

Symposium (Oral) Symposium : Frontiers of Quantum Technologies and Trends in Social Implementation
--

📅 Thu. Sep 21, 2023 1:30 PM - 5:10 PM JST | Thu. Sep 21, 2023 4:30 AM - 8:10 AM UTC | 🏢 A301 (KJ Hall)

[21p-A301-1~7] Frontiers of Quantum Technologies and Trends in Social Implementation

Hideo Kosaka(Yokohama Natl. Univ.), Shiro Saito(NTT)

1:30 PM - 2:10 PM JST | 4:30 AM - 5:10 AM UTC

[21p-A301-1] Efforts for realizing practical quantum computing

○Shintaro Sato^{1,2} (1.Quantum Lab., Fujitsu, 2.RIKEN RQC-Fujitsu Collaboration Center, RIKEN)

2:10 PM - 2:50 PM JST | 5:10 AM - 5:50 AM UTC

[21p-A301-2] World Trends in Quantum Computing

○Yoshiyuki Yoshida¹ (1.AIST)

2:50 PM - 3:30 PM JST | 5:50 AM - 6:30 AM UTC

[21p-A301-3] Overview of QST-Foundational Quantum Technology Centre Initiatives with its Future Plans and Deployment

○Tetsuya Kawachi¹ (1.QST)

3:45 PM - 4:25 PM JST | 6:45 AM - 7:25 AM UTC

[21p-A301-4] Social Implementation of Quantum Computing Technology and its Hardware Development

○Masayuki Shirane¹, Chishima Hiroshi² (1.NEC SSPF Lab., 2.NEC QC Dep.)

4:25 PM - 4:40 PM JST | 7:25 AM - 7:40 AM UTC

[21p-A301-5] Research on diamond color centers for realization of quantum interface

○Hodaka Kurokawa¹, Keidai Wakamatsu², Shintaro Nakazato², Moyuki Yamamoto², Toshiharu Makino³, Hiromitsu Kato³, Satoshi Fujii^{3,4}, Hirotaka Terai⁵, Yuhei Sekiguchi¹, Hideo Kosaka^{1,2} (1.IAS, QIC, YNU, 2.Grad. Sch. Eng., YNU, 3.AIST, 4.NIMS, 5.NICT)

4:40 PM - 4:55 PM JST | 7:40 AM - 7:55 AM UTC

[21p-A301-6] Superconducting Self-shunted Flux Quantum Bits

Tokunoshin Uchida¹, Hiroki Kutsuma¹, ○Taro Yamashita¹ (1.Tohoku Univ.)

4:55 PM - 5:10 PM JST | 7:55 AM - 8:10 AM UTC

[21p-A301-7] Improving the lifetime of the ancilla qubit in bosonic qubits using superconducting cavity

○Takaaki Takenaka¹, Kosuke Mizuno¹, Imran Mahboob¹, Shiro Saito¹ (1.NTT-BRL)

量子コンピューティング実用化に向けた取り組み

Efforts for realizing practical quantum computing

富士通量子研¹, 理研 RQC-富士通連携センター² ○佐藤 信太郎^{1,2}

Quantum Lab., Fujitsu¹, RIKEN RQC-Fujitsu Collaboration Center, RIKEN², °Shintaro Sato^{1,2}

E-mail: sato.shintaro@fujitsu.com

人工知能 (AI)、特に生成型 AI が最近我々の生活に大きな影響を及ぼしつつある。それを可能にしているのはコンピューティング能力の向上である。その一方、コンピューティング能力向上を支えてきた半導体微細化の限界が近づきつつあり、今後コンピューティング能力をいかに向上していくかは重要な課題である。富士通ではこれまでコンピューティング技術の研究開発に取り組んできたが、これまで通りいわゆるハイパフォーマンส์コンピューティング (HPC) 技術に取り組む一方で、新たな原理に基づく量子コンピューティングの研究開発にも取り組んでいる。

富士通では、ハードウェアから、基盤ソフトウェア、アプリケーションいたるまで、量子コンピューティングのすべての技術レイヤーの研究開発に、世界有数の研究機関と共に取り組んでいる。ハードウェア技術では、超伝導量子ビット技術を理化学研究所と、ダイヤモンドスピン量子ビット技術をデルフト工科大学と共に研究開発しており、今年度中には理研 RQC-富士通連携センターから 64 量子ビットの超伝導量子コンピュータを公開する予定である。

ソフトウェア領域では、大阪大学とエラー訂正技術の研究開発に取り組んでおり、この3月にはエラー訂正を含む新たな量子計算アーキテクチャを発表した[1]。このアーキテクチャでは、従来の表面符号を用いた誤り耐性量子計算 (FTQC) アーキテクチャと比較して、少ない量子ビット数で実用的な量子計算が可能となる。また最近では、アルゴリズム領域でも、「局所変分量子コンパイル法 (LVQC)」 [2] を応用して、大規模な電子系のグリーン関数を量子コンピュータを用いて計算するための新たな手法を開発した[3]。さらに、量子コンピュータのアプリケーション開拓にも力を入れており、量子コンピュータ公開前から、富士通の HPC 技術により開発した量子コンピュータシミュレータ[4]を活用し、材料、創薬、金融などの分野でエンドユーザーの方々と共同研究を開始した。

講演では、このような量子コンピューティング領域での富士通の取り組みの概要を述べるとともに、最近の研究トピックのいくつかについて説明を行う予定である。

【参考文献】

[1] Y. Akahoshi, et al, arXiv: 2303.13181, <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2023/03/23.html>.

[2] K. Mizuta et al., PRX Quantum 3 040302 (2022).

[3] S. Kanasugi, et al., *Phys. Rev. Res.* in press, arXiv:2303.15667.

[4] S. Imamura, et al., arXiv:2203.16044.

Symposium (Oral) | Symposium : Frontiers of Quantum Technologies and Trends in Social Implementation

Thu. Sep 21, 2023 1:30 PM - 5:10 PM JST | Thu. Sep 21, 2023 4:30 AM - 8:10 AM UTC | A301 (KJ Hall)

[21p-A301-1~7] Frontiers of Quantum Technologies and Trends in Social Implementation

Hideo Kosaka(Yokohama Natl. Univ.), Shiro Saito(NTT)

2:10 PM - 2:50 PM JST | 5:10 AM - 5:50 AM UTC

[21p-A301-2] World Trends in Quantum Computing

○Yoshiyuki Yoshida¹ (1.AIIST)

Keywords : quantum computing

QST の量子技術基盤拠点の取り組みの全体像と今後の計画・展開

Overview of QST-Foundational Quantum Technology Centre Initiatives

with its Future Plans and Deployment

QST（量子科学技術研究開発機構）、量子技術基盤研究部門

河内 哲哉

QST（National Institutes for Quantum Science and Technology),

Foundational Quantum Technology Research Directorate, Tetsuya Kawachi

E-mail: kawachi.tetsuya@qst.go.jp

量子科学技術研究開発機構（QST）では、電子ビームやイオンビーム、放射光X線、レーザーといった量子ビーム技術を活用して高性能な固体量子ビット（ダイヤモンドNV センターに代表される量子マテリアル）を高効率に形成する技術開発を進めており、これらの技術を基盤として国の量子技術イノベーション拠点の1つである「量子技術基盤拠点」に、同じくQSTの「量子生命拠点」とともに位置付けられている[1]。量子技術基盤拠点では、量子材料・量子機能の創製や制御といった基礎・基盤研究から、量子技術の実用化・産業化をめざしたデバイス応用までを視野に入れた研究開発を行うとともに、量子科学を広く使える真の技術とするための産学官連携のハブ機能としての役割を担うことをめざしている（Figure 1）[2]。

本講演では、量子技術基盤拠点の全体像を説明するとともに、拠点で進められている量子マテリアルやデバイスの開発や極短パルスレーザーを用いた材料の量子制御等の最近の研究成果について紹介する。また、産学官連携のハブ機能としての取り組みとして、量子マテリアルの大学や産業界等への供給に加えて、QST内に産学協創オープンラボを、また大学との連携の元で大学内に産学協創サテライトラボを開設し、産業界向けに量子マテリアルや量子技術を実際に利用・試験・評価する場の提供や将来の量子技術を担う

人材育成を推進する量子技術基盤テストベッド構想などについても説明し、量子技術基盤拠点がめざす今後の計画・展開について紹介する。

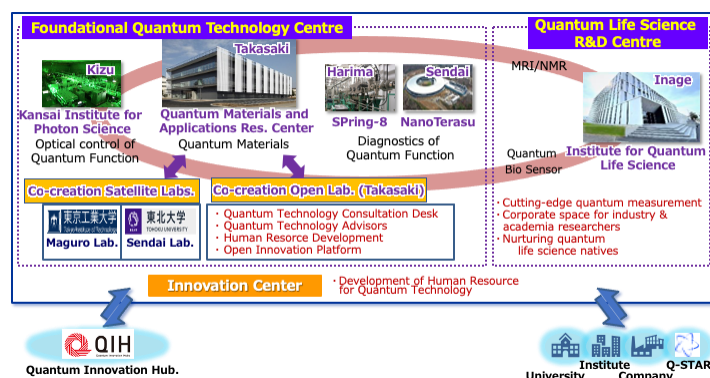


Fig. 1. Schematic diagram of the activity of Foundational Quantum Technology Centre and Quantum Life Science R&D Center.

[1] 量子未来産業創出戦略(2023年4月内閣府策定)

https://www8.cao.go.jp/estp/ryoshigijutsu/230414_mirai.pdf

[2] 量子技術基盤・量子生命拠点 HP (<https://www.qst.go.jp/site/qst-qih/>)

量子コンピューティング技術の社会実装とハードウェア開発

Social Implementation of Quantum Computing Technology and its Hardware Development

NEC SSPF 研¹, NEC 量子コン統括部² °白根 昌之¹, 千嶋 博²

NEC SSPF Lab.¹, NEC QC Dep.², °Masayuki Shirane¹, Hiroshi Chishima²

E-mail: masa-shirane@nec.com

私たちの生活の中には、生産計画や物流計画の最適化など、膨大な組合せの中から最適なものを選択する「組合せ最適化問題」が数多く存在する。従来コンピュータ技術では、特に大規模で複雑な問題を現実的な時間内で解くことが困難である。この課題を解決するため、NEC ではベクトル型スーパーコンピュータで動作する疑似量子アニーリング (NEC Vector Annealing [1]: VA)、および超伝導パラメトロンを利用する量子アニーリング[2]の開発を進め、最終的には両者を適材適所で利用することを想定している。

NEC では、すでに複数の企業の事例で VA を適用した業務システムを構築し本格運用に至っている。製造現場や物流現場の事例では、日々の生産計画、物流計画作成作業の一部を自動化し、従来は熟練の作業者が数時間かけて作成している計画を数分で出力し、作業の効率化を実現している。実際の業務適用を経験して分かったことは、コンピュータによる自動化が実現したことの価値は単に作業の時間短縮や熟練作業員不足の解消だけに止まらない。複数の目的関数の重み調整議論を通じて、その企業が今大事にしている業務課題、経営課題が浮き彫りになり、さらに大きな課題解決に向けた糸口になる可能性がある。また、物流業界の 2024 年問題のように、近い将来起こる業務条件の変化が具体的にどの程度業務に影響を与えるのかを見積り、それに対して経営リソースをどう変更すれば対応できるのか様々な条件を変えたシミュレーションも可能になる。これらのことから、量子アニーリング技術等を用いた最適化ソリューションがもたらす価値は、さらに広がる可能性がある。

講演当日には、超伝導量子アニーリングマシンの開発状況も合わせて報告する。本発表は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の成果を一部活用している。

共創パートナーとの取り組み				
 広告/公共/インフラ	 製造	 交通/物流	 金融	 素材開発/創薬
・ マッチング/レコメンド ・ 通信基地局制御 ・ 監視センサー制御	- 生産計画 - 部品発注計画	・ 乗務員シフト ・ 配送計画 ・ 積荷配置	・ カード不正検知 ・ モンテカルロ・シミュレーション ・ リスク計算 データ補完	・ スクリーニング ・ 実験/パラメータ探索

※研究中、顧客実証～実用に至るものが含まれています

Fig 1 量子コンピューティング技術の適応領域

参考文献

[1] <https://jpn.nec.com/nec-vector-annealing-service/index.html>

[2] T. Yamaji *et al.*, Phys. Rev. A 105, 023519 (2022); T. Yamaji *et al.*, arXiv:2212.13682.

量子インターフェースの実現に向けたダイヤモンド色中心の研究

Research on diamond color centers for realization of quantum interface

横国大 QIC, IAS¹, 横国大院理工², 産総研³, 物材機構⁴, 情報通信研究機構⁵

○黒川 穂高¹, 若松 恵大², 中里 慎太郎², 山本 萌生², 牧野 俊晴³, 加藤 宙光³, 藤井 知^{3,4},
寺井 弘高⁵, 関口 雄平¹, 小坂 英男^{1,2}

IAS, QIC, YNU¹, Grad. Sch. Eng., YNU², AIST³, NIMS⁴, NICT⁵

○Hodaka Kurokawa¹, Keidai Wakamatsu², Shintaro Nakazato², Moyuki Yamamoto², Toshiharu
Makino³, Hiromitsu Kato³, Satoshi Fujii^{3,4}, Hirotaka Terai⁵, Yuhei Sekiguchi¹, Hideo Kosaka^{1,2}

E-mail: kurokawa-hodaka-hm@ynu.ac.jp

量子ビットの集積数は年々増加しており、昨年には 400 ビットを超える超伝導量子コンピュータが IBM から報告された。ただし現在のところ、実用的とされる誤り耐性を持つ量子コンピュータの実現には 100 万以上もの量子ビットが必要とされている。100 万ビット級の集積化を目指すには、希釈冷凍機の冷却能力や配線スペース、ウエハの大きさといった様々な物理的制約を乗り越えるための技術的ブレークスルーが必要となる。中でも我々は、離れた冷凍機間の通信によって量子ビット数を拡張する分散型の量子コンピュータ技術に注目している。超伝導量子ビットを操作するマイクロ波光子の量子情報は室温の熱雑音に埋もれてしまうため、室温での量子通信にはエネルギーの高い光子への変換が不可欠である。マイクロ波光子と光子を相互に接続するための量子インターフェースの開発は、現在世界的にも様々な物理系で盛んに進められている。

我々は量子インターフェースの構成要素として、ダイヤモンド中の色中心の利用を検討している。ダイヤモンド中の色中心は、色中心自体がマイクロ波と光の両方と相互作用すること、ダイヤモンドフォトリック結晶構造の作製によって単一光子との相互作用が可能であること、それによって超低パワー更には単一光子レベルでの操作が可能となり発熱の低減が期待されること、固体素子であるために他のデバイスとの集積化に適していること、といった利点がある。

現在我々はプロジェクト全体としてダイヤモンドフォトリック/フォノリック結晶の開発、新規ダイヤモンド色中心の開拓、ダイヤモンド色中心の量子インターフェース動作の原理実証、マイクロ波共振器の開発、各種デバイス間の接続技術開発を進めている。本講演では、ダイヤモンド色中心のフォノン/電場操作と新規色中心開拓を中心に、研究の進捗と今後の展開について述べる。

本研究は JST「ムーンショット型研究開発事業」(JPMJMS2062)、総務省「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」(JPMI00316)、JST-CREST(JPMJCR1773)、科研費基盤研究(S)、挑戦的研究(開拓)の支援を得た。

超伝導自己シャント型磁束量子ビットの提案と検証

Superconducting Self-shunted Flux Quantum Bits

東北大院工¹ (M1)内田 徳之新¹, 沓間 弘樹¹, [○]山下 太郎¹

Tohoku Univ.¹

E-mail: taro@tohoku.ac.jp

Google 等による量子優位性実証の報告や理化学研究所による量子計算機のクラウド公開等、超伝導量子計算機の開発が加速している [1]。超伝導量子ビットには様々なタイプがあり、現在量子計算機で用いられている量子ビットは、電荷型のトランズモンほぼ一択で、設計面等の工夫によりコヒーレンス時間の改善が進んでいる。一方で、雑音低減の代償として非調和性が低下しており、さらなる大規模化では高準位へのリークエラーやビット間クロストーク等の増加が懸念される。これに対し磁束型の量子ビットは、高い非調和性を保持しつつシャントキャパシタの付加による雑音低減により、80 μ s を超えるコヒーレンス時間が達成され、スケーラブルな量子ビットの有力候補である [2]。大規模化に向けた課題として、コヒーレンス時間が最長となる最適動作点での動作のために半磁束量子バイアスを必要とする点が挙げられるが、最近 π 接合の導入によりゼロバイアス動作が可能となった [3, 4]。磁束量子ビットの集積化に残された課題は、ジョセフソン接合を含む超伝導ループ部の数 100 倍以上の専有面積を占めるシャントキャパシタの存在である。

そこで我々は、従来よりも大きな 1 μ m² 以上の面積を有するジョセフソン接合を用いた、自己シャント型磁束量子ビット (Self-shunted flux qubit: SSFQ) を考案し優位性の検討を行った [5, 6]。SSFQ では、ジョセフソン接合自体が有する数 10 fF/ μ m² のキャパシタンスを利用することでシャントキャパシタが不要となるため、素子全体の専有面積を飛躍的に低減できる。臨界電流密度や接合面積等の設計パラメータに対し体系的に数値計算を行い、非調和度や雑音耐性等の性能指標に関して検証した。その結果、臨界電流密度の低減と接合の大面积化により、磁束及び電荷雑音耐性についてシャントキャパシタを備えた従来型 [2]と同程度まで抑えつつ、1 GHz を超える高い非調和度を実現できることが明らかとなった (Table 1)。この結果は、類似の設計指針による新型トランズモン (Merged element

transmon: MET) [7]に対しても、非調和度が 2 倍以上大きく優位性となる。講演では、接合や読み出し共振器の設計も含め詳細に報告する。

本研究の一部は、科研費・基盤研究(S) (JP19H05615) の支援により行われた。

Table. 1 量子ビットの比較。f₀₁ は量子ビット周波数を表す。

モデル	臨界電流 密度 [A/cm ²]	接合 面積 [μ m ²]	α 接 合比	f ₀₁ [GHz]	非調 和度 [MHz]	シャントキャ パシタ
SSFQ	11.0	1.5	0.49	3.3	1049	0
従来型 [2]	240	< 0.1	0.42	4.3	830	200x300 μ m ²
MET [7]	~1	1.4	–	3.8	414	0

[1] F. Arute *et al.*, Nature **574**, 505–510 (2019). [2] F. Yan *et al.*, Nat. Commun. **7**, 12964 (2016).

[3] D. Pham *et al.*, Sci. Rep. **12**, 6863 (2022) 他. [4] K. Zuo *et al.*, in preparation.

[5] 山下, 内田, 特願 2023-019627.

[6] T. Uchida *et al.*, EUCAS 2023, Sep. 3-7, 2023, Bologna, Italy, accepted.

[7] H. J. Mamin *et al.*, Phys. Rev. Appl. **16**, 024023 (2021).

超伝導共振器を用いたボソニック量子ビットにおける 補助量子ビットの特性改善

Improving the lifetime of the ancilla qubit in bosonic qubits using superconducting cavity

NTT 物性基礎研¹ ○竹中崇了¹, 水野皓介¹, Imran Mahboob¹, 齊藤志郎¹

NTT-BRL¹, °Takaaki Takenaka¹, Kosuke Mizuno¹, Imran Mahboob¹, Shiro Saito¹

E-mail: takaaki.takenaka@ntt.com

量子誤り訂正(QEC)の実現に向け、表面符号をはじめとした様々な方式が提案されている。共振器内の無限次元のヒルベルト空間を用いるボソニックコードと呼ばれる方式は、量子情報が保持されるメモリ共振器、非線形操作に用いられる補助量子ビット、補助量子ビットの読出しに用いられる読出し共振器の3点が最小構成であり、物理量子ビットを多数組み合わせる方式に比べ必要なハードウェア数が少ないという利点がある。最近ボソニックコードにおいてQECを実行し、論理量子ビットの寿命が共振器の T_1 を超える、break-evenを達成した実験結果が報告されており[1,2]、注目を集めている。

我々はトランズモン量子ビットを補助量子ビットとして用い、超伝導3次元同軸共振器と組み合わせたデバイスにおいてボソニック量子ビットの実装に取り組んでいる。これまでは補助量子ビットの T_1 が10 μs 以下という状況であったが、補助量子ビット電極の形状等の設計を変更したことにより、安定して30 μs 超を達成、最良サンプルでは50 μs を超える T_1 を達成した。本講演では従来設計からの変更点と測定結果について報告した上で、現状抱えている課題点や今後の改善方針について検討、議論したい。

本研究はJST Moonshot R&D (JPMJMS2067)の支援を受けて行われている。

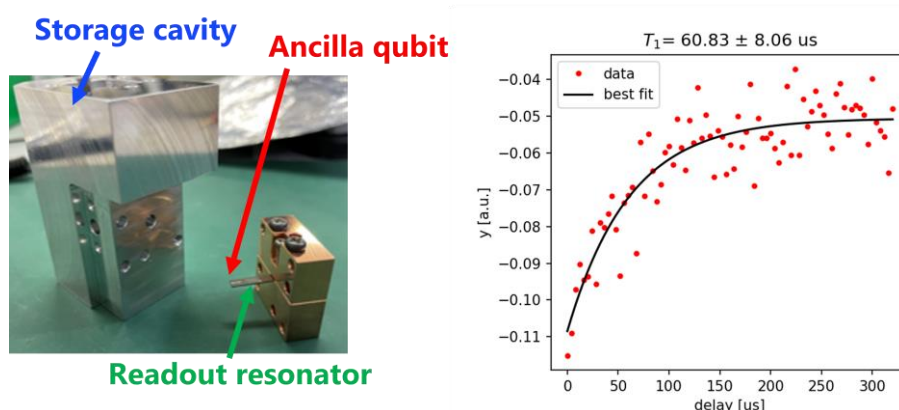


Figure. (Left) A picture of our bosonic qubit composed of a high-Q 3D superconducting cavity, a transmon qubit, and a 2D stripline readout resonator. **(Right)** Energy relaxation time (T_1) for the ancilla qubit.

[1] V. V. Sivak, et al., Nature **616**, 50-55 (2023).

[2] Z. Ni, et al., Nature **616** 56-60 (2023).