

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創成」
研究課題「スピン量子計算の基盤技術開発」

研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2022年 3月

研究代表者：樽茶 清悟
(理化学研究所創発物性科学研究セ
ンター 副センター長/グループディレク
ター)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

量子コンピュータは、5年前後で誤り訂正なしの中規模量子コンピュータ、20年前後先に誤り訂正ありの大規模量子コンピュータの開発に至ることが期待されている。これは、挑戦的で長期的な課題であり、将来性の高い技術の開発が求められる。電子スピンは、内在的なコヒーレンス時間が長い、集積技術と親和性が良いといった特徴があり、この数年はシリコン(Si)を材料とする研究が活発化している。その中で本課題は、半導体量子ドット中のスピンの量子操作を基盤として、固体量子情報処理の新展開を導く基盤概念・技術の開発を目指した。具体的な研究項目は、**A. 多量子ビット化とスピン相関の物理探索**、**B. デコヒーレンス機構の解明による量子ゲート高忠実度化**、**C. 最適な量子回路の開発**、**D. Si 量子ドットへの技術移植と集積回路設計の導入**、である。なお方針として、当初作製技術が進んでいた GaAs 量子ドットと材料的に優れた Si 量子ドットの研究を平行し、次第に主体を Si へ移した。

A. 樽茶グループと Loss グループが実験と理論を担当した。実験では GaAs 量子ドットを用いて世界最多の4量子ビットを実現し、また五重量子ドットを用いて1つの電荷計と三重量子ドットを単位として、より多重の量子ドットへ拡張できることを示した。その中で実際の量子ドットの位置が不純物で決まるという問題が浮上し、対応策として Loss グループは磁場効果を利用してドットの位置や異方性を決定する理論を開発した。以上の知見は Si の実験に活用した。

樽茶グループはスピン量子もつれの問題に着手し、三重量子ドット中の2スピンが占有ドットに依らずコヒーレントな量子もつれを保持することを確認した。これは電子スピン量子もつれの非局所性を初めて実証した実験であり、論理演算に新手法を提供する。

B. 量子ビットの忠実度の改善は量子コンピュータの性能向上に必須である。そのためには、デコヒーレンスの要因である核スピン、電荷揺らぎといった雑音源の役割を解明し、制御手法を開発する必要がある。樽茶グループが雑音測定、Loss グループが理論解析を担当してこの研究を進めた。スピン量子ビットを高感度プローブとしてスピンの位相に対する環境雑音を実時間で捉える手法を確立し、GaAs、天然 Si/SiGe、同位体制御 $^{28}\text{Si}/^{29}\text{Si}$ の量子ドットで作られる量子ビットの雑音パワースペクトル密度を測定し、理論解析により各雑音機構を明らかにした。加えて量子ビット間の相関雑音を検出し、要因を明らかにした。また、環境雑音の測定結果を実時間でフィードバックし、雑音の影響を補償する技術を開発した。その結果、従来高忠実度化が難しかった GaAs 量子ビットであっても、99%以上の高い忠実度が得られることを確認した。Loss グループはバーゼル大と共同で、GaAs 量子ドットのスピン緩和機構を理論解析し、核スピン結合とスピン軌道相互作用の寄与を明らかにした。

C. 当初スピンによる量子回路の実験研究は皆無であり、その開発が急がれていた。樽茶グループが基本となる3スピン量子回路の実験を主導し、量子テレポーテーション、量子誤り訂正の実装にいち早く成功した。実験は GaAs を先行し、量子ビット高忠実度化の知見を基盤として2019年度半ばから Si 回路を開始した。

まず GaAs の三重量子ドットの3スピンを異なる形式で符号化した異種2量子ビットを用いて、桁違いに高速の制御位相ゲートを実現した。これは Loss グループの提案(計画前)を受けて行った実験で、同グループが理論を担当した。続けて基本の量子回路として量子テレポーテーションに着手し、ベル測定を原理とする確率的テレポーテーションの原理実証に成功した。

Si では誤り耐性量子計算のマイルストーンとして3ビット誤り訂正に向けた2つの要素技術(3スピン純粋もつれ状態と Toffoli ゲート)の開発を中心テーマとした。2組のスピン交換結合を制御することにより、両方の実験に成功し、ごく最近位相誤りの訂正実験にも成功した。多ビットのアルゴリズム開発を加速する大きい成果である。

また樽茶グループは、GaAs 三重量子ドットの異種2ビットの応用として、電子スピンの初となる量子非破壊測定を提案、実証した。片方のビットを補助として測定することで他方の主ビット

を非破壊で読み出した(Loss グループと共同)。この方式は当初計画にはなかったが、誤り検出、読み出し、初期化に有用であることが分かった。さらに同グループは非破壊測定を Si の2ビットに適用する方法を開発し、読み出しと初期化の忠実度を 99 %以上に改善できることを示した。

D. 集積回路と相性のよい MOS 構造 Si 量子ビットの開発を小寺グループが主で樽茶グループが協力、高忠実度化はその逆、そして MOS の正孔スピンの理論を Loss グループが担当した。

MOS は有望な材料ではあるが、当初作製法が確立していなかった。作製技術の開発から始めて、多重量子ドット構造の評価、スピン制御の実証を経て、正孔スピン共鳴の観測に成功した。これを受けて Loss グループは正孔スピンの g 因子と位相緩和を評価する理論を開発した。

高忠実度化に関しては、同位体制御 Si/SiGe と独自に開発した微小磁石法の導入により、コヒーレンス時間の増大とビット動作の高速化を図り、世界最高の忠実度(99.93 %)を達成した。2ビットゲートでは、制御回転操作を高速化し、単一ビット操作速度を最適化することで、世界最高となる99.5%を達成した。読み出しに関しては、感度と速度を向上するための原理と技術の開発を行い、誤り訂正閾値を超える忠実度(>99 %)と高速動作(<1・sec)を達成した。これにより、すべての主要量子操作について誤り訂正閾値を初めてクリアした。

大規模化に向けて2次元 3x3 量子ビット配列を提案し、量子ビットの高速操作性と独立操作性を計算で確認した。さらに、同構成は 40x40 配列に拡張可能であることを指摘した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 量子非破壊測定の実証

概要:量子非破壊測定は、量子状態の特定の物理量を、擾乱を与えることなく読み出す測定であり、量子コンピュータの重要な要素(誤り検出、読み出し、初期化)の高忠実度化に有用とされる。超伝導や光子などでは既に実現されているが、電子スピンでは未だであった。今回、量子もつれを作る2量子ビット間の相互作用をイジング型として、片方のビットの測定で他のビットの情報を非破壊的に読み出す方法を提案、実現した。また、読み出し、初期化の忠実度の大幅な改善を確認した。応用範囲の広い量子情報技術の開発といえる。

2. 量子もつれ制御の自由度の拡大

概要:量子もつれは量子力学の基本概念であり、そのコヒーレントな操作が量子コンピュータの動作に必要となる。しかし、固体中では雑音が強いために量子力学的結合を保つ程度に近接した2スピンでしか量子もつれは作れなかった。今回、量子結合を調整して3スピンによる量子もつれを生成し、また量子結合がない離れた2スピンでもコヒーレント操作を行うことに成功した。今後固体系量子情報の概念・技術の自由度の拡大につながることを期待される。また量子もつれは超伝導や近藤効果の基本状態であることから、その微視的な物理の理解にも有用と考えられる。

3. 量子ドット中の電子スピンの緩和機構の解明と最長寿命の観測

概要:スピン緩和時間 T1 はコヒーレンス時間と読み出し忠実度の上限を与え、その理解と制御は量子ビット開発の鍵を握る。磁場中の GaAs 量子ドットの T1 はフォノン放出とスピン軌道相互作用で決まり、磁場の-5乗に従うことが実験理論で確認されていた。しかし、弱磁場の T1 は核スピン結合に支配され、-3乗に従うことが15年前に予測されたが、両機構の移り変わりは未確認であった。今回、磁場の大きさ、角度などを精密に制御した実験により、理論予測を確認し、また、57秒という最長の T1 を観測した。半導体スピンの物理に広く関わる重要な成果といえる。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 誤り訂正閾値を超える量子操作の実証

概要:量子コンピュータの大規模化には、量子ビットの誤りを訂正する機能が不可欠である。そ

のための条件として、各量子操作の忠実度が一定の閾値(単一量子ビット 99.9 %、2量子ビット 99 %、初期化 99 %、読み出し 99 %)を超える必要がある。本研究では、Si 量子ビットに対する全ての量子操作で同閾値を超えられることを初めて実証した。量子コンピュータの大規模化が原理的に可能であることを示す重要な成果である。

2. 量子誤り訂正の原理実証

概要:量子誤り訂正は、量子コンピュータの大規模化に欠かせない機能であるが、Si 量子ビットでは、まだ基本の実証実験すら確認されていなかった。今回、3ビットを用いて、誤り訂正の要素技術である量子もつれ状態(GHZ 状態)と Toffoli ゲートを初めて実現し、前者による誤り検出と後者による誤り訂正を組み合わせることにより、位相誤りが訂正できることを初めて確認した。量子コンピュータの大規模化の道を拓く重要な成果である。

3. フィードバック制御を利用したスピン量子ビット位相と量子測定の安定化

概要:超伝導や半導体スピンなどの固体中の量子状態を利用する量子コンピュータでは、環境雑音による量子状態の揺らぎが大きい問題である。我々は高速フィードバックの手法で電子スピンの量子状態を実時間で安定化できる技術を開発した。これは量子コンピュータデバイスにおける雑音への耐性・安定性の問題を解決し得る新手法である。また同フィードバック法は応用の範囲が広く、その例として単一電子の電荷測定の安定化に適用できることを示した。

< 代表的な論文 >

1. J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, and S. Tarucha, "A > 99.9 %-fidelity quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise", *Nature Nanotechnol.* 13, 102 (2018).

概要:磁氣的雑音の極めて少ない同位体制御シリコン基板を用いて量子ドットを作製し、これに特殊な形状の微小磁石を用いた高速スピン操作を適用することにより、従来に比べて約100倍のスピン量子ビットの操作速度と約10倍の位相コヒーレンス時間を同時に達成した。その結果、量子ビット操作の忠実度として世界最高値 99.93 %を達成した。またこのコヒーレンス喪失は、通常の磁氣的雑音ではなく、電荷雑音が支配していることを初めて明らかにした。

2. A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha, "Fast universal quantum gate above the fault-tolerance threshold in silicon", *Nature* 601, 338 (2022).

概要:量子コンピュータの大規模化には、前提条件として種々の量子操作の忠実度が誤り訂正のための閾値を超える必要がある。しかし、これまでは2量子ビットゲートの忠実度が十分大きくなかった。今回同位体制御した²⁸Si/SiGe 二重量子ドットを用い、また単一スピン回転、および制御回転ゲートの速度を上げることにより、同閾値を初めて超えることに成功した。大規模量子コンピュータの開発を加速する重要な成果である。

3. K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, J. Yoneda, T. Kobayashi, and S. Tarucha, "Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon", *Nature Nanotechnol.* 16, 969 (2021).

概要:量子コンピュータの動作には複数量子ビット間の量子もつれの制御が重要である。電子スピンを用いた量子ビットでは、これまでに2量子ビット間の量子もつれが実現されていたが、量子誤り訂正など重要な量子アルゴリズムの実装には3量子ビット以上の量子もつれが必要になる。この論文では、Si 量子ドット中に閉じ込めた3つの電子スピンを高い精度で制御、測定し、さらに世界初となる3量子ビットもつれ状態の生成することに成功した。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 樽茶グループ

研究代表者: 樽茶 清悟 (国立研究開発法人理化学研究所、グループディレクター)

研究項目

- スピン量子計算の多ビット化四、五重量子ドットデバイス
- スピン量子相関の物理と遠隔スピン操作
- 磁気的な環境雑音の解明
- 電気的な環境雑音の解明
- 環境フィードバック制御の最適化
- ハイブリッド量子ビット
- 量子テレポーテーション
- Toffoli ゲートと量子誤り訂正
- 量子非破壊測定と誤り検出
- 量子ゲートの高忠実度化

② Lossグループ

主たる共同研究者: Loss Daniel (国立研究開発法人理化学研究所、チームリーダー)

研究項目

- 基本単位と構成法の提案
- 環境雑音による量子コヒーレンス低下の物理模型
- 量子ビット操作の最適化理論
- スピン緩和機構の解明
- 正孔スピンの制御の理論

③ 小寺グループ

主たる共同研究者: 小寺 哲夫 (国立大学法人東京工業大学、准教授)

研究項目

- シリコン量子ドット素子の不純物ドーピングおよび結晶欠陥の評価・制御
- MOS 型多重量子ドットの開発とスピン制御
- シリコン量子ビット集積化の提案

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

相補的な共同研究(理論と実験、試料提供、シリコン技術など)に関してネットワークを形成している。

樽茶グループ

• 同位体制御 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ 試料の作製にあたり、2017年から2018年まで慶応大学の伊藤公平教授グループおよび名古屋大学の宇佐美徳隆教授グループから基板の提供を受け、また、当方からはホールバー試料の移動度測定結果をフィードバックするなど、共同して試料品質の向上に取り組んだ。

• 2019年以降は、デルフト工科大の Giordano Scappucci 博士から品質の高い同位体制御 $^{28}\text{Si}/\text{SiGe}$ 基板の提供を受けている。

• 計画開始以前から GaAs 量子ドット試料の作製にあたり、ルール大学ボーフム(ドイツ)の Andreas Wieck 教授グループから安定な量子ドットに適した高移動度基板の提供を受けた。

• 量子ビット系への電荷雑音によるバックアクションの解明のため、2018年理化学研究所 Franco Nori 主任研究員およびニューヨーク州立大学バッファロー校 Xuedong Hu 教授らと共同

で理論的解析を行った。

- 開発している量子誤り訂正回路の性能を予測するため、2018年以降韓国電子通信研究所の Byung-Soo Choi 博士のグループ(量子回路シミュレーション)と共同研究を行っている。
- 2020から2021年に FinFET 型スピン量子ビット試料の開発に向けて、Taiwan Semiconductor Research Institute の Lee Yao-Jen 博士、Su Chun-Jung 博士、Cho Ta-Chun 博士と、デバイス構造についての議論を行い、それをもとにデバイスの作製を依頼した。
- 2020年に開始した Si スピン量子ビットの測定に適した Josephson パラメトリック増幅器の開発にあたり、産業技術総合研究所の日高睦夫博士、永沢秀一博士、ならびに国立天文台の牧瀬圭正准教授と議論を行い、デバイスの作製を依頼した。

Lossグループ

- 2018年 Basel 大の Zumbuehl 教授と擬 2 次元量子ドットの面内磁場の軌道効果に関する共同研究を実施した。同教授のグループによる面内磁場中の量子ドットのスペクトル応答に関する実験に対する理論解釈を提供した。実験で観測された効果に基づいて、Loss グループは新しい分光ツールを理論的に開発した。この共同研究により数件の共同論文を出版した。
- 2020年以降 Basel 大の Kuhlmann 教授と Si fin-FET における正孔量子ビットの g 因子に関して共同研究を行っている。同教授のグループで行われている正孔スピンの g 因子とスピン軌道相互作用によるラビ周波数(EDSR 周波数)の実験に対する理論解析を行っている。g-因子と EDSR 周波数は、いずれも磁場方向に対して異方的で、量子ビット状態の詳細に関わる情報を提供する。現在これらに関する共同論文を準備中。
- 2019年以降東北大学大塚准教授と熱浴に結合した量子ドットにおけるスピン、電荷ダイナミクスに関する共同研究を行っている。Loss グループは熱浴に結合した量子ドットの電荷とスピンの自動相関の減衰に関して、同准教授のグループによる測定結果を解析し、二つのレートの間の大い違いを説明した。また同准教授のグループで行われている電荷雑音の実験についても解析した。この共同研究は 2 件の共同論文につながった。

小寺グループ

- シリコン量子ドット試料の解析にあたり、日立ケンブリッジ研究所の Aleksey Andreev 博士と議論を行い、素子のモデル化とシミュレーションによる実験データの再現を行った。
- シリコン量子ドット素子の動作温度向上に向けて、デルフト工科大学の石原良一准教授と測定データに関する議論を行った。
- シリコン量子ビットの集積化に向けて、日立基礎研究所の土屋龍太博士、産業技術総合研究所の森貴洋博士との議論を行った。
- Wilfred van der Wiel, University of Twente TokyoTech World Research Hub Initiative (WRHI) の枠組みにより2020年度に招聘することを決定し、コロナ禍で延期されたが、今後国際共同研究を実施予定。
- Thierry Ferrus, Hitachi Cambridge Laboratory シリコン量子ドットに関する国際共同研究を実施。2016年、2021年に国際共著論文を執筆。
- Aleksey Andreev, Hitachi Cambridge Laboratory シリコン量子ドットに関する国際共同研究を実施。2016年、2020年に国際共著論文を執筆。
- Ryoichi Ishihara, Delft University of Technology TokyoTech World Research Hub Initiative (WRHI) の枠組みによりシリコン量子ドットに関する国際共同研究を実施。2020年に国際共著論文を執筆。
- 産業技術総合研究所 2018年より共同研究を実施。複数の研究室学生が技術研修生として在籍し、シリコン量子ドット素子を作製。2020年、2021年に共著論文を執筆。