計の指針を提示(図2)
5. グラフェンの電子状態解析で得た知見を基に、トポロジカルフォトニック結晶の設計指針をトポロジカル位相の観点から提示

特記事項

- ・グラフェンの電子伝導解析に関するプログラムコード、光物性解析に関するコードを、IISER Tirupati(インド)、エクセター大学(英国)の共同研究先に提供した。また、国内外の多数の研究機関との共同研究へと発展している。
- ・2015年、教授に昇進している。

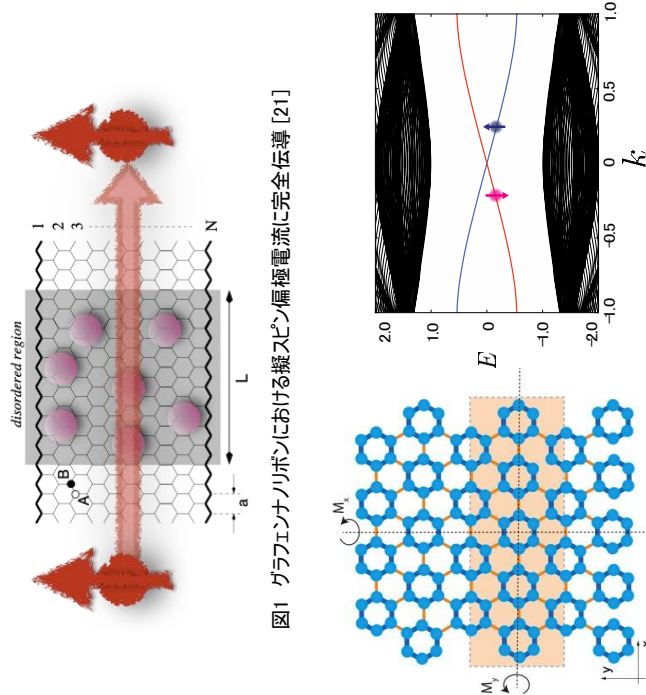


図1 グラフェンナノリボンにおける擬スピン偏極電流に完全伝導 [21]

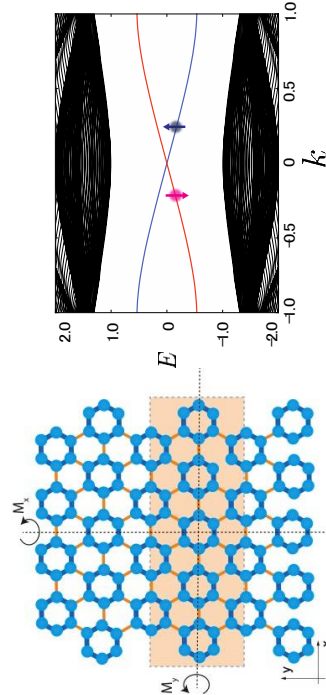


図2 高次トポロジカル状態を有する物質の設計とヘリカルスピンの流 [22]

3.2 2008 年度採択研究課題

- 3.2.1 極性ワイドギャップ半導体フォトリックナノ構造の新規光機能
(研究者 片山竜二)
- 3.2.2 ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製
(研究者 川山巖)
- 3.2.3 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
(研究者 寒川義裕)
- 3.2.4 サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発
(研究者 小林航)
- 3.2.5 ワイドギャップ酸化物における界面機能開発
(研究者 須崎友文)
- 3.2.6 光配線 LSI 実現に向けた Ge ナノ光電子集積回路の開発
(研究者 竹中充)
- 3.2.7 量子ドットを用いた単電子・スピン・光機能融合デバイス
(研究者 中岡俊裕)
- 3.2.8 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
(研究者 浜屋宏平)
- 3.2.9 ワイドギャップ強磁性半導体デバイス
(研究者 福村知昭)
- 3.2.10 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
(研究者 水落憲和)

極性ワイドギャップ半導体フォトニックナノ構造の新規光機能

展開している事業
 科 研究費基盤研究(A)
 科 研究費若手研究(A)
 MIC 情報通信(ICT政策) 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)
 ICT基礎・育成型研究開発 従来型(2011年)

片山竜二(大阪大学大学院基礎工学研究科・教授)
 研究期間2008年10月~2012年3月

さきがけの成果

周期的極性反転GaN導波路および、線形・非線形媒質による積層導波路を作製し、それらの導波モード実効屈折率分散など線形光学特性の評価により導波路として機能することを確認するとともに、特に前者の構造で高効率な第二高調波発生を実証した。



発展

1. 横型擬位相整合波長変換素子の開発
 基本波基底モードと高調波高次モード間で速度整合し、後者の節にあたる層厚で結晶方位を反転し電磁界の重なりを最大化させる、新規な擬位相整合構造を提案し、実際にチャネル導波路型デバイス構造の作製と第二高調波発生に世界で初めて成功した(図1)。
2. モリシック共振器型ワイドギャップ半導体波長変換素子の開発
 「複屈折性や分極反転が必須」という波長変換素子の既存概念にとらわれない、簡素な構造と作製工程からなる、構成部品を全て集積化した全長10 μmの世界最小サイズのモリシック微小共振器型波長変換素子を提案し、その作製と原理実証に成功した(図2)。

特記事項

- ・2016年に教授に昇進している。

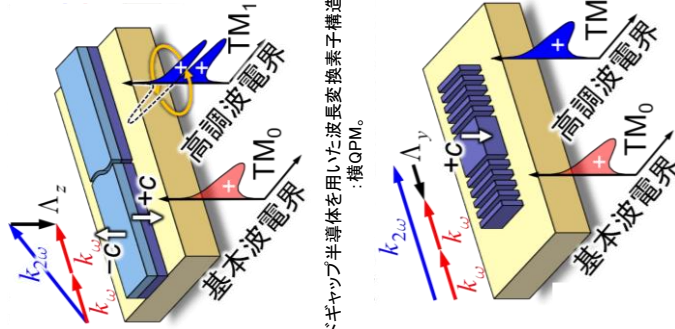


図1 極性ワイドギャップ半導体を用いた波長変換素子構造の新規構造 [23]
 :横QPMs

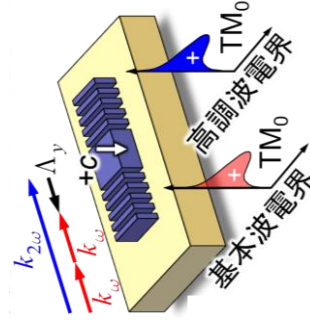


図2 極性ワイドギャップ半導体を用いた波長変換素子構造の新規構造 [24]
 :微小共振器

3.2.2 ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製 (研究者 川山巖)

ナノ構造制御した光生成磁束量子デバイスの創製

展開している事業
科研費基盤研究(B)

川山巖(京都大学大学院エネルギー科学研究科・准教授)
研究期間2008年10月～2012年3月

さきがけの成果

フェムト秒パルスレーザーを高温超伝導薄膜に照射し、光磁束量子を発生させるとともに、そのピコ秒レベルの高速応答を独自開発した計測システムにより計測することに成功した。また、レーザー照射により発生した単一磁束量子のダイナミクスを磁気光学顕微鏡により観察した。

発展

1. ナノカーボンのテラヘルツ機能開発
カーボンナノチューブやグラフェンなどのナノカーボン材料を用いたTHz波の制御や発生に関する研究を行い、THz領域の高性能偏光子、酸素センサー、THz光源など多様なテラヘルツ機能を創出した(図1)。
2. 高強度THz波による超伝導状態制御とメタマテリアルへの応用
超伝導ギャップエネルギー以下の光子エネルギーしかないテラヘルツパルスによる超伝導電子対破壊現象を発見し、これが電界効果による電子対運動エネルギーの増加に起因することを明らかにした。また、この現象を利用した超伝導メタマテリアルの制御に成功した。
3. 半導体材料・デバイスからのTHz放射特性の観測と評価技術への応用
テラヘルツ波放射分光により、太陽電池の欠陥、pn接合界面および表面保護層のパシベーションによる電界変化、GaN表面の欠陥濃度や分極ベクトル等を計測することに成功した(図2)。

特記事項

- ・フェムト秒レーザーを半導体材料・デバイスに照射し、発生するTHz波を計測・イメージングする装置を「レーザーテラヘルツ放射顕微鏡」と名付け、(株)SCREENホールディングスと共同で実証機開発を行い、産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所に設置した。
- ・2012年に准教授に昇進している。

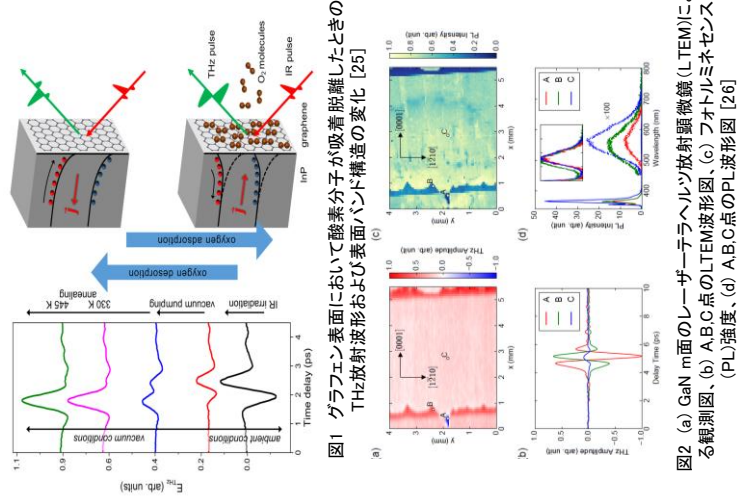


図1 グラフェン表面において酸素分子が吸着脱離したときのTHz放射波形および表面バンド構造の変化 [25]

図2 (a) GaN m面のレーザーテラヘルツ放射顕微鏡(LTEM)による観測図、(b) ABC点のLTEM波形図、(c) フォトルミネセンス(PL)強度、(d) ABC点のPL波形図 [26]

3.2.3 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
(研究者 寒川義裕)

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

寒川義裕(九州大学応用力学研究所・教授)
研究期間2008年10月～2012年3月

さきがけの成果

光・電子デバイスの多くは薄膜材料により作製されており、その特性は薄膜の結晶品質に依るところが大きい。本研究ではデバイス品質の窒化物半導体薄膜の堆積に向けて窒化アルミニウム基板の溶液成長長技術を開発した。

発展

1. 高温液体/固体界面のリアルタイム観察システム開発と固体ソースAIN溶液成長への応用(図1)
 - ・可視光に対して透明なAIN / α -Al₂O₃ テンプレートを基板として使用することにより基板裏面側から高温液-固界面現象のリアルタイム画像を取得することに成功した。
 - ・高温での液体/固体界面での界面現象をリアルタイムで観察し、固体ソース溶液成長中のAINの成長プロセスを理解した。
2. 固体ソースAIN溶液成長法により成長したAIN基板の構造及び光学的構造
 - ・透過型電子顕微鏡(TEM)解析により、成長方向とすべり面の幾何学的関係が転位の伝播挙動と消滅メカニズムに影響することを明らかにした(図2)。
 - ・C不純物が表面近くに偏析し、AI空孔が3SGメソッドを使用して成長したAIN / AIN(0001)に広く分布していることを明らかにした。

特記事項

- ・高温液体/固体界面のリアルタイム観察システム開発と固体ソースAIN溶液成長への応用で、JFEミネラル(株)やフランホーファー研究機構と共同研究を行った。
- ・ポーンランド科学アカデミーとMOVPE中のGaIn成長解析について共同研究を行った。
- ・2017年に教授に昇進している。

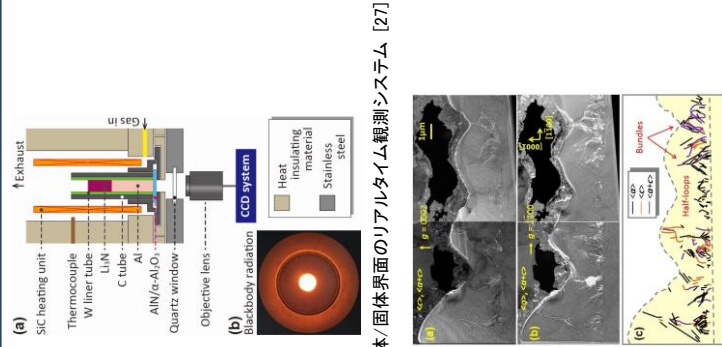


図1 高温液体/固体界面のリアルタイム観察システム [27]

図2 AIN基板のTEMイメージ [28]

サーモエレクトロニクスを指向した基礎材料の開発

展開している事業
科 研 費 若 手 研 究 (A)

小林航 (筑波大学物理学域・助教)
研究期間 2008年10月～2012年3月

さきがけの成果

強相関酸化物や半金属結晶中の熱輸送現象の精密測定を通して、(1)同現象の理解を深め、(2)外場印加や素子化により熱電性能向上や熱流の制御性の検証を行った。



発展

- コイン型熱セルの開発
 - 二次電池正極材料を用いた二次電池コインセルに温度差を印加することで電気化学ゼーベック効果を観測した(図1)。
- 室温近傍の排熱を効率よく電気に変換-熱サイクルによる熱発電
 - 295-323Kの範囲の熱サイクルにより、プルシヤンブルー類似体で作成した熱セルがカルノー効率の11%の理論熱効率で動作することを確認した(図2)。
 - 286-313Kの範囲の熱サイクルにより、プルシヤンブルー類似体で作成した熱セルがカルノー効率の27%の理論熱効率で動作することを確認した。
- ポリマーの電気化学ゼーベック係数における振動エントロピーの役割を明らかに
 - 5種類の異なるポリマーの充放電特性および起電力の温度係数を測定し、温度係数の絶対値を振動エントロピーの観点から議論した。

特記事項

- さきがけの研究成果をもとに、二次電池型セルによる熱発電の研究を行っている。

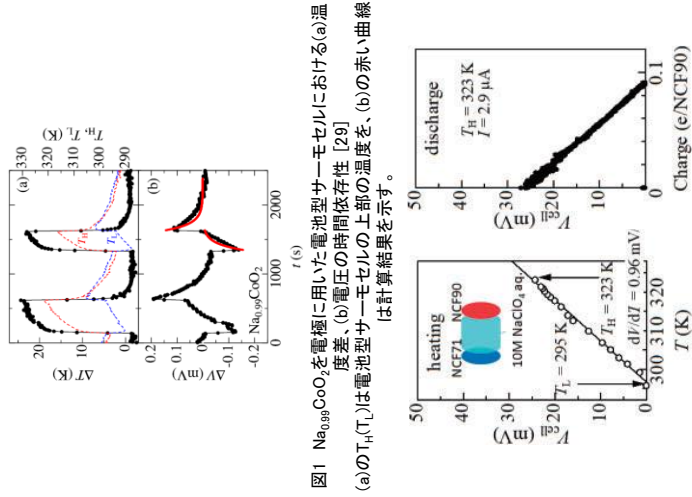


図1 $\text{Na}_{0.99}\text{CoO}_2$ を電極に用いた電池型サーモセルにおける(a)温度差、(b)電圧の時間依存性 [29]
(a)の T_H, T_L は電池型サーモセルの上部の温度を、(b)の赤い曲線は計算結果を示す。

図2 熱発電セルの起電力(V_{cell})と温度の関係と高温での熱発電セルの放電曲線 [30]

3.2.5 ワイドギャップ酸化物における界面機能開発 (研究者 須崎友文)

ワイドギャップ酸化物における界面機能開発

展開している事業
科研費基盤研究(B)

須崎友文(三菱ケミカル株式会社 Science & Innovation Center Inorganic Materials Laboratory・主席研究員)

研究期間2008年10月～2012年3月

さきがけの成果

安定なオール酸化物構造で、積層構造の工夫により2.0 eV という極めて低い仕事関数を実現した。酸化物基板上において強い分極面であるMgO(111) 薄膜表面を原子スケールで平坦化し、この表面が電氣的・化学的に強い活性を持つことを明らかにした。

発展

1. ありふれた酸化物の簡便な室温堆積により2.0 eV という低仕事関数表面を実現
ありふれた酸化物である MgO を室温で堆積し、非平衡成長を利用することで荷
電欠損を薄膜中に導入し、その結果 2.0 eV という極めて低い仕事関数を持つ
表面を実現した(図1)。
2. 両性半導体 Cu_3N 薄膜の開発
希少元素フリー、毒性元素フリーの高移動度の新規半導体薄膜 Cu_3N を開発し
た。バンドギャップは、太陽光吸収に好適であり、p型、n型両方が実現できるた
め、p-n ホモ接合も可能な材料として有用である(図2)。

特記事項

- ・(株)クレステック、浜松ホトニクス(株)、京都大学の白石誠司教授、東京工業大学の宮内雅浩教授、ヨーク大学のVlado Lazarov教授と共同研究を行っている。
- ・(株)クレステックとは薄膜電子源の開発を検討し、浜松ホトニクス(株)とは薄膜試料の二次電子放出特性を検討した。

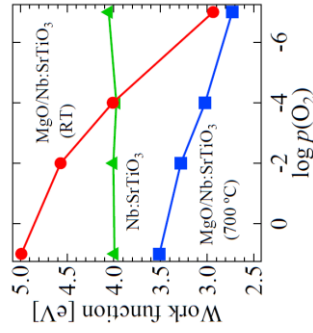


図1 室温堆積MgO/Nb:SrTiO₃の仕事関数の堆積時酸素濃度依存性 [31]

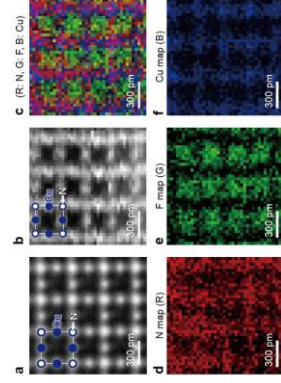


図2 $\text{Cu}_3\text{N}/\text{F}$ の原子マッピング像 [32]
a,b:原子像、dN, e:F, f:Cuのマッピング、c::d,e,fの合成図

光配線LSI実現に向けたGeナノ光電子集積回路の開発

竹中充(東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻・准教授)

研究期間2008年10月～2012年3月

展開している事業

JSPS KAKEN 若手研究(A)*2

MIC 情報通信(ICT政策) 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)

ICT基礎・育成型研究開発従来型(2011年)

キヤノン財団研究助成

さきがけの成果

GeO₂ゲート絶縁膜と気相拡散を用いて世界で初めてSiの性能を上回るn型Ge MOSTランジスタの動作実証に成功した。また同じプロセス技術をGeフォトディテクタに用いることで、暗電流の物理的起源を明らかにすると共に世界最小レベルの暗電流動作の実証に成功した。また、融点ぎりぎりでの酸化濃縮することで酸化濃縮ゲルマニウム薄膜の結晶品質を大幅に向上できることを発見した。

発展

1. 酸化濃縮における低欠陥Ge薄膜形成プロセスの開発
融点ぎりぎりでの酸化濃縮することに加えて、温度の時間変化を緩やかにすることで酸化濃縮中の結晶欠陥が大幅に抑制できることを発見した。これにより酸化濃縮で作製したGe薄膜の高品位化を達成した。
2. 歪みSiGe中における自由キャリア効果増大の実証および光変調器応用
歪みSiGe中で、有効質量が軽くなることで自由キャリア効果が増大することを理論提唱し実験による実証に成功し、高性能Si光変調器を実現した。
3. III-V/Siハイブリッド光変調器の開発
歪みSiGeで実証した有効質量エンジニアリングを発展させて、電子有効質量が小さいIII-V族半導体をSi導波路上に貼り合わせたハイブリッドMOS型光変調器を提唱し、極めて高効率に光変調を達成した(図1)。
4. Ge中赤外光集積回路の提唱および開拓
Ge中赤外光集積回路の提唱および開拓
貼り合わせで作製したGeOIプラットフォームを用いた新たな中赤外光集積回路を提唱し、その基本動作の実証に成功した(図2)。

特記事項

- ・技術研究組合光電子融合基盤技術研究所(PETRA)と共同で研究を進めており、歪みSiGeを用いたSi光変調器の着想を得て原理実証に成功した。この技術をPETRAに移管して、実用化に向けた研究開発を進め量産に向けた準備を進めている。
- ・ウエハボンディングを用いたGe-on-insulator(GeOI)基板の作製に成功し、世界に先駆けてGeOIプラットフォームを用いた中赤外光集積回路の動作実証に成功した。この成果を受け東京大学理学部合田圭介教授と先端デバイスの共同研究を進めた。

3.2.6 光配線LSI実現に向けたGeナノ光電子集積回路の開発 (研究者 竹中充)

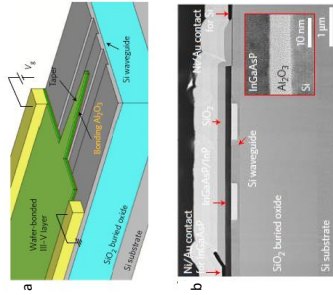


図1 InGaAsP/Si hybrid MOS光変調器 [33]
A: 位相シフターの構造、b: InGaAsP/Al₂O₃/Si MOSのウエハ貼り合わせ

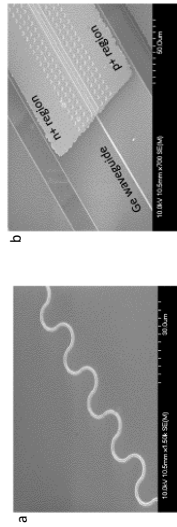


図2 GeOIプラットフォームを用いた中赤外光集積回路 [34]
a: Ge bend, b: Ge optical modulator

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

浜屋宏平(大阪大学大学院基礎工学研究科・教授)

研究期間2008年10月～2012年3月

さきがけの成果

ホイスラー合金と呼ばれる強磁性合金とSiの高品質な接合を形成し、Siへのスピントランジスタ注入技術を確認した。また、室温でスピントランジスタ注入信号を電界印加によって制御することに成功した。



発展

1. Si上の高スピントランジスタCo系ホイスラー合金薄膜の性能実証
Si基板の上に低温成長したCo系ホイスラー合金を用いて、金属ベースの横型スピントランジスタを作製することに成功し、スピントランジスタとして有用であることを示した。
2. 高スピントランジスタCo系ホイスラー合金/Siヘテロ界面の実証
通常は接合界面付近で化学反応を引き起こしてしまうCo系ホイスラー合金とSiを、非化学論組成MBE法を用いて高品質に接合することに成功し、今後のスピントランジスタのベースとなるホイスラー合金作製手法を確認した(図1)。
3. 2. の技術をゲルマニウム(Ge)に応用し、電氣的スピントランジスタ・検出を実証
Ge専用の非化学論組成MBE法を開発し、Ge系横型スピントランジスタにおいてCo系ホイスラー合金スピントランジスタ注入電極の効果を実証することに成功した。また、Ge中のスピントランジスタ緩和現象を詳細に解明した。

4. Geスピントランジスタの室温実証

Geへの電氣的スピントランジスタ注入技術の高度化・低抵抗化により、世界で初めて、Ge素子における室温スピントランジスタの観測に成功した(図2)。

特記事項

- ・英国のヨーク大学とホイスラー合金/半導体ヘテロ界面の高品質形成やそれを用いたスピントランジスタ技術に関して共同研究した。ドイツのポールドゥルレーデ研究所と、縦型半導体スピントランジスタ素子について共同研究中である。
- ・2014年、教授に昇進している。

展開している事業
 科研費基礎研究(S)、科研費基礎研究(A)*2、科研費若手研究(A)、
 科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B))、(SCOPE)ICT
 イノベーション創出型研究開発 グリーン・イノベーションの推進、NEDO
 分野横断的公募事業 先導的産業技術創出事業(若手研究 Grant)

3.2.8 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 (研究者 浜屋宏平)

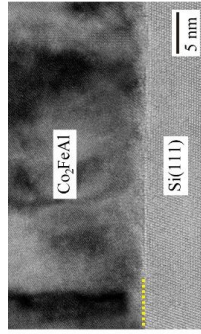


図1 Co系ホイスラー合金/Siヘテロ界面の断面TEM画像 [37]

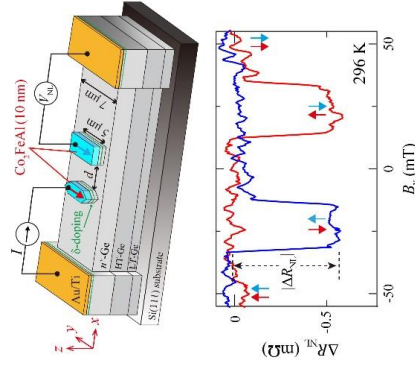


図2 Ge中の室温スピントランジスタ伝導の観測 [38]

ワイドギャップ強磁性半導体デバイス

展開している事業

科研費基礎研究(A)

科研費新学術領域研究(研究領域提案型) 3D活性サイト科学

最先端研究開発支援 最先端・次世代研究開発支援プログラム(NEXT)

福村知昭(東北大学材料科学高等研究所・教授)

研究期間2008年10月～2011年3月

さきがけの成果

室温強磁性半導体コバルトドープ酸化チタンを用いて、初めて室温で電界誘起強磁性を実証した。

発展

1. コバルトドープ酸化チタンのX線磁気円二色性分光による強磁性特性の測定
コバルトドープ酸化チタン(アナターゼ構造)のX線磁気円二色性分光を測定した結果、高キャリア濃度ほど磁化が大きいくことを観測した。また、試料表面では磁化の大きさが減少していることがわかった。
2. 酸化チタン・酸化亜鉛ベースの遷移金属ドープワイドギャップ酸化物半導体
機能性金属酸化物に関する専門書の一章にさきがけやそれまでの成果をまとめることができた。みずから開発した遷移金属ドープワイドギャップ酸化物半導体が新たな磁性体として国際的に認知された証である。
3. コバルトドープ酸化チタンの磁区構造の室温観察
コバルトドープ酸化チタンの磁区構造を室温で初めて明瞭に観察し、キャリア濃度が高い試料がより明瞭な磁区構造をもつことがわかった(図1)。
4. コバルトドープ酸化チタンにおけるコバルトイオン周囲のサブオキサイド構造の自発形成
強光X線ホログラフィーを用いて、コバルトドープ酸化チタンにおけるコバルトイオン周囲で、特異なサブオキサイド構造が形成されていることを初めて観測した(図2)。

特記事項

- ・台湾National Synchrotron Radiation Research Centerとコバルトドープ酸化チタンのX線磁気円二色性分光測定について共同研究を行った。
- ・2015年、教授に昇進している。

3.2.9 ワイドギャップ強磁性半導体デバイス

(研究者 福村知昭)

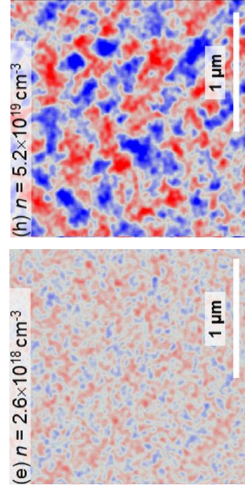


図1 コバルトドープ酸化チタン薄膜の磁区構造 [39]

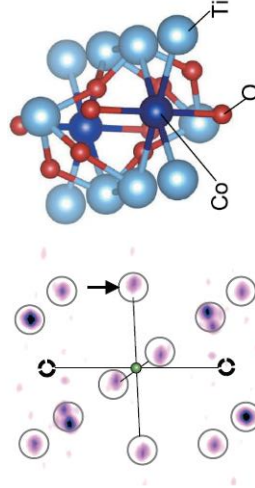


図2 コバルトドープ酸化チタンのサブオキサイド構造 [40]

3.2.10 ワイドギャップ半導体中の単一帯磁性発光中心による量子情報素子

(研究者 水落憲和)

ワイドギャップ半導体中の単一帯磁性発光中心による量子情報素子

展開している事業

科研費基礎研究(A)

MIC 情報通信(ICT政策) 戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)

ICTイノベーション創出型研究開発フェーズⅡ

科研費新学術領域研究(研究領域提案型)*2

科研費若手研究(A)

水落憲和(京都大学化学研究所・教授)

研究期間2009年1月～2012年3月

さきがけの成果

室温で初めての電流注入による単一光子発生、ダイヤモンド中の単一スピン多量子ビット系における量子情報処理研究、ダイヤモンド・超伝導量子ビットハイブリッド系の量子状態制御の研究などの成果を上げた。



発展

1. 単一NVダイヤモンド量子センサで世界最高感度を実現
人工的に合成したリンドープn型ダイヤモンドを用い、NV中心の室温での世界最長電子スピンコヒーレンス時間(T_2)と、単一NV中心を用いた量子センサでの世界最高磁場感度実現に成功した。この T_2 は、他の固体系電子スピンの中でも室温では一番長い(図1)。
2. 室温でNV中心の電荷状態を電気的に制御 ～単一NV-電荷状態の電氣的スイッチングと安定化
NV中心には保有する電子数に応じて、負に帯電した状態(NV⁻)や中性の状態(NV⁰)がある。単一NV-の電荷状態を電氣的に初めて制御することに成功し、p-i-nダイヤモンド半導体を用い、i層の単一NV中心の電荷状態を変化させた。
3. NV中心のN-V軸方向の制御に成功
NV中心はダイヤモンド中で4方向にランダムに配向し得る。(111)面にCVD法で合成されたダイヤモンドで、N-V軸方向が[111]軸方向に99%以上という高い割合で制御できた。
アンサンブルNV中心を用いた磁気センサの感度がランダム配向に比べ4倍に向上することが期待される(図2)。この成果で2016年度応用物理学会優秀論文賞受賞。

特記事項

- ・NTT物性科学基礎研究所、産業技術総合研究所、複数の民間企業と共同研究を実施。
- ・2012年9月フロンティアサロン財団より永瀬賞最優秀賞を受賞している。
- ・2016年に43歳で京都大学化学研究所教授に就任している。

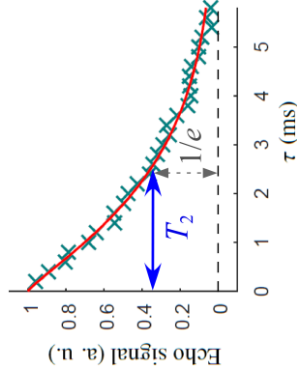


図1 ハーンエコー信号の測定結果 [41]

$T_2=2.43\pm 0.06\text{ms}$

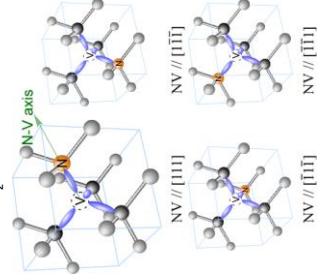


図2 NV中心の配向し得る4方向 [42]

3.3 2009 年度採択研究課題

- 3.3.1 スピン量子十字素子を用いた新規な高性能不揮発メモリの創製
(研究者 海住英生)
- 3.3.2 ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発
(研究者 組頭広志)
- 3.3.3 フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発
(研究者 高橋和)
- 3.3.4 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
(研究者 富岡克広)
- 3.3.5 分子配列制御による有機トランジスタの高性能化
(研究者 中野幸司)
- 3.3.6 誘電体トランジスタを用いたスピン操作
(研究者 中村浩之)
- 3.3.7 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
(研究者 西永慈郎)
- 3.3.8 光制御型有機単一電子デバイスの開発
(研究者 野口裕)
- 3.3.9 各種ナノカーボン構造体の自在実装
(研究者 野田優)
- 3.3.10 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
(研究者 東脇正高)
- 3.3.11 グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現
(研究者 町田友樹)
- 3.3.12 電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発
(研究者 山本浩史)

スピ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

展開している事業
科研究費基盤研究(B)*2

海住英生(慶應義塾大学理工学部物理情報工学科・准教授)

研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

強磁性薄膜のエッジとエッジの間に有機分子を挟んだ強磁性体/有機分子/強磁性体スピ量子十字素子を提案し、これにより金属-金属間オームミック挙動、極薄絶縁層を介したナスケールトンネル現象、分子内バリスティック伝導を観測することに成功した。

発展

1. スピ量子十字デバイスにおけるコバルト膜厚依存性に関する研究
スピ量子十字デバイスに用いる電極材料として低融点ガラス間に挟まれたコバルト薄膜に関する研究を行った。その結果、構造と磁気特性の観点から当該材料はスピ量子十字デバイスの電極材料として適していることを明らかにした。
2. 低融点ガラス間に挟まれたNiFe薄膜の磁気特性とスピ量子十字デバイスへの応用
スピ量子十字デバイスに用いる電極材料として低融点ガラス間に挟まれたNiFe薄膜に関する研究を行った。その結果、構造、電気、磁気特性の観点から当該材料はスピ量子十字デバイスの電極材料として極めて適していることが明らかになった。その後、当該材料を用いることでスピ量子十字デバイスの創製に成功した(図1)。
3. 逆トンネル磁気キャパシタンス効果の発見
正のスピ分極率を示すFeと負のスピ分極率を示す Fe_3O_4 を用いて、Fe/AlOx/ Fe_3O_4 強磁性トンネル接合を作製し、磁気キャパシタンス特性を調べた。その結果、新しい物理現象である逆トンネル磁気キャパシタンス効果を観測することに初めて成功した。
4. 電圧誘起トンネル磁気キャパシタンス効果の発見
MgOベースの強磁性トンネル接合を作製し、磁気キャパシタンス(MC)特性を調べた。その結果、電圧に対してMC効果が増大する電圧誘起トンネル磁気キャパシタンス効果を観測することに初めて成功した(図2)。

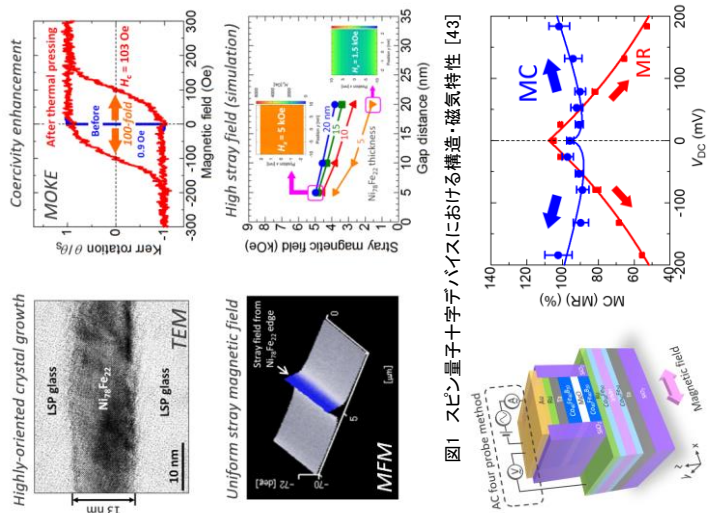


図1 スピ量子十字デバイスにおける構造・磁気特性 [43]

図2 電圧誘起トンネル磁気キャパシタンス効果 [44]

3.3.2 ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発 (研究者 組頭広志)

ナノキャパシタ構造を用いた低環境負荷メモリの開発

展開している事業
 科研費基盤研究(A)
 科研費基盤研究(B)
 科研費国際共同研究加速基金(国際共同研究強化)

組頭広志(東北大学多元物質科学研究所・教授)
 研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

抵抗変化型不揮発性メモリの動作中における界面化学状態について、放射光電子分光を用いて可視化する方法を開発し、これを用いた金属/酸化物で構成されたメモリ構造の最適化を行った。



発展

1. 金属酸化物量子井戸における異常な量子化状態の起源解明
 伝導性酸化物SrVO₃を用いた金属量子井戸構造における量子化状態を放射光電子分光で調べ、その異常な振る舞いの起源が3d軌道の異方性を反映した量子化現象によるものであることを明らかにした。
2. 酸化物ヘテロ構造界面における電荷移動現象の空間分布の決定
 遷移金属酸化物ヘテロ構造界面における遷移金属イオン間の電荷移動現象について、その空間分布を放射光電子分光により調べる方法を開発した(図1)。
3. 金属酸化物量子井戸の2次元極限における量子臨界的挙動の観測
 金属酸化物量子井戸構造の2次元極限において、量子化された電子が超伝導の前触れ現象である量子臨界点的挙動を示すことを明らかにした。
4. 強相関VO₂の電荷注入界面における異常金属相の発現
 強相関dパイスのチャネル層として用いられるVO₂において、その電子注入時の界面状態を調べた結果、「単斜晶系金属」という新たな相が発現することを放射光分光により明らかにした(図2)。

特記事項

- ・パナソニック(株)と素子材料の放射光解析に関する共同研究、及び放射光解析に関する技術指導を行った。
- ・日亜化学工業(株)と素子材料の放射光解析に関する共同研究、及び表面分析手法と放射光解析に関する技術指導を行った。

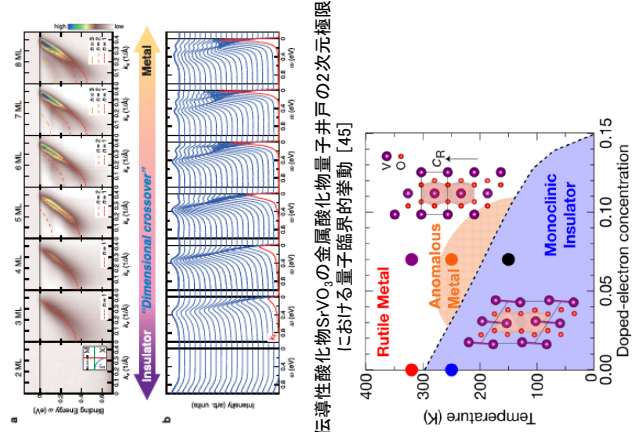


図1 伝導性酸化物SrVO₃の金属酸化物量子井戸の2次元極限における量子臨界的挙動 [45]

図2 電子をドーピングした酸化バナジウム薄膜とカリウム薄膜との界面に発見された単斜晶系金属相 (Anomalous Metal) [46]

3.3.3 フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発 (研究者 高橋和)

フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発

展開している事業
 科研費基盤研究(B)
 科研費若手研究(A)*2
 旭硝子財団 ステップアップ助成
 東レ科学振興会 東レ科学技術研究助成

高橋和(大阪府立大学大学院工学研究科電子数物系・准教授)
 研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

独自に開発した高Q値ナノ共振器を用いてマイクロワット閾値で室温動作するシリコンラマンレーザーを開発した。インテルの先行研究と比べて、エネルギー消費量が1万分の1、デバイスサイズが10万分の1である。



発展

1. 高Q値ナノ共振器シリコンラマンレーザーの光学利得スペクトルにおける非対称性の発見
 シリコンラマンレーザーの光学利得スペクトルを誘導ラマン散乱励起分光法を開発して調べた。レーザー動作が可能になる波長範囲、最大出力の励起条件、利得ピークのシフト、非線形光学損失を含むラマン利得の変化を突き止めた(図1)。
2. 2層の厚みを有するSOI基板上への1.31μmおよび1.55μmの通信波長帯域で動作する高Q値ナノ共振器シリコンラマンレーザーの集積作製
 単一シリコンチップ上で数百nm離れた動作波長を持つシリコン光素子を集積作製するための新手法を実証した。動作波長が異なる全ての光素子は1度のリソグラフィとエッチングで作製され、同じフォトニックバンド図で処理できる。
3. 高Q値ナノ共振器シリコンラマンレーザーの発振ダイナミクスにおける動的波長変化の発見
 シリコンラマンレーザーの発振ダイナミクスを調べた。2光子吸収が誘導する熱光効果とキャリアプラズマ効果により共鳴波長が動的にシフトする。その結果、強励起ではレーザー出力に振動が発生するが、数マイクロ秒以内に安定した連続発振に収束することが分かった。
4. フォトリソグラフィを用いて高Q値フォトニック結晶ナノ共振器の大量作製に成功
 ArF液漬フォトリソグラフィを使用して、300mmシリコン基板上に、高Q値ナノ共振器を大量作成した。300mm基板にわたってQ値を測定したところ平均で190万と非常に高い値が得られた(図2)。

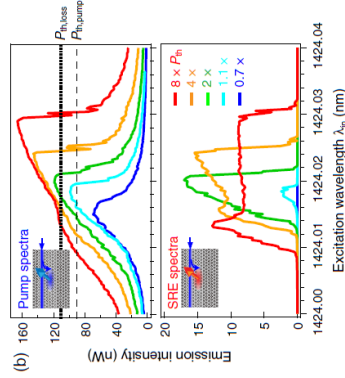


図1 シリコンラマンレーザーの共鳴スペクトル ポンプモードとラマン散乱励起スペクトル [47]

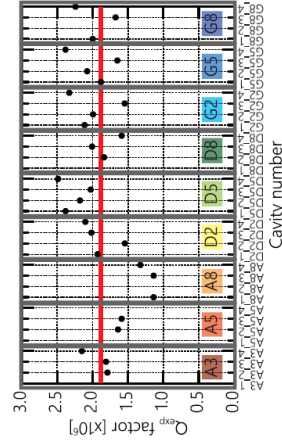


図2 300mmシリコン基板上に作成されたナノキャビティのQ値の分布 [48]
 面内30点の平均が 1.9×10^5 となっている。

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

展開している事業
 科研費若手研究(A)
 科研費基礎研究(B)
 さきがけ「エネルギー—高効率利用と相界面」
 東電記念財団研究助成(基礎研究)

富岡克広(北海道大学大学院情報科学研究科・准教授)
 研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

ナノメートルスケールの結晶成長技術によってシリコンとインジウムヒ素ナノワイヤ界面を形成し、その界面で生じる電子のトンネル効果による電流をスイッチ素子に使うことで、サブスレッシヨルド係数の理論限界60mV/桁を大幅に超える12mV/桁を世界で初めて達成した。



発展

1. 半導体ナノ構造の新規ドーピング法の確立
 半導体ナノワイヤや量子ドット構造などの低次元ナノ材料で困難であった補償ドーピングや高濃度ドーピング技術を新たに考案し、III-Vナノワイヤ縦型トランジスタやさきがけ領域で開発したInAs/Si接合型トンネルFETの閾値制御を実現した(図1)。
2. Ge基板上のIII-Vナノワイヤ異種集積技術の確立
 Ge(111)基板上に垂直に配向したIII-Vナノワイヤ選択成長技術を確立し、Ge/III-Vナノワイヤ混載CMOS集積構造の提案やInAsナノワイヤ縦型トランジスタ素子を実証した。
3. Si上のInGaAsナノワイヤ受光デバイスの開発
 Siフォトリクスのナノ光源、光伝送用のInGaAsナノワイヤ受光素子をSi上のIII-Vナノワイヤ異種集積技術によって作製した(図2)。
4. ウルツ鉱AlInP材料の成長技術の確立
 MOVPE選択成長によって作製したウルツ鉱型III-Vナノワイヤ材料をテンプレートとすることで、その側壁にウルツ鉱型のP系化合物半導体シエル層を形成する成長技術を確立した。

特記事項

- ・2016年に第13回日本学術振興会賞を受賞した。
- ・2015年に科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。
- ・2012年10月から別のさきがけ「相界面」領域で研究を継続した。
- ・2016年、准教授に昇進している。

3.3.4 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

(研究者 富岡克広)

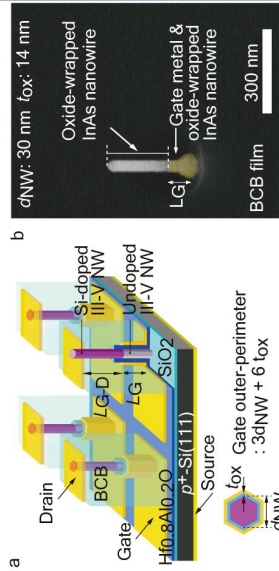


図1 バルブドーピングしたInAs/Si接合型トンネルFET素子のa. 構造図とb. 作製した素子構造の電子顕微鏡写真 [49]

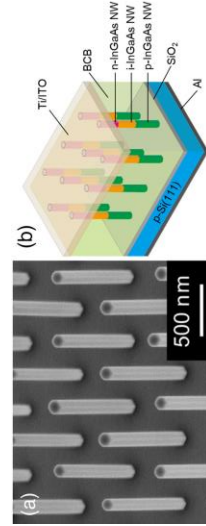


図2 Si(111)基板上に作製した縦型InGaAsフォトダイオードアレイ [50]
 (a)電子顕微鏡写真、(b)構造図

分子配列制御による有機トランジスタの高性能化

中野幸司(東京農工大学大学院工学研究応用化学部門・准教授)

研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

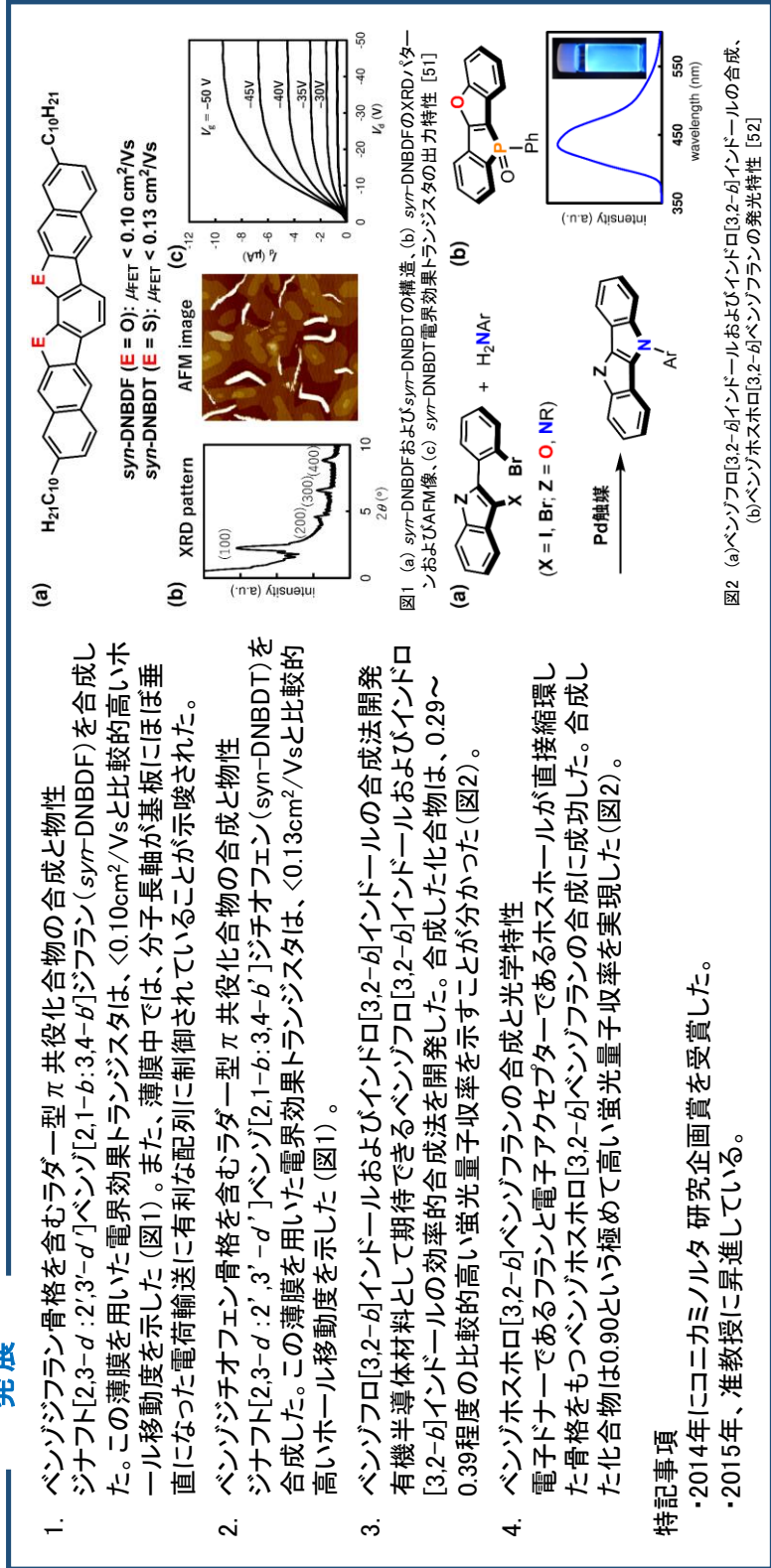
電荷移動度の高い有機半導体としてジベンゾ[1,2-*b*:4,5-*b'*]ジフラン(DBBDF)の各種置換体を設計・合成し、それらを用いた有機トランジスタ素子を作製した。ヘキシル基を置換させたDBBDF誘導体を用いた素子においてホール移動度 $0.25\text{cm}^2/\text{Vs}$ を達成した。

発展

1. ベンゾジフラン骨格を含むラダ一型 π 共役化合物の合成と物性
ジナフト[2,3-*d*:2',3'-*d'*]ベンゾ[2,1-*b*:3,4-*b'*]ジフラン(*syn*-DNBDF)を合成した。この薄膜を用いた電界効果トランジスタは、 $<0.10\text{cm}^2/\text{Vs}$ と比較的高いホール移動度を示した(図1)。また、薄膜中では、分子長軸が基板にほぼ垂直になった電荷輸送に有利な配列に制御されていることが示唆された。
2. ベンゾジチオフェン骨格を含むラダ一型 π 共役化合物の合成と物性
ジナフト[2,3-*d*:2',3'-*d'*]ベンゾ[2,1-*b*:3,4-*b'*]ジチオフェン(*syn*-DNBTD)を合成した。この薄膜を用いた電界効果トランジスタは、 $<0.13\text{cm}^2/\text{Vs}$ と比較的高いホール移動度を示した(図1)。
3. ベンゾフロロ[3,2-*g*]インドールおよびインドロ[3,2-*g*]インドールの合成法開発
有機半導体材料として期待できるベンゾフロロ[3,2-*g*]インドールおよびインドロ[3,2-*g*]インドールの効率的合成法を開発した。合成した化合物は、0.29～0.39程度の比較的高い蛍光量子収率を示すことが分かった(図2)。
4. ベンゾホスホロ[3,2-*g*]ベンゾフランの合成と光学特性
電子ドナーであるフランと電子アクセプターであるホスホールが直接縮環した骨格をもつベンゾホスホロ[3,2-*g*]ベンゾフランの合成に成功した。合成した化合物は0.90という極めて高い蛍光量子収率を実現した(図2)。

特記事項

- ・2014年にコニカミノルタ 研究企画賞を受賞した。
- ・2015年、准教授に昇進している。



誘電体トランジスタを用いたスピン操作

中村浩之 (University of Arkansas - Assistant Professor)

研究期間 2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

スピン軌道相互作用という性質が強い材料を探索するという方針のもとに、スピン物性の詳細な測定および電場制御を行った。大きな成果として、「3次のRashba効果」という現象を世界で初めて実験的に実証した(2012 Physical Review Letters 誌に発表)。

発展

1. アンチペロブスカイト Sr_3PbO の分子線エピタキシートポロジカルな電子物性を有するアンチペロブスカイトのMBE成長を世界にさががけて実現した。特に、キャリアが非常に低濃度のホールであること、移動度が薄膜においても数百 cm^2/Vs と非常に高いことを明らかにした(図1)。
2. 単原子層 WSe_2 のエピタキシャル成長
新規に開発したパルスレーザー堆積法を用いて単原子層から数原子層までの WSe_2 薄膜の成長を実現し、この材料が有する巨大なスピン分裂エネルギーを活用したデバイス応用への道筋を示した(図2)。

特記事項

- 英国 Diamond Light Source と WSe_2 単層膜の構造解析で共同研究、Phys. Rev. Bに論文を投稿中 (preprint: arXiv:1912.04770)。
- スイス PSI とアンチペロブスカイトの光電子分光で共同研究、論文をPhys. Rev. Materials に投稿 (Phys. Rev. Mater. 3,124203(2019))。

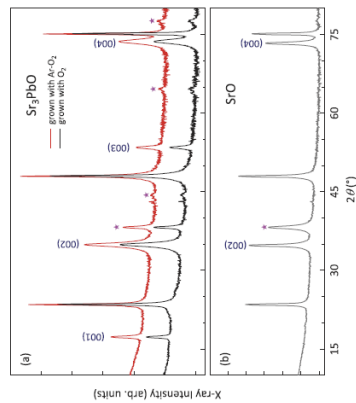


図1 MBE成長させたアンチペロブスカイト Sr_3PbO のX線回折スペクトル [53]

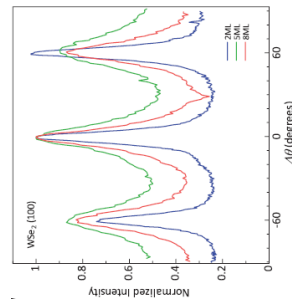


図2 パルスレーザー堆積法で数原子層(2~8層)成長させた WSe_2 薄膜のX線回折パターン [54]

有機・無機半導体へテロ構造を用いた新規デバイスの開発

西永慈郎(産業技術総合研究所太陽光発電研究センター・主任研究員)

研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

有機・無機半導体へテロ界面の結晶成長および基礎的物性の評価を行った。フラーレン C_{60} をGaAs結晶中に欠陥なく添加することに成功し、 C_{60} の空軌道に電子をトラップさせ、外部電界によって放出することを明らかにし、新規メモリ・高速トランジスタの提案を行った。



発展

1. C_{60} 電子トラップと2次元電子の相関に関する検証
AlGaAs/GaAs界面に存在する2次元電子ガスと、 C_{60} 電子トラップの電子相関について研究した。AlGaAs中に存在するDXセンターは100K以下の低温にて電子を捕縛することができず、永年光伝導を示す。一方、 C_{60} 電子トラップは10K以下の極低温においても、電子を捕縛することができ、高速電子トランジスタのスウィッチング特性を改善させる効果があることがわかった(図1)。

特記事項

- ・筑波大学岡田晋教授と、ナノ炭素物質と無機半導体からなる複合構造におけるナノ界面物性の解明に関して共同研究を行った。
- ・さきがけ研究で開発した試料を、共同研究先の京都大学に提供し、光学的物性を評価した。また、宮崎大学福山研究室にも提供し、非発光再結合中心に関する物性を評価した。
- ・2013年7月、Crystalline and electrical characteristics of C_{60} doped GaAs layersで、第32回電子材料シンポジウムEMS賞を受賞している。

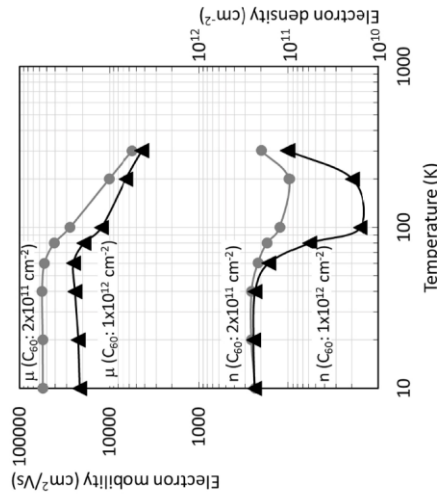


図1 C_{60} をドープしたAlGaAs/GaAs界面の電子移動度と電子密度の温度特性 [55]

光制御型有機単一電子デバイスの開発

野口裕 (明治大学理工学部・専任准教授)

研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

光機能性分子をフローティングゲートとした単一電子トランジスタを提案し、その可逆的スイッチング特性を実証した。



発展

1. 分子ドープ金ナノ粒子単一電子トランジスタにおける光照射波長依存性および複数誘起状態を発見
光照射により分子ドープ単一電子トランジスタに誘起される状態数が、添加した分子の吸収波長に依存することを明らかにした。
2. 銀ナノ粒子単一電子トランジスタにおける両極性スイッチング特性を発見
光照射により分子ドープ銀ナノ粒子単一電子トランジスタに誘起されるゲート電圧シフトの極性が、照射波長に依存することを見出した。
3. 分子フローティングゲート単一電子トランジスタのスイッチング特性の定量的解析に成功
単一ドット単一電子トランジスタを作製し、単一分子による光スイッチング特性を観測した。ゲートオフセットのシフト量を定量的に解析し、フローティングゲート効率は算出した(図1)。
4. 半導体性ナノ粒子単一電子トランジスタにおいて離散化された励起準位や負性微分抵抗を観測
CdSe/ZnSコアシェル型ナノ粒子を用いて単一電子トランジスタを作製し、ナノ粒子に形成される励起準位や負性微分抵抗を観測した。

特記事項

- ・東京工業大学 真島豊教授、東康夫助教、京都大学 寺西進教授、坂本雅典准教授と共同研究を行っている。
- ・明治大学理工学部専任准教授に就任している。

3.3.8 光制御型有機単一電子デバイスの開発

(研究者 野口裕)

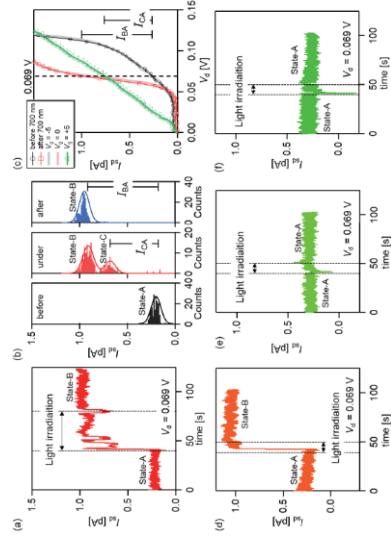


図1 光照射前後のIsd-Vat特性 [56]
(a)700nm,280 μ W/mm², (d)600nm,52 μ W/mm²,
(e)520nm,128 μ W/mm², (f)500nm,79 μ W,
(b)光照射前後の電流ヒストグラム, (c)光照射前後のIsd-Vat特性

各種ナノカーボン構造体の自在実装

野田優(早稲田大学理工学術院・教授)

研究期間2009年10月～2013年3月

展開している事業
 科研費基盤研究(S)
 科研費基盤研究(A)
 JST 戦略的創造研究推進事業 ALCA 特定領域 革新的省・創エネル
 ギーンシステム・デバイス

さきがけの成果

ナノカーボン材料の応用実現に向け、デバイス基板上への直接合成技術を開発した。稠密なカーボンナノチューブ垂直配向膜の導電性下地上の低温成長を実現した。グラフェン連続膜の誘電体下地上への直接合成を実現した。

発展

1. グラフェンの誘電体基板上への直接合成技術の開発
 エッチング析出法という独自技術を開発、誘電体基板上に炭素を含む鉄薄膜を形成し600～650°Cで塩素ガスにより鉄をエッチング除去することでグラフェン製膜を実現した。誘電体基板上に連続膜やパターン膜を直接形成でき層数制御も可能(図1)。
2. 良質な単層グラフェンの高速・大面積製膜技術の開発
 サファイア基板上に銅触媒膜を10秒でエピタキシャル成長させ、CVD法で単層グラフェンを合成、グラフェンのデバイス基板への転写とサファイア基板の再利用を実現した。銅箔を三次元状に巻き、エチレンを用いた90秒のCVDで単層グラフェンの高速・大面積製膜を実現した。
3. 稠密なカーボンナノチューブ垂直配向膜の低温成長技術の開発
 集積回路垂直配線に向けCNTを1g/cm³と高密度なCNT垂直配向膜を400°Cの低温で導電性下地上に直接成長する技術を開発した。熱界面材料応用に向け銅箔表面に0.3g/cm³と高密度なCNT垂直配向膜を数10μm長に合成、良好な熱界面を実現(図2)。
4. 1mm長CNT垂直配向膜のアルミニウムシート上への直接成長技術の開発
 Alは融点が低くCVDを600°C程度で行う必要があり、CNT長さは0.1mm程度が限界であったが、CO₂添加で触媒寿命を延ばしCNT長さ1mmを実現した。

特記事項

- ・(株)デンソーと放熱デバイス向けAlシート上のCNTファイナレイ合成で共同研究を実施。富士フイルム(株)と単層CNTの火炎合成で共同研究を実施。

3.3.9 各種ナノカーボン構造体の自在実装 (研究者 野田優)

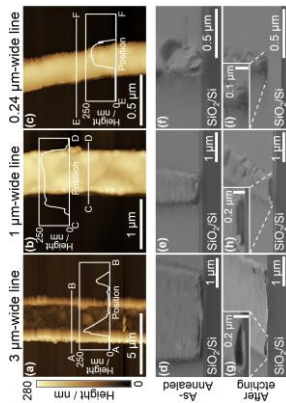


図1 SiO₂/Si基板上に直接形成したグラフェンラインパターン [57]

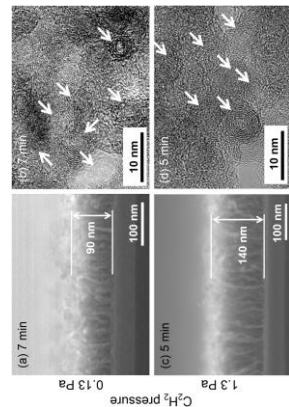


図2 TiN導電性下地上に400°Cの低温で成長させた1g/cm³の高密度CNTアレイの断面SEM像と平面TEM像 [58]

3.3.10 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
(研究者 東脇正高)

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

展開している事業
科研費基盤研究(B)*2
総務省 SCOPE、内閣府 SIP

東脇正高(情報通信研究機構未来ICT研究所グリーンICTデバイス先端開発センター長)

研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

Ⅲ族酸化物／窒化物半導体複合構造の作製に取り組み、窒化物半導体のバンドエンジニアリングの新たな可能性を探索した。また、酸化ガリウム (Ga_2O_3) デバイス研究開発においては、単結晶 Ga_2O_3 膜をチャネル層としたトランジスタ動作実証に世界で初めて成功した。



発展

1. 世界初の Ga_2O_3 MOSFET を実現、優れたデバイス特性の実証
世界初の Ga_2O_3 MOSFET の実現、優れたデバイス特性の実証を果たした。本成果内で作製した MOSFET 構造が、現在世界で行われている横型 Ga_2O_3 MOSFET 開発のベース構造となっている。
2. フィールドプレート Ga_2O_3 MOSFET の開発
フィールドプレートを採用することで、 Ga_2O_3 MOSFET の高耐圧化に成功した。本成果は、 Ga_2O_3 のパワーデバイス半導体材料としての高いポテンシャルを、広く、強く周知することにつながった(図1)。
3. 耐圧 1 kV 超 Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードの開発
トランジスタ、ダイオードを問わず、すべての Ga_2O_3 デバイスとして世界初の耐圧 1 kV 超を実現した。結果、 Ga_2O_3 のパワーデバイス半導体材料としての高いポテンシャルを、さらに広く、強く周知することにつながった。
4. 世界初のイオン注入ドーピングを用いた縦型 Ga_2O_3 トランジスタ開発
縦型 Ga_2O_3 トランジスタの試作、デバイス動作実証を達成した。Si、SiC デバイス生産に一般的に用いられる、汎用性、生産性の高いイオン注入ドーピングプロセスを採用しているところが最も重要な点である(図2)。

特記事項

- ・三菱電機(株)との資金受け入れ型共同研究の中で、 Ga_2O_3 デバイスを提供、先方にてデバイス特性評価を行った。
- ・本研究の成果を基に、情報通信研究機構からの技術移転ベンチャーとして、(株)ノベルクリスタルテクノロジが設立された。

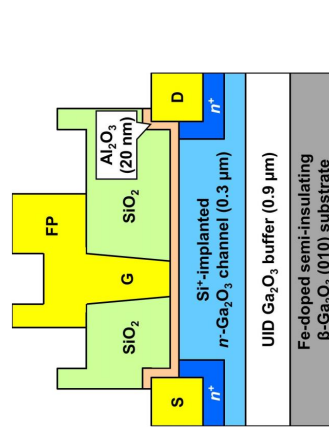


図1 フィールドプレート(FP)を用いた Ga_2O_3 MOSFET の断面図 [59]



図2 縦型 Ga_2O_3 MOSFET の断面図 [60]

グラフェン量子ドットを用いた新機能素子の実現

展開している事業
CREST「ファンデルワールス超格子の作製と光機能素子の実現」

町田友樹(東京大学生産技術研究所・教授)
研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

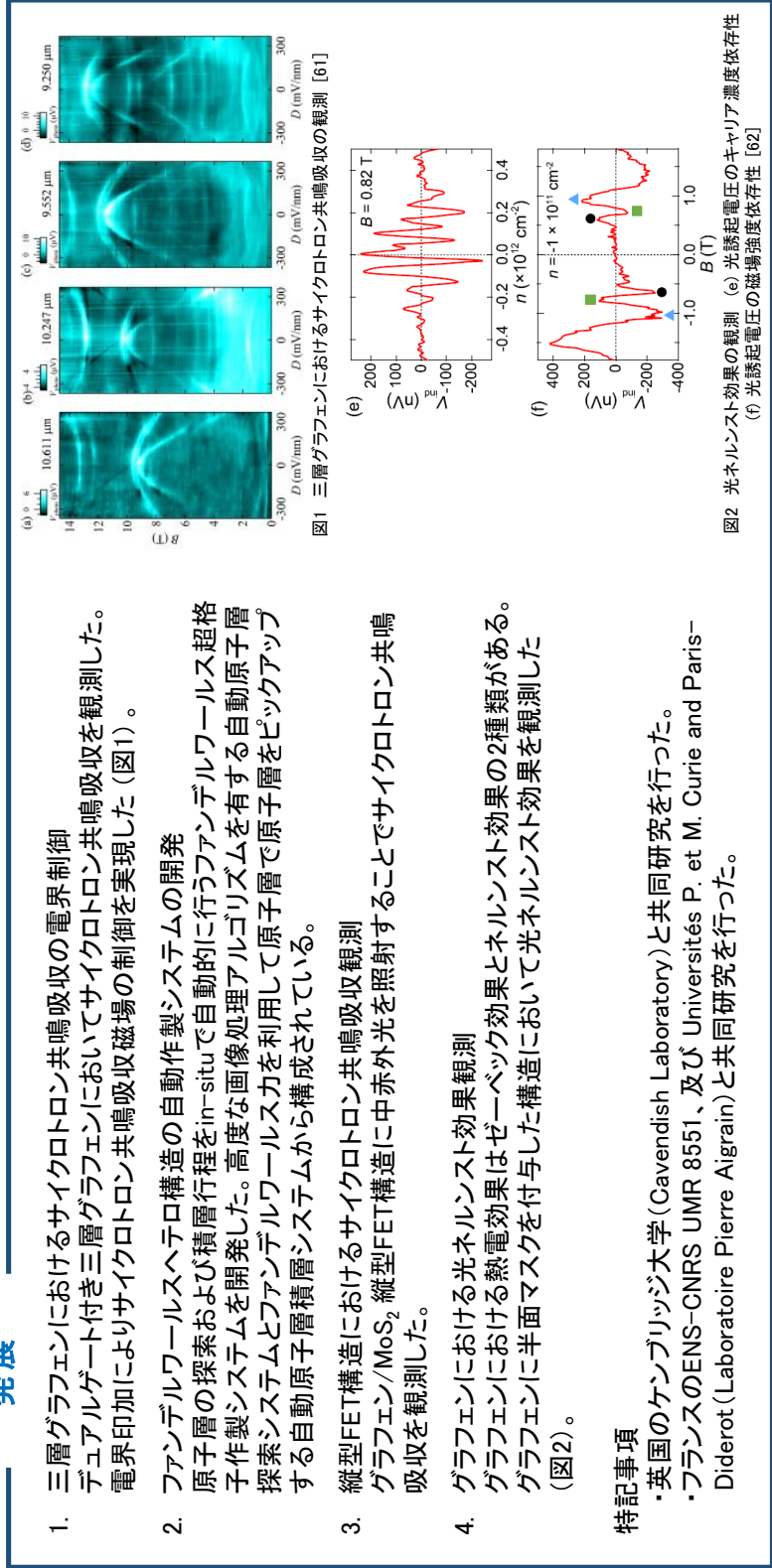
グラフェンにおけるナノ構造を作製して量子輸送現象の観測および光応答を探索した。

発展

1. 三層グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴吸収の電界制御
デュアルゲート付き三層グラフェンにおいてサイクロトロン共鳴吸収を観測した。
電界印加によりサイクロトロン共鳴吸収磁場の制御を実現した(図1)。
2. ファンデルワールスヘテロ構造の自動作製システムの開発
原子層の探索および積層行程をin-situで自動的に行うファンデルワールス超格子
作製システムを開発した。高度な画像処理アルゴリズムを有する自動原子層
探索システムとファンデルワールス力を利用して原子層で原子層をピッキングアップ
する自動原子層積層システムから構成されている。
3. 縦型FET構造におけるサイクロトロン共鳴吸収観測
グラフェン/MoS₂ 縦型FET構造に中赤外光を照射することでサイクロトロン共鳴
吸収を観測した。
4. グラフェンにおける光ネルンスト効果観測
グラフェンにおける熱電効果はゼーベック効果とネルンスト効果の2種類がある。
グラフェンに半面マスクを付与した構造において光ネルンスト効果を観測した
(図2)。

特記事項

- ・英国のケンブリッジ大学(Cavendish Laboratory)と共同研究を行った。
- ・フランスのENS-CNRS UMR 8551、及び Universités P. et M. Curie and Paris-Diderot (Laboratoire Pierre Aigrain) と共同研究を行った。



電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発

展開している事業
科研費基盤研究(A)
科研費基盤研究(B)

山本浩史(分子科学研究所・教授)

研究期間2009年10月～2013年3月

さきがけの成果

有機モットランジスタの界面における電界誘起モット転移および電界誘起超伝導転移を実現した。

発展

1. 光誘起超伝導の実現
界面での光化学反応と有機モット絶縁体の組み合わせ(κ -Brデバイス)によって光による超伝導のスイッチングを世界で初めて実現した。弱い光(紫外線と可視光)でスイッチングを実現している(図1)。
2. 強相関超伝導相図の決定
有機モット絶縁体に静電キャリアドープと歪み制御を行い、二次元の基底状態相図を決定した。電界効果でホールドープ、エレクトロンドープを行うことで、バンドフィリングをスキヤンし理論予想を実証した(図2)。
3. 超高速光スイッチの開発
有機モット絶縁体の薄膜にテラヘルツパルスを加えることにより、絶縁体から金属への超高速スイッチを実現した。
4. 有機モット絶縁体を用いたスピントロニクス
有機モット絶縁体にスピノンピングを行うことにより逆スピノンホール効果を観測した。

特記事項

- ・領域研究内の東京大学・齊藤英治教授と有機モット絶縁体を用いたスピントロニクスについて共同研究を実施した。タイ王国NANOTECの研究者と共同研究を実施し論文を共著で発表した。
- ・「有機モット絶縁体材料を用いた相転移デバイスに関する研究」にて平成30年度日本化学会学術賞を受賞している。

3.3.12 電子相関を利用した新原理有機デバイスの開発 (研究者 山本浩史)

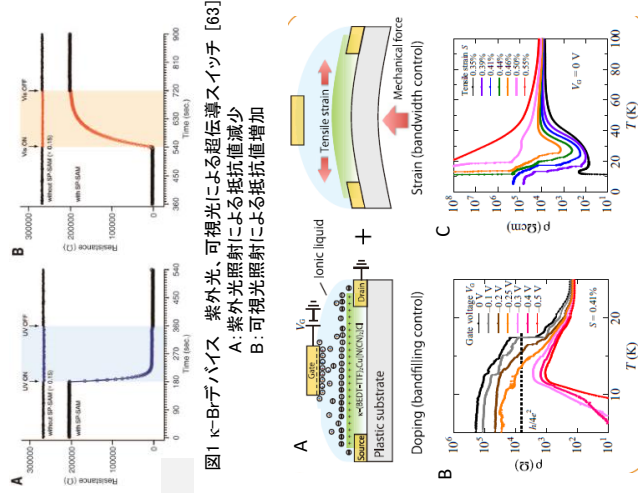


図1 κ -Brデバイス 紫外光、可視光による超伝導スイッチ [63]
A: 紫外光照射による抵抗値減少
B: 可視光照射による抵抗値増加

図2 同一サンプルでのフィリングとバンド幅制御 [64]
A: デバイス構造, B: Doping (Bandfilling), C: Strain (Bandwidth)

第3章 図の出典

- [1] Journal of Applied Logics, 2018, 5(9), p1801 の図 1
- [2] 葛西先生御提供
- [3] Nature Physics, 2017, 13, 1, p31 の図 1
- [4] Nature Communication, 2019, 10, 1, p21 の図 2
- [5] Nano Letters, 2014, 14, p6228 の図 2
- [6] Physical Review Applied, 2018, 9, p054002-2 の図 1
- [7] Journal of Applied Physics, 2014, 115, p173912-4 の図 4
- [8] Applied Physics Letters, 2013, 103, p042405-3 の図 4
- [9] Applied Physics Letters, 2015, 107, p082408-3 の図 3
- [10] Applied Physics Letters, 2019, 115, p142403-3 の図 3
- [11] Nature Communications, 2019, 10, 4786, p5 の図 3
- [12] Nature Materials, 2017, 16, 12, p1190 の図 3
- [13] ACS NANO, 2015, 9, p12182 の Abstract の図
- [14] Nano Energy, 2019, 56, p608 の図 6
- [15] 村上先生御提供
- [16] Physical Review letters, 2018, 121, p175301-4 の図 3
- [17] 安田先生御提供
- [18] 安田先生御提供
- [19] Sensors & Actuator B:Chemical, 2016, 230, p99 の図 8 Fig. 8
- [20] Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 453, p110 の図 3
- [21] 若林先生御提供
- [22] 若林先生御提供
- [23] 片山先生御提供
- [24] 片山先生御提供
- [25] Scientific Reports, 2017, 7:177411, p2 の図 1
- [26] APL Photonics, 2017, 2, 041304, p041304-3 の図 2
- [27] Applied Physics Express, 2015, 8, p065601-1 の図 1
- [28] Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54, p085501-2 の図 4
- [29] Applied Physics Letters, 2015, 107, p073906-3 の図 4
- [30] Applied Physics Express, 2018, 11, p017101-2 の図 3
- [31] Physical Review B, 2014, 90, p035453-4 の図 5
- [32] Advanced Materials, 2018, 30, p1801968-6 の図 4
- [33] Nature Photonics, 2017, vol. 11, no. 8, p487 の図 1
- [34] Optics Express, 2016, vol. 24, no. 11, p11862-11863 の図 6, 8

- [35] Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54, p04DJ03-3 の図 4
- [36] Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55, p04EK03-2 の図 1
- [37] Applied Physics Letters, 2014, 105, p071601-3 の図 4
- [38] Applied Physics Express, 2017, 10, p093001-2 の図 1
- [39] Applied Physics Letters, 2015, 106, p202402-3 の図 3
- [40] Applied Physics Letters, 2015, 106, p222403-3 の図 3
- [41] 水落先生御提供
- [42] 水落先生御提供
- [43] 海住先生御提供
- [44] 海住先生御提供
- [45] Scientific Reports, 2017, 7:16621, p3 の図 1
- [46] Physical Review, 2019, B 99, p125120-2 の図 1
- [47] Optical Society of America, 2018, 5(10) p1259 の図 3
- [48] Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(20), p4778 の図 4
- [49] 富岡先生御提供
- [50] ACS Photonics, 2019, 6, p261 の図 1
- [51] Bulletin of Chemical Society of Japan, 2016, 89, p1035, 1037, 1038 の Chart2, 図 4, 5
- [52] Journal of Organic Chemistry, 2015, 80, p3790, p11566 の Abstract
- [53] APL Materials, 2016, 4, p076101-3 の図 2
- [54] Applied Physics Letters, 2017, 111, p073101-4 の図 4
- [55] 西永先生御提供
- [56] Scientific Reports, 2017, 7, 1589, p4 の図 2
- [57] Carbon 82, 2015, p261 の図 8
- [58] Carbon 81, 2015, p779 の図 6
- [59] 東脇先生御提供
- [60] 東脇先生御提供
- [61] Nano Letters, 2019, 19, p8100 の図 4
- [62] Applied Physics Letters, 2019, 115, 153102-3 の図 2
- [63] Science, 2015, 347, p744 の図 2
- [64] Science Advances, 2019, 5, eaav7282, p2 の図 1