

2.5.2 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、古典系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様々な工学、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、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され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 2 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も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、表面符号はエラー閾値が約 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。

現状では、超伝導量子ビット系とイオントラップ系では 50 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ほか、計算能力の点での概念実証も可能だろう。ただし、誤り訂正符号は未実装であり、ゲートの物理エラーが計算の論理エラーに直結する。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、古典コンピューターでは量子コンピューターのふるま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¹²⁾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¹³⁾、欧州¹⁴⁾、中国¹⁵⁾、英国¹⁶⁾、カナダ¹⁷⁾、ドイツ¹⁸⁾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いえよう。欧州の FET Flagship プログラム「Quantum Technology Flagship」の初回公募では、OpenSuperQ と AQTION の 2 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 5 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

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

究開発投資を行っている。

我が国では、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」¹⁹⁾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3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²⁰⁾。また、内閣府ム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ほか、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。

（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ー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²¹⁾。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ほか、コンパイラをともな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ーは古典コンピューターからの古典制御をう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²²⁾。

最近になり、実際の小規模量子コンピューター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な、具体的プラットフォームが登場した²³⁾。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のほか、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のほか、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²⁴⁾。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）Quipper²⁵⁾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。とくに、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と物理量子ビットへのマッピングや、実際のデバイスの条件を満たすように量子回路を最適化する必要がある。空間的なマッピングのほか、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^{26), 27)}。誤り訂正がある場合とない場合では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。現状の 5 ～ 50 量子ビットをアーキテクチャー概念なしにそのまま大規模化することは不可能である。とくに、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。設計指針としては、NISQ デバイスではドメイン志向で検索やサンプリングないしは量子アルゴリズムで頻出する位相推定などの特定の量子計算に最適化する方向性が考えられる。大規模量子コンピューターでは誤り訂正符号の選択がアーキテクチャーを決める。

これまで述べたように、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）がハードウェアの状況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未だ登場していないからという見方もできる²⁸⁾。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。実現系としては、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2つの系が有望視されているほか、固体系ではシリコン量子ドット系も注目されている²⁹⁾。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活かされる。

NISQ 時代の量子計算

エラー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、現実的に手に入るエラー耐性無しの量子コンピューター上で、エラーを許しながら、なん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)³⁰⁾ や、Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)³¹⁾、Quantum Circuit Learning (QCL)³²⁾ 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しかけである。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、量子計算とい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。

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**量子優位性**

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。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 などのモデルがあり、Shor の素因数分解アルゴリズムなどと比べて単純な量子回路で実現可能である³³⁾。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10,000年かかると見積もられる計算タスク（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³⁴⁾。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^{35), 36)}。

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・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。量子コンピューターの計算能力のベンチマーキングや、様々なレベルにおける検証にも有益な知見を提供しうる。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³⁷⁾。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³⁸⁾。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、様々な指標がユーザーに提供されるのが望ましいだろう^{39), 40)}。

今後拡大するコミュニティ内の円滑なコミュニケーションには、定義が共有された共通言語が不可欠である。また、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ーラーと量子シミュレーターが挙げられる⁴¹⁾。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⁴²⁾。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⁴³⁾や、non-stoquastic（注：sto“qu”astic は量子的に見えて実は古典の確率的（stochastic）モデルで表現可能、という意味の造語である）な効果による指数加速の達成⁴⁴⁾など、今後の発展も注目される。

量子インターネット

古典コンピューターにおいて、スタンダアローンコンピューティングから分散コンピューティングへの発展と同様に、量子コンピューティングにおいても、2つの意味での量子ネットワーク化が進んでいる。1つは、コンピューティングの安全性を従来の計算理論的に基づく安全性から情報理論的な安全性への発展、もう1つは、量子情報をインターネット同様に、地球規模で収集、流通、分析できる量子ネットワークのグローバル化である。

米国においては、エネルギー省（DoE）が、アルゴンヌ国立研究所やフェルミ国立研究所、シカゴ大学とともに「国家量子インターネット」開発に係る戦略のブループリントを示す報告書⁴⁵⁾ [1] を発表。報告書は、量子インターネット実現のための「研究の方向性」「マイルストーン」を記載。研究の方向性として、① 量子インターネットの基礎となる技術の提供、② 量子ネットワーク機器の統合、③ 量子もつれのためのリピーター、スイッチング、ルーティング技術の生成、④ 量子ネットワーク機能のエラー修正の可用化をまとめている。

欧州においては、欧州委員会が2016年から10億ユーロの規模で開始している、「量子技術・フラッグシップ（Quantum Technology Flagship⁴⁶⁾ [2]）」の中のQIA（Quantum Internet Alliance）⁴⁷⁾ が、EU圏をカバーする量子もつれベースのQuantum Internetの研究開発を推進し、ブループリントの作成やハッカソンなどを開催している。

中国においては、量子鍵配送が既に銀行・インフラなどの分野で利用されており各国をリードしている。日本は、東芝・NECが特許の出願件数で最上位を占めているが、中国は、企業・大学など複数の組織から特許が出願されており量子通信産業に関するスタートアップも数多く出現している。量子インターネットへのロードマップなどは、公表されていない。

【注目すべき国内外のプロジェクト】

- ・ QuTech（オランダ）：「誤り耐性量子計算（FTQC）」「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3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）：「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。
- ・ 量子計算実験室（中国）：中国科学院（CAS）と Alibaba 社との MoU のもと設立された量子コンピューター開発センター。クラウド提供など活発な研究開発を進めている。量子技術としては中国科学技術大学に依拠している。
- ・ EPIQC（米国）：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ねらうプロジェクト。シミュレーター、デバugg、コンパイラ開発のほか、IEEE

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

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) : 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。
- ・ 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) (日本) : 超伝導量子コンピューター、量子ソフトウェアについて研究拠点形成が行われている他、量子生命、量子センサー、次世代レーザーについてのプロジェクトもある。

(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 デバイスとの間には量子ビット数で5～6桁に渡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⁴⁸⁾。

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、様々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、アーキテクチャー志向の取り組みも必要である⁴⁹⁾。

研究開発が進捗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。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。

（通常の意味の）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）として、誤り訂正処理を行うプログラム、NISQ マシンでの誤り抑制方法の探索、動作検証の理論と具体的なソフトウェアツールなどは、すぐにでも必要だろう。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。

(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全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ヶ所に集合させることは現実的でない。したがって、多様な研究開発拠点や研究チームから成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様々な種類が考えられる。それ

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・電子工学に跨がった研究者・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。

(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。
	応用研究・開発	△	→	・産業化に向けた応用研究、製品開発に至る研究成果は顕著でない。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。 ・ソフトウェア関連のスタートアップが登場したが、量・質ともに今後の発展が欲しい。
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、Harvard 大学などがそれぞれ中心的存在である。量子情報分野では Caltech、MIT が中心である。 ・国家量子イニシアチブにより、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 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で目立つものは少ない。

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

中国	基礎研究	○	↗	・「国民経済・社会発展第十三次五カ年計画」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。
	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。
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研究所も顕著な成果を上げている。
	応用研究・開発	○	↗	・ウオーターラー地区は 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

関連する他の研究開発領域

- ・量子情報・通信（ナノテク・材料分野 2.3.6）
- ・量子計測・センシング（ナノテク・材料分野 2.3.7）

参考文献

- 1) 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～』，CRDS-FY2017-SP-02（2018）
- 2) IEEE Rebooting Computing, <https://rebootingcomputing.ieee.org/>
- 3) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Quantum Computing Progress and Prospects, The National Academies Press（2018）
- 4) F. T. Chong, D. Franklin and M. Martonosi, Programming languages and compiler design for realistic quantum hardware, Nature 549, 180（2017）
- 5) A. C.-C. Yao, Quantum circuit complexity, Proc. The 34th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 352（1993）
- 6) 小柴健史，藤井啓祐，森前智行，『観測に基づく量子計算』，コロナ社（2017）
- 7) M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information,

- Cambridge University Press (2000)
- 8) K. Fujii, Quantum Computation with Topological Codes, From Qubit to Topological Fault-Tolerance, Springer (2015)
 - 9) Quantum Algorithm Zoo, <https://math.nist.gov/quantum/zoo/>
 - 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, Vol. 101, No. 4, 400 (2018)
 - 11) R. Barends et al., Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance, Nature 508, 500 (2014)
 - 12) A. W. Harrow and A. Montanaro, Quantum computational supremacy, Nature 549, 203 (2017)
 - 13) Executive Office of the President of the United States National Science and Technology Council (NSTC), National Strategic Overview for Quantum Information Science (2018)
 - 14) European Commission, Quantum Manifesto (2016)
 - 15) 国務院, 『国家十三五国民経済・社会発展計画綱要』(2016)
 - 16) Quantum Technologies Strategic Advisory Board, National strategy for quantum technologies : A New Era for the UK (2015)
 - 17) Government of Canada, Seizing Canada's Moment : Moving Forward in Science, Technology and Innovation (2014)
 - 18) Bundesregierung, Hightech-Strategie (2018)
 - 19) 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)』(2017)
 - 20) 内閣府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) . <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushisenryaku2020.pdf>
 - 21) F. T. Chong, D. Franklin and M. Martonosi, Programming languages and compiler design for realistic quantum hardware, Nature 549, 180 (2017)
 - 22) Mingsheng Ying 著、川辺治之 訳, 『量子プログラミングの基礎』, 共立出版 (2017)
 - 23) R. LaRose, Overview and comparison of gate level quantum software platforms, Quantum, Vol. 3, 130 (2019) .
 - 24) D. C. McKay et al., QiskitBackend Specifications for OpenQASM and OpenPulse Experiments, arXiv : 1809.03452 (2018)
 - 25) B. Valiron et al., Programming the Quantum Future, Communications of the ACM, Vol. 58, No. 8, 52 (2015)
 - 26) N. C. Jones et al., Layered Architecture for Quantum Computing, Phys. Rev. X 2, 031007 (2012)
 - 27) R. Van Meter and C. Horsman, A Blueprint for Building a Quantum Computer, Communications of the ACM, Vol. 56, No. 10, 84 (2013)
 - 28) 蓮尾一郎, 星野直彦, 量子プログラミング言語, 情報処理 Vol. 55, No. 7, 710 (2014)
 - 29) 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 - 万能デジタル量子コンピュータの実現に向けて, 応用物理, Vol. 86, No. 6, 453 (2017)

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

- 30) A. Kandala et al., Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets, *Nature* 549, 242 (2017)
- 31) J. S. Otterbach et al., Unsupervised Machine Learning on a Hybrid Quantum Computer, arXiv : 1712.05771 (2017)
- 32) K. Mitarai et al., Quantum circuit learning, *Phys. Rev. A*, 98, 032309 (2018)
- 33) 森前智行, 『量子計算理論 量子コンピュータの原理』, 森北出版 (2017)
- 34) F. Arute et al., Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, Vol. 574, 505–510 (2019)
- 35) IBM Research Blog (October 21, 2019) . On “quantum supremacy”. <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>
- 36) C. Huang et al., Classical simulation of quantum supremacy circuits. arXiv : 2005.06787 (2020)
- 37) IEEE Standards Association P7130 – Standard for Quantum Computing Definitions, <https://standards.ieee.org/project/7130.html>
- 38) A. Cross et al., Validating quantum computers using randomized model circuits, arXiv : 1811.12926 (2018)
- 39) R. Blume-Kohout and K. Young, A volumetric framework for quantum computer benchmarks, arXiv : 1904.05546 (2019)
- 40) J. Eisert, et al., Quantum certification and benchmarking, *Nat. Rev. Phys.*, Vol. 2, 382–390 (2020)
- 41) IEEE Rebooting Computing, An IEEE Framework for Metrics and Benchmarks of Quantum Computing (2018)
- 42) T. F. Rønnow et al., Defining and Detecting Quantum Speedup, *Science* 345, 6195, 420 (2014)
- 43) R. Harris et al., Phase transitions in a programmable quantum spin glass simulator, *Science* 361, 6398, 162 (2018)
- 44) H. Nishimori and K. Takeda, Exponential Enhancement of the Efficiency of Quantum Annealing by Non-Stoquastic Hamiltonians, *Front. ICT*, 17 (2017)
- 45) U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Advanced Scientific Computing Research,” Report of the DOE Quantum Internet Blueprint Workshop , https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/07/f76/QuantumWkshpRpt20FINAL_Nav_0.pdf
- 46) QuantumFlagship, “About QuantumFlagship”, <https://qt.eu/about-quantum-flagship/>
- 47) Quantum Internet Alliance ,” Quantum Internet Alliance “, <https://quantum-internet.team>
- 48) 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～』, CRDS-FY2018-SP-04 (2018)
- 49) T. S. Metodi, A. I. Faruque, F. T. Chong, Quantum Computing for Computer Architects, Morgan & Claypool (2011)