

研究拠点形成事業（A. 先端拠点形成型）
最終年度 実施報告書（平成25年度採択課題）

（※本報告書は、前年度までの実施報告書とともに事後評価資料として使用します。）

1. 拠点機関

日本側拠点機関：	慶應義塾大学
（ドイツ）拠点機関：	ミュンヘン工科大学
（英国）拠点機関：	ユニヴァーシティーカレッジロンドン
（米国）拠点機関：	スタンフォード大学
（カナダ）拠点機関：	サイモンフレーザー大学
（スイス）拠点機関：	スイス連邦工科大学
（オーストラリア）拠点機関：	ニューサウスウェールズ大学

2. 研究交流課題名

（和文）： 同位体スピントロニクス
（交流分野：数物系）

（英文）： Isotope spintronics
（交流分野： Mathematics and Physics）

研究交流課題に係るホームページ：[http:// www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/](http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/)

3. 採用期間

平成25年4月1日～平成30年3月31日

（5年度目）

4. 実施体制

日本側実施組織

拠点機関：慶應義塾大学

実施組織代表者（所属部局・職・氏名）：学長・長谷山 彰

コーディネーター（所属部局・職・氏名）：理工学部・教授・伊藤公平

協力機関：独立行政法人産業技術総合研究所、東京都市大学、東京大学

事務組織：理工学部学術研究支援課

相手国側実施組織（拠点機関名・協力機関名は、和英併記願います。）

（1）国名：ドイツ

拠点機関：(英文) **Technical University of Munich**

(和文) ミュンヘン工科大学

コーディネーター (所属部局・職・氏名)：(英文) **Department of Physics・Professor・
Martin BRANDT**

協力機関：(英文) なし

(和文) なし

経費負担区分：パターン1

(2) 国名：英国

拠点機関：(英文) **University College London**

(和文) ユニヴァーシティーカレッジロンドン

コーディネーター (所属部局・職・氏名)：(英文) **London Center for Nanotechnology・
Royal Society University Research Fellow and Reader・John MORTON**

協力機関：(英文) **University of York**

(和文) ヨーク大学

経費負担区分：パターン1

(3) 国名：米国

拠点機関：(英文) **Stanford University**

(和文) スタンフォード大学

コーディネーター (所属部局・職・氏名)：(英文) **Department of Materials Science and
Engineering・Professor・Paul MCINTYRE**

協力機関：(英文) **UC Berkeley**

(和文) カリフォルニア大学バークレー校

経費負担区分：パターン1

(4) 国名：カナダ

拠点機関：(英文) **Simon Fraser University**

(和文) サイモンフレーザー大学

コーディネーター (所属部局・職・氏名)：(英文) **Department of Physics・Professor・
Mike THEWALT**

協力機関：(英文) なし

(和文) なし

経費負担区分：パターン1

(5) 国名：スイス

拠点機関：(英文) **ETH**

(和文) スイス連邦工科大学

コーディネーター（所属部局・職・氏名）：（英文） Department of Physics・Professor・
Christian DEGEN

協力機関：（英文） なし
（和文） なし

経費負担区分：パターン1

（6） 国名：オーストラリア

拠点機関：（英文） The University of New South Wales
（和文） ニューサウスウェールズ大学

コーディネーター（所属部局・職・氏名）：（英文） Centre for Quantum Computation &
Communication Technology・Professor・Andrew DZURAK

協力機関：（英文） University of Melbourne
（和文） メルボルン大学

経費負担区分：パターン1

5. 研究交流目標

5-1. 平成29年度研究交流目標

<研究協力体制の構築>

最終年度であるため、5年間の総決算となるセミナーをミュンヘン工科大学、島根県松江市などで開催し本拠点の成果をアピールする。また、第三国であるが、香港中文大学で開催される Gordon Research Conference on Quantum Sensing (R-3 のテーマ)に、R3 の主要メンバー（スイス拠点長、ドイツ拠点メンバー、アメリカ拠点メンバー、オーストラリア拠点メンバー）と慶應側拠点メンバー（含、若手・学生メンバー）が集結し本 Core-to-Core の成果をアピールする。さらに本 Core-to-Core を通して深めた国外拠点とのつながりを来年度以降にも発展させるべく学会成果発表の場を利用した共同研究打合せを実施する。慶應スピノ研を訪問する海外研究者によるセミナーを随時開催していく。

<学術的観点>

最終年度であるため、5年間の集大成とすべく昨年度の内容を引き継ぎ発展させる。

研究拠点形成事業の共同研究(整理番号 R-1)(以下、『R-1 プログラム』)：ミュンヘン工科大学・UCL・サウスウェールズ大・東京都市大・慶應スピノ研の協調では、同位体シリコン中の単一リンダーおよび同位体シリコン中の単一量子ドットを量子ビットとして量子計算を実行する研究を進め、昨年度に引き続きインパクトの強い論文誌への共著論文発表を行う。

研究拠点形成事業の共同研究(整理番号 R-2)(以下、『R-2 プログラム』)：昨年度に引き続きスタンフォード大・サイモンフレーザー大・慶應スピノ研の協調では、スタンフォード大学においてゲルマニウムのナノワイヤーの作製に取り組み、サイモンフレーザー大学ではシリコン同位体構造の光評価、プリンストン大学ではゲルマニウムの磁気共鳴に取り組む。

研究拠点形成事業の共同研究(整理番号 R-3)(以下、『R-3 プログラム』)：ETH・産総研・ウル

ム大・慶應スピ研の協調では、産総研が同位体ダイヤモンド成長を実施し、それらの試料の基礎評価を慶應で実施し、その結果として選別された試料を ETH および Ulm 大学に送り、ETH が磁気共鳴、Ulm 大学が少数核スピ磁気共鳴の研究に取り組み、量子センシングとしての発展を広げる。また、ダイヤモンド量子センシングという切口で、ハーバード大学の Amir Yacoby 教授とワシントン大学の Kai-Mei Fu 教授との協調を深める。研究拠点形成事業の共同研究(整理番号 R-4)(以下、『R-4 プログラム』)：ETH・東大・慶應スピ研の協調では、東大が超伝導量子情報処理用の素子と構想を作製し、その実行方法の確立を ETH、MIT らと協調して進める。

<若手研究者育成>

6 月にドイツ・ミュンヘン工科大学にて日本からの若手研究者も参加する JSPS Core-to-Core セミナーを開催して国際舞台における研究活動の実態を体験する。ここでは日本からドイツへ学生メンバー6名を派遣する予定である。また日程は未定であるが、ブリストル大学でも日本からの学生が参加するセミナーを計画中である。さらに 28 年度の成功を受けて、学生1名を ETH に4週間程度派遣して共同研究を実施することを計画中である。また、プログラム横断的なセミナー・スクールを続行し、そのビデオ (http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/)の公開を続行する。

<その他(社会貢献や独自の目的等)>

当プロジェクトのホームページ http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/にて、当プロジェクトの活動報告を写真や文章で公開するとともに、様々なビデオ講義も収録して発信し続ける。

5-2. 全期間を通じた研究交流目標

スピントロニクス (Spintronics) とは、物質の電気特性と磁気特性の双方を制御することにより得られる新しい物理現象を利用して電子・情報通信産業のイノベーションを創成する新しい学術分野である。量子力学的効果を顕在化するための微細加工が不可欠であるため、固体物理学とナノテクノロジーに力点を置いた日本の基幹研究が世界のスピントロニクス研究をリードしてきた。本申請の中心となる慶應義塾スピントロニクス研究センター (以下、慶應スピ研) は、元素戦略および環境保護という観点において特に有用な炭素、ケイ素、ゲルマニウムの安定同位体を自在に制御することから、新しいスピントロニクス材料と新奇な電気・光学・磁気的特性を次々と世界に送り出してきた。

本研究交流では、同位体ダイヤモンドナノプローブによる単一分子核磁気共鳴(NMR)イメージングの実現、同位体カーボンナノチューブやグラフェンによるスピ量子情報処理法の開発、同位体シリコン構造による量子計算手法の確立、同位体ナノ構造による磁気光学素子の開発、同位体シリコン基板上での超伝導量子情報処理と量子制御など、慶應スピ研が世界レベルでの主導権を有する同位体工学をキーワードとした先端基礎研究を中心にすすめる。そしてこれまで以上に当スピ研メンバーと相手国拠点研究機関メンバーの往

来を加速し、この協調を基盤として、1) 同位体スピントロニクス研究のハブとして国内外を統合したスピントロニクス国際連携ネットワークを発展させ、2) 世界に散らばる先端的手法とノウハウを我が国に結集し、3) 国境を越えた先端研究の推進と若手研究者を啓蒙する教育プログラムを実施することから、本学術分野の発展に対する我が国のリーダーシップを確固なものとする。

目標に対する達成度とその理由

■研究交流目標は十分に達成された

□研究交流目標は概ね達成された

□研究交流目標はある程度達成された

□研究交流目標はほとんど達成されなかった

【理由】

日本拠点代表者（研究代表者）・伊藤公平は、相手国拠点代表者らとの face-to-face ミーティングを全期間通じて 22 回開催し、この密で継続的なネットワーク構築により、全期間中に 55 報の学術論文を発表した。その内の 31 報が本 Core-to-Core 参加相手国研究者との共著論文であり、過去 5 年間という直近の成果であるにも関わらず、Core-to-Core 共著論文の被引用数は多いものから 181, 177, 157, 58, 56, 50, 37 回と極めて高く、Web of Science によるトップ 1%論文が 3 報ある。Core-to-Core 共著論文の 1 論文あたりの平均被引用回数は、直近に発表された引用 0 回の 3 論文も含めて「28 回」と極めて高いことも、本研究拠点形成事業(以下、『core-to-core 事業』)がいかに大成功であったかを示している。

Core-to-Core 共著論文 31 報の相手国分布も、ドイツ 14 報、イギリス 3 報、アメリカ 7 報、カナダ 7 報、オーストラリア 6 報、スイス 4 報とバランスよく、このうち、2 報がイギリス・アメリカ・オーストラリアとの共著、1 報がイギリス・カナダとの共著という合作になっている。

研究分野的には、プログラム R-1 と R-2 にまたがるシリコン量子コンピュータ開発への注目が一番高く、慶應拠点が「同位体シリコン」という新しい切口を示し、その材料が不可欠であることが証明されたことが大きな成果である。各国の拠点機関・拠点リーダー、イギリス UCL・John Morton 教授、カナダ Simon Fraser 大学・Mike Thewalt 教授、オーストラリア New South Wales 大学教授・Andrew Dzurak 教授とのシリコン量子コンピュータ開発の成果が最終年度に大きく花開き、米国 Intel 社のシリコン量子コンピュータ開発開始を促し、本 Core-to-Core 事業チームがその相談相手になる産学協働にまで発展した。事業開始当初、本 Core-to-Core 事業内の R-1 と R-2 プログラムで立てた目標は、日本・ドイツ・イギリス・アメリカ拠点を中心とした、シリコン量子コンピュータ開発につながるスピントロニクス基礎研究の実施であった。そのことはドイツとの共著論文 14 報、イギリスとの共著論文 3 報、アメリカとの共著論文 3 報から明らかなおりの成果となったが、それに加えて、日本拠点のシリコン同位体技術の発展が目覚ましく、3 年度目から新たにオーストラリア拠点を加えることで、実際のシリコン量子コンピュータ開発と、産業界との議論が一気に進むことになった。3 年度目には日本拠点リーダー・伊藤公平が議長として、

香川県高松市でシリコン量子コンピュータに関する国際会議を本 Core-to-Core 主催で開催し、わずか2日間の会議に、140名が参加し、驚くべきことにその内の95名が外国からの参加者（旅費援助は一切なし）であった。ドイツ、英国、米国、カナダ、スイス、オーストラリアの Core-to-Core メンバーに加えて、Intel といった企業の参加もあり、このことがシリコン量子コンピュータ開発の重要な加速器となった。2017年8月に本 Core-to-Core チームがオレゴン州ポートランドの Intel 先端研究本部を訪れ、シリコン量子コンピュータ技術と今後に関する意見交換を行った。以下に示す写真は、左からオーストラリア拠点長・ニューサウスウェールズ大・Dzurak 教授、イギリス拠点長・ユニヴァーシティカレッジロンドン・Morton 教授、日本拠点長・慶應義塾大学・伊藤公平、カナダ拠点長・サイモンフレーザー大・Thewalt 教授。Intel 側の出席者は秘匿保持契約のため非開示）。



ダイヤモンド量子センシング（プログラム R-3）も大きな成功をおさめた。ここでも日本拠点と産総研が共同開発した同位体ダイヤモンド基板が量子センサー開発で極めて重要であることが示され、2017年の「量子センシング」に関する Gordon Research Conference では、日本から唯一の招待講演に慶應拠点の成果が選ばれた

(<https://www.grc.org/quantum-sensing-conference/2017/>)。Gordon Research Conference は科学分野で最重要視される会議の一つで、このシリーズで、いま世界が注目する「量子センシング（R-3 プログラムの主題）」が初めて選ばれた。一週間、単一セッションで実施された会議での講演は25件すべてが招待講演であった。慶應拠点の成果発表依頼は、拠点長の伊藤公平に届いたが、伊藤の学部長・研究科委員長としての本務と Conference 日程が重なってしまったため、慶應拠点の特任准教授・阿部英介が発表して好評を得た。なお、25件の招待講演には、Joerg Wrachtrup、Christian Degen（スイス拠点長）、Amir Yacoby、Marko Loncar、Kai-Mei Fu、Lloyd Hollenberg、Fedor Jelezko といった本 Core-to-Core メンバーが含まれることから、いかに本拠点が世界と強固につながり評価されているかがわかる。本 Core-to-Core によるスイス代表拠点 ETH・Degen 教

授と慶應の交流は特に緊密で、昨年度に慶應の学生が ETH に 2 ヶ月弱の長期滞在を行った結果として、ダイヤモンドを用いた新しい量子センシング手法の開発に成功したことを Core-to-Core 共著論文として報告した。シリコンと同様、3 年度目には日本拠点リーダー・伊藤公平が議長として、香川県高松市でダイヤモンド量子センシングに関する国際会議を開催し、3 日間の会議に、ドイツ、アメリカ、スイス、オーストラリアから多くの Core-to-Core メンバーが参加した。Core-to-Core 実施期間の中間で、シリコン量子コンピュータとダイヤモンド量子センシングの国際会議を日本で開催したことが、その後の発展の大きな礎になったという点において、他の Core-to-Core プログラムのモデルケースになると自負している。

超伝導量子ビットプログラム (R-4 プログラム) は、最初の 4 年間は目新しい成果に乏しかったが、H29 年度 (最終年度) になって予想外の成果として結実した。米国 IBM 社が開発した超伝導量子コンピュータ”IBM Q”は、現在、世界唯一の集積型量子コンピュータである。(カナダの D-wave 社の商用”量子”コンピュータは、任意の加算・減算・乗算などができない量子シミュレータであるため、正確にはコンピュータとは言えない。) その IBM Q 開発チームが本 Core-to-Core メンバーの MIT グループと提携し、さらには、その提携依頼が、慶應拠点に届くことになった。その結果として、現在、世界唯一の量子コンピュータ IBM Q の最新版 (現在は 20 量子ビットで、来年以降は 50 量子ビットに拡張) が利用できる大学は、世界でも MIT, Oxford, Melbourne、慶應義塾の 4 校のみとなり、アジアでは慶應義塾が唯一となった。すなわち、アジア諸国の企業や研究機関が IBM Q を利用して量子ソフトウェアの開発を希望する場合には、必ず慶應義塾大学を訪れることになり、慶應拠点が実機を用いた量子計算ソフトウェア開発の正真正銘の「センター (Center)」となった。これは Core-to-Core の大きな成果である。(詳細は

<https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/>の IBM Q Network Hubs を参照)

量子コンピューターの開発状況	
企業名	主な開発状況
米IBM	20個の量子ビットを実装した量子コンピューター「IBM Q」を開発。50個の量子ビットプロセッサの試作にも成功
米グーグル	49個の量子ビットに対応したシステムを試作
米インテル	17個の量子ビットの超電導テストチップを公開し、オランダの研究施設 QuTech に納入
米マイクロソフト	量子コンピューター向けの新しいプログラミング言語を公開
NTT、国立情報学研究所、東京大学など	「量子ニューラルネットワーク」方式をベースに次世代計算機を開発
カナダのDウェーブ・システムズ	2011年に「量子アニーリング」方式の計算機を商用化
富士通	「量子アニーリング」で実用を持つカナダの1QBインフォメーション・テクノロジーズに出資し、商用サービスを開発
米アクセンチュア	1QBインフォメーション・テクノロジーズに出資

量子ビットの数量単位の増えが早い方が優れている

量子コンピューター活用拠点

米IBM 慶大、企業と連携

日刊工業新聞

THE NIKKAN
KOGYO SHIMBUN


1月17日 水曜日
2018年(平成30年)

慶応義塾大学は1月17日横浜市港北区の理工学部内に、「量子コンピューティングセンター」を新設する。米ニューヨーク郊外にある米IBMの最先端高度の計算量子コンピューター「IBM Q」に直接アクセスできる国内唯一の拠点として、IBMQを日本初となる「オープンイノベーション」を推進する。量子コンピューターの活用で最先端を先駆けする慶大は米IBMが推進する「超電導方式」の量子ビットを47個に達する量子コンピューター「Q」を開発し、その共同研究に際しては、共同開発した成果を共同で発表する。また、共同開発した成果を共同で発表する。また、共同開発した成果を共同で発表する。

量子コンピューターは、従来のコンピュータとは異なり、量子ビットと呼ばれる小さな粒子の性質を利用して、大量のデータを同時に処理できる。これにより、従来のコンピュータでは不可能な計算が可能になる。慶大は、この量子コンピューターを活用して、最先端の研究を進め、社会に貢献する。また、共同開発した成果を共同で発表する。

量子コンピューターは、従来のコンピュータとは異なり、量子ビットと呼ばれる小さな粒子の性質を利用して、大量のデータを同時に処理できる。これにより、従来のコンピュータでは不可能な計算が可能になる。慶大は、この量子コンピューターを活用して、最先端の研究を進め、社会に貢献する。また、共同開発した成果を共同で発表する。

IBM Q Network
IBM Q Learn Experiment GitHub




IBM Q Network Hubs


IBM Q Network Hubs are regional centers of quantum computing education, research, development, and implementation that provide collaborators online access to IBM Q Systems.

[Join or become a hub](#)


Our hubs




OAK RIDGE
National Laboratory




慶應義塾
Keio University



THE UNIVERSITY OF
MELBOURNE



UNIVERSITY OF
OXFORD



IBM Research

若手育成に関しては、全機関を通じて 120 回の国際会議発表のうち 39 回が学生によるもので、90 件の交流実績のうち 48 件が学生によるものである。最終年度を例にあげると、国際会議発表 28 件のうち、25 件が 40 歳以下の若手研究者および大学院生が筆頭著者の口頭・ポスター発表である。また、H29 年度の交流実績 38 件（うち国外 26 件）のうち、24 件が学生、5 件が 40 歳以下の若手研究者によるものである。これらの事実は、本拠点が常に若手の育成を意識し、すべての研究分野において学生を中心とした若手を育て次世代につな

げることを目指している証の一つだと考えている。

以上のとおり、すべての Core-to-Core 相手国と有機的につながり、世界から高く評価される学術成果を協調的に発表し、若手育成も達成し、さらには当初予定にない海外企業との国際産学協働に発展した本 Core-to-Core 事業は、当初目標をはるかに超える成果を達成したと考える。

6. 研究交流成果

6-1. 平成29年度の成果

<研究協力体制の構築状況>

本 Core-to-Core 事業の最終年度という区切りにおいて、当初予定の「総決算をアピールする」という目標の先を行く「国際的发展性」を重視した活動に取り組み、以下のとおりの当初目標をはるかに超える成果を得た。

平成29年度（プロジェクト最終年度）発展的成果のハイライト（学術的成果は後述）。

R-1 と R2 プログラム:ミュンヘン工科大学・ユニバーシティカレッジロンドン・サウスウエールズ大・サイモンフレーザー大・慶應スピン研の協調では、世界トップを走ってきた我々のシリコン量子コンピュータ研究が、半導体業界の巨人・米国 Intel 社に認められた。2017年8月に本 Core-to-Core チームがオレゴン州ポートランドの Intel 先端研究本部を訪れ、シリコン量子コンピュータ技術と今後に関する意見交換を行った。

R-3 プログラムでは、2017年の「量子センシング」に関する Gordon Research Conference で日本から唯一の招待講演に慶應拠点の成果が選ばれた

(<https://www.grc.org/quantum-sensing-conference/2017/>)。本 Core-to-Core 事業によるスイス拠点 ETH と慶應の交流は特に緊密で、昨年度に慶應の学生が ETH に1ヶ月以上の長期滞在を行った結果として、物理分野最高峰の Physical Review Letters 誌に、ダイヤモンドを用いた新しい量子センシング手法の開発に関する ETH-Keio 共著論文を発表する成果も得た。

R-4 プログラムの MIT-ETH-慶應による超伝導量子ビットに関する研究は、本 Core-to-Core 事業発足から4年ほどは大きな成果に乏しく、研究代表者・伊藤公平も「なぜ、これを直感的に含めたか？」を疑問に感じることもあった。しかし、H29年度（最終年度）になって、R-4 プログラムを設置したことがセレンディピティにつながった。米国 IBM 社が開発した超伝導量子コンピュータ”IBM Q”は、現在、世界唯一の集積型量子コンピュータである。（カナダの D-wave 社の商用”量子”コンピュータは、任意の加算・減算・乗算などができない量子シミュレータであるため、正確にはコンピュータとは言えない。）その IBM Q 開発チームが MIT と提携し、さらには、その提携依頼が、慶應拠点に届くことになった。その結果として、現在、世界唯一の量子コンピュータ IBM Q の最新版（現在は20量子ビットで、来年以降は50量子ビットに拡張）が利用できる大学は、世界でも MIT, Oxford, Melbourne、慶應義塾の4つのみとなり、アジアでは慶應義塾が唯一となった。すなわち、アジア諸国の企業や研究機関が IBM Q を利用して量子ソフトウェアの開発を希望

する場合には、必ず慶應義塾大学を訪れることになり、慶應拠点の実機を用いた量子計算ソフトウェア開発の正真正銘の「センター (Center)」となった。これは Core-to-Core の大きな成果である。(詳細は <https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/> の IBM Q Network Hubs を参照)

その他、当初目標の 5 年間の総決算となるセミナーは、2017 年 6 月に独拠点ミュンヘン工科大学(R-1 プログラム)、2017 年 11 月にブリストル大学(R-1 プログラム)で開催し、R-3 プログラムに関しては、本 Core-to-Core のセミナーではないが、上述の Gordon Research Conference で拠点メンバーが招待講演やポスター講演を行うことで最先端の成果を発信した。また、R-1 と R-2 プログラムにまたがる成果として、豪英加日拠点長が 2017 年 8 月に米 Intel 社ポートランド研究拠点に集合したことは上述のとおりである。また、Core-to-Core セミナーではないが、日本拠点長の伊藤公平が共同議長を務めた 2017 年 8 月 International Conference on Defects in Semiconductors において、日本拠点を中心にシリコンやゲルマニウム半導体同位体工学に基づく光磁気効果に対する同位体効果とデバイス応用に関する発表を行った。

<学術面の成果>

最終年度にあたり、14 編の学術論文発表(内、4 編が相手国拠点との共著)、28 件の国際会議発表(内、8 件が相手国拠点との共同発表、3 件が招待講演)を行った。論文発表先としては Nature Nanotechnology、Nature Communications、Science Advances、Physical Review Letters (3 報)、Physical Review B、Physical Review X、Applied Physics Letters (3 通)、Journal of Applied Physics といった超一流誌を厳選している。さらに、応用物理誌 2017 年 6 月号に「固体量子情報デバイスの現状と将来展望・万能デジタル量子コンピュータの実現に向けて」と題した 2 段組み 14 ページの総合報告を研究代表者の伊藤公平と慶應拠点の阿部英介が発表し、本 Core-to-Core 事業も含めた量子コンピュータ開発の最先端を概観し、さらには量子コンピュータの将来展望と課題を詳細に記した解説論文を発表した。この解説は広く読まれ参考にされている。

学術分野としては、研究代表者の伊藤公平(シリコン・ゲルマニウム・ダイヤモンドスピントロニクス全般および量子コンピュータ応用)に加えて、慶應拠点の田邊孝純准教授(R-1 と R-2 プログラムに関わる光スピントロニクス、ミュンヘン工科大 Core-to-Core セミナー主催者)、安藤和也准教授(R-1 と R-2 プログラムに関わるスピン流デバイス物理学、Science Advances)、神原陽一准教授(R-1 と R-2 プログラムに関わる強相関スピントロニクス、ブリストル大 Core-to-Core セミナー主催者)、能崎幸雄教授(R-2 プログラムに関わる高周波スピントロニクスデバイス、Physical Review Letters、Physical Review B、Applied Physics Letters)、牧英之准教授(R-2 プログラムに関わるグラフェンスピントロニクス、Nature Communications)、阿部英介特任准教授(R-1 から R-4 プログラム全般に渡る量子情報、Applied Physics Letters、Journal of Applied Physics、応用物理誌)、早瀬潤子准教授(R-3 プログラム量子センシング)、渡邊紳一准教授(R-2 プログラム光スピントロニクス)らが世界的に高く評価される成果を出し、本 Core-to-Core 事業拠点である慶

慶應義塾大学スピントロニクス研究センターの「世界的拠点」としての地位を確固なものとした。

<若手研究者育成>

国際会議発表 28 件のうち、25 件が 40 歳以下の若手研究者および大学院生が筆頭著者の口頭・ポスター発表である。このことは、本拠点が常に若手の育成を意識し、すべての研究分野において学生を中心とした若手を育て次世代につなげることを目指している証の一つだと考えている。また、H29 年度の交流実績 38 件（うち国外 26 件）のうち、24 件が学生、5 件が 40 歳以下の若手研究者によるものである。

また、中間評価において、若手の 1 ヶ月以上の海外派遣例の欠如が指摘された。このことをうけ、H28 年度であるが、研究代表者・伊藤公平の大学院生・佐々木健人君が R-3 プログラムのスイス拠点 ETH のスイス拠点代表 Degen 教授の研究室に滞在することが実現した。ここで大いなる刺激を受けた佐々木君は後期博士課程進学を決意し、また、ETH で行った共同研究に基づき *Physical Review Letters* 誌に ETH・慶應の共著論文を発表する成果を得た。また、この出張で築かれた ETH 学生との交流をもとに、佐々木君は、ダイヤモンド量子センシングの概念を覆す画期的なセンシング方法を開発し、本報告書作成時点では、その論文の執筆を急いでいる。

<その他（社会貢献や独自の目的等）>

Core-to-Core 実施中に、研究代表者・伊藤公平が H28 年度に発足した JST さきがけ研究「量子機能領域」の領域総括に就任した。また、H30 年度に発足する文部科学省 Q-Leap プログラムの量子シュミレーター・コンピューター分野の PD（プログラムディレクター）に就任した。伊藤は日本学術会議の連携会員として物性物理・一般物理学分科会幹事、応用物理と未来社会分科会幹事を務めるなど、日本における量子情報処理分野全般の発展や、さらに広くは、物理学・応用物理学の発展に寄与すべく努力している。

また、日本のスピントロニクス分野の研究者コミュニティの代表として、東大・東北大・阪大・慶大が「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spintronics Research Network of Japan, Spin-RNJ)」拠点形成計画を構築し、「学術研究の大型プロジェクトロードマップ 2014」に掲載された。ロードマップ掲載を受けて、東大・東北大・阪大はそれぞれ「スピントロニクス連携研究教育センター」を 2016 年度に設置したが、慶應義塾には本 Core-to-Core 拠点としてのスピントロニクス研究センターがすでに存在したことが、ロードマップ審査において高く評価された。

最近の文科省・科学技術・学術政策研究所の調査では、慶應義塾全体におけるコア論文発表分野第 5 位（スピン量子コンピュータ）と第 10 位（スピン流素子）がスピントロニクス研究センターのプロジェクトである。（コア論文とは、トップ 10%論文に引用される「タネ論文」を指す。サッカーで例えれば重要なゴールのアシスト数で、最近特に注目されて

いる指標である。1～4位は医学系の成果である。) また米国物理学会がスピントロニクス研究センターを注目すべき研究機関に選び、以下のビデオを作成したことからその名が世界的に知られている。

https://www.youtube.com/watch?v=u0PdFJ_JF5k

独自の目的は、すでに述べたとおり、世界から評価される最先端研究拠点として、世界最先端の企業と組むことである。シリコン量子コンピュータで米 Intel 社と議論を継続し、量子コンピュータ用ソフトウェア開発で米 IBM 社と提携することでガラパゴス化を避け、地球レベルでの産学連携のモデルケースを提示している。

- (1) 平成29年度に学術雑誌等に発表した論文・著書 14本
うち、相手国参加研究者との共著 4本
 - (2) 平成29年度の国際会議における発表 28件
うち、相手国参加研究者との共同発表 8件
 - (3) 平成29年度の国内学会・シンポジウム等における発表 6件
うち、相手国参加者との共同発表 0件
- (※ 「本事業名が明記されているもの」を計上・記入してください。)

6-2 全期間にわたる研究交流成果

(1) 研究協力体制の構築状況

① 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)

Core-to-Core 実施における協力機関として、東京都市大・澤野憲太郎教授 (R-1 プログラム シリコン量子コンピューティング基板成長)、産総研・渡邊幸志博士 (R-3 プログラム 同位体ダイヤモンド成長)、東大先端研・中村泰信教授 (R-4 プログラム 超伝導量子ビット) が参加した。東京都市大・澤野教授のシリコンクリーンルームを本 Core-to-Core メンバーが利用し、共同研究の成果を多数発表した。産総研・渡邊博士とは Core-to-Core で共同を始めたことを契機としてテーマ「ダイヤモンド量子センシング」で科研費基盤 S に H26 に申請し (代表者・伊藤公平) 採択された。よって、Core-to-Core に加えて基盤 S においてダイヤモンド量子センシングに関する協働を強力に進めてきた。東大・中村教授とは、「量子センシング」という広い枠組みで H26 科研費特別推進研究 (代表者・伊藤公平) に申請したが不採択となった (評価は最上位)。その後、中村教授は JST の ERATO 事業を開始したため、ゆるい協力体制を保ちながら R-4 プログラムにおける超伝導量子コンピューティングに協力いただき、その成果が、先に述べた IBM Q Network Hub @ Keio University の設立として結実した。

H26 には、日本のスピントロニクス分野の研究者コミュニティの代表として、東大・東北大・阪大・慶大が「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spintronics

Research Network of Japan, Spin-RNJ) 拠点形成計画を構築し、「学術研究の大型プロジェクトロードマップ 2014」に掲載された。ロードマップ掲載を受けて、東大・東北大・阪大はそれぞれ「スピントロニクス連携研究教育センター」を 2016 年度に設置したが、慶應義塾には本 Core-to-Core 拠点としてのスピントロニクス研究センターがすでに存在したことが、ロードマップ審査において高く評価された。慶應の代表は、本 Core-to-Core と同様に伊藤公平で、ロードマップ掲載に基づく概算要求により予算化された資金の一部が慶應義塾のスピントロニクス研究センター運営費に充当され、全国に広がるスピントロニクスネットワークにおける「量子スピントロニクス拠点」として寄与している。

② 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）

全期間を通じて全 22 回、拠点代表者同士が世界のどこかで開かれる重要な国際会議やお互いの機関を示し合わせる形で訪れ、共同研究と拠点間ネットワークの強靱化や発展に努めた。この密な頻繁な議論体制の構築こそが本 Core-to-Core 拠点ネットワーク構築の基盤である。そのうえで各拠点との成果を国際会議開催に関する成果を以下にまとめる。

ドイツ拠点：

ドイツ拠点ミュンヘン工科大学では、R-1 プログラムのシリコン量子コンピュータ開発に必要なスピントロニクス基礎（特に電子磁気共鳴やスピン流物理解明）に関する共同研究を慶應拠点とともに進め、Ulm 大学との R-3 プログラムであるダイヤモンド量子センシング共同研究も含めて、全期間を通じて 14 編の Core-to-Core 謝辞ありの共著論文を発表した。

Core-to-Core 事業の慶應拠点研究室に、合計 4 名の大学院生がミュンヘン工科大学（1 名はアーヘン工科大学）から修士課程に入学し慶應にて修士号を取得した。慶應からは Core-to-Core 研究室から 4 名の大学院生がミュンヘン工科大学修士課程に入学し先方の修士号を取得した。これは慶應とミュンヘン工科大学間で結ばれたダブルディグリー制度を利用したものであるが、2 年間フルに先方の研究室で Core-to-Core 研究に励むことが本拠点事業の多大なる学術的成果と拠点間の強い絆の形成に寄与した。その他にもセミナー開催、短期研究者相互派遣で協力体制を強めた。

英国拠点：

英国拠点ユニヴァーシティカレッジロンドン（UCL）とは R-1 プログラムのシリコン量子コンピュータ開発を進め、全期間を通じて 3 編の Core-to-Core 謝辞ありの共著論文を発表した。また、オーストラリア・カナダ拠点、日本拠点の慶應と共同で米国 Intel 社とのシリコン量子コンピュータ開発の議論を始めている。

米国拠点：

米国拠点スタンフォード大学とは R-2 プログラムの同位体光磁気効果に関する試料作製を中心に共同研究体制を深め、複数回のセミナーも実施した。また、プリンストン大学とのシリコン量子コンピュータに関する共同研究が大きく発展し、全期間を通じて 7 編の Core-to-Core 謝辞ありの共著論文を発表するに至った。

また R-4 プログラムに関して MIT との議論を深めた結果、慶應拠点が世界最先端超伝導量子コンピュータ IBM Q Network Hub @ Keio University という新しい国際産学共同研究に発展した。

カナダ拠点

カナダ拠点サイモンフレーザー大学とは、R-2 プログラムであるシリコン量子コンピュータ開発のために必要な分光研究に関する共同研究を行い、全期間を通じて 7 編の Core-to-Core 謝辞ありの共著論文を発表するに至った。前述のとおり、オーストラリア・英国拠点、日本拠点の慶應と共同で米国 Intel 社とのシリコン量子コンピュータ開発の議論を始めている。

オーストラリア拠点：

オーストラリア拠点ニューサウスウェールズ大学とは、R-2 プログラムのシリコン量子コンピュータ開発に関して、慶應拠点が開発した特別な同位体シリコン基板に基づく現実的な量子コンピュータチップ開発に共同で取り組み、全期間を通じて 6 編の Core-to-Core 謝辞ありの共著論文を発表した。前述のとおり、カナダ・英国拠点、日本拠点の慶應と共同で米国 Intel 社とのシリコン量子コンピュータ開発の議論を始めている。

スイス拠点：

スイス拠点 ETH とは、R-3 プログラムのダイヤモンド量子センシングに関して、慶應拠点と産総研が共同で開発した特別な同位体ダイヤモンド基板に基づくダイヤモンド量子センシング手法開発に共同で取り組み、期間を通じて 4 編の Core-to-Core 謝辞ありの共著論文を発表した。

H25 年度 ETH 拠点の Andreas Wallraff 教授の博士課程学生である Simon Berger が慶應拠点到滞し、R-4 プログラムに関するシリコン上の超伝導量子ビットに関する新しい知見を得る事に成功し、Core-to-Core プログラムの共著成果論文を発表した。

H28 年度には慶應拠点の博士課程大学院生が ETH 拠点代表 Degen 教授研究室に 2 ヶ月弱滞り、ダイヤモンド量子センシングに関する新しい手法を共同開発することに成功し、Core-to-Core プログラムの共著論文を発表した。

また、H27 年度の間地点では、本 Core-to-Core の二つの主題「シリコン量子コンピューティング」と「ダイヤモンド量子センシング」に関する大規模な国際会議それぞれ二つを香川県高松市の国際会議場で開催した。

2015 年 8 月 3~4 日に開催された Silicon Quantum Electronics Workshop には 131 名

が参加した。この内、外国からの参加者は 95 名で、本 Core-to-Core のコアメンバーがドイツ、英国、米国、カナダ、スイス、オーストラリアの全外国拠点から多数参加した。拠点代表も英国、カナダ、オーストラリアから出席した。2 日間で口頭発表 36 件（内、15 件が本 Core-to-Core 関連）、ポスター発表 51 件（内、6 件が本 Core-to-Core 関連）が実施された。本 Core-to-Core 成果の広報という観点から当該領域でのトップ研究者を世界中から集め、彼らの発表と本 Core-to-Core 発表を織り交ぜることに成功した。日本で開催されたワークショップにおいて、我が国からの参加者の倍の参加者が海外から集まったことが、本研究領域に対する世界レベルでの注目度の高さと、本 Core-to-Core 事業を中心とする日本の成果が高く評価されていることを表している。本ワークショップは JSPS Core-to-Core の主催であったが、海外からの参加者 95 名はすべて自費による参加で、参加費も各参加者が支払ったことを付記しておく。すなわち、すべてのチームメンバーが、国で得た研究費を利用して参加し、また、Core-to-Core に関係していない研究者も自らの意志と財源でわざわざ高松まで飛んできた。

2015 年 8 月 5～7 日に開催された R-3 プログラムに関する Diamond Quantum Sensing Workshop には 103 名が参加した。この内、外国からの参加者は 33 名で、本 Core-to-Core のコアメンバーがドイツ、米国、スイス、オーストラリアから参加した。参加者にはスイス拠点代表が含まれる。3 日間で口頭発表 25 件（内、12 件が本 Core-to-Core 成果）、ポスター発表 40 件（内、12 件が本 Core-to-Core 成果）が実施された。ここでも本 Core-to-Core 成果の広報という観点から、当該領域でのトップ研究者を世界中から集め、彼らの発表と、本 Core-to-Core 発表を織り交ぜることに成功した。本ワークショップは藤原科学財団がメインスポンサー（主催）、JSPS Core-to-Core の共催であったため、海外からの参加者の現地経費（宿泊費、食事、エクスカージョン等）はすべて藤原科学財団が支払ったが、海外からの参加者全員が日本までの旅費を自費で支払ったことを付記しておく。慶應と産総研からの発表を R-3 プログラム関連の中間報告会として位置付けた本ワークショップに、我が国のみならず海外から多くの参加者が訪れたことは、学会に成果を広めるという点に加えて、交流を深めるという点において大きな成功をおさめた。

最終年度に当たる H29 年度は、「シリコン量子コンピュータ」の会議が米国 Portland、「ダイヤモンド量子センシング」の会議が香港で開催され、それぞれにおいて本拠点メンバーが集まり招待講演や一般講演を行った。

③ 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）

英語対応可能な事務員を雇用し、国際ワークショップ主催から、各国拠点間の事務連絡と円滑で強固なネットワーク体制の確立（含む訪問者のビザ申請補助など）に努めた。

また、Core-to-Core 予算の執行と、支出ルール遵守も含めた管理は、本学理工学部学術研究支援センター事務員が課長の責任のもとで執行した。

(2) 学術面の成果

R-1 プログラム: 同位体シリコン・ゲルマニウム・グラフェン・ナノチューブに基づく量子情報処理

(ミュンヘン工科大学・UCL・ニューサウスウェールズ大学・東京都市大・慶應スピ研の協調)

H25 年度：慶應に 4 月から 8 月まで滞在したミュンヘン工科大学の大学院生 David Franke と慶應・伊藤グループがシリコン中の光誘起スピン三重項欠陥の量子情報応用に関する研究を実施し、固体物理学分野の世界トップ誌である Physical Review B に共著論文を投稿した。また、慶應のチームメンバー大塚学（代表者・伊藤の修士課程学生）が、シリコン酸化膜とシリコン界面の新しいスピン欠陥を発見し、応用物理分野世界トップの Applied Physics Letters 誌に論文を発表した。これは本 JSPS Core-to-Core の成果論文第一号であるが、海外拠点の共著者は含まれていない。しかし、この論文の成果がドイツ拠点から注目を集め、その結果として大塚が 11 月から 12 月にかけてミュンヘン工科大学 Martin Brandt 教授のグループに滞在することになった。そこでは、シリコン中のヒ素ドナーを利用した量子情報処理に関する共同研究を実施し、ミュンヘンと慶應で Core-to-Core 共著論文発表につなげた。また、2014 年 1~2 月に慶應のチームメンバーで博士課程学生の Pierre-Andre Mortemousque が UCL・John Morton 教授の研究室に滞在し、シリコン中のリンドナーを量子プロセッサとし、その計算結果を周辺の ^{29}Si 核スピンメモリに蓄える研究に取り組んだ。

H26 年度：シリコン中のスピン三重項準位の利用を進め、同位体シリコンに基づく量子情報処理に関する成果をあげ、Physical Review Letter 誌 2 通、Applied Physics Letters 誌 2 通の共著論文を発表する成果をあげた。また、ドイツ側拠点の研究協力者であるニューサウスウェールズ大学と慶應の協調を強め、同位体シリコン中の単一リンドナーまたは同位体シリコン中の単一量子ドットを量子ビットとして量子計算を実行する研究に取り組み、Nature Nanotechnology 誌に 2 通の共著論文を発表するなど大きな成果を得た。

また、世界最大の材料科学学会である、米 Materials Research Society の最新学術誌 MRS Communications からの依頼で、代表者の伊藤公平と分担者の渡邊幸志が二人で”Isotope Engineering of Silicon and Diamond for Quantum Computing and Quantum Sensing”と題した解説論文を発表した。

H27 年度：シリコン中の四重極子相互作用の利用による量子情報処理に関する成果をあげ Physical Review Letter 誌に 1 通の共著論文を発表した。UCL との連携ではシリコン中の ^{29}Si 核スピンを量子ビットとして用いる新しい手法を実験的に示し、その成果を New Journal Physics 誌に発表した。また、ニューサウスウェールズ大学と慶應の協調を特に強め、同位体シリコン中の単一リンドナーまたは同位体シリコン中の単一量子ドットを量子ビットとして量子計算を実行する研究に取り組み、Nature 誌 1 通、Nature Nanotechnology 誌 1 通、Science Advances 誌 1 通、Physical Review B 誌 1 通の共著論文を発表するなど大きな成果を得た。

H28年度：7月にブリストル大学を慶應メンバー4名が訪れ、生物模倣プロセスを用いた超電導材料開発に関するワークショップを開催し、固体素子で生命現象や信号処理を実施する方法に関して複数の共同研究の方向性を生み出した。10月にはミュンヘン工科大学にてシリコン量子コンピューターセミナーを開催し、電子スピン量子ビットの量子制御方法に関して意見交換を行った。特にシリコン中の四重極子相互作用量子情報処理に利用する手法を調べ、Physical Review Letter 誌1通、Nanotechnology 誌1通の共著論文をミュンヘン工科大学と発表する成果をあげた。集積型シリコン量子コンピューティングに関する研究に関しては、同位体シリコン中の単一量子ビット量子計算を実行する研究に取り組み、サウスウェールズ大学と共に Nature Nanotechnology 誌1通、Physical Review B 誌1通の論文を発表するなどの成果を得た。また、²⁹Si 核スピン量子コンピューティングに関して英国拠点 UCL とともに Physical Review B 誌1通を発表した。

H29年度：研究代表者の伊藤公平がシリコン量子コンピュータに関する成果で Nature Technology 誌に Core-to-Core 論文、ドイツ拠点ミュンヘン工科大学との電子スピン共鳴に関する共同研究で Physical Review X 誌に Core-to-Core 共著論文、安藤和也准教授がスピン流デバイス物理学で Science Advances 誌に Core-to-Core 論文、阿部英介特任准教授が量子情報関連で Applied Physics Letters 誌と Journal of Applied Physics 誌、応用物理誌に伊藤公平で Core-to-Core 論文を発表するなど世界的に高く評価される成果を出した。

R-2 プログラム： ナノ構造による磁気光学素子の開発

(スタンフォード大-サイモンフレーザー大-慶應スピン研の協調)

H25年度：米国拠点スタンフォード大でキックオフセミナーを実施し、また、プリンストン大学とシリコン量子コンピュータ開発に関する共同研究計画を策定した。

H26年度：スタンフォード大学においてコアシェル型のナノワイヤーの作製に取り組み、その量子準位の光学評価を慶應とサイモンフレーザー大学が実施することにより、磁気光学材料の開発につながる光学特性の探求を行った。また、慶應拠点が中心となり、シリコン量子コンピューティングに不可欠な、シリコン中のリンドナー核スピン共鳴に対する同位体効果の解明を行い、サイモンフレーザー大学、プリンストン大学、UCL メンバーとともに Core-to-Core 共著論文を Physical Review B 誌に発表した。

H27年度：スタンフォード大-サイモンフレーザー大-慶應スピン研の協調では、スタンフォード大学において 2015年10月に慶應メンバーが4名訪れてセミナーを開催した。プリンストン大学と共同でゲルマニウム同位体における電子スピンコヒーレンスの測定に成功し、量子コンピュータ開発応用の可能性に関する議論も含めて、Physical Review Letters 誌に共著論文を発表した。

H28年度：スタンフォード大-サイモンフレーザー大-慶應スピン研の協調では、ゲルマニウム同位体の量子コンピュータ応用を進めて Physical Review B 誌に Core-to-Core 共著論文1通を発表した。また、シリコン中のリンドナーの量子コヒーレンスに関する重要な知見を得ることに成功し、量子コンピュータ応用を議論する論文を、サイモンフレーザー大

学、UCL との共著 Core-to-Core 論文として Physical Review B 誌に発表した。

H29 年度：研究代表者の伊藤公平がカナダ拠点サイモンフレイザー大学、米国プリンストン大学とともにシリコン量子コンピュータに関する成果を Physical Review X 誌に Core-to-Core 共著論文として発表した。神原陽一准教授が強相関スピントロニクス of 成果を発表し、能崎幸雄教授が高周波スピントロニクスデバイス関連の成果で Physical Review Letters 誌、Physical Review B 誌、Applied Physics Letters 誌に Core-to-Core 論文発表、牧英之准教授がグラフェンスピントロニクスで Nature Communications 誌に Core-to-Core 論文を発表するなど世界的に高く評価される成果を出した。

R-3 プログラム：同位体ダイヤモンドナノプローブによる単一分子 NMR イメージングの実現

(スイス連邦工科大学 (ETH)、慶應スピン研、産総研の協調)

H25 年度：慶應スピン研、ETH、産総研の共著論文をナノ分野トップの Nano Letters 誌に発表した。これは 2nm の薄さのダイヤモンド薄膜の中に量子センサーを埋め込むことに成功した実験例で、このセンサーを用いてわずか 6000 個のプロトン核スピン磁気共鳴を検知することに室温で成功した。6000 個はこれまでに報告された最少個数のプロトン NMR である。また、同じ量子センサーを用いてダイヤモンド表面の電子スピン欠陥を検知することに成功し、Core-to-Core 共著論文を Physical Review Letters 誌に発表した。

H26 年度：ETH-産総研-慶應スピン研の協調にドイツ Ulm 大学も新たに参加し、産総研が同位体ダイヤモンド成長を実施し、それらの試料の基礎評価を慶應で実施し、その結果として選別された試料を ETH および Ulm 大学に送り、ETH が磁気共鳴、Ulm 大学が少数核スピン磁気共鳴の研究に取り組んだ。その結果、Physical Review Letters 誌に 2 通の Core-to-Core 共著論文を発表する。

また、世界最大の材料科学学会である、米 Materials Research Society の最新学術誌 MRS Communications からの依頼で、代表者の伊藤公平と分担者の渡邊幸志が二人で”Isotope Engineering of Silicon and Diamond for Quantum Computing and Quantum Sensing”と題した解説論文を発表した。

H27 年度：共著論文の発表はなかったが、前年度に引き続き、産総研が同位体ダイヤモンド成長を実施し、それらの試料の基礎評価を慶應で実施し、その結果として選別された試料を ETH および Ulm 大学に送り、ETH が磁気共鳴、Ulm 大学が少数核スピン磁気共鳴の研究に取り組んだ。

H28 年度：7 月に慶應メンバーが ETH と Ulm 大学を訪れ、ダイヤモンド量子センシングを用いて単一核スピンを検知するという目標に向けた共同研究を実施した。また平成 29 年 2 月には 2 ヶ月弱、慶應の学生が ETH に滞在し、ダイヤモンド量子センシングに関する新しい手法を開発し、Core-to-Core 共著論文を Physical Review Letters 誌に発表した。

H29 年度：研究代表者の伊藤公平と早瀬潤子准教授が量子センシングに関する共同研究をスイス拠点の ETH と続行し、ダイヤモンド量子センシングに関する新しい手法の発見をスイス拠点・慶應拠点 Core-to-Core 共著論文として Physical Review Letters 誌に発表し

た。

R-4 プログラム：同位体シリコン基板上での超伝導量子情報処理と量子制御

(スイス連邦工科大学 (ETH)、慶應スピノ研、東大の協調)

H25 年度：ETH チームメンバーの Andreas Wallraff 教授の博士課程学生である Simon Berger が 2012 年 12 月から 2013 年 5 月まで慶應スピノ研に滞在し、慶應の大学院生である Pierre-Andre Moretemousque と共同研究を実施した結果、シリコン上の超伝導量子ビットとの結合に適したシリコン中のビスマスドナー量子メモリの動作原理に関する新しい知見を得る事に成功し、Core-to-Core 共著論文を Physical Review B 誌に発表した。

H26~H28 年度：東大が超伝導量子情報処理用の素子と構想を作製し、その実行方法の確立を ETH、MIT らと協調して進めた。

H29 年度：MIT と協力のもと、米国 IBM 社との超伝導量子コンピューティングネットワークのハブ (拠点) に本 Core-to-Core 拠点が選ばれた。

(3) 若手研究者育成

H25 年度：多くの博士・修士課程学生が国境を越えた拠点間の橋渡しを行った。本 Core-to-Core プログラムの成功は、柔軟な思考力・発想力を有する若手研究者が国境を越えて循環し、世界レベルでの多様性をもって研究討論することにかかっている。そのような環境を整えることに 1 年目の平成 25 年度は注力し、その目的を達成した。また、各拠点のコーディネーター教員が国境を超えて他拠点に赴きセミナーを開催することにより、若手研究者の啓蒙に努めた。

H26 年度：慶應の博士課程学生 1 名がプログラム R-1 に関わりイギリス UCL における共同研究に参加、修士課程学生 1 名が R-2 プログラムに関してカナダ NISR に共同研究で訪問、修士課程学生 2 名と博士課程の学生 1 名が R-3 プログラムに関する共同研究で ETH や Ulm 大学に滞在、東大の若手研究員が R-4 プログラムに関して Yale 大学と MIT にて共同研究を実施した。また、ミュンヘン工科大学・慶應義塾大学ダブルディグリープログラム (修士課程を両校で学ぶことによりそれぞれの大学から修士号が取得できる協定プログラム) を通して、ドイツ拠点から 1 名の学生が慶應に移動した。さらに上記ダブルディグリープログラムによりドイツから慶應に滞在した 1 名の学生が修了し、本 JSPS Core-to-Core プロジェクトのテーマでの修士論文が両大学で審査され共同指導の成果となった。また、プログラム横断的なセミナー・スクールを英語を用いて随時開催し、そのビデオ (http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/) に公開した。

H27 年度：8 月に高松で開催した Silicon Quantum Electronics Workshop には、世界中から若手研究者・学生が 50 名ほど参加し、最先端研究と交流を通じた若手育成を行った。Diamond Quantum Sensing Workshop には若手研究者・学生が 35 名参加し、世界中から集まった超一流の研究者との議論を通して大きく成長した。また、アーヘン工科大学・慶應義塾大学ダブルディグリープログラム (修士課程を両校で学ぶことによりそれぞれの大学

から修士号が取得できる協定プログラム)を通して、ドイツより1名の学生が慶應に移動し、2014年度より慶應で活躍しているミュンヘン工科大学からのダブルディグリー生1名とともに本Core-to-Coreプロジェクトを強力に推進した。プログラム横断的なセミナー・スクールを英語により開催し、そのビデオ

(http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/)の公開を続行した。

H28年度：中間評価で指摘された学生の海外拠点長期滞在共同研究に関しては、博士課程に進学する慶應義塾大学大学院修士過程2年生の大学院生がETHに約1ヶ月半滞在し、ダイヤモンドプロトンNMRイメージングに関する新手法開発といった共同研究成果をあげた。6月にはMIT・Lloyd教授、University of Southern California・高橋教授、7月にRice大学・河野教授、平成29年1月にHarvard大学・Loncar教授を慶應に迎えて、慶應拠点の学生および若手研究者を特に意識したセミナーを開催した。また、7月にイギリス・ブリストル大学にて日本からの若手研究者も参加するJSPS Core-to-Coreセミナーを開催して国際舞台における研究活動の実態を体験した。ミュンヘン工科大学・慶應義塾大学ダブルディグリープログラム(修士課程を両校で学ぶことによりそれぞれの大学から修士号が取得できる協定プログラム)を通じたドイツ拠点から学生1名の慶應滞在を続行した。プログラム横断的なセミナー・スクールを英語により開催し、そのビデオ(http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/)の公開を続行した。

H29年度：国際会議発表28件のうち、25件が40歳以下の若手研究者および大学院生が筆頭著者の口頭・ポスター発表である。このことは、本拠点が常に若手の育成を意識し、すべての研究分野において学生を中心とした若手を育て次世代につなげることを目指している証の一つだと考えている。また、H29年度の交流実績38件(うち国外26件)のうち、24件が学生、5件が40歳以下の若手研究者によるものである。

また、中間評価において、若手の1ヶ月以上の海外派遣例の欠如が指摘された。このことをうけ、H28年度であるが、研究代表者・伊藤公平の大学院生・佐々木健人君がR-3プログラムのスイス拠点ETHのスイス拠点代表Degen教授の研究室に滞在することが実現した。ここで大いなる刺激を受けた佐々木君は後期博士課程進学を決意し、また、ETHで行った共同研究に基づきPhysical Review Letters誌にETH-慶應の共著論文を発表する成果を得た。また、この出張で築かれたETH学生との交流をもとに、佐々木君は、ダイヤモンド量子センシングの概念を覆す画期的なセンシング方法を開発し、本報告書作成時点では、その論文の執筆を急いでいる。

(4) 国際研究交流拠点の構築

全期間中に学術雑誌等に発表した55本の論文を発表し、そのうちの31本が相手国参加研究者との共著Core-to-Core成果論文である。成果欄に示すとおり論文の発表先は厳選されたインパクトの高い学術誌のみである。また、全期間中の国際会議における発表120件のうち、相手国参加研究者との共同発表は28件に上る。

研究機関を通じて、ドイツ拠点のミュンヘン工科大学からの大学院生らが滞在していたため、日常の拠点内セミナーのほとんどが英語で実施され、今もそうなっている。

Core-to-Core 終了時には、米国 Intel 社と Core-to-Core チームでの共同開発議論が進行中で、米国 IBM 社が量子コンピューティングのハブ（拠点）として本 Core-to-Core 拠点の慶應義塾を指名した。世界の大学で IBM 量子コンピュータが活用できるのが、MIT、慶應、メルボルン大学、Oxford 大学の 4 校のみで、この 4 校はすべて、本 Core-to-Core に関わってきた。国際交流拠点としてしっかりと確立された。

（５）社会貢献や独自の目的等

発足当初から、本プロジェクトのホームページ

（http://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/spintronics/）および慶應 YouTube Channel（<https://www.youtube.com/playlist?list=PL14EFFC888B1C0CDB>）において、メンバーが実施した基礎講義、各種セミナー講演の動画（ビデオ）を日英両言語で掲載し広く世界から視聴されている。このことが不特定多数の若手育成と最新成果の発信に大きく寄与している。

H26 には、日本のスピントロニクス分野の研究者コミュニティの代表として、東大・東北大・阪大・慶大が「スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク (Spintronics Research Network of Japan, Spin-RNJ)」拠点形成計画を構築し、「学術研究の大型プロジェクトロードマップ 2014」に掲載された。ロードマップ掲載を受けて、東大・東北大・阪大はそれぞれ「スピントロニクス連携研究教育センター」を 2016 年度に設置したが、慶應義塾には本 Core-to-Core 拠点としてのスピントロニクス研究センターがすでに存在したことが、ロードマップ審査において高く評価された。

同じく H26 年度、世界最大で、物理学会として最も影響力がある American Physical Society (APS: 米国物理学会) から選ばれ、慶應義塾スピントロニクス研究センター (Core-to-Core 事業主体) のビデオが作製され、先の米国物理学会年会にて大々的かつ継続的に放映された。また、APS-TV のウェブサイト

（http://www.websedge.com/videos/aps_tv_2015/#/a_new_kind_of_qubit）と APS YouTube チャンネル

（https://www.youtube.com/watch?v=u0PdFJ_JF5k&index=56&list=PLGve6BxyFHNVCEd-X1a_mv0pVRuI4Z43z）にて上述のビデオが常時観られるように設定された。このビデオに出演したのが Core-to-Core 事業のコアメンバー 4 名である。

H28 年度には、研究代表者・伊藤公平が新たに発足した JST さきがけ研究「量子機能領域」の領域総括に就任した。これは本 Core-to-Core により先端拠点活動が認められた成果である。また、H30 年度に発足する文部科学省 Q-Leap プログラムの量子シュミレーター・コンピューター分野の PD（プログラムディレクター）にも伊藤が就任した。伊藤は日本学術会議の連携会員として物性物理・一般物理学分科会幹事、応用物理と未来社会分科会幹事を務めるなど、日本における量子情報処理分野全般の発展や、さらに広くは、物理学・応用物理学の発展に寄与すべく努力している。

最近の文科省・科学技術・学術政策研究所の調査では、慶應義塾全体におけるコア論文発表分野第5位、理工学部分野1位（スピントロニクス量子コンピュータ）と全体で第10位、理工学部分野3位（スピントロニクス）がスピントロニクス研究センターのプロジェクトである。コア論文とは、トップ10%論文に引用される「タネ論文」を指す。サッカーで例えれば重要なゴールのアシスト数で、最近特に注目されている指標である。ちなみに全学の1~4位は医学系の成果である。

独自の目的は、国際的産学共同拠点を目指したこと、世界から評価される最先端研究拠点として世界最先端の企業と組むことである。シリコン量子コンピュータで米Intel社と議論を継続し、量子コンピュータ用ソフトウェア開発で米IBM社と提携することでガラパゴス化を避け、地球レベルでの産学連携のモデルケースを提示している。

（6） 予期しなかった成果

米Intel社との協働の可能性が生まれたこと、および、米IBM社との量子コンピュータネットワークハブに選ばれるなど、米有力企業との直接やりとりによる国際的共同研究への発展。

（7） 今後の課題・問題点及び展望

研究代表者・伊藤公平が中心に進めてきたスピントロニクス拠点形成であるが、H29年4月に伊藤が理工学部長・研究科委員長に就任したことにより校務が増える中で、田邊孝純准教授、安藤和也准教授、神原陽一准教授、能崎幸雄教授、牧英之准教授、早瀬潤子准教授、渡邊紳一准教授といった45歳以下の研究者らが中心となり、世代交代を図りながら常に世界最先端を切り拓き、刷新を求める研究体制の継続に努めてきた。本Core-to-Coreが米IBMとの協働と、現在も続く米Intelとの交渉に発展したが、このことは世界レベルでの契約履行や知財管理が求められるということで、その整備を大学として進める必要がある。また世界で学び・研鑽を積んだ研究者をより多く集めることも世界の企業や学術機関との協調では重要となる。そのあたりの整備を効率的に進める必要がある。

（8） 本研究交流事業により全期間中に発表された論文等

- | | |
|--------------------------|------|
| ①全期間中に学術雑誌等に発表した論文・著書 | 55本 |
| うち、相手国参加研究者との共著 | 31本 |
| ②全期間中の国際会議における発表 | 120件 |
| うち、相手国参加研究者との共同発表 | 28件 |
| ③全期間中の国内発表・シンポジウム等における発表 | 16件 |
| うち、相手国参加研究者との共同発表 | 1件 |

（※ 「本事業名が明記されているもの」を計上・記入してください。）

（※ 詳細は別紙「論文リスト」に記入してください。）

7. 平成29年度及び全期間にわたる研究交流実績状況

7-1 共同研究

整理番号	R-1	研究開始年度	平成25年度	研究終了年度	平成29年度
研究課題名	<p>(和文) 同位体シリコン・ゲルマニウム・グラフェン・ナノチューブに基づく量子情報処理</p> <p>(英文) Quantum information processing based on isotopically controlled silicon, germanium, graphene, and carbon nanotubes</p>				
日本側代表者 氏名・所属・職	<p>(和文) 伊藤公平・慶應義塾大学理工学部・教授</p> <p>(英文) Kohei Itoh・Keio University Faculty of Science and Technology・Professor</p>				
相手国側代表者 氏名・所属・職	<p>(英文) Martin Brandt・Technical University of Munich・Professor John Morton・University College London・Royal Society University Research Fellow and Reader Andrew Dzurak・University of New South Wales・Professor</p>				
29年度の研究 交流活動及び得 られた成果	<p>6月に慶應の教員と学生がミュンヘン工科大学にてジョイントセミナーを行った。11月には慶應の教員と学生がブリストル大学にて共同研究およびセミナーを行った。8月には松江にて国際会議を代表者の伊藤が議長として開催し、Core-to-CoreのR-1とR-2の成果を広く発表した。交流リストに記載した38件の本事業交流活動のうち、27件がR-1研究(内、4件がR-2と重複)に関するものであった。</p> <p>ミュンヘン工科大学(R-1)-ユニバーシティーカレッジロンドン(R-1)-ニューサウスウェールズ大(R-1)-サイモンフレーザー大(R-2)-慶應スピ研の協調では、世界トップを走ってきた我々のシリコン量子コンピュータ研究が、半導体業界の巨人・米国Intel社に認められた。2017年8月に本Core-to-Coreチームがオレゴン州ポートランドのIntel先端研究本部を訪れ、シリコン量子コンピュータ技術と今後に関する意見交換を行い、それを国際的産学共同研究につなげる議論を継続している。スピン流研究においてはミュンヘン工科大学との共同を続け、シリコン中のドナー量子ビットに関する研究を続けた。イギリスとの交流においてはシリコン中の核スピン量子ビットと強相関スピントロニクス研究に注力した。</p>				

<p>全期間にわたる 研究交流活動及 び得られた成果 の概要</p>	<p>交流活動</p> <p>H25</p> <p>ミュンヘン工科大学の David Frenke が、4月から4ヶ月間慶應に滞在し共同研究を実施した。また、ミュンヘン工科大学からダブルディグリー生（修士課程学生）が慶應に1名、慶應からのダブルディグリー生としてミュンヘン工科大学に滞在した慶應修士課程学生1名らが中心となり、若手研究者を中心としたチーム編成で共同研究をスタートした。さらにミュンヘン工科大学の教員2名が5月に慶應に滞在して共同研究を実施し、慶應からは、教員4名が12月にミュンヘン工科大学を訪ねてセミナーと共同研究を実施した。イギリスとの交流では、8月に慶應の大学院生1名がYork大学にて、超高品質スピントロニクス磁性薄膜の成膜および透過型電子線顕微鏡による観察の共同実験を行った。また他資金で慶應の大学院生が2013年11月から2ヶ月間ミュンヘン工科大学、2014年1月から2ヶ月間UCLに滞在して共同研究を実施した。またビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。</p> <p>H26</p> <p>2013年4月から滞在しているミュンヘン工科大学からの大学院生との共同研究を引き続いて実施し、2014年9月からもミュンヘン工科大学から大学院生を1名受け入れた。7月に慶應のメンバーが英国UCLにて共同研究を実施、7月に慶應のメンバーが米国で開催された国際会議で英国メンバーと共同研究の打合せを実施、11月に慶應の別のメンバーがミュンヘン工科大学を訪ねてセミナーと共同研究を実施、1月に慶應のメンバーがドイツの協力研究者であるメルボルン大学とニューサウスウェールズ大学で共同研究とセミナーを実施した。またビデオ会議を毎月のペースで実施して研究交流を深めた。</p> <p>H27</p> <p>量子情報処理研究に関する実験のために、2014年9月からミュンヘン工科大学の大学院生1名を1年度間通じて受け入れた。また、8月にはドイツ、英国、オーストラリア拠点の主要メンバーが香川県高松市に一同に会し、Core-to-Core 国際会議を主催したことから、当該プロジェクトの中間的成果の発信と、後半部分の発展にむけた共同研究計画を綿密に練った。R-1に関して具体的には、慶應のシリコン試料をミュンヘン工科大学に提供することで、シリコン中のドナー量子ビットに対する四重極子相互作用を明らかにする実験をミュンヘン工科大学で実施することを決めた。これは Physical Review Letters 誌に発表した成果に続</p>
--	--

く実験実施に相当する。その結果として得られた成果を共著論文としてまとめる作業を、電子メールの往信と、テレビ電話会議を重ねて実施した。この作業を通じて完成させた論文は、ミュンヘン・慶應共同研究の論文1通として年度末に投稿し、さらに1通の執筆準備を開始した。

H28

昨年度から慶應に滞在しているミュンヘン工科大学の学生との共同研究を継続して行った。6月にはオランダ・デルフトにおけるシリコン量子情報の国際会議に拠点メンバーが集まり、シリコン量子コンピュータ開発に関する共同研究打ち合わせを実施した。8月にはドイツ拠点リーダーが主催する国際会議が米国で開催され、そこに慶應教員が参加して、共同研究の打ち合わせを行った。その後、10月にも慶應の教員がミュンヘン工科大学でセミナーと共同研究、ベルリンの Paul-Drude-Institute で共同研究打ち合わせを行った。

H29

6月に慶應の教員と学生がミュンヘン工科大学にてジョイントセミナーを行った。11月には慶應の教員と学生がブリストル大学にて共同研究およびセミナーを行った。8月には松江にて国際会議を代表者の伊藤が議長として開催し、Core-to-Core の R-1 と R-2 の成果を広く発表した。交流リストに記載した38件の本事業交流活動のうち、27件が R-1 研究（内、4件が R-2 と重複）に関するものであった。

得られた成果

H25

慶應に4月から8月まで滞在したミュンヘン工科大学の大学院生 David Franke と慶應・伊藤グループがシリコン中の光誘起スピン三重項欠陥の量子情報応用に関する研究を実施し、固体物理学分野の世界トップ誌である Physical Review B に共著論文を投稿した。また、慶應のチームメンバー大塚学（代表者・伊藤の修士課程学生）が、シリコン酸化膜とシリコン界面の新しいスピン欠陥を発見し、応用物理分野世界トップの Applied Physics Letters 誌に論文を発表した。これは本 JSPS Core-to-Core の成果論文第一号であるが、海外拠点の共著者は含まれていない。しかし、この論文の成果がドイツ拠点から注目を集め、その結果として大塚が11月から12月にかけてミュンヘン工科大学 Martin Brandt 教授のグループに滞在することになった。そこでは、シリコン中のヒ素ドナーを利用した量子情報処理に関する共同研究を実施し、現

在は、ミュンヘンと慶應で共著論文を準備中である。

H26

7編の共著論文をインパクトの高い学会誌（Nature Nanotechnology 誌 2報、Physical Review B 誌 2報、Applied Physics Letters 誌 1報、Journal of Physics 誌 1報）に発表した。その内容はシリコン同位体量子情報処理の関わるもので、同位体スピントロニクスの世界コンソーシアムとして高い認知度を得て、MRS Communications 誌（材料科学分野での世界最大の学会）からの依頼で招待解説論文も発表した。

H27

ミュンヘン工科大学-UCL-東京都市大-慶應スピン研の協調では、ミュンヘン工科大学との連携でシリコン中の四重極子相互作用の利用による量子情報処理に関する成果をあげ Physical Review Letter 誌に1通の共著論文を発表する成果をあげた。UCL との連携でシリコン中の ^{29}Si 核スピンを量子ビットとして用いる新しい手法を実験的に示し、その成果を New Journal Physics 誌に発表した。また、ニューサウスウェールズ大学と慶應の協調を特に強め、同位体シリコン中の単一リンドナーまたは同位体シリコン中の単一量子ドットを量子ビットとして量子計算を実行する研究に取り組み、Nature 誌 1通、Nature Nanotechnology 誌 1通、Science Advances 誌 1通、Physical Review B 誌 1通の共著論文を発表するなど大きな成果を得た。

また、R-1 と R-2 の成果をもとに 9th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures（5月カナダ・モントリオール）、11th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications（6月カナダ・バンクーバー）、SpinTech VIII(8th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology)（8月スイス・バーゼル）において招待講演を行った。

H28

昨年度に引き続き、ミュンヘン工科大学とはスピン流およびシリコン中のドナーにおける四重極子相互作用の解明等に注力した。イギリスとの交流においてはシリコン中のドナーに対する電界の効果の解明に注力した。また、オーストラリアとの強力な研究体制をさらに高め、昨年度同様に多数の拠点間共著論文を Physical Review 誌、Nature 系の学術誌などに発表することを目指した。結果ドイツと 2通、オーストラリア

と 2 通、英国と 1 通の共著論文を発表した。また国際会議における招待講演で本 Core-to-Core プログラムの成果を広く発信した。

H29

ミュンヘン工科大学(R-1)-ユニバーシティーカレッジロンドン(R-1)-ニューサウスウェールズ大(R-1)-サイモンフレーザー大(R-2)-慶應スピンの協調では、世界トップを走ってきた我々のシリコン量子コンピュータ研究が、半導体業界の巨人・米国 Intel 社に認められた。2017 年 8 月に本 Core-to-Core チームがオレゴン州ポートランドの Intel 先端研究本部を訪れ、シリコン量子コンピュータ技術と今後に関する意見交換を行い、それを国際的産学共同研究につなげる議論を継続している。スピン流研究においてはミュンヘン工科大学との共同を続け、シリコン中のドナー量子ビットに関する研究を続けた。イギリスとの交流においてはシリコン中の核スピン量子ビットと強相関スピントロニクス研究に注力した。

整理番号	R-2	研究開始年度	平成25年度	研究終了年度	平成29年度
研究課題名	(和文) 同位体ナノ構造による磁気光学素子の開発				
	(英文) Magneto-optics device based on isotope nanostructures				
日本側代表者 氏名・所属・職	(和文) 伊藤公平・慶應義塾大学理工学部・教授				
	(英文) Kohei Itoh・Keio University Faculty of Science and Technology・Professor				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) Paul McIntyre・Stanford University・Professor Mike Thewalt・Simon Fraser University・Professor				
29年度の研究 交流活動及び得 られた成果	<p>8月には松江にて国際会議を代表者の伊藤が議長として開催し、Core-to-CoreのR-1とR-2の成果を広く発表した。また米国拠点（スタンフォード大学）およびカナダ拠点（サイモンフレーザー大学）との共同研究を続行した。</p> <p>交流リストに記載した38件の本事業交流活動のうち、7件がR-1研究（内、4件がR-1と重複）に関するものであった。</p> <p>スタンフォード大学においてゲルマニウム同位体ナノワイヤーの作製と評価を続行し、ライス大学とはグラフェンスピントロニクスに関する議論を深めた。</p> <p>ミュンヘン工科大学(R-1)-ユニバーシティーカレッジロンドン(R-1)-ニューサウスウェールズ大(R-1)-サイモンフレーザー大(R-2)-慶應スピ研の協調では、世界トップを走ってきた我々のシリコン量子コンピュータ研究が、半導体業界の巨人・米国Intel社に認められた。2017年8月に本Core-to-Coreチームがオレゴン州ポートランドのIntel先端研究本部を訪れ、シリコン量子コンピュータ技術と今後に関する意見交換を行い、それを国際的産学共同研究につなげる議論を継続している。</p>				
全期間にわたる 研究交流活動及 び得られた成果 の概要	<p>交流活動</p> <p>H25</p> <p>スタンフォード大学では慶應の大学院生2名が技術打合せおよび共同研究を実施した。また、ヒューレットパッカードでは慶應の大学院生1名が、カナダのNational Institute of Scientific Researchでは慶應の教員1名と大学院生1名が計測システム開発に関する共同研究を実施した。またビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。</p> <p>H26</p> <p>6月に慶應のメンバーが共同研究でStanford大に滞在、7月に慶應の別のメンバーが米国での国際会議にて米国メンバーと共同研究の打合せを行いさらにStanford大を共同研究のために訪問、8月に慶應のメンバー</p>				

が米国での国際会議にてカナダメンバーとの共同研究に関する打合せを実施、8月に別の国際会議にてカナダおよび米国メンバーとの共同研究に関する打合せ、9月に慶應メンバーがカナダ NISR にて共同研究を実施した。またビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。

H27

年度開始早々から、Core-to-Core 共著発表論文をまとめるためのメール往信・テレビ電話会議を慶應と海外で実施した。具体的にはシリコン中の中性 ^{29}Si 核スピン量子ビットのデコヒーレンスに関する成果の論文執筆をプリンストン大学、 ^{29}Si 核スピンを量子ビットと利用する工夫を UCL と相手を定め、論文をまとめる作業を遠隔で行い、それぞれ 2 通の論文として夏までに投稿し、年度内に掲載されるという目標を達成した。一方、拠点（海外）機関のメンバーが共同研究のために海外（拠点）機関に滞在することはなかった。しかし、一昨年まで慶應メンバーであった Pierre-Andre Mortemousque が一昨年慶應で学位取得した後にフランス研究機関にポスドクとして就職し、その彼 1 名が英国拠点 UCL に共同研究を目的として昨年度始めに 3 週間滞在し、データ取得を重ねた。本研究は Mortemousque 博士が慶應メンバーとして開始した研究であり、それにより上記慶應-UCL 共著論文、すなわち ^{29}Si 核スピンを量子ビットと利用する工夫をまとめることに成功した。5 月と 7 月には代表者の伊藤がカナダで開催された国際会議にて招待講演を行い、本 Core-to-Core 成果を広報すると同時に、カナダや他の拠点メンバーとの打合せを行った。8 月にはアメリカ、カナダ拠点の主要メンバーが香川県高松市に一同に会し、Core-to-Core で国際会議を主催し、当該プロジェクトの中間的成果の発信と、後半部分の発展にむけた共同研究計画を綿密に練った。具体的には、カナダ拠点とともに進める同位体を用いた超高感度スピン依存量子ビット分光測定に関する試料構造や測定方法に関する詳細、プリンストン大学とともに進めるゲルマニウム量子ビット実験に関する実験計画の制定などを行った。

H28

6 月にオランダ・デルフトで開催されるシリコン量子情報の国際会議にアメリカ拠点メンバーの一部も参加し、R-2 と R-1 の境界重複領域も含めた研究打ち合わせを実施した。8 月にはオーストリアで開催される学会に慶應メンバーが参加し、同会議に参加する Rice 大学・河野教授と共同研究打ち合わせを行った。昨年度同様に多数の拠点間共著論文を、Physical Review 誌、Nature 系の学術誌などに発表することを目指した。

H29

8 月には松江にて国際会議を代表者の伊藤が議長として開催し、Core-to-Core の R-1 と R-2 の成果を広く発表した。また米国拠点（スタンフォード大学）およびカナダ拠点（サイモンフレーザー大学）との共同研究を続行した。

交流リストに記載した 38 件の本事業交流活動のうち、7 件が R-1 研究（内、4 件が R-1 と重複）に関するものであった。

得られた成果

H25

シリコン同位体素子や、超伝導材料における同位体効果を利用した材料探索を光学的測定や構造測定により実施した。

H26

世界的にインパクトの強い Physical Review B 誌に一報の論文を発表した。ゲルマニウム基板上に単結晶の磁性薄膜を成長することに成功した内容である。

H27

スタンフォード大・サイモンフレーザー大・慶應スピ研の協調では、スタンフォード大学においてゲルマニウムのナノワイヤーの作製に取り組み、サイモンフレーザー大学ではシリコン同位体構造の光評価、プリンストン大学ではゲルマニウムの磁気共鳴に取り組んだ。プリンストン大と連携して取り組んだ、ゲルマニウム同位体における電子スピニコヒーレンスの測定の成果は、量子コンピュータ開発応用の可能性に関する議論も含めて Physical Review Letters 誌に共著論文として発表した。

また、R-1 と R-2 の成果をもとに 9th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures（5 月カナダ・モントリオール）、11th International Conference on Ceramic Materials and Components for Energy and Environmental Applications（6 月カナダ・バンクーバー）、SpinTech VIII(8th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology)（8 月スイス・バーゼル）において招待講演を行った。

H28

スタンフォード大・サイモンフレーザー大・慶應スピ研の協調では、スタ

ンフォード大学においてゲルマニウムのナノワイヤーの作製、サイモンフレーザー大学ではシリコン同位体構造の光評価、プリンストン大学ではゲルマニウムの磁気共鳴評価を続行した。Rice 大学にも新規参加してもらい、ナノチューブやグラフェンに関する共同研究を立ち上げた。

H29

スタンフォード大学においてゲルマニウム同位体ナノワイヤーの作製と評価を続行し、ライス大学とはグラフェンスピントロニクスに関する議論を深めた。

ミュンヘン工科大学(R-1)-ユニバーシティーカレッジロンドン(R-1)-ニューサウスウェールズ大(R-1)-サイモンフレーザー大(R-2)-慶應スピン研の協調では、世界トップを走ってきた我々のシリコン量子コンピュータ研究が、半導体業界の巨人・米国 Intel 社に認められた。2017年8月に本 Core-to-Core チームがオレゴン州ポートランドの Intel 先端研究本部を訪れ、シリコン量子コンピュータ技術と今後に関する意見交換を行い、それを国際的産学共同研究につなげる議論を継続している。

整理番号	R-3	研究開始年度	平成25年度	研究終了年度	平成29年度
研究課題名	<p>(和文) 同位体ダイヤモンドナノプローブによる単一分子 NMR イメージングの実現</p> <p>(英文) Single molecule NMR imaging using isotopically controlled diamond nano probe</p>				
日本側代表者 氏名・所属・職	<p>(和文) 伊藤公平・慶應義塾大学理工学部・教授</p> <p>(英文) Kohei Itoh・Keio University Faculty of Science and Technology・Professor</p>				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) Christian Degen・ETH・Professor				
29年度の研究 交流活動及び得 られた成果	<p>2017年7月の「量子センシング」に関する Gordon Research Conference で日本から唯一の招待講演に慶應拠点の成果が選ばれた (https://www.grc.org/quantum-sensing-conference/2017/)。Gordon Research Conference は科学分野で最重要視される会議の一つで、このシリーズで、いま世界が注目する「量子センシング (R-3の主題)」が初めて選ばれた。一週間、単一セッションで実施された会議での講演は25件すべてが招待講演であった。慶應拠点の成果発表依頼は、拠点長の伊藤公平に届いたが、伊藤の学部長・研究科委員長としての本務と Conference 日程が重なってしまったため、慶應拠点の特任准教授・阿部英介が発表して好評を得た。なお、25件の招待講演には、Joerg Wrachtrup、Christian Degen (スイス拠点長)、Amir Yacoby、Marko Loncar、Kai-Mei Fu、Lloyd Hollenberg、Fedor Jelezko といった本 Core-to-Core メンバーが含まれることから、いかに本拠点が世界と強固につながり評価されているかがわかる。9月にはポーランド・ワルシャワで開催された国際会議にて研究代表者の伊藤が招待講演を行った。さらにビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。</p> <p>本 Core-to-Core によるスイス拠点 ETH と慶應の交流は特に緊密で、昨年度に慶應の学生が ETH に1ヶ月以上の長期滞在を行った結果として、物理分野最高峰の Physical Review Letters 誌に、ダイヤモンドを用いた新しい量子センシング手法の開発に関する ETH-Keio 共著論文を発表した。その他、ハーバード大学、ワシントン大学、メルボルン大学とのダイヤモンド量子センシングに関する共同研究も深化させた。</p>				
全期間にわたる 研究交流活動及 び得られた成果 の概要	<p>交流活動</p> <p>H25</p> <p>スイス側の拠点である ETH のコーディネーターである Christian Degen 教授とのキックオフミーティングを4月に香港で実施した。ダイヤモン</p>				

ド量子情報に関する国際会議が香港中文大学で開催され、そこに Degen 教授と伊藤が招待されたことを契機とし、慶應から 4 名のチームメンバーが参加したうえ、米国協力研究者である UC Berkeley の Dimitry Budker 教授や Hewlett Packard 研究所の Victor Acosta 博士らも参加し、チームミーティングを実施して今後の共同研究の方針に関して詳細に議論した。また、7 月にはイタリア・ボローニャにおける国際会議においてドイツ・Ulm 大学 Fedor Jelezko 教授と長時間に渡る研究討論を実施し、その結果として Jelezko 教授とのダイヤモンドスピンに関する共同研究が開始された (Jelezko 教授は平成 26 年度より本 Core-to-Core に協力研究者として参加予定)。また 10 月には Degen 教授が慶應スピン研を訪問し、日本における R-3 プロジェクトキックオフセミナーを開催し、共同研究を慶應にて実施した。ビデオを用いた ETH-慶應間の会議も隔週おきに開催し、緊密な共同研究体制を確立した。

H26

6 月に慶應と産総研のメンバーがスイス ETH と独 Ulm 大学にてセミナーおよび共同研究を実施、7 月に慶應のメンバーが ETH にて共同研究を実施、11 月に慶應メンバーが独 Stuttgart 大、Ulm 大、スイス ETH にてセミナーと共同研究を実施した。また、ビデオ会議を毎月のペースで実施した。

H27

ETH および Ulm 大学との共同研究を強化した。8 月第 1 週にはドイツ、スイス拠点の主要メンバーが香川県高松市に一同に会し、Core-to-Core で国際会議を主催し、当該プロジェクトの中間的成果の発信と、後半部分の発展にむけた共同研究計画を綿密に練った。また、ETH メンバー 1 名と Ulm 大学メンバー 1 名 (ともに大学院生) が慶應に 3 日間滞在して共同研究を行った。そして 8 月第 2 週にはスイス・バーゼルでの国際会議にて研究代表者の伊藤が招待講演を行った。さらにビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。

H28

産総研、ETH、Ulm 大学を中心としたダイヤモンド量子センシング研究を続行した。慶應と産総研で比類なき高品質の同位体ダイヤモンド材料を開発し、それを用いた量子センシングを慶應・産総研に加えて、スイス、ドイツ、米国、豪などの共同研究者と共に実施した。6 月には名古屋で開催される国際会議にて研究代表者の伊藤が招待講演を行った。7 月に

は慶應の学生1名がETHに2日、特任教員1名がETHとUlm大学に2日ずつ、また2月には慶應の学生1名がETHに約1ヶ月半滞在し、ダイヤモンド量子センシングを用いて単一核スピンを検知するという高い目標に向けた共同研究を実施した。さらにビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。

H29

2017年7月の「量子センシング」に関するGordon Research Conferenceで日本から唯一の招待講演に慶應拠点の成果が選ばれた (<https://www.grc.org/quantum-sensing-conference/2017/>)。Gordon Research Conferenceは科学分野で最重要視される会議の一つで、このシリーズで、いま世界が注目する「量子センシング (R-3の主題)」が初めて選ばれた。一週間、単一セッションで実施された会議での講演は25件すべてが招待講演であった。慶應拠点の成果発表依頼は、拠点長の伊藤公平に届いたが、伊藤の学部長・研究科委員長としての本務とConference日程が重なってしまったため、慶應拠点の特任准教授・阿部英介が発表して好評を得た。なお、25件の招待講演には、Joerg Wrachtrup、Christian Degen (スイス拠点長)、Amir Yacoby、Marko Loncar、Kai-Mei Fu、Lloyd Hollenberg、Fedor Jelezkoといった本Core-to-Coreメンバーが含まれることから、いかに本拠点が世界と強固につながり評価されているかがわかる。9月にはポーランド・ワルシャワで開催された国際会議にて研究代表者の伊藤が招待講演を行った。さらにビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。

得られた成果

H25

慶應スピン研、ETH、産総研の共著論文をナノ分野トップのNano Letters誌に発表した。これは2nmの薄さのダイヤモンド薄膜の中に量子センサーを埋め込むことに成功した実験例で、このセンサーを用いてわずか6000個のプロトン核スピンの磁気共鳴を検知することに室温で成功した。6000個はこれまでに報告された最少個数のプロトンNMRである。また、同じ量子センサーを用いてダイヤモンド表面の電子スピン欠陥を検知することに成功し、Core-to-Core論文として物理学界世界トップのPhysical Review Letters誌にETH・慶應共著論文として投稿した。

H26

ダイヤモンド量子センシングに関する共同研究をスイスETHと独Ulm

大学と推進し、物理分野で最も高い権威を誇る *Physical Review Letters* 誌に 2 通の論文を共著で発表した。また、同位体スピントロニクスの世界コンソーシアムとして高い認知度を得て、*MRS Communications* 誌（材料科学分野での世界最大の学会）からの依頼でダイヤモンド量子センシングも含む招待解説論文を発表した。さらに、アジア物理学連合からの依頼で、ダイヤモンド量子センシングに関する解説論文を発表した。

H27

ETH-産総研-Ulm大-慶應スピ研の協調では、産総研が同位体ダイヤモンド成長し、それらの試料の基礎評価を慶應で実施し、その結果として選別された試料を ETH および Ulm 大学に送り、ETH が磁気共鳴、Ulm 大学が少数核スピ磁気共鳴の研究に取り組み、量子センシングとしての発展を広げた。

R-3 に関連して 28th International Conference on Defects in Semiconductors (7月フィンランド・ヘルシンキ)、5th annual NanoMRI Conference (7月カナダ・Waterloo 大学)、XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (10月ベラルーシ・ミンスク)、EMN Meeting on Vacuum Electronics (11月アメリカ・ラスベガス) などで招待講演を行った。

H28

ETH-産総研-Ulm大-慶應スピ研の協調では、産総研が同位体ダイヤモンド成長を実施し、それらの試料の基礎評価を慶應で実施し、その結果として選別された試料を ETH および Ulm 大学に送り、ETH が磁気共鳴、Ulm 大学が少数核スピ磁気共鳴の研究に取り組み、量子センシングとしての発展を広げた。また、ダイヤモンド量子センシングという切口で、ハーバード大学の Amir Yacoby 教授とワシントン大学の Kai-Mei Fu 教授との協調を深めた。

H29

本 Core-to-Core によるスイス拠点 ETH と慶應の交流は特に緊密で、昨年度に慶應の学生が ETH に 1 ヶ月以上の長期滞在を行った結果として、物理分野最高峰の *Physical Review Letters* 誌に、ダイヤモンドを用いた新しい量子センシング手法の開発に関する ETH-Keio 共著論文を発表した。その他、ハーバード大学、ワシントン大学、メルボルン大学とのダイヤモンド量子センシングに関する共同研究も深化させた。

整理番号	R-4	研究開始年度	平成25年度	研究終了年度	平成29年度
研究課題名	<p>(和文) 同位体シリコン基板上での超伝導量子情報処理と量子制御</p> <p>(英文) Quantum information processing and quantum control using superconducting qubits placed on isotopically enriched silicon substrates</p>				
日本側代表者 氏名・所属・職	<p>(和文) 伊藤公平・慶應義塾大学理工学部・教授</p> <p>(英文) Kohei Itoh・Keio University Faculty of Science and Technology・Professor</p>				
相手国側代表者 氏名・所属・職	(英文) Christian Degen・ETH・Professor				
29年度の研 究交流活動 及び得られ た成果	<p>3月に研究代表者の伊藤が米国IBM社を訪れ、MIT、IBM間の共同研究とIBM Q Networkに関する共同研究打ち合わせを行った。またETHのAndreas Wallraff教授とKlauss Ensslin教授との共同研究を続行した。</p> <p>IBM Q開発チームがMITと提携し、さらには、その提携依頼が、慶應拠点に届くことになった。その結果として、現在、世界で唯一の量子コンピュータであるIBM Qの最新版（現在は20量子ビットで、来年以降は50量子ビットに拡張）が利用できる大学は、世界でもMIT、Oxford、Melbourne、慶應義塾の4つのみとなり、アジアでは慶應義塾が唯一となった。すなわち、アジア諸国の企業や研究機関がIBM Qを利用して量子ソフトウェアの開発を希望する場合には、必ず慶應義塾大学を訪れることになり、慶應拠点が実機を用いた量子計算ソフトウェア開発の真正銘の「センター（Center）」となった。これはCore-to-Coreの大きな成果である。（詳細はhttps://www.research.ibm.com/ibm-q/network/のIBM Q Network Hubsを参照）</p>				
全期間にわたる 研究交流活動 及び得られた成果 の概要	<p>交流活動</p> <p>H25 他事業で日本に滞在していたETHチームメンバーのAndreas Wallraff教授の博士課程学生であるSimon Bergerが慶應スピン研にも参加し、本プロジェクトに関する共同研究のキックオフを担った（Berger君滞在の財源はJSPS外国人特別研究員 欧米短期）。また、東大と慶應は密に連絡をとりあった。</p> <p>H26 3月に東大メンバーがYale大とMITで共同研究を実施した。</p> <p>H27</p>				

ETH の Andreas Wallraff 教授と Klaus Ensslin 教授との共同研究を深化させた。具体的には、メール往信とテレビ電話会議を通じて、ETH が得意とする超伝導量子ビットと、慶應が得意とするシリコン中のビスマスドナー量子ビットを結合させる実験計画を精査した。その結果、当初の予定以上に研究予算が必要なことがわかった。そこで慶應と ETH と共同で EU 関連の研究予算に応募する準備を始めた。さらに慶應・ETH の間でビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。

H28

ETH の Andreas Wallraff 教授と Klaus Ensslin 教授との共同研究を続行した。さらに慶應・ETH・東大の間でビデオ会議を毎月のペースで実施し研究交流を深めた。

H29

3 月に研究代表者の伊藤が米国 IBM 社を訪れ、MIT、IBM 間の共同研究と IBM Q Network に関する共同研究打ち合わせを行った。また ETH の Andreas Wallraff 教授と Klaus Ensslin 教授との共同研究を続行した。

得られた成果

H25

ETH チームメンバーの Andreas Wallraff 教授の博士課程学生である Simon Berger が 2012 年 12 月から 2013 年 5 月まで慶應スピン研に滞在し、慶應の大学院生である Pierre-Andre Moretemousque と共同研究を実施した結果、シリコン上の超伝導量子ビットとの結合に適したシリコン中のビスマスドナー量子メモリの動作原理に関する新しい知見を得る事に成功し、Core-to-Core プログラムの共著成果論文として Physical Review B 誌に投稿した。

H26～H28

ETH・東大・慶應スピン研の協調では、東大が超伝導量子情報処理用の素子と構想を作製し、その実行方法の確立を ETH、MIT らと協調して進めている。今年度から MIT の教員 2 名が本プロジェクトに参加し、マイクロ波を用いた超伝導量子ビット操作の精緻化に取り組んだ。

H29

IBM Q 開発チームが MIT と提携し、さらには、その提携依頼が、慶應拠点に届くことになった。その結果として、現在、世界で唯一の量子コン

	<p>コンピュータである IBM Q の最新版（現在は 20 量子ビットで、来年以降は 50 量子ビットに拡張）が利用できる大学は、世界でも MIT, Oxford, Melbourne、慶應義塾の 4 つのみとなり、アジアでは慶應義塾が唯一となった。すなわち、アジア諸国の企業や研究機関が IBM Q を利用して量子ソフトウェアの開発を希望する場合には、必ず慶應義塾大学を訪れることになり、慶應拠点を実機を用いた量子計算ソフトウェア開発の真正正銘の「センター（Center）」となった。これは Core-to-Core の大きな成果である。（詳細は https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/ の IBM Q Network Hubs を参照）</p>
--	---

7-2 セミナー

(1) 全期間において実施したセミナー件数

	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
国内開催	7 回	5 回	4 回	4 回	1 回
海外開催	2 回	6 回	1 回	2 回	2 回
合計	9 回	11 回	5 回	6 回	3 回

(2) 平成 29 年度セミナー実施状況

整理番号	S-1
セミナー名	(和文) 日本学術振興会研究拠点形成事業「ミュンヘン工科大学-慶應義塾大学ジョイントセミナー」 (英文) JSPS Core-to-Core Program “TUM-KEIO joint-seminar at Walter-Scott Institute “
開催期間	平成 29 年 6 月 30 日 ～ 平成 29 年 6 月 30 日 (1 日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) ドイツ、ミュンヘン、ミュンヘン工科大学 (英文) Technical University of Munich, Garching, Germany
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 田邊孝純・慶應義塾大学理工学部・准教授 (英文) Takasumi Tanabe, Keio University・Associate Professor
相手国側開催責任者 氏名・所属・職 (※日本以外で開催の場合)	(英文) Jonathan Finley・Technical University of Munich・Professor

参加者数

派遣先 派遣元	セミナー開催国 (ドイツ)	
	A.	B.
日本 〈人／人日〉	6 / 59	
ドイツ 〈人／人日〉	10 / 10	
	12	
合計 〈人／人日〉	16 / 69	
	12	

A. 本事業参加者（参加研究者リストの研究者等）

B. 一般参加者（参加研究者リスト以外の研究者等）

※日数は、出張期間（渡航日、帰国日を含めた期間）としてください。これによりがたい

場合は、備考欄を設け、注意書きを付してください

セミナー開催の目的	R-1「同位体シリコン・ゲルマニウム・グラフェン・ナノチューブに基づく量子情報処理」に携わるプロジェクトメンバーが共同研究実施も兼ねてミュンヘン工科大学を訪ね、最新の成果を発表する。また、ミュンヘン側研究者も光量子情報処理デバイスのテーマに絞って発表を行う。		
セミナーの成果	「同位体シリコン・ゲルマニウム・グラフェン・ナノチューブに基づく量子情報処理」に関連して、特に複数のデバイスを光でつなぎ、また、光で情報を保持することに主題を置くセミナーを開催した。ミュンヘン工科大学と本プロジェクトメンバーの専門が近いながらも、お互いの得手が上手に分離できるため、相互補完型の共同研究を議論するとともに、本プロジェクト共同研究の進展を一般に公開した。		
セミナーの運営組織	Walter Schottky Institute, TU Munich		
開催経費 分担内容 と金額	日本側	内容	金額
		外国旅費	1,511,180 円
		不課税取引・非課税取引に係る消費税	114,002 円
	(ドイツ)側	内容	
		会議費	

整理番号	S-3
セミナー名	(和文) 日本学術振興会研究拠点形成事業「磁気光学スピントロニクスセミナーII」
	(英文) JSPS Core-to-Core Program “Spintoronic Magneto-Optics Seminar II”
開催期間	平成29年7月10日 ~ 平成29年7月10日 (1日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) 日本、横浜市、慶應義塾大学矢上キャンパス
	(英文) Keio University Yagami campus, Yokohama, Japan
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 伊藤公平・慶應義塾大学工学部・教授
	(英文) Kohei Itoh, Keio University・Professor

参加者数

派遣先 派遣元		セミナー開催国 (日本)	
		A.	B.
日本 〈人/人日〉	A.	32/ 32	
	B.	10	
米国 〈人/人日〉	A.	1/ 1	
	B.		
合計 〈人/人日〉	A.	33/ 33	
	B.	10	

A. 本事業参加者(参加研究者リストの研究者等)

B. 一般参加者(参加研究者リスト以外の研究者等)

※日数は、出張期間(渡航日、帰国日を含めた期間)としてください。これによりがたい場合は、備考欄を設け、注意書きを付してください。

セミナー開催の目的	R-2「同位体ナノ構造による磁気光学素子の開発」に携わる米国 Rice 大学の河野淳一郎教授が”Carbon Nanotube for Opto-thormoelectronics”と題する講演を行い、セミナー発表内容に基づき、慶應スピントロニクス研究センターメンバー（伊藤公平、牧英之、その他、ポスドク・学生メンバー）が炭素系同位体を用いた磁気光学素子の開発基礎研究に関する打ち合わせを行う。	
セミナーの成果	R-2「同位体ナノ構造による磁気光学素子の開発」の一環として、慶應拠点において牧英之准教授がカーボンナノチューブを用いた単一光子源の開発に取り組んでいる。慶應拠点では同位体操作に基づく排熱性能の向上を目指しているが、カーボンナノチューブの光学特性に対する熱の影響に関しては未解明な点が多い。その研究の最先端を走る河野淳一郎博士と共同研究を昨年より続けており、講演を通して最新の成果や考え方を学ぶと同時に、講演後に共同研究の議論を深めた。ここでの議論に基づき牧英之准教授と伊藤公平研究代表は共同研究の推進をはかった。	
セミナーの運営組織	慶應義塾先導研究センター、スピントロニクス研究センター	
開催経費 分担内容 と金額	日本側	内容 なし
	(米国)側	内容 外国旅費
		金額

整理番号	S-4
セミナー名	(和文) 日本学術振興会研究拠点形成事業「生物模倣プロセスを用いた超伝導材料開発に関するワークショップ II」
	(英文) JSPS Core-to-Core Program “Workshop on novel superconducting materials using biomimetic process II”
開催期間	平成29年11月23日～平成29年11月23日(1日間)
開催地(国名、都市名、会場名)	(和文) イギリス、ブリストル、ブリストル大学
	(英文) University of Bristol, Bristol, UK
日本側開催責任者 氏名・所属・職	(和文) 神原陽一・慶應義塾大学理工学部・准教授
	(英文) Yoichi Kamihara, Keio University・Associate Professor
相手国側開催責任者 氏名・所属・職 (※日本以外で開催の場合)	(英文) Simon Robert Hall・University of Bristol・Senior lecturer

参加者数

派遣先 派遣元	セミナー開催国 (英国)	
	A.	B.
日本 〈人／人日〉	5/25	
英国 〈人／人日〉	1/1	
	15	
〈人／人日〉		
合計 〈人／人日〉	6/26	
	15	

A. 本事業参加者(参加研究者リストの研究者等)

B. 一般参加者(参加研究者リスト以外の研究者等)

※日数は、出張期間(渡航日、帰国日を含めた期間)としてください。これによりがたい場合は、備考欄を設け、注意書きを付してください。

セミナー開催の目的	R-1「同位体シリコン・ゲルマニウム・グラフェン・ナノチューブに基づく量子情報処理」に携わるプロジェクトメンバーが共同研打ち合わせも兼ねてブリストル大学を訪ね、最新の成果を発表する。また、ブリストル大学の研究者も発表を行う。		
セミナーの成果	本プロジェクトの核となる「同位体シリコン・ゲルマニウム・グラフェン・ナノチューブに基づく量子情報処理」に関連して、慶應メンバーの神原陽一准教授と学生メンバーが推進する強相関材料スピントロニクス的成果をブリストル大学で発表し、その研究に興味を有する関連研究者が聴衆として集まり、慶應の成果を広報することから今後の共同研究の幅を広げ、新しいアイデアなどに関するディスカッションを行った。		
セミナーの運営組織	University of Bristol		
開催経費 分担内容 と金額	日本側	内容	金額
		外国旅費	1,059,000 円
		不課税取引・非課税取引に係る消費税	77,880 円
	(英国) 側	内容	
		会議費	

7-3 研究者交流（共同研究、セミナー以外の交流）

共同研究、セミナー以外でどのような交流（日本国内の交流を含む）を行ったか記入してください。

（1）平成29年度実施状況

日数	派遣研究者		訪問先・内容		派遣先
	氏名・所属・職名	氏名・所属・職名	氏名・所属・職名	内容	
7	日間	宮本 聡・慶應義塾大学・特任助教			英国
6	日間	阿部英介・慶應義塾大学・特任准教授			オーストラリア
5	日間	阿部英介・慶應義塾大学・特任准教授			福岡
9	日間	田邊孝純・慶應義塾大学・准教授			ドイツ
10	日間	藤井 瞬・慶應義塾大学・前期博士過程			ドイツ

##	日間	本多祥大・慶應義塾大学・前期博士過程			Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conferenceにて成果発表	ドイツ
##	日間	久保田啓寛・慶應義塾大学・前期博士過程			Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conferenceにて成果発表	ドイツ
10	日間	淵田美夏・慶應義塾大学・前期博士過程			Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conferenceにて成果発表	ドイツ
10	日間	堀 敦裕・慶應義塾大学・前期博士過程			Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conferenceにて成果発表	ドイツ
6	日間	阿部英介・慶應義塾大学・特任准教授			Gordon Research Conference: Quantum Sensing にて招待講演および同会議に参加のドイツ、米国、スイス、オーストラリアメンバーと共同研究打ち合わせ	香港

6	日間	佐々木健人・慶應義塾大学・後期博士過程			Gordon Research Conference: Quantum Sensing にて成果発表および同会議に参加のドイツ、米国、スイス、オーストラリアメンバーと共同研究打ち合わせ	香港
6	日間	西條蒼野・慶應義塾大学・前期博士過程			Gordon Research Conference: Quantum Sensing にて成果発表および同会議に参加のドイツ、米国、スイス、オーストラリアメンバーと共同研究打ち合わせ	香港
6	日間	矢幡 健・慶應義塾大学・前期博士過程			Gordon Research Conference: Quantum Sensing にて成果発表および同会議に参加のドイツ、米国、スイス、オーストラリアメンバーと共同研究打ち合わせ	香港
7	日間	木我亮太郎・慶應義塾大学・前期博士過程			29th International Conference on Defects in Semiconductorsにて成果発表	松江
7	日間	林彩弥佳・慶應義塾大学・前期博士過程			29th International Conference on Defects in Semiconductorsにて成果発表	松江
7	日間	松岡諒太郎・慶應義塾大学・前期博士過程			29th International Conference on Defects in Semiconductorsにて成果発表	松江
5	日間	花野郁也・慶應義塾大学・前期博士過程			29th International Conference on Defects in Semiconductorsにて成果発表	松江

5	日間	伊藤公平・慶應義塾大学・教授			International Workshop on Silicon Quantum Electronics に International Advisory として参加および同会議に参加の米国、オーストラリアメンバーと共同研究打ち合わせ	米国
6	日間	宮本 聡・慶應義塾大学・特任助教			International Workshop on Silicon Quantum Electronics に International Advisory にて成果発表加および同会議に参加の米国、オーストラリアメンバーと共同研究打ち合わせ	米国
3	日間	伊東那由多・慶應義塾大学・前期博士過程			第7回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会にて成果発表	修善寺
3	日間	松岡諒太郎・慶應義塾大学・前期博士過程			第8回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会にて成果発表	修善寺
3	日間	木我亮太郎・慶應義塾大学・前期博士過程			第9回半導体量子効果と量子情報の夏期研修会にて成果発表	修善寺
6	日間	伊藤公平・慶應義塾大学・教授			E-MRS 2017 Fall Meetingにて招待講演およびドイツメンバーと共同研究打ち合わせ	ポーランド
8	日間	渡邊紳一・慶應義塾大学・准教授			62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materialsにて成果発表	米国
8	日間	柴田浩章・慶應義塾大学・前期博士過程			62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materialsにて成果発表	米国

8	日間	白怜士・慶應義塾大学・前期博士過程			62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materialsにて成果発表	米国
8	日間	影山由維人・慶應義塾大学・前期博士過程			62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materialsにて成果発表	米国
9	日間	宮本 聡・慶應義塾大学・特任助教			2017 MRS Fall Meeting & Exhibitにて成果発表	米国
3	日間	松岡諒太郎・慶應義塾大学・前期博士過程			電子デバイス界面テクノロジー研究会にて成果発表	三島
9	日間	影山由維人・慶應義塾大学・前期博士過程			APS March Meeting 2018にて成果発表	米国
8	日間	能崎幸雄・慶應義塾大学・准教授			APS March Meeting 2018にて招待講演	米国

(2) 全期間にわたる実施状況概要

拠点研究者が国際会議に示し合わせて参加して実現した face-to-face 議論：22 回

拠点研究者が招待講演を実施するために参加した国際会議：10 回

拠点研究者が一般講演を実施するために参加した国際会議：28 回

拠点学生が拠点成果を発表するために参加した国際会議：39 回

拠点学生が拠点成果を発表するために参加した国内会議：8 回

7-4 中間評価の指摘事項等を踏まえた対応

※中間評価の指摘事項等を踏まえ、交流計画等に反映させた場合、その対応について記載してください。

指摘事項1：多数の教授や准教授が参画している計画と思われるが、日本側参加者間の内部連携、ならびに各参加者による中心課題や関連課題への貢献がややわかりにくいいため、研究交流目標に対する各参加者の役割をより明確にすることが望まれる。

対応1：

研究代表者の伊藤公平（シリコン・ゲルマニウム・ダイヤモンドスピントロニクス全般および量子コンピュータ応用）に加えて、慶應拠点の田邊孝純准教授（R-1とR-2プログラムに関わる光スピントロニクス、ミュンヘン工科大Core-to-Coreセミナー主催者）、安藤和也准教授（R-1とR-2プログラムに関わるスピン流デバイス物理学、H29年度業績欄Science Advances論文責任著者）、神原陽一准教授（R-1とR-2プログラムに関わる強相関スピントロニクス、ブリストル大Core-to-Coreセミナー主催者）、能崎幸雄教授（R-2プログラムに関わる高周波スピントロニクスデバイス、H29年度業績欄Physical Review Letters, Physical Review B, Applied Physics Letters論文成果責任著者）、牧英之准教授（R-2プログラムに関わるグラフェンスピントロニクス、H29年度業績欄Nature Communications責任著者）、阿部英介特任准教授（R1からR4プログラム全般に渡る量子情報、H29年度業績欄Applied Physics Letters、Journal of Applied Physics論文責任著者、「応用物理」誌解説論文共著者）、早瀬潤子准教授（R-3プログラム量子センシング）、渡邊紳一准教授（R-2プログラム光スピントロニクス）らが有機的につながることで、本Core-to-Core事業拠点である慶應義塾大学スピントロニクス研究センターの「世界的拠点」としての地位を確固なものにできたと自負している。

論文発表に加えて、H29年度国際会議発表とH29年度事業交流リストにおいてもR-1からR-4プログラムのすべての項目にわたり、上記准教授メンバーとその学生たちが共同研究の推進とセミナー意見交換などに積極的参加し、本Core-to-Core事業の発展に尽くした。

指摘事項2：欲を言えば、若手研究者がどのように試料作製や評価技術の開発に参画しているか、評価資料に具体的な記述があるとなおよかったと思われる。

対応2：

H29年度成果としてリストした国際会議発表28件のうち、25件が40歳以下の若手研究者および大学院生が筆頭著者の口頭・ポスター発表である。このことは、本拠点が常に若手の育成を意識し、すべての研究分野において学生を中心とした若手を育て次世代につなげることを目指している証の一つだと考えている。また、H29年度の交流実績38件（うち国外26件）のうち、24件が学生、5件が40歳以下の若手研究者によるものである。

慶應義塾が得意とする量子コンピュータ用シリコン同位体基板開発においては、35歳の宮本聡特任助教が中心となり、最新のニーズを組んだ試料構造設計と作製方法を開発し、独拠点ミュンヘン工科大学、英拠点ユニヴァーシティカレッジロンドン、豪拠点ニューサ

ウスウェールズ大学、加拠点サイモンフレーザー大学、米拠点スタンフォード大学・プリンストン大学等との共同研究を進めた。米 Intel 社との技術的議論にも、若手研究者が積極的に参加している。

指摘事項3：関連分野の国際会議に多くの若手参加者がいる場合には、その場での関連機関の参加者を集めたグループセミナーを開催する等の案も効果的な若手交流として期待できるのではないかと。また、国際的なノウハウの結集に関しては、海外拠点での短期の実験への参加では得られない部分が重要であろう。可能であれば、相手国からの長期招へい研究者の人数と滞在期間を増やすとともに、日本からの若手研究者の長期派遣による日常的な研究への参加をより組織的に行うことも必要であろう。

対応3：

このことをうけ、H28年度であるが、研究代表者・伊藤公平の大学院生・佐々木健人君が R-3 プログラムのスイス拠点 ETH のスイス拠点代表 Degen 教授の研究室に滞在することが実現した。ここで大いなる刺激を受けた佐々木君は後期博士課程進学を決意し、また、ETH で行った共同研究に基づき Physical Review Letters 誌に ETH・慶應の共著論文を発表する成果を得た。また、この出張で築かれた ETH 学生との交流をもとに、佐々木君は、ダイヤモンド量子センシングの概念を覆す画期的なセンシング方法を開発し、本報告書作成時点では、その論文の執筆を急いでいる。

並行して海外拠点での短期の実験参加でも大きな成果をあげた。ビデオ会議等でお互いの問題点を短期派遣前に協議し、先方には日本からの派遣受入れの準備を整えてもらい、実際の派遣滞在中には実験ノウハウを伝授してもらい、それを帰国後に日本で試すことを重ねている。今どきの若手研究者らしく、一度、face-to-face でつなぐと、その後は SNS や skype でつながり研究討論を活発に行う。ただし、短期であるとそれぞれの機関で考えたことを他の機関で試す時間に制限が生じるため、指摘いただいた長期派遣の必要性は大変に有効であった。

8. 研究交流実績総人数・人日数

8-1 平成29年度の相手国との交流実績

派遣先 派遣元	国名	1	2	3	4	計
日本	日本	659				659
	ドイツ		17			17
	英国			525		525
	米国				211	211
	カナダ				541	541
ドイツ	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
英国	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
米国	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
カナダ	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
スイス	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
オーストラリア	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
香港(第三国)	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
ポーランド(第三国)	日本					
	ドイツ					
	英国					
	米国					
	カナダ					
合計	日本	659	17	525	211	541
	ドイツ		17			
	英国			525		
	米国				211	
	カナダ				541	
計	659	17	525	211	541	

※各国別に、研究者交流・共同研究・セミナーにて交流した人数・人日数を記載してください。(なお、記入の仕方の詳細については「記入上の注意」を参考にしてください。)

※日本側予算によらない交流についても、カッコ書きで記入してください。(合計欄は()をのぞいた人数・人日数としてください。)

8-2 平成29年度の国内での交流実績

1	2	3	4	合計
1/5 ()	8/38 ()	0/0 ()	1/3 ()	10/46 (0/0)

8-3 全期間にわたる派遣・受入人数

年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
派遣人数 (人)	29/229 (7/120)	27/196 (5/13)	15/105 (2/10)	16/143 (0/0)	28/201 (0/0)
受入人数 (人)	0/0 (23/53)	0/0 (5/27)	0/0 (19/79)	0/0 (3/3)	0/0 (1/1)

※各年度の実施報告書の「相手国との交流実績」に記載の人数を転記してください。相手国側マッチングファンド等日本側予算によらない交流については（ ）で記載してください。

9. 経費使用総額

9—1 平成29年度経費使用額

(単位 円)

	経費内訳	金額	備考
研究交流経費	国内旅費	786,490	国内旅費、外国旅費の合計は、研究交流経費の50%以上であること。
	外国旅費	8,396,523	
	謝金	0	
	備品・消耗品購入費	1,944,348	
	その他の経費	4,153,004	
	不課税取引・非課税取引に係る消費税	719,635	
	計	16,000,000	研究交流経費配分額以内であること。
業務委託手数料		1,600,000	研究交流経費の10%を上限とし、必要な額であること。また、消費税額は内額とする。
合 計		17,600,000	

9—2 全期間にわたる経費使用額

(単位 千円)

	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
国内旅費	0	5	1,505	495	786
外国旅費	9,258	8,846	5,817	7,395	8,397
謝金	0	0	0	0	0
備品・消耗品購入費	2,490	3,254	1,758	3,573	1,944
その他の経費	3,781	3,218	4,967	2,925	4,153
外国旅費・謝金等に係る消費税(※2)	471	677	453	612	720
合計	16,000	16,000	14,500	15,000	16,000

※各年度の実施報告書の「経費使用額」を千円単位にして転記してください。

※2 平成28・29年度は「不課税取引・非課税取引に係る消費税」となります。

10. 相手国マッチングファンド使用額

10-1 平成29年度使用額

相手国名	経費負担区分	平成29年度使用額	
		現地通貨額[現地通貨単位]	日本円換算額
ドイツ	パターン1	26,800 [ユーロ]	355 万円相当
英国	パターン1	19,500 [ポンド]	300 万円相当
米国	パターン1	25,500 [ドル]	273 万円相当
カナダ	パターン1	12,500 [カナダドル]	106 万円相当
スイス	パターン1	26,800 [フラン]	300 万円相当
オーストラリア	パターン1	39,000 [オーストラリアドル]	325 万円相当

※交流実施期間中に、相手国が本事業のために使用したマッチングファンドの金額について、現地通貨での金額、及び日本円換算額を記入してください。

※経費負担区分

パターン1：日本側研究者の経費は振興会が、相手国側研究者の経費は相手国側学術振興機関等が負担。

パターン2：派遣国が派遣にかかる費用を負担し、受入国が受入にかかる滞在費等を負担。

10-2 全期間にわたる相手国のマッチングファンドの状況概要

H25～H28

相手国名	平成25年度使用額	
	現地通貨額[現地通貨単位]	日本円換算額
ドイツ	33,800 [ユーロ]	490 万円相当
英国	23,500 [ポンド]	430 万円相当
米国	21,000 [ドル]	220 万円相当

カナダ	13,800[カナダドル]	140 万円相当
スイス	26,000 [スイスフラン]	310 万円相当

相手国名	平成26年度使用額	
	現地通貨額[現地通貨単位]	日本円換算額
ドイツ	32,500 [ユーロ]	430 万円相当
英国	22,800 [ポンド]	300 万円相当
米国	22,000 [ドル]	260 万円相当
カナダ	14,200 [カナダドル]	138 万円相当
スイス	24,500 [スイスフラン]	310 万円相当

相手国名	平成27年度使用額	
	現地通貨額[現地通貨単位]	日本円換算額
ドイツ	60,000[ユーロ]	720 万円相当
英国	40,000[ポンド]	600 万円相当
米国	30,000[ドル]	360 万円相当
カナダ	20,000[カナダドル]	170 万円相当
スイス	60,000[フラン]	660 万円相当
オーストラリア	100,000 [オーストラリアドル]	840 万円相当

相手国名	平成28年度使用額	
------	-----------	--

	現地通貨額[現地通貨単位]	日本円換算額
ドイツ	30,000 [ユーロ]	350 万円相当
英国	20,500 [ポンド]	290 万円相当
米国	25,000 [ドル]	275 万円相当
カナダ	12,500 [カナダドル]	105 万円相当
スイス	25,000 [フラン]	275 万円相当
オーストラリア	38,800 [オーストラリアドル]	330 万円相当