

**平成 30 年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)
中間評価資料(進捗状況報告書)**

1. 概要

研究交流課題名 (和文)	半導体集積デバイス向け二次元電子・スピン材料研究拠点		
日本側拠点機関名	東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センター		
コーディネーター 所属部局・職名・氏名	国際集積エレクトロニクス研究開発センター・センター長・遠藤哲郎		
相手国側	国名	拠点機関名	コーディネーター所属部局・職名・氏名
	英国	ケンブリッジ大学	Department of Engineering・Professor・ John ROBERTSON
	仏国	パリ南大学	Unité Mixte de Physique・Professor・ Pierre SENEOR

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

電子を情報単体とする情報処理デバイスのスケージングは限界に近づいており、次世代の半導体開発のブレークスルーとなる新材料と、その製造技術へのインテグレーション技術の開発が、強く求められている。グラフェンに代表される2次元材料は、高い電子移動度を有するにのみならず、室温で非常に長いスピン拡散長を有し、現在のMOSチャンネルにかわる新規電子伝導チャンネルとして、さらに近年電子にかわる超消費電力の新しい情報担体として注目されているスピンの伝導チャンネルとして、大きな注目を集めている。しかしながらグラフェン等の2次元材料を集積回路へ導入する製造技術はいまだ確立していないため、現状ではその応用範囲はニッチな産業領域に限られている。研究コーディネーターの遠藤を中心とした東北大学の研究グループは、縦型半導体からスピン応用ロジック・メモリまで、最先端の半導体デバイスの開発を先導し、2012年に新しい国際的な産学連携拠点として、国際集積エレクトロニクス研究開発センターを開設し、日本発の本格的な産学連携拠点を運営している。本研究の目標は、大面積基板に適用可能なCVD技術を駆使した再現性の高いグラフェンの製造技術を用い、高品質な電極物質や絶縁体との界面を創製することで、高品質の2次元電子、スピンチャンネルを実現し、前記チャンネルを伝導する電子・スピンの挙動を理論的、実験的に明らかにすることにある。具体的には、日本の拠点である東北大学を中心に新規の2次元電子・スピンデバイスの提案とその理論解析を行い、英国の研究拠点であるケンブリッジ大学を中心に、高品質のグラフェンデバイスの製造技術、グラフェンを応用したスピンデバイスの製造技術を開発し、さらにフランスの拠点であるパリ南大学でグラフェン中のスピン伝導を実験的に解明する。これら世界トップレベルの拠点機関間の緊密な連携により次世代半導体のブレークスルー技術を創製するとともに、研究拠点交流を通じて革新的技術創出に資する国際的なセンス豊かな若手研究者を育成することも目標とする。

○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について、

十分に達成された

概ね達成された

ある程度達成された

ほとんど達成されなかった

【理由】

平成29年度までに、毎年各拠点での研究交流セミナーの開催により、研究交流の拡大をはかり研究協力体制を構築した。これによりグラフェンなど原子層材料において、h-BNでもフェルミレベルのピニングが起きるといった新たな結果を見出したことや理論的に予測したグラフェンが良好なスピンフィルタになるという事をCoベースの磁気トンネル接合(MTJ)構造においてトンネル磁気抵抗(TMR)効果を見出す実験的検証ができたことなど学術面において成果が得られはじめたこと、加えて日本から大学院生を英国に派遣してグラフェンの微細加工技術の習得とその伝導特性からスピン物性を研究することになるなど、日英三拠点間の技術の相互移転と若手研究者の人材交流を促進することが出来たため。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成30年3月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

日本側拠点が「2次元電子・スピンドバイスの伝導機構の理論解析と2次元材料およびその界面の伝導特性測定」、英国拠点が「半導体集積デバイス向け二次元電子・スピン材料物性の研究」そして、仏国拠点が「2次元材料を障壁層とする磁気トンネル接合の研究」を担当し、各拠点間で密接な連携の下、本事業を進めている。

具体的には、東北大学から研究者、大学院生(2名)がケンブリッジ大学に平成30年2月に3日間滞在して原子層材料であるGaSeなどの物性について現状進捗を議論し、今後の共同研究に向けた検討を行った結果、大学院生をケンブリッジ大学に派遣してグラフェンを細線構造に微細加工する技術の習得とその伝導特性からスピン物性を明らかにする研究に着手することとなった。一方、東京大学は、ケンブリッジ大学と共同でh-BNのフェルミレベルピニング(FLP)をはじめ、強誘電性HfO₂など半導体集積デバイス向け二次元電子・界面材料、物性の実験、解析を進めた。さらに、ケンブリッジ大学が理論提案したグラフェンが良好なスピンフィルタになる事をパリ南大学が実験的に証明し、グラフェンをバリア層に用いたCoベースのMTJ構造においてTMR効果を見出すなど、各拠点間での連携により大きな成果が得られている。

○セミナー

	平成28年度	平成29年度
国内開催	1回	0回
海外開催	1回	1回
合計	2回	1回

【概要】

平成28年7月に英国拠点のケンブリッジ大学で英国工学・物理学研究会議－日本学術振興会研究拠点形成事業キックオフセミナー「2次元電子・スピンドバイス」を開催した後、平成28年11月に日本側拠点

である東北大学、平成 29 年 7 月に仏国拠点のパリ南大学において、日英仏拠点機関の主要研究者を集めた会議を開催した。これらの会議では、各研究グループの研究成果に関する発表を通じてその解決に向けた方策について有意義な意見交換を行った。

日本側拠点でのセミナーでは他の国際ワークショップと連続しての共同開催に加え、拠点機関である東北大国際集積エレクトロニクス研究開発センター主催の一般公開フォーラム（4th CIES Technology Forum、2018 年 3 月 22-23 日開催、参加者延べ 450 名以上）では、本プロジェクトを通じた国際的研究者の交流と拠点形成について広く市民にアピールすることができた。仏国拠点でのオープンセミナーでは本プログラム参加者の拡大を図ったことなど、本事業参加研究者以外の研究者にも本事業で得られた研究成果を広く周知することができた。

○研究者交流

【概要】

共同研究の促進や新たな展開に資する研究打ち合わせのために日本から主要研究者・若手研究者を英国拠点であるケンブリッジ大学に派遣し、研究発表、討論等を通して相手国若手研究者・大学院生と交流した。具体的には、2018 年 2 月に 3 日間主要研究者と共に 2 名の大学院生がケンブリッジ大学に訪問して原子層材料である GaSe などの物性について議論した結果、大学院生をケンブリッジ大学に派遣してグラフェンの微細加工による細線形成技術、およびその伝導特性からスピン物性を明らかにする研究に着手することとなった。

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、「学術的側面」、「若手研究者の育成」、及び「研究交流拠点の構築」の観点から記入してください。

○学術的側面

平成 28 年、29 年度における日英仏拠点大学を中心とした共同研究により、各研究テーマで以下の研究成果が得られた。

1) 2次元電子・スピndeバイスの伝導機構の理論解析と2次元材料およびその界面の伝導特性測定

日本側拠点である東北大学は、ケンブリッジ大学と共同でグラフェン細線の伝導特性からスピン物性の研究に着手した。さらに、仏英で取り組むグラフェン障壁層による MTJ において、グラフェンをヘキサゴナル(h)-BN に替えることにより特性が向上するという予想に基づいて日英仏の共同研究がスタートした。東京大学では h-BN は金属との界面で FLP が起こることを実験的に初めて検証するなど、新しい知見が見いだされた。h-BN における FLP については、ケンブリッジ大学の理論計算との比較を行う。

2) 半導体集積デバイス向け2次元電子・スピン材料物性の研究

英国拠点であるケンブリッジ大学では CVD 法を用いた単層 h-BN 薄膜の作製について基板材料に加えて、金属 Fe 層上にも良好な薄膜試料を作製できた。本成果は、2D-MTJ 素子、ファンデルワールスヘテロ接合、単一状態フォトエミッションなどへの応用展開が期待できる。同大学は、フランス拠点であるパリ南大学との共同研究においてグラフェンが良好なスピンフィルタになるという理論を提案した。

3) 2次元材料を障壁層とする磁気トンネル接合の研究

フランス拠点であるパリ南大学は、2次元材料を障壁層として用いる磁気トンネル接合高精度の作製と評価を行った。ケンブリッジ大学が理論的に提案したグラフェンをバリア層に用いて Co ベースの MTJ を試作し、TMR が向上することを実験的に検証できた。

上記のように 3 つの研究テーマは、相互に密接に関連しており、本事業の目的達成に向かって素子作成

と機構解明、評価・検証が有機的に機能しており、更なる研究の展開が見込まれる。

○若手研究者の育成

平成 28 年 11 月に東北大学において日本学術振興会研究拠点形成事業シンポジウム「2 次元電子・スピ
ンデバイス」および英国工学・物理学研究会議－日本学術振興会研究拠点形成事業セミナーを開催し、日
本側の若手研究者・学生と欧州拠点の研究者との交流を行い、忌憚ない意見交換を通じて若手研究者の育
成を図った。

また、若手研究者の人的交流としてケンブリッジ大学へ学生を含む若手研究者を派遣し、研究目的の共
有と技術共有を行い、互いのレベル向上に努めた。2018 年 2 月に 3 日間主要研究者と共に 1 名の大学院生
がケンブリッジ大学に訪問し、原子層材料である GaSe などの物性や今後の共同研究に向けた議論を進め
た。その結果、大学院生をケンブリッジ大学に派遣してグラフェンの微細細線加工技術、およびその伝導
特性からスピン物性を明らかにする研究に着手することとなった。このような体験を通じて実際に自分の研
究を説明することや相手の研究内容を理解しながらディスカッションすることは、学生にとって非常に刺
激的で自身の研究を推進するうえで大変重要な機会となる。

○研究交流拠点の構築

平成 28・29 年度に開催した計 3 回の会議は、他の国際ワークショップと連続して共同開催したりするこ
となどにより新たな参加研究者を獲得し、共同研究のネットワークを拡大した。これにより本事業参加研
究者は平成 28 年度当初には 32 名（日本 14 名、英国 15 名、フランス 3 名）であったが、平成 29 年度末時
点で 40 名（日本 22 名、英国 14 名、フランス 4 名）に増加した。特に、スピントロニクス、材料の分野の
研究者が加わり、研究交流拠点として充実した陣容がほぼ整った。

4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での、「日本側拠点機関の実施体制」、「相手国拠点機関との協力体制」、及び「日本側拠点
機関の事務支援体制」について記入してください。

○日本側拠点機関の実施体制（拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等）

東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センターを日本側拠点機関（コーディネーター：遠藤哲郎センター
長）として、東北大学内から協力研究機関である大学院工学研究科に所属する研究者・大学院生が、また協力研
究者として金属材料研究所に所属する研究者が参加している。一方、東北大学外から東京大学、筑波大学、名
古屋大学、京都大学の研究者・大学院生が参加しており、平成 29 年度末時点で参加研究者は計 23 名に上る。

日本側研究拠点が中心となり、研究テーマの設定と研究者・大学院生の派遣・受け入れに関して相手国拠点機
関との連絡調整を行い、東北大学内の研究者と協力してすべての研究テーマに主体的に取り組んでいる。また、若
手研究者の育成に関連した事業の一部は、東北大学スピントロニクス国際共同大学院プログラムと連携して実施
している。東北大学外との協力体制に関して、筑波大学、名古屋大学の協力研究者は主に、2 次元電子・スピン
デバイスの伝導機構の理論解析、東北大学、東京大学、そして日立ケンブリッジ研究所の協力研究者は主に、2
次元材料およびその界面の伝導特性測定において本事業の推進に貢献している。

○相手国拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

本事業においては、英国拠点のケンブリッジ大学は、グラフェンの作製、2 次元電子材料の理論計算に
おいて実績があるので、半導体集積デバイス向け二次元電子・スピン材料物性の研究を担当し、日仏の若

手研究者とグラフェン細線の作製、およびその伝導特性からスピン物性を明らかにする研究を主として行う。理論計算においては、東京大学で見出された HfO_2 の大きな強誘電性に対する理論的解釈や h-BN における FLP 結果の比較を担当する。また、仏国拠点のパリ南大学は、2次元材料を障壁層として用いる MTJ の作製と評価において実績があるので、ケンブリッジ大学が理論提案したグラフェンをバリア層に用いた障壁層とする MTJ の作製と評価を担当する。そして、日本側拠点である東北大学や協力機関である東京大学、筑波大学、名古屋大学では主として、2次元電子・スピンドバイスの伝導機構の理論解析と2次元材料およびその界面の伝導特性測定を担当し、グラフェンや h-BN、 HfO_2 などの評価・理論解析を担う。

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

日本側拠点機関である東北大学 国際集積エレクトロニクス研究開発センターでは、本事業の日本側参加者の旅行手続きをはじめ、物品購入や日本国内での会議開催に伴う経理手続など、本事業に関連した一切の事務処理を行い、本事業を支援する体制を整えている。