

# 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。

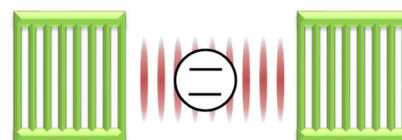
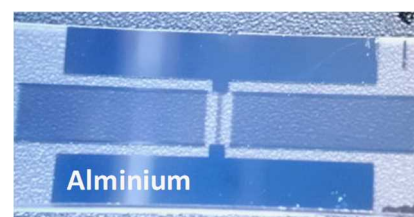
このように異なる量子系を結合させた系をハイブリッド量子系と呼ぶ。2016 年までに、マイクロ波共振器・ナノメカニクス・ダイヤモンド中空素欠陥スピン・強磁性体マグノンなど、様々な量子系が超伝導量子ビットと結合されてきた。本研究では、表面弾性波共振器と呼ばれる、固体の表面に局在している音波の共振器に着目し、超伝導量子回路と結合したハイブリッド量子系の実現を目指した。表面弾性波共振器は、高いQ値のものを 2 次元の微細加工技術により容易に作製することができる。また、音波の波長が短いことを利用すると、比較的小型の構造によって進行波共振器の作製が可能になる。進行波共振器では、「共振する向き」という自由度が追加され、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フォトン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。

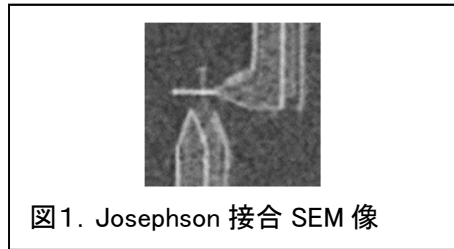


図1. Josephson 接合 SEM 像

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]。

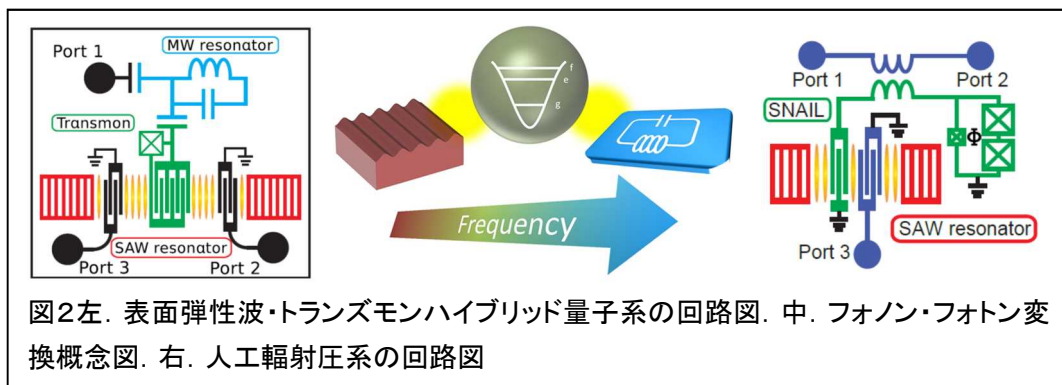


図2左. 表面弾性波・トランズモンハイブリッド量子系の回路図. 中. フォノン・フォトン変換概念図. 右. 人工輻射圧系の回路図

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。

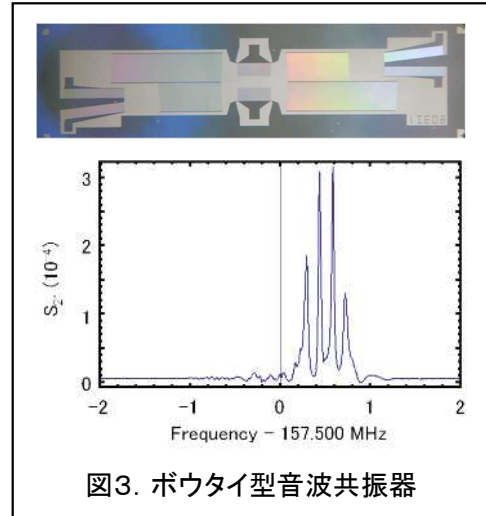


図3. ボウタイ型音波共振器

#### 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。

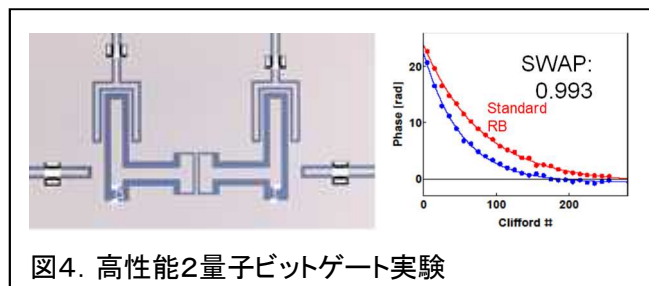


図4. 高性能2量子ビットゲート実験



### 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、歪と核スピンとの結合は、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」