

SWoPP BoF

「コンピュータ研究者は、量子コンピュータを研究する（勉強する）必要があるのだろうか？」

理化学研究所 量子コンピュータ研究センター（RQC）

基礎科学特別研究員

上野 洋典

Q. コンピュータ屋が量子コンピュータを研究する必要ある？

● A. Yes!

- 人類の計算能力の質的な向上への貢献
- ↑実現のためには計算機（もっと言えば情報系）の知見必須
- 新しい物好きなら楽しめる
- トップカンファに通しやすい（?）

● A. No!

- 難しいことは専門家に任せればいい
 - 物理の人とチームを組む
- （ほぼ）量子のことを知らなくても貢献できる箇所はある

自己紹介

● 経歴

- 2017.3 東大工学部計数工学科卒業
- 2017.4~2022.3 東大情報理工システム情報学専攻 中村研
 - 指導教員: 近藤正章 先生 (現慶應)、中村宏 先生
- 2022.5~2023.2 ミュンヘン工科大学 訪問研究員
- 2023.4~現在 RQC ポスドク

● 博論: 超伝導回路 (SFQ回路) を用いた量子誤り訂正

- 修士の間はディープラーニング (特に転移学習) とか
- せっかく博士進学したから変なことしたい! -> **SFQ回路**
 - HotSPA2018 パネルセッション
「極低温」コンピューティングは「ホット」になり得るか?
- 近藤先生「冷えてるものの制御に使えばいいんじゃない?
量子コンピュータの誤り訂正とか」 (2019年夏頃)

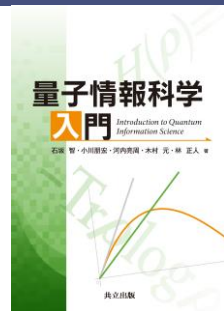


ドイツでの最初 (上) と
最後 (下) のビールと私

博士課程での研究経緯

2019年
夏頃

(一般的な) 量子誤り訂正符号の話難しすぎ



秋～冬

表面符号ってやつが有力らしい
結局グラフマッチングに帰着されるっぽい？
(ETNET2020)

猫でもわかる Surface Code 量子計算
Dec 24, 2017 • Shota Nagayama
<https://shota.io/2017/12/24/surface-code.html>

12月

鈴木さん、田渕さん（アーキわかる物理屋）との議論開始、具体的な問題を理解

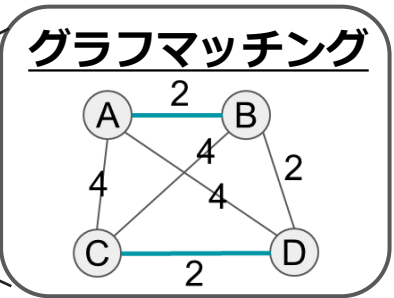
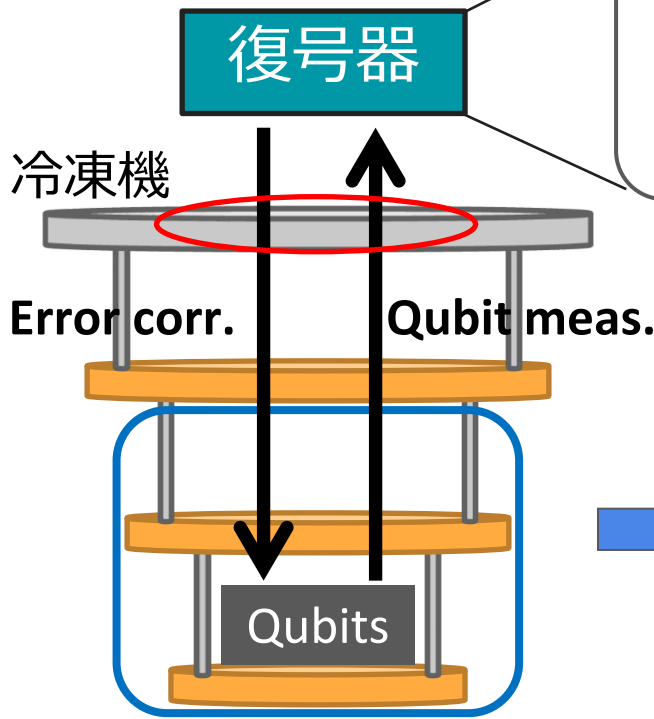


2020年
3月

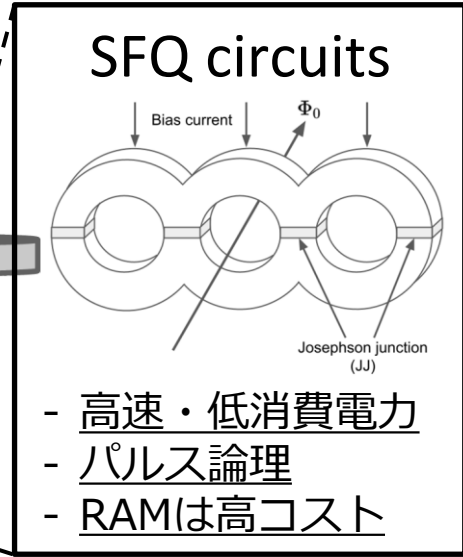
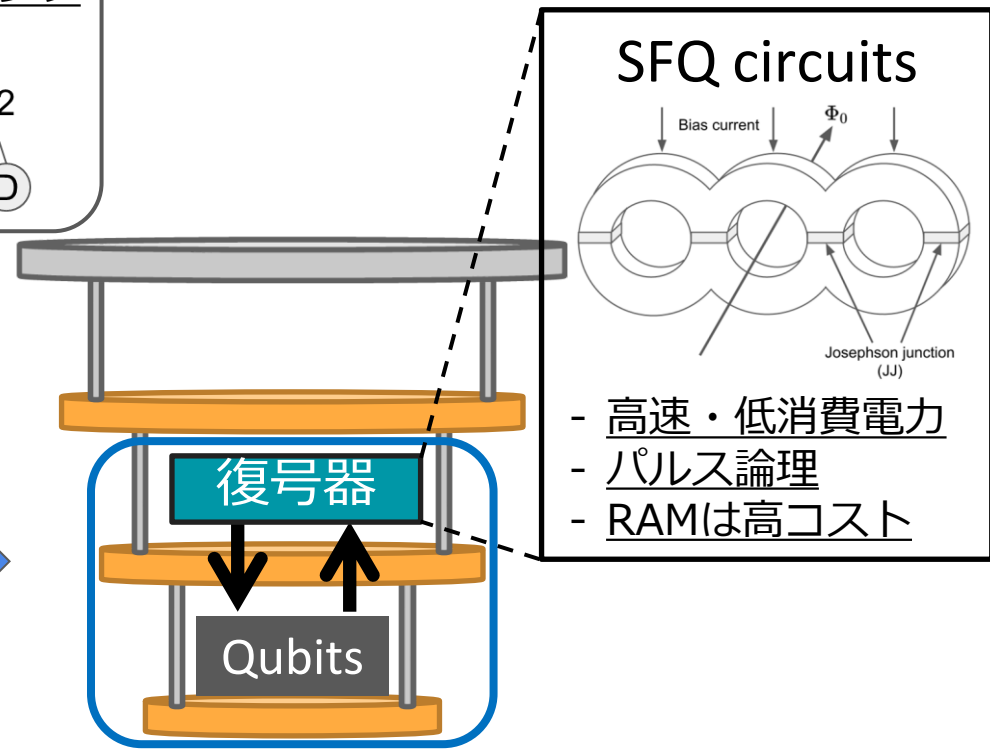
田中先生（SFQ回路）とともに設計検討

極低温環境で動作する量子誤り訂正アーキテクチャ

従来アーキテクチャ



提案アーキテクチャ



Y. Ueno et al., "QECool: on-line quantum error correction with a superconducting decoder for surface code," DAC2021.

研究の構想・着想に至った理由

SFQ回路

利点

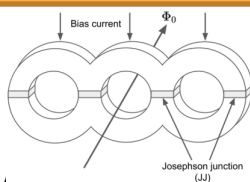
- CMOSに比べて
高速・低消費電力

欠点・制約

- 極低温環境でのみ動作
- 大規模RAMの構築が困難

工学的に有用な応用が難しい

新奇デバイス



量子計算機

利点

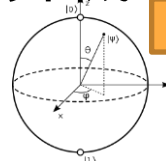
- 量子超越性

欠点・制約

- (超伝導は) 極低温環境でのみ動作
- 誤り訂正に膨大な古典計算リソース

室温-極低温間の配線が
スケーラビリティを制限

新原理計算



SFQ回路を用いた誤り訂正機構

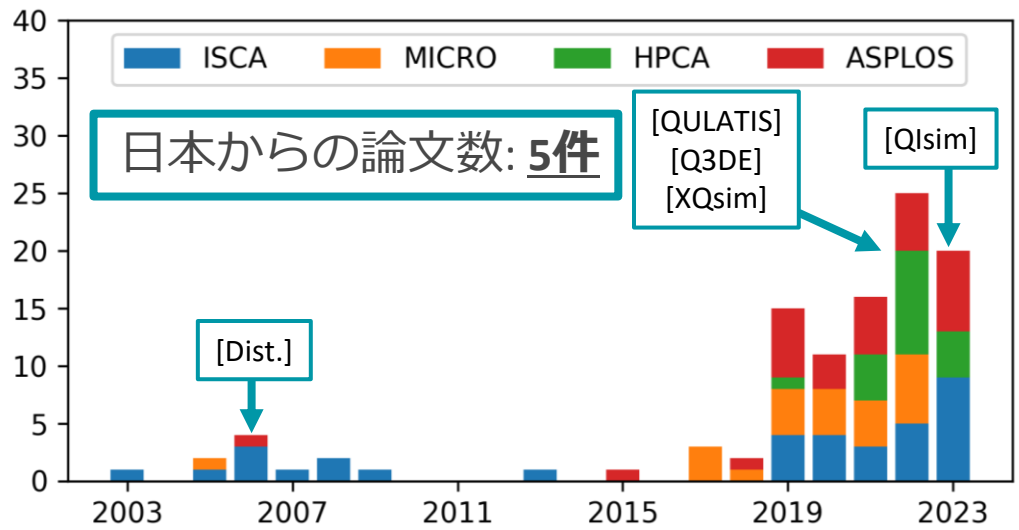
大規模RAMが不要な
分散処理方式の
誤り訂正**アルゴリズム**



提案アルゴリズムを実行する
SFQ回路の設計

量子っぽいところを触らなくても貢献できる！

国内外の量子計算機アーキテクチャ研究動向



アーキ系のトップ国際会議 (ISCA, MICRO, HPCA, ASPLOS) における量子計算機関連論文数 (過去20年分)

| 年 | 量子関連論文割合 |
|-----------|---------------|
| 2003~2018 | 0~1%程度 |
| 2019 | 5.4% (15/276) |
| 2020 | 3.6% (11/308) |
| 2021 | 5.0% (16/323) |
| 2022 | 7.7% (25/325) |
| 2023 | 6.4% (20/311) |

トップ国際会議における量子関連論文数割合

元データ: <https://yuteno.github.io/> または上野のresearchmapで公開中

[Dist.] R. Van Meter, W. Munro, K. Nemoto, K. Itoh, "Distributed Arithmetic on a Quantum Multicomputer", **ISCA2006**.
 [QULATIS] **Y. Ueno**, M. Kondo, M. Tanaka, Y. Suzuki, Y. Tabuchi, "QULATIS: A Quantum Error Correction Methodology toward Lattice Surgery", **HPCA2022**.
 [Q3DE] Y. Suzuki, ..., K. Inoue, **T. Tanimoto**, "Q3DE: A fault-tolerant quantum computer architecture for multi-bit burst errors by cosmic rays", **MICRO2022**.
 [XQsim] I. Byun, ..., **T. Tanimoto**, M. Tanaka, K. Inoue, J. Kim, "XQsim: modeling cross-technology control processors for 10+K qubit quantum computers", **ISCA2022**.
 [Qlsim] D. Min, ..., M. Tanaka, K. Inoue, J. Kim, "Qlsim: Architecting 10+K Qubit QC Interfaces Toward Quantum Supremacy", **ISCA2023**.

国内外の量子計算機アーキテクチャ研究動向

| 主要な研究グループ | 論文数 (割合) | First quantum paper in top conferences |
|--|------------------------------|--|
| University of Chicago (Fred Chong (@UCSB until 2015)) | 32本 (29.1%) | ISCA2003 |
| Georgia Tech. (Moinuddin Qureshi, Swamit Tannu (UW-Madison)) | 13+4 (16.5%) | MICRO2017 |
| Princeton University (Margaret Martonosi) | 13 (12.6%) (内Chicagoと共同5) | ISCA2007 |
| UC Santa Barbara (Yuan Xie, Yufei Ding) | 6 (5.8%) | ASPLOS2019 |

- 60%の論文が上位4グループから出ている

各グループの初期の量子関連論文

Chicago University

- [初期] M. Oskin, F. Chong, I. Chuang, J. Kubiawicz, Building Quantum Wires: The Long and the Short of it, ISCA2003. (arXiv2001.06598)
- [最近] A. Litteken, L. Seifert, J. Chadwick, N. Nottingham, F. Chong, J. Baker, Qompress: Efficient Compilation for Ququarts Exploiting Partial and Mixed Radix Operations for Communication Reduction, ASPLOS2023.

Georgia Tech.

- [初期] P. Das, C. Pattison, S. Manne, D. Carmean, K. Svore, M. Qureshi N. Delfosse, AFS: Accurate, Fast, and Scalable Error-Decoding for Fault-Tolerant Quantum Computers, HPCA2022. (arXiv2001.06598)
- [最近] S. Vittal, P. Das, M. Qureshi, Astrea: Accurate Quantum Error-Decoding via Practical Minimum-Weight Perfect-Matching, ISCA2023.

最初は「**アーキわかる（興味ある）物理屋**」と併走
その過程で「**物理わかるアーキ屋**」を育成
物理屋の実装下請けは評価されない

物理屋に囲まれてみた感想

- RQCは物理学者（特に実験・デバイス側）がマジョリティ
- やはり見ているレイヤが違いすぎる
 - 言葉の定義も違う
 - アーキテクチャ、ソフトウェア、etc.
- アーキの重要性を理解してくれる人も増えつつある
 - 特に院生～ポスドクくらいの若手
- 上野の役割
 - 量子興味ありアーキ屋と物理屋を繋ぐパイプとなる
 - 物理わかるアーキ屋になる（難しそう）
 - 情報系における「量子興味あり」の裾野を広げる
 - 簡単（:= あまり量子っぽくない箇所）を中心にした解説・セミナーなど？

Q. コンピュータ屋が量子コンピュータを研究する必要ある？

● A. Yes!

- 人類の計算能力の質的な向上への貢献
- ↑実現のためには計算機アーキの知見必須
- 新しい物好きなら楽しめる
- トップカンファに通しやすい(?)

本数、割合ともに増加傾向
世界でも有カグループは少数
-> まだ狙い目あり？

● A. No!

- 難しいことは専門家に任せればいい
 - 物理の人とチームを組む
- (ほぼ) 量子のことを知らなくても貢献できる箇所はある

最初は「**アーキわかる (興味ある) 物理屋**」と併走
その過程で「**物理わかるアーキ屋**」を育成