

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
量子技術基盤の創出」
研究課題「超伝導量子ビットを用いた極限量子
センシング」

研究終了報告書

研究期間 2017年 10月～2023年 3月

研究代表者: 齊藤 志郎
(日本電信電話(株)NTT物性科学
基礎研究所、上席特別研究員)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

NTT グループでは、超伝導量子回路を用いた高感度・高空間分解能な磁場センサの応用例として、局所電子スピン共鳴(ESR)測定装置の高性能化を進めた。磁場センサを超伝導量子干渉計(SQUID)から超伝導磁束量子ビット(Superconducting Flux Qubit, FQ)に変更し、センサ情報の読み出し方法を改良することにより、 10^6 スピン/√Hz であった感度が 12 スピン/√Hz まで向上した。一方、空間分解能向上に関しては、磁場センサを小型化することにより検出体積が 150 fL から 5 fL まで減少した。さらに、検出対象を微細加工することにより、0.7 fL の検出体積を実現した。また、更なる感度向上を目指し、回路量子電磁力学を利用した読み出し方法と長寿命 FQ の開発を行った。前者では実験で得られたパラメータから、数スピンの感度が期待される。後者では理想的な読み出しを仮定すると、単一電子スピン検出が可能である。

電子スピン検出の例として、ダイヤモンド結晶中の NV 中心に由来する電子スピンと光学結晶(Y2SiO5)中のエルビウム原子に由来する電子スピンの ESR スペクトルをそれぞれ測定した。どちらのスペクトルも先行研究により得られたスピンパラメータを用いたシミュレーションと良く一致しており、本手法が固体材料の物性評価に適していることを示している。さらに生体スピン試料として、NTT グループにおいてニューロンや株化細胞を準備し、静岡大学グループにおいて低温高感度 ESR 測定を実施、期待通り、細胞中の鉄および銅に由来する ESR 信号を確認した。この生体スピン試料を FQ チップに張り付け、鉄イオンに由来する電子スピンの磁化測定に成功した。FQ のループサイズは、ニューロンの細胞サイズと同程度なので、単一のニューロンに含まれる電子スピンの検出に成功したことになる。本成果は、これまでにない単一細胞レベルの ESR 測定に繋がるものであり、医療における病理診断等への応用が期待される。

静岡大学グループでは、上記生体スピン試料や固体スピン試料の評価を念頭に、市販の ESR 装置の検出部を Electrically Detected Magnetic Resonance (EDMR)検出器に置き換えた汎用性の高い低温 EDMR を立ち上げた。ここでは、同手法をシリコントランジスタに適用し、ドーパントや構造欠陥中の電子スピンを検出することに成功した。

NTT グループでは、FQ を用いた ESR イメージングを目指して、マイクロ波強度の空間分布の非一様性を利用した磁気顕微鏡を開発している。この装置では、センサの素子サイズよりも高い空間分解能を有する ESR 測定が可能となる。現在、電子線レジストを直径 100 nm 程度のドット状に加工し、そこに含まれる電子スピンの検出に成功しており、今後、ESR 測定や空間分解能のテストを進める予定である。さらに、近畿大学グループが提案した FQ を用いた電子スピンの冷却方式やエラーに強い高精度な量子制御法による高性能化を検討している。

量子情報処理技術を用いた磁場センサの高性能化に関しては、理論と実験の両面から研究を進めた。理論研究からは様々な提案が生まれた。NTT グループからは、量子テレポーテーションを用いて標準量子限界を超える磁場センサを実現する方法や、高忠実度なマイクロ波単一光子検出器を提案した。近畿大学グループは、ポスト・セレクションを用いた測定、ノイズを情報のエンコーディングに用いる測定の理論を構築し、標準量子限界を超える測定の可能性を示した。また、量子センサネットワークによる情報送信プロトコルのノイズ耐性を、理論的に解析した。一方、実験においては、FQ を用いた電子スピン検出を応用したハイブリッド温度センサを実現した。ここでは、ナノダイヤモンド中の NV 中心に由来する電子スピンを温度センサとして利用し、FQ を用いてそのスピン状態を検出することにより、高感度($1.3 \mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 9.1 mK)な超小型温度計を実現した。

近畿大学グループでは、NMR によって実現したモデル実験と理論研究を進めることにより、単独あるいはエンタングルしたセンサにおける緩和現象の理解を深めた。緩和現象は量子情報分野の発展を妨げる最大の要因の一つであり、その理解を深めることは有意義である。理論的な研究がほとんどの中で、NMR による実験を行って緩和の理解を深めようという試みには独自性がある。

当初計画していなかった成果として、磁場センサの高感度化を目指して開発した長寿命 FQ

を用いて、FQ の近傍に存在し高周波数で揺動する 2 準位(TLS)欠陥を検出・識別する方法を見出した。これらの欠陥は量子ビットの量子状態を破壊するため、量子コンピュータ開発の大きな妨げになっている。そのため、TLS 欠陥を検出し低減することは量子コンピュータ開発で重要な課題となっている。本研究は、この課題解決に向けて新たな知見を提供するものである。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1.

概要： FQ を用いた高感度・高空間分解能な ESR 測定装置を開発し、感度 12 スピン/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、検出体積 5 fL を達成した。フランスのサクレ研究所が微細加工により作製した超伝導共振器を用いて同程度の性能指数を示しているが、周波数掃引ができず応用範囲は狭い。一方、周波数と磁場を自由に掃引できる本手法は応用範囲が広い。測定に極低温が必要となるが、固体物性評価や病理診断などへの応用が期待される。

2.

概要： FQ を連続マイクロ波で励起する際の緩和過程を観測することにより、高周波数 TLS 欠陥を高感度に検出する手法を見出した。この手法を応用し、世界で初めて、異なる種類の TLS 欠陥を識別することに成功した。これらの欠陥は量子ビットの量子状態を破壊するため、TLS 検出および低減は、量子コンピュータ開発に不可欠な量子ビットの特性向上に向けた重要な課題となっている。本研究は、この課題解決に向けた新たな知見を提供するものである。

3.

概要： 緩和は量子状態を破壊するため、量子情報分野の発展を妨げる重要な要因のひとつである。その理解を深めることは、緩和の抑制方法を見いだすために必要である。緩和を起こすシンプルなモデルを考案し、NMR 実験によって実現した。理論的な研究がほとんどの中で、実験を行って緩和の理解を深めようという試みには独自性がある。また、エンタングルしたセンサのノイズ下の振る舞いを調べ、動的デカップリングの有用性を検証した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1.

概要： FQ を用いて、ラットのニューロンに含まれる鉄イオンに起因する電子スピンの磁化測定に成功した。FQ のループサイズはニューロンの細胞サイズと同程度なので、単一のニューロンに含まれる電子スピンの検出に成功したことになる。本成果は、これまでにない単一細胞レベルの ESR 測定に繋がるものであり、医療における病理診断等への応用が期待される。

2.

概要： FQ とナノダイヤモンド中の常磁性スピンの結合したハイブリット系を用いて、超小型・高感度温度計を実現した。この温度計は、マイクロメートルスケールの領域の温度を感度 1.3 $\mu\text{K}/\sqrt{\text{Hz}}$ で測定可能である。ナノダイヤモンドは熱容量も小さいため従来の温度計よりも高速な応答が期待できる。一般に小型の温度計は大型のものより測定精度が悪くなるが、FQ の量子センシングと組み合わせることで小型かつ高精度な温度計を実現した。温度計の自己発熱や、熱容量の大きさに起因した応答の遅さ等のために、正確な温度測定が難しかった極低温下での温度測定に新たな技術として貢献すると期待される。

3.

概要： 静岡大学グループでは、NTT グループの固体スピン試料の評価を念頭に、低温 ESR/EDMR を立ち上げた。これをシリコントランジスタに適用することにより、界面や酸化

膜中に存在する構造欠陥、および、不純物原子の検出に成功している (Applied Physics Letters 誌において Editor's pick に選定)。この低温 ESR/EDMR 技術は半導体製造企業からも注目されており、これを利用した高感度スピン検出研究は、企業との共同研究開発に発展している。今後、半導体の信頼性評価・故障解析の技術として日本の半導体産業に貢献するものと期待される。

< 代表的な論文 >

1. H. Toida, et al., "Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom", Commun. Phys. 2, 33 (2019).

概要: 量子情報技術の発展にともない格段の進歩を遂げた FQ を量子センサとして用い、高感度・高空間分解能な ESR 測定を実現した。センサ部分を SQUID から FQ に改良することで、 10^6 スピン/√Hz から 400 スピン/√Hz まで検出感度が向上した。また、FQ の小さなフットプリントを活かして 100 fL という微小な検出体積を実現した。

2. R. P. Budoyo, et al., "Electron Spin Resonance with up to 20 Spin Sensitivity Measured using a Superconducting Flux Qubit", Appl. Phys. Lett. 116, 194001 (2020).

概要: FQ を用いた局所 ESR 測定において、読み出し方法を改良することにより 20 スピン/√Hz の検出感度を達成した。具体的には、読み出し用の SQUID を含む非線形共振器を構築し、ジョセフソン分岐増幅現象を利用することで高速読み出しを実現した。その結果、単位時間当たりの測定回数が増加し、測定結果の積算によって感度が向上した。さらに、FQ を小型化し、6 fL の検出感度を達成した。

3. L. V. Abdurakhimov, et al., "Identification of different types of high-frequency defects in superconducting qubits", submitted to Phys. Rev. X Quant.

概要: 長寿命 FQ に対してスピンロッキング法を適用することで、量子ビットのエネルギー緩和の原因となる高周波数 TLS 欠陥を検出する方法を確立した。この手法を用いて、これまででは区別することができなかった、電場揺らぎを誘発する TLS とジョセフソン接合の臨界電流揺らぎを誘発する TLS を識別することに成功した。この成果は、量子コンピュータ開発に不可欠な量子ビットのコヒーレンス向上に貢献する。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「NTT」グループ

研究代表者: 齊藤 志郎(日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所 上席特別研究員)

研究項目

- ・超伝導磁束量子ビットを用いた局所 ESR 測定
- ・量子情報処理技術を用いた磁場センサの高性能化

② 「静岡大学」グループ

主たる共同研究者: 小野 行徳(静岡大学電子工学研究所 教授)

研究項目

- ・ESR・EDMR を用いた高感度電子スピン検出

③ 「近畿大学」グループ

主たる共同研究者: 近藤 康(近畿大学理工学部 教授)

研究項目

- ・量子センサ実現に向けた理論の開発と NMR による原理実証

(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

CREST「量子技術」の仙場チームと共同研究を進めている。具体的には、本プロジェクトで開発した長寿命超伝導磁束量子ビット(Superconducting Flux Qubit, FQ)用の測定系で、仙場チームが作製した π 接合を含む FQ のコヒーレンス評価を行っている。

単一電子スピン検出用のスピン試料候補として、ナノダイヤモンド中の NV 中心を検討している。実証実験に向けて、量子科学技術研究機構の五十嵐氏から、様々なサイズのナノダイヤモンドの提供を受けた。

研究開始時には NTT グループに所属していた松崎氏とは、彼が産業技術研究所(新原理コンピューティング研究センター、量子エンジニアリングチーム)に移籍した後も、新規測定法・FQを用いた電子スピンの冷却法の提案に関する共同研究を続けている。また、量子エンジニアリングチームの博士研究員とも共同研究を行っている。

NTT グループでは、NMR の研究を進めている大阪大学の北川研究室から実習生を受け入れ、FQ による NMR 測定の可能性を検討し、共著にて論文を出版した。