

量子計算機アーキテクチャのための 異分野間共同研究のすすめ

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

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. 上野はなぜ量子計算機アーキテクチャの研究をしている？

A. ミーハーで図々しい人間だからです。

● 経歴

- 2015.4~2017.3: 東大工学部 計数システム
- 2017.4~2022.3: 東大情報理工 システム情報学専攻
 - 指導教員: 近藤 正章先生 (現慶應)、中村 宏先生
 - 博論: **超伝導デジタル回路を用いた量子誤り訂正**
- 2022.5~2023.2: ミュンヘン工科大学 訪問研究員
 - HPC、アーキテクチャ、量子-HPC連携
- 2023.4~現在: 理研量子コンピュータ研究センター
基礎科学特別研究員 (田淵ユニット)



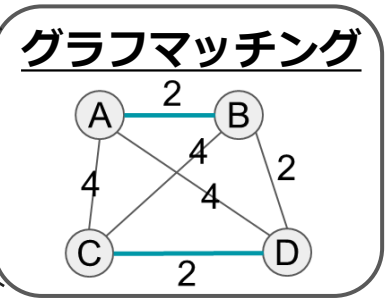
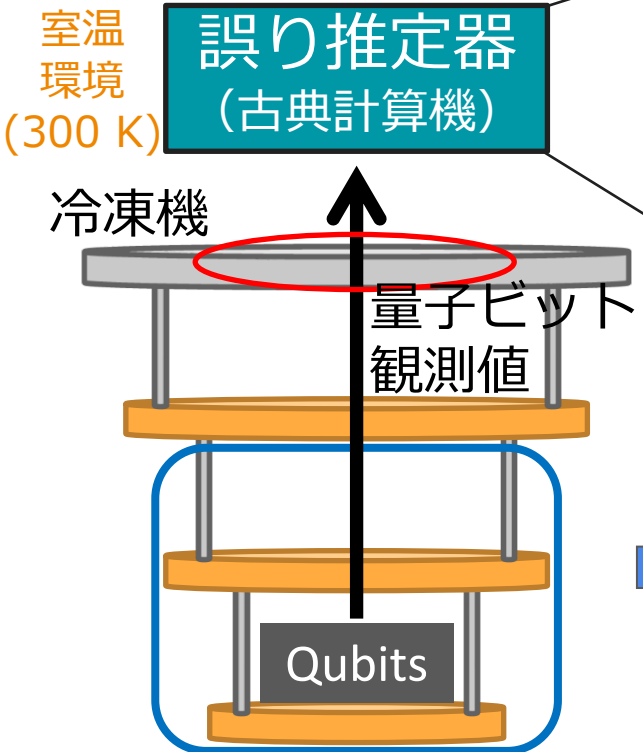
IEEE Quantum Week 2023
参加中の上野

● 研究対象、興味

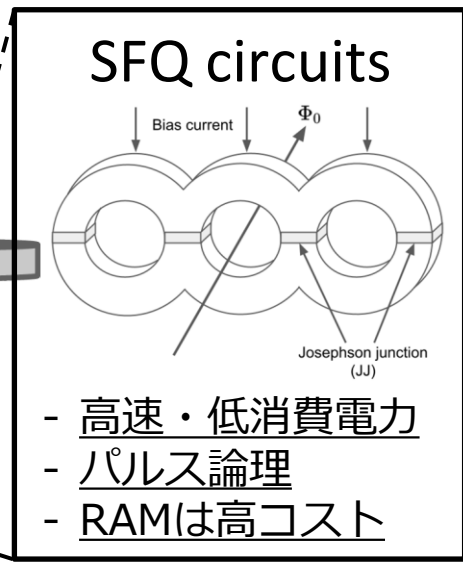
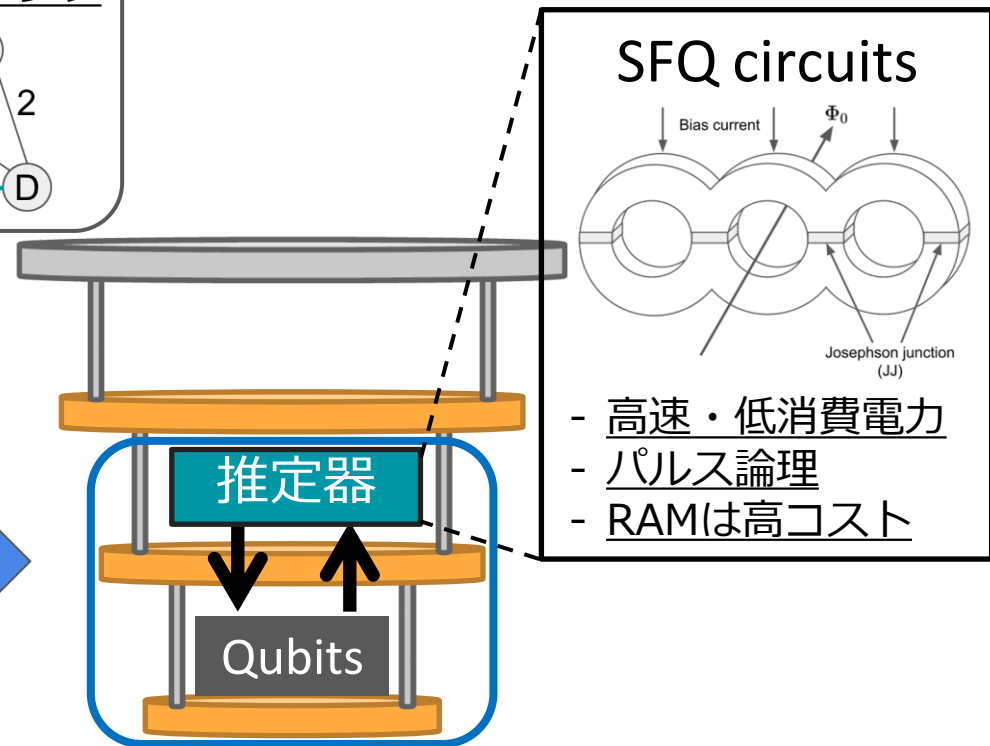
- (量子) 計算機アーキテクチャ、
超伝導デジタル回路 (SFQ回路)、量子誤り訂正、誤り耐性量子計算

超伝導デジタル回路を用いた量子誤り訂正

従来アーキテクチャ



提案アーキテクチャ



極低温環境 (20 mK~4 K)

[1] Ueno, Kondo, Tanaka, Suzuki, and Tabuchi. QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code. DAC2021.

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

修士でやってた深層学習飽きた
イケてる研究テーマやりたい！



2018年6月
HotSPA2018



2019年4月
博士進学



2019年7～8月頃
近藤先生との議論



2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

修士でやってた深層学習飽きた
イケてる研究テーマやりたい！

HotSPA2018 (Hot Spring Annual meeting 2018)

IEICE-CPSY/DC、IPSJ-ARC 合同研究会

蔵王温泉 たかみや瑠璃倶楽リゾート



■セッション3：招待講演1（16:00 - 17:00）

(9) 16:00 - 17:00

デバイス/回路/アーキテクチャの協創による超伝導超高速マイクロプロセッサ

○田中雅光（名大）

■パネルセッション：第一回 ポストムーアを考える座談会（17:10 - 18:10）

「極低温」コンピューティングは「ホット」になり得るか？

司会：井上弘士（九大）

パネリスト：前澤正明（産総研）、田中雅光（名大）

キーワード：超伝導コンピューティング、量子コンピューティング

2018年6月
HotSPA2018

2019年4月
博士進学

2019年7～8月頃
近藤先生との議論

2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

SFQ回路で何かやりたい！

- 高速・低消費電力
- RAMは重い
- 極低温環境で動作

HotSPA2018 (Hot Spring Annual meeting 2018)

IEICE-CPSY/DC、IPJSJ-ARC 合同研究会

蔵王温泉 たかみや瑠璃倶楽リゾート



■セッション3：招待講演1（16:00 - 17:00）

(9) 16:00 - 17:00

デバイス／回路／アーキテクチャの協創による超伝導超高速マイクロプロセッサ

○田中雅光（名大）

■パネルセッション：第一回 ポストムーアを考える座談会（17:10 - 18:10）

「極低温」コンピューティングは「ホット」になり得るか？

司会：井上弘士（九大）

パネリスト：前澤正明（産総研）、田中雅光（名大）

キーワード：超伝導コンピューティング、量子コンピューティング

2018年6月
HotSPA2018

2019年4月
博士進学

2019年7～8月頃
近藤先生との議論

2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

SFQ回路で何かやりたい！

- 高速・低消費電力
- RAMは重い
- 極低温環境で動作



「もともと冷えているものの
制御とか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」



2018年6月
HotSPA2018



2019年4月
博士進学



2019年7～8月頃
近藤先生との議論



2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- 高速・低消費電力
- RAMは重い
- ~~極低温環境で動作~~



「もともと冷えているものの制御とか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」



2018年6月
HotSPA2018



2019年4月
博士進学



2019年7～8月頃
近藤先生との議論



2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- 高速・低消費電力
- RAMは重い
- ~~極低温環境で動作~~

2019年11月21日(木)

■ 情報数学セミナー

16:50-18:35 数理科学研究科棟(駒場) 122号室

鈴木泰成 氏 (NTTセキュアプラットフォーム研究所)

量子誤り訂正 (Japanese)



[講演概要]

本講義では2048bitの素因数分解などの大規模な量子計算の実現において必須となる、量子誤り訂正技術について解説する。まず量子計算と通常の計算機の違いから誤り訂正の仕組みにどのような要請の違いが生じるのかを解説し、量子誤り訂正の構造と難しさを概観する。続けて、量子誤り訂正および誤り耐性量子計算の全体像と、その実現に向けた最近の取り組みを紹介する。

セミナー後、
上野「共同研究させてください！」

★
2018年6月
HotSPA2018

|
2019年4月
博士進学

★
2019年7～8月頃
近藤先生との議論

★
2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表（～2019年11月）

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- 高速・低消費電力
- RAMは重い
- ~~極低温環境で動作~~
- 量子誤り訂正は
グラフマッチング問題を解けば良い

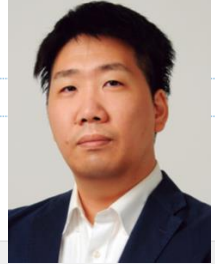
2019年11月21日(木)

■ 情報数学セミナー

16:50-18:35 数理科学研究科棟(駒場) 122号室

鈴木泰成 氏 (NTTセキュアプラットフォーム研究所)

量子誤り訂正 (Japanese)



[講演概要]

本講義では2048bitの素因数分解などの大規模な量子計算の実現において必須となる、量子誤り訂正技術について解説する。まず量子計算と通常の計算機の違いから誤り訂正の仕組みにどのような要請の違いが生じるのかを解説し、量子誤り訂正の構造と難しさを概観する。続けて、量子誤り訂正および誤り耐性量子計算の全体像と、その実現に向けた最近の取り組みを紹介する。

セミナー後、
上野「共同研究させてください！」

2018年6月
HotSPA2018

2019年4月
博士進学

2019年7～8月頃
近藤先生との議論

2019年11月
東大数学科セミナー

上野の研究年表 (2019年12月~2021年2月)

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- SFQではRAMは重い
- 分散処理方式でのマッチング
- ひとまずは2次元格子上のグラフマッチング問題を解く？
(観測エラー未対応)



極低温環境での誤り訂正は
FTQCアーキテクチャにおいて
重要な問題！



上野の研究年表 (2019年12月~2021年2月)

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- SFQではRAMは重い
- 分散処理方式でのマッチング
- ひとまずは2次元格子上のグラフマッチング問題を解く？
(観測エラー未対応)

NISQ+: Boosting quantum computing power by approximating quantum error correction

Adam Holmes
Department of Computer Science
University of Chicago
Chicago, USA
adholmes@uchicago.edu
Intel Labs
Intel Corporation
Oregon, USA

Mohammad Reza Jokar
Department of Computer Science
University of Chicago
Chicago, USA
jokar@uchicago.edu

Ghasem Pasandi
Department of Electrical and
Computer Engineering
University of Southern California (USC)
Los Angeles, USA
pasandi@usc.edu

Yongshan Ding
Department of Computer Science
University of Chicago
Chicago, USA
yongshan@uchicago.edu

Massoud Pedram
Department of Electrical and
Computer Engineering
University of Southern California (USC)
Los Angeles, USA
pedram@usc.edu

Frederic T. Chong
Department of Computer Science
University of Chicago
Chicago, USA
chong@cs.uchicago.edu

Fred Chongグループの成果 観測エラー未対応



上野の研究年表 (2019年12月～2021年2月)

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- SFQではRAMは重い
- 分散処理方式でのマッチング
- ひとまずは2次元格子上のグラフマッチング問題を解く？
(観測エラー未対応)

MICRO 2020 Submission #271 – Confidential Draft – Do NOT Distribute!!

Neuromorphic-Inspired Quantum Error Correction Logic with Superconducting Circuits

ABSTRACT

A fault-tolerant quantum computing requires a great deal of help from classical computers in detecting and correcting errors of qubits. One of the most promising quantum error correction (QEC) methods is Surface code which can be decoded by solving a matching problem of weighted graphs. It is considered that most successful large quantum computers now is based on the superconducting qubits. Because of the superconducting nature, they should be operated only in the cryogenic environment. One of the big challenges of developing large quantum computer which has thousands of qubits is scalability of QEC. Since the QEC is performed

will be expected, but there are several major barriers towards the rapid increase in the number of qubits. One of them is considered to be high fragility of quantum state in a qubit which necessitate fault tolerance mechanism for QC systems. To increase the robustness of QCs to errors on qubits, huge amount of efforts has been paid for using multiple physical qubits to represent a single logical qubit and to construct error detection and correction mechanisms [30]. It is not possible to detect and correct errors by directly observing qubits because entangled quantum state is destroyed when they are measured. Therefore, researchers usually use methods to encode multiple physical qubits plus observational

先行研究との明確な違いを見出だせず不採択…



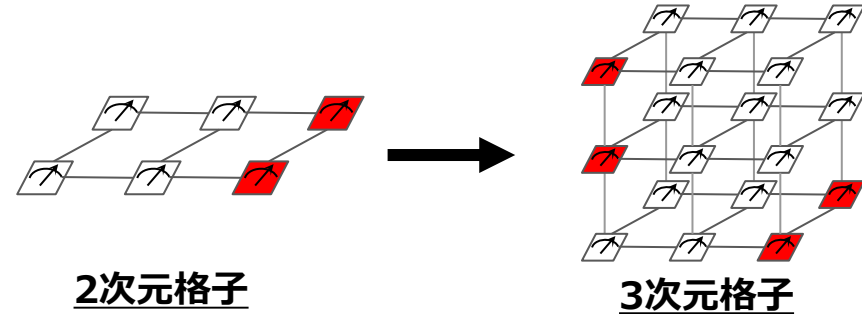
上野の研究年表 (2019年12月~2021年2月)

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- SFQではRAMは重い
- 分散処理方式でのマッチング
- 観測エラーに対応するため、3次元格子上のマッチング問題を解く

マッチング問題の対象



論文の書きぶりが悪く、
利点がうまく伝わらず不採択…



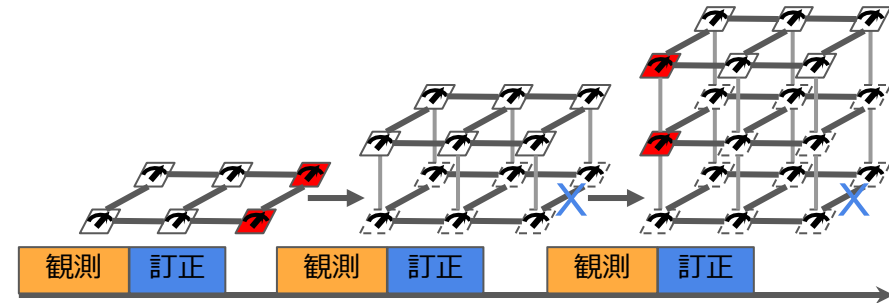
上野の研究年表 (2019年12月~2021年2月)

研究テーマ構想

SFQ回路で量子誤り訂正！

- SFQではRAMは重い
- 分散処理方式でのマッチング
- 3次元格子上のマッチング問題
- より高速な誤り訂正のために
オンライン方式を提案

オンライン処理方式の提案



DATE不採択通知から11日間で
全力revise、無事採択！



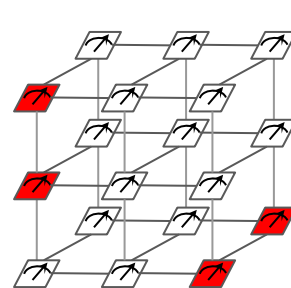
上野の研究年表 (2021年2月~2022年3月)

研究テーマ構想

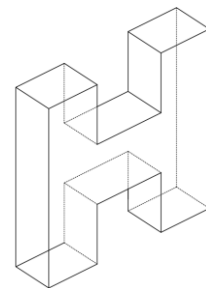
SFQ回路で量子誤り訂正！

- 格子手術により論理演算を行うにはより複雑な3次元格子上のグラフマッチング問題を解けばよい
- ユニバーサルな誤り耐性量子計算を支える極低温量子誤り訂正機構

マッチング問題の対象



単一論理ビット
単純な3次元格子



論理演算
複雑な3次元格子

MICRO不採択 -> HPCAで無事採択！

2021年4月~6月

MICRO

投稿・不採択

8月~10月

HPCA

投稿・採択

2022年3月

博士修了

8月

続編arXiv

アップロード

共同研究体制

上野
理研



近藤先生
東大（現慶應）



計算機
アーキテクチャ

田中先生
名古屋大



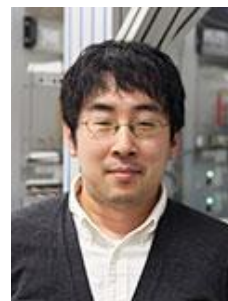
SFQ回路

鈴木さん
NTT



FTQC理論、
ソフトウェア

田淵先生
理研



超伝導
量子デバイス

幅広い分野の共同研究によりハイインパクトな研究！
様々な分野の知見が身につく！

上野が担当した箇所 = できるようになったこと

誤り訂正アルゴリズム設計

Algorithm 1 Spike-based on-line QEC for 3-D Surface code

```

1: MeasureEachUnit:
2:  $m = 0$ 
3: while true do
4:    $A = \text{checkAncilla}()$ 
5:   if  $m == 0$  then
6:      $\text{Reg}[0] = A$ 
7:   else
8:      $\text{Reg}[m] = \text{Reg}[m-1] \oplus A$ 
9:   end if
10:   $m = m + 1$ 
11:  Sleep(Mcycle)
12: end while

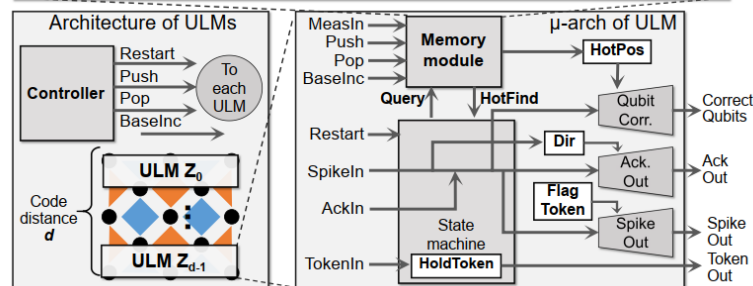
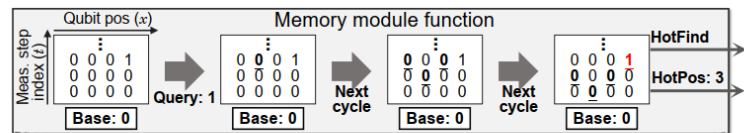
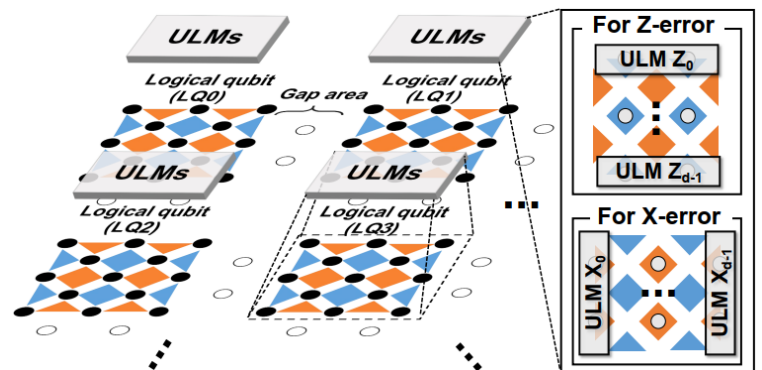
1: Controller:
2: start_loop:
3: for  $C = 1$  to  $N_{\text{limit}}$  do
4:   for  $b = 0$  to  $N_{\text{depth}}$  do
5:     shift = true
6:     for  $i = 0$  to  $N_{\text{row}}$  do
7:       currentRow =  $i$ 
8:       for  $j = 0$  to  $N_{\text{col}}$  do
9:         if  $m - b > th_v$  then
10:          giveToken( $i, j$ )
11:          RestartUnit( $b$ )
12:          while !getFinish() &&
13:            !Timeout()
14:          end while
15:        end if
16:        shift && !Unit( $i, j$ ).Reg[0]
17:      end for
18:    end for
19:    sendResetFlag()
20:    if shift then
21:      SHIFTREG()
22:    end if
23:  end for
24: end for

1: procedure SHIFTREG
2: if  $m > 0$  then
3:   for  $i = 0$  to  $N_{\text{depth}} - 2$  do
4:      $\text{Reg}[i] = \text{Reg}[i+1]$ 
5:   end for
6:    $m = m - 1$ 
7: end if
8: end procedure

1: RestartUnit(Input: b)
2: if Token == 1 then
3:   FlagToken = 1
4:   if  $\text{Reg}[b] == 1$  then
5:     requestSpike()
6:     for  $t = b$  to  $N_{\text{depth}}$  do
7:       if  $(S = \text{getSpike}()) \neq \text{NULL}$  then
8:         Dir = rotate(S)
9:         correctQubit(Dir)
10:        sendSyndrome(Dir)
11:      end if
12:    end if
13:    if  $t \neq b$  &&  $\text{Reg}[t] == 1$  then
14:      sendController("Finish")
15:    end if
16:  else
17:    sendController("Finish")
18:  end if
19: else
20:   for  $t = b$  to  $N_{\text{depth}}$  do
21:     if  $\text{Reg}[t] == 1$  then
22:       SPIKE(self.row, FlagToken)
23:       if getCorrect() then
24:          $\text{Reg}[t] = 0$ 
25:       end if
26:     end if
27:   else
28:     if  $(S = \text{getSpike}()) \neq \text{NULL}$  then
29:       Dir = rotate(S)

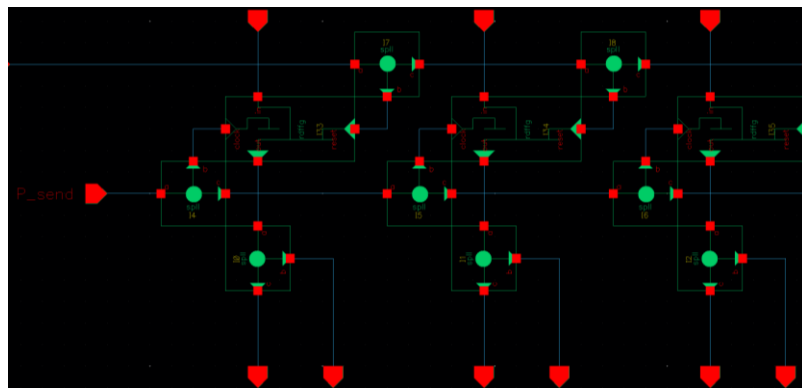
```

誤り訂正アーキテクチャ設計

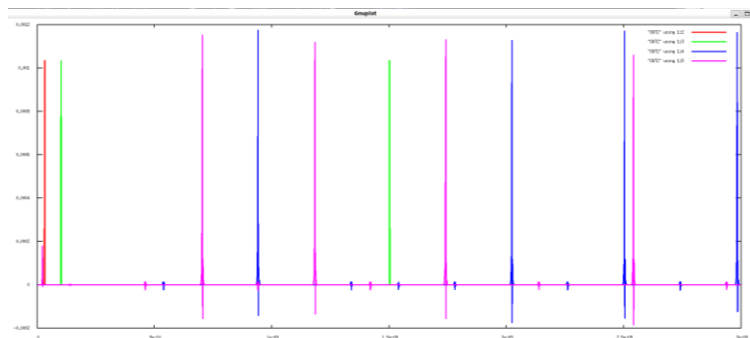


上野が担当した箇所 = できるようになったこと

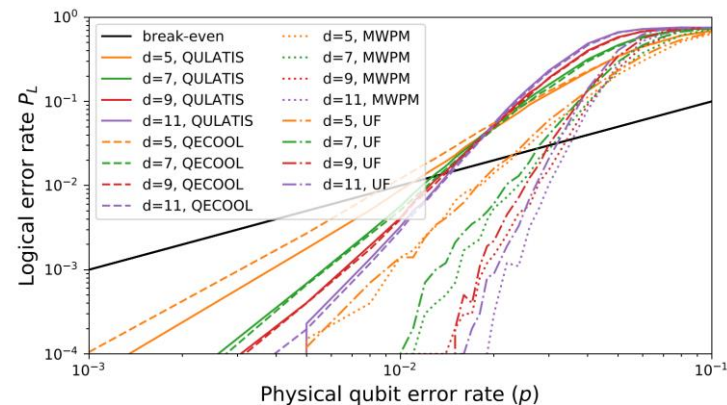
SFQ回路による誤り訂正回路の機能設計



SPICEレベルシミュレーションによる機能検証



数値計算による 誤り訂正性能評価



研究内容まとめ

従来アーキテクチャ

室温環境
(300 K)

誤り推定器
(古典計算機)

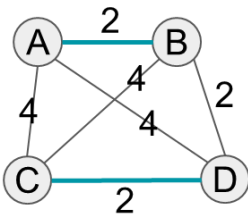
冷凍機

量子ビット
観測値

Qubits

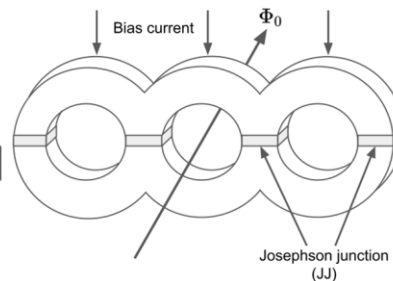
極低温環境 (20 mK~4 K)

グラフマッチング



提案アーキテクチャ

SFQ circuits



- 高速・低消費電力
- パルス論理
- RAMは高コスト

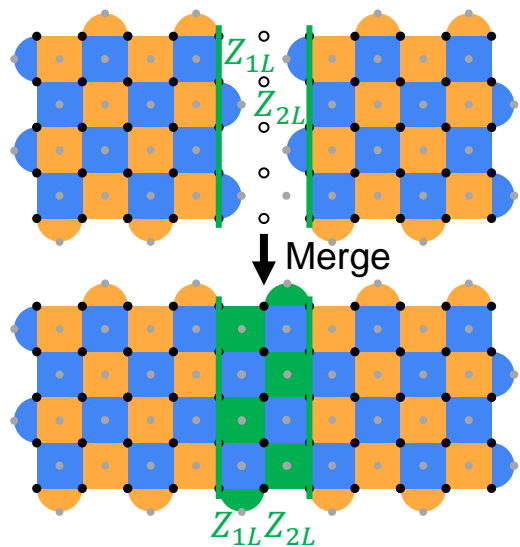
推定器

Qubits

[1] Ueno, Kondo, Tanaka, Suzuki, and Tabuchi. QECool: On-Line Quantum Error Correction with a Superconducting Decoder for Surface Code. DAC2021.

最近のトピック: 格子手術アーキテクチャ

格子手術の概要

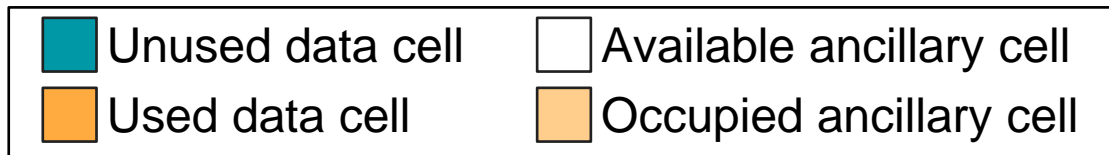
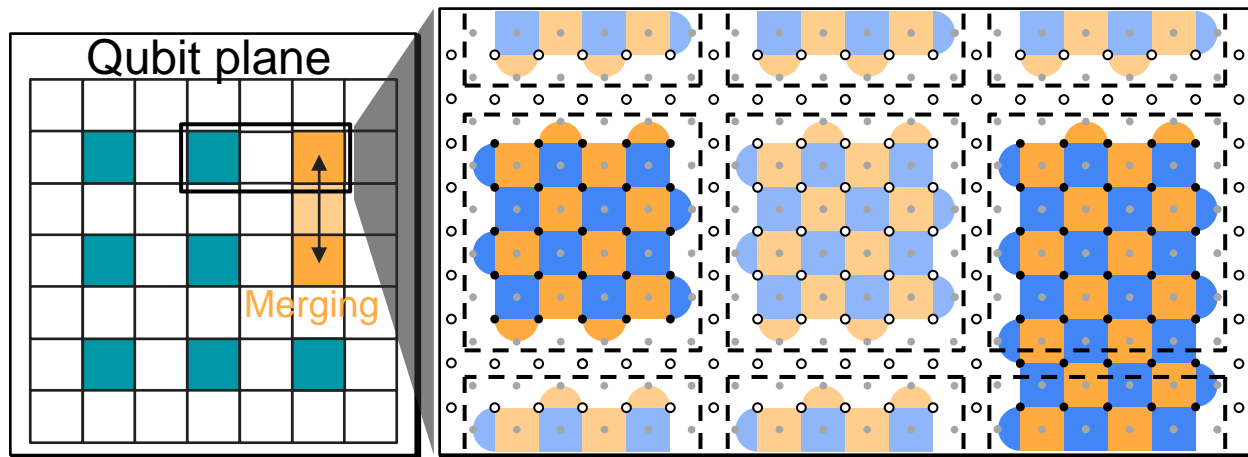


Multi-body Pauli測定

- **格子手術**
- 魔法状態蒸留
- ゲートテレポーテーション

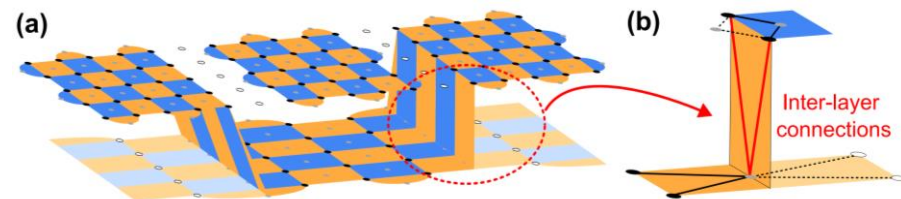
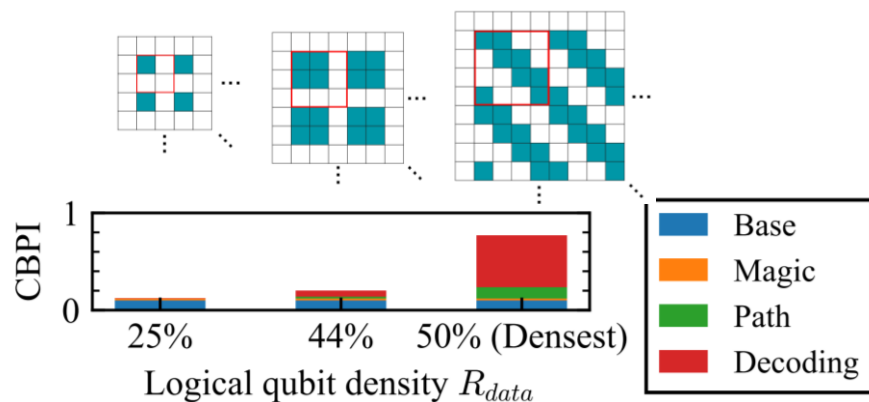
ユニバーサルFTQC

格子手術を実行するQubit plane



最近のトピック: 格子手術アーキテクチャ

今週中にarXivアップロード予定!



- 格子手術における各性能低下要因の影響を可視化する性能評価手法CBPI (Code Beats per Instruction) stack
 - 古典プロセッサにおけるCPI stackを参考
- 格子手術アーキテクチャのボトルネックを特定
 - > 格子手術の経路長
- 経路長を低減する量子ビットの2.5次元積層構造を提案

共同研究体制

上野 (理研)



量子計算機アーキ

齋藤さん (東大中村研M2)



NO IMAGE

競技プログラミング

谷本先生 (九大) 鈴木さん (NTT)



計算機アーキ



FTQC理論、
ソフトウェア

玉手さん (理研)



超伝導量子デバイス

田渕先生 (理研)



超伝導量子デバイス

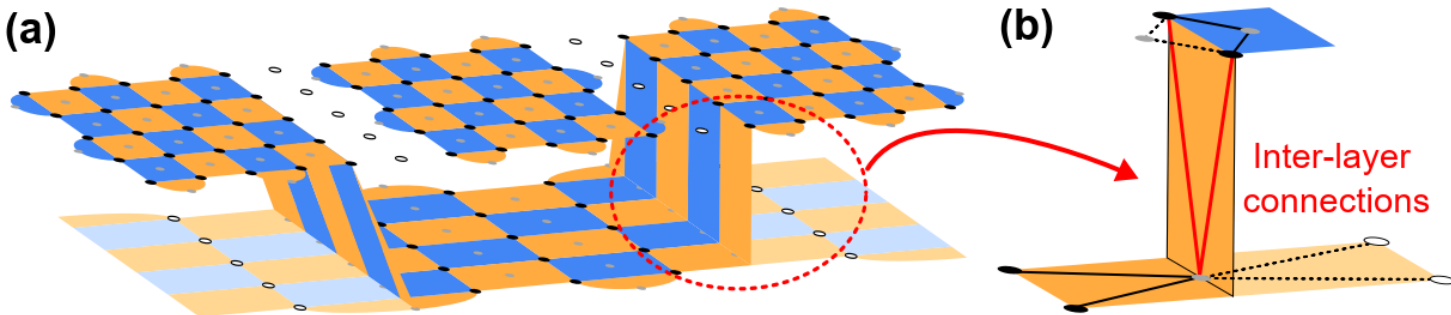
中村先生 (東大)



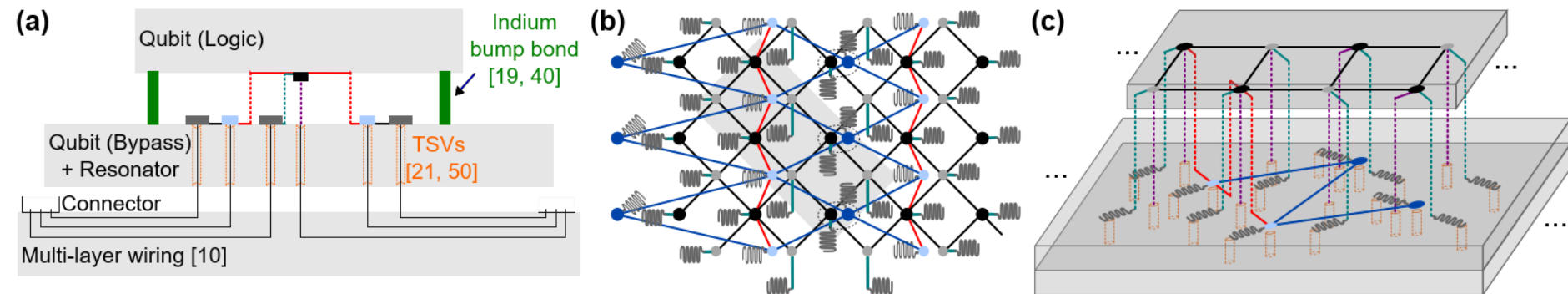
計算機アーキ

上野が担当した箇所

格子手術アーキテクチャ設計



超伝導量子デバイス設計検討



まとめ

- 量子計算機の継続的な発展を示すアーキテクチャ研究は必須
- いろいろな分野の共同研究によりハイインパクトな研究ができる
 - 幅広い分野に触れて楽しい
- 「ミーハーに飛び込んで凶々しく共同研究をお願いする」が量子計算機アーキテクチャ研究を始める近道？

上野の研究年表 (2024年11月～)

研究テーマ構想

いろいろな分野に触りながら
量子計算機アーキテクチャの
研究を続けたい！

FTQC-ARC-1

第1回
FTQCアーキテクチャ研究会
(キックオフ)

2024年11月25日(月) 12:30~17:00
サンポートホール高松

新しい研究ネタ
新しい共同研究体制
etc.

★
2024年11月
FTQC-ARC-1

2025年4月～7月
MICRO
投稿・採択！

2025年8月～11月
HPCA
投稿・採択！