

「量子の状態制御と機能化」研究領域 領域活動・評価報告書

－2019 年度終了研究課題－

研究総括 伊藤 公平

1. 研究領域の概要

量子現象をただ観るのではなく、制御して機能化するフロンティアを切り拓く独創的で意欲的な研究を本研究領域では推進します。様々な原子、分子、物質、ナノ構造、電磁波、生命体や、それらが相互作用する系に潜む量子現象の本質を紐解き、挑戦的な量子状態の操作・制御・測定をとおして新概念、新機軸、新技術の創成に大きく寄与します。これらがシーズとなり、将来的には革新的な情報処理技術、計測技術、標準化技術、通信ネットワーク技術、省エネ技術などに発展することを目指します。高度な洞察力と、理論展開・実験技術・計算技術などに支えられた実力を駆使して、量子科学とその応用の将来を世界レベルでリードする若手研究者の輩出を目指します。具体的には、量子に関わる物理学、情報科学、化学、工学や生物学のみならず、数理科学、物質科学、ナノ構造科学などの多岐に渡るテーマを推進し、これら異分野の連携・融合を促進するプラットフォームを構築します。

2. 事後評価対象の研究課題・研究者名

件数：10 件

※研究課題名、研究者名は別紙一覧表参照

3. 事前評価の選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

1) 選考は、「量子の状態制御と機能化」領域に設けた選考委員 11 名の協力を得て、研究総括が行う。

2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。

3) 選考に当たっては、さががけ共通の選考基準 (URL: <https://www.jst.go.jp/pr/info/info1211/index.html>) の他、以下の点を重視した。

(1) 世界レベルでリードする若手研究者の採択

(2) 機能化を意識した研究の採択

4. 事前評価の選考の経緯

一応募課題につき領域アドバイザーの内 4 名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補課題を選定した。

選 考	書類選考	面接選考	採択数
対象数	65 件	18 件	10 件

5. 研究実施期間

平成 28 年 10 月～令和 2 年 3 月

6. 領域の活動状況

領域会議: 7 回

研究総括(または技術参事)の研究実施場所訪問: 12 回(全研究者および所属機関変更などにより再確認が必要となった 2 名)

7. 事後評価の手続き

研究者の研究報告書を基に、評価会(研究報告会、領域会議等)での発表・質疑応答、領域アドバイザーの意見などを参考に、下記の流れで研究総括が評価を行った。

(事後評価の流れ)

令和元年 11 月 評価会開催

令和 2 年 2 月 研究総括による事後評価

令和 2 年 3 月 被評価者への結果通知

8. 事後評価項目

(1) 研究課題等の研究目的の達成状況

(2) 研究実施体制及び研究費執行状況

(3) 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

(4) 本さがけ研究の結果、研究者として飛躍したといえるかどうか

(5) 将来的な成果に繋がるために必要な展開(シナリオ)とタイムスパン

9. 評価結果

総論

本領域が研究対象とする量子情報分野、特に量子コンピュータ・量子通信・量子暗号の近年の進展は凄まじいものがあります。しかし、その流れに参加することは「追従」であり「さきがけ」ではありません。今の発展は、先見性のある研究者たちのさきがけた基盤のうえに築かれていることを認識することが大切です。それだけに本領域では、さきがけ研究の3年間でコンパクトな成果を出すのではなく、さきがけ研究から始まる挑戦が、さきがけ研究終了後の10年間で量子状態制御の新しい潮流を生み出すという目標を、領域の発足当初から明確にしてきました。そのために、本領域では様々なバックグラウンドを有する研究者をバランスよく採用し、彼(女)らが議論を深め、スケールの大きい目標に向かって勇気を持って力強く協調的に挑戦する環境を整えることを心がけています。そして、研究領域において研究者が影響し合い、異分野連携・融合的な視点で問題解決に取り組む中で、科学技術のイノベーションの源泉となる研究成果を創出するとともに、量子科学とその応用の将来を世界レベルでリードする若手研究者を輩出することを目指しています。

このような視点において、量子情報理論を専門とする藤井啓祐博士が領域内でのディスカッションをリードし、自らも量子コンピュータの長期的な発展に不可欠な「誤り訂正符号」に関する新しい方向性を打ち出したことを大いに評価します。山下太郎博士は、現在の主流である超伝導量子ビットとは異なり、ゼロ磁場で動作する「 π 量子ビット」という新しいコンセプトを発案し、そのプロトタイプを実験的に作製することに成功しました。野口篤史博士は表面弾性波と超伝導量子ビットの相互作用の研究から、新しい量子ビット「キュービクトランズモン」のコンセプトを発案し、その実験にも成功しました。その他の研究者も、理論・実験の両面において、10年後の主流の源流になるべく鋭意努力し、2期生以降の同僚に挑戦することの大切さを印象づけてくれたことを高く評価しています。

1. 相川 清隆 研究者「真空中の浮揚ナノ粒子に対するレーザー冷凍機の開発」

ナノ粒子の重心運動を利用して、加速度や微小質量のセンシング、ナノスケールの非平衡物理の探究を目的とした研究はこれまでも多く行われてきました。これに対し相川博士は、ナノ粒子を真空中で浮揚させることで環境との熱的な遮断を徹底し、希釈冷凍機でも到達し得ないほどの超低温に達する冷却技術を開拓し、単一ナノ粒子の内部状態および重心運動に関わる研究の実施を目標にすえました。一見、「古典力学」の域をでない研究に映りますが、相川博士の挑戦は、原子・分子より大きいナノ粒子で巨視的量子状態が存在するかを問うという極めて新しいものでした。そのために必要な実験系をゼロから構築し、ナノ粒子実験を実現したことは大きな成果です。

さきがけ研究期間内の当初目標は、真空中にナノサイズの粒子を浮揚させ、その内部状態と重心運動を結合させ、重心運動の冷却を通じて内部状態をも冷却するというものでした。内部状態の冷却には至りませんでした。ナノ粒子が想定よりずっと大きな電荷を自発的に持ち、粒子同士の反発が非常に大きいことを発見しました。その性質を積極的に活用することで、相川博士はナノ粒子の重心運動を量子基底状態付近まで冷却できる見込みがあるという、新しい冷却手法を提案・実証しました。ナノ粒子を量子として扱えることを示した成果で、まさに学問の新しい潮流として高く評価できます。

今後は巨視的物体の量子力学を調べることの重要性を一般的な説得力をもって説明し、世界レベルで「相川博士が新しい学問の源流」であることが認識されることを期待しています。重力デコヒーレンスといった新しい効果の探求の物理的意義・重要性を示し、ナノ粒子系の長所、すなわち機械振動子といった類似した他の系では達成できない新しい方向性を切り拓いていくことを期待します。

2. 加藤 真也 研究者「量子光学技術を駆使した生物系を含んだ散逸と量子的研究」

近年、生体環境内の量子性に関する研究が注目されています。例えば、光合成における単一励起レベルでの高効率輸送など、特定の分子を対象とした研究は世界中で精力的に進められています。しかし量子状態という見地から、生体内の分子集合体を舞台にして、分子配置などの構造や、結合強度などの変数を系統的に制御して理解する実験を行うのは難しいのが現状です。そこで加藤博士は、光ファイバー共振器を用いた共振器量子電気力学(CQED)系の技術を発展させ、制御性の高い量子系と環境を模した外部変調が協調動作するような実験システムを構築し、それらの間の関係を研究することを目指しました。生物・生体内における量子現象の解明を目指したシミュレータをCQEDで構築するという野心的な研究提案でした。量子状態の保持や制御の品質が重要視される量子情報処理の研究とは異なり、生体内の量子現象において、量子系同士の不均一な接続

や、外界からの変調、ノイズの混入といった多体量子現象をどのように理解するかに挑む未来的な研究提案です。

加藤博士は、さがけ研究期間中に、低損失・任意分岐比スプリッタ作製技術や、集積化に向けて重要な複数ファイバー加工技術を確立し、2ユニットのCQEDの低損失接続に成功しました。極めて高度な実験であり、量子エレクトロニクス分野において高く評価されるものであります。この調子で加藤博士がユニット数を増加させ、多体系の量子現象の解明という誰もが考える目標において活躍する研究者になることは間違いありません。

一方、加藤博士が当初目標にすえた光合成に関する研究の一部を、他の研究機関がさがけて発表するなど、世界における生体環境内の量子現象研究は日進月歩であることがわかりました。今後、加藤博士が新しい学問の潮流を作るためには、他人とは異なる新しい着想を得て、道なきところを切り拓く勇気と努力が必要だと感じています。

3. 桐谷 乃輔 研究者「分子/二次元無機膜ヘテロ界面における量子伝導の発現と制御」

科学研究の成熟により専門化が進む今日において、新しい方向性を築くためには分野横断が必須です。量子機能分野も同様であり、異分野から果敢に飛び込んでくる有能な研究者を常に必要としています。桐谷博士は化学者でありながら、ポスドクとして電子デバイス分野の最先端研究を切り拓いた実績を有し、本さがけ領域の発足に伴い、量子機能分野に強い決意をもって参入してきた研究者です。二次元膜状の無機物質である遷移金属カルコゲナイドに注目し、その上に分子を巧みに接合することで量子スピンホール相を示す物質として利用するための材料開拓に取り組みました。領域としては化学者である桐谷博士が物理学者を驚かす物質操作を示すことを期待しました。

実際に、分子接合により二次元無機物質の電子状態を変えフォトルミネッセンス発光強度を100倍に高めること、また、接合する分子のパターンを制御することにより電子状態が制御可能であることを示すなど、物質化学面での多くの進展が得られました。しかし、量子機能という側面においては、結局のところ成果を得られずにさがけ期間を終了しました。

本領域で得た経験を生かして、今後は桐谷博士が、電気系や物理系が望む材料をよく理解する化学者として、量子機能を見出す研究に貢献していくことを期待します。量子情報や量子物理学のすべてを詳細に理解する必要はありません。これらの分野の発展に寄与する材料とは何かが肌感覚でわかる化学者・材料科学者として発展し、桐谷博士の材料があるからこそ実現するという研究を、量子機能分野の様々な研究者と進めていくことを期待します。

4. 素川 靖司 研究者「極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索」

レーザー冷却によって生成される極低温原子は、量子多体現象の量子シミュレーションを行うプラットフォームとして注目されています。最近では、電荷がない中性原子を用いて、電荷を有する電子のAharonov-Bohm位相を模する手法などが開発され、トポロジカル格子模型を光格子で実現したり、さらにはスピン・軌道相互作用を人工的に冷却原子に対して導入したりすることができるようになっています。これらの進展により極低温原子集団を多体系の量子シミュレータとして利用することへの期待が高まっています。素川博士の提案は、物理学分野で注目を集める人工ゲージ場の手法を非可換ゲージ場へ応用・展開することで、これに起因する幾何学的、トポロジカル量子多体現象を極低温原子集団で実現することです。物性でもアクセスできない新しい幾何学的量子現象を量子シミュレーション的に探索するという素川博士の究極的な目標はさがけ研究としてふさわしいものです。

素川博士は、さがけ研究開始と同時に実験プラットフォームとなるルビジウム原子(Rb)のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を生成するための装置の設計を開始し、超高真空装置を立ち上げ、3次元磁気光学トラップによって1兆個以上のRb原子を100マイクロケルビン以下までレーザー冷却することに成功しました。高出力近赤外レーザーを集光した光トラップにレーザー冷却によって生成された原子集団を移行することにも成功し、冷却の最適化を進めながらBEC生成を目指しています。複雑かつ繊細な実験系をゼロから設計・立ち上げてきたことは高く評価できる一方、かなりの専門家でないかぎり、新しい幾何学的量子現象を量子シミュレーション的に探索する重要性が見えにくいのが現状です。多体系量子物理学に明るく、高い実験能力を有する素川博士だけに、異なる分野の研究者に対しても平易かつ説得力をもって自らの研究の重要性を説明しながら、多体系量子物理学の10年後の新しい潮流を作ってほしいと願います。

5. 田中 宗 研究者「機械学習の高速化を指向した量子アニーリングの研究」

量子アニーリングは組合せ最適化問題を高速かつ高精度に処理する計算技術として期待されています。特に



2011年にカナダ企業が商用量子アニーリングマシンの開発に成功してからは、現在の計算機の不可能の一部を可能にする技術として実験・理論の両面から活発に研究されています。しかし、量子アニーリングがどのような問題に対して有効かは明確ではありません。そこで田中博士は、量子アニーリングの機械学習応用に着目し、機械学習処理の全体としての高速化を目標に掲げました。量子アニーリングで計算を行うためには、対象とする問題を物理学の分野で有名なイジングモデルに落とし込む必要があります。そこで田中博士は、機械学習における計算処理をイジングモデルで表現すること、それを量子アニーリングマシンに入力すること、量子アニーリングマシン実行の際の各種パラメータ設定を行うこと、量子アニーリングを行った後に得られるイジングモデルの状態を元の問題の解として適切に解釈すること等に取り組みました。

その結果として、田中博士は、機械学習の「学習」に対する量子アニーリングマシン適用、機械学習における「推論」に対する量子アニーリングマシン適用、それら両者に関係するチューニング技術の構築という観点で最先端の成果をあげ、特に機械学習を用いた材料開発分野（マテリアルズインフォマティクス）への具体的な応用事例を提示することに成功しました。また、量子アニーリング応用という切り口で多くの企業との議論を深めたことは、量子機能の産業応用に向けた大きな成果です。一方、世界レベルでの学術的な潮流をつくるためには、積極的な論文発表、国際会議発表が大切です。そして、すでに商用マシンが発売されているという量子アニーリングの成熟段階において、将来の科学技術を「さきがける」という観点からは、機械学習といったやはり成熟しつつある技術との融合だけを考えるのではなく、今後本当に成長するであろう科学技術分野の標的を定め、量子アニーリングと成長技術分野を組み合わせるといった未知領域への挑戦が、田中博士が新しい潮流を作るためには必要だと考えます。

6. 根来 誠 研究者「スケーラブル分子スピン制御技術の高度化により可能になる量子情報処理の新機能」

量子コンピュータを用いて世界で初めて素因数分解に成功した（ショアのアルゴリズムを実行した）のは、米IBMのグループで、そこでは同一分子の集合体中の核スピンが量子ビットとして用いられました。一方、この核スピンを用いる手法に対しては、初期化が困難、射影測定ができない、量子ビット数が増やせないといった批判があり、分子集合体中の核スピンを用いたNMR量子計算は表舞台から姿を消しました。しかし、最近になって、初期化が完璧ではなく、集合体測定しかできない（射影測定ができない）場合でも、限られた問題において古典計算より有利に計算できるという理論が発表されました。このような進展を受け、核磁気共鳴研究者そして量子情報研究者として経験を積んできた根来博士は、分子集合体核スピン量子コンピューティングを既存の古典計算とハイブリッド化して、機械学習の効率化に取り組む研究を提案しました。表舞台から去った手法に着目して量子計算の有効性を実証しようとする意欲的な取り組みです。

具体的には、量子エクストリーム学習アルゴリズムを分子中の核スピンの系で実装し、簡単な関数の学習が可能であることを示し、スピン多体系を特定のハミルトニアンで時間発展させた後に逆転させることで状態が元に戻るロシュミットエコーの量子シミュレーションに成功するなど、着実な成果をあげました。また、分類問題に対する古典コンピュータを用いた機械学習において重用されるカーネル法をNMR量子コンピュータで実装することに成功し、そこでは10量子ビット数を超える重ね合わせ（コヒーレンス）を得たことから、量子状態を特徴空間として用いることに成功しました。これは量子カーネルトリックを実現したことに相当し、ノイズのある量子コンピュータでも古典のコンピュータを十分に補助できる可能性を示したものです。

根来博士は大変な勉強家で、これまでの学術の成り立ちや研究の最先端を積極的に理解し、その枠組みの中で自分の研究計画を練ってきました。しかし、これからは世界の潮流の「理解」という作業から脱却して、世界の潮流を新しく作っていくことが根来博士には求められます。高い実験能力を有する根来博士だけに、今後は新しいアイデアに基づく「さきがけ論文」を積極的に発表して、世界の中での存在感を高めていくことを期待します。

7. 野口 篤史 研究者「表面弾性波を使ったエレクトロメカニクスの量子制御」

超伝導量子ビットを様々な外部素子と結合させて新しい量子機能を創成するという「ハイブリッド量子系」の研究が急速に進展しています。野口博士は固体の表面に局在している音波の共振器（表面弾性波共振器）と超伝導量子回路と結合した、エレクトロメカニカル（電気回路+機械振動）なハイブリッド量子系を設計し、さきがけ期間中にその作製と評価に見事成功しました。高いQ値の表面弾性波共振器を微細加工技術により作製し、超伝導量子回路と結合することで、ジョセフソン接合に由来する非線形インダクタンスを利用した人工輻射圧相互作用を導入し、単一のマイクロ波光子による表面弾性波の量子状態制御を可能にする相互作用強度を実現しました。さらに、その強い相互作用を超伝導量子ビット間の量子ゲートとしての機能化につなげ、キュービクトランズモン（Cubic Transmon）という新しい量子ビットの概念を確立しました。これにより、高精度が特徴であるイオントラップ量子ゲート手法にアイデアを得た、超伝導量子ビットにおける新たな高速な2量子ビットゲートの実証実験

に成功しました。これらの成果は独創的かつ高い実験技術の結晶であり、本さがけを代表する成果の一つとして高く評価します。

また野口博士は、10年後の新しい潮流をつくるという観点から、これからは量子センサーやイオン・電子系にも新しいアイデアの枠組みを広げていくという積極的な姿勢をもっています。今後の活躍が大いに期待されます。

8. 藤井 啓祐 研究者「知的量子設計による量子計算・量子シミュレーションの新機能創出」

ノイズがあるために大規模集積化をしても役に立たない、しかし、中規模(数100量子ビット)サイズの量子コンピュータであればなんとかノイズに打ち勝ち、役に立つアプリケーションが見つかるかもしれない。このようなコンセプトは noisy intermediate scale quantum computing(NISQ)として知られ、短中期の目標としてアプリケーション開発が進められています。そして、長期的な目標としてノイズを除去した(量子誤り訂正を伴う)デジタル量子計算の活用が期待されています。しかし、これら短中期そして長期的な目標を実現するためには、対象とする量子ビットの特性の理解に加えて、その量子系をどのように現在の高度な古典的計算技術につなげるか?といった大局的な視点が大切です。藤井博士は、量子と古典の最先端を深く理解し発展させるという極めて高い目標で本さがけ研究に挑み、見事、世界の最先端を切り拓いてきました。

NISQ 研究においては、藤井博士は量子ダイナミクスを機械学習へと応用する量子レザバー計算に着目し、世界に先駆けて量子古典ハイブリッドの機械学習アルゴリズムを提案しました。続いて、パラメータ付き量子回路をモデルとして機械学習を行う、量子回路学習も提案し、これらの過程において、NISQ マシンの性能評価を行うための高速シミュレータ qulacs を開発し、世界中の誰もが利用できるオープンソースとして公開しました。

長期的な量子誤り訂正デジタル量子計算の実現に向けては、新しい符号方式の開発に成功しました。世界的な流れが「接続符号方式」と「トポロジカル符号方式」の二つで進む中で、藤井博士の新しいアイデアの有用性が確認されれば大発明となり得ます。今後は、短中期と長期の研究のバランスをとりながら進めながらも、国外との交流を増やし、世界からの注目度が増す藤井博士として活躍することを期待します。

9. 山下 太郎 研究者「超伝導位相制御素子によるスケーラブル量子技術」

通常の超伝導磁束量子ビットは、大きな非調和性という利点を有する一方、外部磁場を印加して動作させる必要があり、そのときに磁場の均一性や安定性(揺らぎの抑制)が問題になります。そこで山下博士はゼロ磁場で動作する超伝導磁束量子ビットを発明し、その作製と評価をさがけ期間中に見事に成功させました。提案から概念実証までを成功させた山下博士の研究は本さがけを代表する成果の一つです。

山下博士のオリジナリティは、超伝導回路にスピントロニクス(電気と磁気の融合)という概念を導入した点にあります。具体的には、強磁性体と超伝導ジョセフソン接合を結合させる Spin-JJ という素子基盤を確立し、超伝導単体では実現が困難なレベルの高いスケーラビリティが期待される新しい位相制御型の量子ビット(通称: π 量子ビット)の作製と評価に成功しました。 π 量子ビットの磁束バイアスフリーという長所は明らかですが、これからは一般的な量子ビットに対する π 量子ビットのベンチマーク化を進め、総合的な優位性が実証されることが期待されます。また、Spin-JJ という山下博士のアイデアにより、新しい学術概念「phasetronics」(位相と電子回路の融合)が誕生しました。まだ生まれたばかりのコンセプトですが、山下博士が世界の舞台でフェーズトロンクスの学術的価値を高め、新しい潮流を作り出すことが大いに期待されます。

10. 山本 直樹 研究者「フィードバック増幅による量子機能創出」

電子・電気回路において、オペアンプなどの増幅器に適切なフィードバックを施すことで、安定かつ有用な機能システムを無数に実現できるようになりました。そこで山本博士は、フィードバック増幅の方法論を量子の世界に展開し、現代エレクトロニクス・電子回路理論に対応する量子機能システム群の設計理論を構築することを提案しました。制御理論という数学を中心とした枠組みで、量子技術をモデル化する学術体系を作り上げるという重要かつ先駆的な研究を、山本博士はさがけ研究として実施しました。その結果として、古典の世界で確立された微分器、積分器、一方向増幅器、重力波検出応用、発振器、パワースフィルタ(通信への応用)といった回路の量子版を構築することに成功し、フィードバック増幅で量子機能を出すというコンセプトを世界で初めて体系化して論文にまとめました。ただ、現代制御理論の量子版を作るという観点からは残された仕事がたくさんあります。今後、山本博士には、世界レベルで仲間を増やし、量子制御理論という新しい学問を体系化していくことを期待します。また、山本博士の量子機能システム群が広く工学者(特に実験技術者)に採用される技術になるためには、各々の量子回路モデルが導かれた前提条件と最終結果の式が意味する物理を平易に説明し、技術者たちがどのような変数を有する装置を採用または開発すれば目的とする量子回路が構築できるかをわかりやすくする必要があります。このあたりの工夫が世界の研究仲間とともにできれば、量子機能システムの実装が一

気に発展することが期待できます。

10. 評価者

研究総括 伊藤 公平 慶應義塾大学理工学部 教授

領域アドバイザー(五十音順。所属、役職は2020年3月末現在)

小川 哲生	大阪大学 大学院理学研究科 教授
上妻 幹旺	東京工業 大学理学院理学系 教授
小林 研介	東京大学 大学院理学系研究科附属知の物理学研究センター／物理学専攻 教授 大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻 教授
高橋 義朗	京都大学国際高等教育院(大学院理学研究科併任) 教授
谷 誠一郎	日本電信電話(株)NTT コミュニケーション科学基礎研究所 グループリーダー
中村 泰信	東京大学先端科学技術研究センター 教授
橋本 秀樹	関西学院大学理工学部 教授
藤原 聡	日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所 部長・上席特別研究員
古川 はづき	お茶の水女子大学基幹研究院 教授
萬 伸一	理化学研究所創発物性科学研究センター コーディネーター

(参考) 件数はいずれも、2020年3月末現在。

(1) 外部発表件数

	国 内	国 際	計
論 文	0	81	81
口 頭	231	123	354
その他	31	3	34
合 計	262	207	469

(2) 特許出願件数

国 内	国 際	計
8	6	14

(3) 受賞等

・相川 清隆

東京工業大学 第2回末松賞(2017.02月)

平成29年度文部科学大臣表彰(若手科学者賞)(2017.04月)

・桐谷 乃輔

Surface Science Society of Japan(SSSJ) Young researcher award, Symposium on Surface Science and Nanotechnology -25th Anniversary of SSSJ Kansai(2017.01月)〃

日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会 平成28年度 講演奨励賞(2017.04月)

平成31年度文部科学大臣表彰(若手科学者賞)(2019.04月)

・野口篤史

平成31年度文部科学大臣表彰(若手科学者賞)(2019.04月)

・山下太郎

超伝導科学技術研究会 第21回超伝導科学技術賞(2017.04月)【共同受賞】

平成29年度文部科学大臣表彰(若手科学者賞)(2017.04月)

電子情報通信学会 2019年度エレクトロニクスソサイエティ活動功労表彰(2020.03月)

・山本 直樹

Institute of Physics (IOP) Quantum Science and Technology Outstanding Reviewers of 2017(2018.02月)

電子情報通信学会 2017年度エレクトロニクスソサイエティ活動功労表彰(2018.03月)

(4)招待講演

国際 36 件

国内 110 件

別紙

「量子の状態制御と機能化」領域 事後評価実施 研究課題名および研究者氏名

研究者氏名 (参加形態)	研究課題名 (研究実施場所)	現職(2020年3月末現在) (応募時所属)	研究費 (百万円)
相川 清隆 (兼任)	真空中の浮揚ナノ粒子に対するレーザー冷凍機の開発(東京工業大学)	東京工業大学理学院 准教授 (同上)	49
加藤 真也 (専任)	量子光学技術を駆使した生物系を含んだ散逸と量子の研究(早稲田大学)	早稲田大学理工学術院 次席研究員／ 科学技術振興機構 さきがけ研究者 (同上 日本学術振興会特別研究員 SPD)	44
桐谷 乃輔 (兼任)	分子/二次元無機膜ヘテロ界面における量子伝導の発現と制御(大阪府立大学)	大阪府立大学大学院工学研究科 テニュ アトラック助教 (同上)	46
素川 靖司 (兼任)	極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索(自然科学研究機構)	自然科学研究機構分子科学研究所 助教 (メリーランド大学カレッジパーク校物理学 学科 ポスドク)	43
田中 宗 (兼任)	機械学習の高速化を指向した量子アニーリングの研究(早稲田大学)	早稲田大学グリーン・コンピューティング・ システム研究機構 主任研究員(研究院 准教授) (早稲田大学高等研究所 助教)	14
根来 誠 (兼任)	スケーラブル分子スピン制御技術の高度化により可能になる量子情報処理の新機能(大阪大学)	大阪大学先導的学際研究機構 特任准 教授 (大阪大学大学院基礎工学研究科 助教)	44
野口 篤史 (兼任)	表面弾性波を使ったエレクトロメカニクスの量子制御(東京大学)	東京大学大学院総合文化研究科 准教授 (東京大学先端科学技術研究センター 特任助教)	54
藤井 啓祐 (兼任)	知的量子設計による量子計算・量子シミュレーションの新機能創出(大阪大学)	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授 (東京大学大学院工学系研究科 助教)	18
山下 太郎 (兼任)	超伝導位相制御素子によるスケーラブル量子技術(名古屋大学)	名古屋大学大学院工学研究科 准教授 (情報通信研究機構未来 ICT 研究所 主任 研究員)	50
山本 直樹 (兼任)	フィードバック増幅による量子機能創出(慶應義塾大学)	慶應義塾大学理工学部 教授 (慶應義塾大学理工学部 准教授)	10

研 究 報 告 書

「真空中の浮揚ナノ粒子に対するレーザー冷凍機の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 相川 清隆

1. 研究のねらい

真空中に浮揚させた単一ナノ粒子系は、物体の運動を光で制御するオプトメカニクスの分野における新しい実験系として、近年急速に発達しつつある。基板上に固定された機械的振動子と比べて、浮揚ナノ粒子は熱的・物理的に極めてよく隔離されており、非常に高い Q 値を持つ点が特長である。

これまで、この実験系は、主にナノ粒子の重心運動を利用して、加速度や微小質量のセンシング、ナノスケールの非平衡物理の探究といった目的のために用いられてきた。これに対し、本研究では、環境から極めてよく隔離された単一のナノ粒子を観測できる点に着目し、単一ナノ粒子内での物性研究のための新たな舞台として浮揚ナノ粒子系を扱うための基礎的な技術の開拓を進める。特に、熱的によく隔離されていることを利用し、希釈冷凍機でも到達し得ないほどの超低温へと達する冷却の技術を開拓し、浮揚ナノ粒子系を用いて、単一ナノ粒子の内部状態および重心運動に関わる量子力学を探究する舞台を創り出すことを長期的な目標としている。

本研究課題では、浮揚ナノ粒子系での物性探究に向けた第一歩として、真空中・レーザー光中でのナノ粒子の振る舞い、特に帯電の有無やナノ粒子同士の衝突特性について調べ、これらの知見に基づいて浮揚ナノ粒子の内部状態を冷却する新しい機構を実証することを目的とする。また、浮揚ナノ粒子を扱うための基盤技術として、その重心運動の観測・冷却の手法を極限的に発展させることも、重要な目的である。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、まず真空中で光格子に捕捉されたナノ粒子という新しい系の基礎的な性質について探究を進めた。その結果、低圧力領域におけるパワースペクトルのスペクトル幅が背景圧力によらない一定値に近づくことを見出し、このスペクトル幅から粒子のサイズを推定する新しい方法を実験・理論の両面から確立した。また、2 粒子が単一格子内に捕捉されている場合に、大気圧下でも安定な発振を起こすことを発見し、この 2 粒子が互いの周りを回るような安定な軌道運動を行っていることを示した。

続いて、ナノ粒子の帯電特性について調べた結果、ほとんどの場合にナノ粒子は真空引きの際に比較的大きな正電荷を獲得することを見出した。この特性のため、2 粒子間には非常に大きなクーロン反発力が働くこととなり、粒子の内部状態が変化するような非弾性衝突は起こりにくいと考えられることがわかった。

本研究では、捕捉されたナノ粒子の重心運動の制御も、重要な基盤技術であることから、複数の手法について技術開発を進めた。他グループによってこれまでに知られていた、パラメトリックに捕捉光の強度変調を行う冷却手法を光格子内で実証すると共に、これより

かに冷却効率の高い新たな手法として、外部から振動電場を加える新奇手法を実証し、その冷却限界について理論的な検討を行った。その結果、充分低い背景圧力下では、重心運動の量子基底状態への到達が可能であるとの見込みを得た。

さらに、本研究で得られた知見を踏まえ、超高真空領域での実験を行うべく、排気系に大幅な変更を加えた新しい真空チャンバーの製作を進めた。

(2) 詳細

研究課題(A): 光格子中のナノ粒子の基礎的な振る舞い

ナノ粒子を真空中で扱う従来研究では、単一ビームが粒子の捕捉・観測・冷却に用いられていた。一方、ナノ粒子間の衝突をも課題とする本研究では、同時に複数粒子を捕捉できる光格子を利用した独自の実験系を構築した。この実験系において、ナノ粒子の振る舞いを理解する基盤となるパワースペクトルを調べたところ、従来知られていたものとは異なる振る舞いが観測された。すなわち、背景圧力に比例すべきスペクトル幅が、低圧力下では一定値に近づき、しかも振動の方向によって異なる値となることを見出した。ナノ粒子の3次元的な運動についての理論

モデルを立てて実験結果と比較した結果、ナノ粒子の低圧力領域でのスペクトル幅を振動周波数で規格化した値は、粒子が感じる光ポテンシャルの深さと直接関係があることを見出し(図1)、低圧力下でのスペクトル幅から粒子のサイズを推定する新しい手法の実現へと繋げることが出来た。

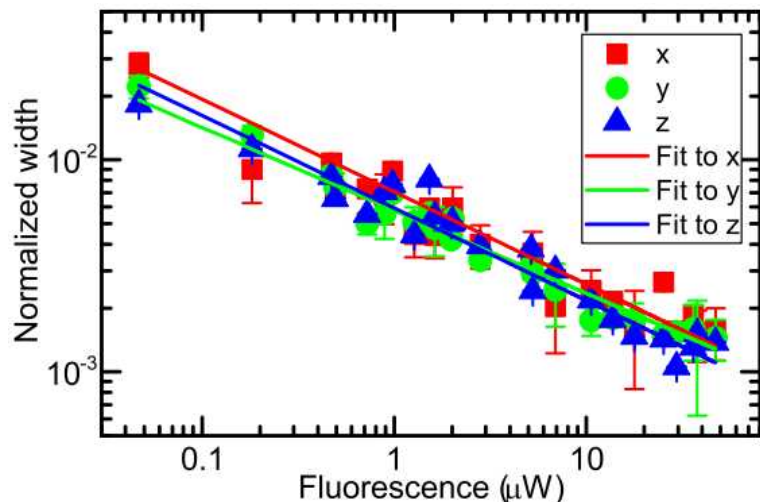


図1 規格化されたスペクトル幅と粒子による散乱光強度の関係

また、光格子にナノ粒子を捕捉する際に、大気圧下という非常に擾乱の多い環境であるに関わらず、しばしば強い発振が生じ、数時間に渡って安定に維持されることを発見した。この発振現象について様々な角度から実験を進めた結果、複数個のナノ粒子が単一格子内に捕捉されると、互いの周りを回るような軌道運動を始め、粒子を別格子に分離すると発振が消えること(図2)、また擾乱が少ないほど発振が強まりそうという直感に反し、0.1気圧程度以下では発振が消えること、といった非常に興味深い性質を明らかにした。この現象のメカニズムは明らかとなっておらず、今後の理論・実験の両面からの研究が必要である。

これらの成果は、いずれも当初は想定していなかったものであり、直接その後の研究に不可欠なものではないが、光格子に捕捉された真空中のナノ粒子という新しい系を確立し、その新しい基礎的な性質を見出すことができたという意味で重要である。

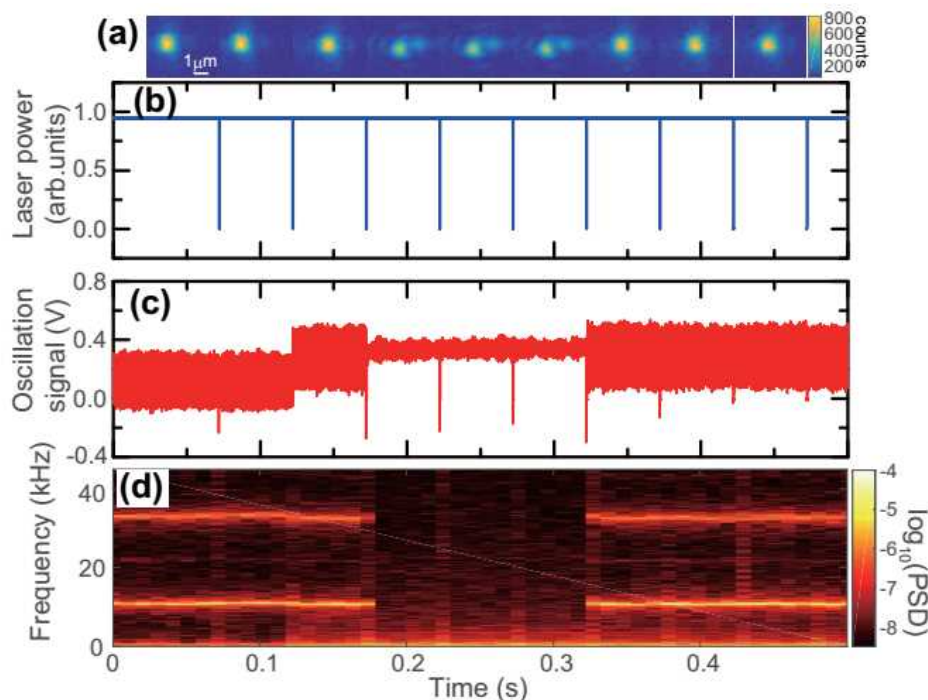


図 2 光格子中の複数のナノ粒子が示す発振現象

研究課題(B): 荷電特性の解明・より効率的な重心運動の冷却

本研究では、ナノ粒子間の相互作用を制御する目的で、捕捉光とは別の光を当ててナノ粒子を帯電させる手法の導入を想定していた。しかし、実験を進める中で、真空中のナノ粒子が自発的に比較的大きな電荷を持っている可能性が示唆されたことから、ナノ粒子の電場に対する応答を調べた。その結果、真空引きの行う過程で、主にイオンゲージの生成するイオンによって素電荷の 100 倍程度の電荷を獲得することがわかった。大きな電荷を持つことから、電場によって容易に重心運動を制御できることが予想されたため、重心運動の電場による制御の可能性を追究した。

真空中に光捕捉されたナノ粒子の重心運動を冷却する手法として、これまでに知られていたのは、ナノ粒子の運動を観測し、その結果に基づいて捕捉光に変調を加えてパラメトリックに行う手法であった。本研究でも、光格子中のナノ粒子の運動を、パラメトリック冷却によって 1K 以下にまで冷却できることを実証した。

ただし、先行研究により、パラメトリック冷却の本質的な問題点である、低温での冷却能力の弱さが制約となり、捕捉光のランダムな散乱による加熱に打ち勝てず、0.5mK 程度が限界であることが示されていた。

一方、本研究では、ナノ粒子が自発的に大きな電荷を持つという性質を活用し、外部から

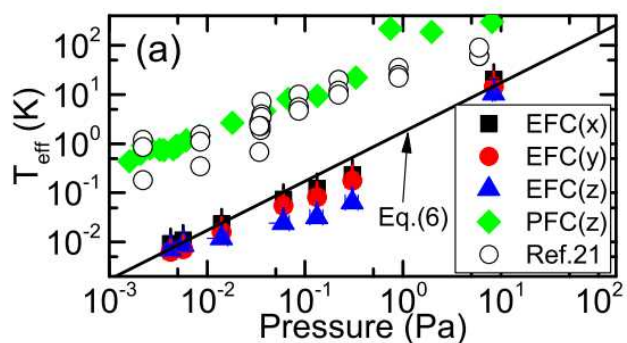


図 3 重心運動の温度と圧力の関係

加えた周期的な電場によってナノ粒子の運動を冷却する研究を進めた。その結果、電場冷却は高い冷却能力を持ち、パラメトリック冷却と比べて、同じ圧力で 1~2 桁低い温度へと冷却できることを見出した(図 3)。本研究で用いた実験装置の限界である数 mPa 程度の圧力において、3 次元的に 10mK 程度までの冷却を実現した(図 4)。さらに、冷却の限界についても理論的な検討を行い、中真空~高真空程度の圧力領域ではフィードバック信号を生成する帯域で制約されること、超高真空領域ではパラメトリック冷却の限界となっていた光子反跳加熱に打ち勝って、量子基底状態(数 μ K 程度)付近までの冷却が可能であることを示した。

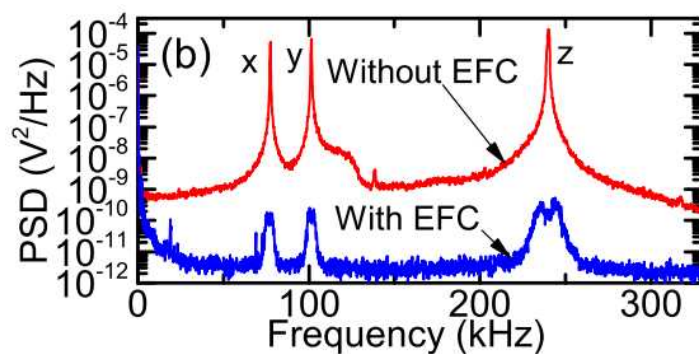


図 4 捕捉されたナノ粒子の 3 次元的なパワースペクトル

捕捉されたナノ粒子の内部状態と重心運動との結合をつくりだし、重心運動の冷却を通じて内部状態の冷却をも志す本研究においては、重心運動の冷却が本質的に重要である。そのため、今回得られた高効率な冷却手法は、目標の実現に向けた重要な布石であると言える。本研究により、超高真空環境でナノ粒子の捕捉・冷却を行う重要性が明らかとなったことから、デザインを一新した真空槽およびそれに関わる光学系の構築を進めた。

3. 今後の展開

本研究により、真空中のナノ粒子の重心運動を 3 次元的に超低温領域まで冷却する手法を確立できた。この手法を発展させることで、重心運動に関する量子基底状態への到達が可能であると期待される。原子、分子などの小さな粒子に対してよく研究され、応用されてきた量子力学が、どの程度大きな物体にまで適用できるかはわかっておらず、本研究で開発した実験系を用いることで、原子数が 1 億~10 億個程度のメソスコピックなサイズにおける量子力学の振る舞いについて、実験的に検証することが可能となると期待される。原子・分子・光子などに対してよく研究されてきた量子重ね合わせ状態が巨視的物体において観察されることはない、という事実に基づき、量子力学に対する様々な形での補正が理論的に検討されてきているが、これまで、適切な実験系がないために、理論を検証することができない状態であった。真空中のナノ粒子という新しい量子系を活用し、巨視的物体の重心運動に対する量子力学を探究することが、量子という分野における今後の重要な潮流の一つとなっていくと考えられる。

また、真空中のナノ粒子は、環境から極めてよく隔離されているという点で特異であり、その重心運動の極限的に冷却する技術は、新しいタイプのセンサーへの道を拓くと期待される。たとえば、ナノ粒子に働く加速度や、ナノ粒子が感じる角速度などを検知する高感度なセンサーなどの応用が考えられることから、本研究で開発した技術を実用へと近づける研究も重要である。

この他、本研究で実現した、光格子に捕捉された複数ナノ粒子系においても、興味深い研究が進められると期待される。2 個のナノ粒子を単一光格子内に閉じ込めただけの非常に単純な系で

あるにもかかわらず、粒子が永続的に軌道運動を行い続けるという、簡単には理解できない振る舞いが見つかったことから、この系にはこの他にもナノ物理、非平衡物理という観点から興味深い性質が潜んでいる可能性がある。これらの性質を明らかにすることは、たとえば星間物質が形成されるメカニズムに関する定量的な検討といった、複数のナノ粒子を利用した新しいタイプの実験にも繋がると期待される。

4. 自己評価

本研究の当初の目標は、真空中のナノ粒子の内部状態と重心運動を結合させ、重心運動の冷却を通じて内部状態をも冷却する機構の開発であったが、この機構の実現にまでは至らなかった。ナノ粒子同士の衝突を利用することで、内部状態と重心運動を結合させる手法を想定していたが、ナノ粒子が想定よりずっと大きな電荷を自発的に持ち、粒子同士の反発が非常に大きいことが主な問題点であった。ただし、逆にこのような性質を積極的に活用することで、ナノ粒子の重心運動を量子基底状態付近まで冷却できる見込みのある、新しい効果的な冷却手法を提案・実証できた点は、想定以上の重要な成果であったと言える。

本研究は、全期間を通して、学生数名と共に適宜役割を分担しながら遂行した。そのため、データ収集中に次の実験装置を準備する、あるいはデータ解析中に装置の改良を行う、といった効率的な研究の進め方ができた。研究予算についても、研究の進展状況を鑑みつつ、実験結果を踏まえて装置の改良を順次進めていく形をとったことから、予算を非常に効果的に利用し、成果へと繋げることができたと考えている。

本研究の成果は、主に基礎科学に対して重要な貢献を行うものである。量子力学は、20世紀を通して飛躍的な進展を遂げ、最近ではこれを計算やセンシングへと活用する応用研究へとシフトしつつあるが、いまなお理解されていない側面も多い分野である。特に、我々の日常に関わる巨視的物体が、なぜ原子・分子・光子といった粒子で調べられてきた量子力学の振る舞いを示さないのか、という根源的な疑問に答えられる理論は確立しておらず、その実験的検証は量子力学の次なる重要な課題である。この観点からいえば、新しいメゾスコピック量子系を開拓した本研究は、量子力学の基本を明らかにする基礎科学としての側面が強いと同時に、将来的にはその量子的性質を有効活用する新しいタイプのデバイスへの道を拓くものであるとも言える。特に、真空中のナノ粒子が持つ、環境からよく隔離されているながら長時間観測が可能であるという特長は、高感度センシングに適していると考えられることから、その応用研究を通じた社会的な波及効果も大きいと期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. M. Yoneda, K. Aikawa, “Thermal broadening of the power spectra of laser-trapped particles in vacuum”, J. Phys. B 50, 245501 (2017).
2. Mitsuyoshi Yoneda, Makoto Iwasaki, Kiyotaka Aikawa, “Spontaneous continuous orbital motion of nanoparticles levitated in air”, Phys. Rev. A 98, 053838 (2018).
3. M. Iwasaki, T. Yotsuya, T. Naruki, Y. Matsuda, M. Yoneda, K. Aikawa, “Electric feedback cooling of single charged nanoparticles in an optical trap”, Phys. Rev. A 99, 051401(R)

(2019).

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

発 明 者: 相川 清隆

発明の名称: 微小粒子を用いる加速度計

出 願 人: 東京工業大学

出 願 日: 2017/02/17

出 願 番 号: 特願 2017-028232

公 開 番 号: 特開 2018-132500

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 平成 29 年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞 受賞
2. 平成 29 年度 末松賞(東京工業大学) 受賞
3. (invited talk) K. Aikawa, "Cold nanoparticles in an optical lattice: towards investigating multi-particle dynamics", the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy, Kanazawa (Japan), 26 September 2018.

研究報告書

「量子光学技術を駆使した生物系を含んだ散逸と量子の研究」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 加藤 真也

1. 研究のねらい

本研究のねらいはさがけ研究に先立って実現した光ファイバー共振器を用いた共振器量子電気力学(CQED)系の技術を発展させ、少数の制御性の高い量子系と環境を模した外部変調が協調動作するような実験システムを構築し、それらの間の関係を研究することである。その発想の起点には近年大きな進展を見せている光合成光捕集系を始めとした生体環境内の量子性に関する研究がある。そこでは一般に量子性が見られるとは考えられなかった生物内環境でも、光合成システム内の光エネルギー輸送といった特定の機能に於いて分子振動といった環境を巧みに利用することで単一励起レベルでの高効率輸送が実現していることが調べられてきた。具体的な光合成分子を対象とした研究は世界中で精力的に進められているが、分子配置といった構造や結合強度といったパラメータを系統的に制御した実験は天然の既に完成している分子群を対象に行うことは難しい。そこで実際の分子を用いたトップダウンと呼べる研究とは逆に、個々の量子系を接続しながら実験を行うボトムアップ型のアプローチを試みるというのが本研究のねらいである。

具体的には、単一の CQED 系として動作することが確認された独自システムを拡張し、連結光共振器とそれらに結合する冷却原子からなる装置を開発する。低損失で複数の CQED 系を結合させた実験は世界でも例がないことから、量子光学の実験としても非常に重要である。それに加え、連結された個々のノードに対する操作技術を開発することで、系の特徴とエネルギー伝搬の物理の間の関係を系統的に研究することを目指す。本研究は量子情報処理を目指した研究とは目指す方向性が大きく異なる点も重要である。量子状態の保持や制御の品質が最重要課題である量子情報処理の研究とは異なり、その視点ではむしろ排除されるべき量子系同士の不均一な接続や、外界からの変調、ノイズの混入に着目する点が大きな違いである。それらを制御して導入するという点に於いては既存の量子情報処理実験よりも難易度の高いものになるが、孤立量子系では実現しない機能が周囲の環境を巻き込むことで発現する可能性は、量子機能を考える上で環境を含めたより広い視点に立った知見をもたらすと期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究は複数台の CQED 系を光ファイバーで相互接続し、それぞれの装置に変調や個別の特徴を持たせる。その上で全体としての光エネルギー伝搬の性質が個々の特徴に応じてどのように変化するかを調べる。その目標に向けてまず取り組むべき課題は2台の CQED 系を作製し、それらが低損失に接続できることを示すことである。そこで、高性能な光ファイバー共振器を含む装置2台を新たに設計し、実験に必要なレーザー冷却装置もそれらに合わせて独立に制御できるものを構築した。光共振器として接続するためには、光ファイバー部分を接続するだけでは不十分で、

共振器の偏光モードの整合や共鳴周波数の制御、共振器ミラーの反射率制御等の技術が必要で、それらも全て装置に組み込んだ。その結果、世界で初めて CQED 系を低損失に相互接続し、連結された光共振器の共振器モードと離れた装置内に局在する原子集団の結合の観測に成功した(論文1)。次の課題は、実際の光合成分子系にあるような複雑な接続トポロジーを再現するために、分岐や合流といった接続を可能にするスプリッタ・コンバイナの実現があげられる。そこで、市販のスプリッタを先の2共振器のシステムに追加する実験と、より高性能なスプリッタの自作システムの開発の両方を行った。市販のものを用いた実験では挿入損失の問題はあったが、新しく観測可能になった共振器モードを用いた実験に成功した(論文2)。自作システムに関しても、市販品よりも高性能なスプリッタが作製可能になったことを示した。高性能スプリッタの作製が可能になった点は任意分岐比のスプリッタの実装を可能にし、今後の研究で重要な基盤技術の実現に成功したと評価できる。さらに、連結された共振器の透過性能の外部変調に対する応答についての実験も行った。同種の実験がすでに報告されていたが、そこでは外部変調の帯域に関する考察が不足しており、系の特徴的な応答時間に対する本質的な議論が欠けていた。それに対し CQED 系を応用し原子の状態制御を活用することで、変調の帯域幅を大幅に引き上げることに成功した。その結果、外部変調によって連結共振器系の振る舞いが変化する様子を、理論計算と実験の両面で議論し、それらが整合することを示した。この結果も接続された系の結合の条件や外部操作によって全体の性質が変化する様子を系統的に研究が可能であることを示したという点で重要な成果といえる。

(2) 詳細

以下では、本研究期間中の主要な成果3点について詳細を説明する。

研究テーマ A「2台の CQED 系の低損失接続」

本研究では CQED 系を複数接続したシステムを構築することを目指している。CQED は光共振器とそれと結合する2準位原子からなる量子システムである(図1a)。それらの相互接続であるが、接続部での損失によって確率的に2つのユニット間を光子が伝搬している形の実現例が挙げられる程度で、系全体でコヒーレントに振る舞う低損失接続は実現していなかった。つまり、2台の CQED 系を低損失接続するだけでも技術的には大きな挑戦といえる。そういった状況に対して、本研究では独自の全光ファイバー共振器を用いた CQED 系(図1b)を応用することで低損失相互接続を実現した(論文1)。

このデバイスは CQED 系を構成する光共振器中の光子が常に光ファイバーの導波路中に存在するという特徴を持つ。従って、光ファイバー共振器に連なる光ファイバーをそのまま相互接続することで、原子と相互作用する光子を自由空間に取り出さずにユニットからユニットへと伝搬させ、システムを拡張していくことが可能になる。研究期間

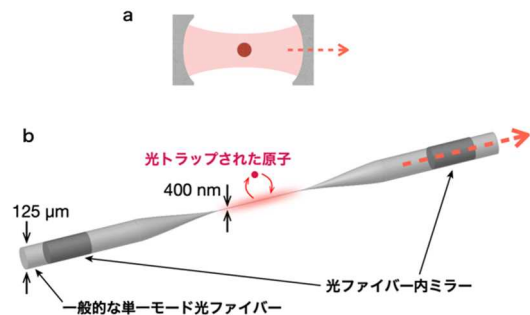


図1 CQED 系の模式図。a. 一般的によく用いられる対向した凹面鏡からなる共振器を用いた CQED 系の模式図。中央の点は共振器と結合する原子を現す。b. 本研究で用いる光ファイバー共振器を用いた CQED 系の模式図。原子は細く加工された部分(直径 400 nm)で共振器中の光と相互作用する。

中の最初のテーマとして、この低損失接続を実際の装置で実現することに取り組んだ。

全光ファイバー共振器を用いた CQED 系は、光共振器に対し、レーザー冷却され、光トラップされたセシウム原子が結合する形で構成される。本研究では現実的な装置規模に抑えるためにレーザー光源から光共振器を内側に含む真空装置までを一貫して最適設計し、一般的なレーザー冷却実験に用いられる装置に比べると格段にコンパクトな装置を開発した(図2a)。また、CQED 系として成立するためには非常に高い共振器性能を要求されるが、それを確実に満たす光ファイバー共振器の作製技術も確立した。こうして独立して動作可能な装置(CQED ユニット)を2台開発し、それらの間を光ファイバーで接続する実験を行った。

原子が結合しない場合、2つの Fabry-Perot 型共振器を低損失な導波路で結合しているので、全体としては3個の共振器が連結していることになる(図2b)。実験でも偏光を含めた条件を適切に設定することで、連結共振器のノーマルモードに対応する3個のピークを持つ透過スペクトルが得られた(図2c 青線)。さらに両端の共振器に原子を結合させた場合のスペクトルを図2c に示す(赤線)。原子がない場合に比べ、中央のピークが分裂し、両脇のピークはそれぞれ周波数軸上で外側にシフトしている様子がわかる。定性的には3個の共振器のノーマルモードが離れた2地点の原子集団とそれぞれ結合し、その相互作用を反映してスペクトルが変化していると言える。連結共振器内の非局在化したモードと離れた2地点の原子の結合は、接続部の光ファイバーの長さを変更することでよりその特徴が明らかになる。図2d にあるように連結共振器のノーマルモードは連結部分の共振器からの寄与の有無で $c_{\pm}$ と d の二種類に分けることができる。特に、 d は連結部からの寄与がないために、その共鳴周波数は連結部の詳細に依存しない。従って、例えば連結部の光ファイバーの長さの変更という系全体から見たら大きな変化に対しても変化はしな

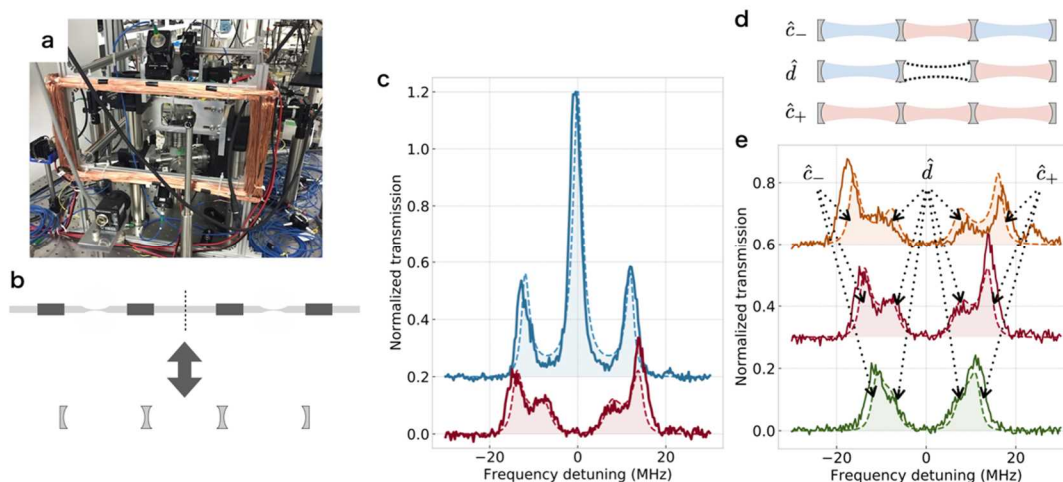


図2 連結 CQED 実験。a 開発した CQED ユニット主要部。同型の装置をもう一台準備して接続実験を行った。b 連結光ファイバー共振器の模式図と対応する凹面鏡を用いた光共振器。c 連結共振器の透過スペクトル。青線が共振器のみ、赤線が両端の共振器に原子を準備したもの。見やすさのために縦軸方向にオフセットを設けている。実線が実験、点線が数値計算結果。以下のグラフでも同様。d 連結共振器のノーマルモードの概念図。 $c_{\pm}$ が全共振器に渡ってモードが存在するのに対して、 d は中央の共振器に振幅がない。e 接続部の長さを変更した場合の原子を含めた透過スペクトル。上から接続部の長さを 0.83 m、1.23 m、2.27 m と変化させた結果。

いはずである。それを実験で実際に確かめた結果が図2e である。ファイバー長さに依存して変化する $c_{\pm}$ に対応するピークに対して d に対応するピークの共鳴周波数は変化しないことが観測できた。

研究テーマ B「スプリッタの導入実験と作製装置開発」

複数ユニットの接続を考えた場合に、分岐・合流が可能か否かで実現可能な配置のバリエーションは大きく異なる。実際の光合成分子系でもループ構造を始めとした複雑な結合が内在することが知られており、本研究を進める上でもその実現は重要なポイントになる。その配置の実現に光ファイバーネットワークを利用する本研究では市販の光ファイバースプリッタの活用が可能である。

ただし、多くの市販品は離散的な分岐比と数%程度の挿入損失がある。系統的な実験には任意分岐比の実現は必須であり、挿入損失のような制御できない損失は実験の幅を制限する。そこで、市販品利用で可能な実験と、より高度な実験に向けて損失が低く任意の分岐比を実現可能なスプリッタの作製装置の開発の両方を行った。

市販品を用いた実験は、先の2ユニットの結合実験の発展でユニット間にスプリッタを挿入した装置を作製した(図3a)。この場合、先の実験ではアクセスできなかった中央部分の共振器に光の注入や、そこからの光の測定が可能になる。物理的な意味では、先の2ユニットの実験では観測できなかった、原子と光共振器全体が構成するノーマルモードの一つ(図 3b, $|cDM\rangle$)を直接励起し、分光観測することに成功した(図 3c、論文2)。

市販品を用いた実験でもスプリッタを入れることで初めて可能になる実験の結果を得ることができたが、今後の拡張性を考えた場合には任意の分岐比やより一層の低損失化は不可欠である。光ファイバーを用いたスプリッタの作製手法も様々あるが、低損失化を考え本研究で培ってきたファイバ加工技術を応用する手法をとった。その結果従来のファイバー加工装置を発展させることで、2x2のファイバースプリッタを挿入損失が 1%以下で作製することに成功した(図 3d)。この装置では作る際の設定で分岐比も任意に変更が可能である点も重要な成果といえる。また、2x2のスプリッタを作製する場合には2本のファイバーとなるが、装置構成の工夫で、複数のファイバーの同時加工も可能な装置を実現した。本研究で用いる加工されたファイバーは非常に繊細で微粒子の付着によって容易に性能が劣化する。1

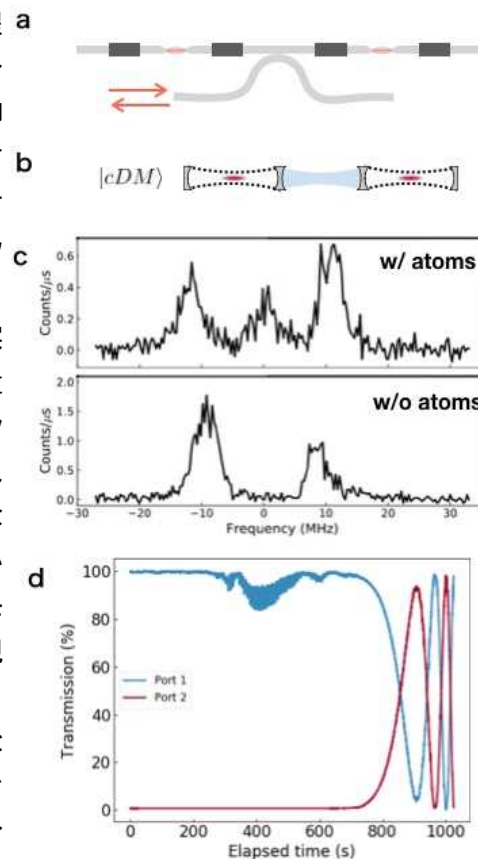


図3 スプリッタに関連した実験。a スプリッタを追加した連結共振器の模式図。b 観測した連結 CQED 系のノーマルモードの模式図。c スプリッタを用いた反射分光結果。上段が共振器に結合する原子あり、下段がない場合の結果。原子と結合した時のみ、中央に $|cDM\rangle$ に対応するピークが観測される。d スプリッタ作製時の透過パワーの推移。加工時間に応じて分岐比が変化し、加工終了のタイミングを制御することで任意分岐比のスプリッタを作製できる。

度に1本しか加工できなかったこれまでの加工後すぐに真空環境に導入するために1台の真空槽に1本のファイバーを入れることしかできなかった。しかし、この新しい装置は複数本同時加工が可能のため、複数本のファイバーを同時に同じ真空槽に導入可能となった。これは多数ユニットを用いた実験を実現させる上で重要な集積化の基盤技術として着実な成果といえる。

研究テーマ C「連結共振器系の変調に対する透過率の変化」

本研究では CQED ユニートを接続するだけでなく、外部からの変調を加えることによる変化に興味を持っている。そこで連結システムの最小構成単位である2個の光共振器が連結したシステムを用いて、外部変調による系全体での光透過率の変化を測定した。本実験のポイントは2つある。一つはCQED系の原子のエネルギー状態を光で高速に制御することで、従来行われてきたような連結光共振器システムにはない高速な変調が可能になった点である。光合成分子系でも環境系との結合レートが各分子間の結合やエネルギーギャップと同程度であることが効率的な駆動に重要であることが指摘されている。そういった観点でも変調帯域が系の特徴的な時間スケール(連結共振器の間の光子のホッピングレートや各共振器での光子の寿命)に匹敵することは本質的に重要である。さらに、光共振器を構成するミラーの反射率を制御可能な本実験では、連結共振器の結合の具合を変化させることが可能な点も大切である。結合によって系全体に渡る共振器モードが有意な場合と、局所的なモードの確率的な結合とみなすべき領域の両方を統一的に実験できることは他の系にはない利点である(図4a)。

まず、変調のない場合で共振器間の結合の強さの影響を先の実験のような分光実験を通じて確認した(図4b,c)。結合が十分弱い(中央のミラーの反射率が高い)場合にはそれぞれの共振器が確率的に光子を受け渡していると見ることができて、観測されるスペクトルは単一のピークを持つ(図4b、青線)。それに対し、結合が強く(中央のミラーの反射率が低い)、系全体にまたがるノーマルモードが有意な場合、スペクトルは2つのノーマルモードを反映して分裂して観測される(図4c、青線)。それらの条件に加え原子を結合させた場合は相互作用によってスペクトル形状が変化する(図4b, c、赤線)。

連結共振器としては、原子が結合することによって特定の波長に対してその透過率は著しく下がる。図4b, cの周波数原点付近での透過率が青線から赤線へと変化していることがそれに対応する。そういった条件で、原子のエネルギー状態を高速に変化させてその影響による透過率の変化を測定した(図 d, e)。共振器同士の結合が十分弱い場合には、原子のいない共振器と原子と結合して変調をうける共振器が確率的に結合しているとみなせる(図4a 上段)。従って変調による変化は単一の共振器のみがそれを受けている場合と同じ応答を示す。それは実験でも数値計算の結果でも読み取れ、独立に行った単一の共振器の場合と同じ変調周波数(図4d、緑破線)で透過率増強のピークが観測される。それに対して、共振器間の結合が強く、全体に渡るノーマルモードが有意な場合は応答に変化が生じる(図4e)。実験、数値計算ともにみられるようにピークの位置が高周波側にシフトする。これは、局所的な変調に対する変化が系全体に広がる共振器モードを通じて全体の透過率の変化に影響を及ぼしていると解釈できる。今回の実験は個別ユニットの特性だけではなく、連結の詳細に依存して全体の振る舞いに変化する様子を捉えたという点で重要だろう。この結果はより複雑な構造を持つ実際の光合成光捕集系の物理を、連結光共振器で考える研究の基礎をなす成果と言える。以上の内容については現在論文を準備中である。

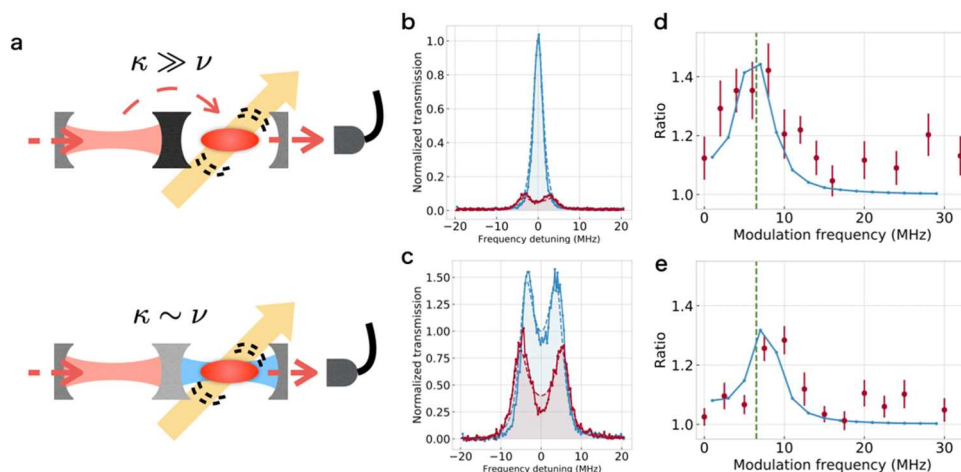


図4 連結共振器系の外部変調に対する変化。**a** 実験の模式図。共振器同士の結合レート(ν)が共振器中の光子の寿命(κ)に対して小さい場合(上段)と同程度の場合(下段)。本実験では片方の共振器にのみ原子が存在し、外部からの光でそのエネルギー状態が変調される。**b,c** 原子が結合していない場合(青線)と、している場合(赤線)の透過スペクトル。**d,e** 原子への変調の周波数に対する透過率の変化。変化の基準はエネルギー変調が時間的に変化しない場合を基準としている。共振器の条件は **b,d** が $\kappa \gg \nu$ に対応し、**c,e** が $\kappa \sim \nu$ に対応する。

3. 今後の展開

2ユニットの直接接続やスプリッタの導入といった複雑な構造を実現する上で必須の技術はこの研究期間に確立することができた。今後の展開としては、これらの技術を統合し、例えばループ構造のような特徴的な配置をもつ結合システムの実験に進む方向を考えている。また、それらと並行して、それぞれのユニットで単一の原子を選択的に結合させる実験も今後の飛躍には重要であると考えている。これまでの実験は基本的に集団原子が光共振器と結合する形をとってきた。装置の性能としては単一の原子でもいわゆる強結合領域で実験できることがわかっている。実際に初期の実験においては単一の原子が結合した状態を観測しているが、確率的にそれを実現していたためごくまれに単一の原子が結合する結果を事後選択する形で利用していた。この手法だとユニット数が増えれば成功確率が指数関数的に減衰するために、多数のユニットで行うのは実験時間的に現実的でなくなる。そこで、光ピンセットといった技術を併用し、選択的な単一原子の準備を行う実験にもとりかかっている。単一の原子が準備できれば、系内に単一の光子を生成することが可能で、これまでの実験のような微弱コヒーレント光ではなく、その非古典性を議論できる単一光子の伝搬について研究することができるようになる。

これまでの変調は強いコヒーレント光による古典ノイズと呼べるものを用いてきた。ところが、実際の光合成分子を用いた最近の結果で、光エネルギー伝搬の量子性については量子化された分子振動と光励起された電子の結合がその本質であるという指摘がなされてきた。つまり、古典的な環境と考えていた分子振動もまた量子的な取り扱いをすることが現象の理解に重要ということである。そういったより複雑な実験環境に関しても、光ファイバー共振器の性質を応用して再現で

きるのではないかと考えている。具体的には変調用として導入している光についても光共振器を構成し、変調用の光の量子ゆらぎが系の振る舞いに影響を及ぼすような構成を考えている。こういった多色の光共振器も本研究で使っている光ファイバー共振器のシステムでは作製が十分現実的で、装置構成について検討を始めている。

それらに加え、2～3ユニットを超える数のユニットを現実的に作製するためには集積化を含めた工夫も必要になる。スプリッタ作製装置の項でも触れたが、一番重要な光ファイバ加工の部分ではその方向性のめどがたつた。今後は複数本の光ファイバーを収納する真空槽の設計と、多数の光共振器を安定的に結合させる工夫が必要である。それらの開発を着実に進め、当初目標としていた7ユニットの結合に向けて装置全体のさらなる成熟を図る予定である。

4. 自己評価

本研究期間中には、独自技術を応用することで世界で初めて CQED 系を低損失に接続することに成功した。また、今後の展開を踏まえ低損失・任意分岐比スプリッタ作製技術、それと同時に集積化を可能にする複数ファイバ加工技術を確立した。さらに、本研究の目的である連結した量子システムと外部変調の関係を研究するコンセプトの元、2ユニット系での実験も行い、数値計算と比較することで本実験システムの特徴を活かした測定にも成功した。当初計画ではこれらの成果の上にユニット数を増加させ、実際によく調べられている光合成系の研究と比較できるような実験を行う予定であったが、期間中では少なくともそれに向けた着実な技術基盤の整備ができたと評価している。また、研究箇所の移動に伴い、期間途中で何もない実験室からの再スタートとなったが、さきがけのサポートのおかげで円滑な移行ができた点は非常に良かったと感じている。

世界に目を向けてみると、超電導量子回路やイオントラップという異なる量子の実験系で、結合する量子系と外部変調による物理を光合成光捕集系の物理とからめた議論をする論文が海外の有力グループから昨年、今年と立て続けに出版された。そういった状況を考えると研究開始時にたてた本研究のコンセプトは世界的に見てもさきがけていたと呼べるが、他の物理系での実験に先行されている側面も事実である。単一原子の制御技術を開発し、より高度な実験を行って世界にアピールしていく必要があるだろう。また、光ファイバーを用いた本研究は組み換え可能である点や結合の制御といった他の実験系にはない利点も存在する。さらに同じ原子に複数の光が強く結合する新しい CQED 系は先行する実験の古典的な環境ノイズの再現とは質的に異なる実験を可能にする。本さきがけで培った基盤技術を応用することで、そういった独自デバイスの利点を生かした研究でさらなる展開が期待できると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Donald H. White, Shinya Kato, Nikolett Nemet, Scott Parkins, and Takao Aoki, "Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems," *Physical Review Letters* **122**, 253603 (2019).
2. Shinya Kato, Nikolett Nemet, Kohei Senga, Shota Mizukami, Xinhe Huang, Scott Parkins,

and Takao Aoki, “Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics,” Nature Communications **10**, 1160 (2019).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件 (公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[国際学会発表]

1. Shinya Kato and Takao Aoki, “Transmission enhancement in a coupled-cavities with fast modulation through atom-cavity interaction,” Gordon Research Conference: Quantum Control of Light and Matter, Newport, US (2019.8).
2. Donald H. White, Shinya Kato, Nikolett Nemet, Scott Parkins and Takao Aoki, “Observation of nonlocal atomic saturation in a coupled-cavities quantum electrodynamics system,” International Conference on Laser Spectroscopy, Queenstown New Zealand (2019.7).
3. Shinya Kato, Nikolett Nemet, Kohei Senga, Shota Mizukami, Xinhe Huang, Scott Parkins and Takao Aoki, “Observation of dressed states in coupled-cavities quantum electrodynamics,” Optical Nanofiber Applications: From Quantum to Bio Technologies, Okinawa, Japan (2019.6).
4. Shinya Kato, Nikolett Nemet, Kohei Senga, Shota Mizukami, Xinhe Huang, Scott Parkins, and Takao Aoki, “Coupled-cavities quantum electrodynamics with a cavity array in a single optical fiber,” The 26th International Conference on Atomic Physics, Barcelona, Spain (2018.7).

[国内会議]

1. (招待講演) 加藤真也、「結合共振器量子電気力学系とその展開」、応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会、長野県、2018年12月。
2. 加藤真也、千賀功平、水上翔太、黄心和、青木隆朗、Nikolett Nemet、Scott Parkins、「ナノ光ファイバー共振器を用いた結合共振器量子電気力学」、日本物理学会第73回年次大会、千葉県、2018年3月。

[プレスリリース]

- 「二つの共振器量子電気力学系を光ファイバーで低損失・高効率に結合成功」2019年3月11日。
 - 日経新聞電子版「早大と JST など、二つの共振器量子電気力学系を光ファイバーで低損失・高効率に結合成功」(2019年3月11日)
 - EE Times Japan「複数の系を高効率に結合可能: 2 つの共振器量子電気力学系を光ファイバーで結合」(2019年3月14日)

研究報告書

「分子/二次元無機膜ヘテロ界面における量子伝導の発現と制御」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 桐谷 乃輔

1. 研究のねらい

本研究は、二次元の無機薄膜上において2次元トポロジカル絶縁体(量子スピンホール)相の発現をねらいとしている。発現方法として、溶液処理へと繋がる分子接合法の開拓を狙った。本技術は、トポロジカル絶縁体相を大面積、位置選択的、局所的に発現する技術へ発展すると考えられる。展望としては、任意の形・サイズでトポロジカル絶縁体相をデバイス中へ作りこむ、あるいは、非散逸流を利用した高速デバイスなど工学へ発展すると期待される(図1)。

半導体デバイスの集積度が限界を迎える今、情報処理技術開拓への機運が高まっている。特に量子コンピュータをはじめとする量子情報技術に大きな期待が寄せられている。近年、トポロジカルに保護された物質相が見出され、擾乱に強い量子ビット構築へと繋がる基材として注目されている。しかし、この稀有なトポロジカル物質「そのもの」を如何に作製するのか、さらには今後工学へと如何に発展させるのか、などの物質プラットフォームに課題があると考えられる。

本研究では、通常は絶縁体であるが潜在的に量子スピンホール相を示す物質を変換・制御して、利用するための技術開拓に取り組んだ。対象として、二次元膜状の無機物質である遷移金属カルコゲナイド (TMDC: Transition Metal Dichalcogenide)に注目した。この物質は、層状の結晶性化合物群である。成膜技術の進展に伴い、ウェハスケールで結晶を取り扱うことが可能となっている物質であり、広く工学への展開が期待されている。単層の TMDC は 0.7 nm 厚の極薄の物質であり、同時に原子レベルの平坦性を有している。従って、適切な外部環境において、結晶全体の状態を制御できると考えられる。TMDC 結晶は一般に半導体相であるため、量子スピンホール相への転移技術が必要である。この技術開拓が本研究の対象である。また、トポロジカル絶縁体相とされる 1T' 相は準安定相とされるため、如何に 1T' 相へと転移を発現させるかと共に、如何に安定に取り扱うか、この点も課題となる。

本プロジェクトを通して、極薄膜無機物質である TMDC に対して、分子接合により状態制御を実現するための技術開拓を試み、相変換を示唆する結果を得た。本アプローチは、溶液を用いたプロセスであるため、トポロジカル絶縁体相を任意の位置に発現する、配線するなど、今後工学プロセス親和性の高い手法へと繋がると期待している。

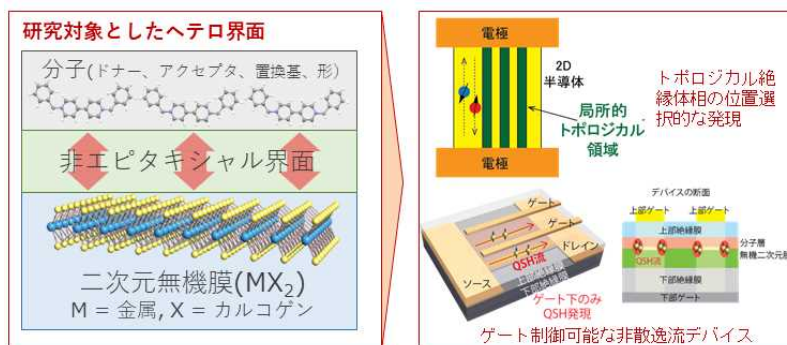


図 1.対象としたヘテロ界面および期待される工学展開の模式図

2. 研究成果

(1) 概要

化学的安定性の観点から、二次元の膜状物質である二硫化モリブデン(MoS_2)や二セレン化タングステン(WSe_2)を中心に取り扱い、分子接合に伴う電子状態変化、物性変化、およびトポロジカル相転移を探索した。戦略として、既往研究を参考に、強くキャリア変調を誘起する分子との接合、および、二次元無機膜上に無数に存在する欠陥への分子化学的なパッシベーションによる結晶の高品質化、の2つの方針から研究を進めた。具体的な研究テーマを下記に記す。

A) 分子接合による二次元無機膜の電子状態を変える基礎技術の開拓

MoS_2 は半導体相である $2\text{H}(1\text{H})$ 相を示すことが知られているが、準安定相として 1T や $1\text{T}'$ 相への転移を示すことが知られている。量子スピンホール相である $1\text{T}'$ 相は、金属相として知られる 1T 相の緩和によって発現する。ただし、 2H 相から 1T 相への転移障壁は高く、その障壁を下げる戦略としてキャリア注入法が提案されている。本研究では、高い還元能を示す酸化還元活性分子を利用する技術を展開して、 MoS_2 を金属的な状態へと転移できることを明らかとした。さらに、 $1\text{T}'$ 相への転移を促す分子技術を開発し、量子スピンホール相の安定発現できる結果を見出しつつある。この結果は、テーマ C と関連して現在検証中である。

B) 二次元無機膜の高品質化手法の開拓

既往の量子スピンホール効果の報告例において、高品質な結晶界面の実現が重要である。そこで、 0.7 nm 厚の膜状物質である単層 MoS_2 に対して、欠陥をパッシベーションする手法の確立を試みた。適切な環境で酸性分子を処理したところ、単層の MoS_2 において、フォトルミネッセンス光強度を定量的に数百倍上昇させる手法を見出した。スペクトルの解析から、キャリアの再結合サイトへの分子によるパッシベーションが起きていることが示唆され、二次元無機膜を高品質化するための有望な指針を開発した。

C) 分子接合による量子スピンホール相への変換および検証

上記 A および B の研究テーマと連動して、各サンプルに対して量子スピンホール相の実現を試みてきた。これまでに、量子スピンホール相の発現を示唆する光学スペクトルを得ることに成功している。現在はデバイス測定から、さらなる検証を進めている。今後、工学への展開を含めて状態を制御するためには、測定技術や電極作製技術の向上が必要であると考えている。

(2) 詳細

研究テーマ A 「分子接合による二次元無機膜の電子状態を変える基礎技術の開拓」

二次元無機半導体である MoS_2 の電子状態を強く変調するための分子技術を開拓した。まずは、高濃度で酸化還元活性なビオロゲン系分子を生成する機構を見出した(図 2. ChemistryOpen, 2019)。従来の手法では、長時間の連続的な反応環境の維持が難しく、ビオロゲン系分子の高濃度化が難しかった。そこで、非平衡な対流場を用いることで、循環環境を作ることを実現し、連続的に還元分子であるビオロゲン分子を生成し、高濃度溶液を得ることに成功した。本技術の開拓により、高電子注入を可能とする手法を得た。次に、分子を

二次元無機膜へと強く相互作用をさせることで、電子状態を強く変調する手法を見出した。この電子変調を定量的に実証するために、フォトルミネッセンス測定を行ったところ、単層の MoS_2 において、発光強度を百倍程度上昇させることに成功し、分子溶液のキャリア変調能を強化する手法を開拓した(図 3. Appl. Phys. Express, 2019)。さらに、トランジスタ特性においても、本手法の有効性が示唆され、縮退半導体としての挙動が得られることが確かめられた。さらに、分子の電子注入量を変調する手法として、分子の堆積状態を変える(パターン形成)手法の開拓にも取り組んだ(ACS Nano 2018, ACS Appl. Mater. Int. 2019)。この手法は、現時点ではドナー能を巨視的には減少させる傾向にあるが、リソグラフィ技術を用いずに 200 nm スケールの無数のパターン生成を可能とする発見へと繋がった。今後、局所的なナノスケールにおけるキャリア変調技術として有効であると考えている。

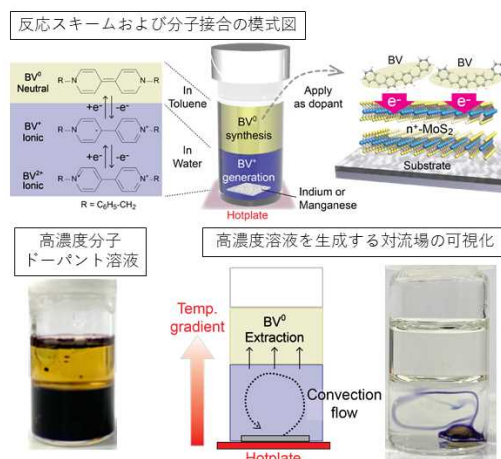


図 2. 高濃度分子ドーパント溶液の作製スキームおよび対流場の可視化

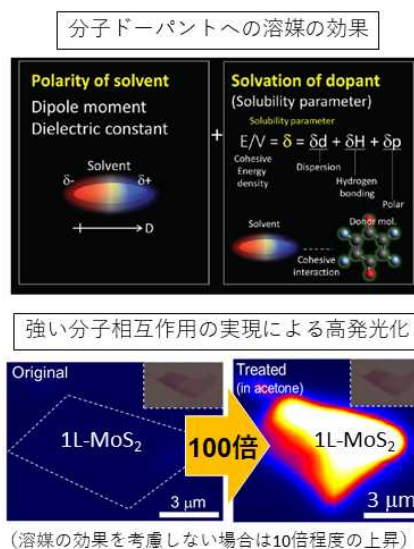
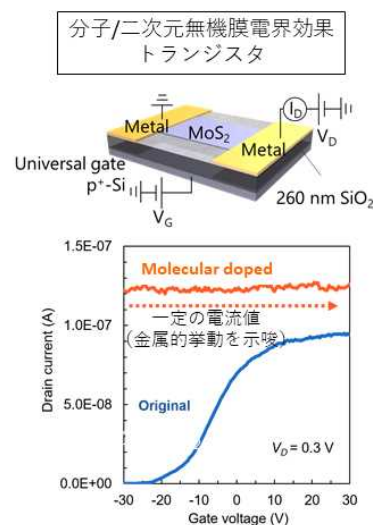


図 3. 高電子注入を可能とする溶媒の効果と単層 MoS_2 によるフォトルミネッセンスを用いた実証実験(左)。溶媒の効果を取り入れることで、分子による MoS_2 への相互作用が変わることで、高発光特性へと繋がった。溶媒の効果を取り入れた分子/ MoS_2 界面において見出された縮退した伝導特性(右)。



研究テーマ B 「二次元無機膜の高品質化手法の開拓」

二次元無機結晶膜を分子処理によって高品質化する手法として、定量的に状態を劇的に変える分子技術を見出した。超酸分子や酸処理により、キャリアの再結合サイトのパッシベーションが効果的に行われることをフォトルミネッセンス測定より明らかとした(Langmuir 2018,

and in preparation)。分子処理後において、フォトルミネッセンス光強度は数百倍の上昇を示した(図 4)。解析により、二次元無機結晶面内に存在する欠陥をパッシベーションする技術として有効であることが示唆された。本技術は、剥離法および化学気相成長法で得られる二次元無機結晶のどちらに対しても有効となることが確認された。尚、本処理の前後において、量子スピンホール相への転移を示さないことが確認された。研究テーマ A および C における電子注入前の前処理として、結晶の質の向上法として有効であると考えている。また、本手法は、極薄膜(0.7 nm 厚)の結晶性半導体の光学特性を定量的に向上する方法であり、今後は光物性探索や光デバイス展開へ繋がる成果であると考えている。

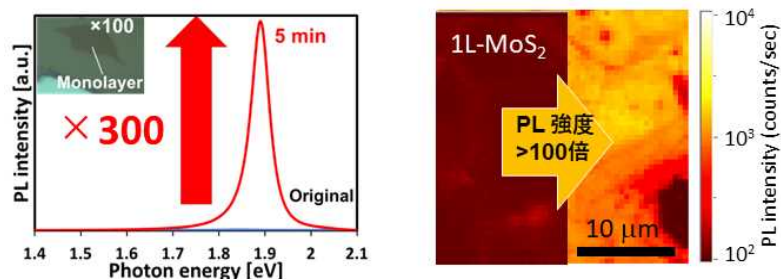


図 4. 酸性分子処理により高フォトルミネッセンス特性を有する単層 MoS_2 の実現。本研究では、定量的に高発光化する手法を見出し、解析からキャリアの失活を抑制するパッシベーションの寄与が示唆された。左図は剥離法によって得られた単層 MoS_2 への処理前後のプロット、右図は化学気相成長法によって得られた MoS_2 における処理前後におけるフォトルミネッセンスのマッピング測定結果。

研究テーマ C 「分子接合による量子スピンホール相への変換および検証」

研究テーマ A および B から得られた知見を用いて、二次元無機膜を量子スピンホール相へと転移できる可能性を見出した。まずは、分子処理による金属的な伝導状態を実現し(図 5)、分子接合による二次元無機半導体の転移を実証した。さらに摂動を加えた結果、量子スピンホール相とされる $1T'$ 相の発現が光学測定によって確認された。今後、デバイスの観点からもさらなる検証が必要と考えている。尚、検証中の項目については、非公開の研究成果へと記載をさせて頂いた。

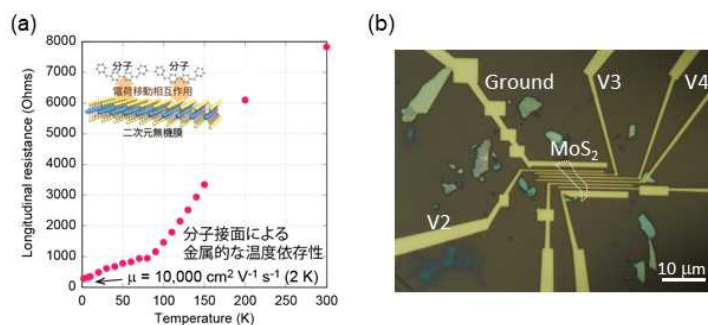


図 5. (a)電子ドナー分子の接合による MoS_2 の金属的挙動の実証。低温において高い移動度を確認した。(b)量子スピンホール効果の検証に用いたデバイスの顕微鏡写真。

3. 今後の展開

本研究は、分子接合によって無機物質表面において量子スピンホール相の発現を狙ったものである。これまでに、分子接合を用いた量子スピンホール相発現の可能性が示されつつあり、今後の展開へと繋がる成果を得ている。

今後はさきがけの研究期間内で得た成果を発展させる。まずは、量子スピンホール相をデバイス測定の見点から実証することが必要であると考えている。将来の工学展開を行うにあたり、基礎となる課題である。測定技術やデバイス作製技術の向上、特に電極界面の最適化など、要素技術一つ一つを積み上げていく必要があると考えている。電子デバイスによる量子スピンホール相の実証がなされた後、分子の特徴とも言える溶液処理、大面積処理、局所処理へと研究を進め、任意の位置、サイズで量子スピンホール相を発現する工学へと展開する。同時に、超伝導体との接合界面の構築、およびその物理的な検証へと研究を進める。その先にあると想定される、擾乱に強いエラー耐性を備えた量子ビット構築のためのエンジニアリングを拓いてゆきたいと考えている。

4. 自己評価

分子を接合させる、という特異な手法の開拓を試みて研究を進めてきた。表面清浄性が重要となる従来の材料設計に対して、逆を行く方法論である。二次元無機膜において、分子接合の有効性を見出しつつあり、量子スピンホール相の発現が示唆されている。この結果は、研究開始当初の方向性に近いものと考えている。さらに、この過程で分子/二次元無機膜の接合強度を上昇させる分子技術を見出した。ドーピング技術は基礎となるため、無機薄膜材料を扱う上で、今後物性発現やデバイス開拓において鍵となる技術であると考えている。当初、分子の集積状態を制御してドーピング能の制御を掲げていたが、内容として近い技術を得ることができた。本研究期間を振り返り、初年度に購入をさせて頂いた顕微鏡ラマン・フォトルミネッセンス装置は多いに役立った。分子/二次元無機膜の接合界面を評価できる環境を得られたことで、上記の発見が可能となった。また、この装置の導入によって、早いサイクルで物質の状態を検証することが可能となり、研究開始当初には想定されなかった相転移現象も見出しつつある。従って、当初の想定を超えた展開へと今後繋がる。ただし、本プロジェクトにおける重要な成果を3年目の中後半に見出したため、期間内にデバイスの見点からの実証へは至らなかった。従って、今後さらなる検証を行い、それをもって本プロジェクトの目的を達成する、この点については反省点である。

本さきがけ研究の機会を得たことで、量子技術として価値ある結果・展開を得ていると考えており、今後も本課題を継続して進めてゆく。分子技術を用いた量子スピンホール相の実証、さらには社会へ還元する量子技術へと発展させたいと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. K. Matsuyama, A. Fukui, K. Miura, H. Ichimiya, Y. Aoki, Y. Yamada, A. Ashida, T. Yoshimura, N. Fujimura, D. Kiriya, Convection-Flow-Assisted Preparation of a Strong Electron Dopant, Benzyl Viologen, for Surface-Charge Transfer Doping of Molybdenum Disulfide, ChemistryOpen, 2019, 8, 908-914.
2. H. Ichimiya, M. Takinoue, A. Fukui, T. Yoshimura, A. Ashida, N. Fujimura, D. Kiriya, Electronic Structure Mosaicity of Monolayer Transition Metal Dichalcogenides by Spontaneous Pattern Formation of Donor Molecules, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 15922-15926.
3. H. Ichimiya, A. Fukui, Y. Aoki, Y. Yamada, T. Yoshimura, A. Ashida, N. Fujimura, D. Kiriya, Solvent engineering for strong photoluminescence enhancement of monolayer molybdenum disulfide in redox-active molecular treatment, Appl. Phys. Express, 2019, 12, 051014.
4. H. Ichimiya, M. Takinoue, A. Fukui, K. Miura, T. Yoshimura, A. Ashida, N. Fujimura, D. Kiriya, Tuning Transition-Metal Dichalcogenide Field-Effect-Transistor by Spontaneous Pattern Formation of an Ultrathin Molecular Dopant Film, ACS Nano, 2018, 12, 10123-10129.
5. D. Kiriya, Y. Hijikata, J. Pirillo, R. Kitaura, A. Murai, A. Ashida, T. Yoshimura, N. Fujimura, Systematic Study of Photoluminescence Enhancement in Monolayer Molybdenum Disulfide by Acid Treatment, Langmuir, 2018, 34, 10234-10249.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 2019年4月 平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞
2. 2017年4月 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会 講演奨励賞
3. 2018年9月 第79回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋)における招待講演、発表タイトル「分子界面による遷移金属カルコゲナイドの物性変換」
4. 2017年3月 第64回応用物理学会春季学術講演会(横浜)における招待講演、発表タイトル「機能性分子の界面による遷移金属カルコゲナイドの物性制御」
5. 2019年11月 The 4th Graphene Flagship EU-Japan Workshop on Graphene and related 2D materials (Pisa) における招待講演、Title: Electronic structure modification of TMDCs by spontaneously patterned molecular dopant film

研 究 報 告 書

「極低温ドレスト原子集団の超精密制御による非可換トポロジカル量子現象の探索」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 素川 靖司

1. 研究のねらい

レーザー冷却によって生成される極低温原子は、高い制御性を有し、不純物の影響を受けないという特長があり、量子多体現象の量子シミュレーションを行うプラットフォームとして注目されている。例えば、光格子中にトラップされたフェルミ原子は強相関電子系を記述する重要なモデルであるフェルミ・ハバードモデルで記述され、高温超伝導体のメカニズム解明など寄与することが期待されている。一方で、中性原子は、「電荷」がないために、電子のように電磁場中のローレンツ力やスピン軌道相互作用に起因する多様でかつ重要な物理現象をそのままではシミュレートできない。これに対して、近年、これらの効果を量子エンジニアリングする人工ゲージ場と呼ばれる手法で複写、考案され、電子の Aharonov-Bohm 位相をレーザーによる量子力学的な位相の獲得によって模擬することでトポロジカル格子モデルを光格子で実現したり、さらにはスピン・軌道相互作用を人工的に冷却原子に対して導入したりすることができるようになった。これらの系は量子多体効果によって、基礎的にも実用上においても重要性の高い多体量子状態が現れることが理論的に予測されており、分数量子ホール状態における非可換エニオンや2次元ラシュバ・スピン軌道相互作用をするフェルミ原子系におけるマヨラナ・フェルミオンはトポロジカル量子計算を行う量子ビットへの応用が非常に期待されている。これらのトポロジカル秩序相をはじめとする量子多体状態の学理を解明することは、制御性の高い冷却原子系を用いた量子情報処理のプラットフォームを構築していく上で重要である。本研究課題では、これらの将来的な応用上の重要性を見据えて、この人工ゲージ場の手法を非可換ゲージ場へ応用・展開することで、これに起因する幾何学的、トポロジカル量子多体現象の実現とその学術的理解を目指す。具体的には、スピン・軌道相互作用には含まれない、縮退したエネルギーバンドに人工非可換ゲージ場をエンコードする量子エンジニアリング技術の開発し、量子シミュレーションによって新奇な幾何学的・トポロジカル量子現象の観測と理解、および制御することを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

実験プラットフォームとなるルビジウム原子(Rb)のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成装置の開発を進め、キーとなるシステムの多くを完成させた。超高真空装置を立ち上げ、3次元磁気光学トラップによって 10^8 個以上の Rb 原子を 100 マイクロケルビン以下までレーザー冷却することに成功した。高出力近赤外レーザーを集光した光トラップにレーザー冷却によって生成された原子集団を用いた移行することにも成功した。冷却の最適化を進めていくことで、BEC 生成へと至る。

人工非可換ゲージ場をパラメータ空間内に量子エンジニアリングすることに成功し、原子が獲得する非可換なベリー位相を観測することに、量子縮退原子気体において初めて成功した。さらに、これを特徴づけるゲージ依存しない物理量であるウィルソン・ループを断熱的に測定することにも世界に先駆けて成功した。ルビジウム原子の超微細構造基底状態の内の4準位系をラジオ波とマイクロ波によって結合し、縮退したエネルギー基底状態を構築した。縮退したエネルギー状態は、人工非可換ゲージ場の影響を受けて、非可換なベリー位相を獲得する。さらに、量子プロセス・トモグラフィによって、非可換ベリー位相因子のプロセス行列を再構成し、高いフィデリティで量子操作が実現していることと示すとともに、プロセス行列からウィルソン・ループを評価することに成功した。ウィルソン・ループは人工非可換ゲージ場を特徴づける重要な物理量であり、精度よく測定できたことは、量子シミュレーションを進めていく上でとても意義がある。

上記の研究を踏まえて、極低温原子を用いた幾何学的・トポロジカル量子現象を観測するためのプラットフォームの実装を進めた。具体的には、光格子とドレスト原子のための光源のために光学系を設計し構築した。また、マクロな原子集団を用いて、幾何学的な量子現象を具体的な実験提案方法と手法を考案し、この量子現象の観測へ向けて実装を進めた。

(2) 詳細

研究テーマ A「超高安定な量子縮退原子気体の生成装置の開発」

実験プラットフォームとなるルビジウム原子(Rb)のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の生成装置の開発を進めた。超高真空装置を立ち上げ、2次元磁気光学トラップによって、Rb 蒸気から低速 Rb 原子ビームを生成するとともに、生成された Rb 原子ビームを超高真空槽内で3次元磁気光学トラップをすることで 10^8 個の Rb 原子を捕捉・冷却をした。さらに光糖蜜中にドップラー冷却限界を下回る 40 マイクロケルビンまで Rb 原子をレーザー冷却することに成功した。高出力近赤外レーザーを集光した光トラップにレーザー冷却によって生成された原子集団を用いた移行することにも成功しており、交差型の光トラップを構築し、光強度を下げながら、蒸発冷却を効率よく行うことで、さらに冷却が可能である。冷却の最適化を進めていくことで、本テーマの目的であった BEC 転移温度以下の原子集団の生成装置が達成できる。また、レーザー冷却に必要なレーザー冷却光源の光学系、レーザー周波数安定化システムを設計し、実装した。

研究テーマ B「非可換ベリー位相の観測と Wilson ループによる特徴付け」

非可換ベリー位相の観測とウィルソン・ループによる特徴付けに成功した。幾何学的位相で

ある Berry 位相は様々な物理系・化学系において現れる普遍的な量子効果であり、凝縮系（電子・冷却原子系）においては量子状態を特徴づけるとともに、幾何学的にある種の揺らぎに対して堅牢であることを生かして、量子ビットの量子操作や磁力計などへの応用としても重要である。一方で、これを F. Wilczek と A. Zee らが 1984 年に理論的に拡張した非可換 Berry 位相は、ホロノミック量子計算や光格子系などで理論的に議論されることがあったが、実験的な観測例がほとんどなかった。非可換 Berry 位相は量子エンジニアリングした人工非可換ゲージ場中の原子の運動を決める上で重要な物理量であり、非可換 Berry 位相を観測し、特徴付けることは、本研究課題を進めていく上で取り組むべき重要なテーマの一つである。特に非可換ゲージ場においては、可換な場合ではゲージ依存しない物理量であるベリー位相やベリー曲率は、非可換な場合ではゲージ依存する物理量になるため、その特徴付けには注意が必要となる。本研究テーマでは、非可換 Berry 位相をゲージ依存しないウィルソン・ループを用いて高精度に特徴付けをすることに成功した。ウィルソン・ループは、クォークの閉じ込め問題において提唱され、高エネルギー理論、トポロジカル量子計算、トポロジカル絶縁体の分類などでほぼ理論でのみ議論されており、縮退したエネルギー状態を用いて断熱的操作によって測定された例はこれまでに一切なく、本研究で初めて実現した。

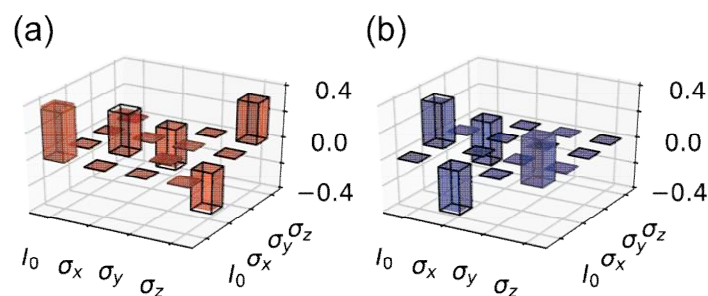


図1. 量子プロセス・トムグラフィによって得られた非可換ベリー位相因子のプロセス行列の(a)実部と(b)虚部。縮退部分空間中の量子操作のフィデリティは 98%。

実験系としては、内部自由度のある光トラップされたルビジウム原子ボース・アインシュタイン凝縮体を用意して、4つの超微細構造基底状態をラジオ波とマイクロ波で結合することで、堅牢な 2 重エネルギー縮退構造を持つ基底状態を用意した。制御パラメータが閉じた軌跡を描くように、断熱的にラジオ波の位相を制御して、始状態と終状態を比べることで、量子状態が幾何学的位相を獲得していることを観測した。さらに、量子プロセス・トムグラフィを取り入れた手法によって縮退部分空間内での幾何学的位相因子を評価することで、高いフィデリティで量子制御ができていることを明らかにした。また、量子プロセス・トムグラフィによって得られたプロセス行列からウィルソン・ループを評価し、非可換なベリー位相が満たす特性についても注目して、閉曲線を掃く向きに対する関係式とよく一致することも示した。さらに、ウィルソン・ループから、幾何学的位相に付随するホロノミーの固有値の偏角についての測定量も実験的に測定した。なお、本研究の実験測定は、研究テーマ A に先駆けて、アメリカ・メリーランド州 Joint Quantum Institute の Spielman 博士の研究グループ(2016年10月末まで所属)において、研究代表者が提案・主導して行ったものである。量子プロセス・トムグラフィを用いた解析、それによるウィルソン・ループ、ホロノミーの固有値の偏角の評価、理論的な解析を本研究課題

での位置づけを明確にした上で、本研究テーマに沿って原著論文としてまとめた。共著者の了解のもと、さがけ研究の成果として学術論文誌に投稿した。

研究テーマ C「新奇的幾何学的・トポロジカル量子現象」

上記の研究テーマを踏まえて、極低温原子を用いた幾何学的・トポロジカル量子現象を観測するためのプラットフォームの実装を進めた。また、マクロな原子集団を用いて、幾何学的な量子現象を具体的な実験提案方法と手法を考案し、この量子現象の観測へ向けて実装を進めた。

3. 今後の展開

極低温原子を用いた幾何学的・トポロジカル量子現象の量子シミュレーションを進めていくことで、新奇的幾何学的・トポロジカル量子現象を観測できることが期待される。また、量子シミュレーションのもつ多様な自由度を制御する基盤技術を開発していくことで、観測手法や制御方法を発展させて、量子シミュレータとしての機能を高めていく。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

極低温原子を用いた量子シミュレーションを行うプラットフォームの開発を進め、キーとなるシステムの多くが完成し、人工非可換ゲージ場の量子エンジニアリングや量子シミュレーションへ向けて具体的な実験提案のもとで、開発を進めることができた。当初の研究計画と比較して、期間中に所属研究機関が変わったことなども影響して、装置開発が全体的として遅れたことは否めず、今後の課題としたい。一方で、当初の計画には大きな位置づけにはなかった非可換ゲージを特徴づける物理量として、非可換ベリー位相から得られるウィルソン・ループ等を実験的に観測して評価できることを世界に先駆けて示したことは大きな進展であり、今後、研究を発展させていくための基礎付けができたと考えている。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)、

本研究課題は研究代表者が個人で進めた。ゼロからの研究の立ち上げであったが、研究実施機関において研究スペース等、周囲のサポートもあり、比較的スムーズに進めることができた。また、研究費は、装置開発、レーザー光源の購入など備品を中心に効果的に使用することができたと考えている。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果(今後の見込みを含む)

本研究で観測を目指した人工ゲージ場に起因する多体量子状態には、基礎的にも実用上においても重要性の高い量子状態が現れることが期待される。従って、これらの量子多体状態の学理を解明することは、物性機能を理解する基礎研究のみならず、高い制御性をもつ冷却原子系を用いた量子情報処理のプラットフォームを構築していく上でも重要であり、今後、研究を発展させていくことで、基礎科学及び社会・経済への波及効果が期待できる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

Seiji Sugawa, F. Salces-Carcoba, Y. Yue, A. Putra, and I. B. Spielman, “Observation and characterization of a non-Abelian gauge field’s Wilczek-Zee phase by the Wilson loop”, arXiv:1910.13991 (2019).

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

[口頭発表]

1. (招待講演) Seiji Sugawa, “Experimental extraction of Chern numbers from quantum-simulated monopoles”, Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 2018.12.15.
2. (招待講演) 素川靖司、「冷却原子を用いたトポロジカル不変量の測定」、応用物理学会量子エレクトロニクス研究会、軽井沢、2018.12.8.
3. (学会発表) 素川靖司, F. Salces-Carcoba, Y. Yue, A. Putra, I. B. Spielman, 「幾何学的 Wilczek-Zee 位相の観測」、日本物理学会 第 75 回年次大会(名古屋大学)、2019 年 3 月予定.
4. (学会発表) 素川靖司, F. Salces-Carcoba, A. Perry, Y. Yue, I. B. Spielman, 「ボース凝縮体の量子制御による非可換ヤン・モノポール観測と第 2 チャーン数の測定」、日本物理学会 第 72 回年次大会(大阪大学)、2017.3.19.

研究報告書

「機械学習の高速化を指向した量子アニーリングの研究」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 田中 宗

1. 研究のねらい

量子アニーリングは組合せ最適化問題を高速かつ高精度に処理する計算技術として期待されています。量子アニーリングは、シミュレーテッドアニーリング(焼きなまし法)に類似のイジングモデルの基底状態探索方法として提案された方法です。この提案がなされた後、実際に量子アニーリングを実験的に実現する「量子アニーリングマシン」が開発されました。一方で、量子アニーリングがどのような場面において有効か、どのような場面で活用すべきか、といったことは明らかではありません。本研究では、機械学習における計算処理のどの部分において量子アニーリングマシンを利用するのが適切かを検討し、それを実際の量子アニーリングマシンを実行することによって性能を確かめることにより、機械学習の高速化を目指します。

機械学習における計算処理を量子アニーリングで実行すると言った場合に、大きく二つに分類されます。一つは、機械学習における「学習」に対して量子アニーリングを使うという考え方、もう一つは機械学習における「推論」に対して量子アニーリングを使うという考え方です。

「学習」に対して量子アニーリングを使う場合や「推論」に対して量子アニーリングを使う場合の両方に共通する解決すべき課題は以下の通りです。機械学習における計算処理をイジングモデルで表現すること、それを量子アニーリングマシンに入力すること、量子アニーリングマシン実行の際の各種パラメータ設定を行うこと、量子アニーリングを行った後に得られるイジングモデルの状態を元の問題の解として適切に解釈すること等が挙げられます。これらをまとめると、機械学習の高速化を目指す際には、イジングモデルで表現するというアイディア面と、量子アニーリングマシンの効率を引き出すアルゴリズム実装面の両者を達成する必要があることを意味します。

2. 研究成果

(1) 概要

機械学習の高速化を目指すにあたり、機械学習の「学習」に対して量子アニーリングを適用する場合と、機械学習の「推論」に対して量子アニーリングを適用する場合との両者について検討しました。機械学習の「学習」に対する量子アニーリングの適用については、大きく分けて3つのことを行った。(A) Neven らが提案した QBoost という量子アニーリング向けアルゴリズムを拡張した一般化 QBoost と呼ばれる方法を新たに提案し、量子アニーリングを用いた特徴量選択を行いました。(B) 相互情報量最大化を元にした特徴量選択について、量子アニーリングマシン適用可能な形式を提案しました。これらについてはいくつかの従来手法と比較し、量子アニーリングの有用性を示した例であると言えます。また、機械学習の「推論」に対する量子アニーリングの適用に関しては、(C) ブラックボックス最適化を量子アニーリングで実行し、マテ

リアルズ・インフォマティクスの高速化を行いました。これは、波長選択性のある熱放射メタマテリアルの構造を発見することを題材として検討を進めましたが、離散構造を推定するブラックボックス最適化一般に適用できる形式を提案しており、量子アニーリングの適用範囲を拡大した研究であると言えます。

更に、量子アニーリングを用いた高速化を実行するにあたり有用な (D) 量子アニーリングマシンの高速化につながるアルゴリズム構築を行いました。具体的には、量子アニーリングマシンに新たに追加された「アニールクエンチ」と呼ばれる方法を用いた組合せ最適化処理高速化や、解精度を高めるためのパラメータ設定を適応的に行う方法を提案しました。

(2) 詳細

研究テーマ(A) 量子アニーリングマシンを用いた特徴量選択として、一般化 QBoost の提案

特徴量選択は、多数存在する特徴量のうち、最適な特徴量の部分集合を見つける問題です。言い換えれば、データ説明に重要となる特徴量の組合せを見つける問題と言えます。特徴量選択により、学習時間の減少、モデル精度の向上、過学習の減少、モデル解釈性の向上など、機械学習における重要な課題です。Neven らによつて QBoost と呼ばれる提案された量子アニーリングマシン向け特徴量選択アルゴリズムが提案されていました。これは弱学習器を複数用いて、アンサンブルとして強学習器をつくる Boosting を量子アニーリングマシン適用が可能になる形式としたものでした。本研究では、QBoost の定式化を拡張し、特徴量の個数を直接減らす項を導入し、それを量子アニーリングマシンで実行できる新しい方法を提案しました。典型的な従来手法(線形回帰、ランダムフォレスト、AdaBoost)や、Neven らの提案した QBoost と比較したところ、本研究で提案した一般化 QBoost を用いた場合のほうが誤差関数が小さくなることを確認しました。

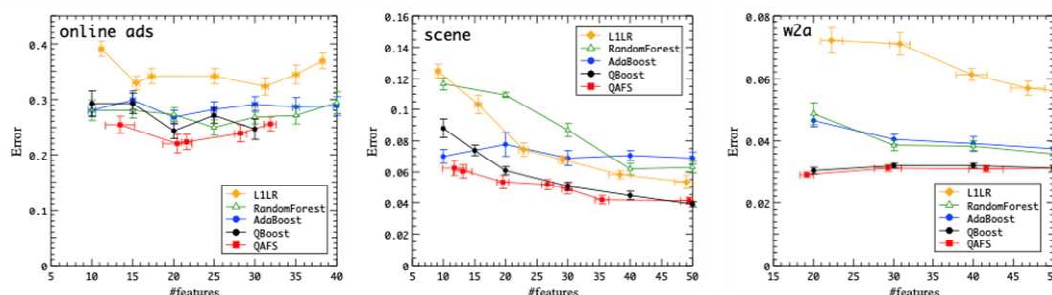


図 1:いくつかのデータセットに対する一般化 QBoost(QAFS、赤)と他従来手法との比較。

研究テーマ(B) 相互情報量最大化をもとにした量子アニーリング向け特徴量選択手法の提案

相互情報量は、それぞれの特徴量間の相関関係を表します。そのため、これを最大化することにより特徴量選択が可能になります。ただし、冗長な特徴量はできるだけ減らしたいという制約を取り込んだ上で、相互情報量をできる限り大きくしたいという目的があります。本研究では、これを量子アニーリングで実装する方法を新たに提案しました。この提案手法と、典型的な既存手法(線形緩和、Truncated power method, タブーサーチ)とで比較した所、用いる特徴量の個数を固定した際、既存の手法に比べ、相互情報量が高くなることを確認しました。

Mutual Information Score

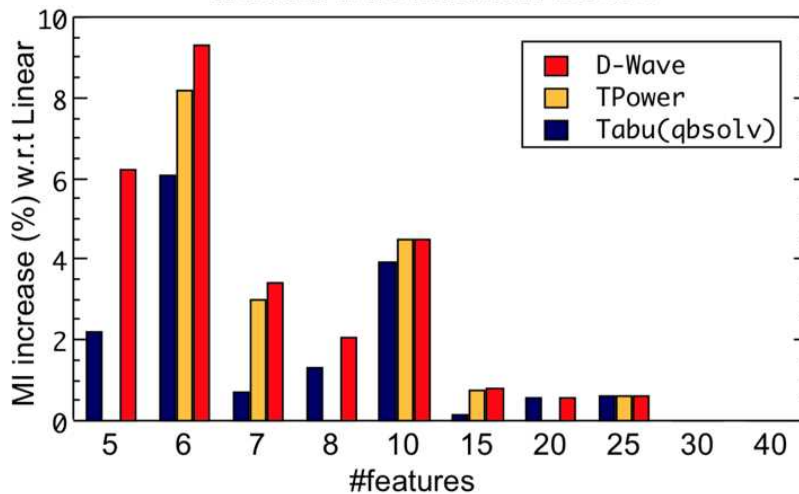
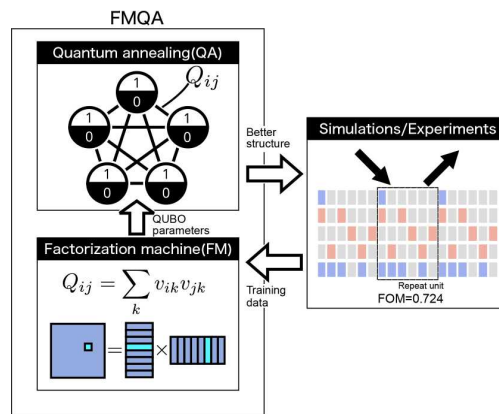


図 2: 提案手法(赤)と既存手法との比較。線形緩和法に比べて相互情報量が高くなる割合。

研究テーマ(C) ブラックボックス最適化を量子アニーリングで実行し、マテリアルズ・インフォマティクスの高速化

マテリアルズ・インフォマティクスは、情報科学的手法を物質科学に適用することで、物質設計を効率化することが一つの目的です。「物質構造が膨大な組合せを持つ場合に、物性値を最大化する物質構造を発見する」という課題に対し、量子アニーリングを用いる方法を提案しました。物質構造が与えられたときに物性値を計算することが可能なシミュレータが既にあるという状況のもと、次にシミュレーションすべき物質構造を探索する、という部分に量子アニーリングマシンを適用するという方法です。シミュレータにより少数の物質構造に対する物性値を予め計算し、データベースを作成しておきます。それを Factorization Machine(FM)を用いてデジタルコンピュータで学習します。FM は量子アニーリングマシンで処理可能なイジングモデルと等価な構造を有することから、学習された関数を量子アニーリングマシンで計算することにより、物性値が高いと期待される物質構造を予測することが可能になります。シミュレータを用いてその物質構造を計算することにより、物性値を計算し、新たにデータベースに追加します。この一連の工程を繰り返すことで、より物性値の高い物質構造を発見できるという仕組みです。デジタルコンピュータのみで一連の工程を行った場合と、量子アニーリングマシンを物質構造予測の部分に用いた場合とで、計算時間の低減が見られました。



Bits	Quantum-classical hybrid			Only classical		
	Selection	Learning	Simulation	Selection	Learning	Simulation
9	361 [sec]	54.9 [sec]	2920 [sec]	236 [sec]	50.0 [sec]	2830 [sec]
12	385 [sec]	53.0 [sec]	3620 [sec]	1730 [sec]	50.4 [sec]	2630 [sec]
15	423 [sec]	51.1 [sec]	3390 [sec]	12500 [sec]	45.0 [sec]	2920 [sec]
18	374 [sec]	52.2 [sec]	3140 [sec]	110000 [sec]	50.3 [sec]	3170 [sec]

図 3: (上)提案手法の計算フロー。(下)量子アニーリングマシンを一部利用した場合(左)と、デジタルコンピュータのみで一連の工程を行った場合(右)の計算時間の比較。

研究テーマ(D) 量子アニーリングマシンの高速化につながるアルゴリズム構築

量子アニーリングマシンの性能を引き出すためには、大きく分けて二通りのアプローチが考えられます。第一に、量子アニーリング過程を表現するパラメータのチューニングを行うこと、第二に、量子アニーリングマシンに入力するイジングモデルのパラメータチューニングを行うこと、です。

第一のアプローチとして、最近、量子アニーリングマシンに導入された新機能である「アニールクエンチ」を用いた計算時間短縮について取り組みました。その結果、従来の量子アニーリングスケジュールを用いた場合に比べて 4 倍の高速化が達成されることを明らかにしました。また、第二のアプローチとして、量子アニーリングに入力するイジングモデルのパラメータチューニングを効率的に行うことで、より精度の高い解が得られることを見出しました。

3. 今後の展開

本研究により、量子アニーリングによる機械学習の高速化に対する様々な基礎的課題を解決したと考えられます。機械学習の「学習」に対する量子アニーリング適用については、利用しやすいソフトウェア開発をすすめることで、提案手法の活用が期待されます。また、機械学習の「推論」に対する量子アニーリング適用、つまり、ブラックボックス最適化を量子アニーリングで実行

する方法については、拡張性が高い方法であると考えられます。そのため、応用範囲は、本研究で検討した波長選択性のある熱放射メタマテリアルの高速発見にとどまらず、離散的組合せで表現可能な材料構造探索や、加工条件を組み合わせることにより、性能の高い物を作り出す製造分野などへの適用も可能であると期待されます。

4. 自己評価

本研究における研究目的の達成状況としては、先に述べたように、機械学習の「学習」に対する量子アニーリングマシン適用、機械学習における「推論」に対する量子アニーリングマシン適用、それら両者に関係するチューニング技術の構築という観点で重要な成果に到達したと考えております。一方で、本研究で得られた成果を他グループが活用するということまでは至っておらず、そのための研究の充実化や成果公開を今後しっかりと行っていく必要があると考えています。

研究の進め方については、個人研究として研究を進めてきましたが、企業研究者を含む多くの研究者との議論を通じて研究をまとめてきたため、さきがけ期間において他分野、他業種の理解を深めたことは、研究者としての今後のキャリアにおいて非常に貴重な機会でした。また、量子アニーリングマシンをクラウド利用するに当たり十分な研究費のご支援を頂いたことは、本研究遂行において大変ありがたいことでした。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果としては、機械学習の高速化を量子アニーリングで行うための基礎的な課題を複数解決しており、特に、研究テーマ(C)におけるブラックボックス最適化に関しては、メタマテリアル設計のみならず幅広い応用が可能であると期待されます。この研究成果を元に、社会科学等への適用を含む様々な学術的研究へ展開することが重要だと考えます。更に社会実装に向けて、産学共同研究を含む様々な協力関係を構築し、利用しやすいソフトウェア開発等を進めることで、より幅広い展開が見込まれる成果が得られたと考えております。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Kotaro Terada, Daisuke Oku, Sho Kanamaru, Shu Tanaka, Masato Hayashi, Masanao Yamaoka, Masao Yanagisawa, and Nozomu Togawa, “An Ising model mapping to solve rectangle packing problem”, Proceedings of 2018 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT), pp. 1-4 (2018).
2. Sho Kanamaru, Daisuke Oku, Masashi Tawada, Shu Tanaka, Masato Hayashi, Masanao Yamaoka, Masao Yanagisawa, and Nozomu Togawa, “Efficient Ising Model Mapping to Solving Slot Placement Problem”, Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 1-6 (2019).
3. Yuya Seki, Shu Tanaka, and Shiro Kawabata, “Quantum Phase Transition in Fully Connected Quantum Wajnflasz-Pick Model”, Journal of the Physical Society of Japan, 88, 054006-1-12 (2019).
4. Kotaro Tanahashi, Shinichi Takayanagi, Tomomitsu Motohashi, and Shu Tanaka,

“Application of Ising Machines and a Software Development for Ising Machines”, Journal of the Physical Society of Japan, 88, 061010–1–10 (2019).

5. Koki Kitai, Jiang Guo, Shenghong Ju, Shu Tanaka, Koji Tsuda, Junichiro Shiomi, and Ryo Tamura, “Designing Metamaterials with Quantum Annealing and Factorization Machines”, Physical Review Research (Accepted)

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件 (公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. (英文書籍) “Quantum spin glasses, annealing and computation”
Shu Tanaka, Ryo Tamura, Bikas K. Chakrabarti, Cambridge University Press (2017).
2. (国際会議招待講演) “Basics and Applications of Quantum Annealing”
Shu Tanaka, 2nd Electron Devices Technology and Manufacturing (EDTM) Conference 2018 (EDTM2018), Ariston Hotel Kobe, Japan, March 13, 2018.
3. (国際会議チュートリアル招待講演) “Recent Development and Future Perspective of Quantum Annealing”
Shu Tanaka, 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP–DAC2019), Tokyo Odaiba Waterfront, Japan, January 21, 2019.
4. (国際会議招待講演) “Theory of Ising Machines and a Common Software Platform for Ising Machines”
Shu Tanaka, 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP–DAC2020), China National Convention Center, Beijing, China, January 16, 2020.
5. (国際シンポジウム招待講演) “Quantum Annealing Accelerates Material Discovery”
Shu Tanaka, MANA International Symposium 2020 Jointly with ICYS, Tsukuba International Congress Center EPOCHAL TSUKUBA, Japan, March 1, 2020.

研 究 報 告 書

「スケーラブル分子スピン制御技術の高度化により可能になる量子情報処理の新機能」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 根来 誠

1. 研究のねらい

分子中のスピンを qubit として用いる量子情報処理システムは、コヒーレンス時間が長く、ある程度高精度の量子ゲート操作が容易である一方で、初期化が難しい、射影測定ができない、スケーラブルでないといった批判があり、量子情報処理実験の表舞台から少しずつ遠ざかっていった。しかし最近、初期化されていない高エントロピー量子系で、射影測定ができずにアンサンブル測定しかできない場合で実現可能な DQC-1 計算量クラスの問題を解くアルゴリズムでも、古典計算機で効率的にシミュレートできない「量子スプレマシー」が達成可能であることが明らかにされた。分子内に個別制御可能なスピンを集積するのは確かに難しい。しかし、低エントロピー化された並進対称的なスピン系ではグローバル操作に基づいて、DQC-1 より強力な BQP クラスの問題が解ける量子アルゴリズムが実現可能であることはわかっている。このようなスピン系なら現代の分子技術でスケーラブルに用意できる。量子スプレマシーに到達するためという目的では、分子スピン量子情報処理システムは表舞台に立てるだけの優れた量子系ではないかと申請者は考えた。

分子の核スピン・電子スピン系のスケーラブルな高精度操作技術と低エントロピー化技術を有していた申請者は、これらの技術を高度化し、分子スピン系で可能になる量子情報処理の新機能開拓を世界に先駆けて実装することを目指した。大別すると以下の3つのテーマで新機能実現を目指した。

まずは、申請者らが考案した量子エクストリーム学習の実装を目指した(研究テーマ A)。エクストリーム学習はニューラルネットワークを用いた機械学習の一種であり、これの量子版が量子エクストリーム学習である。次に、スピンスクイーミングを可能にする二軸ひねりのハミルトニアンを高精度で実現し、ロシュミットエコーの量子シミュレーションを目指した(研究テーマ B)。当初量子計測目的での高レベルスクイーミングも目指していたが、当初の狙いになかった量子カーネルトリックの実現ならびに量子カーネル学習の大規模実装へとつながることがわかり、この実装にエフォートを割いた。量子エクストリーム学習においてデータ入力のたびにリアルタイム低エントロピー化による量子フィードバックを行うことで量子レザバー計算が実装できる(研究テーマ C)。当初はリアルタイム低エントロピー化による散逸フィードバックの実現も目指していたが、測定フィードバックのための要素技術開発に集中した。また、分子スピンの高精度操作技術と低エントロピー化技術の高度化の基礎的な研究も行った。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究ではまず量子エクストリーム学習アルゴリズムを分子中の核スピンの系で実装し、簡単な関数の学習が可能であることを示した。標準的なニューラルネットワークによる機械学習では、教師データを用いてすべてのノード間の遷移レートをチューニングするが、エクストリーム学習では、ノード間遷移行列はランダムに選んで固定し、出力ノードへの線形重みだけをチューニングする。本研究で実装した量子エクストリーム学習は、ノードに分子中の核スピンを用いるもので、スピン間相互作用でノード間遷移を行い、データの入出力は磁気共鳴により行う。実際に 4bit のブール関数や 2 実数の非線形演算が学習できることを示した。さらに、ノード間遷移のチューニングを行う量子回路学習アルゴリズムならびにその実装方法を考案した。

次にロシュミットエコーの量子シミュレーションを行った。これは、スピン多体系をあるハミルトニアンで時間発展させ、ハミルトニアンを逆転させることで状態が元に戻ってくるエコーを観測するものである。動的相転移や OTOC (Out of Time Order Correlator) によるブラックホールのシミュレーションに用いられている。スピンスクイーミングを可能にする二軸ひねりのフロッケハミルトニアンを高精度に実現することで、分子中の核スピン系において 16 スピン以上が強く量子相関してからエコーが返ってくることを確かめた。このような大規模量子系のダイナミクスは古典コンピュータでのシミュレーションが非常に難しいとされている。このダイナミクスを量子カーネル学習に用いることができ、本研究では、世界で初めて量子カーネルトリックを実現し、関数のフィッティング、分類タスクを実装した。ダイナミクスの発展時間を長くすればするほど、より大規模な量子相関が成長して、学習性能が向上することを示した。

量子レザバー計算の分子スピン系での実装方法を考案し、さらに、性能改善を可能にする量子レザバーの空間多重化法の実装方法まで考案した。リアルタイム低エントロピー化による量子フィードバックを目指して FPGA RFSoc による装置を開発し、電子スピン qubit の制御を実現した。極低温下で複合回転操作を実現し、電子スピンの高精度操作と初期化の両立を実現した。核スピンの低エントロピー化法であるトリプレット DNP の高速化を研究し、高速により低いエントロピーが実現できることを示した。高精度操作が可能になる溶液状態の低エントロピー化を実現した。

(2) 詳細

研究テーマ A 「量子エクストリーム学習」

量子エクストリーム学習アルゴリズムは $1,^{13}\text{C}-\beta$ -アラニンを $^2\text{H}_\gamma-\beta$ -アラニンに希釈した単結晶で実装した。 ^{13}C スピンと複数個の ^1H スピンが量子ビット系をなすアンサンブル量子コンピュータとなっている。 ^1H スピンへのグローバル操作で入力を行い、ノード間遷移はスピン間の双極子相互作用が担う。 ^{13}C スピンのダイナミクスを時々刻々と測定し、測定データに線形重みをかけて出力とする。量子回路を図 1(a) に示す。グローバル操作とは、複数個のスピに対して同等の操作を同時に行うことを指す。

実際に 4bit の入力を行った際のダイナミクスを図 1(b)に示す。これらのダイナミクスで教師データに基づいて XOR などの簡単な関数が誤りなく学習できることを示せた。また、4bit

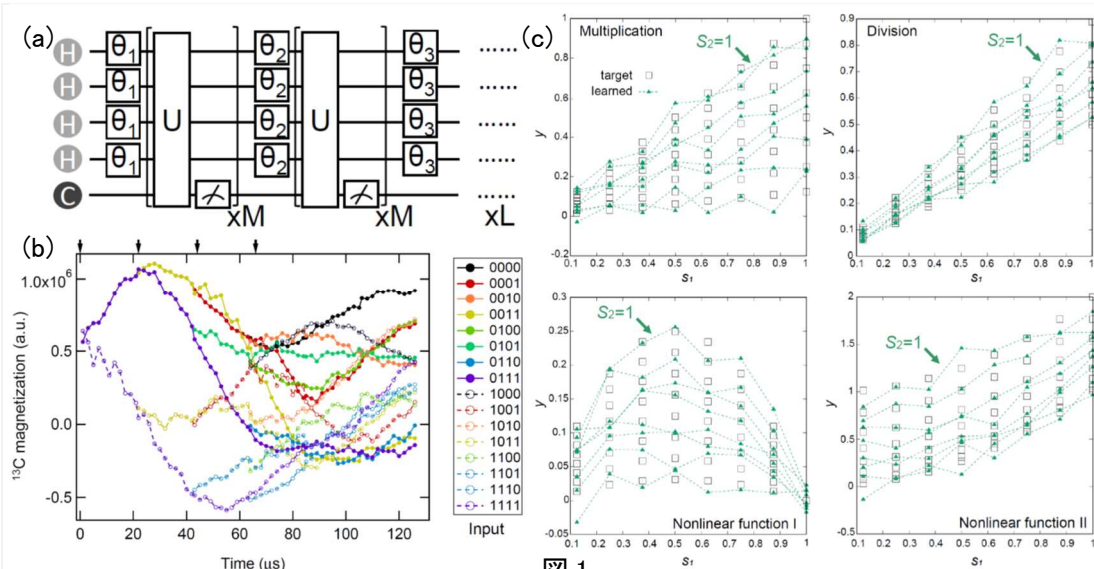


図 1

4bit 階調の 2 実数の非線形演算の学習結果を図 1(c)に示す。この実装方法はグローバル操作を用いているため ^1H スピンの数を容易にスケールできる。[“Machine learning with controllable quantum dynamics of a nuclear spin ensemble in a solid” M. Negoro, K. Mitarai, K. Fujii, K. Nakajima, M. Kitagawa, arXiv:1806.10910 (2018).]

量子機械学習の性能は量子ビット数、操作精度、系のエントロピーで高めることができるため、これを計画していたが、より高性能なアルゴリズムの開発も重要であると考え、ノード間遷移をチューニングする量子回路学習を提案し、実装方法を示し 6qubit のシミュレーションでフィッティングタスクと分類タスクが実現可能であることを示した [論文業績 1]。

研究テーマ B 「ロシュミットエコー型量子カーネル学習」

この研究で用いたアダマンタンには複数個の ^1H スピンがあり分子間の双極子相互作用を介した大規模な量子相関が実現できる。図 2(a)に示す 8 パルスと呼ばれるパルス列でのグローバル操作によってハミルトニアンは実効的に二軸ひねり型に変形される。パルスの位相を 180° ずらすと負符号付の二軸ひねり型になる。図 2(b)のような回路で位相 ϕ を 180° にした場合はロシュミットエコーが返ってきて、ずらしていくと返ってこなくなる。図 2(c)に示すが

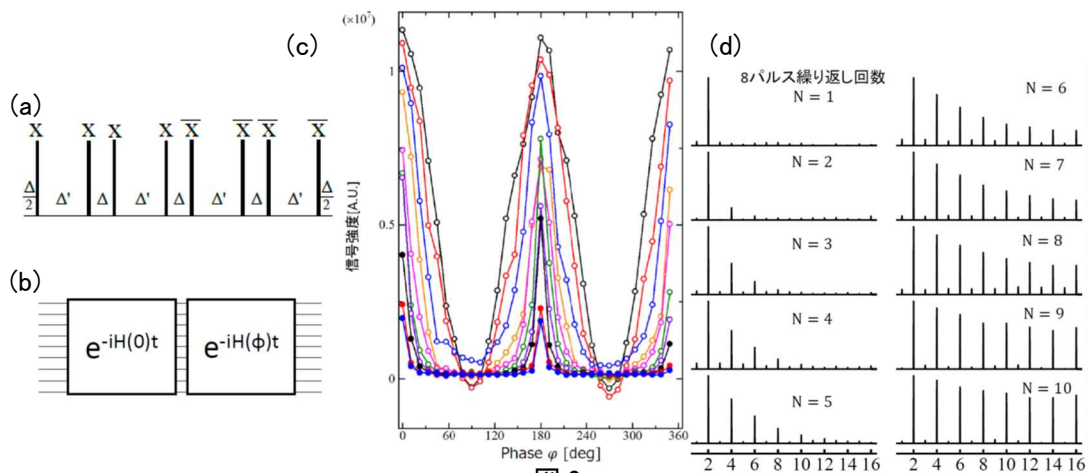


図 2

時間発展が長いものほど多くのスピンの量子相関し、この位相の変化に敏感になるため、少しのずれでもロシュミットエコーが返ってこなくなる。このロシュミットエコーは、位相 0 のハミルトニアンで時間発展してできた密度演算子と、位相 ϕ のハミルトニアンで時間発展してできた密度演算子の内積に相当する。ここから時間発展によってどれだけ量子相関しているかを調べることができる。図 2(d)に示すような、ロシュミットエコーをフーリエ級数展開して得られたスペクトルが量子相関するスピン数が試料中にどれだけ分布しているかを表しており、この実験では最大 16 スピン以上の量子相関が高い確率で発生していることを示している。このようなダイナミクスを用いて動的相転移や OTOC (Out of Time Order Correlator) によるブラックホールの量子シミュレーションが行われたことがある。

この古典コンピュータでシミュレート困難な大規模系での量子シミュレーションによって基礎物理学に貢献することを計画していた。また、量子計測目的の高レベルスピンスクイージングの実装も計画していたが、これを達成する代わりに、このダイナミクスを量子カーネル学習に用いることができることを見出し、エフォートを割いた。機械学習ではプリプロセッシングによりデータを高次元の特徴量空間に飛ばすことで、より複雑な回帰や分類を可能にするが、次元が増えると計算量が増大する。カーネル法とは高次元の特徴量空間での内積を用いるもので、これによって計算量が増大せずに特徴量空間の恩恵を受けることができる。量子カーネル法はヒルベルト空間やリウビル空間を特徴量空間とするものであり、例えばある位相のハミルトニアンでの時間発展後の密度演算子に射影する。先ほどのロシュミットエコーの実験により量子的な特徴量空間での内積を得ることができる。

これにより、関数のフィッティングタスクを行ったものが図 3(a)である。また、2 入力に増やして、分類タスクを行ったものも図 3(b)に示す。それぞれにおいて、ダイナミクスの発展時間を長くするほど、より大規模な量子相関が成長し、学習性能が向上することを示している。10 スピン以上が量子相関するダイナミクスを用いているもので、カーネル行列より特徴量空間の次元が大きい領域で量子カーネルトリックを世界で初めて実現したものであると言える。

“Experimental quantum kernel machine learning with nuclear spins in a solid” T. Kusumoto, K. Mitarai, K. Fujii, M. Kitagawa, M. Negoro, arXiv:1911.12021 (2019).

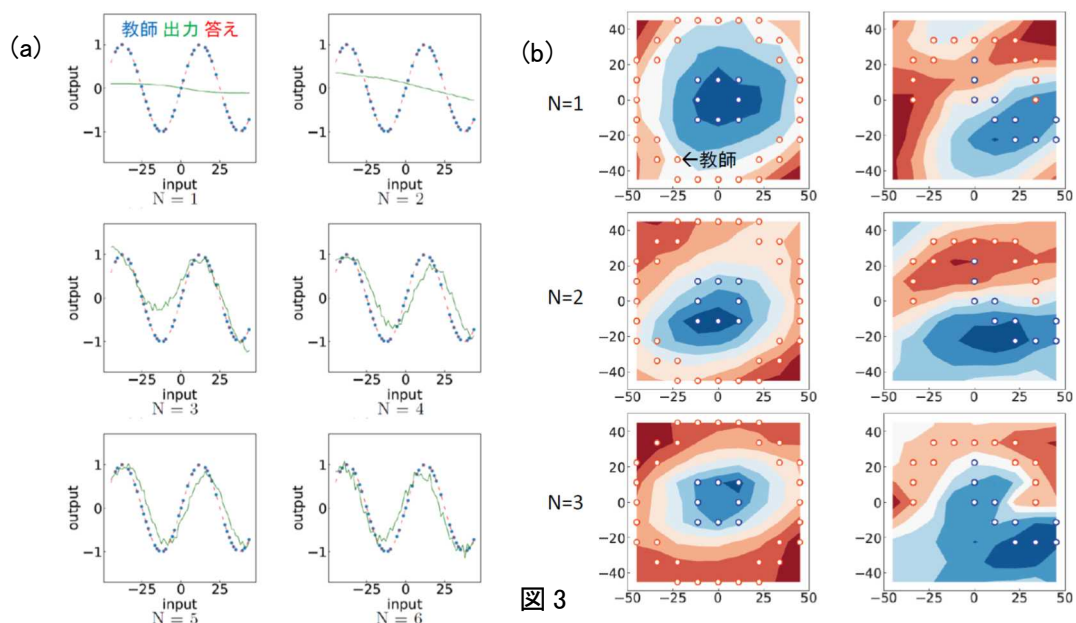


図 3

研究テーマC「量子レザバー計算」

量子レザバー計算の分子スピン系での実装方法を考案し、さらに、性能改善を可能にする量子レザバーの空間多重化の実装方法まで考案した〔論文業績 2〕。量子エクストリーム学習においてデータ入力のたびにリアルタイム低エントロピー化による量子フィードバックを行うことで量子レザバー計算が実装できる。散逸フィードバックを可能にするレベルの高速な低エントロピー化は実現できなかったが、以下に示す基盤技術の研究を行った。

核スピンの高精度操作が可能になる溶液状態の低エントロピー化を可能にする装置を開発し、熱平衡状態に比べ約 220 倍偏極率が高い低エントロピー状態を実現した〔論文業績 3〕。核スピンの低エントロピー化の高速化を研究し、照射レーザーの繰り返し周波数がこれまでの 50Hz より 2 倍に早くすることで、得られる偏極率も 2 倍になり、これを微弱な外部環境の検出を敏感にする量子相関状態を用いた量子計測の応用研究に用いた。

“Long-lived state in a four-spin system hyperpolarized at room temperature”, K. Miyanisshi, N. Ichijo, M. Negoro, M. Motoyama, A. Kagawa, M. Kitagawa, arXiv:1908.08699 (2019).

リアルタイム低エントロピー化による量子フィードバックを目指し FPGA RFSoc による装置を開発し、電子スピン qubit の制御を実現した。極低温 150mK 下で電子スピンを偏極率 99% に初期化した状態で、ランダムイズドベンチマーキングの忠実度 96% の操作を行った。室温で通常のパルス操作の忠実度が 97% である中、複合回転操作によって 99% まで高めた。

“Low Power, fast and broadband ESR quantum control using a stripline resonator”, Y. S. Yap, M. Negoro, Y. Sakamoto, M. Kuno, A. Kagawa, M. Kitagawa, arXiv:1911.04314 (2019).

3. 今後の展開

核スピンの量子機械学習では、とくに量子カーネル学習でのさらなる大規模化が期待される。ドイツのチームの先行研究ではパルス角度を非常に細かくチューニングすることで 58 スピンの量子相関を検出することに成功している。今後、数値的なパルス設計法によってよりロバストに二軸ひねりのハミルトニアンを実現することによって、手間を少なく、古典コンピュータでシミュレート不可能な大規模系でのカーネル推定を実現する。低エントロピー化することで、より大きな量子相関の信号も検出可能になるため、これによってさらに大規模な量子特徴量空間を用いた量子機械学習を実現する。また、日本の超伝導量子コンピュータ開発チームとの共同研究や商用量子コンピュータクラウドの使用を通して、超伝導量子コンピュータでの学習性能との比較検討を行っていく。

量子レザバー計算を電子スピン系で実装するのにいくつかの課題が明らかになった。まず、初期化が可能な温度でより高精度の電子スピン量子ビット操作を実現する必要がある。開発した FPGA RFSoc ベースの装置でひずみがより小さいパルス照射を実現して、複合回転操作によって 99% より高い忠実度を達成したい。そして、電子スピンを集積化して、高速な低エントロピー化が可能な磁場を探索する必要がある。分子スピンマテリアルの技術を持った研究者との共同研究を通じてこれを推進したい。

4. 自己評価

誤り訂正なしの量子コンピュータ実現までの間に、大規模量子系で実現でき、経済・社会に波及効果を与える量子情報処理の新機能は古典量子ハイブリッドアルゴリズムに頼る必要がある。本研究提案時は古典量子ハイブリッドアルゴリズムは量子化学計算や組み合わせ最適

化向けの限られたもののしか世界にほとんど知られていなかった。本研究プロジェクトが進行する中で、量子機械学習の古典量子ハイブリッドアルゴリズムが社会的に注目されるようになっていった。この分野は、藤井・中嶋による教師あり機械学習の古典量子アルゴリズムである量子レザバー計算の提案論文が 2017 年 8 月に掲載されたのを皮切りに、2017 年 12 月 Rigetti が超伝導量子ビットの系で教師なし機械学習の実装が行われ、本研究成果である量子回路学習を 2018 年 1 月に投稿し、2 月に Google から同様の提案があり、4 月には IBM がこれを実装し、6 月に本研究成果である教師あり機械学習である量子エクストリーム学習の提案と実装を発表した。2018 年から 2019 年にかけて本研究成果を引用する形で数多くの量子機械学習の古典量子ハイブリッドアルゴリズムが考案された。その中で量子カーネル学習に注目すると、2018 年 4 月に超伝導の 2 量子ビットの系での実装を皮切りに、2019 年 6 月に 2 光子の系で、そして、本研究成果で 2019 年 11 月に 10 スピン以上が量子相関するダイナミクスで量子カーネルトリックを実現した。今後、実装研究を通して量子機械学習はますます発展すると期待している。この大きな流れの中で、本研究プロジェクトは実施体制や研究費執行を適切にマネージすることで、古典シミュレート困難な近未来大規模デバイスでの実装が可能な「量子機械学習」と言う新機能の創出・実装に貢献できたと考えている。マネージの中で、当初の目的である量子レザバー計算は達成できなかったが、上記のようにいくつかの課題を明らかにしたので、今後これに取り組みたい。量子機械学習がいつ社会に還元されるかは世界のだれもがまだ予想するのが難しい状況であるが、今後、世界に先駆けて社会実装を行うことを目指していきたい。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. K Mitarai, M Negoro, M Kitagawa, K Fujii, “Quantum circuit learning” Phys. Rev. A 98, 032309 (2018).
2. K Nakajima, K Fujii, M Negoro, K Mitarai, M Kitagawa, “Boosting computational power through spatial multiplexing in quantum reservoir computing” Phys. Rev. Appl. 11, 034021 (2019).
3. A. Kagawa, K. Miyanishi, N. Ichijo, M. Negoro, Y. Nakamura, H. Enozawa, T. Murata, Y. Morita, M. Kitagawa, “High-Field NMR with Dissolution Triplet-DNP” J. Magn. Reson. 309, 105523 (2019). 表紙に採用
4.
5.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 8 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

国際会議招待講演 “Room temperature Dissolution Dynamic Nuclear Polarization” 1st India-Japan NMR Workshop, Yokohama, 2019

書籍 「量子コンピュータ/イジング型コンピュータ研究開発最前線」 根来誠、他 27 名、情報

機構(2019 年)

国際会議招待講演 “NMR implementation of quantum reservoir computing” The 2nd
International Symposium on Dynamics in Artificial Quantum Systems, Tokyo, 2018.

研 究 報 告 書

「表面弾性波を使ったエレクトロメカニクスの量子制御」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 野口 篤史

1. 研究のねらい

近年、量子制御技術の向上に伴い、量子コンピュータや量子シミュレーションの実現等の量子機能創出を目指した研究が盛んに行われるようになってきた。とりわけ、超伝導量子回路と呼ばれる、超伝導体の Josephson 接合を含む電気回路を用いた量子制御技術は加速度的に発展している。超伝導量子回路技術では、マイクロ波共振器と、Josephson 接合の非線形性を利用して作製する超伝導量子ビットとを互いに結合させた、回路電磁気学 (circuit QED) と呼ばれる技術が中心的な役割を担っている。

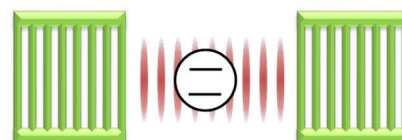
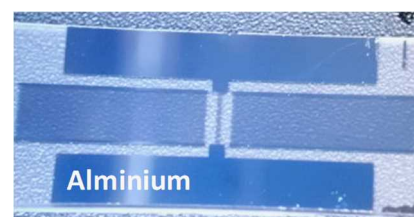
このように異なる量子系を結合させた系をハイブリッド量子系と呼ぶ。2016 年までに、マイクロ波共振器・ナノメカニクス・ダイヤモンド中空素欠陥スピン・強磁性体マグノンなど、様々な量子系が超伝導量子ビットと結合されてきた。本研究では、表面弾性波共振器と呼ばれる、固体の表面に局在している音波の共振器に着目し、超伝導量子回路と結合したハイブリッド量子系の実現を目指した。表面弾性波共振器は、高いQ値のものを 2 次元の微細加工技術により容易に作製することができる。また、音波の波長が短いことを利用すると、比較的小型の構造によって進行波共振器の作製が可能になる。進行波共振器では、「共振する向き」という自由度が追加され、ハイブリッド量子系に新たな自由度を追加することができる。また、表面弾性波共振器は非常に線形性が高いことが知られており、パラメトリック発振器や増幅器として用いた場合、飽和が小さく、高利得のものが作られると期待される。さらに、表面弾性波を超伝導量子回路によって精度よく測定することで、ピエゾ効果をはじめとした様々な弾性効果によってその他の物理系を測定するプローブとすることができる。

ハイブリッド量子系の一つのマイルストーンが、超伝導量子回路と光からなる結合系である。ネットワーク上で光にエンコードされた量子情報を超伝導回路に変換することで、量子コンピュータ間を結ぶ量子ネットワークが実現できるばかりでなく、超伝導量子回路からなる量子プロセッサ同士を光でつなぐ光インターコネクト・分散型量子計算への応用も考えることができる。しかし、超伝導回路は直接には光とコヒーレントに相互作用させることが難しいため、媒介となる量子系が必要となる。表面弾性波、光弾性効果とピエゾ効果によって、電気と光との両者と相互作用することができるため、これらを結ぶ系として適していると考えられる。

2. 研究成果

(1)概要

研究開始当初には以下の3つの研究テーマを掲げた。1. 超伝導量子回路と表面弾性波共振器からなるハイブリッド量子系の実現, 2. カイラルフォノニクスのための進行波音波共振器の作製, 3. 超伝導量子回路・表面弾性波・光共振器からなるハイブリッド量子系の実現。これらの技術は、異なる量子系を結合させ、さらにそこから新たな機能を発現させるための研究である。初年次には主に1と2について、第2, 3年次には1と3について研究をおこなった。最終年度では、それまでの研究で生かされたハイブリッド量子系での知見を活かし、その技術により新たなテーマとして4. 高性能な超伝導量子回路の実現というテーマを立て、そのための研究にシフトした。図に示したものが、典型的な表面弾性波共振器サンプルとハイブリッド量子系の概念図である。以下にそれぞれの概要を述べる。



図上. 表面弾性波共振器の典型例. 左右のブラッググレーティングにより共振器を構成される. 図下. 表面弾性波共振器の内部に人工原子を配置し、ハイブリッド量子系を構築する。

1. 超伝導量子回路と表面弾性波共振器からなるハイブリッド量子系の実現

ピエゾ効果をもつ基板上に高Q値表面弾性波共振器と超伝導量子回路を同時に作製する技術を開発し、表面弾性波共振器と超伝導量子回路が結合したハイブリット量子系の構築を行った。また、超伝導量子回路の量子状態を経由することで、表面弾性波共振器のフォノンをマイクロ波共振器の光子に高い確率で変換することに成功し、この変換技術によって、表面弾性波を非常に高い感度(0.2 am/ $\sqrt{\text{Hz}}$)で測定することができた。

2. カイラルフォノニクスのための進行波音波共振器の作製

進行波共振器として、ボウタイ型の共振器を採用し、角度がついたブラッグミラーを開発、共振器を作製した。ボウタイ型の共振器作製には成功したが、共振器内で音波が反射する回数(Finesse)は最大で約 13 程度であり、また共振器構成要素の反射波により、「方向」を自由度に持つ共振器を作ることができなかった。

3. 超伝導量子回路・表面弾性波・光共振器からなるハイブリッド量子系の実現

水晶基板上に酸化チタンからなる光導波路を作製し、Q 値 100,000 のリング共振器の作製に成功し、室温において表面弾性波から光への変換実験を行い、共振器内変換効率で0.1%程度の変換効率を実現した。

4. 高性能な超伝導量子回路の実現

ハイブリッド量子系の改良のためのハミルトニアンエンジニアリングの技術を超伝導量子回路に適用し、高速な量子ゲートが可能な量子回路を開発した。この回路により、99%を超えるような精度での量子ゲートを実現した。

(2) 詳細

各研究テーマについて個別に詳細に述べる。

研究テーマ1「超伝導量子回路と表面弾性波共振器からなるハイブリッド量子系の実現」

超伝導体と絶縁体からなる Josephson 接合(図1)は、大きな非線形性を持つため、Josephson 接合を含んだ超伝導回路は様々な機能を持つことができる。特に、Josephson 接合を大きなキャパシタンスで短絡した回路はトランズモンと呼ばれ、量子2準位系を持つことから量子ビットとしての機能を持つ。

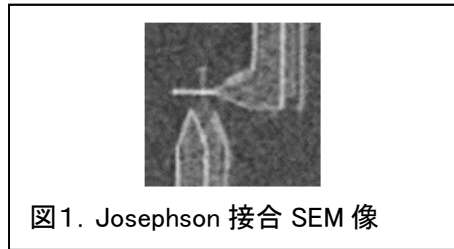


図1. Josephson 接合 SEM 像

トランズモンの電気的なエネルギーはほぼすべてがキャパシタンスに集中しているため、その部分に他の物理系を接続することで、強く相互作用させることができる。図2左にトランズモンと表面弾性波共振器が結合したハイブリッド量子系を示す。表面弾性波は piezoelectric 効果を持つ基板にくし型の電極を形成することで発生することができる。そのため、このくし形電極をキャパシタンスに持つトランズモンを作製することで、表面弾性波と超伝導量子ビットを結合させることができる。実験では、水晶基板の上に表面弾性波共振器とトランズモンを図2のように作製した[1]。

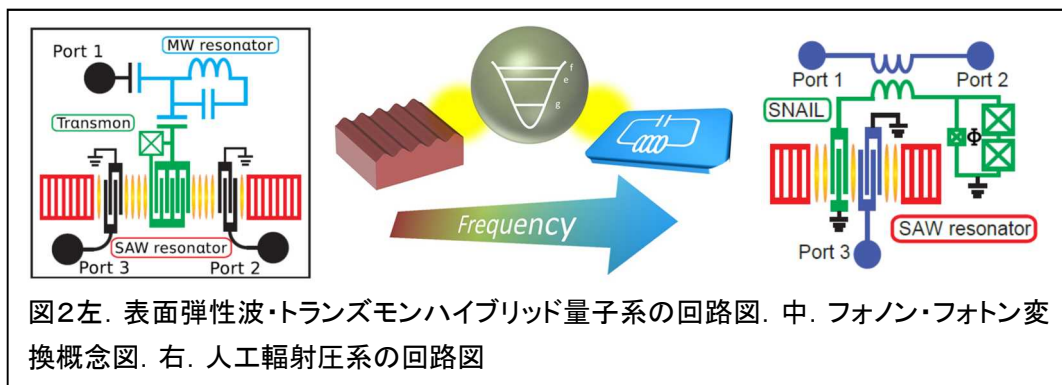


図2左. 表面弾性波・トランズモンハイブリッド量子系の回路図. 中. フォノン・フォトン変換概念図. 右. 人工輻射圧系の回路図

この系に対しパラメトリック結合と呼ばれる手法を用いて、2周波数のマイクロ波を外部から入力することにより、表面弾性波共振器のフォノンをマイクロ波共振器のフォトンへと変換する実験を行った(図2中)。こういったパラメトリック結合は系の非線形性を利用しているため、両者を媒介するトランズモンの存在によって可能になっている。この技術を利用して、表面弾性波の精密測定を行った。マイクロ波の領域では、Josephson パラメトリック増幅器と呼ばれる、量子極限で動作する増幅器がある。そこで、表面弾性波フォノンから変換されたマイクロ波フォトンを精密に測定することにより、表面弾性波を表面変位に換算して $0.2 \text{ am}/\sqrt{\text{Hz}}$ という非常に高感度に測定することに成功した。

しかしながら、piezoelectric 基板上のトランズモンの性能が十分には高くなく、この手法では結合強度に限界がたりず、強結合の領域に入ることができなかった。そのため、さらなる結合強度増強のため、超伝導回路に工夫をこらした。構成した超伝導量子回路を図2右に示す[3]。ここに示した超伝導量子回路は、複数の Josephson 接合からなり、2次の非線形性を持つ回路である。2次の非線形性を利用して、電磁波に人工的に巨大な輻射圧を発生させ、その力によって表面弾性波と相互作用する系になっている。巨大な輻射圧により、強結合にま

で入ることに成功した。また、単一光子あたりの輻射圧がすでに系の応答を変化させるほどに強く、オプトメカニクスの研究として新しい領域に到達することができた。

研究テーマ2「カイラルフォノニクスのための進行波音波共振器の作製」

音波の共振器に対し、カイラリティを導入し、ハイブリッド系に非相反性を実現するため、図3上のようなボウタイ型の共振器を作製した。この共振器では右回りと左回りの自由度があり、カイラリティが生まれる。図3下に共振器の透過信号を示す。明確な共振器が見て取れるが、共振器線幅と共振器ピークの間隔（FSR）の比である Finesse は約 13 である。これは、ミラーの構造上の問題であることがわかり、これ以上の改善は見込めないことが分かった。ハイブリッド系に使えるほどの高 Q 値が実現されないため、本テーマは終了した。

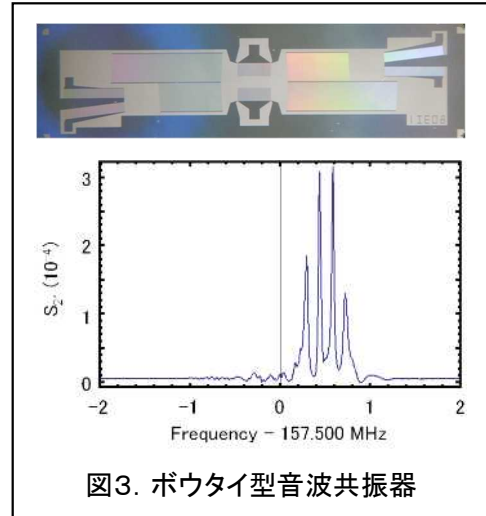


図3. ボウタイ型音波共振器

研究テーマ3「超伝導量子回路・表面弾性波・光共振器からなるハイブリッド量子系の実現」

本研究テーマでは、第一段階として、主に表面弾性波と光共振器からなるハイブリッド量子系に関する研究を行った。材料として、ニオブ酸リチウム[2]と水晶を用いてそれぞれ開発をした。特に研究期間後半では、光導波路作製に集中し、表面弾性波中に光導波路リング共振器のある系を実現した。この系を用いて、弾性波による位相変調を利用した弾性波—光変換機を作製した。共振器内の変換では約 0.1%の変換に成功した。当初、光の導入損に問題があり、約 0.1%しか光が入射できなかったが、ポリマー導波路によるモード変換器を開発し、約 50%の強度で光を導入できるようになった。この系を超伝導回路と組み合わせるため、極低温で動作する光導波路・モード変換機を実現する研究を現在行っている。

研究テーマ4「高性能な超伝導量子回路の実現」

研究テーマ1で開発した2次の非線形性を持つ量子ビットを利用し、超伝導量子回路2つからなる系を作製した[4]。2次の非線形性は、量子ビット間の強いパラメトリック結合を生むため、高速な2量子ビットゲートを実装することができる。作製したサンプルと結果を図4に載せる。図4左はサンプルの写真であり、2次の非線形性を持つ量子ビットと通常の量子ビットが一つずつ結合している。図4の右に実装した量子ゲートの精度の評価実験の結果を載せる。Randomized Benchmarking という手法により 99.3%の精度で量子ゲートが実現できていると評価できた。ハイブリッド量子系の研究によって開発された新しい量子ビットの技術を、超伝導量子コンピュータの研究に活かすことで、量子ゲートの高性能化につなげることができた。現在、この量子ビットの性能向上や新しい機能創成のための研究を行っている。

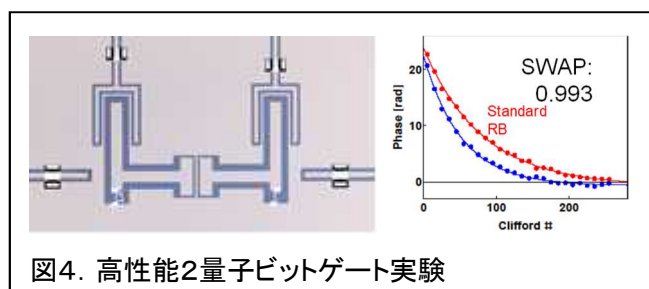


図4. 高性能2量子ビットゲート実験

3. 今後の展開

2019年現在、超伝導量子回路のある程度の集積化が進められる中で、これからの超伝導量子回路によるハイブリッド量子系は、単に異なる量子系をつなげるだけではなく、量子系をつなげることによって新たな量子機能を発現する研究がさらに重要になってくると考えられる。その候補としては、1. 超伝導量子回路の高性能化、2. 超伝導量子回路と光技術の融合、3. 超伝導量子回路を上回る超高コヒーレンス量子系の超伝導量子回路による制御、4. 磁気センサーや核磁気共鳴などの高感度化に向けたセンサーの研究、5. 巨視的な量子系を量子極限精度で操作し、巨視的な系における量子力学の研究、などが挙げられる。

誤り訂正量子コンピュータの実現には、量子ビットの数を劇的に増やし、さらに量子操作の精度をこれまで以上に高めていかなければならない。そのためには、高精度な量子ゲートが可能な超伝導量子ビットの開発や、超伝導量子回路を超える精度で制御可能な量子系を構築することが重要となる。また、集積化の面においても、量子ビット一つ一つに配線する現行の方法では限界があるために、行と列で量子ビットにアクセス可能な2次元アクセス量子ビット配列の開発や、また光による超伝導回路の制御技術を開発することが重要になると考えられる。2次の非線形性を持つ超伝導量子ビットは、高速の量子ゲートが可能であるだけでなく、2種類の周波数のマイクロ波が照射されたときにだけ制御されるという特徴がある。この超伝導量子ビットのコヒーレンス時間の延長などの性能向上を行うことで、高精度で制御可能かつ、少ない制御ラインで制御できる2次元配列量子ビット系を作ることができると考えられる。

また、超伝導量子回路は、結合強度や非線形性を設計可能であり、それ自身が良い量子系でありながら、同時に良い量子制御器となっている。これまでの研究によって、超伝導量子回路はコヒーレンス時間が伸び続けており、それに伴い年々と制御精度が向上してきた。しかし一方で、超伝導量子回路は基板上に作製されるため、そのコヒーレンス時間には限界があると考えられる。そのため、より精度の高い量子制御を行うには、より長いコヒーレンス時間を持ちうる量子系を見つけ出すことが必要になる。このようなより高性能な量子系に対し、超伝導量子回路は制御量子系としての役割を担うことができる。将来の量子コンピュータ技術の発展のためには、より高性能な量子系を見つけ出す探索的研究も重要になると考えられる。

表面弾性波共振器と超伝導量子回路からなるハイブリッド量子系においては、センサーとしての応用を考えることができる。表面弾性波は、歪結合によって、力学的な力や電場や磁場、また核スピンと結合する。そのため、表面弾性波を精度よくプローブすることで、これらを対象として高精度のセンサーを開発することができる。なかでも、近年、歪と核スピンの結合は、新たな核磁気共鳴の手法として注目を浴びており、本研究テーマで開発した表面弾性波の超高感度測定と組み合わせることで、その性能向上が見込まれる。また、ハイブリッド量子系を利用した量子制御技術を用いると、表面弾性波と超伝導量子回路との間に量子エンタングルメントを生成することができる。エンタングルメントを利用して測定感度を上げる「量子センサー」の開発も今後の課題として挙げられる。

4. 自己評価

世界中の大学・研究機関で表面弾性波共振器に着目したハイブリッド量子系の研究が進め

られる中で、早い段階でハイブリッド量子系の実現に成功し、さらにその系を用いて表面弾性波の精密測定まで実現したことは評価に値すると考えている。さらに、より高性能なハイブリッド量子系の実現を目指し、ハミルトニアンエンジニアリングという独自の手法を開発した。超伝導量子回路の特性を活かしたこの技術は、適用範囲が広く、超伝導量子回路分野における新技術開発にもつなげることができた。

一方で、当該研究者は、超伝導量子回路と光量子技術の融合というハイブリッド量子系におけるマイルストーンの実現にも挑戦した。しかし、微細加工技術による高性能光共振器の実現や、極低温における光学実験の困難さのために、光を用いた研究は室温実験に留まった。この点においては、光回路技術を持った他研究者と連携し、極低温光回路を共同で研究するという道もあったように思う。超伝導回路から通信波長帯の光子を発生させる、また光によって超伝導量子回路を制御するという技術は、今なお実現はしておらず、世界中の研究機関によって目標とされている技術である。この技術は、量子中継器・量子ネットワークの実現や、分散型量子コンピュータ、また超伝導量子回路の集積化といった、多くの次世代量子技術の根幹を担う技術になると考えられる。ハイブリッド量子系における次なる課題は光量子技術と超伝導量子技術の融合にあると考えている。

当該研究者は、ハミルトニアンエンジニアリングによって開発した2次の非線形性を持つ超伝導量子ビットによって、高速な制御による高精度な量子ゲートを実現した。超伝導量子回路の集積が進む現代において、このように拡張性が高く、高性能な量子ビットの実現は、既存の量子コンピュータの性能を大きく上げる可能性がある。開発した超伝導量子回路の性能向上や新しい配線技術の実現を目指し、超伝導量子技術の向上を狙っている。

2016年～2020年という期間は、量子コンピュータの実験研究が爆発的に加速した期間であった。そんな時に、本領域に参加している様々な量子技術の実験家や理論家と交流できたことは、これからの量子技術の時代へ飛躍していく上で、得るものの多い期間であったと思う。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi, and Yasunobu Nakamura, Qubit-assisted transduction for a detection of surface acoustic waves near the quantum limit, Physical review letters, 2017 年, 119, 180505
2. Ayato Okada, Fumikazu Oguro, Atsushi Noguchi, Yutaka Tabuchi, Rekishu Yamazaki, Koji Usami, and Yasunobu Nakamura, Cavity Enhancement of Anti-Stokes Scattering via Optomechanical Coupling with Surface Acoustic Waves, Physical Review Applied, 2018 年 10, 024002
3. Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi, and Yasunobu Nakamura, Single-photon quantum regime of artificial radiation pressure on a surface acoustic wave resonator, arXiv:1808.03372, 2018 年, submitted.
4. Atsushi Noguchi, Shumpei Masuda, Shingo Kono, Kentaro Heya, Samuel Piotr Wolski, Hiroki

Takahashi, Takanori Sugiyama, Alto Osada, Dany Lachance-Quirion, and Yasunobu Nakamura, two-qubit gate with a parity-violated superconducting qubit, in preparation.

(2)特許出願

研究期間累積件数:1 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表, 受賞, 著作物, プレスリリース等)

学会発表(招待講演)

1. Quantum hybrid system with a superconducting qubit and surface acoustic waves.
The 31st International Symposium on Superconductivity, つくば, 日本, 2018年
2. 超伝導量子回路を用いた表面弾性波の超高感度検出.
第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 日本, 2019年

学会発表

3. Qubit-assisted transduction for a detection of surface acoustic waves near the quantum limit. APS March Meeting 2018, Los Angeles, California, 2018
4. Dispersive coupling between a surface-acoustic-wave resonator and a superconducting qubit. APS March Meeting 2017, New Orleans, Louisiana, 2017

受賞

5. 平成 31 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰(若手科学者賞)
「ハイブリッド量子系における量子極限操作の研究」

研 究 報 告 書

「知的量子設計による量子計算・量子シミュレーションの新機能創出」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 藤井 啓祐

1. 研究のねらい

近年の量子情報実験の進展はめざましく、光格子中冷却原子を用いた量子シミュレータ、超伝導量子ビットを用いたアナログ量子計算 (NISQ: noisy intermediate scale quantum computing)、そして量子誤り訂正を伴うデジタル量子計算が現実味を帯びてきている。一方、現実が明らかになることによって、実験的現状と理論的要求に依然として大きなギャップがあることも明確になってきている。これらを踏まえ、制御された量子系の新たな機能を創出するためには、量子情報を実装する個々の量子系の特性・許される制御方法・古典側でもできる高度な情報処理を最大限に活用することによって、量子がもつ利点を最大限に引き出すための理論による新たなシステム設計が重要となっている。

本研究構想の目的は、冷却原子や超伝導量子ビット、NMR 量子スピンアンサンブル系などに代表される、様々な物理系の特色や制御性の制約に立脚した新たな理論的アイデアを導入することで、量子情報処理の実現を着実に次世代の機能へと推し進めることである。既に実現している、もしくは近未来的に実現される量子デバイスを最大限に活用するためには、すべてを量子系に押しつけ量子系から得られた測定結果から直接的に有益な情報を得るという従来戦略だけではなく、得られた測定結果を古典側においても高度に知的処理し、最大限有益な情報を紐解き、抽出することが重要であると考えている。このためには、古典コンピュータでも出来る部分と、真に量子性がなければ出来ない部分を明確に切り分け、後者のみを量子系へと着実にアウトソースする必要がある。本研究構想では、以上のような個々の物理系の制約の知見に基づいた系の設計や、また真に量子性の必要のない部分を古典側に知的処理する指針を、**知的量子設計 (intelligent quantum system design)**と定義する。知的量子設計によって、量子がもつ機能を最大限引き出すための理論的枠組みを、情報科学・物理学・基礎工学(物理工学)の本質的融合によって構築する。実験グループとも連携することによって、質的にも規模的にもこれまでの量子情報実験を遥かに超えた新機能の実験的実現に理論側から貢献する。

2. 研究成果

(1) 概要

さきがけ研究提案時(2016 年)の構想では、超伝導量子ビットの集積化などに基づく誤り耐性量子コンピュータを目指すボトムアップアプローチ、NMR 量子スピン系や冷却原子系などの制御性は低いが量子多体系の芳醇なダイナミクスを利用できるトップダウンアプローチの2つに分けて、それぞれの物理系の特性を生かした理論的提案を行うことを目的とした。その後、2017 年に入り 50-100 量子ビット級の量子コンピュータの実現が近づき、このような小規模で誤り訂正を施すほどの規模をもたない量子コンピュータをどのように活用するか、という NISQ

(noisy-intermediate-scale quantum computing)という領域が立ち上がった。図らずしも、後者のトップダウンアプローチとして計画していた内容が、さらに超伝導量子ビットの系もサンプリングをして利用する、という形で大きな研究領域として立ち上がったことになる。

このような背景を踏まえ、当研究プロジェクトでは、誤り耐性量子コンピュータを実現するための理論研究(ボトムアップ)、と近未来的に実現する NISQ マシン(トップダウン)を有効利用するための理論研究の両輪で進めてきた。前者については、現在主流となっている表面符号を超えるような性能を有する新方式の提案にむけて、新方式の設計を行った。また、この新方式の研究の中で、性能評価を行うためには、量子誤り訂正の復号問題に取り組む必要があることが明らかになり、機械学習を用いて高速かつ高い精度で復号化する方法の提案を行った。さらに、今後実験的に重要となるであろうコヒーレンスエラー(量子性を持ったエラー)の解析方法を構築した。また、光量子ビットなど、多様な量子系を用いた誤り耐性量子コンピュータの実現に資する研究をすすめた。後者については、アンサンブル量子系の多自由度性を用いて機械学習を行う量子レザバー計算に発想を得て、パラメータ付き量子回路からの出力をモデルとして機械学習を行う量子回路学習や、量子レザバー計算をフィードフォワード型にした量子エクストリーム学習などを提案した。量子エクストリーム学習や、量子カーネル推定などを実験グループと協力し原理実証実験を行った。さらには、NISQ マシンを量子化学計算に利用するための手法の提案や、小規模な NISQ マシンをもちってより複雑な量子計算を実行するための問題分割法など、NISQ マシンの性能を引き出すための提案も多数行った。

(2) 詳細

[誤り耐性量子コンピュータを目指した理論研究] 誤り耐性量子コンピュータを目指した研究では、これまで主流となっている表面符号を用いた研究に加え、表面符号に変わる新たな方式の提案という意欲的な目標を設定して研究を進めてきた。

この研究をするなかで、復号化方法が誤り耐性量子コンピュータの研究においてボトルネックとなることも明らかとなった。特定の限定的な状況では、効率の良い復号化方法が存在するが、一般的には NP 困難な問題となる。特にエラー確率が高い近未来的には、このような復号化を高性能かつ高速にする方法論が必要である。このため、機械学習を用いた復号化方法の構築を行った(Davaasuren-Suzuki-Fujii-Koashi, arXiv:1801.04377)。また、これまで確率的な(いわば古典的な)エラーに対してのみ量子誤り訂正の性能が評価されてきたが、量子誤り訂正の実験的実現が近づくなか、量子性をもったエラー、コヒーレントエラーについてもその性能にたいする影響について無視はできない。このため、コヒーレントエラーを解析的に取り扱うことができる誤り訂正モデルを構築し、コヒーレントエラーの誤り閾値に対する影響も解析した。また、この解析結果を説明しより複雑なモデルを拡張できるような有効モデルの構築も行った(Suzuki-Fujii-Koashi, Phys. Rev. Lett. **119** 190503, 2017)。

これらの研究に加え、光を用いた誤り耐性量子計算の研究(Fukui-Tomita-Okamoto-Fujii, Phys. Rev. X **8** 021054, 2018)や、誤り耐性量子コンピュータがきちんと閾値未満のエラー確率で動作しているかどうかを効率良く検証するための方法も提案した(Fujii-Hayashi, Phys. Rev. A **96** 030301(R), 2017)。

[近未来的に実現する NISQ マシンの有効活用に関する理論研究]

さきがけ提案当初(2016 年度初旬)は、近未来的に実現する量子コンピュータからサンプリングをし、古典コンピュータ上の処理と合わせて活用するというアプローチはまだ定着していなかった。そのような中、従来初期化が難しいと考えられていた NMR アンサンブル量子スピン系に着目し、機械学習へと応用する量子レザバー計算を提案した (Fujii-Nakajima Phys. Rev. App. **8** 024030, 2017, Nakajima et al Phys. Rev. App. **11** 034021, 2019)。これは、現在主流となっている、量子古典ハイブリッドアルゴリズムを機械学習に応用するという研究のさきがけであった。また、この量子レザバー計算では、アンサンブル量子系からサンプリングすることなく物理量の期待値を得ることを前提としていたが、NISQ という領域が 2017 年以降拡大し、超伝導量子ビットなど制御性の高い量子系に対してサンプリングをすることで物理量の期待値を得る、量子古典ハイブリッドアルゴリズムが研究されるようになっていった。そのような分野の変化に呼応して、パラメータ付き量子回路を機械学習のモデルとして利用し、教師あり学習をする世界初の NISQ を用いた教師あり学習アルゴリズム、量子回路学習を提案した (Mitarai-Negoro-Kitagawa-Fujii, Phys. Rev. A **98** 032309, 2018)。この方法では、パラメータ付き量子回路の最適化を勾配法を用いて実行するために、量子回路の解析的微分を行うことで勾配の値を実験結果から直接計算するための方法を導入した。量子回路学習は提案から2年を待たずして95件以上 (google scholar 調べ) 引用されており、このパラメータ最適化法は現在 NISQ のための量子古典ハイブリッドアルゴリズムで広く使われている手法となった。

また、上記の量子古典ハイブリッドアルゴリズムの研究を進める中で、量子アルゴリズムの性能評価をする必要が生じ、従来コンピュータを用いて高速に量子アルゴリズムをシミュレーションすることが NISQ 研究のための研究インフラとして重要であることに気づいた。このため、さきがけ研究予算を利用してプログラミングスキルのある技術補佐員を雇用し、従来コンピュータを用いた量子コンピュータの高速シミュレータを開発した。これは現在、qulacs としてオープンソースで全世界の研究者が利用できるようにしている。また現在のところ 30 量子ビット未満の NISQ 研究を最も高速にシミュレーションできる世界最速のオープンソース量子コンピュータシミュレータである。

量子古典ハイブリッドアルゴリズムの応用範囲を広げるための研究および、問題を分割することで、小規模の量子コンピュータの性能を最大限に活用するための方法も提案した。応用に関する研究では、量子回路学習と量子化学計算のアプローチを組み合わせることで、分子の基底状態やそのエネルギーを汎化し予測するためのアルゴリズムを提案した (Mitarai-Yan-Fujii, Phys. Rev. App. **11** 044087, 2019)。また、古典計算機でより難しくなるであると予想される励起状態計算 (Nakanishi-Mitarai-Fujii, Phys. Rev. Res. **1** 033062, 2019) や、低エネルギー部分空間における実時間ダイナミクスの計算 (Heya et al., arXiv:1904.08566)、非平衡定常状態の計算 (Yoshioka et al., arXiv:1908.09836)、など従来の基底状態を計算する VQE (variational quantum eigensolver) を様々な用途に拡張した。

さらに、量子古典ハイブリッドアルゴリズムを用いて2量子ビット演算の精度を向上させる方法 (Heya et al, arXiv:1810.12745) や間接測定を直接測定に置き換える方法 (Mitarai-Fujii, Phys. Rev. Res. **1** 013006)、そして非隣接量子ビット間の2量子ビット演算を仮想敵に古典処理によって実装するなど NISQ のための問題分割法 (Mitarai-Fujii, arXiv:1909.07534) を提案し

た。

また、近未来的に実現する量子デバイスの量子超越性の検証という方向性では、誤り耐性量子コンピュータの要件を満たさない、よりノイズレベルの高い量子コンピュータにおける量子超越性理論(Fujii, arXiv:1610.03632)や、準古典確率的断熱量子計算における量子超越性理論(Fujii, arXiv:1803.09954)の研究も進めた。

3. 今後の展開

Google や IBM が 50 量子ビット級の量子コンピュータを実現しつつあり、そして我が国における実験のプロジェクトにおいても同様の規模の量子コンピュータが次の5年のスコープに入るなど、今後量子コンピュータの実装は千量子ビット級まで順調に進歩すると予想される。そのような中、量子誤り訂正は量子超越性の次にくるマイルストーンであり、この実現が射程圏内に入ってきたと考えられる。本さがけ研究期間には、NISQ 時代の勃興というダイナミックな時代の変化があり、NISQ のための応用研究に当初の予定より多くのエフォートを割くことによって重要な研究成果が得られた。一方で、量子誤り訂正の新規手法の提案は性能評価の解析の途中であり、今後の残りのさがけ研究期間および今後の研究テーマとして取り組む予定である。また、量子誤り訂正の実現が近づくなか、より現実的なエラーや、制御における問題の解決を目指した研究も、従来方法の表面符号に基づいて今後進めていく予定である。

一方、NISQ 研究においては、現在様々な手法が提案されるなか、その原理実証実験としては小規模にとどまる結果しか世界的に示されていない現状である。今後は、量子化学や物性、そして機械学習など応用が期待される分野にとって十分意味のあるベンチマークを進め、NISQ マシンであっても意味のあるタスクが実行可能か、それを実行するために不十分な要素なにかを明確にしていける予定である。

4. 自己評価

本さがけプロジェクトでは、NISQ の活用という近未来的に実現する量子コンピュータの活用や、当分野の究極的な目標である誤り耐性量子コンピュータにおいて必須となる量子誤り訂正という2つの大きな課題に取り組んだ。前者については、NISQ という言葉が明確に意識しだす前から、量子ダイナミクスを機械学習へと応用する、量子レザバー計算に着目し、世界に先駆けて、量子古典ハイブリッドの機械学習アルゴリズムを提案した。また、これに続いて、パラメータ付き量子回路をモデルとして機械学習を行う、量子回路学習も提案した。本論文は発表から1年半ほどで95件以上引用されており、ここで導入した量子回路の解析微分による勾配の取得方法は、以降の多くの研究で利用されている。また、NISQ マシンを用いた量子古典ハイブリッドアルゴリズムの性能評価を行うために開発した高速シミュレータ qulacs は現在オープンソースとして公開され、当プロジェクトを超えて多くの研究者が利用している。これらの開発環境を用いて、励起状態や低エネルギー部分空間内のダイナミクス、非平衡定常状態など様々な用途に応用するための手法も開発された。

後者においては、50量子ビット級の量子コンピュータが実現するなか、量子誤り訂正の実証実験がいよいよ射程範囲に入ってきた。実際に量子誤り訂正の実験をする上では、高速かつ性能のよい復号化方法が必須である。また、実際の実験ではこれまであまり検討されてこなかった量子性のあるエラーが生じていると考えられる。機械学習による復号化方法の提

案や、コヒーレントエラーを解析的に取り扱うモデルや半古典的な実効理論の構築は、これら近未来的に実現する量子誤り訂正の実証実験に資するものである。また、長期的には、既存の表面符号方式を性能や機能面で超えるような新たな誤り耐性量子計算法が求められる。このような意欲的な課題にも本さがけプロジェクトで取り組むことができ、今後も継続して研究を進める予定である。

以上の成果から、本さがけプロジェクトでは当初計画していた目的をほぼ達成し、またNISQ 研究については世界のリードする新しい潮流を作ること成功したと判断する。量子誤り訂正については、表面符号方式をこう得るという挑戦的かつ長期的な課題であり、さがけ期間終了後も継続することで10年後、新たな潮流となりうる研究を本さがけ研究で得られた成果をもとに創成したいと考える。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| 1. K. Mitarai, M. Negoro, M. Kitagawa, and K. Fujii, "Quantum circuit learning." Physical Review A, 2018, 98, 032309. |
| 2. Y. Suzuki, K. Fujii, and M. Koashi. "Efficient simulation of quantum error correction under coherent error based on the nonunitary free-fermionic formalism." Physical Review Letters, 2017, 119, 190503. |
| 3. K. Mitarai and K. Fujii, "Methodology for replacing indirect measurements with direct measurements". Physical Review Research, 2019, 1, 013006. |
| 4. K. Fukui, A. Tomita, A. Okamoto, and K. Fujii, "High-threshold fault-tolerant quantum computation with analog quantum error correction." Physical Review X, 2018, 8, 021054. |
| 5. K. Fujii and K. Nakajima, "Harnessing disordered-ensemble quantum dynamics for machine learning", Physical Review Applied, 2017, 8, 024030. |

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 4件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- ・(トップ国際会議口頭発表採択) K. Fujii, "Threshold theorem for quantum supremacy", 20th Annual Conference on Quantum Information Processing (QIP), Seattle, USA (14-20/1/2017).
- ・(国際会議招待講演) Keisuke Fujii "Quantum speedup in stoquastic adiabatic quantum computation with non-standard measurements", 18th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2018), Nagoya, Japan (8-12/9/2018).

- ・プレスリリース:「量子コンピュータのデバッグを高速化～速いがゆえのジレンマを解消～」

EETimes: <https://eetimes.jp/ee/articles/1711/10/news035.html>

マイナビミューズ:<https://eetimes.jp/ee/articles/1711/10/news035.html>

・Google の量子超越性についての識者としてのコメント、日経新聞、産経新聞、朝日新聞(予定)、東京新聞(予定)、Newton(予定)、日経サイエンス(予定)

・小柴健史, 藤井啓祐, 森前智行, 「観測に基づく量子計算」, コロナ社(2017).

・藤井啓祐, 「驚異の量子コンピュータ-宇宙最強マシンへの挑戦-」, 岩波科学ライブラリー(2019).

研 究 報 告 書

「超伝導位相制御素子によるスケーラブル量子技術」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 山下 太郎

1. 研究のねらい

本研究のねらいは、超伝導量子デバイスにスピントロニクス概念を融合させることで、超伝導単体では実現が困難なレベルの高いスケーラビリティを有する、新しい位相制御型の量子計算素子(量子ビット)及び超伝導回路の基盤技術を創出することである。

近年、超伝導量子ビットは設計可能かつ良好なコヒーレンス時間を有する特長から、量子計算機の実現に向けた有力な候補として研究が進められている。ところが従来の磁束型超伝導量子ビットでは、量子ビット動作を行うために外部磁場の印加が必要不可欠であり、多量子ビットを備えた大規模量子回路の実現を妨げる主要因となっている。磁束型量子ビットは3つのジョセフソン接合を含む超伝導ループで構成されるが、動作のためには半磁束量子に相当する外部磁場をループに印加することが必要不可欠である。単一またはごく少数の量子ビットの場合には磁場を調整すればよいが、多量子ビット化した際には素子サイズのばらつきや磁場の空間不均一性のため、全量子ビットを動作点に調整するのは極めて困難となる。またコヒーレンス性の観点からも、磁場印加用マグネットからの磁気的雑音と量子ビットの結合によるデコヒーレンスも懸念される。

そこで本研究では、「スピンジョセフソン接合(以下 Spin-JJ)」を導入することで、上記の主要課題の克服を目指す。Spin-JJ は磁性層を超伝導体で挟んだ構造をもつが、磁性層の膜厚を制御することで、両側の超伝導位相差が π の場合に安定となる「 π 状態」が発現することが知られており、位相制御素子として機能する。この Spin-JJ を磁束型量子ビットに導入し、超伝導ループに自発的な位相のねじれを発生させることで、磁場ゼロで動作可能な「磁束バイアスフリー」量子ビットを実現する。量子ビット毎の外部磁場調整が不要となるため、多量子ビット化におけるスケーラビリティの飛躍的な向上が期待される。また、量子ビットの周辺回路にも Spin-JJ 導入を検討する。単一磁束量子回路等の超伝導論理回路は、極低温下での低電力性と超高速性を両立可能であるため量子ビットの周辺回路応用が期待されるが、ミリケルビンレベルの超極低温下では回路の発熱等が懸念される。そこで本研究では、超伝導論理回路へも Spin-JJ を導入することで、量子ビット信号処理に向けた超伝導回路応用に関する基盤技術の構築を狙う。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では3つの研究テーマ、A)位相制御素子の作製・評価技術の構築、B)位相制御素子を組み込んだ磁束バイアスフリー量子ビットの実証、C)位相制御素子を用いた超伝導論理回路の基盤技術構築、に関して研究を進めた。

テーマ A に関しては、量子ビット応用に適した窒化物ベースの Spin-JJ (NbN/CuNi/NbN 接合、CuNi が強磁性体)を作製し、窒化物 Spin-JJ として世界で初めて位相制御素子として動作する π 状態の実証に成功し、論文発表及びプレスリリースを行った。その後基板を誘電

損の大きい MgO から量子ビットに利用可能な Si へと移行し、Si 基板上への TiN バッファ層技術を融合することで、高性能な量子ビットの実現に重要となる、酸化物フリー Spin-JJ 技術を確認した。並行して、Spin-JJ でのエネルギー散逸の抑制が期待される絶縁層 AlN 付き Spin-JJ も作製し、臨界電流等の物理パラメータを体系的に明らかにした。

テーマ B に関しては、主に 2 種類の量子ビット構造について研究開発を行った。ひとつ目は、窒化物 Spin-JJ と Al ベースの量子ビット接合のハイブリッド構造である。位相シフタとして NbN/CuNi/NbN 接合を利用し、磁束型量子ビットを構成する接合としては既に確立された斜め蒸着法により作製した Al/AIO_x/Al 接合を採用することで、確実な量子ビットの実現を目指した。その結果、本研究最大の目標であった、Spin-JJ 量子ビットの磁束バイアスフリー動作実証に成功した。励起状態から基底状態へのエネルギー緩和時間としても 1 μs を超える性能が得られており、性能向上に向け設計・プロセス等様々な観点から改善を継続中である。もうひとつは、全てを窒化物接合で構成するオール窒化物構造である。こちらは窒化物 Spin-JJ の特性制御や作製プロセスの難易度が高かったが、量子ビット動作実証に成功し、現在磁束バイアスフリー動作に関して検証中である。

テーマ C に関しては、断熱型磁束量子パラメトロン(AQFP)回路と呼ばれる超伝導回路へ Spin-JJ の導入を行い、従来型よりも小型化・集積化に適した構造を提案した。また単一磁束量子(SFQ)回路に関しても Spin-JJ を導入することで、静的な電力消費が低減可能なことを示した他、大規模集積回路プロセスへの Spin-JJ 融合についても基盤技術を確認した。

(2) 詳細

【研究テーマ A 「位相制御素子の作製・評価技術の構築」】

研究テーマ A に関しては、研究開始から半年間で窒化物 Spin-JJ における明瞭な 0 状態と π 状態の相転移を観測することに成功した(論文発表 1 及びプレスリリース 1)。具体的には、超伝導体に NbN、強磁性体に CuNi 合金を採用し、MgO(100)基板上へ真空を破らずに NbN/CuNi/NbN 多層膜を成膜することでクリーンな接合界面を有する Spin-JJ を作製した。0- π 転移を観測するためには接合の臨界電流値を測定する必要があるが、Spin-JJ は金属的なジョセフソン接合であるため臨界電流値以上の電流に対して発生する電圧が非常に小さく、通常のジョセフソン接合測定系では臨界電流値の測定が不可能である。そのため研究開始直後に、ナノボルトメータをベースとした極微小電圧測定系を構築し、精度良く Spin-JJ の臨界電流値の測定を可能とした。その結果、臨界電流の CuNi 膜厚依存性及び温度依存性において、0- π 転移を示唆するディップ構造を観測し(図 1)、微視的理論を用いた詳細な解析により 0- π 転移であることを実証した。また、0- π 転移 CuNi 膜厚近傍にある Spin-JJ の臨界電流に関して現れる低温側での飽和など特徴的な温度依存性も観測し、全て理論式によりコンシステントに説明できることを明らかにした。これにより、研究テーマ B に向けたコア技術の確立を研究開始から早い段

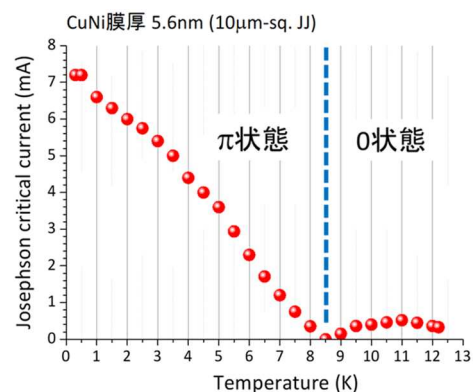


図 1. Spin-JJ における 0- π 転移。

階で行うことができた。その後、Spin-JJ に用いる基板として、誘電損の大きい MgO から Si への移行に挑戦した。ここでは、既に従来のジョセフソン接合で実績のある TiN バッファ層技術を採用した。量子ビットで一般的に用いられる高抵抗 Si 基板に特定の前処理を施した後、超高真空下で TiN を成膜することにより、TiN(100)が結晶配向する。TiN と NbN の格子定数は近いため、この TiN バッファ層上に NbN 及び NbN/AlN/NbN のエピタキシャル成長が可能となる。そこで本研究では、TiN/Si 基板上へ NbN/CuNi/NbN 接合を作製することで、量

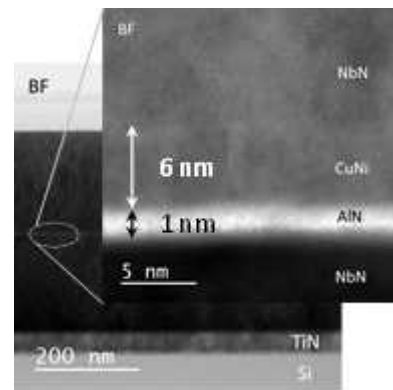


図 2. Spin-JJ の電子顕微鏡写真。

子ビットへ応用できる位相制御素子としての Spin-JJ 技術を確立した。MgO 同様、Si 基板上でも π 状態にあることは、後述の量子ビット測定に加え、Spin-JJ を含んだ超伝導ループにおける最大電流の磁場変調測定からも確認した。さらに将来的な技術として、Spin-JJ の NbN と CuNi 間に絶縁層 AlN を挿入することで準粒子トンネル等によるエネルギー散逸の抑制、つまり量子ビットの性能向上が期待されるため、NbN/CuNi/AlN/NbN 接合の作製も行い、これに成功した(図 2)。以上より、研究テーマ B の基盤となる位相制御素子の作製・評価技術の確立に成功し、本テーマの目的を達成した。

【研究テーマ B 「位相制御素子を組み込んだ磁束バイアスフリー量子ビットの実証」】

研究テーマ B に関しては、研究テーマ A で確立した窒化物 Spin-JJ の技術をベースとして、大きく分けて 2 種類のアプローチ・素子構造で研究を進めた。ひとつ目は、Spin-JJ を位相シフタとして機能する接合として利用し、量子ビットのエネルギー準位を決定する接合としては実績のある斜め蒸着法で作製した Al/AIO_x/Al 接合を用いる構造である。この NbN と Al のハイブリッド構造を実現するために、最初に TiN バッファ層付き Si 基板上に Spin-JJ を作製し、下部 NbN 層及び TiN 層を利用してコプレーナ導波路及び共振器、Al 接合とのコンタクト部を形成した。その後層間絶縁のために SiO₂ 層が必要となるが、一般的に酸化物は量子

ビット性能を劣化させるため、Al 接合を作製する前にフッ化水素酸より選択的にエッチングを行い除去した。最後に Al 接合を成膜・形成して Spin-JJ 量子ビットを作製した。図 3 に示すように、共振周波数を 9 GHz に設計したコプレーナ共振器に、Spin-JJ 付き/無し 2 種類の磁束型量子ビットが結合した構造を作製した。まず、作製

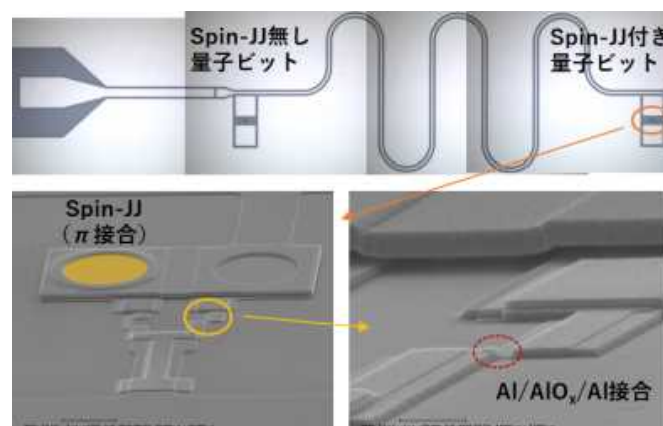


図 3. 作製した Spin-JJ 量子ビットの顕微鏡写真。

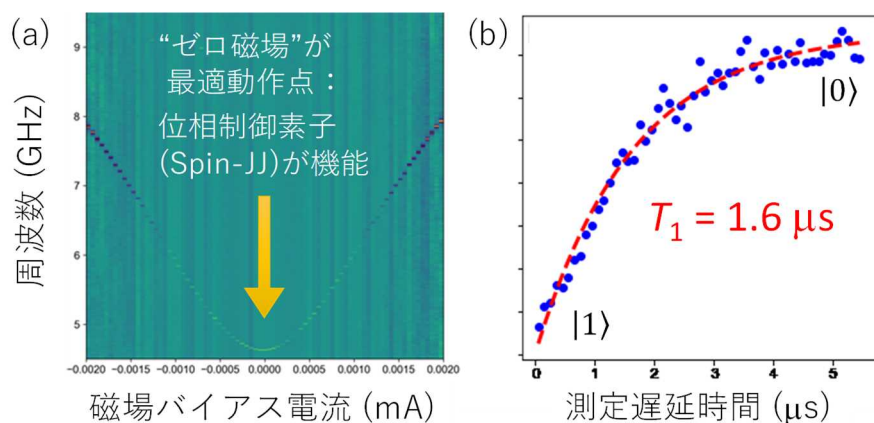


図 4. (a) Spin-JJ 量子ビットのスペクトロスコピー。(b) エネルギー緩和時間の評価。

した量子ビットのスペクトロスコピー(磁場依存性)の測定を行った。その結果 Spin-JJ 付き量子ビットに関して、図 4(a)に示すようにゼロ磁場においてエネルギー最小となる最適動作点が観測され、磁束バイアスフリー動作の実証に成功した(学会発表 1 他)。時間領域測定も行い、 π パルスにより励起状態へ量子ビットを励起してから一定の遅延時間の後に状態を測定した結果、図 4(b)に示すように励起状態から基底状態への緩和時間(エネルギー緩和時間, T_1)として $1.6 \mu\text{s}$ が得られた。Spin-JJ 無しの量子ビットに関しても同程度の T_1 が得られており、更なる性能向上を目指し設計及びプロセスの改善に取り組んでいる。以上により磁束バイアスフリー量子ビットの実現という本テーマの目的を達成することに成功した。

もうひとつのアプローチは、Spin-JJ を含む全接合を窒化物接合で構成する構造である。本テーマ開始当初は、3 つの絶縁層付き Spin-JJ による構造を作製したが、微小接合作製や特性制御の困難性に直面したため、位相シフタとして機能するひとつの Spin-JJ と、量子ビット接合としての NbN/AlN/NbN 接合を組み合わせる構造に方針転換した。その結果、スペクトロスコピー及び時間領域測定から、量子ビットとしての動作実証に成功した(学会発表 2 他)。磁束バイアスフリー動作については、オフセット磁場の存在によりまだ明確ではないため詳細に調査中である。一方で、同一基板上に作製した Spin-JJ は別実験により π 状態であることを確認しているため、測定系の見直し等により実証可能であると考えている。

【研究テーマ C 「位相制御素子を用いた超伝導論理回路の基盤技術構築」】

本テーマに関しては、まず超伝導論理回路のひとつである AQFP 回路へ Spin-JJ を導入することで、回路の小面積化につながることをシミュレーションにより示した(論文発表 2)。AQFP は超低消費電力性が特長であるため、冷却能力の限られたミリケルビンステージにおいても動作が期待でき、量子ビットの周辺回路応用が期待できる。また、SFQ 回路にも Spin-JJ 導入の検討を行い、位相制御の効果による静的な消費電力の削減が可能であることを示した。さらに、超伝導集積回路の豊富な実績をもつ産業技術総合研究所のファウンダリプロセス(CRAVITY)へ Spin-JJ を組み込む新しいプロセスを提案・検証し(学会発表 3 他)、CARVITY チップ上での位相制御動作を実証することに成功した。これらは量子ビットの周辺回路実現に向けた技術基盤となる成果である。以上から、本テーマについても目的は達成できたと考えている。

3. 今後の展開

本さがけ研究において Spin-JJ という超伝導位相制御素子を実現し、超伝導量子ビットの大規模化に向けた重要な基盤技術である、磁束バイアスフリーな磁束型量子ビットの実証に成功した。これは超伝導量子計算分野へブレークスルーを与えたのみではなく、超伝導スピントロニクス
の新しいデバイス応用の可能性を切り拓いたことを意味する。今後は、まず Spin-JJ 量子ビットの素子性能(エネルギー緩和時間やコヒーレンス時間等)の向上を短い期間で達成し、その上で多数量子ビットから構成される集積量子回路の開発を目指す。さらに、量子ビットの周辺回路として超伝導論理回路へも Spin-JJ の導入を進め、更なる低消費電力化と集積化を可能とすることにより、量子回路と制御・読み出し回路を融合した、超伝導量子・古典ハイブリッド回路の実現を目指す。また、Spin-JJ 以外にも超伝導スピントロニクス技術による新奇な位相制御手法の開拓にも挑戦し、超伝導及びスピントロニクスデバイスの高性能化・高機能化を推進していく所存である。

4. 自己評価

まず研究目的の達成状況としては、研究開始からごく早い段階で Spin-JJ における π 状態を実証したことに加え、本研究最大の目的である磁束バイアスフリーな Spin-JJ 量子ビットの実証にも成功したため、明確に目的を達成できたと考えている。また超伝導論理回路への Spin-JJ 導入に関しても、シミュレーションによる優位性実証の他、集積回路プロセスとの融合に向けた基盤技術を構築できた。研究実施体制としては、Spin-JJ 技術開発に関しては前職場である国立研究開発法人・情報通信研究機構において研究代表者が作製から測定、解析まで全てを行った。名古屋大学へ異動後は、Spin-JJ 量子ビット開発や超伝導回路応用に関して研究代表者が中心となり学生や研究者とも適宜相談・協力しながら研究を推進した。途中研究環境の変化があったものの、さがけの支援のおかげもあり、研究進捗が滞ることなく効率良く研究を進めることができた
と自負している。研究費の執行としては、主に Spin-JJ 及び量子ビットの作製に必須となる超伝導/磁性膜スパッタリング成膜装置の購入及び移設、素子特性評価システムを構成するマイクロ波源等の各種機器等の購入、素子作製に必要となる基板等の購入に使用した。科学技術及び社会・経済への波及効果としては、Google や IBM を筆頭として超伝導量子回路の大規模化競争が激化している状況において、本さがけで実証した磁束バイアスフリー量子ビット技術は、優れたスケラビリティや高い非調和性を有することから現在主流のトランズモン型量子ビットを置き換え得るポテンシャルを大いに秘めており、その将来的な波及効果は極めて大きいことが予想される。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Taro Yamashita, Akira Kawakami, Hirotaka Terai, “NbN-based 0 and π ferromagnetic Josephson junctions”, Physical Review Applied, 2017, vol. 8, pp. 054028–1–5.
2. Kota Arai, Naoki Takeuchi, Taro Yamashita, Nobuyuki Yoshikawa, “Adiabatic quantum-flux-parametron with π Josephson junctions”, Journal of Applied Physics, 2019, vol. 125, no. 9, pp. 093901–1–7.
3. Taro Yamashita, “Phase Shift and Control in Superconducting Hybrid Structures”, IEICE

Transactions on Electronics, 2018, vol. E101.C, no. 5, pp. 378–384.

4. Taro Yamashita and Hirotaka Terai, “Recent Progress in Ferromagnet/Superconductor Hybrid Structure and its Applications to Cryogenic Computing”, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2016, vol. 136, no. 12, pp. 728–733.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【主要な学会発表】

1. Taro Yamashita, Kun Zuo, Yoshiro Urade, Qiu Wei, Hirotaka Terai, Akira Fujimaki, Yasunobu Nakamura, “Phase-shift flux qubit with ferromagnetic π junction”, 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th), Tsukuba, Japan, May 13–15, 2019.
2. Sunmi Kim, Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Wei Qiu, Taro Yamashita, Ziqiao Ao, Koichi Semba, Hirotaka Terai, “NbN-based superconducting qubit on Si substrate”, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics 2019 (ISNTT2019), Atsugi, Japan, November 18–22, 2019.
3. Daiki Hasegawa, Yuto Takeshita, Kyosuke Sano, Masamitsu Tanaka, Taro Yamashita, Akira Fujimaki, “Magnetic Josephson junctions on Nb four-layer structure for half flux quantum circuits”, The 17th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2019), Riverside, USA, July 28–August 1, 2019.

【受賞】

1. 平成 29 年度文部科学大臣表彰 若手科学者賞

【プレスリリース】

1. 「窒化ニオブを用いた磁性ジョセフソン素子を世界で初めて実現」

国立研究開発法人情報通信研究機構、2017 年 11 月 15 日.

URL: <https://www.nict.go.jp/press/2017/11/15-1.html>

研 究 報 告 書

「フィードバック増幅による量子機能創出」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研 究 者: 山本 直樹

1. 研究のねらい

現代エレクトロニクスの爆発的な発展の立役者として、フィードバック増幅の発明と方法論の体系化が挙げられる。すなわち、増幅器(とくにオペアンプ)の入出力を適切にフィードバックすることで、能動フィルタ、ホールド回路、同期検出器、波形整形器、比較器などなど、安定で斬新かつ有用な機能システムを無数に実現することが可能となった。本研究の大きな目的は、このフィードバック増幅の方法論を量子レベルで展開し、現代エレクトロニクス・電子回路理論に比肩しうる、量子機能システム群の設計理論を構築することである。すなわち、「フィードバック増幅による量子機能設計論」の構築を研究の狙いとする。これにより、量子系の高度制御・高度機能実現のための汎用コア技術を提供し、量子科学の進歩発展に貢献することを目指す。本研究では、このコンセプトに則って、つぎの2つのねらいを設定する:

[1] 量子フィードバック増幅法に基づき、従来実現できなかった安定で高度な量子機能システムを数多く理論提案する。そして、数値シミュレータによる検証と実験研究者による支援をもとに、それらの実質的性能と実装可能性を理論的・数値的に明らかにする。

[2] 機能設計のために数理工学を整備する。すなわち、いかなるフィードバックがいかなる量子機能を生み出すのか、という根本的な問題を解析するための理論構築を行う。また、制御されたシステムの安定性・ロバスト性を評価するための方法論の体系化を行う。

2. 研究成果

(1) 概要

「研究のねらい」で記載した大項目[1]について、次の成果を得た。すべての小項目について数値計算を実施し、とくにフィードバック増幅により獲得された機能が有効な状況(周波数領域)を明らかにした。

[1-1] 量子系の微分器・積分器の実現法とその応用(量子信号の高感度検出、および量子PID 制御器による振動子の冷却)。[1-2] 能動フィルタの実現法とその応用(量子パタワースフィルタの構成法の開発と性能評価、および量子位相進みフィルタの実現と重力波検出器の広帯域化への応用)。[1-3] 一方向増幅器の実現法とその応用(超電導量子系のロバスト一方向増幅器の実現)。[1-4] 量子発振器の実現法とその性能評価。[1-5] ロバスト多体量子エンタングルメント生成器の実現法。

つぎに、「研究のねらい」で記載した大項目[2]について、次の成果を得た。とくに[2-5]はフィードバック増幅法のターゲットを拡大するものであり、また[2-6, 2-7]はフィードバック増幅によって機能化された量子系の性能を評価し解析するための一般論である。

[2-1] 量子理想増幅器(理想オペアンプの量子版)の特徴づけとフィードバック増幅で制御された量子系の入出力関係(伝達関数)の導出。[2-2] フィードバック増幅制御された量子系

の安定判別法および感度関数評価法の開発。[2-3] カスケード増幅のためのフィードバックの設計法開発。[2-4] 一般の量子開放系をフィードバック増幅制御したときの効果の解明。[2-5] 測定フィードバック系を全量子型フィードバック系へ置き換える一般的方法の開発。[2-6] デコヒーレンスの影響下にある量子制御性能を評価するための一般理論の構築。[2-7] 結合量子振動子系の同期現象を解析するための一般的方法論の開発。

(2) 詳細

「概要」欄にて示した各課題について、成果の詳細を説明する。

[1-1] 量子系の微分器・積分器の実現法とその応用。理想的な量子増幅器と周波数ロックされた対称キャビティをフィードバック結合しハイゲインリミットをとると、量子信号に対する微分器(D: Differential)と積分器(I: Integration)の量子版が構成できる。この入出力デバイスは、量子信号の交換関係を保持するように機能する。この量子積分器を量子ビットの高精度検出に応用できることを示した(以上、その他成果 1)。古典の場合、この機能素子の典型的な応用例は PID フィードバック制御である(P: Proportional は増幅器そのもの)。この量子 PID 制御器をオプトメカニカル系の冷却に応用した。とくに、D 制御器をコヒーレントフィードバック(測定器を介しないフィードバック)の形で組み込んだオプトメカニカル系において、振動子の冷却が効率よく行えることを数値シミュレーションで確認した(以上、その他成果 5)。

[1-2] 能動フィルタの実現法とその応用。制御器として周波数ロックされた非対称キャビティを用いる事で、能動フィルタを構成できることを示した。これを用いて、量子光学系の典型的な状況において、静的な受動フィルタに比べ2~3桁高い Q 値をもつ能動フィルタを実現できることを示した。次いで、同様に高い Q 値をもつ 2 次バターワースフィルタの構成法も示した。これは量子通信に応用できる。この能動フィルタは、パラメータを特別な値に設定することで位相進み(したがって非因果的)デバイスとして機能させることもできる。このデバイスは、以下のように重力波検出器の感度向上へ役立てることが出来る。重力波干渉計は光キャビティからなり、これによって光パワーの増加と感度向上を実現している。しかし、このキャビティは重力波信号にとってはローパスフィルタとして働くため、感度は上がるが帯域が狭まる。ここで上述の位相進みデバイスを組み込み、ローパス成分をキャンセルさせることで、広帯域で感度を向上させることができる。非因果性は、外部信号をフィードバックして全体系を安定化させることで解消する。このアイデアは[Miao et al, PRL 115, 211104, 2015]で提唱されたものだが、その効率的な実現法が不明であった。しかし本研究によって、位相進みデバイスを全光学的に、かつシステムティックに構築可能となった。これを干渉計に組み込んだ系について数値検証を行った。結果、ロバスト性を確保しつつ広帯域感度向上が可能であることが数値的に判明した。低周波帯域での感度改善はいわゆる反作用回避測定に基づく多くの提案があるが、高周波帯域での改善法は有効な方法が知られておらず、新規性の高い有意義な結果であると考えている。以上の成果は(その他成果 1, 2)にて発表している。

[1-3] 一方向増幅器の構成法、およびその応用。量子信号を増幅する際に、増幅された信号が信号源に戻るパスを通る、という状況がよくある。この増幅された信号は、例えばサーキュレータなどを用いて別パスに逃がし、測定系に送る。しかし一般にサーキュレータを通過すると信号雑音比が悪化するため、近年、増幅過程を一方向的に実現する「一方向増幅器」が理論実験ともに活発に研究されている。本研究では、フィードバック増幅の方法を利用する新

しい一方増幅器の実現法を開発した。フィードバック増幅を利用していることから、ロバストな入出力関係を実現することができ、これが従来法と比べて新規性が高くかつ有用である点である(その他成果 1)。

[1-4] 量子発振器の構成法。量子増幅器と周波数ロックしない対称キャビティをフィードバック結合することで、発振器を構成できることを示した(その他成果 1)。とくに、実現できる振動の振幅と持続性にトレードオフがあることを示した。これは量子特有の性質である。ここで示した量子発振器は線形系からなるため、非線形素子を組み入れることでより持続性の高い量子リミットサイクル振動が発生させられると考えている(成果[2-7]と関連)。

[1-5] 量子エンタングルメント生成器のフィードバック増幅による安定化。エンタングルとは、複数の量子変数(ここでは光のモード)の間に生じる非古典的な相関であり、これが量子計算等の基盤となっている。量子増幅器はエンタングル状態発生器として用いることができ、一方で、フィードバック増幅は機能をロバスト化するという利点をもつ。これらの組み合わせにより、ロバストなエンタングル生成器を構成できることを示した。とくに、4つのモード間までのエンタングルは効率よくロバスト化できることを示した。成果は(論文 1)で発表した。

[2-1] 量子理想増幅器(理想オペアンプの量子版)の特徴づけとフィードバック増幅で制御された量子系の入出力関係(伝達関数)の導出。フィードバック制御された全系のダイナミクスを解析し、増幅率無限大の理想極限における閉ループ系の入出力関係(伝達関数)を導出した。その際、古典オペアンプの場合と同様、増幅器に関係する量が伝達関数に現れないことが肝要であるが、これが成立するための条件を求めた。これは「量子理想オペアンプの特徴づけ」を得たことに相当する。この成果はすべての解析の土台となる。この成果は(その他成果 1)にて発表している。

[2-2] フィードバック増幅制御された量子系の安定判別法および感度関数評価法の開発。古典ナイキスト線図の方法を拡張し、閉ループ系の安定判別を行う手法を開発した(その他成果 1)。古典の場合と同様、ループを閉じなくても安定判別は可能であるが、増幅器・制御器共に2入力2出力系であり、ループのつなぎ方、測定すべき量子場などは古典と比べて非自明になる。

[2-3] カスケード増幅のためのフィードバックの設計法開発。カスケード接続された量子増幅器をフィードバック安定化する際、フィードバックの構造にいくつかの配置が考えられるが、感度の指標から最適なものが存在する。ここでは代表的な2つを対象に、一方が他方に比べてつねに優れていることを証明した。また、これらの差異は古典の場合に比べて小さいことを数値シミュレーションで確認し、その起源が量子系特有の構造によるものであることを明らかにした(論文 5)。古典電子回路の構造から分かる通り、一般にサーキットは複数の増幅器のカスケードからなり、従って本成果はそのようなマルチコンポーネントの量子サーキット設計論構築のための足がかりになると考えている。

[2-4] 一般の量子開放系をフィードバック増幅制御したときの効果の解明。古典の場合、オペアンプと線形に限らない一般の制御器をフィードバック結合すると、制御器の逆演算が機能として発現することが知られている。この事実の量子版を明らかにした。具体的には、量子増幅器と一般の量子開放系をフィードバック結合し、ハイゲインリミットで制御器の演算子を共

役化したものが現れることを確認した(その他成果 3)。

[2-5] 測定フィードバック系を全量子型フィードバック系へ置き換える一般的方法の開発。
本研究で開発している各種機能は、測定器などの古典的デバイスを含まないコヒーレントフィードバックにより生成される。一方で、量子測定に基づくフィードバック制御は、例えば量子誤り訂正等で効果を発揮する強力な手法である。本課題では、この測定+フィードバックというプロセスを全量子型で行う為の一つの一般的指針を提案し、その有効性を様々な量子系で確認した(論文 4)。

[2-6] デコヒーレンスの影響下にある量子制御性能を評価するための一般理論の構築。
制御された一般のマルコフ量子開放系について、その定常状態とターゲット状態の距離の下限を導出した。これは制御法、デコヒーレンスの種類などによらない完全な一般理論である。量子フィードバック増幅制御された系は不可避免的にノイズが加わるため、本理論を適用して制御系設計の指針として用いることができる。本成果は(論文 2)で発表した。

[2-7] 結合量子振動子系の同期現象を解析するための一般的方法論の開発。 オペアンプに基づく電子回路の重要な応用として発振器がある。典型的には、オペアンプにより負値抵抗値をもつ不安定素子(負性抵抗)を作り出し、これを内包する非線形回路を設計することで多彩な周期信号を発生する発振器を構築することができる。また、複数の非線形発振器を結合させると同期現象が起きるが、これは電子回路応用はもちろん、非線形物理の一大テーマである。成果項目[1-4]で記載した通り、フィードバック増幅を用いて量子発振器を作ることができる。本研究では、これにさらに非線形要素を入れて安定な量子発振器が構成できたと仮定したうえで、それらを結合して生じる同期現象の解析法を構築した。これは古典非線形同期理論の手法(とくに位相感度関数)を量子系に使えるように拡張したもので、基本的な理論構築とシミュレーションによる有効性の確認を実施した。この成果は(論文 3)にて発表した。

3. 今後の展開

まず、項目2「研究成果」の小項目すべてについて、実機を想定した詳細な数値シミュレーションを行い、各機能の実質的性能と実装可能性を理論的に明らかにする。成果[1-2]で説明した通り、位相進みフィルタの重力波干渉計への応用については基本的な設定でこのことを実施したが、振動子のより詳細なモデリングなどを含むより精緻なシミュレーションを実施する。同時に、新たな機能素子の提案と性能検証を行う。すなわち、フィードバック増幅法は特定の機能に関する理論ではなく、機能を強化 or 生成するための一般理論であることを、さらに多彩な物理系(量子光学、超伝導、オプトメカ、冷却原子、フォトニクス結晶系など)で実証する。また、成果[2-4]を軸に、量子性が強く現れる状況での有用性を示す。とくに制御器として非線形素子を採用し、いかなる機能が発現するかを解析する。この項目については、まず成果[1-4]を拡張し、非線形発振器の構成法を開発する。これを成果[2-7]と結びつけ、量子同期回路などに発展させる。

一方で、本研究は「古典情報処理系を量子情報処理系に置き換える」という方向性で意義を有するものである。このことを陽な形で実施したものが成果[2-5]である。例えば、ノイズフィルタリングについては、検出器を介して変換された古典信号に古典能動フィルタを作用させても古典ノイズしか除去できないため、量子のままで高度なノイズ除去を可能とする量子能動フィルタが必要となる。これは古典能動フィルタを量子のそれに置き換えたものと見ることが出来る。他にも、量子系をフィードバック制御したいときに、測定器を介した古典 PID 制御器よりも、応答速度がは

るかに速い分、量子のまま PID 制御器を構成した方が良い。これら2つは成果[1-1]で記載した結果である。共通の思想は「量子のままですべて信号処理したい」というものであり、この方向性を指向しながら第一段落で記載した課題を実施する。

4. 自己評価

当初掲げていた2つの大目的:

[1] 量子フィードバック増幅により、新規量子機能システムを数多く理論提案。それらの実質的性能と実装可能性を理論的・数値的に明らかにする。

[2] 機能設計のために数理工学の整備。

については、土台づくりのレベルではほぼ達成できたと考えている。研究費は、当初予定通り、主に国内外への研究出張・会議参加に使用し、成果の発表とネットワークの拡充に努めた。

フィードバック増幅は、約 90 年前に当時ベル研究所に勤務していた H. S. Black により「発見」された方法で、それは彼自身が述べている通り「シンプルで驚異的に有用」なものである。彼はこの技術の特許申請したのだが、あまりに革命的なアイデアであったためアメリカ特許庁は信用せず、9年に渡って保留されたというのも有名な話である。のち、この方法論は H. Bode, H. Nyquist によって、便利かつ強固な体系に仕上げられ、これが現代エレクトロニクスを支える方法論となった。この歴史を今後拡大していく量子科学技術の進展に当てはめると、本さきがけ研究で得られた成果はその核を担うものであるはずである。すなわち、量子科学の永続的な発展のため、必要な「シンプルで驚異的に有用」な基幹技術としての役割を果たすものになると信じる。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

論文 1. K. Gallock Yoshimura and N. Yamamoto, Generating robust entanglement via quantum feedback, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 52, 055501 (2019)
論文2. K. Kobayashi and N. Yamamoto, Control limit on quantum state preparation under decoherence, Phys. Rev. A, 99, 052347 (2019)
論文 3. Y. Kato, N. Yamamoto, and H. Nakao, Semiclassical phase reduction theory for quantum synchronization, Phys. Rev. Research, 1, 033012 (2019)
論文4. Y. Kashiwamura and N. Yamamoto, Replacing measurement feedback with coherent feedback for quantum state preparation, Phys. Rev. A, 97, 062341 (2018)
論文 5. Y. Yokotera and N. Yamamoto, Sensitivity analysis of cascaded quantum feedback amplifier, IEEE Control Systems Letters, 3-1, 156/161 (2018)

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

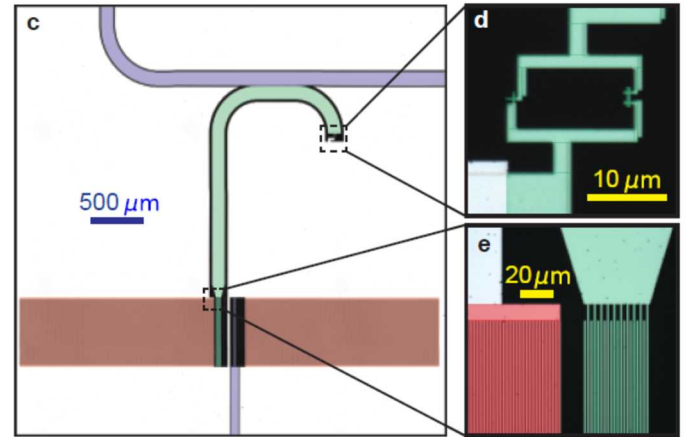
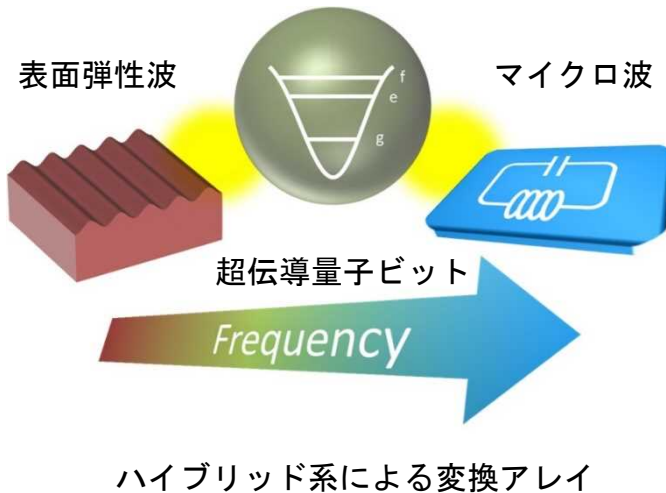
(その他成果 1) R. Shimazu and N. Yamamoto, Quantum functionalities via feedback amplification, arXiv:1909.12822, 2019 (プレプリント)

- (その他成果 2) N. Yamamoto, Quantum active filtering and application to broadband gravitational wave detection, 1st Quantum Science, Engineering, and Technology, Canberra, Australia, 2019 (国際会議招待講演)
- (その他成果 3) 田中友里、山本直樹、量子オペアンプによる相互作用演算子の反転、第 41 回量子情報技術研究会、東京、2019 (国内会議ポスター発表)
- (その他成果 4) Y. Yokotera and N. Yamamoto, Sensitivity analysis of cascaded quantum feedback amplifier, 10th Principles and Applications of Control in Quantum Systems, Paris, France, 2018 (国際会議ポスター発表)
- (その他成果 5) 野尻裕紀、山本直樹、コヒーレント量子 PID フィードバック制御、第 38 回量子情報技術研究会、広島、2018 (国内会議ポスター発表)
- (その他成果 6) N. Yamamoto, Quantum op-amp and functionalities, APS March Meeting, Los Angeles, California, USA, 2018 (国際会議口頭発表)

超伝導で聴く量子の奏（かなで）

野口 篤史（東京大学総合文化研究科・准教授）

研究課題名：「表面弾性波を使ったエレクトロメカニクスの量子制御」研究期間：2016. 10～2020. 03



人工輻射圧を持った超伝導回路
と表面弾性波共振器の写真

【研究の概要】

異なった性質の量子系が互いに結合した系をハイブリッド量子系と呼びます。本研究では、非常に高寿命として知られている物体表面に局在化した表面弾性波と、制御性の高い超伝導量子回路とに着目し、これらのハイブリッド量子系を構築しました。また、その研究の中で新しい超伝導共振回路として二次の非線形性を持つ回路を開発し、電磁波に人工的に大きな輻射圧を持たせることに成功しました。

【研究成果とインパクト】

本研究のハイブリッド系により、既存の精度を二桁向上し、表面弾性波をアトメートルの精度で測る事に成功しました。また、超伝導回路の持つ非線形性を巧みに設計し、量子回路に新たな性質をデザインすることで、世界で初めて単一光子で量子制御可能なオプトメカニクスを実現しました。

【今後の展開など】

本研究で開発した新しい超伝導回路は、ハイブリッド量子系だけでなく、超伝導回路同士の結合にも用いることができ、その原理に基づく2量子ゲート実験をすでに行っています。また、その量子ゲートの動作原理

について、特許を申請中である。また、同回路を用いることで、超伝導回路で問題になっている課題を克服する特許を作製中です。

>>参考情報

➤ 論文

1. Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi, and Yasunobu Nakamura, Qubit-assisted transduction for a detection of surface acoustic waves near the quantum limit, Physical review letters, 2017 年, 119, 180505
2. Ayato Okada, Fumikazu Oguro, Atsushi Noguchi, Yutaka Tabuchi, Rekishu Yamazaki, Koji Usami, and Yasunobu Nakamura, Cavity Enhancement of Anti-Stokes Scattering via Optomechanical Coupling with Surface Acoustic Waves, Physical Review Applied, 2018 年 10, 024002

3.

➤ 受賞

平成 31 年度文部科学大臣表彰(若手科学者賞)

➤ プレスリリース

量子コンピュータを賢く利用し新機能を創出

藤井 啓祐（大阪大学院基礎工学研究科・教授）

研究課題名：「知的量子設計による量子計算・量子シミュレーションの新機能創出」

研究期間：2016.10～2020.03

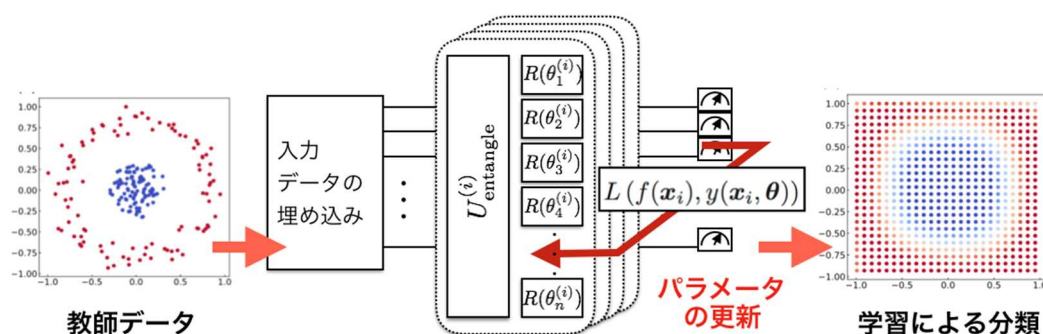


図 量子回路学習

パラメータ付き量子回路に対して、教師データとの誤差が最小になるようにパラメータを学習し、分類タスクを実行する。

昨年(2019年)10月には、Googleから特定のタスクにおいてスパコンより高速に計算を行うことができる量子コンピュータを実現したとの報告がありました。一方で、量子ビット数はまだまだ少なく、有用な問題を理論的に保証された量子アルゴリズムを用いて解くことができる大規模な誤り耐性量子コンピュータの実現には20年以上の研究開発が必要だとされています。つまり、現在はノイズを含んだ中規模の量子コンピュータ、NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum computer)の時代であるといえます。

本、さがけプロジェクトでは、このようなNISQ時代の到来にさがけて、近未来的に実現する量子コンピュータを応用するための方法の開発に取り組みました。特に、物理系がもつ計算能力を賢く活用し情報処理を行うレザバー計算に着目し、量子レザバー計算を提案しました[1]。また、これをさらに発展させ、NISQ型量子コンピュータを用いた世界初の機械学習アルゴリズム、量子回路学習を提案しました[2]。量子回路学習はIBMの実験グループが原理実証実験をするなど、NISQ型量子コンピュータの代表的なアルゴリズムになっています。

また、このようなNISQ型量子コンピュータから大規模な誤り耐性量子コンピュータへと筋道をつけることも長期的には重要です。本さがけプロジェクトでは、より

高いノイズ耐性を目指して新たな量子誤り訂正符号方式や、量子コンピュータにおけるノイズ解析手法やデバッグ法の研究開発も行いました[3]。

このように、本さがけプロジェクトでは近未来的なNISQから長期的な誤り耐性量子コンピュータに至るまで、量子コンピュータを賢く利用し、新たな機能を創出するための理論的研究をすすめました。

>>参考情報

➤ 論文

1. K. Fujii and K. Nakajima "Harnessing Disordered-Ensemble Quantum Dynamics for Machine Learning." Physical Review Applied, 2017, 8, 024030.
2. K. Mitarai, M. Negoro, M. Kitagawa, and K. Fujii, "Quantum circuit learning." Physical Review A, 2018, 98, 032309.
3. Y. Suzuki, K. Fujii, and M. Koashi. "Efficient simulation of quantum error correction under coherent error based on the nonunitary free-fermionic formalism." Physical Review Letters, 2017, 119, 190503.

➤ プレスリリース

「量子コンピュータのデバッグを高速化～速いがゆえのジレンマを解消～」(2017.11.10)

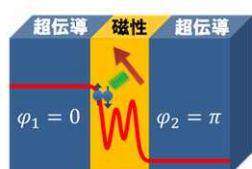
<https://eetimes.jp/ee/articles/1711/10/news035.html>

磁石と超伝導体の融合で新しい量子計算デバイスが生まれた

山下 太郎（名古屋大学大学院工学研究科・准教授）

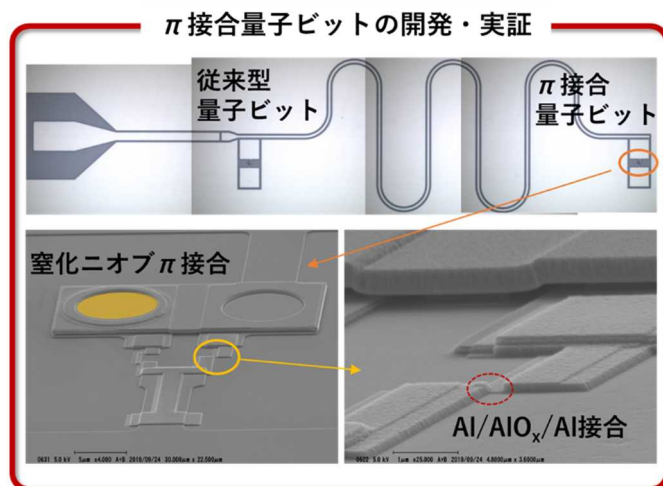
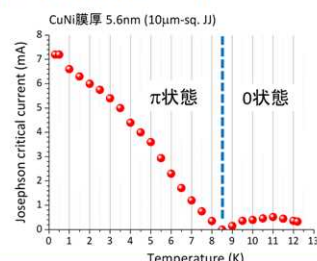
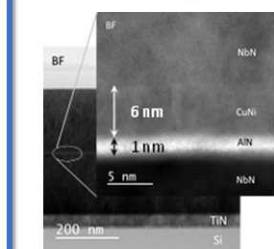
研究課題名：「超伝導位相制御素子によるスケーラブル量子技術」 研究期間：2016.10～2020.03

スピントジョセフソン接合（ π 接合）：位相制御素子



超伝導量子ビット
 $\Phi_e = 0$ 磁束バイアスフリー動作
超伝導論理回路
低電力化/小型化等の高度化

窒化ニオブ π 接合の開発・実証



【研究概要】

本研究では、超伝導/磁性ハイブリッド素子であるスピントジョセフソン接合（ π 接合）を開発し、これを位相制御素子として超伝導量子回路へ組み込むことで、大規模化可能な量子計算素子（量子ビット）及び超伝導論理回路の基盤技術を創出しました。量子回路応用に適する酸化物フリーな窒化ニオブ π 接合を導入した磁束型量子ビットを作製し、磁束バイアスフリー動作実証に成功しました。また、超伝導回路へ π 接合を融合し低電力化や小型化等の様々な優位性を示しました。

【研究成果とインパクト】

超伝導量子ビットの中で、磁束型量子ビットは高い非調和性等の優れた特徴をもちます。残された課題は、コヒーレンス時間が最大となる最適動作点で動作させるために、磁束バイアスの印加・制御が必要となる点でした。本研究で実証した磁束バイアスフリーで最適動作する π 接合量子ビットにより、多量子ビット回路の制御が飛躍的に容易となり、大規模量子回路の実現が加速されます。

【今後の展開など】

π 接合を組み込んだ磁束バイアスフリー量子ビットによる大規模量子回路と超伝導回路の融合技術の開発

を進め、進行中の科研費・基盤研究(S)に加え、将来的にはCRESTやムーンショット等のプロジェクトへと展開し、量子計算機の開発を推進します。連携としては、進行中の ERATO、Q-LEAP 等での共同研究に加え、材料技術等に関して英ケンブリッジ大学等との国際連携も進めます。

>>参考情報

➤ 論文

1. Taro Yamashita, Akira Kawakami, Hirotaka Terai, “NbN-based 0 and π ferromagnetic Josephson junctions”, Physical Review Applied, 2017, vol. 8, pp. 054028-1-5.
2. Kota Arai, Naoki Takeuchi, Taro Yamashita, Nobuyuki Yoshikawa, “Adiabatic quantum-flux-parametron with π Josephson junctions”, Journal of Applied Physics, 2019, vol. 125, no. 9, pp. 093901-1-7.

➤ 受賞

平成 29 年度文部科学大臣表彰(若手科学者賞)

➤ プレスリリース

「窒化ニオブを用いた磁性ジョセフソン素子を世界で初めて実現」(2017 年 11 月 15 日)

URL: <https://www.nict.go.jp/press/2017/11/15-1.html>