

## 5 量子コンピューティング

# 量子コンピューティング・量子ネットワークの早期実現のためのアーキテクチャー研究

半導体の集積率が18ヶ月ごとに2倍になるというムーアの法則が限界を迎えつつあり、量子の持つ性質を利用する量子コンピューティングへの期待が高まっている。本稿ではその実現に向け、誤り耐性処理を基盤とした幅広いアーキテクチャー研究に取り組むNTTコンピュータ&データサイエンス研究所（以下、CD研）革新的コンピューティングアーキテクチャー研究プロジェクト（以下、C革P）の量子コンピューティングに関する活動を紹介する。

### 誤り耐性処理を基盤技術とし 汎用型量子コンピューターの実現を目指す

量子を用いた計算には大きく2つの方式が知られている。「量子アニーリング」は用途が特定の最適化問題を解くことに限定され、古典最適化技術と比較した優位性が不明確であり、ノイズへの耐性も明らかになっていない。本稿で紹介するのは、大規模化された時に古典コンピュータに対する計算量的優位性が明らかになっており、ノイズ耐性の理論も構築されている、いわゆる「量子ゲート」を用いた汎用型量子コンピューターを目指す研究だ。

量子コンピューティングは「重ね合

わせの原理」や「量子もつれ」といった量子特有の性質を扱うことができる「量子ビット」で計算を行うのだが、量子ビットは外部からの影響を受けやすく計算の誤りが起きやすい。このことが量子コンピューターの実現に向けた大きな課題だ。そのためNTT研究所は、誤りを訂正／抑制しながら量子計算を進める「誤り耐性処理」の研究に取り組んできた。さらに、誤り耐性処理を基盤技術とする量子コンピューティングのアーキテクチャー全般について研究を行っている。

### 実装面も含む幅広いレイヤーを見据えた研究開発

C革Pにおいて量子コンピュー



NTTコンピュータ&データサイエンス研究所  
革新的コンピューティングアーキテクチャー  
研究プロジェクト  
コンピューティングデザイン研究グループ  
特別研究員 徳永 裕己氏

ティングの研究を担う量子コンピューティングチームの特徴について、チームリーダーの徳永特別研究員は次のように述べている。

「アルゴリズムや誤り耐性の理論に加え実装面の理論にも力を入れており、この間をつなぐ幅広いレイヤーを見据えソフトウェアとハードウェアを協調して設計する研究に取り組んでいます。（図1）分散処理も含めた量子ネットワークも研究対象です。量子コンピューティングに関してこのように幅広い意識を持って研究しているチームは珍しいと思います。」

- ・クロスレイヤー協調設計: 技術的なレイヤーを超えてソフトウェアとハードウェアが互いの仕組みを把握したうえで協調可能なシステムを設計すること

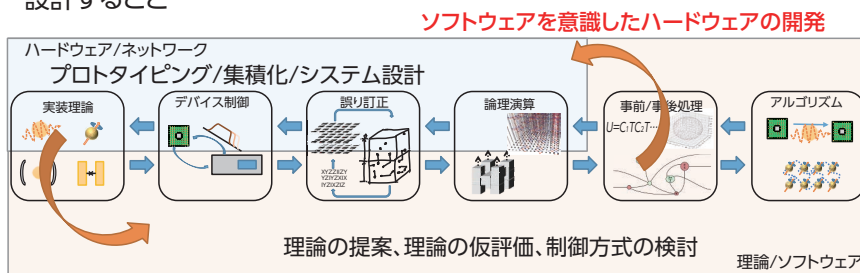


図1 CD研における量子コンピューティング研究開発の取り組み方針

## 国家プロジェクトへの参画

量子コンピューティングの実用化に向けた国家プロジェクトへの参画実績も豊富だ。誤り抑制／誤り訂正、量子・古典ハイブリッドアルゴリズム、超伝導量子コンピューターの研究開発などに関して、文科省Q-LEAPプロジェクトやJST さきがけプロジェクトに参画、量子コンピュータ・量子ネットワークのインターコネクトの技術に関して、JST CRESTプロジェクトに参画など、幅広い領域で貢献している。

「内閣府による『ムーンショット型研究開発事業』において東京大学の小芦教授がプロジェクトマネージャーを務める『誤り耐性量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発』の中核技術を、我々が担当しています。ソフトウェアとハードウェアが互いの仕組みを把握した上で協調可能なシステムを設計することを『クロスレイヤー協調設計』(図1)と呼びます。我々はチーム内および共同研究者に幅広い専門家を有する強みを活かし、クロスレイヤー協調設計に取り組んでいます。」(徳永氏)

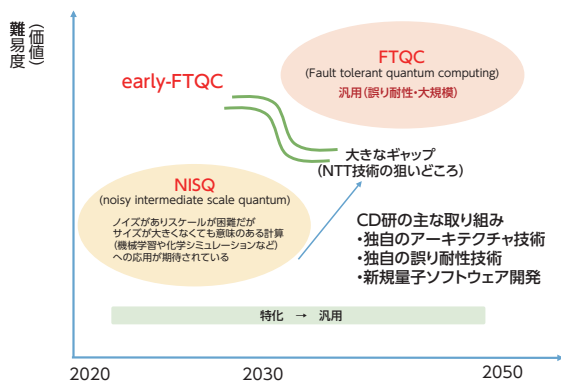


図2 量子コンピューターの進展イメージ

## FTQC と NISQ

誤り耐性のある汎用型量子コンピュータはFTQC (Fault tolerant quantum computing) と呼ばれている。大規模化された時に古典コンピュータに対する計算量的優位性が明らかになっており、ノイズ耐性の理論も構築されているが、克服すべき課題が多く、実現は十年以上先と見込まれている。C革Pでは、この実現を早めるべく、効率化を行うための、コンパイラ技術、制御ソフトウェア技術、集積化技術、実装精度の向上などを目指した様々な理論やアーキテクチャの研究をおこなっている。

一方、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) と呼ばれる小規模な量子コンピュータはすでに実機が存在する。ただし規模が小さいため大量の量子ビットを必要とする誤り訂正を行えない。そのためノイズの影響を受けやすくスケールしないことから、小規模のままでも活用できる方法を探る取り組みが進められている。

NISQでの性能向上に向けた主要なテーマの1つが「誤り抑制」だ。量子情報処理に加え古典情報処理をハイブリッドに用いることにより、

統計的に「誤りがなければこうであったらう」と推測することにより誤りの影響を削減する手法と言える。同様に、小さな量子コンピュータの量子部分を最大限に活かしつつ、古典の最適化技術のサポートも大いに活かして計算を行う量子・古典ハイブリッドアルゴリ

ズムの開発も重要な研究テーマだ。

## NTT 技術の狙いどころは『early-FTQC』

「誤り訂正を前提とし実現に時間を要するFTQCと、小規模で誤り耐性がないNISQの間には大きなギャップがあります(図2)。いずれの分野についても研究していますが、その中間に位置し、ノイズ耐性があり軽量で高速な量子計算がいち早く訪れる『early-FTQC』の実現を目指すのが、我々の技術の狙いどころと考えています。」(徳永氏)

## 近年の主要な研究成果

ここ数年のC革Pによる主な研究成果について、一部を紹介する。

### 小型化につながる量子誤り訂正／抑制のハイブリッド方式

2022年3月18日に発表されたのが、量子誤り訂正／抑制のハイブリッド方式だ。従来、FTQCでは誤り訂正のみ、NISQでは誤り抑制のみの適用が考えられてきたが、C革Pは両手法を組み合わせる独自の手法により、量子コンピューターの規模を最大80%削減可能であることを示した。誤り訂正のみ／誤り抑制のみの方式と比較し、量子演算の個数に対する誤りの数が少なく、高精度な解を得られることも示した(図3)。

このため高い評価を得ており、物理のトップジャーナル“PRX quantum”に採択された。NISQとFTQCの間を埋めていく『early-FTQC』の先駆的研究と言え、世界中の多くの研究機関が後続研究に取り組んでいる。

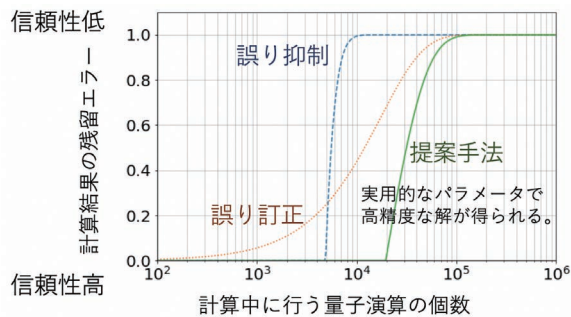


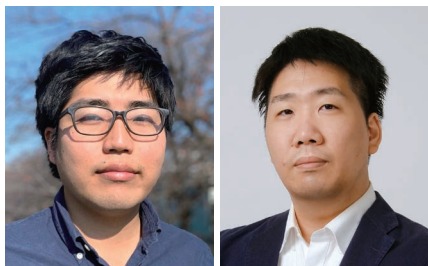
図3 誤り訂正・抑制ハイブリッド方式

### ハードウェアとアルゴリズムのエラーを抑制できる手法

2022年7月12日に発表されたのが、東京大学、産業技術総合研究所、大阪大学との共同研究により開発したエラー抑制手法だ。従来は特定の種類のエラーを抑制する手法が多かった。しかし本手法はハードウェア/アルゴリズムの双方に起因するさまざまなエラーに対応できる。本手法により、従来手法と比較してエラー抑制の効率が向上することも確認されている。本研究に関する論文は、最難関の物理論文誌である“Physical Review Letters”に採択されている。

### 量子コンピューターの極低温制御アーキテクチャー

集積可能性と設計自由度の高さから「超伝導量子ビット」が量子コンピューター素子として有望視されている。しかし極低温で動作する量子ビットと室温で動作する制御装置を接続する配線が膨大になるため、ス



(左) 遠藤 傑 研究員  
(右) 鈴木 泰成 研究員

ケーラビリティが制限される。

そこで東京大学、名古屋大学、理化学研究所と共同で極低温の環境下で動作する制御装置を設計し、配線の大幅削減を可能にした。2021年11月8日に発表されたこの

手法は、超伝導量子ビットを利用しつつ実用的な消費電力と速度で駆動する量子コンピューターを可能にする世界で初めてのものであった。本研究の成果は2021年12月7日に行われた国際会議DAC (Design automation conference) で発表された。

また慶応義塾大学、名古屋大学、理化学研究所と共同で、同じく極低温の環境下において誤り訂正と論理演算まで実行可能な設計を、こちらも世界で初めて提案した。2022年4月1日に発表した本研究の論文は、計算機分野のトップ会議“HPCA”に採択されている。

### バーストエラーに耐性のある量子コンピューター

量子コンピューターはノイズに脆弱であるため、宇宙線などの影響により誤り訂正ができないような大きなエラー「バーストエラー」が生じる。九州大学、東京大学との共同研究により、このような場合でも誤り訂正を行える量子コンピューターの設計を世界で初めて発表した。

「エラー特性の変化を即座に検知し、それをトリガーにエラー訂正手法を切り換えるという手法です。単純に実装すると負荷が高くなりやすいのですが、うまく切り換えを行うことでさほど影響なく動作できるよ

うになっています。」(徳永氏)

2022年9月30日に発表した本研究の論文は、計算機アーキテクチャーのトップ会議IEEE MICROに採択されている。同会議は採択率約20%、日本からの採択が過去10年で5件のみという、非常に価値のある採択例であった。

### 世界最高速の量子計算のシミュレーション技術を開発

量子コンピューターを開発する上ではシミュレーターも欠かせない。2021年7月16日、後述の鈴木氏が開発したシミュレーターに関する論文が“Quantum”誌に採択された。このシミュレーション技術は、典型的なタスクにおいて世界最高速であることが実証されている。

### Innovators Under 35 Japan を2年連続で受賞

C革Pには世界的に高く評価されているメンバーが多い。2021年には遠藤氏、2022年には鈴木氏が、米マサチューセッツ工科大学(MIT)のメディア部門「MITテクノロジーレビュー」が主催する国際アワード“Innovators Under 35”の日本版“Innovators Under 35 Japan”を立て続けに受賞するという快挙を達成した。

Innovators Under 35は35歳未満の才能ある若きイノベーターたちを讃え、その活動を支援することを目的としたものであり、過去にはセルゲイ・フリンやマーク・ザッカーバーグといった錚々たるメンバーが受賞している。

本稿で紹介した近年の研究に関しても遠藤氏、鈴木氏のうちどちらか、または両名が揃って主要な役割を果たしている。