

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」
研究課題「超伝導量子メタマテリアルの創成
と制御」

研究終了報告書

研究期間 2017年 10月～2023年 3月

研究代表者: 仙場 浩一
(情報通信研究機構未来ICT研究所、
上席研究員)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究計画では、「深強結合」等の未踏領域の物理現象や新種のハイブリッド量子系を積極的に使い、新奇な量子的機能を有する超伝導量子メタマテリアル(一般化された分子 および量子デバイス複合体)の創成とそのコヒーレント制御を目指し、①量子極限増幅、②高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜、③ π 接合超伝導量子素子、④深強結合回路 QED、⑤超伝導量子メタマテリアルの量子光学応答理論の各研究項目に取り組んだ。

本研究開始当時、私達は、超伝導磁束量子ビットと LC 共振回路の深強結合状態の実証に世界に先駆けて成功したところであった。通常、物質と光の相互作用は摂動的に扱われるが、深強結合系の場合には量子ビット、共振器(光子)、相互作用の3つのエネルギーの中で、相互作用エネルギーが最大である。深強結合系の基底状態は、非常に奇妙であり、量子ビットが平均光子数1以上の仮想光子を纏った(いわば光と物質から構成された安定した分子のような)状態に譬えられる。当初計画では、そのような新たな状態の集合体を生成することによってこれまでに存在しなかった量子メタマテリアルが得られるのではないかと推察した。しかし、共振器に複数の超伝導磁束量子ビットを深強結合させた場合、予想に反して、研究の入口となるベキスペクトロスコピーの解釈さえ困難であることが判明した。このような状況の中、①~⑤で実施した研究項目のうち、NICT 神戸(寺井グループ)を中心に進めていた②高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜で技術的ブレイクスルーが得られた。この機会を捉えて NICT 小金井の実験研究リソース(含:人材)を「新奇な量子デバイス複合体」の研究開発へ重点化することとした。

これまでに NICT 小金井チーム(研究代表者:仙場浩一)は、②③に関して神戸の超伝導薄膜デバイス PJ チーム(共同研究者:寺井弘高)と、①④⑤に関して理論チーム(主たる共同研究者:越野和樹 東京医科歯科大)と共同し、①~⑤の項目に関して下記の成果を得た:

①量子極限増幅 : 結合強度変調による超伝導量子ビット・共振器系の量子状態の増幅と修復に関する新しいプロトコルを開発した[1]。

②高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜 : TiN 薄膜の Si(100)基板上での結晶配向制御成功がトリガーとなり、シリコン基板上に極薄 TiN バッファ層を介して NbN/AlN/NbN エピタキシャル接合の作製プロセス確立に成功した。この技術を応用してシリコン基板上にキャパシタンスシヤント型の超伝導磁束量子ビットおよび量子ビットと強結合した回路 QED 系を試作してコヒーレンス特性の測定を行った。Hahn エコー測定から得られた位相緩和時間は 22 マイクロ秒程度で、MgO 基板上に作製した先行研究での報告値と比較し約 44 倍の大幅な改善が得られた[2]。

③ π 接合超伝導量子素子 : 窒化チタン(TiN)バッファ層を備えたシリコン(Si)基板上の窒化ニオブ(NbN)ベースの強磁性 π 接合を含む SQUID の臨界電流の磁場依存性より、NbN/CuNi/NbN 接合が Si 基板上で π 位相シフターとして機能することを実証した[3]。この π 接合を含む磁束量子ビットを試作して、NTT 齊藤グループの協力を得て 3D キャビティ中で、エネルギー分散のバイアス磁場依存性を測定したところ、最適磁束バイアスが零磁場である全窒化物磁束量子ビット(π -flux-qubit)の作製に初めて成功した。現在、コヒーレンス特性の改良に取り組んでいる。

④深強結合回路 QED : マイクロ波共振回路・超伝導磁束量子ビット深強結合系に於いては、共振器中の真空場や 1~3 個程度の非常に少数個の光子が存在するだけで、量子ビット準位に従来報告の線形領域を大きく逸脱した非線形領域での巨大な光シフト((真空場)Lamb シフト、(有限光子数状態)Stark シフト)が観測されることを見出し、その制御に成功した[4]。

複数の量子ビット-共振器結合系での量子相転移の兆候をスペクトル測定から推定する理論[5] および 深強結合領域にも適用可能な 超伝導磁束量子ビットとLC共振回路結合系の正準ハミルトニアン¹の導出に初めて成功した[6]。

⑤**超伝導量子メタマテリアルの量子光学応答理論**：孤立した深強結合系の基底状態は非古典性の高い「シュレーディンガーの猫」状態であることが知られているが、環境との結合により非古典性がどのような影響を受けるか解析した[7]。また、超伝導量子ビットが多モード共振器と超強結合している状況においては、量子ビット-共振器結合の高次(4次)過程に起因して、単一光子が3つの娘光子へと分解される「三光子下方変換」が効率1で起こり得ることを示し、その条件を明らかにした[8]。

- [1] ‘Fast amplification and rephasing of entangled cat states in a qubit-oscillator system’, Z. Xiao, T. Fuse, S. Ashhab, F. Yoshihara, K. Semba, M. Sasaki, M. Takeoka, and J. P. Dowling, [Phys. Rev. A 99, 013827 \(2019\)](#).
- [2] ‘Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubit epitaxially grown on silicon substrate’, Sunmi Kim, Hiroataka Terai, Taro Yamashita, Wei Qiu, Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Kunihiro Inomata, Kouichi Semba, [Communications Materials 2, 98 \(2021\)](#).
- [3] ‘ π phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate’, Taro Yamashita, Sunmi Kim, Haruki Kato, Wei Qiu, Kouichi Semba, Akira Fujimaki & Hiroataka Terai, [Scientific Reports 10, 13687 \(2020\)](#).
- [4] ‘Inversion of qubit energy levels in qubit-oscillator circuits in the deep-strong-coupling regime’, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Ziqiao Ao, Sahel Ashhab, Kosuke Kakuyanagi, Shiro Saito, Takao Aoki, Kazuki Koshino, Kouichi Semba, [Phys. Rev. Lett. 120, 183601 \(2018\)](#).
- [5] ‘Spectrum of the Dicke model in a superconducting qubit-oscillator system’, S. Ashhab, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, S. Saito, F. Yoshihara, T. Fuse, K. Semba, [Phys. Rev. A 99, 063822 \(2019\)](#).
- [6] ‘Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong-coupling regime’, Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Tomoko Fuse, Motoaki Bamba, Kouichi Semba, [Scientific Reports 12, 6764 \(2022\)](#).
- [7] ‘Nonclassicality of open circuit QED systems in the deep-strong coupling regime’, Tomohiro Shitara, Motoaki Bamba, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Sahel Ashhab, Kouichi Semba, Kazuki Koshino, [New Journal of Physics 23 103009 \(2021\)](#).
- [8] ‘Deterministic three-photon down-conversion by a passive ultrastrong cavity-QED system’, Kazuki Koshino, Tomohiro Shitara, Ziqiao Ao, and Kouichi Semba [Phys. Rev. Research 4, 013013 \(2022\)](#).

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 概要： 深強結合回路 QED 技術(理論):深強結合領域での超伝導磁束量子ビット と LC 共振回路が結合した系のハミルトニアン¹の導出に成功した。導出された回路ハミルトニアンを、調和振動子に結合された量子二準位系を記述する量子ラビハミルトニアンと比較したところ、回路ハミルトニアンと量子ラビハミルトニアン¹の間に単純で直感的な対応があることが明らかとなった。スペクトル全体の全体的なシフトが認められるが、深強結合領域にあるときでも 7 番目の励起状態までの回路ハミルトニアン¹のエネルギーレベル構造は、量子ラビハミルトニアン¹でフィット可能であることが明らかとなった。
[F. Yoshihara, S. Ashhab, T. Fuse, M. Bamba & K. Semba, Scientific Reports 12, 6764 \(2022\)](#).
2. 概要： 深強結合回路 QED 技術(実験):超伝導量子メタマテリアルの実現に非常に重要と

考えられる非線形領域での光シフトを生じる結合強度の制御に成功した。この手法を用いて先行研究が量子領域の人工原子で示した光シフトに比べて 100 倍以上巨大な光シフト(Lamb シフト、Stark シフト)の観測に他に先駆けて成功した[2]。例えば、共振器中に光子がなく真空ゆらぎのみの場合でも結合した人工原子のエネルギー準位差は結合していない場合の 10 % 未満に圧縮され(90 % 以上の Lamb シフト)、共振器中に1~2光子存在する場合には、人工原子のエネルギー準位が反転する(100 % 超の Stark シフト)ことを観測した。

[F. Yoshihara, et al., Phys. Rev. Lett. 120, 183601 \(2018\).](#)

報道発表 <https://www.nict.go.jp/press/2018/05/08-1.html>

この研究の発展形として、人工原子と超強結合した共振器中に多モードが存在する場合、更に顕著な Lamb シフトが実現していることが明らかとなった。

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.04114>

3. 概要: 深強結合系の基底状態の非古典性が、環境との結合によりどのような影響を受けるか解析した[7]。基礎モデルである量子ラビモデルがゲージ対称性を破っていることに起因して、共振器-人工原子間の結合と共振器-環境間の結合とが同種であるか異種であるかによって環境との結合による影響の受け方が定性的に異なることを見出した。また、非古典性は共振器-人工原子間の結合強度に対して非単調な振る舞いをすることを示し、非古典性を最大化するために必要な結合強度を数値的に求めた。

[Tomohiro Shitara, Motoaki Bamba, Fumiki Yoshihara, Tomoko Fuse, Sahel Ashhab, Kouichi Semba, Kazuki Koshino, New J. Phys. 23 103009 \(2021\).](#)

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 概要: 高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜技術の開発 (Si 基板上 窒化物超伝導体マイクロ波共振器-超伝導人工原子 量子融合素子の開発) : シリコン基板上に 極薄 TiN バッファ層を介して NbN 接合をベースとした超伝導磁束量子ビットの作製法を確立し、桁違いのコヒーレンス特性の改善に成功した。Rabi 振動、Hahn エコー測定から得られたコヒーレンス時間は $22 \mu s$ 程度で、MgO 基板上に作製した場合に比べて 44 倍の改善を確認した。

[Sunmi Kim et al., Communications Materials 2, 98 \(2021\).](#)

報道発表 <https://www.nict.go.jp/press/2021/09/20-1.html>

全窒化物超伝導体 NbN/AlN/NbN ジョセフソン接合を用いて超伝導量子ビットを作製する技術を有するグループは現在 NICT 以外では中国の Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (SIMIT) のみであるが、コヒーレンス的に優位な Si 基板上で窒化物超伝導体量子ビットを作製し量子コヒーレンスの測定に成功しているのは我々のみである。量子コヒーレンス特性が最適化されれば、窒化物超伝導素子にはアルミニウム系では困難な洗練された多層プロセスを施すことが可能であり、動作温度に関してもアルミニウム量子ビットに比べて格段に広くできる可能性を持つため、現状広く使われているアルミニウム系超伝導量子ビットに置き換わるポテンシャルを備えている。

2. 概要: 強磁性ジョセフソン接合に基づく π 位相シフターは、古典的および量子超伝導デバイスにさまざまな利点をもたらすと期待されている。私達は、窒化チタン(TiN)バッファ層を備えたシリコン(Si)基板上に窒化ニオブ(NbN)ベースの強磁性金属(CuNi)薄膜を挟んだ SFS 型の素子を作製した。磁束バイアス不用の磁束量子ビットおよび古典的なデジタル論理要素への応用として、NbN/窒化アルミニウム(AlN)/NbN ジョセフソン接合、NbN/銅ニッケル(CuNi)/NbN 強磁性ジョセフソン接合、および Si 基板上のこれらの接合からなる超伝導量子干渉デバイス(SQUID)を作製しその特性を評価した。作製された NbN/AlN/NbN 接合は、量子ビット応用に適した高い接合品質を示した。さらに、SQUID の臨界電流の磁場依存性は、NbN / CuNi / NbN 接合が Si 基板上で π 位相シフターとして機能することを示した。

[Taro Yamashita, et al., Scientific Reports 10, 13687 \(2020\).](#)

3. 概要:超強結合系に特徴的な決定論的3光子下方変換の理論:超~深強結合領域にある共振器QED系では、通常の弱~強結合領域とは対照的に、励起数非保存の物理過程が発現すると予想される。この研究では、原子が共振器の基本モードおよび三次高調波モードに極めて強く結合している系の光学応答を理論的に分析し、単一の入射光子が三つの光子へと変換される「三光子下方変換」が、決定論的におこり得る可能性を見出した。従来の非線形光学系では、高次プロセスの遷移行列要素が小さいため効率的な周波数変換のためには強力な入力光子場が必要であったが、超強結合領域においては、線形応答領域の微弱な入射光子場であっても1に近い高効率で変換がおこりうる。本研究結果は、マイクロ波領域のもつれ光子生成源に応用可能である。

[Kazuki Koshino, Tomohiro Shitara, Ziqiao Ao, and Kouichi Semba Phys. Rev. Research 4, 013013 \(2022\).](#)

<代表的な論文>

1. Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubits epitaxially grown on silicon substrate, Sunmi Kim, Hiroataka Terai, Taro Yamashita, Wei Qiu, Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Kunihiro Inomata, Kouichi Semba,

[Communications Materials volume 2, Article number: 98 \(2021\).](#)

概要:

シリコン基板上に 極薄 TiN バッファ層を介して NbN 接合をベースとしたキャパシタンスシャント型の全窒化物超伝導磁束量子ビットの作製に成功した。量子ビットと強結合させた共振器を介した分散状態読み出しによって、エネルギー緩和時間、位相緩和時間ともに、MgO 基板を用いた先行研究での報告値を最大 44 倍上回る結果を得た。この成果は、将来的にアルミニウムを基軸とする技術に置き換わり得る超伝導量子デバイス生産の技術的なプラットフォームの1つを提供するものである。

2. π phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate, Taro Yamashita, Sunmi Kim, Haruki Kato, Wei Qiu, Kouichi Semba, Akira Fujimaki & Hiroataka Terai, [Scientific Reports volume 10, Article number: 13687 \(2020\).](#)

概要:

強磁性ジョセフソン接合に基づく π 位相シフターは、古典的および量子超伝導デバイスにさまざまな利点をもたらすと期待されている。ここでは、窒化チタン(TiN)バッファ層を備えたシリコン(Si)基板上の窒化ニオブ(NbN)ベースの強磁性 π 接合について報告する。磁束バイアス不用の磁束量子ビットおよび古典的なデジタル論理要素への応用として、NbN/窒化アルミニウム (AlN)/NbN ジョセフソン接合、NbN/銅ニッケル (CuNi)/NbN 強磁性ジョセフソン接合、および Si 基板上のこれらの接合からなる超伝導量子干渉デバイス (SQUID) を作製しその特性を評価した。作製された NbN/AlN/NbN 接合は、量子ビット応用に適した高い接合品質を示した。さらに、SQUID の臨界電流の磁場依存性は、NbN/CuNi/NbN 接合が Si 基板上で π 位相シフターとして機能することを示した。

3. Inversion of Qubit Energy Levels in Qubit-Oscillator Circuits in the Deep-Strong-Coupling Regime

F. Yoshihara, T. Fuse, Z. Ao, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, T. Aoki, K. Koshino, K. Semba [Phys. Rev. Lett. 120, 183601 \(2018\).](#) DOI 10.1103/physrevlett.120.183601

概要:

共振器周波数(ω)に匹敵($g/\omega \sim 1$)するほど強い結合係数(g)で LC 共振器と相互作用する超伝導磁束量子ビットで観測された光シフトについて報告する。2-トーン分光法を使い異なる結合係数の試料について最低6準位のエネルギーが決定された。裸のキュービット周波数の 90% を超える巨大な Lamb シフトや、共振器中に光子が有限個ある場

合(量子シュタルク効果)の量子ビットの基底状態と励起状態の反転現象を観測した。実験結果は、量子ラビモデルに基づく理論的予測と良い一致を見た。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

1. NICT グループ

研究代表者: 仙場浩一 (国立研究開発法人 情報通信研究機構(NICT)・
未来 ICT 研究所・上席研究員)

- ・量子極限増幅変調技術の開発
- ・高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜技術の開発
- ・ π 接合を含む超伝導量子素子の開発
- ・深強結合回路 QED 技術の開発

2. 東京医科歯科大学グループ

主たる共同研究者: 越野和樹 (東京医科歯科大学教養部 准教授)

- ・深強結合領域にある共振器量子電磁気学系の基底状態の解析
- ・共振器量子電磁気学系における可変結合実現方法の探索

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

1. **山下太郎教授 (東北大学)** とは、本 CREST 課題開始当初から共同研究を行ってきたが、NICT→名古屋大学→東北大学へ所属が変わられても、②高コヒーレンス窒化物超伝導薄膜 や ③ π 接合超伝導量子素子 の研究開発を通じて良好な共同研究が継続している。

‘Enhanced coherence of all-nitride superconducting qubit epitaxially grown on silicon substrate’, Sunmi Kim, Hiroataka Terai, **Taro Yamashita**, Wei Qiu, Tomoko Fuse, Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Kunihiro Inomata, Kouichi Semba, [Communications Materials 2, 98 \(2021\)](#).

‘ π phase shifter based on NbN-based ferromagnetic Josephson junction on a silicon substrate’, **Taro Yamashita**, Sunmi Kim, Haruki Kato, Wei Qiu, Kouichi Semba, Akira Fujimaki & Hiroataka Terai, [Scientific Reports 10, 13687 \(2020\)](#).

2. 理論チーム海外研究協力者 **Sahel Ashhab 博士** (当時 QEERI)、同じ CREST 領域の課題「超伝導量子ビットを用いた極限量子センシング」代表の齊藤志郎博士、共同研究者 角柳孝輔博士、産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門エレクトロインフォマティクスグループ 松崎雄一郎博士とは、複数量子ビット・共振器 超強結合系における実験に関し共同研究を進めて来たが、Ashhab 博士による理論的な洞察の進展があり、超放射量子相転移をスペクトル測定から判別する新たな方法の共同研究が進展した。研究成果を纏めて投稿し下記に掲載された。2020年1月に Ashhab 博士は、NICT へ上席研究員として異動された。

S. Ashhab, **Y. Matsuzaki**, **K. Kakuyanagi**, **S. Saito**, F. Yoshihara, T. Fuse, K. Semba, ‘Spectrum of the Dicke model in a superconducting qubit-oscillator system’, [Phys. Rev. A99, 063822 \(2019\)](#).

3. **Jonathan Dowling 教授 (Louisiana State University)** とは 量子ビット・共振器 超強結合系における相互作用定数を高速に大振幅で変調することで非古典的マイクロ波状態の増幅と修復が可能であることを見出した。新たな実験スキームを提案した共同研究結果は下記に掲載された。非常に残念なことに Dowling 教授は 2020年6月5日にご逝去された。

Z. Xiao, T. Fuse, S. Ashhab, F. Yoshihara, K. Semba, M. Sasaki, M. Takeoka, and **J. P. Dowling**, ‘Fast amplification and rephasing of entangled cat states in a qubit-oscillator system’, [Phys. Rev. A 99, 013827 \(2019\)](#)

4. William D. Oliver 教授グループ (MIT Lincoln Laboratory) より量子極限信号増幅器 JTWPA (Josephson Traveling Wave Parametric Amplifier) の提供を受け、超伝導量子デバイス複合体の量子状態読み出しに関する共同研究を推進中である。

5. 2019 年度 CREST 量子技術:海外研究者の招へい・派遣の追加支援への提案が認められ、長年当該研究分野を牽引して来られた Michel H. Devoret 教授 (Yale 大学)、J. E. Mooij 名誉教授 (Delft 工科大)、William D. Oliver 教授 (MIT Lincoln Lab.) を招聘し、当課題の研究活動に関連するセミナーに参加いただき意見交換を行った。招聘期間中につくば市で開催された国際シンポジウム [SQ20th 会議](#) には、セッションチェアとしてご参加いただいた。

6. 東京医科歯科大学グループでは、深強結合にある共振器量子電気力学系の理論・実験に精通している、馬場基彰准教授 (京都大学 白眉センター 特定准教授) を共同研究者に加えて理論研究を進めている。また、米国アーカンソー大学の J. Gea-Banacloche 教授、NTT セキュアプラットフォーム研究所の徳永裕己博士とは、導波路 QED (一次元量子光学) 系の光学応答理論に関して、継続的に共同研究を行っている。

R. Asaoka, J. Gea-Banacloche, Y. Tokunaga, and K. Koshino, Stimulated emission of superradiant atoms in waveguide QED, [arXiv:2203.06943](#)

7. NICT 小金井グループの吉原文樹 主任研究員は、2022 年 4 月より東京理科大学教授に栄転。現在も、④深強結合回路 QED の研究開発 を通じて共同研究を継続している。

‘Hamiltonian of a flux qubit-LC oscillator circuit in the deep-strong- coupling regime’,
Fumiki Yoshihara, Sahel Ashhab, Tomoko Fuse, Motoaki Bamba, Kouichi Semba,
[Scientific Reports 12, 6764 \(2022\)](#).