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ド化、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ー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）、量子優位性、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の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）間のインター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］

• 論文・特許動向

領域全体の論文数は2012年から2021年まで増加している。特に、米国は2018年以降論文数の増加が著しい。過去10年間の論文数変化率はインドと中国が同程度の高水準にあり、特にインドは近年の論文数変化率が最も高くなっている。Top1%論文数・Top10%論文数は米国と中国が突出している中、日本は各国と比較して低い水準にある。特許ファミリー件数は、中国がシェアを伸ばしている一方、日本のシェア減少が顕著である。（詳細は「研究開発の俯瞰報告書　論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」を参照）

• 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。

最も大規模化が進展して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。さらにGoogleは量子誤り訂正アルゴリズムの研究開発に力を注いでおり、2023年2月に表面符号方式で物理量子ビットの数を増やして量子演算のエラー率を下げることに初めて成功した。IBMは2023年末に世界初の1000量子ビット超のプロセッサ「Condor」と、2021年発表の127量子ビットプロセッサ「Eagle」と比べてエラー率を5分の1にまで下げた133量子ビットプロセッサ「Heron」を発表している。日本では、理研が2023年3月に64量子ビット国産量子コンピュータをクラウド公開し、さらに、富士通と共同で1000ビット規模の量子コンピュータの研究開発を進めている。

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年にはアルゴリズミ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実機が20アルゴリズミ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。2023年に、ハーバード大学がQuEra Computing等と連携して、冷却原子型で48論理量子ビットを持つ誤り訂正量子コンピュータを構築し話題となった。日本でもリドベルグ軌道電子の超高速パルスレーザーを用いた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しており、2024年1月には、光パルスの中で1つの物理量子ビットを用いて1つの論理量子ビットを生成することに成功している。

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。

• Early-FTQC

量子誤り訂正量子コンピュータ（Fault-Tolerant Quantum Computing, FTQC）に必要となる量子ビットの数は100万個とも1億個ともいわれており、そのような大規模集積化の実現には20年以上かかると考えられている。現状の量子コンピュータ（NISQ）はノイズによるエラーが生じる量子コンピュータであり、Early-FTQCは小規模の量子エラー訂正を備えた量子コンピュータを指す。 Early-FTQCは、従来考えられていたものより少ない物理量子ビット数で現行コンピュータの計算性能を超える量子コンピュータの実現を目指すものである。2023年3月に、大阪大学と富士通は、高効率位相回転ゲート式量子計算アーキテクチャを確立し、1万物理量子ビットで64論理量子ビットの量子コンピュータを構築可能であることを示した。一方、Early-FTQCであっても物理ビットの忠実度は99.99%が求められており、物理量子ビットの質の改善は不可欠である。

• 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

米国NVIDIAは2021年に、896個のGPU上で688個の量子ビットをシミュレートし、MaxCut問題で3375個の頂点を持つグラフを解くことに成功した。以前の最大量子シミュレーションの8倍の量子ビットに相当する。日本では2022年に産総研はNVIDIAが開発した量子回路シミュレータを産総研AI橋渡しクラウド（AI Bridging Cloud Infrastructure）上で実行し、世界最速の量子回路シミュレーションに成功している。

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）

現在の暗号技術は，解読に膨大な時間がかかることで安全性を保っている。従って、コンピュータの性能が飛躍的に向上したり、数学的解法が新たに発見されたりすれば無力化するおそれがある。一方、量子暗号

は不確定性原理を利用することで、将来のどんな技術でも解読できない情報安全性（無条件安全性）保証を可能にする。最も研究が進んでいるのは、秘密鍵を共有する量子暗号鍵配送（Quantum key distribution: QKD）である。このQKDは使う検出器によって離散量QKD（DV-QKD）と連続量QKD（CV-QKD）の2つに分類される。

DV-QKDは単一光子検出器を用いるもので、単一光子状態に基づくBB84、B92、DPS-QKD、COW（コヒーレント一方向方式）などと、量子もつれ状態を用いるE91、BBM92などのプロトコルがある。 BB84プロトコルは1984年に提案され、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。

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の同一ファイバー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、ファイバー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ーの開発に取り組む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のファイバーリンクと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人以上のユーザー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ラ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のファイバーで結合された集団原子を用いた2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］

• 電子の飛行量子ビットの実証

2024年1月に、NTTは、CEA-Saclay、NIMSおよびKAISTと共同で、グラフェンと六方晶窒化ホウ素および金属電極の積層と微細加工によって作製したマッハ・ツェンダー干渉計と、レビトンと呼ばれる単一電子源を組み合わせることで安定性を向上させ、世界で初めて電子の飛行量子ビット動作を実証した。飛行量子ビットは、空間的に配置された素子に光子や電子などの量子を通過させることで演算が行われる量子ビットであり、電子間のクーロン相互作用を利用して量子もつれ対をオンデマンドで生成できるため、量子情報伝送や量子コンピュータの大規模化、高速演算化に寄与する可能性がある。

• 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拡がっている。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はなく、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、理研で初の国産機「叡」のクラウド公開が2023年3月から開始されている。

• 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。IBMは、量子ボリュームの向上に力を入れており、2022年11月には433量子ビットのOspreyプロセッサをリリースし、量子ボリュームが128から512へ4倍、1秒あたりの回路層演算量が1400 CLOPSから1万5000 CLOPSへと10倍以上に向上したとしている。さらに、2023年12月には1,121量子ビットを持つ Condorプロセッサを発表するなど順調に量子ビット数を増やしている。さらに、量子ビット数以外の量子コンピュータの性能指標として新たに量子回路のレイヤーゲートあたりのエラー率（error per layered gate, EPLG）という指標が提唱されている。QVでは少数の量子ビットを用いた性能しか測ることが出来ておらず、多数の量子ビットを活かした計算の指標としてはEPLGの方が適切である。

• 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、2022年5月にIBMにより2025年までに4000量子ビット超を目指すというロードマップが示された。1チッ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。新しいロードマップでは、従来型計算リソースと量子プロセッサを組み合わせたエラー緩和技術の向上、ワークロードの効率的な分散やオーケストレーションなど

による実用的な量子システムの実現が掲げられている。また、モジュール性と短距離チップ間接続を導入し、より大規模な単一プロセッサを効率的に形成できるようにする。さらに量子プロセッサ間の量子通信リンクも確立するとしている。

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化している。

・量子誤り訂正/抑制技術

量子ビットは環境との相互作用によってエラーを起こしやすいため、誤り訂正技術が不可欠である。近年、より効率的で信頼性の高い誤り訂正コードが提案されており、量子ビットのエラーを検出・訂正できる可能性が高まっている。情報を物理量子ビットの二次元グリッドにエンコードする量子低密度パリティチェック（LDPCコード）である表面コードは小規模例の実証が進んでいる。 Googleは2023年に、物理量子ビットの数を17個から49個に増やしてエラー率を減少させ、量子誤り訂正が可能であることを実証した。今後、物理量子ビットの数を1000個まで増やせば、有効な演算ができる水準まで誤り率を下げられる。さらに米IBMは量子誤り訂正の実装に必要な物理量子ビット数を10分の1に削減可能な新しいLDPCコードを2023年8月に発表した。

2023年12月にハーバード大学がQuEra Computing、MIT、NIST/UMDと連携して実験を行い、48個の論理量子ビットを持つ冷却原子型の誤り訂正量子コンピュータ上で大規模アルゴリズムの実行に成功するなど、超伝導量子ビット以外でも、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（$^{171}Yb^{+}$）に加えて、Baイオン（$^{133}Ba^{+}$、$^{137}Ba^{+}$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。2023年5月に、米国Quantinuumは、32量子ビットのH2-1を発表し、量子ボリューム2^{16}を達成している。また、2量子ビットのゲートエラーの平均は0.13%と最も良い水準である。

・2電子系原子アレイのリドベルグ状態による量子計算

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。リドベルグ状態への1光子励起などが実証されており、スケーラブルな量子計算の実現が期待される。

・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つはソフトウェア的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

東芝ケンブリッジ研において、2021年6月に、環境変動の影響を補正することができるデュアルバンド安定化技術と量子暗号鍵配信プロトコルであるTwin field QKD（TF-QKD）に適用することで、世界最長となる600kmを超える量子暗号通信を実証した。TF-QKDはQKDの鍵伝距離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はチャ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いた方式となっている。

中国科学技術大学は、2021年に、世界初の衛星・地上間量子通信ネットワークを構築し、4600 kmの量子鍵配送を実現している。ネットワーク全体で中国の4省・3直轄市の32地点をカバーし、金融、電力、行政などの業界の150以上のユーザーと接続しているとしている。

• 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ーを使い、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］

2021年9月から任意団体として活動してきた「量子技術による新産業創出協議会（Q-STAR）」が、2022年5月に社団法人化し、新たなスタートを切った。 Q-STARでは、量子技術にフォーカスした産業化リファレンスアーキテクチャQRAMI（Quantum Reference Architecture Model for Industrialization）を導入し、デファクトスタンダード化やサプライヤーマップの作成、知財管理や輸出管理の共通ルール化の提案、スタートアップ企業の量子市場への参画支援を通じた裾野の拡大にも取り組んでいる。

2023年4月に、内閣府から「量子未来産業創出戦略」が示されている。量子コンピューティングでは、ユー

スケースづくりや量子・古典ハイブリッドや、サプライチェーン構築が実用化・産業化が示されており、2030年目標として掲げられている「国内の量子技術の利用者を1,000万人に」の達成に向けたに向けた取り組みが進められている。

内閣府の、破壊的イノベーション創出を目指し従来技術の延長にない挑戦的な研究開発を推進するムーンショット型研究開発制度では、目標6として「誤り耐性型汎用量子コンピュータ」が2020年に設定されている。この目標6では「2050年頃までに、大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現する。」ことと、「2030年までに、一定規模のNISQ量子コンピュータを開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。」ことがターゲットとして設定されており、その達成のために、まず一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と実効的な量子誤り訂正の実証を進め、その上で、分散処理型のNISQ量子コンピュータの実証と量子誤り訂正下での有用タスク計算の実行と大規模化を目指している。

JST戦略的創造研究推進事業（CREST、さきがけ）「量子・古典の異分野融合による共創型フロンティアの開拓」（2023～）では、量子コンピュータ・量子通信に、量子センサー等の量子情報技術をみ合わせてシステム化して他分野と融合させ、新たな「量子フロンティア」を開拓をすることを目指している。

［米国］

米国では、2018年の国家量子イニシアティブ法（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。バイデン大統領は、2022年に、量子コンピュータが米国のサイバーセキュリティに及ぼすリスクに対処するための政府の計画を概説した国家安全保障覚書に署名した。米国国立標準技術研究所（NIST）は、量子コンピュータを使った攻撃から保護するための、新しい量子耐性暗号の標準を発表する予定である。

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。

中国で自主開発された第3世代超伝導量子コンピュータ「本源悟空」は、2024年1月にネットに接続され、2月1日午前11時時点で、94の国や地域のユーザーのために1万4233件の演算を行い、アクセス人数は延べ100万人を突破したと発表している。本源悟空は7ビットの自主開発の超伝導量子チップ「悟空芯」を搭載しており、2025年までに1024ビットを実現する計画を進めている。

中国科学技術大学と中国科学院大学の研究チームが中国宇宙ステーションの実験モジュール天宮2号と4つの衛星地上局に搭載されたQKD端末を用いて宇宙-地上間の量子暗号通信ネットワークの実証実験を行っている。2023年3月に、集積フォトニックチップ上の高速かつ高忠実度の偏光状態変調技術を開発し8ピクセルの超電導ナノワイヤ単一光子検出器と組み合わせて、量子暗号通信でこれまでの最高記録を1桁上回る

毎秒100 Mbpsを超えるQKDシステムを実現した。また、北京量子情報科学研究院のグループが2023年3月に615キロメートルの量子暗号通信に成功しており、2025年までに全国ネットワークの整備という目標に向けて着実な進展が見られる。

［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。また、民間パートナーが共同でスーパー・コンピューティング・エコシステムを開発するイニシアティブ「Euro HPC」の一環で、最先端の量子コンピュータをHPC環境に統合する。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。また、BMBFの助成プロジェクト「エクサスケール・ハイパフォーマンス・コンピューティング（HPC）のための欧州量子コンピューティング」（Euro-Q-Exa）が2023年9月に開始した。英国は2023年4月に10年後のビジョンを設定した国家量子戦略を発表した。2023年から量子技術への投資を増強するとしており、量子コンピューティング、通信、センシング、イメージングなどの研究拠点開発に向けて1億ポンドを投資するとしている。

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。さらに、欧州欧州宇宙機関（European Space Agency：ESA）は、2024年に、量子鍵配送システムを実証する人工衛星「Eagle-1」を打ち上げる予定である。 Eagle-1は、量子暗号化通信に関する技術検証に利用される。検証成果はEuroQCI開発の基本データとして活用される見通しである。量子暗号の衛星通信を2028年までに実用化することを目標にしている。

［その他］

韓国の通信大手KTと東芝、東芝デジタルソリューションズの3社は、2022年3月に、長距離ハイブリッド量子暗号通信ネットワークにおけるサービス品質を測定するプロジェクトを実施した。韓国ソウル特別市と釜山市間の約490km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のサービス品質を検証するものである。このサービス品質の評価基準は、KTが独自に開発・提案し、2022年2月に国連の専門機関であるITU-Tから国際標準の承認を受けたものが用いられた。

インドは、2023年4月に、量子技術の研究開発促進に対し600億インドルピー（約978億円）を投資する「国家量子ミッション」を閣議決定した。量子技術のR＆D向けに2023年から31年までの8年間、600億3,650万ルピーの予算を確保し、国内のトップクラスの学術機関や研究開発機関内に量子コンピュータ、量子通信、量子センシング、量子材料とデバイスなどテーマ別のR＆D拠点を設立する。8年以内に、最大2000量子ビットの超伝導量子コンピュータを構築する。また、インド国内の地上局と衛星間の量子通信、他国との長距離量子通信、2000 kmを超える都市間QKD、量子メモリを備えたマルチノード量子ネットワークの実現も目標に掲げている。

（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無くなる。量子誤りなしの演算が可能なト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

現在、世界の主要国は、量子コンピューティング・通信をはじめとする量子技術の研究開発に凌ぎを削っている。量子技術は、将来の社会経済システムを支える基盤としての役割を果たし、経済安全保障上でも極めて重要と考えられているからである。一方、量子コンピュータハードウェアの研究開発等は、挑戦的・総合的な理工学研究の様相を呈してきており、国際協力や国際的な人材交流も盛んになってきている。そのため、量子技術の国際標準化などオープン領域への積極的関与とともに、クローズ領域で差別化し競争力を維持するオープンクローズ戦略が重要である。

（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	◎	→	・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。
	応用研究・開発	○	↗	・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。 ・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。 ・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。
米国	基礎研究	◎	→	・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。 ・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。 ・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。
	応用研究・開発	◎	↗	・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。 ・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。 ・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。
欧州	基礎研究	◎	→	・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。 ・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。

欧州	応用研究・開発	○	↗	・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。 ・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。
中国	基礎研究	◎	→	・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。 ・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。
	応用研究・開発	○	↗	・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。 ・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キングを実証した。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。
韓国	基礎研究	△	↗	・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。 ・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。
	応用研究・開発	△	→	・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。 ・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。

（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・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.