

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－英国研究交流）

1. 研究課題名：「同位体制御されたシリコン中のドナー不純物を中心とした量子スピントロニクス」
2. 研究期間：平成 21 年 12 月～平成 25 年 3 月
3. 支援額： 総額 14,476,000 円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	伊藤公平	慶應義塾大学	教授
研究者	関口武治	慶應義塾大学	特任准教授
研究者	Waseem Akht er	慶應義塾大学	大学院生
研究者	松岡 昂志	慶應義塾大学	大学院生
研究者	川上 恵里加	慶應義塾大学	大学院生
研究者	Pierre-Andre Mortemousque	慶應義塾大学	大学院生
参加研究者 のべ 33 名			

相手側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	John J. L. M orton	Dept of Materials/Physics, Oxford	教授
研究者	Simon C. Be njamin	Dept of Materials, Oxford	助教
研究者	Arzhang Ardavan	Dept of Materials, Oxford	教授
研究者	Vasileia Filid ou	Dept of Materials, Oxford	大学院生
研究者	Stephanie Sim mons	Dept of Materials, Oxford	大学院生
研究者	Eisuke Abe	Dept of Materials, Oxford	ポスドク
参加研究者 のべ 11 名			

5. 研究・交流の目的

量子力学の根源的命題である量子情報物理学の基礎研究とその応用を、産業的に最も重要なシリコン半導体を舞台として実施した。特に 1)スピンコヒーレンス（量子情報）の長時間維持と、2)エンタングルメント生成の高純度化について、物理的な限界を実験的に追求することから量子物理学の様々な理論の検証を行い、同時に理論の予想しない新発見を模索することを目的とした。またコヒーレンスの長時間化やエンタングルメント高純度化を利用して量子スピントロニクスの実用化に繋がる基礎動作原理の実証を目指した。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

本課題では、伊藤が材料工学を基盤とした磁気共鳴の専門家であり、Morton が量子物理と化学という理学的側面を基盤とした磁気共鳴の専門家という特徴を最大限に利用した。伊藤はシリコン中の量子ビットのコヒーレンスを飛躍的に伸ばすシリコン同位体技術を有

し、その結果としてデコヒーレンスの本質的な原因を探求するという基礎物理学研究が実施できた。同時に十分に長いコヒーレンスを利用して、後述の量子メモリーや量子ホログラフィーといった応用が展開された。Morton は量子操作を行うためのパルス列プログラミングの専門家であり、基礎物理学的に興味深い様々な量子状態を準備する技術を有する。当然、その実験装置も創意工夫が施されたものであり、量子情報の応用に向けた様々な改良も行っている。よって、伊藤の試料作製技術と Morton の磁気共鳴量子操作技術を融合し、磁気共鳴という共通の専門で共同研究が進められたことが世界的にも競争力の高い研究体制の樹立につながった。特筆すべきは、わずか 3 年間の共同研究において、当初目標のほぼすべてを達成したうえに、それらの成果を Nature 誌、Nature Materials 誌、Nature Communications 誌、Physical Review Letters 誌 (2 報)、Physical Review B 誌 (2 報) と 7 報もの共著論文として日英共同発表したことである。Nature 誌に発表したシリコンにおける高純度エンタングルメント生成の成果は、伊藤と Morton の両名が明記された形でニューヨークタイムズ紙が記事とし、その連鎖反応として国内は当然のこと、世界中の新聞が本チームの成果を記事として取り上げた。Physical Review Letters 誌と Physical Review B 誌は物理学分野世界最高峰の学術誌であり、学術的な側面において極めて高い評価が得られている。本課題に基づく国際会議の招待講演は両チーム合わせて 30 以上を数える。

具体的には、本研究の第一目標であったシリコン中の電子・核スピン量子ビットのコヒーレンス維持に関する物理の解明では、デコヒーレンス（量子情報が失われる過程）の詳細を実験により観測することからその要因を明らかにした。そのうえでデコヒーレンスの要因を徹底的に取り除き、コヒーレンスがどこまで延長できるかの本質に迫った。核スピンを有する²⁹Si安定同位体を徹底的に排除した高品質²⁸Si同位体単結晶を伊藤が用意し、その中に意図的に添加されたリン不純物の電子スピンと核スピンのデコヒーレンス機構を米国プリンストン大学の共同研究者も含める形で伊藤と Morton のチームが共同で解明した。実験は慶應大、オックスフォード大、プリンストン大において特に慶應とオックスフォードのメンバーが常に共同参加する形で実施した。本成果は、慶應大を中心とした論文として Physical Review B 誌と、プリンストン大を中心として Nature Materials 誌に、日英チームの共著論文として発表された。

また第二の目標であったシリコンにおける高純度エンタングルメントの生成は、慶應大が試料を作製し、エンタングルメントに関する電子磁気共鳴の初期実験も慶應大で行い、最終的にはオックスフォード大において慶應大メンバーも参加する形で実験を実施した。上述のとおり、本成果は Nature 誌に日英共著として発表された。

また、当初予定した成果に基づく様々な展開にも取り組んだ。その代表が極めて長い核スピンのコヒーレンスを利用して量子ホログラフィックメモリーの動作原理の実証に成功したことである。これは個々の量子ビットに情報を独立にインプットする従来の手法とは異なり、複数の量子ビットで目的とする量子情報を記録するという新しい考え方である。個々の量子ビットでわずかに位相が異なる量子情報を保持することから全体としてあたかも波のような、ホログラフィック的なマルチモードメモリーが実現する。ここでも慶應大が試料を作製し、オックスフォード大が最終的な原理検証を実施することから日英共著論文が Physical Review Letters 誌に発表できた。さらにはシリコン中の²⁹Si核スピンをを用いたシリコン中の量子ビット動作の実証にも成功し、この成果は慶應を中心とした Physical Review Letters 誌と Physical Review B 誌に日英共同発表された。また量子力学の根源に関する Leggett-Garg 不等式の破れに関する実験にも日英共同で成功し、Nature Communications 誌に日英共同論文を発表した。

6-2 人的交流の成果

慶應大の研究メンバーでオックスフォード大に赴き共同研究を実施した学生の多くが博士号取得後または修士号取得後も研究者としての発展を続け、英国を中心とした欧州との交流も続けている。本課題開始前に伊藤の指導で慶應から博士号を取得した博士が、本課

題実施中には Morton のもとでポスドクとして活躍した。本課題の実施により伊藤のもとで修士号を取得した学生はオランダ・デルフト工科大学の博士課程に進学し、Morton との交流も続けている。本課題の実施により伊藤のもとで博士号を取得した二人の博士は東大でポスドクの職につき、Morton とは定期的に連絡をとりながら当該分野での活躍を続けている。

また、1年目にオックスフォード大でキックオフシンポジウム、2年目に島根県松江市で関連国際会議を伊藤が議長として主催、そして最終年度には慶應と University College London のそれぞれにおいて本日英課題の成果報告会を完全にオープンな形で開催し、日英多くの学生と若手研究者が交流を深めた。

7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	H. Wu, R. E. George, J. H. Wesenberg, K. Mølmer, D. I. Schuster, R. J. Schoelkopf, K. M. Itoh, A. Ardavan, J. J. L. Morton, and G. A. D. Briggs, "Storage of Multiple Coherent Microwave Excitations in an Electron Spin Ensemble," <i>Phys. Rev. Lett.</i> 105, 14053 (2010).	日英 共著
論文	S. Simmons, R. M. Brown, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, M. L. W. Thewalt, K. M. Itoh, and J. J. L. Morton, "Entanglement in a Solid-State Spin Ensemble," <i>Nature</i> 470, 69-72 (2011).	日英 共著
論文	A. M. Tyryshkin, S. Tojo, J. J. L. Morton, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, T. Schenkel, M. L. W. Thewalt, K. M. Itoh, and S. A. Lyon, "Electron Spin Coherence Exceeding Seconds in High Purity Silicon", <i>Nature Materials</i> 11, 143-147 (2012).	日英 共著
論文	G. C. Knee, S. Simmons, E. M. Gauger, J. J. L. Morton, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, K. M. Itoh, M. L. W. Thewalt, G. Andrew, D. Briggs, and S. C. Benjamin, "Violation of a Leggett-Garg Inequality with Ideal Non-Invasive Measurements," <i>Nature Communications</i> , Published online: doi:10.1038/ncomms1614 (2012).	日英 共著
論文	W. Akhtar, V. Filidou, T. Sekiguchi, E. Kawakami, T. Itahashi, L. Vlasenko, J. J. L. Morton, and K. M. Itoh, "Coherent Storage of Photoexcited Triplet States Using ²⁹ Si Nuclear Spins in Silicon," <i>Phys. Rev. Lett.</i> 108, 097601 (2012).	日英 共著