

ムーンショット目標6PM 追加公募におけるPDの方針

PD: 北川 勝浩 (大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授)

1. ムーンショット目標達成に向けた本研究開発プログラムの概要

従来のコンピュータの進歩が限界に達しつつあるといわれるなか、爆発的に増大する様々な情報処理の需要に対応しうる量子コンピュータが注目を集めています。多様かつ複雑で大規模な実問題を量子コンピュータで高速に解くには、量子的な誤りを直しながら正確な計算を実行する誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現が鍵となります。そのため、本研究開発プログラムでは、量子ハードウェア、量子通信ネットワーク、誤り耐性及び関連する研究開発を推進していきます。

2. ポートフォリオとその取組状況

(1) ポートフォリオ

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向け、以下の課題があります。

- (a) 物理的に制約された量子ビット数を増やすとともに、個々の量子ビットや量子ビット間の量子操作に生じる誤り確率を減らす
- (b) 量子通信によって複数の小中規模の量子コンピュータを接続することでより大規模な量子コンピュータとして動作させる
- (c) 量子ビット間の結合のトポロジーや強度に適した量子誤り訂正方式を見つけて、所与の量子ビット数に対して誤り耐性閾値を可能な限り高くする

これらの課題を克服するため、1) 量子ハードウェア、2) 量子通信ネットワーク、3) 誤り耐性、の3つのカテゴリの研究開発プロジェクトを推進するとともに、各研究開発プロジェクト間の有機的な協業によって誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指します。

(2) 現在の取組状況

現時点で、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) コンピュータとして動作しているのは、超伝導、イオントラップ、光量子などですが、膨大な数の量子ビットが必要とされる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するハードウェアは不明です。

そのため、量子ハードウェアカテゴリでは、有望と考えられている、超伝導 (山本剛 PM)、イオントラップ (高橋優樹 PM)、光量子 (古澤明 PM)、半導体 (水野弘之 PM) の4つのプロジェクトを競争的に推進しています。量子通

信ネットワークカテゴリ（小坂英男 PM、山本俊 PM）では、量子ハードウェアとの連携、相互の相補的な協力を促しつつ2つのプロジェクトを競争的に推進しています。誤り耐性カテゴリでは、理論・ソフトウェア（小芦雅斗 PM）として、量子ハードウェアカテゴリ及び量子通信ネットワークカテゴリの研究開発プロジェクトと連携し目標達成の指導原理を確立するべく研究開発を推進しています。

（3）目標達成に向けた現状の課題

ムーンショット目標6で、我が国は2050年までに誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現を目指すことを世界に先駆けて明らかにし、2030年までに量子誤り訂正の有効性を実証することを目指しています。最近、海外の企業が2030年までに1000論理量子ビットの実現を目指す野心的な目標を掲げており、量子誤り訂正によって古典計算機の能力を上回る有用な量子計算を行う量子優位性の達成を目指す国際的な競争が激化しています。さらに、地球温暖化を解決する脱炭素化など、スパコンを超える大規模計算を可能とする誤り耐性型汎用量子コンピュータへの社会的ニーズも高まっています。

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現には、量子誤り訂正が可能で、かつ、量子ビット数をシームレスに拡張できることが重要です。一つの量子ハードウェアで実現可能な量子ビット数には物理的なサイズなどで決まる上限があります。その上限を超えて量子ビット数を拡張することは、複数の量子ハードウェアを量子通信ネットワークで接続して分散型量子コンピュータとして動作させることによって可能と考えられます。しかし、通信のためのオーバーヘッドがあるため、個々の量子ハードウェアの中で出来る限り多くの量子ビットを実現し、量子誤り訂正によってある程度の数の論理量子ビットを実現できることが望まれます。

世界的競争の中で、量子誤り訂正による量子優位性、さらには誤り耐性をいち早く達成するためには、現状では不足している以下の点を強化する必要があります。

1) 量子ハードウェア

上で述べたように、量子ハードウェアには単体で収容できる物理量子ビットの数に上限がありますが、その上限を大きくするとともに、量子誤りを小さくすることによって、できる限り多くの論理量子ビットを実現することが望まれます。このような観点から、物理的なサイズと量子誤りの小さな物理量子ビットを、量子誤り訂正と親和性の高い配置で、物理的な上限サイズまで拡張できる量子ハードウェアが望まれます。世界的な競争状況を考えると、

1000 物理量子ビット、または 100 論理量子ビット程度以上までスケールすることが望まれます。光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) を始めとする関連する国内の主要な研究開発事業での取組状況や基礎研究の成果などを踏まえ、且つ物理的なサイズと量子誤りの小さな物理量子ビットを実現できる可能性を有する、既存の研究開発プロジェクトとは異なる方式やアプローチによる固体系や原子系の研究開発を強化する必要があります。

2) 量子通信ネットワーク

分散型量子コンピュータにおける通信のオーバーヘッドを小さくし、かつ、大規模化するには、量子ハードウェアを接続する量子通信ネットワークの高度化が必要です。多くの量子ハードウェアを相互接続して分散型量子コンピュータとして効率的に動作させるのに必要な量子通信プロトコルなどは、大規模量子通信ネットワーク (量子インターネット) と共通する課題です。量子通信ネットワークで研究開発している量子インターフェース、量子メモリなどを含む量子リピータは、量子インターネットの要素技術であり、これらを活用してテストベッドを構築して、量子通信プロトコルなどを実証的に研究開発することによって、大規模分散型量子コンピュータの実現を加速する必要があります。

3) 誤り耐性

誤り耐性型汎用量子コンピュータには、量子誤り訂正のためのエラーシンドローム解析を高速に行う古典的な情報処理が必要です。本研究開発プログラムでは量子誤り訂正および誤り耐性に関する理論・ソフトウェアの研究開発を既に開始していますが、量子誤り訂正による量子優位性の獲得と誤り耐性獲得の実現に向けては、量子誤り訂正のための大規模で高速な情報処理システム (ハードウェアおよびソフトウェア) 実装の研究開発が必要です。既に量子ハードウェアの一部の研究開発プロジェクトでは小規模な研究開発に着手していますが、世界的競争が激化する中、量子ハードウェアの研究開発と並行して大規模な誤り訂正システムの研究開発を推進する必要があります。

3. 本公募で追加募集する研究開発テーマおよび要件

(1) 誤り耐性獲得に有望な量子ハードウェア (固体系) の研究開発

本研究開発テーマでは、誤り率の小さい高性能な量子ビットを量子誤り訂正に適した配置で2次元的に拡張し、2030年までに誤り訂正を実証するために十分な規模まで拡張可能な固体系量子ハードウェアの研究開発プロジ

ェクトを募集します。具体的には、少なくとも量子ハードウェア単体として1000 物理量子ビット程度まで拡張可能な固体系量子ビットの提案を期待します。

本研究開発プログラムでは、シリコン半導体製造技術やその周辺技術などを駆使し、高集積なシリコン量子コンピュータの実現を目指す研究開発プロジェクトを実施しています。これに対して、例えば、半導体系において数ビット程度の小規模な高品質の量子ビットの集積性を向上させるアプローチにより目標達成を目指す研究開発が考えられますが、半導体に限らず、固体系で誤り耐性に適した拡張可能な量子ハードウェアの研究開発プロジェクトの提案も歓迎します。

半導体系の提案においては、大規模な量子ビット集積化という目標は共通であるため、既存の半導体系の研究開発プロジェクトと競争しつつも共通する課題について連携することを期待します。また、量子誤り訂正・誤り耐性に関して、理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトとの連携、量子ハードウェア間の量子的な接続に関して量子通信ネットワークの研究開発プロジェクトとの連携も期待します。

なお、提案にて設定された検証可能な定量的目標であるマイルストーンや既存の研究開発プロジェクトの連携などについて、採択後も作り込みで調整します。

(2) 誤り耐性獲得に有望な量子ハードウェア（原子系など）の研究開発

本研究開発テーマでは、誤り率の小さい高性能な量子ビットを量子誤り訂正に適した配置で2次元的に拡張し、2030 年までに誤り訂正を実証するために十分な規模まで拡張可能な原子系量子ハードウェアの研究開発プロジェクトを募集します。具体的には、少なくとも量子ハードウェア単体として1000 物理量子ビット程度まで拡張可能な原子系量子ビットの提案を期待します。

例えば、近年、冷却原子系で数百物理量子ビットのアナログ量子シミュレータが実現し、大規模な量子ビット系としても注目されており、量子誤り訂正可能な量子コンピュータとして動作させるような研究開発が考えられますが、原子系に限らず固体以外で誤り耐性に適した拡張可能な量子ハードウェアの研究開発プロジェクトの提案も歓迎します。

原子量子ビットアレーの提案においては、既存の量子通信ネットワークの研究開発プロジェクト（山本俊 PM）において既に原子量子ビットアレーの研究開発に着手していることから、連携することを期待します。また、量子誤り訂正・誤り耐性に関して、理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトと

の連携や、量子ハードウェア間の量子的な接続に関して量子通信ネットワークの研究開発プロジェクトとの連携も期待します。

なお、提案にて設定された検証可能な定量的目標であるマイルストーンや既存の研究開発プロジェクトの連携などについて、採択後も作り込みで調整します。

(3) 大規模量子通信ネットワークの実証的研究開発

本研究開発テーマでは、新設・既設は問わないが量子通信ネットワークのテストベッド環境において、高品質で高密度な量子情報の通信を可能とする大規模量子通信ネットワーク技術やシステム構築に係る実証的研究開発を行う研究開発プロジェクトを募集します。

早期に量子通信ネットワークの実証的研究開発を進めるために、既存の通信ネットワークの研究開発プロジェクトと密接に連携し、これらの研究開発プロジェクトの成果を活用することが望まれます。また、理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトや量子ハードウェアの研究開発プロジェクトとの連携により、大規模分散型量子コンピュータの実現に貢献することを期待します。

なお、提案にて設定された検証可能な定量的目標であるマイルストーンや既存の研究開発プロジェクトの連携などについて、採択後も作り込みで調整します。

(4) 量子誤り訂正用情報処理システムの研究開発

本研究開発テーマでは、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向け、量子誤り訂正のためのエラーシンドローム解析を高速に行う古典的な情報処理システムを開発する研究開発プロジェクトを募集します。量子誤り訂正による量子優位性の獲得と誤り耐性獲得の実現を加速する大規模で高速な情報処理システム（ハードウェアおよびソフトウェア）を実装する提案を求めます。具体的には、2030年までに量子誤り訂正による量子優位性を実現するために、100~1000 論理量子ビットを量子アルゴリズムで利用可能とする量子誤り訂正システムを実装し、さらに、分散型を含む 1000 論理量子ビット以上の誤り耐性型汎用量子コンピュータに拡張可能な誤り訂正システムの提案を歓迎しますが、提案されるシステムの実装規模や構成などはこれに限るものではありません。

理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトとの密接な連携と、量子ハードウェアの研究開発プロジェクトとの密接な連携、量子通信ネットワークの研究開発プロジェクトとの連携により、研究開発プログラム全体として量子

誤り訂正による量子優位性の獲得と誤り耐性の獲得を実現できるよう貢献を期待します。

なお、提案にて設定された検証可能な定量的目標であるマイルストーンや既存の研究開発プロジェクトの連携などについて、採択後も作り込みで調整します。

(参考)

- ・ ムーンショット目標6ウェブサイト
<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>
- ・ ムーンショット目標6キックオフシンポジウム (2021年3月11日開催)
<https://www.jst.go.jp/moonshot/news/20210311.html>

(参考) 2020 年度 PM 公募における PD による補足

PD: 北川 勝浩 (大阪大学・教授)

1. 募集・選考の方針等

(1) 募集・選考の方針

目標として定められた「2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」に向けたシナリオを提案してください。現在の社会と技術から未来を予測する「フォーキャスティングする」考えと、2050 年の社会を起点にして逆算し今何をすべきかを「バックキャスティングする」考えとの両方を考慮して、2050 年までのシナリオと PM 採択時点から 3 年、5 年、10 年目までのシナリオを提案してください。提案されたシナリオ等の内容には、2050 年の目標達成にもつながること、挑戦的かつ革新的であること、ELSI などの社会受容性も考慮して、どのように社会に実装・適応していくのかの実現可能性の根拠も含めてください。

(2) 提案内容

目標として定められた誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するには、膨大な数の量子ビットを集積して、量子誤り訂正符号によって冗長性を持たせるとともに、量子誤りを誤り耐性閾値以下にする必要があると考えられます。

そこで、研究開発構想に示される通り、2030 年までのマイルストーンとして、一定規模の量子コンピュータを開発して量子誤り訂正の有効性を実証することを目標にするとともに、「1) ハードウェア」、「2) 通信ネットワーク」、「3) 理論・ソフトウェア」の 3 つのカテゴリに分けて研究開発プロジェクトを実施することを想定しています。具体的には、ハードウェアについては複数の有望な研究開発プロジェクトを競争的に実施してもらいながらその実現可能性を見極めつつ、通信ネットワーク及び理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトも一体となって、本目標の達成に向けて研究開発を実施してもらいたいと考えています。そこで、以下の 1) ~ 3) のいずれかのカテゴリで研究開発プロジェクトを提案してください。

1) ハードウェア

誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するための有望なハードウェアとして異なる物理系に基づく複数の研究開発プロジェクトを募集します。

2) 通信ネットワーク

必ずしも単体では大規模ではない量子コンピュータのハードウェアを量子的に結合して分散型の大規模量子コンピュータを実現するために必要となる量子通信ネットワークの研究開発プロジェクトを募集します。

3) 理論・ソフトウェア

誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するための理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトを募集します。

PM 採択時点から 3 年、5 年、10 年目の達成を目指すマイルストーンについては、ハードウェア、通信ネットワーク、理論・ソフトウェアのそれぞれの立場で設定して結構です。ただし、2050 年の目標である誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて、それぞれの立場で、他のカテゴリの研究開発プロジェクトに何を求め、自身の研究プロジェクトがどのように貢献するのかというシナリオを検討の上、提案してください。

2. 研究開発の推進に当たっての方針

(1) ポートフォリオ管理

ポートフォリオ管理として複数の研究開発プロジェクトの関係性も考慮した上で、PM 間の協業や競争等を求めることとなります。そのため、PM として採択された後の作り込み期間においては、提案されたシナリオに対して PM 採択時点から 3 年、5 年、10 年目までのシナリオ及び達成を目指すマイルストーンの明確化、合理的な推進計画及び予算計画の見直しなどに関して、PD 等と相談して行うものとします。

特に、各研究開発プロジェクトの作り込み期間中、1.(2)に記載した3つのカテゴリの各研究開発プロジェクトは、相互に協力することで本目標の達成に向けた研究開発を着実に進められるよう研究開発プロジェクトの計画調整を行います。また、研究開発プロジェクトの実施中は各研究開発プロジェクト間で相互に緊密な連携を図りつつ研究開発を実施していただきます。

なお、光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)を始めとする関連する国内の主要な研究開発事業の成果を十分に踏まえつつ相補的な研究開発を進めることで、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて効果的に研究開発を実施していただきます。

(2) 産学連携

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けては、材料、マイクロ波技

術、光技術、半導体集積回路で培われたプロセス技術、設計、実装、周辺回路技術等の様々な技術要素を組み合わせしていくことも必要であると考えます。そこで、これらの技術・ノウハウ・人材を持つ民間企業との密接な協業についても研究開発プロジェクトの開始早期からの計画・活動を求めます。

(3) 人材育成について

目標として定められた「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」を達成するには、今から長期的な視野に立ち人材層を厚くしていくことが必須です。そこで、研究開発の推進とともに、人材育成への積極的な貢献を求めます。