

ムーンショットプログラム 国際シンポジウム

分科会 6

量子現象等の活用による 未踏領域の創出

令和元年10月31日

分科会主査

東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授

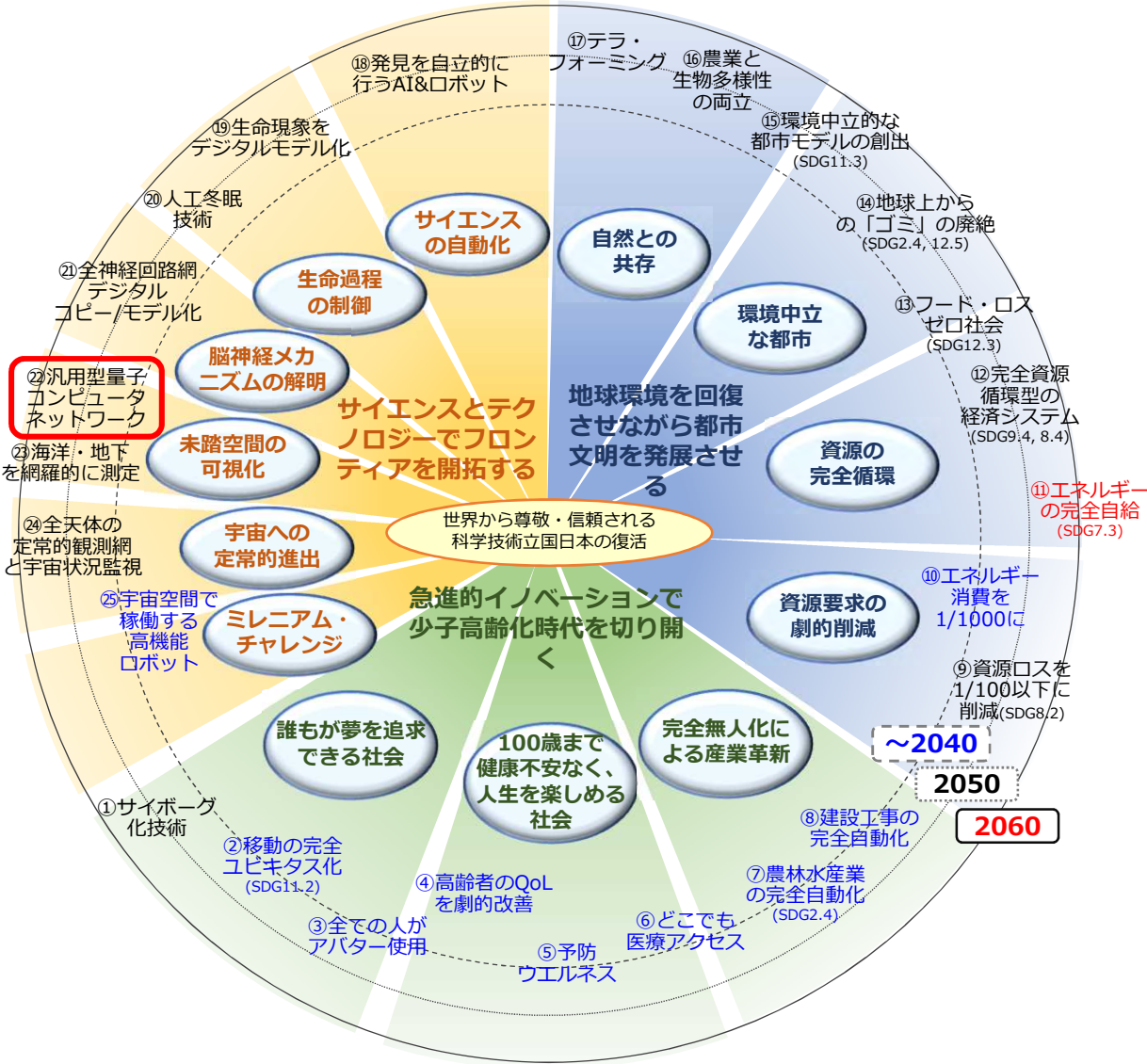
荒川 泰彦

分科会副主査

大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授

北川 勝浩

ビジョナリー会議25のミッション目標例との関連



②②を中心に、分科会を計画

分科会 6：量子現象等の活用による未踏領域の創出

量子技術は、**経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる可能性を持つ重要技術**であり、**長期的視点に立ち戦略的に推進することが極めて重要**である。

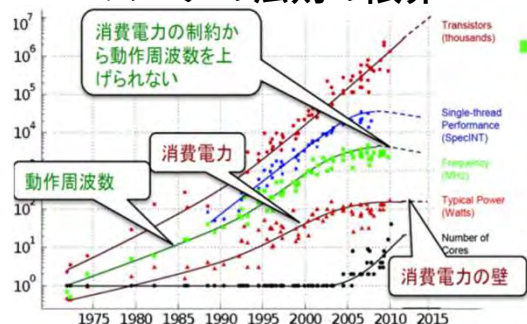
本分科会では、次世代の情報処理・通信の基盤となりうる**ネットワーク型量子コンピュータの実現に必要な量子技術**（例：量子メモリ、汎用型量子コンピュータ、量子中継技術、量子ネットワーク等）を特定し、MS目標を検討する。

ムーンショットで量子コンピュータの開発に取り組む理由

既存技術が抱える課題

- ムーアの法則に従ったデバイスの微小化・集積化による性能向上の限界
- デジタル化社会の到来による処理すべきデータ量の爆発的な増加、それに伴う計算時間や消費電力等のコストの指数関数的な増加（超ビッグデータ処理に当たり、既存技術は現実的な選択肢とならない）

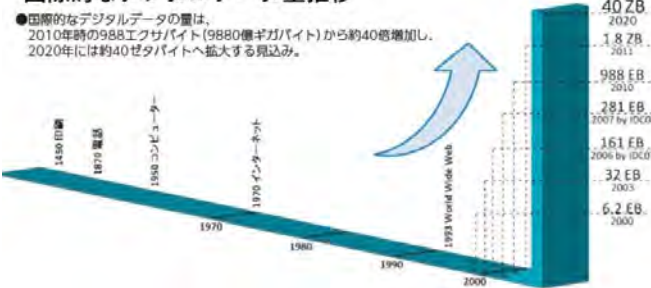
ムーアの法則の限界



Qcon Tokyo 2016 国立情報学研究所教授 佐藤一郎氏講演資料より

爆発的に増える情報量

国際的なデジタルデータ量推移



総務省「ICTコトづくり検討会議」報告書より

- ① 上記課題を克服する技術として、**量子コンピュータに対する期待**が高まっており、各国で研究開発投資が活発化
- ② 我が国として、量子コンピュータのスタンダードにつながる**野心的目標を世界に先駆けて掲げ、産学官の力を結集**して取り組むことが必要

量子コンピュータの開発

- ✓ 量子ビットの**重ね合わせ状態を活用した高速並列計算**により、スパコンでも非現実的な時間を要する一部問題を短時間かつ超低消費電力で計算
例：スパコンでは300万年かかる現在の暗号を1時間で解読
- ✓ **効率的な計算ニーズの高まりに対応**しつつ、従来扱えなかった**大規模データを活用**



○しかしながら、現在開発中の量子コンピュータは**誤り耐性を持たないため、大規模な計算から信頼できる結果を得ることは不可能**

○誤り耐性型汎用量子コンピュータの実用化には**20～30年単位の時間を要する**と見込まれ、量子技術イノベーションによる幅広い社会的課題の克服に向けて、**中長期的観点から研究開発等を進めることが必要**

ムーンショットが目指す未来像への量子技術の貢献

生産性の向上



計算流体力学

複雑な計算を伴う流体力学アルゴリズムに基づき、**製造業**における設計プロセスを改善

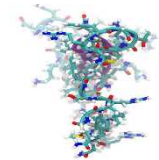
材料開発

詳細な機能解析により、物質の性能を最大限活かした**新材料の発見**を加速

健康・長寿の実現

創薬

強力なシミュレーションにより、**新薬の発見**を促進するとともに、ワークフローの効率化を通じて**低コスト化**



エネルギー

地球物理学の高度な知見を取り込んだ計算により、**石油やガスの新たな採掘現場**を発見し、採掘を最適化

量子コンピュータを始めとする 量子技術の活用による フロンティアの開拓

輸送・物流

巡回セールスマン問題など最適化問題への対応を通じ、**サプライチェーンやスケジューリング**を効率化

金融

短時間・省エネでの大規模な計算により、**短期のポートフォリオ最適化と長期のリスク分析**に対処

気象

大規模なシミュレーションにより、気象の予測精度を向上し、**早期警報や企業の価格・取引戦略**を後押し

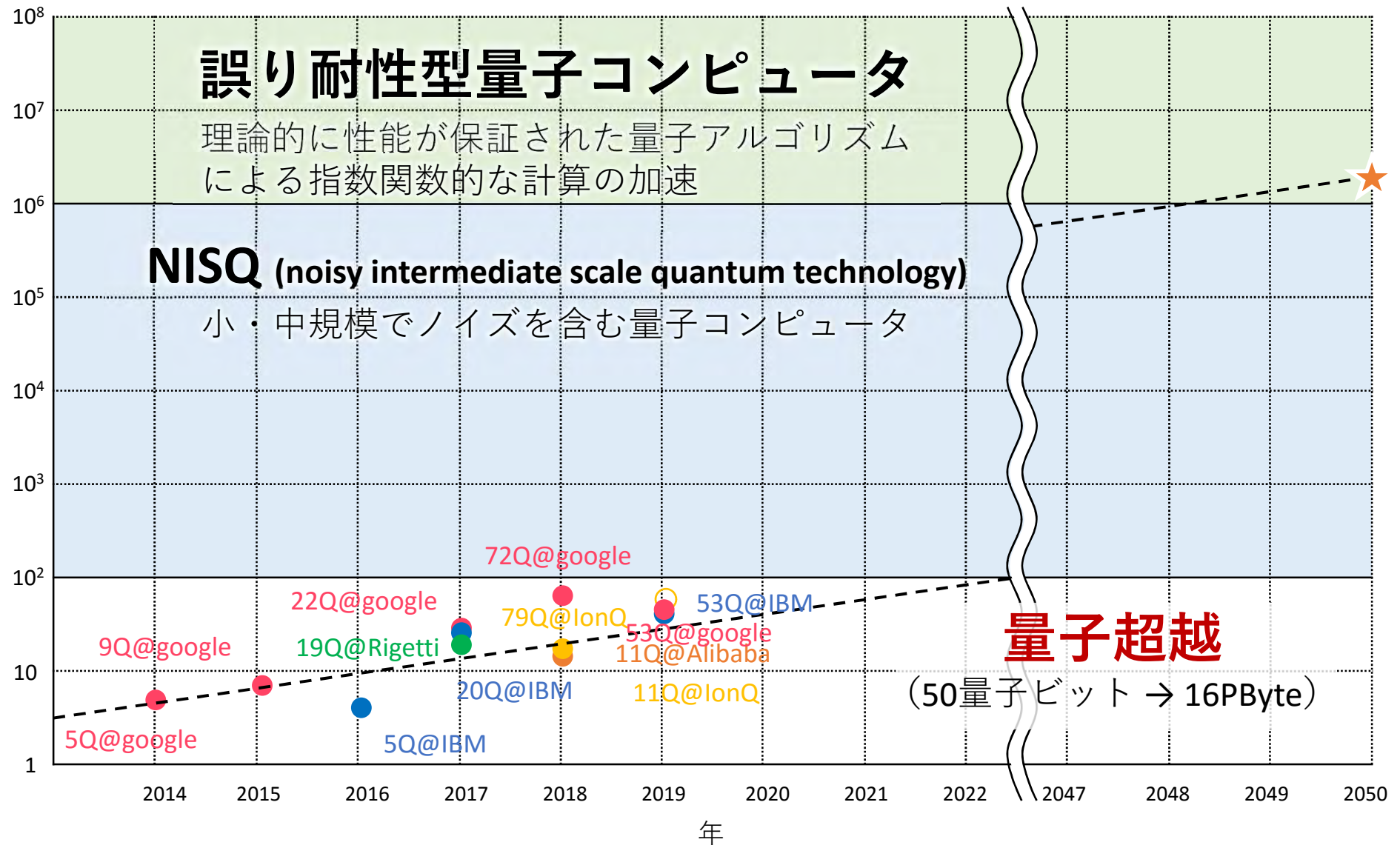


安全・安心の確保

量子技術により現代の多様な社会問題を解決し、将来の産業競争力を強化

“量子版”ムーアの法則

量子ビット数



ムーンショット目標等のイメージ

量子技術全体を底上げしつつ、目標に向かってオールジャパン体制で研究開発

【2050年をターゲットとしたムーンショット目標（案）】

「誤り耐性型汎用量子コンピュータの開発」

まだどの国も手が届いていない挑戦的な目標（30年かかると言われている）

【上記目標の実現に向けた道筋】

「分散処理型の量子コンピュータ*の開発」 「量子誤り訂正の実現」

* NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum Technology)

研究開発の過程で、超高感度MRIや安全なインターネット等に転用可能な技術など副産物を生み出し社会に還元

【研究開発の具体例】

中継・メモリ等のネットワーク

【研究開発課題の例】

- ・ 信号源：小型高速な量子もつれ光源・単一光子光源の開発
- ・ メモリ：量子ビット状態を保存できる個別アクセス量子メモリの開発
- ・ 信号変換：マイクロ波光子と量子メモリの間の量子状態転写技術の確立、量子ビットと量子メモリの接続技術の開発
- ・ 受信機：超高効率通信に向けた小型高速な光子検出器の開発

超伝導・イオン・光量子のハードウェア

【研究開発課題の例】

- ・ ノイズ耐性のある量子ビットの作製
- ・ 超伝導：大規模集積化技術の開発、量子ビット状態の安定制御技術の開発
- ・ イオン：多イオン配置に関する基礎技術の開発、イオン-光共振器との結合技術の開発
- ・ 光量子：正確な任意のゲート操作技術の確立、大規模集積・光チップ化技術の開発、分散ネットワーク技術の開発

誤り耐性の理論面も含めたソフトウェア

【研究開発課題の例】

- ・ 誤り訂正理論の構築、誤り訂正ソフトの開発
- ・ ハードウェア方式やビット結合方式等に即したミドルウェアの開発
- ・ コンピュータアーキテクチャに即したコンパイラの開発
- ・ 量子優位性を示すアプリケーションやアルゴリズム評価の手法の確立

関連技術

・ 量子センサ

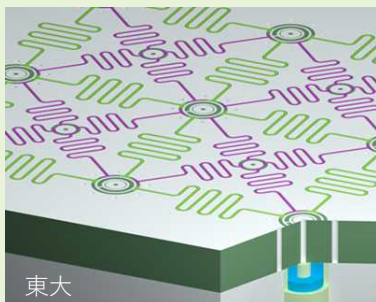
・ 量子マテリアル

・ 基礎基盤的な研究

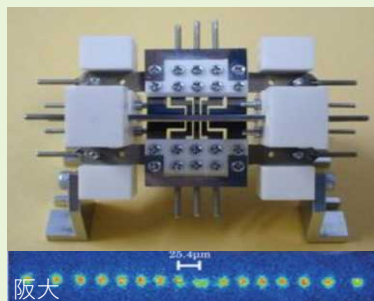
ムーンショットにおける研究開発の例

量子ハードウェア

超伝導量子コンピュータ



イオン量子コンピュータ



光量子コンピュータ



量子ネットワーク

信号源



量子メモリ

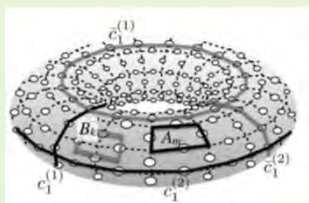


量子中継

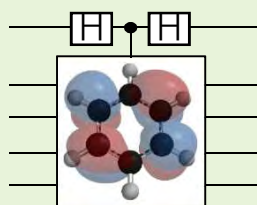


量子ソフトウェア

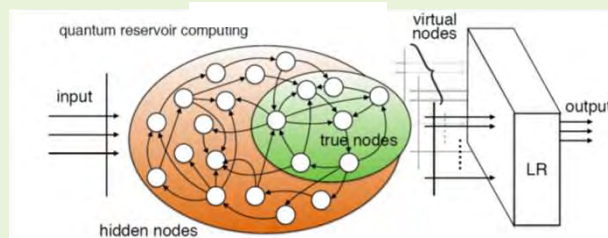
量子誤り訂正符号



量子化学計算



量子機械学習



量子セキュリティ、量子金融
計算、ブラインド量子計算、
量子プログラミング等

関連技術

量子センサ、量子材料、基礎基盤的な研究（例：微細構造解析、微細加工、光波制御・光デバイス技術、半導体技術、極低温エレクトロニクス、解析・評価技術）

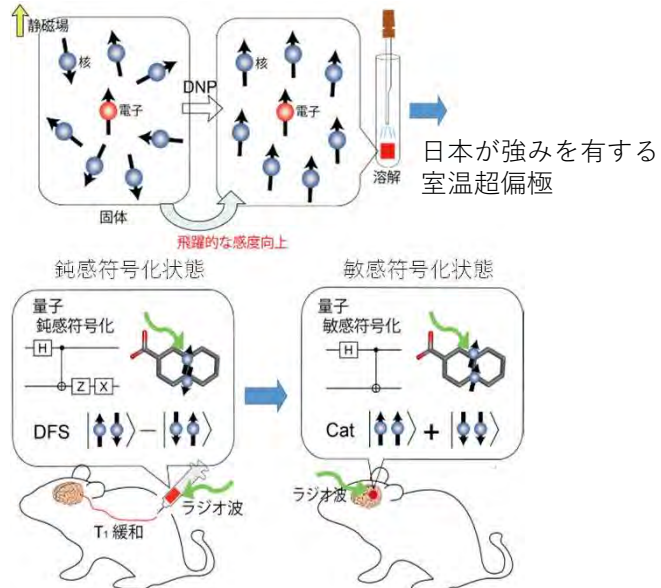
量子コンピュータのスピンアウト技術

誤り耐性型
量子コンピュータ

スピンアウト

多量子ビットが符号化された量子センサや量子通信

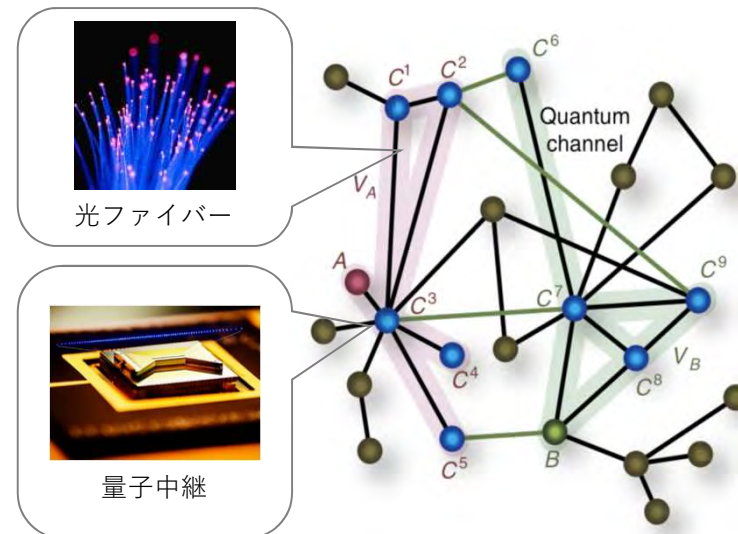
量子符号化センサ (超高感度MRI)



多量子ビット符号化センサーでのリアルタイム代謝イメージングによるがん治療効果判定

国民のQOL向上や医療の効率化を通じた健康・長寿社会の実現

量子インターネット



量子中継と量子符号化による長距離量子暗号に基づく量子インターネット

世界規模の情報セキュリティによる安全・安心な社会の実現

関連分野の取組状況概要① 量子ハードウェア

- ゲート型量子コンピュータには、超伝導量子ビット、イオントラップ、光量子等の方式が考えられており、現在の主流は、超伝導量子ビットとイオントラップの研究開発。いずれの方式でも量子の制御性・スケール化（大規模集積化）を可能とするハードウェアの開発が大きな課題
- 誤り耐性を有するゲート型量子コンピュータの実現には時間を要すると考えられ、誤り耐性のない中規模な量子コンピュータ（NISQ）が注目されている。各国で様々な方式の研究が進んでいるが、まだ決定的な方式は見出されていない
- 海外では、グローバルIT企業や大学を中心にハード・ソフトとも米国が強く、超伝導量子ビット、イオントラップ方式の研究開発が複数チームで進む。中国は産学官で超伝導量子ビット方式を追従中。開発競争が激化。国外では、全ての方式で量子ゲートが実現
- 国内の取組状況として、超伝導量子ビットについては、1999年に日本が世界で初めて制御可能な量子ビットの実験に成功。世界的研究者が研究をリードしているものの、多ビット化のためには、量子ビットの小型化、配線、ビット精度の不揃いの解消など、設計・アーキテクチャを含めた工学的課題の克服が必要
- イオントラップについては、日本国内の研究者層は極めて薄いため、研究者の育成・確保が特に重要。併せて、多体系物理の理解に基づく量子ビット制御方法の確立など基礎研究も必要
- 光量子については、ループした光回路において常温で安定した量子もつれを大量に発生させることにより、誤り訂正を可能とする汎用な光量子コンピュータを目指した研究が実施中

「量子技術イノベーション戦略中間整理」等に基づき作成

ビット方式	国内研究 ポテンシャル	研究機関例
超伝導量子ビット	◎	東京大学、IBM、Google（米国）
イオントラップ	○	大阪大学、IonQ、Honeywell（米国）
光量子	◎	東京大学、Xanadu（カナダ）

関連分野の取組状況概要② 量子ネットワーク

- **量子暗号は**、いかなる計算機にも解読できない暗号通信技術として、重要情報の通信保護の観点から期待。都市間を結ぶ**量子暗号ネットワークの広域化**や、**運用技術の高度化**、**中継ノードの安全性強化**等が課題
- 中国の人工衛星利用による衛星-地上間QKD（Quantum Key Distribution：量子鍵配送）の実験成功など、**各国が研究開発を加速**
- 日本では、NICTが中心となり、2013年に全長100km程度のテストベッド**Tokyo QKDを構築し、運用評価**を継続中。分散ストレージとの融合等で世界をリード
- **量子通信は**、超高効率の通信や長距離化のための量子中継を実現する技術。多数の量子情報処理ノードを接続し、広域量子暗号ネットワークやクラウド量子コンピューティング等を実現。微弱な単一光子に情報を載せて一定間隔で送信する必要があるため、**安定して遠距離（現状では100km程度が限界）に届ける技術**が課題。また、**量子コンピュータ等をネットワーク化するための量子中継・メモリ等の技術**も課題
- 欧州がQuantum Internet Allianceを立ち上げ、都市間の量子通信の実験を組織的に進めるなど、**世界中で量子ネットワークに関する研究開発が実施**
- 課題解決に向けて、日本が高い作製技術を有するダイヤモンドNVセンタ等を用いた単一光子源が注目。横浜国立大学は、**量子中継の基礎技術**として、ダイヤモンド中の炭素同位体を量子メモリとして用い、量子テレポーテーションの原理を応用し、光子の量子状態を維持したまま盗聴の可能性なく**情報を転写することに成功**。引き続き、量子ネットワークを構成する量子デバイスの性能の高度化が必要

「量子技術イノベーション戦略中間整理」及び蒲生秀典（2019）等に基づき作成

構成技術	国内研究 ポテンシャル	研究機関例
暗号鍵配送	◎	NICT、中国科学院、DARPA、Quantum Xchange 社（米国）
中継・メモリ	○	大阪大学、NICT、横浜国立大学、京都大学、Chicago Quantum Exchange（米国）、AIT（オーストリア）、ペリメータ理論物理研究所、ウォータールー大学（カナダ）
ネットワーク化	○	大阪大学、NTT、NICT、Quantum Internet Alliance（欧州）、デルフト工科大学（オランダ）

関連分野の取組状況概要③ 量子ソフトウェア

- 量子ソフトウェアについては、誤り耐性を有するゲート型量子コンピュータの実現には時間を要すると考えられる現在、NISQ用の開発が中心であるものの、ハードウェアの設計指針が確定しておらず、**種々のハードウェアに対する最適なアーキテクチャの構築**（量子回路の実装方法や前処理の最適化等）が必要。加えて、**論理ビット処理上の問題の解決**（モデリング、高速プログラミング等）、**量子言語とコンパイラの開発**（誤り訂正理論等）、**量子優位性を生かしたアプリケーションの開発**及び**ユーザ環境の整備**が課題
- 海外においては、**大学やグローバルIT企業を中心に、ハードと同様、米国が強い**。シカゴ大学を中心とした開発拠点（EPIQC）が実用スケールの量子コンピュータシステムの研究を開始したほか、デューク大学を中心とした拠点（STAQ）がイオントラップ型のアーキテクチャの研究を開始。IBM、Google、Microsoft等は、量子ソフトウェア開発プラットフォームを公開し、ソフトウェアライブラリを拡充。また、欧州は2017年にQuantum Software Manifestoを発表し、ハードウェアと量子ソフトウェアの統合的研究、量子ソフトウェア、アルゴリズムの開発、新しい通信プロトコルの開発を実施
- 我が国においては、大阪大学、慶応大学等がソフトウェア研究を実施。量子コンピュータエミュレータについては、**大阪大学・京都大学が開発したものが世界最速**。また、MDR、QunaSys等のベンチャー企業が、ハードウェア開発企業と使用契約を結んだ上、ソフトウェア開発及びコンサルを実施し、社会実装を目指している。研究者層は厚くはないものの、**国際的にも通用する若手研究者が存在**。誤り耐性の理論も含め、これまでの研究実績を活用し、量子優位性を持つアルゴリズムの検証、量子加速が可能となるアプリケーションの探索、ハードウェアの検証ツールの開発が期待

「量子技術イノベーション戦略中間整理」及び根本香絵（2018）等に基づき作成

構成技術	国内研究 ポテンシャル	研究機関
基礎理論	◎	大阪大学、京都大学、慶応大学、シカゴ大学（米国）、アムステルダム大学（オランダ）
アルゴリズム	◎	
アプリケーション	◎	

量子技術を巡る各国の状況

【諸外国の状況】

- 米欧中を中心として、「量子技術」を国家戦略上の重要技術と位置づけ、戦略策定、研究開発投資の拡充、拠点形成等を急速に展開
- 各国の大手企業は積極的な投資に取り組んでおり、ベンチャー企業の設立・資金調達も活発化

	政府の取組	代表的な企業の動向
	➢ 2016年時点で、量子コンピュータを含む量子科学技術分野に、各政府機関が<u>年間2億ドル（217億円／年）</u>を投資 ➢ 2018年12月、トランプ大統領が「国家量子イニシアチブ法」に署名。米国科学技術政策局下に専用オフィスを設置。量子情報科学を推進する活動に<u>5年間で総額12.8億ドル（1,391億円）</u>を投資 ➢ 全米10か所程度に研究開発や人材育成の<u>拠点を形成</u>	大企業からベンチャーまで、多くの企業が量子コンピュータを開発中 
	➢ 2018年から、「Quantum Technology Flagship」を開始し、量子コンピュータを含む量子科学技術に<u>10年間で総額10億ユーロ（1,199億円）</u>を投資 ➢ 加えて、各国が独自予算で研究開発を実施。蘭・英等は、国際的な拠点を形成。Intel等の民間投資を呼び込み	量子コンピュータのソフトウェア、通信・暗号、関連技術が主体 
	➢ 2015年、量子コンピュータ開発に取り組むため、中国科学院がAlibabaグループと共同で「量子計算実験室」を設立。現在、<u>760億元（1兆1,658億円）</u>をかけて「量子情報科学国家実験室」を建設中（2020年完成予定） ➢ 安全保障の観点から、衛星通信の活用など量子暗号・通信に関する取組を拡大	巨大IT企業が自社内に量子コンピュータ研究チームを設置 

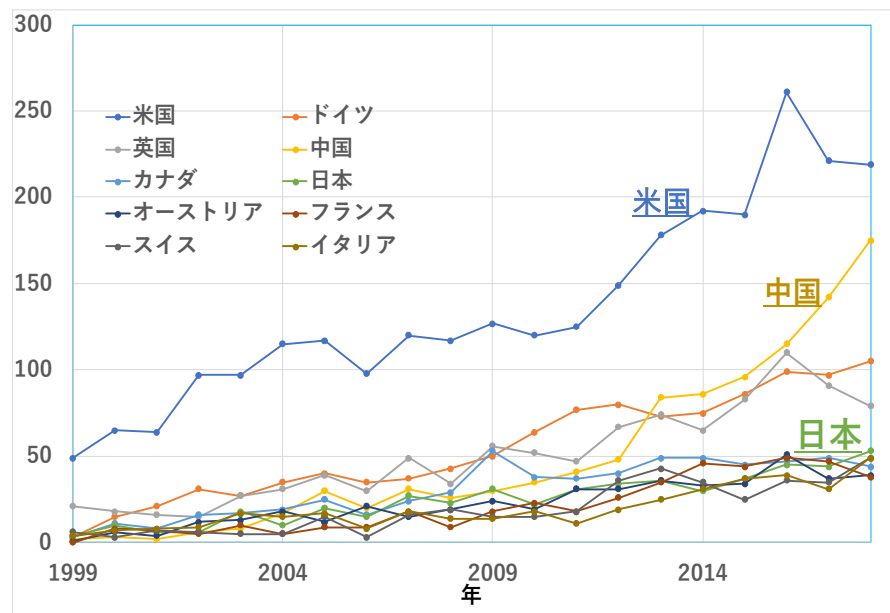
【我が国の状況】

- 長年にわたる研究の蓄積を通じ、**基礎理論や基盤技術等に優位性あり**
- しかしながら、諸外国と比べて**研究開発投資は見劣りし、このままでは致命的な遅れをとるおそれ**

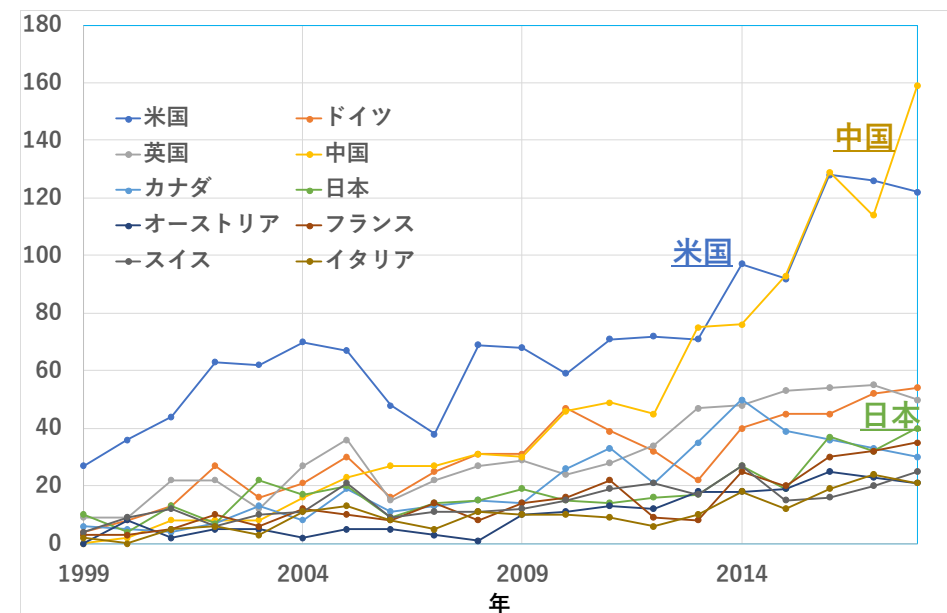
引用数TOP10%の論文数から見た日本の現状

- 「ハードウェア」と「ソフトウェア」の研究レベルの指標となる「量子情報処理」関連の論文数及び「中継・メモリ等のネットワーク」の研究レベルの指標となる「量子通信・暗号」関連の論文数を調査
- 米国の文献数が圧倒的に多い。近年、中国の加速度的な伸びが顕著であり、一部の分野では米国を追い抜いている
- 日本は欧州諸国とほぼ同等。諸外国にこれ以上引き離されないためにも、**研究開発力の更なる強化が必要**。
特に、日本は、1999年の「超伝導回路による量子ビット」に関する論文など、質の高いエポックメイキングとなる論文を発表しており、**高いポテンシャルを有している**

①量子情報処理



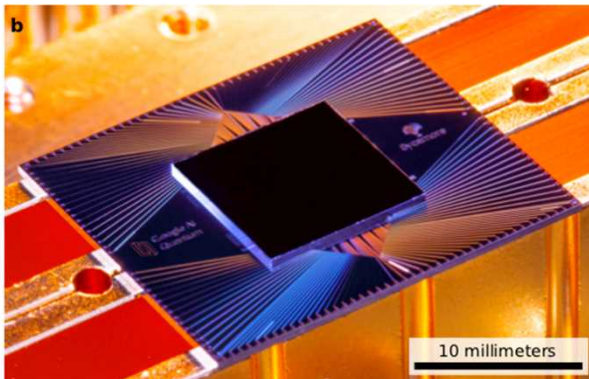
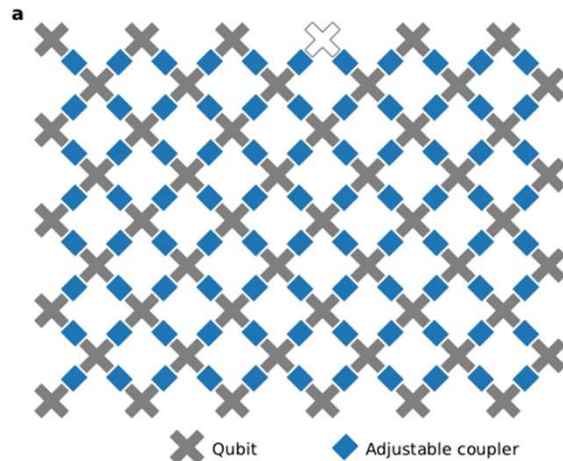
②量子通信・暗号



エルゼビア Scopusカスタムデータに基づきJSTが集計・作成

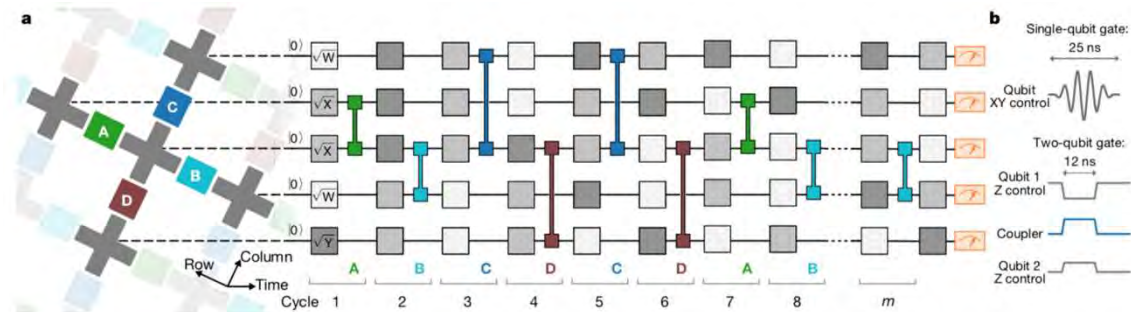
【参考】Googleが達成した量子超越性とは

53量子ビット
→ 8×10^{15} 次元



Google team, Nature **574** 510 (2019)

2次元正方格子上でランダムな量子回路



総合忠実度 (total fidelity)

$$(0.9938)^{430} \times (0.9984)^{1113} \times (0.965)^{53} = 0.00176$$

- ランダムな量子回路の出力
- 量子コンピュータで実際に生成 = 200秒
- スパコンで計算 > 1万年 (2.5日 by IBM)
- 量子コンピュータが得意な問題について優位性を示したに過ぎない
- スパコンでも不可能なことが量子コンピュータでできるようになった
- 一つのマイルストーンに過ぎず、有用な問題を計算可能な量子コンピュータを実現するためには、20～30年程度を要するということが専門家の一致した見解

分科会における議論の内容

- ✓ **2050年のムーンショット目標の設定**
 - 国際的に共有・共鳴できる目標を設定する
- ✓ **目標達成時に実現が期待される社会像の明確化**
 - 社会的インパクト、倫理的課題も含む
- ✓ **ロードマップとマイルストーンの設定**
 - ムーンショットの事業期間中に達成すべき目標
 - 目標達成に向けて取り組むべき具体的な技術的課題や研究開発内容
 - 長期的課題を排除しない

等