

「量子コンピューターの地平線とこれからの展望」

はじめに

量子コンピューターは、近年、高度 AI やデータ連携基盤を支える重要技術インフラとして、米国や欧州、中国をはじめ、各国で盛んにその開発が行われている。国際的な連携・協力の取り組みも進められており、2050 年頃には量子コンピューターが創出する経済価値が 64~122 兆円になるとも見込まれている。¹

本稿では、量子コンピューターに関する現状の開発状況、今後の展望などを整理するとともに、その社会実装の観点から日本における量子コンピューターの開発に向けた方向性を検討する。

1. 量子コンピューターとは

量子コンピューターは、従来のコンピューターとは根本的に異なる仕組みをもつ、次世代コンピューターの1つである。

現在、一般的に使用されている従来型（古典）のコンピューター（以下、古典コンピューター）の情報処理は、図1に示すように0か1のどちらかの状態をとる「ビット」を基本単位として計算する。一方、量子コンピューターは、0と1の間の全ての状態（以下、重ね合わせ状態）を表現することができる「量子ビット」を基本単位として計算する。このような両者の違いにより、問題へのアプローチとその計算速度には大きな差が生じる。例えば、迷路探索問題を解く場合、古典コンピューターでは、図2中に示される各経路をしらみつぶしに行き止まりに至るまで順に(1→2→…→?)

探索する必要がある、迷路の規模によっては極めて多くの回数試行しなければならないのに対して、量子コンピューターでは迷路の規模に関わらず全ての経路(1, 2, …?, …数万)を同時に1度で探索、最適な経路を見出すことができる。このように量子コンピューターでは、膨大な組み合わせの中から最適な解を短時間で得ることが可能なため、新薬の開発や材料設計、暗号解読、物流最適化等への活用が期待される。さらに言えば、現在の最高性

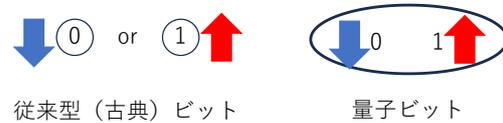


図1 古典ビットと量子ビット

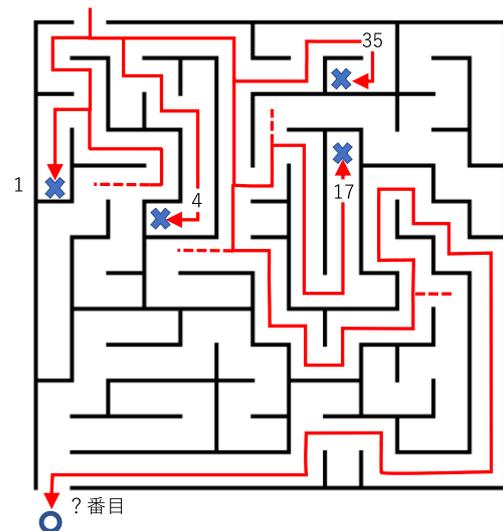


図2 迷路探索の例

¹BCG, “What Happens When “If” Turns to “When” in Quantum Computing?”, <https://www.bcg.com/ja-jp/press/23august2021-quantum-computing-transform-multiple-industries-create-850-billion-annual-value>, 2021.07.21., 2024 年 9 月末 TTS レート (1 ドル=143.35 円) で円換算している。

能のスーパーコンピューターを用いても何千年もかかる計算処理をたった数時間で実行できる可能性を秘めている。

2. 量子コンピューターの開発現状

量子コンピューターの研究開発は、大企業からアカデミアまで、世界中の多くの組織で精力的に行われている（表1）。

量子ビット方式	企業・スタートアップ:黒字、アカデミア:赤字
超電導	IBM, Alphabet, Rigetti, Qolab(米), 富士通, NEC, 理化学研究所, 産業技術総合研究所(日), D-wave, Nord Quantique(加), Oxford Quantum Circuits(英), IQM(芬蘭), 本源量子(中),
半導体	Intel(米), 日立(日), Quantum Motion(英), equal 1(愛蘭), IMEC(白), Leti(仏), Slicon Quantum Computing, Diraq(濠)
イオントラップ	Quantinuum(Honeywell), IonQ(米), 大阪大学, OIST(日), Oxford Ionics, Universal Quantum(英), eleQtron(独), AQTION(澳)
冷却(中性)原子	Atom Computing, QuEra, Infleqtion(米), NanoQT, 分子科学研究所(日), Pasqal(仏), Planqc(独)
光	PsiQuantum(米) NTT, 東京大学(日), ORCA(英), Xanadu(加)

表1 量子コンピューターのプレイヤーマップ

上図の各プレイヤーが開発している量子ビットは、重ね合わせ状態を表現するために、人工的に作り出す（超電導、半導体）か、自然に存在する自然物（イオン、中性原子、光）を使うかのいずれかの手法により実現されている。実際の材料設計等で求められる複雑な計算を処理するためには、いくつかの要件がある。

使用される量子ビットには、(1)重ね合わせ状態を保てる時間（以下、コヒーレンス時間）が十分に長く、(2)計算処理の各ステップの実行に必要な時間（以下、ゲート時間）が十分に短い・速いこと、(3)その処理中の計算ミス（以下、エラー）率が極めて小さい・低いことが求められる。また、量子コンピューターのハード開発では、(1)コヒーレンス時間の極めて長く、(2)ゲート時間の極めて短い、(3)極低エラー率の高性能の量子ビットを数万以上、極めて多く集積した量子信号処理ユニット（Quantum Processing Unit、以下、QPU）を実現することが目指されている。

開発が進む各方式 QPU の利点、欠点及び開発現況を表 2 に示す。

	超電導	半導体	イオントラップ	光	冷却（中性）原子
環境	極低温(mK)	極低温(K)	真空（常温）	常温	真空（常温）
利点	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ゲート時間（短） ✓ 集積化可能 ✓ 量子超越実現 @2019 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ゲート時間（短） ✓ 集積化可能 ✓ 既存半導体技術利用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ コヒーレンス時間（長） ✓ エラー（小） ✓ 全結合(容易) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ゲート時間（短） ✓ 環境ノイズに強い 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ コヒーレンス時間（長） ✓ ゲート時間（短） ✓ 全結合(容易)
欠点	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ 微細化に限界 ⊗ 全結合(困難) ⊗ 環境ノイズに弱い 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ 全結合(困難) ⊗ 環境ノイズに弱い 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ ゲート時間（長） ⊗ 集積化困難 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ 損失によるノイズ ⊗ 量子ビット間相互作用（弱） 	<ul style="list-style-type: none"> ⊗ エラー ⊗ 集積化困難
最大ビット数（開発企業）	>1,000(IBM)	～ 10(Intel)	～30(IonQ)	～20(Xanadu)	～60(QuEra)

公開情報をもとに当行作成

表 2 各方式のメリット・デメリット及び開発現況

各方式の量子ビットの中でも、超電導方式は最初に実現されたため、IBM をはじめ多くのプレイヤーが存在する（表 1、2）。2019 年には、Google の John Martinis²によって、量子コンピューターの開発における大きなマイルストーンである、量子超越性（特定の計算課題をスーパーコンピューターよりも高速に処理できること）の実現が同タイプにて達成された。さらに 2017 年以降、IBM が事業化に向けた長期ロードマップを公表し、実際にロードマップに従って、十分な性能ではないものの各方式の量子ビットの中では最大の 1,000 量子ビットを超える QPU を発表している。各社の精力的な取り組みからも、各方式の量子コンピューターの中では、最も開発が進んでいると言えよう。

しかし、超電導方式であっても、実際に古典コンピューターでは解けない実社会の問題（課題）を解決するという真の量子超越性を示すには至っていない。

これは、いずれの方式でも、今後の趨勢を決定づけるような長いコヒーレンス時間、短いゲート時間、極めて小さなエラー率を同時に備えた量子ビットを、数万を大きく超える規模で集積した高性能 QPU が実現できていないためである。各方式のいずれにおいてもそれぞれ特有の困難はあるが、共通した要因としては、その実現に必要な製造技術、制御方法等が不十分であることが挙げられる。

3. 今後への期待

量子コンピューターの開発には、既述のように極めて高い技術レベルが必要となるため、その実現への道のりはまだ長いと思われるが、近年、実課題の解決に使えるレベルの QPU 実現の可能性を感じさせる成果もいくつか得られている。

² "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor", Nature 574, pp. 505–510 (2019).

これまで述べてきた量子ビットは、超電導回路や光子、中性（冷却）原子からなる物理的に実際に存在するものであり、物理量子ビットと呼称される。物理量子ビットのエラー率を、実用的 QPU で求められるレベルまで削減することは、現時点の物理量子ビットの製造技術では極めて困難である。一方、図3に示すように、これまでの古典コンピューターにおいても、例えばメモリに保存された情報（データ）に発生するエラーへの対策として、保存したいデータにエラーの検知・訂正用に余分なデータを冗長的に追加する手法が用いられているが、それと同様に、量子コンピューターにおいても計算に必要な物理量子ビット以外に、計算中に発生するエラーを特定・訂正するための物理量子ビットを多数、冗長的に付加することで、計算中に発生するエラーを極限まで削減する方法が提案されている。計算を行う物理量子ビットとエラー訂正用の物理量子ビット全体で各計算ステップを行うことになり、それら物理量子ビット全体があたかも1つの量子ビットのように見なすことができるため、その集団全体は論理量子ビットと呼称されている。

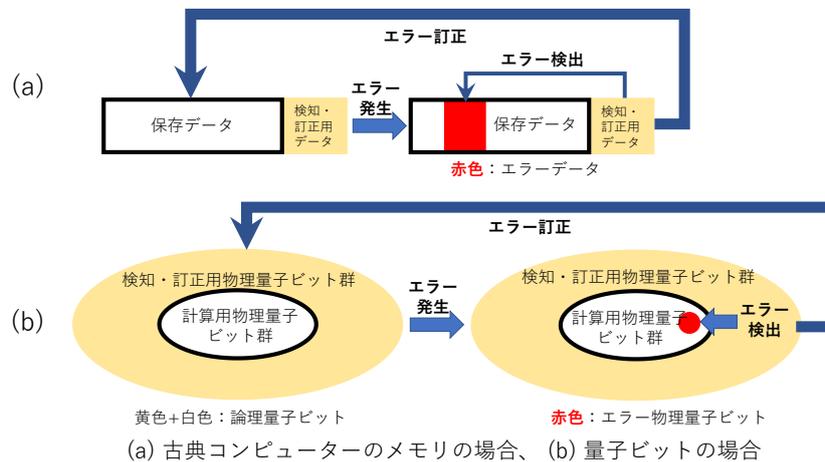


図3 エラー訂正の概念

いくつかの企業で、論理量子ビットの構築及びそれを用いた量子計算の実施に成功しており^{3,4}、実用的な QPU 実現の可能性が感じられるようになってきている（表3）。

	方式	論理量子ビット数	説明
QuEra(米) ⁴	中性(冷却)原子	28	280個の物理量子ビットを用いて実現(2023.12)
マイクロソフト(米) ⁵	イオントラップ	12	Quantinuumの56物理量子ビット(同社H2モデル)を用いて実現(2024.9)

表3 これまでに報告された論理量子ビットの実施例

³ “Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays”, Nature 626, pp.58–65 (2024).

⁴ “Demonstration of quantum computation and error correction with a tesseract code”, arXiv:2409.04628v1.

ただ、これらは大きな進歩ではあるが、表 3 に記載の論理量子ビット数からも分かるようにまだ初期段階である。量子コンピューターでの実施が望まれているような実社会の課題に適用するには、性能を落とすことなくその規模を数桁程度大規模なものとしなければならないため、継続的な技術開発が必要であることに違いはない。このように、海外では着実な技術開発とともに、パイロット的ではあるが既に商用化も行われているが、日本では表 1 のプレーヤーマップを見ても明白なように、量子コンピューターのハード開発を掲げる企業は僅かであり、また現時点で論理量子ビット構築のような実用的な QPU 実現につながる報告もなされてはいないことから、日本単独、国内技術のみで量子コンピューターの社会実装を実現することは極めて困難であると考え。そのため、日本としては世界の開発動向及び国内の開発進捗に基づき自身の強み弱みを見極めたうえで、国外の先端デバイス、周辺機器を柔軟に活用して開発を進めるべきと考える。一方で、グローバルサプライチェーンの中でチョークポイントとなる重要な技術は国産化を進めるなど、日本が当該領域において不可欠な地位を確保することを念頭に進める必要があるだろう。

さらに、その研究開発の実施体制に関して、既述のように日本では量子コンピューターのハード開発を掲げる企業は僅かであり、スタートアップに至っては殆ど見られない。量子コンピューターのような極めてサイエンスオリエンテッドかつその事業（マネタイズ）化までの道のりが長い事業開発において、その技術開発や事業の方針をアジャイルに適応・変化させながら効率的に実施が可能なスタートアップは、重要なプレーヤーである。よって、量子コンピューターの社会実装の実現には、日本国内におけるスタートアップ事業化環境の向上も必要と考える。

具体的に、量子コンピューターの事業化には、非常に高度なエンジニアリング能力と長い開発期間の中の各ステージに合わせた事業開発能力という、技術とビジネス双方に対しての高い素養が求められ、自ずとそれらに必要な能力の醸成にかかるコストも膨大なものとなる。そのため、事業化に際しては、研究機関、事業会社に加え金融など多くの業種（産官学金）の組織が一体となって取り組むことが重要であろう。⁵ その連携においては、国等をはじめとする公的資金供給機関に加え、VC を含む金融機関が、一定の資金供給を実施したうえで、マネタイズという観点で当該事業の開発に関わる人的リソースの探索・提供に取り組むこと、また、研究機関や事業会社については、自身の所有する優れた技術及びその研究インフラ・人材を提供し、スタートアップの研究開発をサポートするだけにとどまらず、研究機関自体がプレーヤーとして事業開発に加わることを可能にすることが必要と考える。

必ずしも産官学金の全組織が参加しているわけではないが、上述のような観点で多くの組織からなるネットワークを形成、量子コンピューターのスタートアップ育成を試みてい

⁵ 「国産初「冷却原子（中性原子）方式」量子コンピューター開発へ産業界の 10 社と事業化に向けた連携を開始」：<https://www.ims.ac.jp/news/2024/02/0227.html>

る組織（団体）を列挙し、本レポートの結びとする。

- ① Chicago Quantum exchange (<https://chicagoquantum.org>)：シカゴ大学を拠点として産業界、学界、政府機関の連携の強化することで、量子コンピューターや量子情報科学分野における研究開発、事業化の促進を目指している。
- ② Munich Quantum Valley(MQV) (<https://www.munich-quantum-valley.de>)：ミュンヘン工科大学（TUM）、フラウンホーファー研究機構等を中心としてミュンヘンにて発足、量子技術に関する研究開発とスタートアップ育成を含むイノベーション促進を目指している。
- ③ 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター（G-QuAT）(<https://unit.aist.go.jp/g-quat/>)：産学のグローバルハブとして産業技術総合研究所に設置され、量子コンピューターを中心とした量子技術の実用化及び産業化を目指している。自身のもつ高度な技術インフラをベースとしたスタートアップインキュベーター機能等を特徴とする。
- ④ QuTech(<https://qutech.nl>)：デルフト工科大学（TU Delft）、オランダ応用科学研究機構(TNO)等を中心に量子技術に関する研究センターとして発足。Intel、Microsoftと長年連携をし、量子技術の幅広い分野において世界をリードする研究を行っている。
- ⑤ Quantum hub for Networked Quantum Information Technologies(NQIT) (<https://nqit.ox.ac.uk/index.html>)：英国国立量子技術プログラムの一環として2014年にオックスフォード大学を中心に、9大学、30企業が参画、設立された量子コンピューティング研究ハブ。大手企業と協力し、ユースケース開発のためのプロジェクト等を実施している。

著者略歴

浮辺 雅宏

現在、日本政策投資銀行 業務企画部イノベーション推進室 参事役

1998年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所、組織再編に伴い産業技術総合研究所所属となる。微細加工を用いた超電導デバイス作製とそれを用いた先端計測機器開発に従事。2020年 同研究所国際室にて、国際連携業務管理に従事。2022年より現職、スタートアップ出資等に従事、現在に至る。博士（工学）。