

2.5.3 量子コンピューティング

（1）研究開発領域の定義

量子コンピューティング（量子計算）とは、状態の重ね合わせ、量子もつれ、量子干渉などを計算資源として、従来の計算機では不可能な情報処理を可能とする新たなコンピューティングパラダイムである。本研究開発領域は、理論的な計算モデルから、ソフトウェア、アーキテクチャー、ハードウェアなど物理学・計算機科学・電子工学の広範囲に及ぶ話題を含む。また、量子コンピューター実現に必要なさまざまな工学、量子コンピューター研究を通して得られる計算機科学への示唆も関連トピックスとして含む。

（2）キーワード

量子コンピューター、量子計算、量子情報科学、量子ビット、量子ゲート、量子回路、量子アルゴリズム、量子加速、量子プログラミング言語、量子コンパイラー、量子SDK、NISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum）、量子優位性、量子誤り訂正符号、量子メモリー、量子センサー、量子通信、量子アニーリング、イジングモデル、量子シミュレーター

（3）研究開発領域の概要

〔本領域の意義〕

半導体微細加工技術によるコンピューターの飛躍的な性能向上が技術的・経済的な限界に近づきつつある一方で、ビッグデータ処理、メディア処理、深層学習、組合せ最適化などの計算ニーズが高まり、コンピューターの性能向上に大きな社会的期待が寄せられている¹⁾。新計算原理、新アルゴリズム、新アーキテクチャー、新デバイスなど新しい計算パラダイムとその計算機システム実現技術への関心が近年急速に高まっており、とりわけ注目を集めているのが「量子コンピューター」である²⁾。

素因数分解や検索などの特定の問題を効率的に計算できる量子アルゴリズムが複数知られているが、いずれも実用サイズの計算を実行するにはハードウェア性能が不足している。量子回路モデルを中心とするハードウェアの開発目標は、量子ビット集積化と高忠実度・高操作性の量子ゲート実装、そして量子誤り訂正符号の実装による大規模化³⁾であるが、開発は長期的テーマである。ソフトウェアやアーキテクチャーの視点もまだ不足している⁴⁾。現在利用可能な小規模のデバイスで有用な計算を行う量子・古典ハイブリッドアルゴリズムは量子化学計算や量子機械学習での有用性の探索が進められている。この理論・アルゴリズムとハードウェアの間の大きなギャップを埋めるには、量子情報科学と電子工学、計算機科学、数理科学などの融合からなる学際的な取り組みが必要である。本領域は、量子コンピューター実現を支える学理基盤・工学基盤としてだけでなく、新しいアルゴリズムの発見など、量子計算・量子情報処理が計算機科学にもたらすフィードバックが大いに期待できる点でも意義がある。

〔研究開発の動向〕

これまでの研究開発の流れ

量子コンピューターの計算モデルとして現在一般的なものは、1993年にYaoにより提案された量子回路モデル⁵⁾である。等価な量子計算モデルには、断熱量子計算、測定型量子計算、トポロジカル量子計算などがある⁶⁾。量子回路モデルよりも物理的に自然な（すなわち、計算機実現に妥当そうな）モデルもあるが、現在のところ量子回路モデルに基づく研究に取り組む研究者・組織が多い。

量子コンピューター研究の第1次ブームのきっかけはShorの素因数分解アルゴリズム（1994年）とGroverの検索アルゴリズム（1996年）という二大アルゴリズムの登場である⁷⁾。デコヒーレンスや量子誤りなどハードウェアの技術課題に明るい見通しはなかったものの、Calderbank、Shor、Steaneらによって具体的な誤り訂正符号⁸⁾も提案され、理論的研究が2000年代初頭にかけての量子コンピューター研究の駆動

力となった。ウェブサイト「Quantum Algorithm Zoo」には、現在までに提案された多数の量子アルゴリズムが整理されている⁹⁾。

大規模量子コンピューターの実現には、複数の物理量子ビットにより冗長性を持たせた論理量子ビットを構成する「量子誤り訂正符号」が鍵となる。中でも、表面符号は許容できるエラーの閾値が約1%と高く注目されている。この符号には、エラーの検出・訂正に最近傍の量子ビット間での2量子ビットゲートまでしか必要としない、2次元正方格子の各辺を伸ばすだけでエラー耐性を決める符号距離を大きくできるなど、ハードウェア実装面での利点もある¹⁰⁾。

近年のトレンド

現在生じている第2次量子コンピューターブームの火付け役は、2014年のカリフォルニア大学サンタバーバラ校（UCSB）のMartinisグループによる、超伝導5量子ビットデバイスでの高忠実度（1量子ビットゲート：99.92%、2量子ビットゲート：99.4%、測定：99%）の実証¹¹⁾ だと言われる。このブームは、理論・実験の両面で「量子コンピューターをいかに創るか」という工学的なフェーズに入ったことが特徴である。Google、IBM、Microsoft、Intel、AlibabaといったIT企業が量子コンピューターへの研究開発投資を拡大し、QC Ware、Rigetti Computing、IonQ、1QBit、Zapata Computingなどスタートアップも次々立ち上がった。

量子ゲートの実現方式にはいくつかあるが、現状では、超伝導量子ビット系とイオントラップ系では100量子ビット程度の動作確認までされており、その他の光、量子ドット、分子などの実装系に比べてスケールアップが進んでいる。このサイズは誤り訂正符号の原理実証が可能である¹²⁾。量子誤り訂正が未実装の場合には、ゲートの物理エラーが計算の論理エラーに直結する。このとき、有効な量子計算が実行できる量子回路の深さ（ステップ数）は限られるため、浅い量子回路と（古典）統計処理・最適化を組み合わせで演算する量子・古典ハイブリッドアルゴリズムが精力的に探索されている。また、ノイズを増加させたときの計算結果からの外挿により計算エラーを取りのぞく「量子誤り抑制」という手法の研究も盛んに行われている¹³⁾。古典コンピューターでは量子コンピューターの振る舞いを効率的にシミュレーションできないことを証明する量子優位性の検証¹⁴⁾ も、小規模量子コンピューターで実行可能なインパクトある研究課題である。

海外・国内政策動向

量子コンピューターを含む一連の量子技術には、各国政府は競うように大規模な研究開発投資を進めている。米国¹⁵⁾、欧州¹⁶⁾、中国¹⁷⁾、英国¹⁸⁾、カナダ¹⁹⁾、ドイツ²⁰⁾ などでは今後も政府研究開発投資の継続が見込まれる。国として早期から量子技術への注力を表明してきたのはオランダである。2013年のQuTechセンター開設に呼応するように、翌年にはオランダ政府は科学技術外交における「National Icon」に位置付け、大規模な政府投資を行うことを発表した。QuTechは量子コンピューターの重要開発拠点であるだけでなく、欧州全体の量子技術研究の象徴的な研究機関と言えよう。欧州のFET Flagshipプログラム「Quantum Technology Flagship」の初回公募では、OpenSuperQとAQTIONの二つの量子コンピューター開発プロジェクトが採択された。米国では2018年12月にNational Quantum Initiative法が成立し、多数の研究支援策が実施された。中でも、DoEは傘下の五つの国立研究所（アルゴンヌ、ブルックヘブン、フェルミ、オークリッジ、ローレンスバークレー）にそれぞれ量子情報科学センターを新設するなど、大規模な研究開発投資を行っている。

わが国では、2017年に文部科学省量子科学技術委員会が「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」²¹⁾ を発表、これを受ける形で、同省は研究開発プログラム「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」を開始、「量子情報処理」「量子計測・センシング」「次世代レーザー」の三つの技術領域で合計20件の研究課題が採択された。2020年7月には新たに「量子AI」「量子生命」のQ-LEAPフラッグシッププロジェクトが採択された。2020年1月には「量子技術イノベーション戦略」が発表された²²⁾。また、内閣府ムー

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
コンピューティングアーキテクチャー

ンショット型研究開発制度では、ムーンショット目標6「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」が2020年度に発足した。量子人材育成については、情報処理推進機構（IPA）「未踏ターゲット事業」において「アニーリングマシン」「ゲート式量子コンピュータ」の2部門でIT人材育成・支援が進められている他、2020年7月にはQ-LEAPに新たに人材育成プログラムが設置された。

また、情報通信研究機構（NICT）では、2020年9月から量子計算や量子通信などの量子ICTを使いこなす高い知識・技術を持つ「量子ネイティブ（Quantum Native）」の育成を目的としたプログラムNICT Quantum Camp（NQC）が設置された。なお、2022年4月からは、大学院生のオリジナルな研究開発を支援する若手チャレンジラボが開始された。

[論文や特許の動向]

本領域においては、論文数はほぼ2倍に増加している。特許は件数、Patent Asset Indexシェアともに指数関数的に増加している。

論文数では米国および欧州が順調に増加しているが、中国はそれを上回る伸びを示している。日本も論文の総数は微増ではあるが、シェアは低下傾向である。

特許についてはファミリー件数シェア、Patent Asset Indexシェアともに中国が著しく伸びており、ファミリー件数シェアでは米国を追い越している。日本は件数シェア、Patent Asset Indexシェアともに低下している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

量子ソフトウェア開発プラットフォーム

ハードウェアの技術進展に伴い、その計算能力を最大限引き出したり、現在のコンピュータと協調動作させたりするためのソフトウェアの重要性が増してきている⁴⁾。量子ソフトウェア開発の基盤となる量子プログラミング言語の設計は、比較的初期から取り組まれたテーマである。QCL、QPL、QMLなどの初期の量子プログラミング言語の他、コンパイラーを伴った量子プログラミング言語 Quipper や Scaffold が開発された。これらの言語では、基本的には量子コンピュータは古典コンピュータからの古典制御を受ける受動的デバイスとして扱われ、プログラムカウンターには重ね合わせや量子力学的な分岐・並列操作は想定されていない²³⁾。初期に開発されたこれらの言語は今ではほとんど使われていないが、プログラミング言語における量子コンピュータの扱い方は現在も変わっていない。

実際の小規模量子コンピュータ実機やそれを模したシミュレーター上で誰もが量子計算を実行できるよう、具体的なプラットフォームも複数登場している²⁴⁾。代表的な量子ソフトウェア開発キット（SDK）として、IBMのqiskit、RigettiのForest、スイス連邦工科大学（ETH）のProject Q、MicrosoftのQDK、GoogleのCirq、デルフト工科大学（TU Delft）のQuantum Inspireなどがある。多くは、プログラミング言語とコンパイラーの他、シミュレーター、ライブラリー、検証ツール、サンプルコード、ドキュメントなどがパッケージとなっている。量子プログラミング言語としてはIBMのOpenQASMの他、RigettiのQuil、MicrosoftのQ#などそれぞれSDKごとに独自に提供される。Pythonのライブラリーとして提供される形も多い。いずれの言語も量子回路レベル（量子アセンブリ言語：QASM）の比較的低い抽象度である。IBMは量子ビット制御用の低級言語のOpenPulseも公開している²⁵⁾。関数型の量子プログラミング言語としては（Haskellをホストとする）Quipper²⁶⁾が有名であるが、上記いずれのプラットフォームでも採用されていない。

コンパイラーによる最適化は、論理的な量子回路を実デバイスで実行可能な形式に変換するだけでなく、処理能力の向上という面でも重要な役割を果たしている。特に、現在の小規模デバイスであるNISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum）デバイスでは量子ビットの寿命や量子ゲートの精度がばらついており、その物理的な配置や接続性を満たすようにプログラム（量子回路）を最適化する必要がある。プログラム上の

量子ビットの物理量子ビットへのマッピングや、2量子ビットゲートの順序変更やSWAPゲートの挿入などにより量子回路を最適化する²⁷⁾。また、空間的なマッピングの他、測定回数やノイズの大きなゲートを別のゲートの組み合わせで近似するなど、時間方向への分解と最適化も重要な課題である。

従来は、この作業はプログラマーの責任であったが、近年はIBMのqiskitのTranspilerに見られるように、コンパイラーに任せられる部分も多くなり改善されつつある。高級言語からOpenQASMをターゲットとしたコンパイラー（Microsoft QDKではドライバーの扱い）も開発されており、OpenQASMは量子回路の表現形式としてデファクト標準になりつつある。現状は多様な可能性が試されている状況であり、今後の整理・洗練に注視する必要がある。

量子コンピューターアーキテクチャーの重要性

量子コンピューターにおけるアーキテクチャーの概念は、ハードウェアの規模拡大とともにその重要性が認識されつつある^{28), 29)}。現状のNISQ量子コンピューターは量子ビット数の増加に伴って計算誤りが指数関数的に増えるため、そのまま大規模化して意味のある計算を実行することは不可能である。誤り訂正がある場合とない場合では抽象化レイヤー構造は大きく異なり、どのように構造化するかはアーキテクチャー研究の重要なテーマである。構成要素の粒度・抽象度、要素間インターフェース、古典・量子の命令フロー、量子・古典部分のインターフェースなど、設計すべきことは多い。大規模な誤り耐性量子コンピューターでは誤り訂正符号の選択がシステムアーキテクチャーを決める。前節で述べた量子アルゴリズムや量子プログラミング言語、量子ソフトウェア開発キット（SDK）がハードウェア制約からある程度自由に開発されているのは、計算機と呼ぶに十分な性能のハードウェアがまだ登場していないからという見方もできるだろう³⁰⁾。

よりハードウェアに近いレイヤーのアーキテクチャー（マイクロアーキテクチャー）の研究も極めて重要な研究開発課題と認識されている。高い操作性（ゲート速度）と高い忠実度を達成し、集積化するような実装技術の開発は依然として困難を極めている。実現系には固体（超伝導、量子ドット、ダイヤモンドNV）、非固体（光、イオン、原子）がある。ゲート速度で優れる超伝導回路と、ゲート忠実度に優れるイオントラップの二つの系が有望視されている他、固体系のシリコン量子ドットも注目されている³¹⁾。超伝導量子コンピューターでは、量子ビットのコヒーレンス時間向上や高密度・低ノイズの配線・パッケージング技術³²⁾の他、チップ間の接続技術、冷凍機技術、クライオエレクトロニクスなど集積化に向けた周辺技術の課題は少なくない。低温動作のマイクロ波源³³⁾、光ファイバーの導入³⁴⁾、大型の希釈冷凍機³⁵⁾などさまざまなアイデアが世界中で試されている。量子センサーや量子通信との接続性を考えると、ダイヤモンドNVセンターや光量子ビットも開発余地が十分にあると思われる。高周波回路、配線、パッケージング、低温技術など、電子工学の知見も広く生かされる。

NISQ時代の量子計算

誤り耐性量子コンピューターの登場にはまだ時間がかかるため、現実的に手に入る誤り耐性無しの量子コンピューター上で、論理誤りを許しながら、何らかの有用性のある計算を実行することは重要な研究開発テーマである。近年、NISQデバイスでの実行を考慮して、Variational Quantum Eigensolver (VQE)³⁶⁾や、Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)³⁷⁾、Quantum Circuit Learning (QCL)³⁸⁾などの量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの提案が相次いでいる。これらのアルゴリズムが対象とする問題設定はそれぞれ、量子化学計算、組合せ最適化、機械学習、である。いずれもパラメーター付きの量子回路の実行を量子コンピューターが担い、そのパラメーターを古典的非線形最適化アルゴリズムで最適化する仕掛けである。量子回路部分は1回の計算に多くのステップを必要としない（浅い量子回路）という特徴がある。また、量子計算と言っても従来考えられてきたような量子アルゴリズムだけでなく、統計分布からのサンプリングのような処理も含まれている。

量子優位性・量子コンピューターのシミュレーション

量子優位性(Quantum AdvantageやQuantum computational supremacyと呼ばれる)の検証は、「量子コンピューターの振る舞いが古典コンピューターでは(多項式時間では)シミュレーションできない」ことを証明しようという理論・実験研究である。用いられるアルゴリズムの実用的な意味合いはないものの、量子コンピューターの研究の重要テーマである。ランダム量子回路、ボソンサンプリング、IQP、DQC1などさまざまなモデルが提案されており、Shorの素因数分解アルゴリズムと比べて単純な量子回路で実現可能である³⁹⁾。Googleのグループは53量子ビットの超伝導量子コンピューターを用い実験検証を試み、スーパーコンピューターでは1万年かかると見積られる計算タスク(ランダム量子回路が出力する確率分布からある精度でサンプリングする)が量子コンピューター実機であれば200秒程度で実行できることを示した⁴⁰⁾。後に別の古典アルゴリズムによりこの問題は、2次記憶を用いる方法で約2.5日、テンソルネットワークを用いるアルゴリズムによって20日以下、などと計算時間を改善できることも示された^{41), 42)}。2021年には、中国のチームがスーパーコンピューター「神威(Sunway)」を用いて100量子ビット、深さ(1+40+1)のランダム量子回路のシミュレーションを304秒で実行し、ゴードンベル賞が贈られるなど話題を呼んだ⁴³⁾。高速の量子回路シミュレーターは量子ソフトウェア開発に重要であり、大阪大学で開発されたQulacks⁴⁴⁾、中国科学院のYao⁴⁵⁾、NVIDIAのcuQuantum⁴⁶⁾などさまざまなシミュレーターが開発・提供されている。

量子コンピューターが古典コンピューターを凌駕する領域を理論的・実験的に正確に把握することは、量子コンピューティング分野の発展にとって重要なだけでなく、従来の計算量理論への新たな視点のフィードバックも期待できる。古典コンピューターによる計算時間を量子コンピューターによる計算時間が下回る点は「量子古典クロスオーバー」と呼ばれ、計算時間の見積もりやハードウェアの性能要求などが検討されている。問題設定は素因数分解や量子化学計算などの複雑な問題の他、2次元スピン系のシミュレーションなど物性物理学における問題設定で詳細な検討が進められている⁴⁷⁾。他にも量子コンピューターの計算能力のベンチマーキングや、さまざまなレベルにおける検証にも有益な知見を提供し得る。加えて、量子計算を古典計算で検証できるかという問題は、計算量理論における未解決問題のひとつであり、その証明は大きなインパクトを生む。実用的な検証プロトコル実現の意味でも重要な問題である。

標準化・ベンチマーキング

IEEE Standard Association (IEEE-SA) が量子コンピューティングにかかる用語の標準化プロジェクトを推進している⁴⁸⁾。IEEE P7130「Standard for Quantum Computing Definitions」は、トンネル効果、量子干渉、重ね合わせ、エンタングルメントなどの用語定義に加え、技術の進展に合わせた追加定義も想定されている。IEEE P7131「Standard for Quantum Computing Performance Metrics & Performance Benchmarking」はメトリクスやベンチマーキングに関する標準化である。

IBM社の研究グループは量子コンピューターがアクセスできる状態空間の実行的な大きさを測定する量子ボリュームと呼ばれる指標を導入した⁴⁹⁾。量子ボリュームが $64=2^6$ とは、幅(量子ビット数)と深さ(ステップ数)が両方とも6であるようなランダム量子回路を確実に実行できるということを意味する。ただし、実際に実行することになる量子プログラムは必ずしも幅と深さが等しいようなものばかりではないため、量子ボリュームだけでなくプログラム実行成功確率の分布の情報など、さまざまな指標がユーザーに提供されるのが望ましいと考えられる^{50), 51)}。IonQ社のイオントラップ型量子コンピューターやIBM社の超伝導量子コンピューターなどNISQ量子コンピューターの実機上でさまざまな量子アルゴリズムを実行した場合の性能評価も報告されている⁵²⁾。多様な量子コンピューターの技術進展を定量的に評価・追跡することは今後の量子コンピューター研究開発を加速するための基盤として重要である。

量子アニーラー・量子シミュレーター

量子回路モデルに基づく量子コンピューターとは異なる計算原理で動作するコンピューターとして量子ア

ニラーと量子シミュレーターが挙げられる⁵³⁾。最も大規模である D-wave Systems 社のマシンは最適化問題を横磁場イジングモデルの最低エネルギー状態探索問題として解く。量子アニーリングは組合せ最適化問題に対するメタヒューリスティックス解法であり、理想的な条件下では「量子計算」のひとつである量子断熱計算を含む広い概念と理解される⁵⁴⁾。この計算原理で動作するコンピューターは自然現象を利用して最適化問題の近似解を与えるアナログ量子コンピューターと捉えるべきだろう。比較的大規模の量子シミュレーター⁵⁵⁾ や、non-stoquastic (注: sto“qu”asticは量的に見えて実は古典の確率的 (stochastic) モデルで表現可能、という意味の造語) な効果による指数加速の達成⁵⁶⁾ など、今後の発展も注目される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

- ・ QuTech (オランダ)⁵⁷⁾: 「誤り耐性量子計算」「量子インターネットとネットワークコンピューティング」「トポロジカル量子計算」の三つを研究目標に掲げる欧州の量子技術研究の中心拠点。Intel や Microsoft などと共同研究を実施。
- ・ Networked Quantum Information Technologies (NQIT) Hub (英国)⁵⁸⁾: 「UK National Quantum Technologies Programme (UKNQTP)」の4カ所のハブ拠点のうち最大の拠点。Oxford 大学を拠点とし、量子コンピューターと量子シミュレーター (Quantum demonstrator) の開発が目標。
- ・ 中国科学院量子情報・量子科学技術イノベーション研究院 (中国)⁵⁹⁾: 中国科学院 (CAS) と安徽省によって設立された量子情報の中核的な研究拠点。「量子通信研究部」「量子コンピューティング研究部」「量子精密計測研究部」「エンジニアリングサポート部」の四つの研究ユニットが設置され、中国科学技術大学をはじめとする中国全土の大学や研究機関、関連企業と共同研究を実施。
- ・ EPIQC (米国)⁶⁰⁾: NSF 支援による量子情報とコンピューターサイエンスの混成チームで、実用的な量子コンピューター開発を狙うプロジェクト。シミュレーター、デバッガー、コンパイラー開発の他、IEEE や ACM 系の国際学会でのチュートリアル実施など、アウトリーチにも積極的。
- ・ IEEE Rebooting Computing Initiative (米国)²⁾: IEEE 内のワーキンググループ。主催する国際会議 ICRC では量子コンピューター関係の発表も多い。「IEEE Quantum Computing Summit」の開催や、「量子コンピューティングのメトリクスとベンチマークのための IEEE フレームワーク」の公開など、活動は活発である。
- ・ ムーンショット目標6「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」(日本)⁶¹⁾: 量子誤り訂正の有効性実証を目標とした量子コンピューター開発プロジェクト。ハードウェア、通信ネットワーク、理論・ソフトウェアというさまざまな面から研究開発を推進している。

(5) 科学技術的課題

エラー耐性量子コンピューターと現状のNISQ量子コンピューターとの間には量子ビット数で5～6桁にわたる計算機システムとしての大きなギャップが存在している。ソフトウェアとアーキテクチャーの研究開発の充実により、量子アルゴリズムから量子ハードウェアに至る量子コンピューター開発全体を強化する必要がある。とりわけ、計算機システムとして実現するような、大規模化を前提とした俯瞰的な設計・開発が求められる⁶²⁾。

理論・ソフトウェアではオーバーヘッドの軽い誤り訂正符号、浅い量子回路で有用な計算を行える新アルゴリズム、ハードウェアでは量子ゲートのエラー制御技術の高精度化、実装容易な集積化法の探索、量子制御部分まで含めたチップレイアウト設計など、さまざまなアプローチでギャップを埋めてゆく必要がある。量子回路を最適化することで誤り訂正符号のオーバーヘッドをソフトウェア的あるいはアーキテクチャー的に緩和できることもあろう。また、トポロジカル量子誤り訂正符号を採用する場合に、計算リソースの大半を占める Tファクトリー (論理 Tゲートをサポートするために必要な「魔法状態」と呼ばれるアンシラ状態の生成) などを、実行ユニットやファブリックなどとして取り出すような、アーキテクチャー指向の取り組みも必要であ

る⁶³⁾。

研究開発が進行している超伝導回路では、デコヒーレンスの理解とそれに基づく改善、制御用エレクトロニクスの開発（低温CMOS、超伝導回路）、量子誤り訂正符号と量子ビットレイアウト・配線のコ・デザイン、そして、量子ビットの集積化が必要である⁶⁴⁾。また、マイクロ波帯で動作する超伝導回路と光量子通信（近赤外～可視域）との間を量子情報のまま接続する量子インターフェース技術が長期的には必要である。

ソフトウェア工学の発展も待たれる。とりわけ、量子ハードウェア制御に関するソフトウェア（ファームウェア、ミドルウェア）として、誤り訂正処理を行うプログラム、NISQ量子コンピューターでの誤り抑制方法、動作検証の理論と具体的なソフトウェアツールは喫緊の課題である。同様に、量子プログラムのコンパイラー、リソース推定・最適化ツール、最適化後の量子回路の検証ツールなども、（古典コンピューター上の）ソフトウェアとして重要である。ハードウェアとしての量子回路を検証するような理論の構築と、具体的なツールの開発も不可欠である。

さらに新しい量子アルゴリズム開発とその実問題への適用、優位性の理論保証なども重要な研究課題である。変分量子アルゴリズム⁶⁵⁾や量子機械学習^{66), 67)}などがどういう仮定の下でどのような優位性があるのかを調べる試みはNISQ量子コンピューターの応用探索の観点からも重要である。量子多体系の問題に（古典の）機械学習を適用する試み⁶⁸⁾とも合流し、量子コンピューターに優位性のあるタスクや高効率の計算方法などはまさに研究萌芽期と言えよう⁶⁹⁾。ニューラルネットワークを用いた機械学習のフレームワーク上で量子回路（量子ニューラルネットワーク）を扱うソフトウェアツールも登場しているが、ベクトルや行列などの形式の古典データを量子ビットに効率よく入力する方法や、量子コンピューター実機とクラウド上の計算資源（従来のCPU、GPU）との連携などにはまだ課題が残る⁷⁰⁾。

（6）その他の課題

量子コンピューターの研究開発にはハードウェアからソフトウェアに至るまでの必要なすべての技術をフルスタックで用意することが重要となるが、それらに関わる機器や人材を物理的に1カ所に集合させることは現実的ではない。従って、多様な研究開発拠点や研究チームからなる研究開発ネットワークの構築と、その効果的・効率的な連携・協調動作のためのハブ拠点が複数必要だろう。

例えば、量子コンピューターサイエンス研究開発拠点、計算プラットフォーム運営・提供拠点、教育・訓練拠点、海外の有力研究者と日本国内の研究者を取り次ぐ国際連携拠点などさまざまな種類が考えられる。それぞれの機能に合わせて大学や公的研究機関に設置し、その上で、量子情報処理の教育・訓練プログラムの開発・提供、正確で積極的なアウトリーチ・科学広報活動、スピンアウトする量子スタートアップ企業の積極的支援など、多様な施策により、持続性あるネットワーク構築が求められる。

これらの研究開発プロジェクトや研究開発ネットワークの成功は、量子コンピューターコミュニティのプレイヤーの充実と、エコシステムの醸成にかかっている。計算機科学・物理・数学・電子工学にまたがった研究者・技術者のコミュニティは萌芽期であり、多分野連携、産学連携、技術レイヤー連携を可能とする研究開発・人材育成の拠点形成を念頭にした政府投資により、コミュニティ形成・エコシステム形成を強力に促進することが不可欠である。

経済安全保障としては、超伝導量子コンピューターについては、産総研調査で部材・素材のサプライヤーレベルで見ると日本企業は30%程度、同志国100%と判明している。今後も同志国との関係を密にして、研究開発を推進するべきである。

2.5

俯瞰区分と研究開発領域 コンピューティングアーキテクチャー

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・JST戦略事業（CREST、さきがけ）や共創の場形成支援プログラム、大型プロジェクト（Q-LEAP、SIP、ムーンショット）が開始された。 ・「量子技術イノベーション戦略」「量子未来社会ビジョン」が策定され、国の研究開発投資は増加傾向であるが、研究成果や技術水準としての大きな変化はまだ顕在化していない。 ・日本の論文数は微増であるが、シェアは低下傾向である。
	応用研究・開発	○	↗	・産業化に向けた応用研究、製品開発には至る研究成果は顕著でなく量子デバイス技術・量子光学技術の蓄積はあるが、計算機システムに至らない。 ・量子化学計算や金融計算など企業における実問題での量子アルゴリズムのPoCが精力的に進められている。 ・特許については件数シェア、PatentAssetIndexシェアともに低下しつつある。
米国	基礎研究	◎	↗	・超伝導量子ビットではUCSB、MIT、Yale 大学、UCバークレー、イオントラップではMaryland大学、Duke 大学、Harverd大学などがそれぞれ中心的存在である。量子情報科学ではCaltech、MITが中心である。 ・国家量子イニシアチブ法により、NSFのグラントや、DoE傘下の研究センター新設が行われている。 ・IEEE Rebooting Computing Initiativeなどコンピューターサイエンス側も活発な活動が進む。
	応用研究・開発	◎	↗	・Google、IBM、Intel、Microsoft、Amazon Web Servicesが研究開発を進める。大学やスタートアップで開発されたハードウェアのクラウド公開やソフトウェアの共同研究などエコシステムが形成されつつある。 ・応用研究や開発だけでなく、理論計算機科学や量子誤り訂正符号などの基礎研究も一部の企業で行われている。 ・多様なスタートアップが登場し、大手IT企業との間で協業エコシステムが形成されつつある。
欧州	基礎研究	◎	→	・多数の大学での量子情報科学の基礎研究の取り組みがある。EU Quantum Technology Flagship プログラムが始まり、量子技術に関する多数の国際連携チームが採択された（量子コンピューターについては、超伝導形式とイオントラップ形式のチームが採択された）。 ・オランダのTU DelftにあるQuTechでは量子コンピューターアーキテクチャーや量子インターネットなどの研究開発が精力的に進められている。
	応用研究・開発	△	↗	・企業による量子コンピューター研究開発・利用で目立った成果は少ない。 ・オランダ、ドイツ、フランス、英国などでは国家戦略の中に量子技術を利用した新産業・新サービスの創出が掲げられている。
中国	基礎研究	◎	↗	・「国民経済・社会発展第13次五カ年計画」で量子コンピューターが重大科学技術項目に明記され、中国科学院（CAS）による拠点形成が進む。 ・超伝導量子コンピューターによるランダム量子回路と光量子コンピューターによるボソンサンプリングの両方で量子超越の実験を成功させており、ハードウェア技術の進展が見られる。 ・スーパーコンピューターを用いた量子回路のシミュレーションでは2021年のゴードンベル賞を受賞した。
	応用研究・開発	△	↗	・CAS-Alibaba 量子計算実験室が設立され、量子コンピューターのクラウド提供を行っている。 ・量子暗号鍵配送の応用ほどには量子コンピューターの産業利用は進んでいない。 ・特許については、ファミリー件数シェア、PatentAssetIndexシェアともに著しく伸びており、ファミリー件数シェアでは米国を追い越している。
韓国	基礎研究	-	-	(顕著な動きは見られない)
	応用研究・開発	-	-	(顕著な動きは見られない)

カナダ	基礎研究	○	↗	・「Seizing Canada's Moment」でICT優先テーマに量子コンピューティングが明記され、Waterloo 大学の Institute for Quantum Computing (IQC) に大規模な研究費支援がなされた。量子情報の基礎研究では同地区にあるペリメーター研究所も顕著な成果を上げている。
	応用研究・開発	○	↗	・ウォータールー地区は BlackBerry 創業者の Lazaridis による寄付で研究所が集積、「Quantum Valley」となりつつある。 ・西側のブリティッシュコロンビア州でも D-wave Systems、1QBit など量子アニーラー関係のスタートアップが活躍している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

1) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル：革新的コンピューティング～計算ドメイン志向による基盤技術の創出～」 <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2017-SP-02.html>, (2023年2月5日アクセス) .

2) IEEE Rebooting Computing Task Force, “IEEE Rebooting Computing,” <https://rebootingcomputing.ieee.org/>, (2023年2月5日アクセス) .

3) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Quantum Computing Progress and Prospects, eds. Emily Grumbling and Mark Horowitz (Washington, DC: The National Academies Press, 2018)., <https://doi.org/10.17226/25196>.

4) Frederic T. Chong, Diana Franklin and Margaret Martonosi, “Programming languages and compiler design for realistic quantum hardware,” Nature 549, no. 7671 (2017) : 180-187., <https://doi.org/10.1038/nature23459>.

5) A. Chi-Chih Yao, “Quantum circuit complexity,” in SFCS '93: Proceedings of the 34th Annual Foundations of Computer Science (IEEE, 1993), 352-361., <https://doi.org/10.1109/SFCS.1993.366852>.

6) 小柴健史, 藤井啓祐, 森前智行『観測に基づく量子計算』(東京: コロナ社, 2017).

7) Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge: Cambridge University Press, 2000).

8) Keisuke Fujii, Quantum Computation with Topological Codes: From Qubit to Topological Fault-Tolerance, SpringerBriefs in Mathematical Physics 8 (Springer, 2015)., <https://doi.org/10.1007/978-981-287-996-7>.

9) Stephen Jordan, “Quantum Algorithm Zoo,” <https://math.nist.gov/quantum/zoo/>, (2023年2月5日アクセス) .

10) 田淵豊, 杉山太香典, 中村泰信「超伝導技術を用いた量子コンピュータの開発動向と展望」『電子情報通信学会誌』101 巻 4 号 (2018) : 400-405.

11) R. Barends, et al., “Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance,” Nature 508, no. 7497 (2014) : 500-503., <https://doi.org/10.1038/nature13171>.

- 12) Google Quantum AI, “Exponential suppression of bit or phase errors with cyclic error correction,” Nature 595, no. 7867 (2021) : 383-387., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03588-y>.
- 13) Suguru Endo, et al., “Hybrid Quantum-Classical Algorithms and Quantum Error Mitigation,” Journal of the Physical Society of Japan 90, no. 3 (2021) : 032001., <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.032001>.
- 14) Aram W. Harrow and Ashley Montanaro, “Quantum computational supremacy,” Nature 549, no. 7671 (2017) : 203-209., <https://doi.org/10.1038/nature23458>.
- 15) National Science and Technology Council (NSTC), “National Strategic Overview for Quantum Information Science (September 2018),” quantum.gov, https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf, (2023年2月5日アクセス) .
- 16) European Commission, “Quantum Manifesto: A New Era of Technology (May 2016),” http://qurope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf, (2023年2月5日アクセス) .
- 17) JST CRDS, 「中国: 中国・第13期全人代第4回会議 第14次五カ年計画における科学技術イノベーション政策動向概要」, <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/FU/CN20210325.pdf> (2023年2月8日アクセス) .
- 18) Quantum Technologies Strategic Advisory Board, “National strategy for quantum technologies: A New Era for the UK, March 2015,” <https://www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/12/IUK-071221-NationalQuantumTechnologyStrategy.pdf>, (2023年2月5日アクセス) .
- 19) Government of Canada, “Seizing Canada's moment: Moving Forward in Science, Technology and Innovation 2014,” <https://publications.gc.ca/site/eng/477317/publication.html>, (2023年2月5日アクセス) .
- 20) Bundesregierung, “Forschung und Innovation für die Menschen: Die Hightech-Strategie 2025,” https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/1/31431_Forschung_und_Innovation_fuer_die_Menschen.pdf?__blob=publicationFile&v=6, (2023年2月5日アクセス) .
- 21) 文部科学省 科学技術・学術審議会 量子科学技術委員会「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策：我が国競争力の根源となりうる「量子」のポテンシャルを解き放つために 報告書（平成29年8月16日発表）」文部科学省,
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2017/09/12/1394887_1.pdf, (2023年2月5日アクセス) .
- 22) 統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略(最終報告)(令和2年1月21日)」内閣府,
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf>, (2023年2月5日アクセス) .
- 23) Mingsheng Ying 『量子プログラミングの基礎』 川辺治之 訳 (東京: 共立出版, 2017).
- 24) Ryan LaRose, “Overview and Comparison of Gate Level Quantum Software Platforms,” Quantum 3 (2019) : 130., <https://doi.org/10.22331/q-2019-03-25-130>.
- 25) David C. McKay, et al., “Qiskit Backend Specifications for OpenQASM and OpenPulse Experiments,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.03452>, (2023年2月6日アクセス) .
- 26) Benoît Valiron, et al., “Programming the quantum future,” Communications of the ACM 58, no. 8 (2015) : 52-61., <https://doi.org/10.1145/2699415>.

- 27) Beatrice Nash, Vlad Gheorghiu and Michele Mosca, “Quantum circuit optimizations for NISQ architectures,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.01972>, (2023年2月6日アクセス) .
- 28) N. Cody Jones, et al., “Layered Architecture for Quantum Computing,” Physical Review X 2, no. 3 (2012) : 031007., <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.2.031007>.
- 29) Rodney Van Meter and Dominic Horsman, “A blueprint for building a quantum computer,” Communications of the ACM 56, no. 10 (2013) : 84-93., <https://doi.org/10.1145/2494568>.
- 30) 蓮尾一郎, 星野直彦 「量子コンピュータ : 5. 量子プログラミング言語」『情報処理』55 巻 7 号 (2014) : 710-715.
- 31) 阿部英介, 伊藤公平 「固体量子情報デバイスの現状と将来展望 : 万能ディジタル量子コンピュータの実現に向けて」『応用物理』86 巻 6 号 (2017) : 453-466., https://doi.org/10.11470/oubutsu.86.6_453.
- 32) 中村泰信 「超伝導量子ビット研究の進展と応用」『応用物理』90 巻 4 号 (2021) : 209-220., https://doi.org/10.11470/oubutsu.90.4_209.
- 33) Adam J. Sirois, et al., “Josephson Microwave Sources Applied to Quantum Information Systems,” IEEE Transactions on Quantum Engineering 1 (2020) : 6002807., <https://doi.org/10.1109/TQE.2020.3045682>.
- 34) Florent Lecocq, et al., “Control and readout of a superconducting qubit using a photonic link,” Nature 591, no. 7851 (2021) : 575-579., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03268-x>.
- 35) Sebastian Krinner, et al., “Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems,” EPJ Quantum Technology 6 (2019) : 2., <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0>.
- 36) Abhinav Kandala, et al., “Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets,” Nature 549, no. 7671 (2017) : 242-246., <https://doi.org/10.1038/nature23879>.
- 37) J. S. Otterbach, et al., “Unsupervised Machine Learning on a Hybrid Quantum Computer,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.05771>, (2023年2月6日アクセス) .
- 38) K. Mitarai, et al., “Quantum circuit learning,” Physical Review A 98, no. 3 (2018) : 032309., <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.032309>.
- 39) 森前智行 『量子計算理論 : 量子コンピュータの原理』(東京 : 森北出版, 2017).
- 40) Frank Arute, et al., “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” Nature 574, no. 7779 (2019) : 505-510., <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.
- 41) Edwin Pednault, et al., “Quantum Computing: On Quantum Supremacy,” IBM Research Blog, https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/?mhsrc=ibmsearch_a&mhq=quantum%20supremacy, (2023年2月6日アクセス) .
- 42) Cupjin Huang, et al., “Classical Simulation of Quantum Supremacy Circuits,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06787>, (2023年2月6日アクセス) .
- 43) Yong Liu, et al., “Closing the “quantum supremacy” gap: achieving real-time simulation of a random quantum circuit using a new Sunway supercomputer,” in SC '21: Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (New York: Association for Computing Machinery, 2021), 1-12., <https://doi.org/10.1145/3458817.3487399>.
- 44) Yasunari Suzuki, et al., “Qulacs: a fast and versatile quantum circuit simulator for research purpose,” Quantum 5 (2021) : 559., <https://doi.org/10.22331/q-2021-10-06-559>.

- 45) The Yao Framework, <https://yaoquantum.org/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 46) NVIDIA Developer, “cuQuantum,” <https://developer.nvidia.com/cuquantum-sdk>, (2023年2月6日アクセス) .
- 47) Nobuyuki Yoshioka, et al., “Hunting for quantum-classical crossover in condensed matter problems,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.14109>, (2023年2月6日アクセス) .
- 48) IEEE Standards Association, “P7130: Standard for Quantum Technologies Definitions,” <https://standards.ieee.org/project/7130.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 49) Andrew W. Cross, et al., “Validating quantum computers using randomized model circuits,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1811.12926>, (2023年2月6日アクセス) .
- 50) Robin Blume-Kohout and Kevin C. Young, “A volumetric framework for quantum computer benchmarks,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05546>, (2023年2月6日アクセス) .
- 51) Jens Eisert, et al., “Quantum certification and benchmarking,” Nature Reviews Physics 2 (2020) : 382-390., <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0186-4>.
- 52) Thomas Lubinski, et al., “Application-Oriented Performance Benchmarks for Quantum Computing,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03137>, (2023年2月6日アクセス) .
- 53) IEEE Rebooting Computing, “An IEEE Framework for Metrics and Benchmarks of Quantum Computing,” <https://quantum.ieee.org/images/files/pdf/ieee-framework-for-metrics-and-benchmarks-of-quantum-computing.pdf>, (2023年2月6日アクセス) .
- 54) Troels F. Rønnow, et al., “Defining and detecting quantum speedup,” Science 345, no. 6195 (2014) : 420-424., <https://doi.org/10.1126/science.1252319>.
- 55) Richard Harris, et al., “Phase transitions in a programmable quantum spin glass simulator,” Science 361, no. 6398 (2018) : 162-165., <https://doi.org/10.1126/science.aat2025>.
- 56) Hidetoshi Nishimori and Kabuki Takeda, “Exponential Enhancement of the Efficiency of Quantum Annealing by Non-Stoquastic Hamiltonians,” Frontiers in ICT 4 (2017) : 2., <https://doi.org/10.3389/fict.2017.00002>.
- 57) QuTech, <https://qutech.nl/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 58) Networked Quantum Information Technologies (NQIT), <https://nqit.ox.ac.uk/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 59) 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院,
<http://www.quantumcas.ac.cn/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 60) Enabling Practical-scale Quantum Computation (EPiQC), <https://www.epiqc.cs.uchicago.edu/>, (2023年2月6日アクセス) .
- 61) 北川勝浩「ムーンショット目標6：2050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」国立研究開発法人科学技術振興機構,
<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 62) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター「戦略プロポーザル：みんなの量子コンピューター～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～」
<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2018-SP-04.html>, (2023年2月6日アクセス) .
- 63) Tzvetan S. Metodi, Arvin I. Faruque and Frederic T. Chong, Quantum Computing for Computer Architects, 2nd ed. (Springer Cham, 2011)., <https://doi.org/10.1007/978-3-031-01731-5>.
- 64) Garrealt J. N. Alberts, et al., “Accelerating quantum computer developments,” EPJ Quantum Technology 8 (2021) : 18., <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00107-w>.

2.5

俯瞰区分と研究開発領域
コンピュータ・アーキテクチャー

- 65) M. Cerezo, et al., “Variational quantum algorithms,” Nature Reviews Physics 3 (2021) : 625-644., <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00348-9>.
- 66) Yunchao Liu, Srinivasan Arunachalam and Kristan Temme, “A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning,” Nature Physics 17 (2021) : 1013-1017., <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01287-z>.
- 67) Hsin-Yuan Huang, et al., “Power of data in quantum machine learning,” Nature Communications 12 (2021) : 2631., <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22539-9>.
- 68) Giuseppe Carleo and Matthias Troyer, “Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks,” Science 355, no. 6325 (2017) : 602-606., <https://doi.org/10.1126/science.aag2302>.
- 69) Keita Osaki, Kosuke Mitarai and Keisuke Fujii, “Classically Optimized Variational Quantum Eigensolver for Topological Ordered Systems,” 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS) 2020, <https://sites.google.com/view/aqis2020-osaki/home>, (2023年2月6日アクセス) .
- 70) Michael Broughton, et al., “TensorFlow Quantum: A Software Framework for Quantum Machine Learning,” arXiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.02989>, (2023年2月6日アクセス) .