

【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」

研究開発構想

令和2年2月
文部科学省

1. ムーンショット目標

文部科学省は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「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¹を実現」

- ・ 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。
- ・ 2030年までに、一定規模のNISQ量子コンピュータ²を開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。

2. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）での議論を踏まえ、現時点での研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

従来のコンピュータの進歩が限界に達すると言われている中で、Society 5.0の実現に向けて爆発的に増大する様々な情報処理の需要に対応できるようにすることが重要であり、そのためには、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の実現が鍵となる。

¹ 誤り耐性型汎用量子コンピュータは、大規模な集積化を実現しつつ、様々な用途に応用する上で十分な精度を保証できる量子コンピュータ。

² NISQ(Noisy-Intermediate Scale Quantum)量子コンピュータは、小中規模で誤りを訂正する機能を持たない量子コンピュータ。

誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するためには、図1に示したハードウェア、ソフトウェア、ネットワーク及び関連する量子技術の研究開発を広く推進するとともに、適切に統合していく必要がある。これらが推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域である。

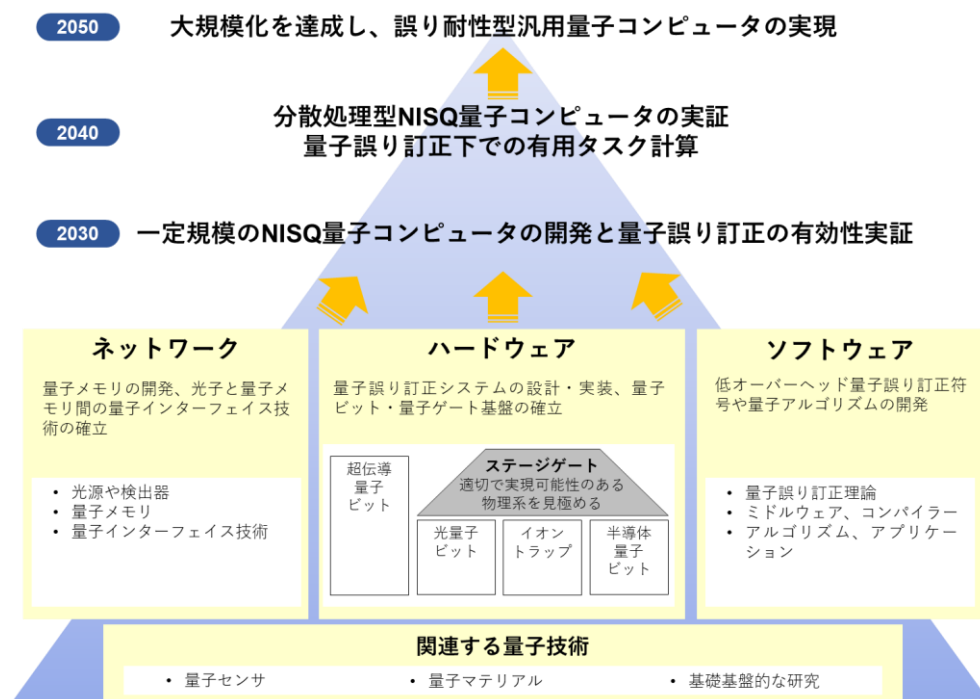


図1. 誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に必要な研究開発の主な分野・領域

(2) 目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発プログラムにおいては、図1に示す通り推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域を定め、ムーンショット目標である、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に貢献する挑戦的な研究開発を進める。なお、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、最新の科学的動向を調査し研究開発の推進に活かす。

具体的には、量子ビット・量子ゲート基盤等のハードウェア、量子誤り訂正理論等のソフトウェア、量子インターフェイス等のネットワークに関する研究開発が想定される。

ハードウェアの研究開発については、超伝導量子ビット方式とともに、光量子ビット、イオントラップ、半導体量子ビット等の各方式の中で有望な複数の方式について並行して研究開発を進め、ステージゲートなどの適切な時期に実現可能性や大規模化の可能性等の観点から最適な方式を見極める。

なお、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとする。

(3) 目標達成に向けた研究開発の方向性

○ 2030 年

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。

○ 2050 年

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。

2050 年までに誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するためには、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る。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を達成し、大規模化に取り組む必要がある。このため、2030 年までの目標は、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となる。図 2 に、本研究開発構想の実現によりムーンショット目標の達成を目指すための研究開発の進め方を示す。

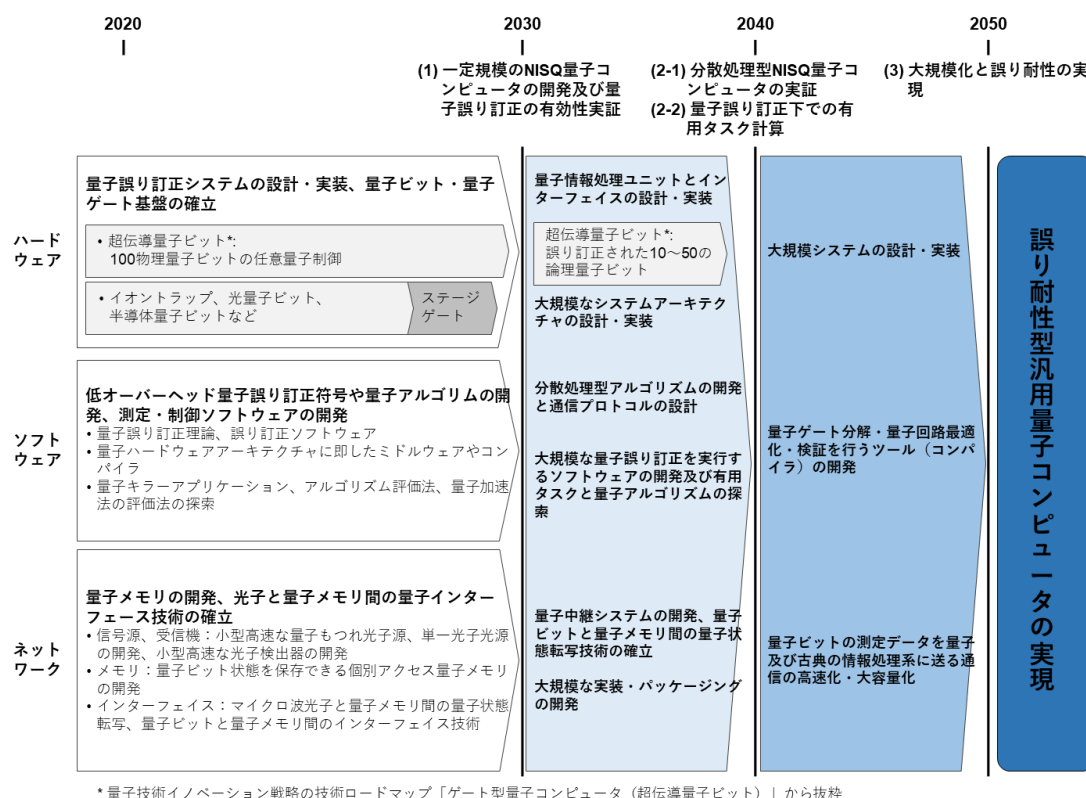


図 2. 誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けた研究開発の進め方

＜参考：目標達成に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウムの Initiative Report において分析された内容を、要約して以下に示す。

（１）目標に関連する分野・技術群の構造

量子コンピュータは、量子コヒーレンスや量子もつれといった量子力学的な性質を操作・制御、利活用する量子技術の代表例である。図3に量子技術の俯瞰図を示す。量子コンピュータ・シミュレーション、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子マテリアルの主要4領域と、それらを深化、発展させる共通原理・共通ツールや、それらだけではカバーできない新たな量子科学技術の種となる新学理・新技術を含む共通量子技術基盤の領域から構成される。

誤り耐性型汎用量子コンピュータの開発に当たっては、上記に加え、材料技術、マイクロ波技術、半導体集積回路で培われたプロセス技術、設計技術、周辺回路技術等の様々な技術要素を組み合わせる必要があり、挑戦的な研究開発が求められる。



図3. 誤り耐性型汎用量子コンピュータに関連する分野・技術群の構造

（出典）JST CRDS 戦略プロポーザル 量子2.0 ～量子科学技術が切り拓く新たな地平～（2019年）を元に作成

（２）関連する研究開発の動向

① 特許マップ

関連する特許 4,088 件の内容の類似度に基づきマッピングし、現在までの量子技術の開発状況を可視化した（図 4）。類似特許のクラスターを 30 個特定し、大域的な構造として「量子コンピュータ」、「量子ビット・量子ゲート」、「量子通信・量子暗号」及び「量子デバイス」を同定した。特に、本目標と関連の深い「量子コンピュータ」区分には 173 件の特許が含まれ、「量子演算装置」と「超伝導量子コンピュータ」のクラスターを擁する。さらに、「量子ビット・量子ゲート」区分にも量子コンピュータ用途の特許が含まれている。

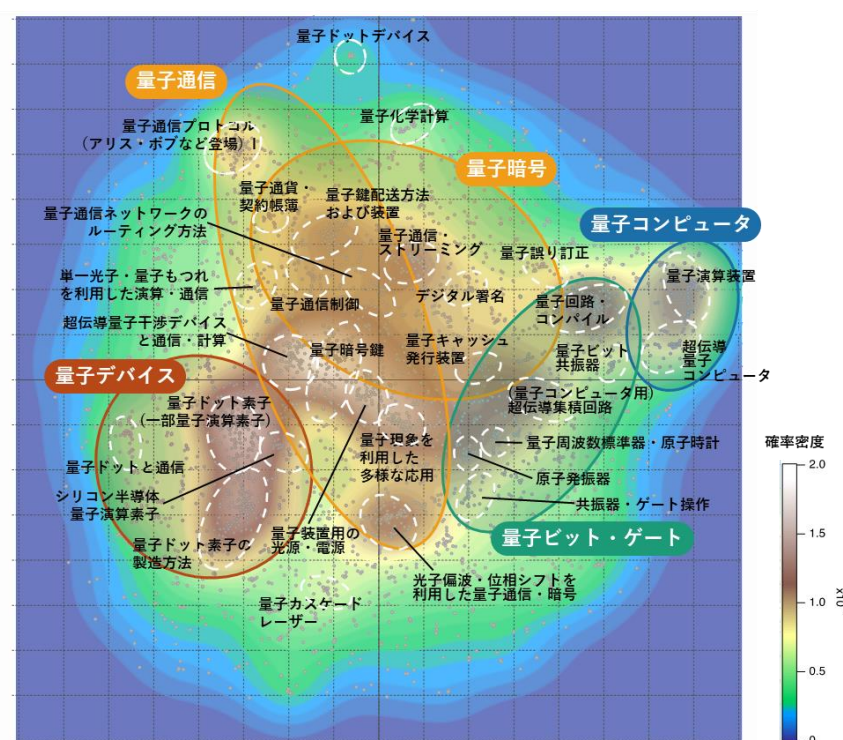


図 4. 量子技術関連特許マップ（カーネル確率密度推定）

（出典）JST CRDS 調査報告書 世界特許マップから見た量子技術 2.0（2019 年）

図 5 には、1990 年以降 2018 年までの 29 年間を 6 期間に分けて、それぞれの期間内に公開された特許の件数を技術領域別にプロットした。

近年（2015～18 年）は他期間と比べて年数が短いにもかかわらず、公開件数はどの技術区分でも期間中最多となっている。特許マップでは「量子暗号鍵」領域を代表として「量子通信・量子暗号」区分で極めて活発な特許公開活動が行われたことがうかがえる一方、「量子演算装置」、「量子回路・コンパイル」、「超伝導集積回路」など、「量子コンピュータ」、「量子ビット・量子ゲート」区分においても精力的に特許が公開されている。

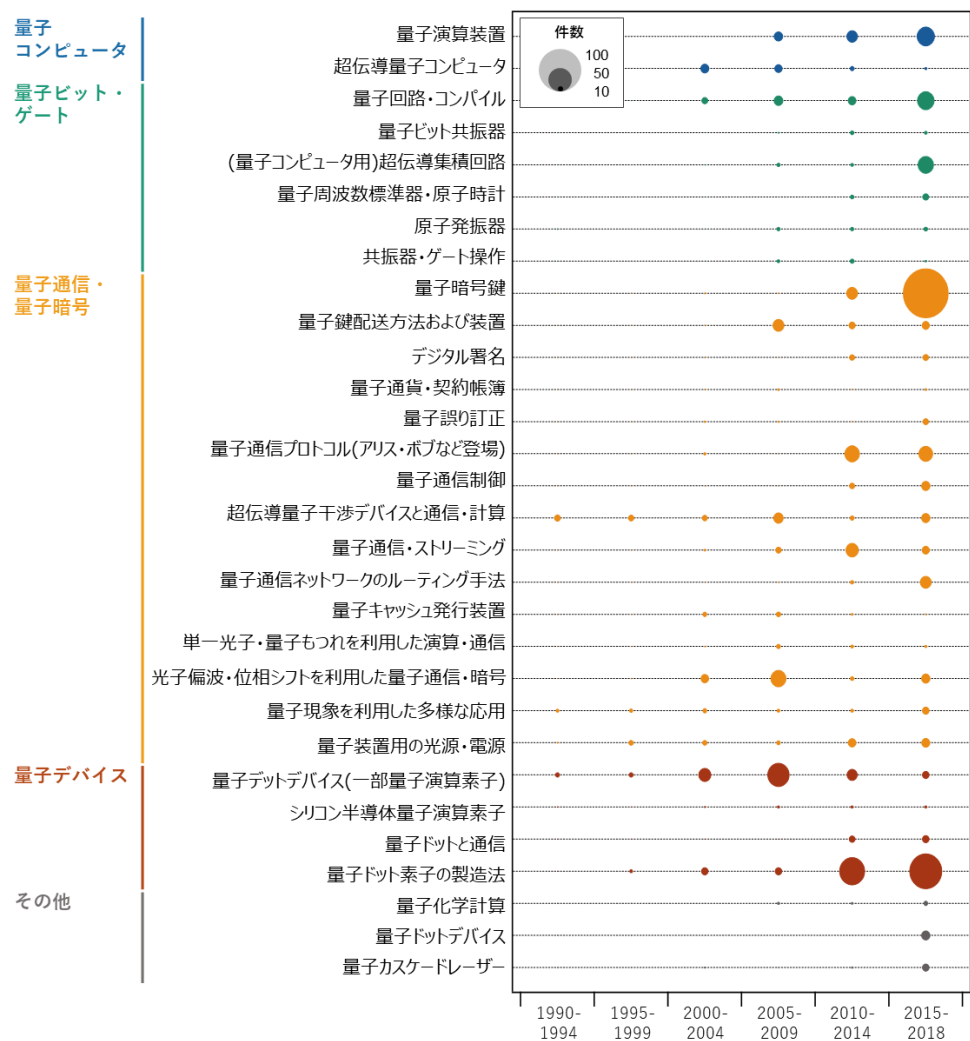


図5. 量子技術関連特許の技術領域別の公開件数推移

(出典) JST CRDS 調査報告書 世界特許マップから見た量子技術 2.0 (2019 年)

② 論文数動向

量子技術に関する学術論文の動向を Scopus データベースで調査した。「quantum computer」、「quantum communication」、「quantum sensor」又は「quantum sensing」、「quantum simulation」又は「quantum simulator」をそれぞれタイトル・アブストラクト・キーワードに含む論文・プロシーディングス・レビューを抽出し、出版数の年次変化を図6に示した。

その結果から、量子技術の研究コミュニティの活動が世界的に活発化している様子がうかがえる。特に、量子コンピュータに関する論文は1994年頃から増加し始め、1999年及び2010年に文献数の増加率が変化する変曲点が確認できる。1999年は中村・蔡らによる超伝導量子ビットの発表年であり、文献中の超伝導量子ビットに関する論文はこの年を機に増加傾向にあった。

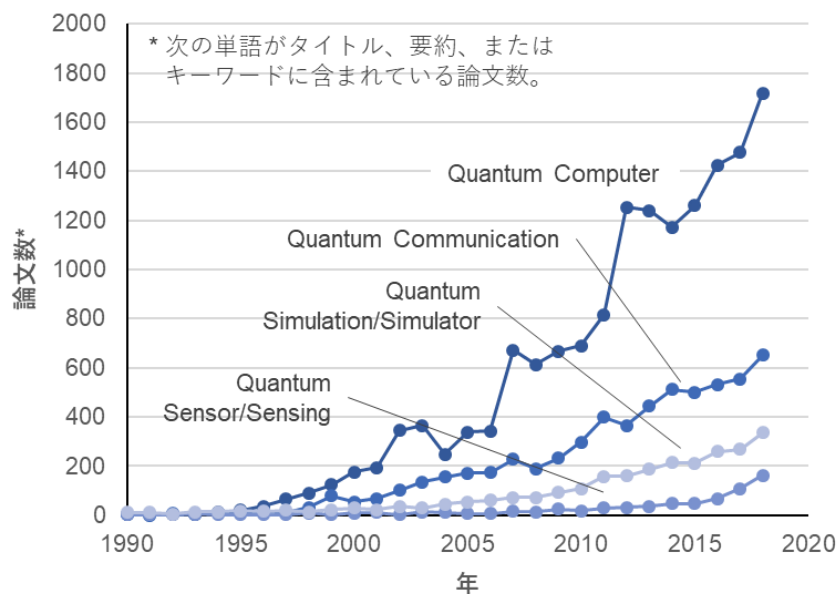


図6. 量子技術関連論文数の推移

さらに、「quantum computer」を含む文献を母集団とし、コンピュータ科学に関連する用語 (algorithm、software、compiler、programming、architecture、instruction、device、network) を含む文献を抽出し、経年変化を図7に示した。ハードウェアとソフトウェアの観点からは、「device」及び「algorithm」と比べ、計算機として必須となる「software」や「compiler」に関する論文は相対的に少ない。しかし、全体としては増加傾向であり、とりわけ2010年頃からの傾きの増加は多くの技術分野で共通した傾向である。

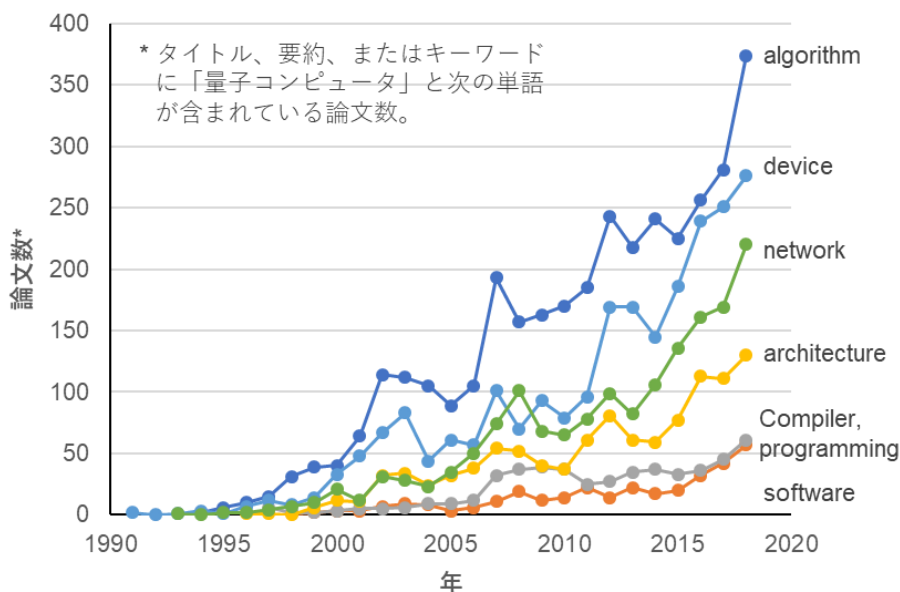


図7. 量子コンピュータ関連論文数の推移

③ 量子ビット数の推移

2014 年からこれまでに発表された量子ビット数と発表者の年次推移を図 8 にプロットした。現在の量子コンピュータの研究開発の主眼は、量子誤り訂正符号の実装と、中規模の量子コンピュータの実現である。また、その中でハードウェア的な実現可能性が見えてきた NISQ 量子コンピュータを、量子超越性の実証（おおむね 50 量子ビット以上、ゲート誤り率は 0.1%を切る精度が必要）や量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの試行など、何らかの計算タスクに利用する動きも見られる。全体としては、量子誤り訂正符号の有効性実証とその上での計算タスクの実行は、究極のゴールである誤り耐性型汎用量子コンピュータに至る重要なマイルストーンとされている。

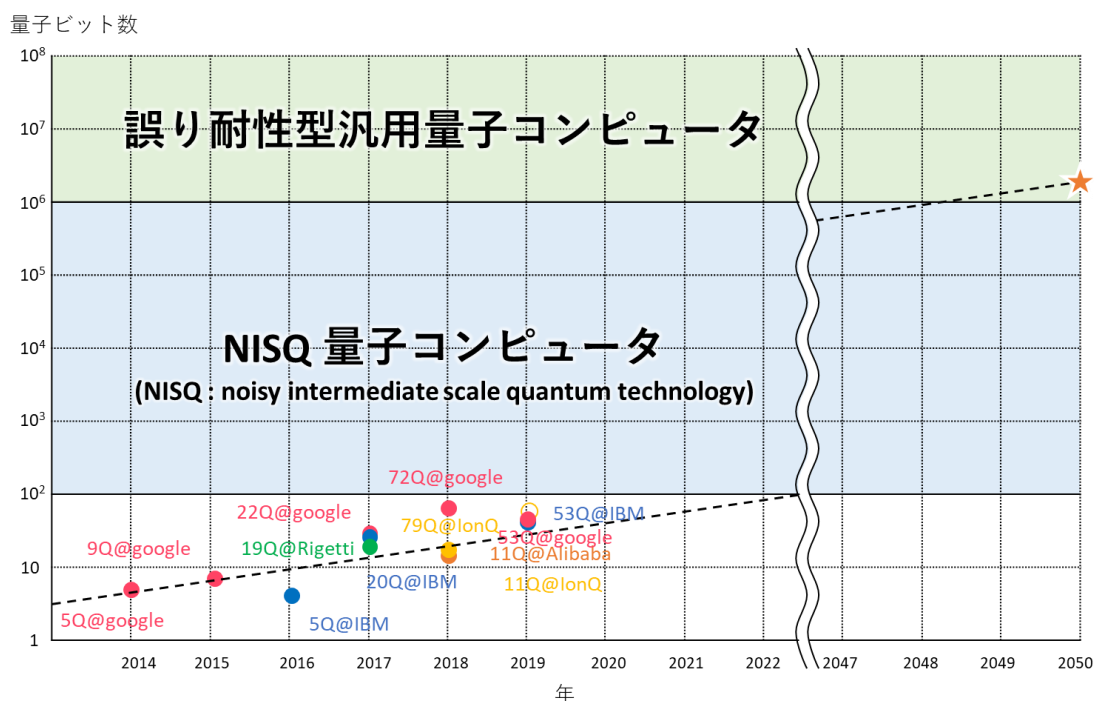


図 8. 量子版ムーアの法則

（３）日本の強み、海外の動向

研究開発の実施に当たり、海外の研究機関との連携・役割分担を図るためには、米国や欧州など量子技術に高い研究技術レベルを有する国・地域との間で、我が国の強み・競争力、研究開発に関するメリット・デメリットを勘案した上で、具体的協力を推進していくことが肝要である。そこで、ハードウェア、ソフトウェア及びネットワークの国内外での研究開発について、国内外の取組状況を以下のとおりまとめた。

① ハードウェア

海外では、グローバル IT 企業や大学を中心にハードウェア、ソフトウェアとも米国が強く、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によって進められている。中国は産学官で超伝導量子ビット方式を追従中であり、開発競争が激化している。総じて、国外では全ての量子ビット実装方式で量子ゲートが実現されている。

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し、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、ビット精度の不ぞろいの解消など、設計・アーキテクチャを含めた工学的課題の克服が必要である。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・確保が特に重要である。あわせて、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と認識されている。光量子ビットについては、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行われている。半導体量子ビットの系は、従来の CMOS 回路技術との整合性が良く、その豊富な技術基盤を量子コンピュータ開発に転用出来ると期待されているが、高忠実度の 2 量子ビットゲートの実装などに課題がある。

② ソフトウェア

米国では、大学やグローバル IT 企業を中心に、ハードウェアと同様、研究開発が盛んに実施されている。米国国立科学財団の支援によるプロジェクトが実用スケールの量子コンピュータシステムの研究やイオントラップ型のアーキテクチャの研究を開始している。IT 企業は量子ソフトウェア開発プラットフォームを公開し、オープンソースのソフトウェアライブラリも拡充している。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中である。

国内の取組状況としては、大学や国立研究所等において量子情報理論やアルゴリズム研究が実施されている。量子コンピュータエミュレータについては、大学やベンチャー企業が開発したものが公開・利用されている。また、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ティングを実施し、社会実装を目指している。国内の研究者やエンジニア等の数は十分ではないが、国際的に高い評価を得ている優秀な日本人研究者がおり、誤り耐性理論などの研究実績がある。

③ ネットワーク

欧州では 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されている。また、中国は人工衛星利用による衛星-地上間 QKD (Quantum Key Distribution: 量子鍵配送) の実験に成功した。

国内の取組状況としては、全長 100km 程度のテストベッド Tokyo QKD Network が 2013 年に構築され、運用評価を継続中であり、分散ストレージとの融合等で世界をリードしている。また、日本では、冷却原子量子メモリと通信波長光子の量子もつれを生成する実験に初めて成功し、世界的に注目されている。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されている。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している。さらに、全光量子中継の実証実験も世界に先駆けて成功している。

PD による補足

PD: 北川 勝浩（大阪大学・教授）

1. 募集・選考の方針等

（１）募集・選考の方針

目標として定められた「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」に向けたシナリオを提案してください。現在の社会と技術から未来を予測する「フォーキャスティングする」考えと、2050 年の社会を起点にして逆算し今何をすべきかを「バックキャスティングする」考えとの両方を考慮して、2050 年までのシナリオと PM 採択時点から 3 年、5 年、10 年目までのシナリオを提案してください。提案されたシナリオ等の内容には、2050 年の目標達成にもつながること、挑戦的かつ革新的であること、ELSI などの社会受容性も考慮して、どのように社会に実装・適応していくのかの実現可能性の根拠も含めてください。

（２）提案内容

目標として定められた誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するには、膨大な数の量子ビットを集積して、量子誤り訂正符号によって冗長性を持たせるとともに、量子誤りを誤り耐性閾値以下にする必要があると考えられます。

そこで、研究開発構想に示される通り、2030 年までのマイルストーンとして、一定規模の量子コンピュータを開発して量子誤り訂正の有効性を実証することを目標にするとともに、「１）ハードウェア」、「２）通信ネットワーク」、「３）理論・ソフトウェア」の３つのカテゴリに分けて研究開発プロジェクトを実施することを想定しています。具体的には、ハードウェアについては複数の有望な研究開発プロジェクトを競争的に実施してもらいながらその実現可能性を見極めつつ、通信ネットワーク及び理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトも一体となって、本目標の達成に向けて研究開発を実施してもらいたいと考えています。そこで、以下の１）～３）のいずれかのカテゴリで研究開発プロジェクトを提案してください。

１）ハードウェア

誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するための有望なハードウェアとして異なる物理系に基づく複数の研究開発プロジェクトを募集します。

２）通信ネットワーク

必ずしも単体では大規模ではない量子コンピュータのハードウェアを量子的に結合して分散型の大規模量子コンピュータを実現するために必要となる量子通信ネットワークの研究開発プロジェクトを募集します。

3) 理論・ソフトウェア

誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現するための理論・ソフトウェアの研究開発プロジェクトを募集します。

PM 採択時点から 3 年、5 年、10 年目の達成を目指すマイルストーンについては、ハードウェア、通信ネットワーク、理論・ソフトウェアのそれぞれの立場で設定して結構です。ただし、2050 年の目標である誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて、それぞれの立場で、他のカテゴリの研究開発プロジェクトに何を求め、自身の研究プロジェクトがどのように貢献するのかというシナリオを検討の上、提案してください。

2. 研究開発の推進に当たっての方針

(1) ポートフォリオ管理

ポートフォリオ管理として複数の研究開発プロジェクトの関係性も考慮した上で、PM 間の協業や競争等を求めることになります。そのため、PM として採択された後の作り込み期間においては、提案されたシナリオに対して PM 採択時点から 3 年、5 年、10 年目までのシナリオ及び達成を目指すマイルストーンの明確化、合理的な推進計画及び予算計画の見直しなどに関して、PD 等と相談して行うものとします。

特に、各研究開発プロジェクトの作り込み期間中、1. (2) に記載した 3 つのカテゴリの各研究開発プロジェクトは、相互に協力することで本目標の達成に向けた研究開発を着実に進められるよう研究開発プロジェクトの計画調整を行います。また、研究開発プロジェクトの実施中は各研究開発プロジェクト間で相互に緊密な連携を図りつつ研究開発を実施していただきます。

なお、光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) を始めとする関連する国内の主要な研究開発事業の成果を十分に踏まえつつ相補的な研究開発を進めることで、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けて効果的に研究開発を実施していただきます。

(2) 産学連携

誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現に向けては、材料、マイクロ波技

術、光技術、半導体集積回路で培われたプロセス技術、設計、実装、周辺回路技術等の様々な技術要素を組み合わせしていくことも必要であると考えます。そこで、これらの技術・ノウハウ・人材を持つ民間企業との密接な協業についても研究開発プロジェクトの開始早期からの計画・活動を求めます。

（３）人材育成について

目標として定められた「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」を達成するには、今から長期的な視野に立ち人材層を厚くしていくことが必須です。そこで、研究開発の推進とともに、人材育成への積極的な貢献を求めます。