

## 2.3.5 量子コンピューティング・通信

### (1) 研究開発領域の定義

電子や光子などの量子性を積極的に活用して、古典系では実現できない情報処理やセキュア通信を実現するための研究開発領域である。超伝導量子ビットを筆頭に冷却イオンなど様々な物理系で研究開発が進められている量子コンピュータでは、量子ビット数の大幅な増加、エラー訂正技術及び古典コンピュータとのハイブリット化、などの研究開発課題がある。また、冷却原子系やイオン系で開発が進む量子シミュレータでは、量子多体状態のプロブなどの研究開発課題がある。実装に向けた開発が急速に進んでいる量子暗号、将来に向けた基礎研究の段階にある量子中継・量子ネットワークでは、伝送距離延伸、伝送損失の低減及び通信速度向上などの研究開発課題がある。

### (2) キーワード

量子情報処理、量子コンピュータ、量子シミュレーション、量子アニーリング、イジングマシン、Noisy Intermediate Scale Quantum computing (NISQ)、量子超越、量子誤り訂正、量子誤り抑制、超伝導量子ビット、冷却原子量子ビット、イオントラップ量子ビット、半導体量子ビット、光量子ビット、スピン量子ビット、量子暗号鍵配送、量子中継

### (3) 研究開発領域の概要

#### [本領域の意義]

量子力学の原理を用いる量子情報処理は20世紀後半には提唱され、従来の古典情報処理をはるかに超える能力を発揮する可能性が示されていた。近年、制御性・拡張性が高く、かつ、単一量子レベルでの測定が可能な幾つかの物理系に対して、複数の量子系の量子エンタングル状態や、測定等の外部からの擾乱を受けた非ユニタリー時間発展、等に関する研究が発展・成熟してきた。一方、ムーアの法則に基づく従来型情報処理の性能向上に限界が見えてきた中で、計算原理として量子力学を利用する量子情報処理システムすなわち量子コンピュータが、従来の古典コンピュータのパフォーマンスを超える量子超越性を証明した、と主張する実証実験の報告が2019年にGoogleよりなされたことで、古典コンピュータが不得意とする問題を高速で解ける量子コンピュータへの期待が高まっている。

また、近年、軍事・外交機密を筆頭に、ゲノムデータや製薬情報など、長期間秘匿性を担保する必要がある情報が電子的に伝送、保管、処理されるようになっているが、実用的な量子コンピュータが実現されると、従来の暗号技術で守られていたデータが全て解読される事態が懸念される。量子力学の原理を用いて暗号鍵を共有する量子鍵配送技術は、従来の古典的な通信技術では実現できない秘匿性・安全性を担保することができる。さらに、量子鍵配送の伝送距離を増大させグローバルなセキュアサイバー空間を実現するためには、量子中継技術が必要となる。この量子中継技術は、異なる情報担体（例えば光子と超伝導量子ビット）間のインタフェースともなり得るので、将来、量子コンピューティングの並列化への応用も期待される。

#### [研究開発の動向]

##### • ゲート型量子コンピュータ

現在、研究開発が進められている主なプラットフォームは、

- ・ 超伝導量子ビット
- ・ トラップドイオン量子ビット
- ・ 中性冷却原子量子ビット
- ・ 光子とフォトニクス技術を用いた量子ビット
- ・ シリコン量子ビット（量子ドット）

### ・トポロジカル量子ビット

である。

最も大規模化が進んでいるのは超伝導量子ビットである。超伝導量子ビットはマイクロ波を用いて制御されるが、これに必要な高密度（多ビット）の高周波生成・制御システムの開発、パッケージ技術、それらを格納する冷凍機の進展が寄与している。懸念されていた忠実度やコヒーレンス時間の改善も進み、Google、IBMなどでは50～70量子ビット高精度制御に成功している。特にGoogleは2019年に53量子ビットの量子コンピュータで量子超越性を実証したと発表し、世界中で大きな話題となった。IBMは2022年に開発ロードマップを更新し、2025年に4000ビット以上を実現する計画を明らかにした。日本では、富士通が理化学研究所と共同で1000ビット規模の量子コンピュータの研究開発を表明した。今後数年は、100ビットから1000ビットレベルのいわゆるNISQ（Noisy Intermediate Scale Quantum computing）マシンの大規模化が進むと考えられる。一方、一部の量子ビットに誤りが起こっても、それを検出し訂正できるような量子誤り訂正/耐性など、量子ビット操作の高精度化・効率化に関する研究も重要となっている。Googleは2022年に表面符号で論理量子ビットの実現につながるエラー抑制実験を発表した。

トラップドイオン量子ビットでは、2020年に米国IonQが32量子ビットのコンピュータを発表した。2022年にはアルゴリズムック量子ビットと呼ばれるアプリケーション指向の性能指標に基づく同社および他社の量子コンピューター実機のベンチマーキング解析結果を公表し、同社の量子コンピューター実機が20アルゴリズムック量子ビットを達成しているとした。これは20量子ビットの量子回路で400回の2量子ビットゲートを含むようなアルゴリズムを実行し、一定値以上の忠実度で答えを得ることが可能であることを意味する。また、米Quantinuumは2022年7月に全結合の20量子ビットシステム開発に成功したと報告している。量子誤り訂正に関しては、2021年にメリーランド大学、IonQなどが量子誤り訂正/耐性の実現、2022年にQuantinuumが誤り耐性を有する2量子ビットゲートの実現を報告している。

冷却原子量子ビットにも大きな進展が見られ、米国ColdQuantaなど複数のスタートアップが設立されている。日本でもリードベリ軌道電子の超高速制御による量子計算の研究開発が進んでいる。

光子を用いる方式では、スケーラビリティの確保や、シリコンフォトニクス等を活用する小型集積化が試みられている。米国PsiQuantumは半導体製造装置を用いて、量子誤り訂正が可能な耐障害性と拡張性を備えた光量子コンピュータを開発している。同社は100万量子ビット実現にむけたロードマップを発表しているが、現時点ではその詳細なデータは公表されていない。中国科学技術大学は2020年に光量子コンピュータで量子超越性を示したと発表し、中国は米国に次いで量子超越性を示すことに成功した。日本でも東京大学と理化学研究所が中心となって、拡張性の高い独自アーキテクチャの光量子コンピュータを開発中である。

半導体量子ビットの研究開発では、複数量子ビットの高精度制御に成功しつつある。デルフト大学が2018年にシリコン量子ドットの1000量子ビットのモジュールを用い、2量子ビットの量子状態制御において忠実度99.9%を達成したと報告している。理化学研究所ではシリコン量子ドットデバイスで世界初となる3量子ビットもつれ状態の生成を実証した。また、東京大学は2022年に量子ビットでの量子誤り訂正を実現したと報告している。

環境ノイズに強いとされるトポロジカル量子ビットは、局所的な物理的性質で量子情報を表現する他の量子ビットとは指向が異なるため、そのスケーラビリティやフィージビリティに対する評価は分かれている。実際Microsoftはマヨラナフェルミ粒子を使ったトポロジカル量子ビットの実現を目指した研究を継続しているが、現時点においてトポロジカル量子ビット実証の報告はなされていない。

### ・NISQの活用

量子誤り訂正を実装した量子コンピュータに必要なビットの数は100万とも1億ともいわれており、そのような大規模集積化の実現には20年以上が必要とされている。一方、ノイズを含んだ中間スケール量子コンピュータであるNISQの開発も世界各国で盛んに実施されている。NISQを用いた化学シミュレーション、

組み合わせ最適化への適用の報告がある。現時点では明らかな有用性を示しているとは言い難いが、今後新しいアルゴリズム・アプリケーションが発見されれば市場展開できる可能性がある。

#### • 量子アニーリング型コンピュータ

最適化問題をイジングモデルに変換し、量子アニーリングを用いて問題解決を図る量子アニーリング型コンピュータも盛んに研究されている。イジングモデルでは、上向きまたは下向きの二つの状態をとるスピンから構成され、隣接するスピンは、相互作用および外部から与えられた磁場によって状態が更新される。最終的に、イジングモデルのエネルギーが最小の状態ではスピンは安定する。量子アニーリング型コンピュータでは、この物理過程を最適化問題として効率よく解くことを目指している。カナダ D-Wave は 5000 量子ビット超の商用ハードウェアシステムを発表するなど集積化を進めている。しかし、現状、量子アニーリング型コンピュータの多くの実現形態では、古典コンピュータに対する実用上の有効性が十分には示されていない。

#### • 量子シミュレーション

冷却原子として一般的に利用される Rb 原子を用いて、米国 ウィスコンシン大、フランス CNRS、などが 2000 年代から研究を開始して基礎技術の開発を進め、2010 年代には、さらに米国ハーバード大学、韓国 KAIST、などが量子計算・量子シミュレーション開発を行い、日本でも電気通信大学が先駆的に研究を行った。現在、Rb 原子に内在する様々な問題点の克服が期待される 2 電子系原子の Yb や Sr を用いた研究が、米国 Caltech、プリンストン大学、JILA、ベンチャー企業 Atom Computing、京都大学、中国（精華大学・香港科学技術大学）で行われている。なお、米国ハーバード大学、MIT はベンチャー企業 QUERA Computing と、JILA、NIST は Atom Computing と、米国 ウィスコンシン大学は ColdQuanta 社とそれぞれ連携して研究開発を進めている。

#### • 量子通信（量子暗号、量子中継、量子ネットワーク）

量子通信の中で最も研究の成熟度が高い量子暗号鍵配送（Quantum key distribution: QKD）は 1984 年の BB84 プロトコルの提案に始まり、2010 年ごろまでには理論的基礎が確立した。その後、装置の不完全性があっても成立する安全性理論の開拓が始まり、2010 年ごろから実装されたデバイス特性にまで踏み込んだ解析と対策が進められている。この実装安全性に関する研究は、欧州電気通信標準化機構（ETSI）や国際標準化機構（ISO）における QKD 装置安全性保証の標準化ドキュメント作成に強い影響を与えている。QKD の鍵生成の高速化では、2015 年ごろまでにはデコイ BB84 プロトコルを実装したクロック周波数 1GHz 台の実用的な装置が、日本の東芝と NEC によって完成した。

連続量 QKD（CV-QKD）は従来型のコヒーレント光通信の部品のみで構成できるため、低価格の QKD 装置となりうる。2019 年には日本においてホモダイン検出の周波数弁別特性（モードセレクション特性）を活かし、18 Tbps の高速光通信と CV-QKD の同一ファイバでの共存実験に成功している。この結果は CV-QKD が専用線を用いなくても実装可能であることを意味し、ファイバ敷設コストを含めた低コスト実装の可能性を示している。一方、CV-QKD は損失耐性が低く、BB84 型と比較し伝送距離に厳しい制限がある。また、鍵生成率は極めて低い。

QKD のネットワーク化は量子中継技術がまだ発展途上であること等から、現状、信頼できる局舎（trusted node）を介した鍵リレー・ネットワーク化による鍵共有エリアの拡大が世界各国で採用されている。米国では民間企業を中心に QKD ネットワークの実証試験が進められている。米国 Quantum Xchange は耐量子ネットワーク（量子コンピュータが出現しても安全なネットワーク）を提供しており、データチャンネルと量子チャンネルは 1 本のダークファイバーで多重化し、鍵生成速度 143 kbps、量子ビット誤り率（Quantum bit error rate: QBER）3.31%（24 時間平均）を記録した。1 か月稼働を達成し、高信頼な商用 QKD サービスが利用可能としている。また 2022 年には JP モルガン・チェース、シエナ、東芝アメリカが、QKD ネットワー

クを使用したと報告している。欧州では2019年6月に、26のEU加盟国が、欧州委員会と協力し欧州宇宙機関の支援を受けて、EU全体をカバーする量子通信インフラストラクチャの開発に取り組むEuroQCI宣言に署名した。これは、既存の地上のセグメントと、EUおよびその他の大陸全体をカバーする宇宙ベースのセグメントで構成される。現在18箇所のQKDネットワークテストベッド拠点が整備され、医療、金融、衛星関係機関への安全な鍵をアプリケーションに提供するプラットフォームとしての実証実験が進められている。日本でも2010年世界最高速のネットワークとしてTokyo QKD Networkが完成し現在に至るまで運用が続けられている。一方、中国では2021年には700のファイバリンクと2つの地上-衛星リンクを統合した量子鍵配送ネットワークを構築し、4600 kmに渡って150人以上のユーザ間での量子鍵配送デモを実施した。また、人工衛星によるQKDシステムは、現時点で、大陸間・グローバルな鍵配送が実証された唯一の方法である。2017年に中国が世界初の衛星-地上間QKD実証を発表している。また、日欧それぞれで衛星量子暗号の研究開発が進められている。衛星を使ったQKDサービスの充実には、衛星の姿勢制御、衛星・地上局双方でのトラッキング、昼間にQKDを可能とするフィルタリング機能、モード選択機能を備えた光子検出システム、等の要素技術開発が不可欠である。

量子中継では、中継ノードで2つの光子の量子もつれ状態（Bell状態）測定が行なわれる。光子対の片方が届かないままBell測定を行うとスケールビリティが失われるため、光子を受け取れたことを確認し選択的にBell測定を行うことが量子中継において重要である。これを実現するには一定時間忠実に量子状態を保持する量子メモリが重要であり、単一イオン、原子集団（atomic ensembles）、共振器量子電磁力学（cavity QED）、結晶中色中心（color defect centers）などが提案されている。2017年には冷却されたYbイオンを用いた量子メモリでコヒーレンス時間10分間という記録が中国精華大学から報告されている。また中国科学技術大学は2019年に22 kmのファイバで結合された集団原子を用いた二つの量子メモリ間のもつれ生成に成功している。しかし、メモリ（コヒーレント）時間、忠実度など全ての性能指標を満たすものはまだなく、光子だけで量子中継をおこなう方式も提案されている。大阪大学は2019年に、中国精華大学は2022年に光子だけによる量子中継の原理実験の成功を発表するなど一定の期待を集めているが、複雑な多数の量子ビットの状態を用意する必要があり、量子メモリを使う方式とは異なる困難さがある。

#### (4) 注目動向

##### [新展開・技術トピックス]

###### • 量子コンピュータ実機の利用環境整備の進展

NISQマシンが利用できる環境が広がっている。IBM、Amazon、Microsoft、Googleなどの大手のクラウドサービスで利用可能となった。超伝導量子コンピュータだけでなく、IonQなどのイオントラップ量子コンピュータも接続可能となっており、量子コンピュータ利用加速に貢献している。中国や欧州各国でも独自のサービス環境が提供されている。日本においてもIBM-Qのクラウドサービスに加えて、初の国産機による量子アプリケーション検証実験が開始されている。

###### • 量子コンピュータ性能評価指標

多様なプラットフォームにおける多数のハードウェア実機が登場する中で量子コンピュータ性能評価指標の提案が盛んになってきた。例えばIBMは量子ボリューム、CLOPS（Circuit Layer Operations Per Second）を提案している。これらは物理層に近いシステムに依存している指標だが、アプリケーションを実行する性能で評価する指標なども現れている。今後、これらの指標を用いた量子コンピュータの性能比較や標準化への動きが加速すると思われる。

###### • 大規模化を目指した技術開発

超伝導量子コンピュータでは、IBMにより1万量子ビットまでを見渡したロードマップが示された。1チップ

プの量子ビット集積の大規模化に加えて、チップ間の通信によるスケールアップ、冷凍機のさらなる大型化がポイントになっている。Googleからも大規模マシンへのロードマップが示されている。様々な課題がある中でも量子ビット制御システム系の実装密度が大規模化の制約になることが懸念されており、量子ビットの制御を低温部で行うデバイス技術の研究開発が進んでいる。クライオCMOS技術を用いるものや超伝導単一磁束量子回路技術 (SFQ) による実証実験やアーキテクチャの提案が活発になってきた。

#### • 量子誤り訂正/抑制技術

表面符号に基づく量子誤り訂正に加えて、比較的小規模の量子ビット数でも実証可能な量子誤り抑制技術も理論だけではなく実験的な検証が進展している。超伝導量子コンピュータのようにシステムのハードウェア構成や量子ビット制御の仕様がはっきりしてきたプラットフォームを中心に、量子誤り訂正や量子誤り抑制技術を適用するためのハードウェアアーキテクチャの研究も進んでいる。

#### • イオントラップ量子コンピュータ

これまで広く使われてきたYbイオン ( $^{171}\text{Yb}^+$ ) に加えて、Baイオン ( $^{133}\text{Ba}^+$ 、 $^{137}\text{Ba}^+$ など) を用いた研究開発が進展している。Baイオンは、初期化が容易、高忠実度の読み出し、可視光や近赤外光レーザーで冷却・制御するため光源構成が容易、等Ybイオンにはない利点を持つ。Baイオンを用いた場合の量子ビットの状態生成と読み出しまでを含めた通称SPAM (state preparation and measurement) の忠実度は2020年に99.99%が報告された。

#### • 2電子系原子光ピンセットアレー

レーザー冷却で標準的に用いられているアルカリ原子のRb原子では、量子計算機実現の上で、リドベルグ状態への2光子励起に伴うデコヒーレンス、基底状態の超微細構造を用いた量子ビットの大きな光シフトによるデコヒーレンス、リドベルグ状態の光トラップ困難性、などの問題が存在する。一方、2電子系原子のYbやSrでは、上記の問題はすべて克服可能であり、さらに、自動イオン化の利用やエラー検出の可能性など、多くの点で非常に有利な特徴を兼ね備えている。実際、コヒーレンス時間1秒にも及ぶ核スピン量子ビットやリドベルグ状態の光トラップ、自動イオン化を用いた高精度観測などが実証されている。

#### • イジングマシンによる組合せ最適化問題解法の大規模化

イジングマシンを用いた組合せ最適化問題を解く際のボトルネックの一つとして、スピン数 (決定変数の個数) 不足が挙げられる。これを解決する方法は大きく分けて2つあり、1つはイジングマシンのハードウェアのさらなる開発により搭載されるスピン数を大きくする方法、もう1つはソフトウェアの側面からハードウェアの問題点を緩和する方法である。前者についてはイジングマシンを開発している各機関にて継続的に進められている。後者については、近年、従来型コンピュータによる前処理で変数固定を行い、実効的にイジングマシンで解く問題を縮小するという取り組みがなされている。

#### • QKDの実装検証

東芝が2020年にQKDの製品化を発表し社会実装検証 (POC) が進行中である。東芝は2019年Quantum Xchange社の機密情報通信ネットワークにおいて、データチャンネルと量子チャンネルを1本のダークファイバーで多重化し、鍵生成速度143 kbps、量子ビット誤り率 (Quantum bit error rate: QBER) 3.31% (24時間平均) を記録した。1か月稼働を達成し、高信頼な商用量子鍵配送サービスを可能としている。2022年にはJPモルガン・チェース、シエナ、東芝アメリカが、量子鍵配送ネットワークを使用し、大都市において、100 kmの距離まで、実用レベルの伝送速度である800 Gbpsで暗号通信が可能なことを確認した。

欧州ではスイスID Quantiqueが本社と災害復旧センターとの間（100 km）で、QKDによる暗号鍵を用いた10ギガEthernetの暗号化装置で暗号化通信を行うシステムを導入した。中国ではQuantumCTekの製品を用いて量子暗号化されたデジタル認証情報の送信に成功したとの報告もある。

#### • 長距離 QKD

2019年に東芝ケンブリッジ研により発明されたTwin field QKD (TF-QKD) はQKDの鍵伝送を大幅に改善できる方法として注目されている。TF-QKDでは鍵を共有する二者それぞれが中間地点へ向けて光パルスを送り、中間地点において1個の光子を検出する構成となっている。そのため、TF-QKDは鍵伝送チャンネルの伝送透過率の平方根に比例する鍵生成レートを実現でき、鍵生成レートが伝送透過率に比例するBB84型と比較し、鍵伝送距離の長距離化に向けた方式となっている。2022年には中国科学技術大学により830 kmでの鍵生成が報告されている。

#### • 量子中継

量子中継、または量子インターネットについては、デルフト工科大学のQuTechプロジェクトが、2022年に量子中継のデモをダイヤモンド内のNVセンターを用いた量子メモリ3つを用いて実証した。米国Qunnect社は2021年に世界初の量子メモリの販売を開始し、忠実度95%以上の単一光子のオンデマンド保管・放出が可能と発表している。シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所による量子インターネットプロトタイプ開発では、2020年2月にシカゴ郊外の敷設済みファイバを使い、52マイル（約84 km）の量子もつれ共有に成功している。

### [注目すべき国内外のプロジェクト]

#### [日本]

量子技術イノベーション戦略をさらに進めた「量子未来社会ビジョン」が2022年に制定され、量子技術による社会変革への展望が示された。8拠点とされていた量子技術の推進拠点は2拠点増加となり10拠点となった。光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）のフラッグシッププロジェクトである理化学研究所の超伝導量子コンピュータは初の国産実機として量子アプリケーション検証実験を2023年から開始している。Q-LEAPでは人材育成系の教育プログラムも開始し、研究者や技術者の育成も強化されている。内閣府の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」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している。2022年度に新たに追加の公募がなされ、冷却原子、シリコンに関する新たなテーマが立ち上がることになった。

NEDO量子計算及びイジング計算システムの統合型研究開発は、ハードウェア（量子アニーリングマシン）開発、ミドルウェア開発、ソフトウェア開発の3つの領域からなる統合的な研究プロジェクトである。特に、イジングマシン向けソフトウェア開発においては、様々な種類のイジングマシンが開発されている状況を鑑み、統一的なプログラミングによってイジングマシンを活用するためのソフトウェア開発を実施している。既に最適化計算を行っている企業等でよく用いられている数値最適化ソルバや、ゲート型量子コンピュータや量子回路シミュレータを用いた最適化計算にも活用することが可能になった。

#### [米国]

米国では、2018年の国家量子イニシアチブ法（The National Quantum Initiative Act）に基づく量子技術に向けた国家投資が進んでいる。2021年度には7億9,300万ドルが計上されており、2022年度に向けて8億7,700万ドルが要求されている。研究拠点化では2022年時点で、5か所のNSF Quantum Leap Challenge Institutes、5か所のDOE QIS Research Centers、3か所のNDAA QIS Research Centersが量子拠点として運営されている。R&D予算として2019年度に4億4,900万ドル、2020年度に6億7,200

万ドル、また、2022年に新たに制定された米国CHIPS及び科学法により量子技術開発を後押しすることがアナウンスされた。

量子インターネット基盤技術開発では、The Chicago Quantum Exchange (CQE) が設立され、シカゴ大学とアルゴンヌ国立研究所、フェルミ加速器研究所が中心となり、中西部の3つの大学と15の企業パートナー（2020年7月現在）が参加している。また、ブルックヘブン国立研究所を中心としてオークリッジ国立研究所、ロスアラモス国立研究所とストーニーブルック大学がニューヨークでテストベッドを建設している。2022年には124マイルの量子ネットワークが形成され、東芝と共同してのQKD実験も実施されている。

## [中国]

米国に続いて光と超伝導で量子超越を実証したと報告した。2021年からの第14次5か年計画でも量子コンピュータの強化が謳われている。企業も本源量子、アリババグループなどが量子コンピュータに取り組んでおり、百度グループは2022年にクラウドサービスの運用をアナウンスした。

## [欧州]

EU Quantum Flagshipでは、2022年から新しいQUCATSと呼ばれる新しいフェーズに移ることになった。量子技術の普及、協力、活用に向けた取り組み、標準化やベンチマーク、量子技術に関連する人材教育や訓練の開発・評価などの活動が強化される。ドイツでは、ユーリッヒ研究所にD-Waveの量子アニーリング型コンピュータが設置されたことが2022年1月に発表された。英国は2014年から進められているThe UK National Quantum Technologies Programmeに対する2019年からの追加投資が表明された。産業界からの投資も含めて総額3億5000万ポンドになる。フランス・イノベーション省（MESRI）が2021年1月に発表した量子国家戦略では、量子コンピュータ、量子暗号・通信、量子センサなど7つの分野に5年間で18億ユーロを投資する予定である。

量子通信基盤の構築では、EuroQCI initiativeが進められており、これをサポートするように2019年6月にEuroQCI declarationが採択され、2020年10月時点で25カ国が署名している。また、2019年9月から開始したOPENQKDではQKDを組み込んだ通信インフラの実現をめざして15百万ユーロの予算、38機関（13か国）からなるコンソーシアムが組まれており、18ヶ所のテストサイトが運用されている。

## [その他]

インドは量子技術の強化に乗り出しており、2020年度に5か年計画を制定し8000億ルピーを投資すると発表した。2026年までに50ビットの量子コンピュータ実現を目指している。イスラエルも2022年に量子コンピューティング研究開発センター設置をアナウンスし、3年間で29Mドルを投資する。

### (5) 科学技術的課題

量子技術全般に渡り、今後は量子ビットの精度向上とともに、損失耐性・誤り耐性を整備することによりシステムとしてのスケーラビリティを実現することが普及・市場拡大に重要となる。量子力学のみならず材料科学、デバイス技術、実装技術、高周波制御回路、冷凍機、高速光通信、システムアーキテクチャなどの広い分野にわたる協業が不可欠である。また、システムの全てを量子技術で実現するのは困難であり、量子技術と従来技術を融合させる必要がある。

これまで量子コンピューティングのプラットフォームとしては超伝導が中心であったが、トラップドイオン、光、半導体、冷却原子などでも量子計算の実証がなされるようになり、これらの今後の大きな目標は誤り訂正、量子誤り耐性に係るものに移っていくものと思われる。

測定型量子計算の研究も進展している。今後、妥当な実装規模で実現するハードウェア構成が出現すれば、論理ビットを多数の物理量子ビットで冗長実装する必要がなくなる。量子誤りなしの演算が可能なたポロジカ

ル量子計算に必要なトポロジカル材料の研究も中長期的な基礎科学として期待される。

(6) その他の課題

量子コンピュータハードウェア研究開発は、挑戦的・総合的な理工学研究の様相を呈している。関係する人材がますます必要となるため、連携・融合の場を作り人材の広がりと育成を図るべきである。また、量子コンピュータ実機を使う環境が整いつつあること、様々なプラットフォームが出てきたことを踏まえ、公平で適切な性能評価（ベンチマーク）指標の確立と国際標準化が重要である。

(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	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>国家プロジェクト（Q-LEAP、ムーンショット）活動が本格化し、基礎・将来技術の研究が進む。量子技術拠点の体制強化が進む。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEC、富士通、日立などがハードウェア研究開発にも参入し産学連携が発展的に進められている。産学連携を担うコンソーシアムが立ち上がり活性化している。内閣府「量子未来社会ビジョン」が国策としても社会実装推進を宣言した。</li> <li>Q-LEAP/PRISMで、基礎基盤研究とともに、冷却原子量子シミュレータのクラウドサービス化などの社会実装を目指した応用研究が進む。</li> <li>量子通信に関してはNICTを中心に社会実装が進んでいる。衛星量子通信についても実証に向けた研究がソニー、スカパーJSATも参加して進められている。またITU-T等での標準化活動を主導している。</li> </ul>
米国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>13か所の量子拠点、主要大学の基礎研究が世界をリードしている。</li> <li>CUA（ハーバード大・MIT）など、各大学で冷却原子量子計算・量子シミュレータの基礎研究が盛んに研究されている。</li> <li>国家量子調整室（NQCO）は、2020年2月量子ネットワーク戦略的ビジョンを発表し、量子インターネット構築に係る目標・集中すべき6つの研究活動領域の提言を実施している。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>Google、IBMの超伝導量子コンピュータ研究開発が世界をリードしている。イオントラップ方式の研究開発でもリード。スタートアップ企業が増加し巨額投資が続いている。</li> <li>ベンチャー企業QUERA ComputingやColdQuantaがRb原子を用いたリドベルグ原子の研究や、クラウドサービスを開始しようとしている。</li> <li>金融分野におけるブロックチェーンアプリケーションで送受される情報を保護するために量子鍵配送ネットワークを使用し、大都市において、最大100kmの距離で、実用レベルの800Gbpsの伝送実証に成功した。</li> </ul>
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>EU Quantum Flagship活動でアカデミア機関の活動をサポートし、継続的な成果創出が続く。</li> <li>独マックスプランク量子光学研究所などで、冷却原子量子シミュレータの基礎研究が盛ん。</li> </ul>
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子拠点をベースとしたスタートアップが増加し、EU Quantum Flagshipでも産学連携活動強化を発表している。</li> <li>今後10年以内に欧州全体で量子通信インフラ（QCI：quantum communication infrastructure）を開発し、展開する方法を検討することを合意する宣言に欧州7か国が署名した。</li> </ul>
中国	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子情報拠点が完成するなど、巨額の政府投資がなされている。中国科学技術大学で超伝導、光量子コンピュータで量子超越などの大型成果が挙げられた。</li> <li>精華大学でSr原子を、香港科学技術大学でYb原子を用いた光トラップアレー量子計算の取り組みが始められている。</li> </ul>

2.3 俯瞰区分と研究開発領域 ICT・エレクトロニクス応用



中国	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本源量子、アリババなどが量子コンピュータの開発を加速し、クラウドサービスも開始された。</li> <li>・世界で唯一の量子通信衛星を打ち上げ、量子システムの長距離ネットワークを実証した。総延長4600 kmに及ぶ量子鍵配送ネットワークを有している。</li> </ul>
韓国	基礎研究	△	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>・リドベルグ原子を用いた量子コンピューティング・量子シミュレーションに関して、KAISTで先端的な基礎研究がなされている。</li> <li>・ソウル大、KAISTなどで、冷却原子量子シミュレータ・量子計算の基礎研究が盛んに研究されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> <li>・イオントラップ関係で米国 IonQ との関連を深めて最先端技術の獲得を進めている。</li> <li>・2022年ソウル特別市と釜山市間の約490 kmにおいて、異機種の量子暗号通信システムをつないだ長距離ハイブリッド量子暗号通信ネットワークを構築した。</li> </ul>

(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

- ・量子コンピューティング（システム・情報分野 2.5.3）
- ・量子通信（システム・情報分野 2.6.3）
- ・量子マテリアル（ナノテク・材料分野 2.5.5）

### 参考・引用文献

- 1) W. Chang, et al., “Long-Distance Entanglement between a Multiplexed Quantum Memory and a Telecom Photon,” *Physical Review X* 9, no. 4 (2019) : 041033., <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.9.041033>.
- 2) Viktor Krutyanskiy, et al., “Light-matter entanglement over 50 km of optical fibre,” *npj Quantum Information* 5 (2019) : 72., <https://doi.org/10.1038/s41534-019-0186-3>.
- 3) Raju Valivarthi, et al., “Teleportation System Toward a Quantum Internet,” *PRX Quantum* 1, no. 2 (2020) : 020317., <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.1.020317>.
- 4) Pei Zeng, et al., “Mode-pairing quantum key distribution,” *Nature Communications* 13 (2022) : 3903., <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31534-7>.
- 5) Guus Avis, et al., “Requirements for a processing-node quantum repeater on a real-world fiber grid,” *arXiv* 2207 (2022) : 10579., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.10579>.
- 6) Feihu Xu, et al., “Secure quantum key distribution with realistic devices,” *Reviews of Modern Physics* 92, no. 2 (2020) : 205002., <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.025002>.
- 7) Juan M. Pino, et al., “Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture,” *Nature* 592, no. 7853 (2021) : 209-213., <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03318-4>.

- 8) Ye Wang, et al., “Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time,” *Nature Photonics* 11 (2017) : 646-650., <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0007-1>.
- 9) Lars S. Madsen, et al., “Quantum computational advantage with a programmable photonic processor,” *Nature* 606, no. 7912 (2022) : 75-81., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04725-x>.
- 10) Kenta Takeda, et al., “Quantum error correction with silicon spin qubits,” *Nature* 608, no. 7924 (2022) : 682-686., <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04986-6>.
- 11) Robert Ian Woodward, et al., “Gigahertz measurement-device-independent quantum key distribution using directly modulated lasers,” *npj Quantum Information* 7 (2021) : 58., <https://doi.org/10.1038/s41534-021-00394-2>.
- 12) Adam M. Kaufman and Kang-Kuen Ni, “Quantum science with optical tweezer arrays of ultracold atoms and molecules,” *Nature Physics* 17 (2021) : 1324-1333., <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01357-2>.
- 13) Florian Schäfer, et al., “Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices,” *Nature Reviews Physics* 2 (2020) : 411-425., <https://doi.org/10.1038/s42254-020-0195-3>.
- 14) Christian Gross and Waseem S. Bakr, “Quantum gas microscopy for single atom and spin detection,” *Nature Physics* 17 (2021) : 1316-1323., <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01370-5>.
- 15) Ehud Altman, et al., “Quantum Simulators: Architectures and Opportunities,” *PRX Quantum* 2, no. 1 (2021) : 017003., <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.017003>.
- 16) Ming Gong, et al., “Quantum walks on a programmable two-dimensional 62-qubit superconducting processor,” *Science* 372, no. 6545 (2021) : 948-952., <https://doi.org/10.1126/science.abg7812>.

## 2.3

俯瞰区分と研究開発領域  
ICT・エレクトロニクス応用