

No. 1139 (2021. 3. 4)

量子コンピュータの研究開発と政策動向

はじめに

I 量子コンピュータの概要

- 1 量子コンピュータとは
- 2 研究開発の動向

II 量子コンピュータの研究開発に関する諸外国の政策動向

- 1 米国
- 2 欧州
- 3 中国

III 量子コンピュータの研究開発に関する日本の政策動向

- 1 政策文書における量子技術の位置付け
- 2 量子技術イノベーション戦略
- 3 我が国の主な研究開発プロジェクト

おわりに

キーワード：量子コンピュータ、量子情報科学、量子技術、ムーンショット、Q-LEAP、量子技術イノベーション戦略

- 量子力学の原理を応用して計算を行う量子コンピュータは、従来のコンピュータを大きく上回る計算能力を持つとされ、世界各国の研究機関がその実現に向けた研究開発に取り組んでいる。
- 米国、欧州、中国などにおいては、量子コンピュータの研究開発を推進するための国家的な研究開発戦略が策定されており、それらに基づいて大規模な研究開発プロジェクト等に巨額の資金が投じられている。
- 我が国においても、令和2（2020）年1月に、量子技術に関する国家戦略として「量子技術イノベーション戦略」が策定された。国の研究開発プロジェクトも立ち上げられ、量子コンピュータの実現に向けた研究開発が始まっている。

国立国会図書館 調査及び立法考査局

文教科学技術課 なかむら しんや 中村 真也

はじめに

半導体加工技術の高度化によるコンピュータの性能向上に限界が指摘される一方、ビッグデータ解析や人工知能を始めとする様々な分野で、コンピュータの計算能力に対する要求は高まっている。こうした中、従来のコンピュータとは異なる仕組みによって高速に計算を行うことができる「量子コンピュータ」に注目が集まっており、その実現に向けて、世界各国の政府や企業が大規模な投資を行って研究開発を進めている。

本稿では、量子コンピュータの仕組み、研究開発の動向、今後の研究課題等について概観した上で、国内外の量子コンピュータの研究開発に関する政策の動向をまとめる。

なお、「量子アニーリングマシン」や「量子アニーラ」と呼ばれる、最適化問題を解くことに特化した計算機が実用化されつつあり、これらの計算機も「量子コンピュータ」として扱われることがあるが、動作原理や応用範囲が異なるため、本稿では扱わない¹。

I 量子コンピュータの概要

1 量子コンピュータとは

量子コンピュータは、原子や電子などの微視的な物体の振る舞いを記述する量子力学の原理を応用して計算を行う計算機である。ここでは、現在一般に使用されているコンピュータ（「古典コンピュータ」と呼ばれる。本稿でもこの呼称に従う。）と比較しつつ、量子コンピュータの特徴的な要素を述べ、その応用が期待される例について紹介する。

(1) 量子コンピュータの構成要素（量子ビットと量子ゲート）

量子コンピュータで扱う情報は「量子ビット」によって表現される。古典コンピュータの場合は、情報は「0」と「1」の2つの状態を取るビットの組合せによって表され、この表現に基づいてあらゆる計算が行われる。一方、量子コンピュータで用いられる量子ビットは、ビットの概念を量子力学の原理に基づいて拡張したもので、「0」と「1」の2状態だけでなく、それらの状態を同時に取る「重ね合わせ状態」も表現することができる²。

複数の量子ビットを用意することで、多数の状態を一度に表すことが可能になる。例えば、2つのビットの組合せには「00」、「01」、「10」、「11」の4通りが存在するが、重ね合わせ状態にある2つの量子ビットを用意すれば、一度にこれら4通りの重ね合わせ状態が表される。量子ビットを増やせば重ね合わせられる状態の数は指数関数的に増加し、仮に10個の量子ビットがあれば約1,000の状態が、100個の量子ビットがあれば約100兆の状態が一度に表現され

* 本稿のインターネット情報の最終アクセス日は、令和3（2021）年2月22日である。また、日本円換算は令和3年2月分報告省令レートに基づき、1ドル=104円、1ポンド=140円、1ユーロ=127円、1人民元=16円として行い、適宜四捨五入した。本稿中の人物の肩書は全て当時のものである。

¹ 量子アニーリングマシンについては、西森秀稔「量子アニーリングの現状と展望」『電子情報通信学会誌』Vol.103 No.3, 2020.3, pp.264-266等を参照。

² 量子ビットや以下で述べる量子ゲート等を含む量子コンピュータの基本的要素と動作原理の説明については、藤井啓祐『驚異の量子コンピュータ—宇宙最強マシンへの挑戦—』（岩波科学ライブラリー 289）岩波書店、2019；竹内繁樹『量子コンピュータ—超並列計算のからくり—』（ブルーバックス）講談社、2005等を参照。

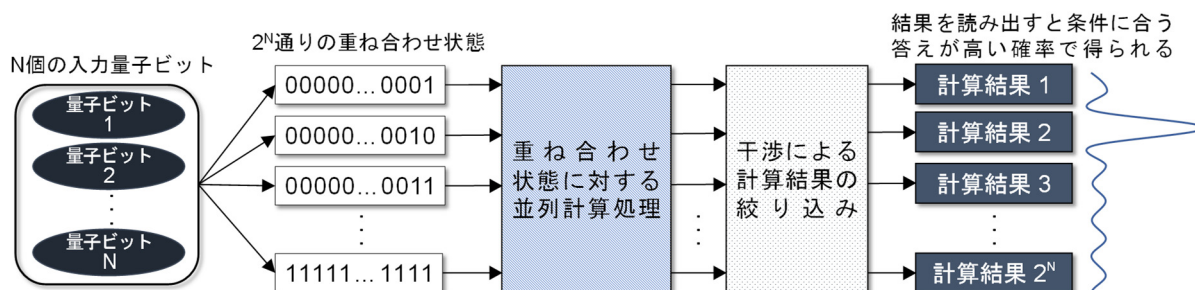
る。このような重ね合わせ状態に対して同時並列的に演算を行うことで、古典コンピュータよりも圧倒的に速く計算を実行できることが量子コンピュータの特徴である³。

量子コンピュータの計算は、量子ビットに対して「量子ゲート」を作用させることによって行う。量子ゲートは、古典コンピュータで用いられる論理ゲート⁴に対応する概念で、論理ゲートが「0」又は「1」のビットを入出力として扱うのに対し、量子ゲートは「0」と「1」だけでなく、それらの重ね合わせ状態も扱うことができる。重ね合わせ状態にある複数の量子ビットを量子ゲートに入力することで、多数の状態に対して並列的に計算処理が行われ、その結果が重ね合わせ状態として出力される⁵。

ところが、量子力学の原理により、計算後の重ね合わせ状態に対して結果の読み出しを行うと、重ね合わせられた状態のうちいずれか1つの状態がランダムに現れ、それ以外の状態は失われてしまう性質がある。そのため、重ね合わせ状態を入力して単に並列的な計算処理を行うだけでは、結果を読み出しても答えがランダムにしか得られず、計算機としては利用できない。そこで、量子コンピュータで計算を行う際には、最終的な計算結果の読み出しを行う前に、「干渉」と呼ばれる量子力学の性質を利用した手順によって、問題の条件に合致する結果を絞り込む必要がある。こうした手順が知られている一部の計算問題においては、量子コンピュータが古典コンピュータと比較して、指数関数的に高速⁶に計算を行えることが分かっている⁷。

量子コンピュータによる計算のイメージを図に示した。N個の入力量子ビットから 2^N 通りの重ね合わせ状態を作り、それらに対して量子ゲートを作用させて並列計算処理と干渉による結果の絞り込みを行った上で、計算結果を読み出して条件に合う答えを得るというものである。

図 量子コンピュータによる計算のイメージ



(出典) 藤井啓祐『驚異の量子コンピュータ—宇宙最強マシンへの挑戦—』(岩波科学ライブラリー 289) 岩波書店, 2019, pp.86-87 等を基に筆者作成。

³ 米国科学・工学・医学アカデミー, Emily Grumbling and Mark Horowitz 編 (西森秀稔訳) 『米国科学・工学・医学アカデミーによる量子コンピュータの進歩と展望』 共立出版, 2020, pp.41-43. (原書名: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Quantum Computing: Progress and Prospects*, Washington D.C.: National Academies Press, 2019.); 竹内 同上, pp.101-111.

⁴ 古典コンピュータの回路を構成する要素で、入力されたビットの値に対して、ある一定のルールに従った値のビットを出力する。NOT ゲートや AND ゲートなどの数種類の基本的なゲートを組み合わせることにより、あらゆる回路が構成できることが知られている。竹内 同上, pp.96-101.

⁵ 同上, pp.112-121.

⁶ サイズが N のデータに対する計算を実行するために必要な計算回数が、古典コンピュータでは N の指数関数 (A^N) に従って増加する一方、量子コンピュータでは N の多項式 (N^A) 程度でしか増加しないことを意味する (A は定数)。A=2 とすれば、両者の比 (古典/量子) は N=10 のとき約 10、N=20 のとき約 2,600、N=30 のとき約 120 万となり、N が大きくなるほど古典コンピュータと量子コンピュータの計算回数の差は加速度的に拡大していく。

⁷ 竹内 前掲注(2), pp.125-127.

(2) 量子ビットの実現手段

量子ビットを実現する物理的手段として様々な方式が提案されており、それぞれ研究が進められている（表）。量子コンピュータの研究開発においては、量子ビットの集積可能性や、重ね合わせ状態の保持時間、量子ビットに対する操作精度などが問題となるが、それぞれの方式に一長一短があり、いずれの方式が最適であるかは現時点では見通せない⁸。

表 量子ビットの主な実現手段

	超伝導	イオントラップ	半導体	光
物理系	物質を極低温に冷却すると電気抵抗が消失する超伝導の現象を利用する。超伝導物質でできた電極で回路を構成し、チップに埋め込む。	真空中で冷却されたイオンを用いる。電極によって複数のイオンを宙に浮かせて捕捉し、直線状に並べる。	半導体基板上に電極を配置して電子を一点に閉じ込める「量子ドット」と呼ばれる構造を用いるものなど、様々な手法が提案されている。	光（電磁波）の最小単位である光子を用いる。
量子ビットの表現・操作	超伝導状態にある電極上の電子の数によって量子ビットを表現する。量子ビットの操作は、チップに接続した信号線を通じて、マイクロ波によって行う。	イオン中の電子がどの軌道に存在しているかによって量子ビットを表現する。量子ビットの操作は、イオンに対してレーザー光を照射することによって行う。	各電子は「スピン」と呼ばれる磁石のように振る舞う性質をもっており、このスピンの向きに応じて量子ビットを表現する。量子ビットの操作は、電圧や電流の制御によって行う。	光（電磁波）は振動の方向に応じた2種類の状態を取り得るため、これらによって量子ビットを表現する。量子ビットの操作は、半透明ミラーなどの光学素子を用いて行う。
利点	<ul style="list-style-type: none"> これまでの研究の蓄積により量子の性質を保持できる時間が大きく延びている。 半導体素子の製造技術を応用した量子ビット数の拡大が可能。 量子ビットの操作が比較的容易。 	<ul style="list-style-type: none"> 長時間安定して量子の性質を保持することができる。 イオンは人工的に作成される量子ビットと異なり製造誤差が存在しないため、全ての量子ビットに対して均一な操作が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 既存の半導体製品の開発で培われてきた、純度の高い半導体を作成する技術や高度な微細加工技術が応用でき、高い密度で量子ビットの集積が可能になると期待されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 外部環境からの影響を受けにくいと、他の方式では必要となる冷凍機や真空容器を必要としない。 光ファイバーを通すことができるため、複数の量子コンピュータの接続に適する。
欠点・課題	<ul style="list-style-type: none"> 量子ビット数の拡大に伴って各量子ビットへ接続する配線の方法が課題となる。 チップの超伝導状態を維持するため、極低温に冷却する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 一定以上の量子ビット数の拡大は技術的に困難とされる。 イオンが外の原子や分子の影響を受けないよう、装置を真空容器内に閉じ込める必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状では、数個の量子ビットの操作実験が行われている段階とされ、集積化は進んでいない。 量子ビットを安定させるため、極低温に冷却する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 回路上の部品（ミラー等）を光子が通過する際に、吸収や散乱が発生して光子が消失してしまう場合がある。 光子間の相互作用が乏しいため、複数の光子間での操作が困難。
研究開発に取り組む主な研究機関	グーグル（米国）、IBM（米国）、リゲッティ・コンピューティング（米国）、QuTech（オランダ）など。	ハネウェル（米国）、IonQ（米国）など。	インテル（米国）など。	PsiQuantum（米国）、Xanadu（カナダ）など。

（出典）米国科学・工学・医学アカデミー、Emily Grumbling and Mark Horowitz 編（西森秀稔訳）『米国科学・工学・医学アカデミーによる量子コンピュータの進歩と展望』共立出版、2020、pp.135-147。（原書名：National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Quantum Computing: Progress and Prospects*, Washington D.C.: National Academies Press, 2019.）；藤井啓祐『驚異の量子コンピューター宇宙最強マシンへの挑戦—』（岩波科学ライブラリー 289）岩波書店、2019、pp.63-72；武田俊太郎『量子コンピュータが本当にわかる！—第一線開発者がやさしく明かすしくみと可能性—』技術評論社、2020、pp.214-236等を基に筆者作成。

⁸ 井元信之「量子コンピュータ技術の歴史と展望」『精密工学会誌』Vol.85 No.12, 2019.12, p.1038.

(3) 量子コンピュータにおけるノイズの問題

量子コンピュータを構成する量子ビットは、外部環境からの影響（ノイズ）に極めて弱く、重ね合わせ状態の喪失などのエラーが生じやすい。量子コンピュータを実現する上では、こうしたエラーにいかに対処するかが重要な研究課題となっている。

古典コンピュータの場合も、意図せずビットが反転する（「0」と「1」の状態が入れ替わる）エラーが生じることがあるが、情報を表すビットを複製して冗長化することにより、エラーに対処しながら計算を行うことができる。例えば、「0」の状態を「000」のように3個のビットで表現することとすれば、仮に計算の途中でいずれか1つのビットにエラーが生じたとしても、これを検知し、他のビットの状態から多数決によってエラーを訂正することができる⁹。

一方、量子コンピュータの場合は、量子力学の原理により、計算途中の量子ビットの状態を読み出すと重ね合わせ状態が失われ、その後の計算が続行できなくなるといった制約がある。しかし、こうした制約を回避して、量子ビットに生じたエラーを検知し訂正する「量子誤り訂正符号」の手法が1990年代中盤以降に考案され、理論上は、ノイズの影響下にある量子ビットであっても、エラーを訂正しながら正確な計算を実行できることが示されている¹⁰。

こうした量子誤り訂正の仕組みを備えた量子コンピュータは「誤り耐性量子コンピュータ」と呼ばれ、アルゴリズム（計算手順）が知られている計算問題においては、古典コンピュータの中でも最も高速な計算機であるスーパーコンピュータを超える速さで計算を行うことができるとされる。量子コンピュータの研究開発の最終的な目標は、この誤り耐性量子コンピュータを実現することであるが、そのためには、高い精度で量子ビットの制御が可能であることに加え、最低でも1万～100万個の量子ビットを集積することが必要と考えられている¹¹。

(4) 量子コンピュータの応用

量子コンピュータの応用が見込まれる分野として、量子化学計算や最適化問題が挙げられる。

量子化学計算は、物質を構成する分子の構造を計算機上でシミュレーションすることにより、物質の化学的性質を解析する技術である。量子コンピュータを活用することで、従来よりも効率的かつ正確なシミュレーションが可能になるとされ、こうした化学計算は、高機能材料の開発や工業用触媒の設計、創薬などに応用できると考えられている¹²。

最適化問題は、複数の組合せがある中から、与えられた条件の下で最適な組合せを選び出す問題である。例えば、複数地点に荷物を届ける物流ルートのうち、どのようなルートが最短となるかを考える場合、古典コンピュータによる計算では、配送先の地点数が増えるごとに計算が必要な組合せが爆発的に増大¹³してしまい、最短ルートの算出は困難になる。しかし、量子コンピュータを用いれば、こうした問題も高速に解くことができると期待されている¹⁴。

一方、量子コンピュータが実現することで、暗号技術によって安全性が確保されているイン

⁹ 藤井 前掲注(2), pp.94-104.

¹⁰ 同上

¹¹ 同上, pp.145-147.

¹² 武田俊太郎『量子コンピュータが本当にわかる！—第一線開発者がやさしく明かすしくみと可能性—』技術評論社, 2020, pp.50-52; 同上, pp.148-152.

¹³ 地点数が5のときは120通り、10のときは約360万通り、20のときは約240京通りというように増加していく。

¹⁴ 武田 前掲注(12), pp.52-53; 竹内 前掲注(2), pp.18-19.

ターネット上の情報通信が脅かされることが指摘されている。現在広く使われている RSA 暗号と呼ばれる方式の暗号は、大きな数の素因数分解が困難である（古典コンピュータでは現実的な時間内に計算ができない）ことを安全性の根拠としている。しかし、古典コンピュータよりもはるかに高速に素因数分解を行う量子コンピュータのアルゴリズムが発見されているため、もし量子コンピュータが実現すれば、こうした暗号は破られてしまうと考えられている¹⁵。そのため、量子コンピュータに対しても安全性が保たれる暗号技術の開発も進められている¹⁶。

2 研究開発の動向

量子コンピュータは、1980年代に基本的なアイデアが提唱され、その後、実現に向けた研究開発のブームと停滞期を経て、現在の世界的な活況に至っている。今後の量子コンピュータの研究開発を展望するため、ここでは、これまでの研究開発の動きを概観するとともに、量子コンピュータ実現に向けた今後の研究開発の方向性について述べる。

(1) 量子コンピュータの起源と第一次量子コンピュータブーム

重ね合わせ状態に対して並列的に計算を行うという、量子コンピュータの基本となるアイデアは、1985年にオックスフォード大学のデイヴィッド・ドイチュ（David Deutsch）によって発表された¹⁷。当初は、このアイデアに注目する研究者はほとんどいなかったとされるが、1992年になって、量子コンピュータが古典コンピュータよりも指数関数的に速く計算を行える場合があることをドイチュとオックスフォード大学のリチャード・ジョザ（Richard Jozsa）が初めて理論的に証明した¹⁸。ドイチュとジョザが扱った計算問題は、それ自体に特段の実用性が認められるものではなかったが、その答えを導くための手法（計算過程で現れる重ね合わせ状態から、条件に合致する結果のみを量子力学に基づく干渉の効果によって絞り込む方法）が、量子コンピュータによる高速な計算の手法を示唆しているものとして重要視された¹⁹。

1994年には、AT&T ベル研究所のピーター・ショア（Peter Shor）が、量子コンピュータによって効率的に素因数分解を行うアルゴリズムを考案した²⁰。このアルゴリズムの登場は、量子コンピュータが実現すれば、素因数分解の難しさを安全性の根拠とする暗号が破られることを意味したため、量子コンピュータの計算能力に多くの研究者が注目することとなった²¹。

また、1990年代中盤以降には、「量子誤り訂正」のアイデアが相次いで考案され、量子コンピュータを実現する上での大きな困難の1つであったエラーの問題が理論上は解決された。これを受け、量子コンピュータの研究は更に活発化した²²。

¹⁵ 米国科学・工学・医学アカデミー 前掲注(3), pp.108-117.

¹⁶ 同上, pp.118-122.

¹⁷ David Deutsch, "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, Vol.400, 8 July 1985, pp.97-117.

¹⁸ D. Deutsch and R. Jozsa, "Rapid solution of problems by quantum computation," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, Vol.439, 8 December 1992, pp.553-558.

¹⁹ 古田彩「二人の悪魔と多数の宇宙—量子コンピュータの起源—」『日本物理学会誌』Vol.59 No.8, 2004, pp.512-519; 井元 前掲注(8), p.1033.

²⁰ P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 1994, pp.124-134.

²¹ 井元 前掲注(8), p.1035.

²² 同上

同時期に、実験研究の面でも重要な研究成果が得られている。1995年には、米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology: NIST）のデイヴィッド・ワインランド（David Wineland）のグループがイオントラップ方式による2量子ビットの演算を成功させた²³。これが世界で初めて行われた量子コンピュータのデモンストレーションであるとされ²⁴、様々な方式の量子コンピュータの提唱や実験研究が行われるきっかけとなった。また、1999年には、NEC基礎研究所の中村泰信・蔡兆申らが、外部からのノイズの影響で制御が難しいと考えられていた固体素子の1つである超伝導物質を利用した量子ビットの制御に成功し²⁵、これを契機に様々な固体素子を使った量子コンピュータの実験研究が展開した²⁶。

こうした研究開発の活況は「第一次量子コンピュータブーム」と呼ばれる。しかし、2000年代以降は量子ビット数の拡大や制御精度の向上が頭打ちになり、ブームは収束していった²⁷。

(2) 第二次量子コンピュータブーム

2014年4月、カリフォルニア大学サンタバーバラ校のジョン・マルティニス（John Martinis）のグループが超伝導量子ビット5個から成る試作機を作成し動作を実証した。従来よりも格段に高い精度で量子ビットを制御することに成功し、誤り耐性量子コンピュータの実現に必要な水準の精度を達成したことが注目された²⁸。

この成果をきっかけに、現在まで続く第二次量子コンピュータブームが始まった。グーグルはマルティニスらをグループごとに取り込み、量子コンピュータの研究開発を本格的に開始した。従来から量子コンピュータの研究開発に取り組んでいたIBMは、研究体制を強化して量子ビットの集積化を進めた。インテルやマイクロソフトといった大手IT企業も研究開発に参入したほか、量子コンピュータの開発を行う複数のベンチャー企業が立ち上がった²⁹。

2016年5月、IBMが世界で初めて量子コンピュータの試作機をクラウド化してオンラインで公開した。公開当初は超伝導量子ビット5個から成るマシンのみであったが、翌年には16個の超伝導量子ビットのマシンも追加された。試作機をクラウドで公開する狙いは、多くのユーザーが使用することで得られる計算データを分析し、ハードウェアの改良やソフトウェアの開発にいかすことにあるとされる³⁰。

2019年10月、グーグルは53個の超伝導量子ビットを使用した量子コンピュータの試作機を用いて、当時世界最速であったIBMのスーパーコンピュータ「Summit」で1万年かかる計算を200秒で実行することに成功したとする論文をNature誌に発表した³¹。この成果は、量子コンピュータによって従来のコンピュータでは実行できない計算を行うことを意味する「量子超

²³ Christopher Monroe et al., “Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate,” *Physical Review Letters*, Vol.75 No.25, 18 December 1995, pp.4714-4717.

²⁴ 古田彩「量子超越 グーグルが作った量子コンピューター」『日経サイエンス』50(2), 2020.2, p.35.

²⁵ Yasunobu Nakamura et al., “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box,” *Nature*, Vol.398 No.6730, 29 April 1999, pp.786-788.

²⁶ 古田 前掲注(24), p.35.

²⁷ 同上

²⁸ 藤井 前掲注(2), pp.114-117.

²⁹ 古田彩「クラウド時代の幕開け」『日経サイエンス』48(4), 2018.4, pp.33-34.

³⁰ 同上, pp.37-39.

³¹ Frank Arute et al., “Quantum supremacy using a programmable superconducting processor,” *Nature*, Vol.574 No.7779, 24 October 2019, pp.505-510.

越」を実験によって初めて示したものとして注目された³²。

グーグルや IBM が超伝導量子ビットによる量子コンピュータの開発を進める一方、イオントラップ方式による量子コンピュータの開発も進展している。2018年12月、米国のベンチャー企業 IonQ がイオントラップ方式のマシンを構築し、79個の量子ビットの制御に成功したことを発表した³³。また、2020年3月、米国の大手機械メーカーのハネウェルは、それまでに他社が発表したあらゆる量子コンピュータよりも高性能なマシンを開発したと発表した³⁴。

近年になって、光を用いた量子コンピュータの開発でも注目を集める研究成果が発表されている。2020年12月、中国科学技術大学の潘建偉（Pan Jianwei）らの研究チームは、76個の光量子ビットを用いた量子コンピュータの試作機「九章」を構築し、2020年12月時点において中国で最速のスーパーコンピュータ「神威・太湖之光」（Sunway TaihuLight）で25億年（同時点で世界最速の日本の「富岳」では6億年）かかると見積もられる計算を、200秒で実行したとする成果を *Science* 誌に発表した³⁵。この成果は、光を用いた量子コンピュータの可能性を示すものとして評価されているが、今回開発された試作機は特定の計算に特化して構築されたもので、プログラム可能ではないため、実際の問題解決には利用できないとの指摘もある³⁶。

(3) 今後の量子コンピュータ開発

量子誤り訂正の機能を実装した誤り耐性量子コンピュータは、実用的な計算においてスーパーコンピュータをはるかにしのぐ性能を有するとされるが、その実現には、多数の量子ビットの集積化や制御精度の向上、量子誤り訂正技術の確立、量子コンピュータのためのソフトウェア開発などが必要とされ、数十年単位の研究開発期間を要すると見られている³⁷。

そこで、NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum computing) マシンと呼ばれる、数十から数百の量子ビットで構成され、量子誤り訂正を行わない小・中規模の量子コンピュータの開発を目指す動きがある。当面の間は、この NISQ マシンを用いて量子超越性を実証することが中心的な研究課題になるとされる³⁸。

NISQ マシンを実用的な問題に応用する研究も進められている。NISQ マシンは、誤り訂正を行わないことから、計算時間（計算ステップ数）ごとにエラーが蓄積して計算が破綻してしま

³² 古田 前掲注(24), pp.31-32. なお、この成果に対し IBM は、記憶装置の使用方法を変更することにより、スーパーコンピュータで同じ計算を2日半ほどで実行できると主張している。Edwin Pednault et al., “On “Quantum Supremacy”,” *IBM Research Blog*, October 21, 2019. <<https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>>

³³ “IonQ harnesses single-atom qubits to build the world’s most powerful quantum computer,” December 11, 2018. IonQ Website <<https://ionq.com/news/december-11-2018>>

³⁴ “Honeywell Achieves Breakthrough That Will Enable The World’s Most Powerful Quantum Computer,” March 1, 2020. Honeywell Website <<https://www.honeywell.com/us/en/press/2020/03/honeywell-achieves-breakthrough-that-will-enable-the-worlds-most-powerful-quantum-computer>> 量子コンピュータの性能は量子ビット数だけでなく、量子ビットが重ね合わせ状態を保持できる時間や量子ゲートによる操作の精度などに依存する。これらを考慮した量子コンピュータの性能の指標として、IBM は「量子ボリューム」を提唱している（小林有里「量子優位性時代の到来の鍵となる量子ボリュームとは？」『THINK Blog Japan』2019.6.10. IBM ウェブサイト <<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/power-quantum-device/>>）。ハネウェルは量子コンピュータの性能を量子ボリュームによって評価している。

³⁵ Han-Sen Zhong et al., “Quantum computational advantage using photons,” *Science*, Vol.370 No.6523, 18 December 2020, pp.1460-1463. この成果は2020年12月3日に *Science* 誌のウェブサイト上で初めて発表された。

³⁶ Philip Ball, “Physicists in China challenge Google’s ‘quantum advantage,’” *Nature*, Vol.588 No.7838, 17 December 2020, p.380.

³⁷ 藤井 前掲注(2), pp.138-139; 科学技術振興機構研究開発戦略センター『量子 2.0—量子科学技術が切り拓く新たな地平—』2020.1, pp.21-22. <<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/SP/CRDS-FY2019-SP-03.pdf>>

³⁸ 藤井 同上, pp.139-141; 科学技術振興機構研究開発戦略センター 同上, p.9.

う。そのため、長時間の（ステップ数の多い）計算は実行できないが、NISQマシンと古典コンピュータを組み合わせる計算を行う「量子古典ハイブリッドアルゴリズム」の手法によって効率的に計算を行う方法が提案されている。現段階では実用性は不透明とされるが、量子古典ハイブリッドアルゴリズムを応用した化学計算や機械学習の研究が進められている³⁹。

II 量子コンピュータの研究開発に関する諸外国の政策動向

1 米国

2018年9月、大統領府科学技術政策局（Office of Science and Technology Policy: OSTP）の下に設置された国家科学技術会議（National Science and Technology Council: NSTC）が「量子情報科学国家戦略概要」と題する報告書を公表した。同報告書は、量子情報科学に関する政策について、①科学を第一に置くアプローチをとること、②量子情報科学分野の人材の育成に取り組むこと、③量子情報科学に関連する産業との関係を強化すること、④重要なインフラ（技術・設備等）を提供すること、⑤国家安全保障と経済成長を維持すること、⑥国際協力を進めることを提言している⁴⁰。

2018年12月、ドナルド・トランプ（Donald Trump）大統領の署名により、量子コンピュータを含む量子技術⁴¹分野において、米国が持続的なリーダーシップを確保することを目的とする国家量子イニシアチブ法⁴²が成立した。同法により、国家量子イニシアチブプログラムの実施や、同プログラム実施のための10か年計画を策定することが定められたほか、同プログラムの調整を担う量子情報科学小委員会や、同小委員会及び大統領に勧告を行う国家量子イニシアチブ諮問委員会が設置されることとなった。また、米国国立標準技術研究所が量子技術産業を育成するための量子コンソーシアムを立ち上げること、米国科学財団（National Science Foundation: NSF）が研究・教育活動を行う「量子研究教育総合センター」を設置すること、米国エネルギー省（Department of Energy: DOE）が基礎研究を行う「国家量子情報科学研究センター」を設置することが定められ、これらの活動のため、5年間で最大13億ドル（1400億円）規模の投資が行われることとなった⁴³。

2019年度は、連邦予算から約4億5000万ドル（470億円）が量子技術の研究開発に拠出され、そのうち約1億ドル（100億円）が量子コンピュータに関するものであった⁴⁴。

2 欧州

(1) EU

2016年5月、欧州各国の大学や企業が署名した量子技術の研究開発戦略「Quantum Manifesto」

³⁹ 御手洗光祐「化学計算・機械学習 量子コンピューターの2つの挑戦」『日経サイエンス』50(2), 2020.2, pp.40-47.

⁴⁰ National Science and Technology Council, *National Strategic Overview for Quantum Information Science*, September 2018. <<https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf>>

⁴¹ 量子コンピュータのほか、量子通信や量子計測など、量子力学の原理を応用した技術を総称して量子技術と呼ぶ。

⁴² National Quantum Initiative Act, P.L.115-368. <<https://www.congress.gov/115/bills/hr6227/BILLS-115hr6227enr.pdf>>

⁴³ 原田久義「アメリカの量子情報科学の進展を目的とする立法—国家量子イニシアチブ法—」『外国の立法』No.282, 2019.12, pp.23-43. <https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11426017_po_02820002.pdf?contentNo=1>

⁴⁴ National Science and Technology Council, *National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2021 Budget*, January 2021. <<https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/01/NQI-Annual-Report-FY2021.pdf>>

が発表され、EU加盟国や欧州委員会に対し、10億ユーロ（1300億円）規模の研究開発プログラムの立ち上げが求められた⁴⁵。

この「Quantum Manifesto」を受け、欧州委員会は2018年10月、欧州研究・イノベーション枠組み計画「Horizon 2020」の一部として、量子技術に関する大型の研究開発プログラム「Quantum Flagship」を開始した。同プログラムの下で、10年間で10億ユーロ（1300億円）が拠出される予定となっており、①量子コンピューティング、②量子シミュレーション、③量子通信、④量子計測・センシング、⑤これらを補完する基礎量子科学の5領域を対象に支援が行われる。2018年10月の時点で各領域合わせて20のプロジェクトが立ち上げられており、原則として3年間、最大1000万ユーロ（13億円）の資金が提供されることとなっている⁴⁶。

(2) 英国

英国の工学・物理科学分野の研究資金配分機関である工学物理科学研究会議（Engineering and Physical Sciences Research Council: EPSRC）は、2014年からの5年間で2億7000万ポンド（380億円）を投資する量子技術分野の研究開発プログラム「UKNQTP」（UK National Quantum Technologies Programme）を実施した⁴⁷。同プログラムの下で、英国内の大学や企業が参画する研究拠点「UKNQT ハブ」が4拠点設置され、量子コンピュータのほか、量子通信や量子センサの研究開発に対して、合わせて1億2000万ポンド（170億円）の資金が提供された⁴⁸。

2015年3月には、量子技術に関する国家戦略の策定や政府への助言等を行う機関として設立された「量子技術戦略諮問会議」（Quantum Technologies Strategic Advisory Board: QT SAB）⁴⁹が量子技術に関する国家戦略を発表した⁵⁰。また、同年9月には量子技術の各分野の実用化の見通しを示したロードマップが発表された⁵¹。

2018年11月、政府は量子技術に関する新たな投資計画を発表した。2014年から2019年までの期間で実施されていたUKNQTPは2024年まで延長されることとなり、2019年から2024年までの間に合計3億1500万ポンド（440億円）が提供されることとなった。また、誤り耐性量子コンピュータの実現に向けた研究開発を行う拠点として、国立量子コンピューティングセンターを設立することが発表された⁵²。

2020年9月、企業がクラウドで利用できる英国初の量子コンピュータの試作機が、米国を拠点とするベンチャー企業のリゲッティ・コンピューティング（Rigetti Computing）によって、国立量子コンピューティングセンターに設置されることが発表された⁵³。同社は、3年間のプロジェ

⁴⁵ *Quantum Manifesto: a New Era of Technology*, May 2016. Quorpe Website <http://quorpe.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf>

⁴⁶ “Quantum Technologies Flagship kicks off with first 20 projects,” 29 October 2018. European Commission Website <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_18_6241>

⁴⁷ “Overview of programme.” UK National Quantum Technologies Programme Website <<https://uknqt.epsrc.ac.uk/about/overview-of-programme/>>

⁴⁸ “UKNQT Hubs.” *ibid.* <<https://uknqt.ukri.org/about/uknqt-hubs/>>

⁴⁹ “Quantum Technologies Strategic Advisory Board: Terms of Reference.” *ibid.* <<https://uknqt.epsrc.ac.uk/files/qtsabtermsreference/>>

⁵⁰ *National strategy for quantum technologies: a New Era for the UK*, 2015.3. GOV.UK Website <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/414788/Strategy_QuantumTechnology_T15-080_final.pdf>

⁵¹ *A roadmap for quantum technologies in the UK*, 2015.9. *ibid.* <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470243/InnovateUK_QuantumTech_CO004_final.pdf>

⁵² “New funding puts UK at the forefront of cutting edge quantum technologies,” 1 November 2018. *ibid.* <<https://www.gov.uk/government/news/new-funding-puts-uk-at-the-forefront-of-cutting-edge-quantum-technologies>>

⁵³ “Government backs UK’s first quantum computer,” 2 September 2020. *ibid.* <<https://www.gov.uk/government/news/government-backs-uks-first-quantum-computer>>

クト期間中に英国内の大学や企業と共同で量子コンピュータの実機を構築してクラウド上で利用できる環境を整え、機械学習や材料設計、金融分野における実用的な応用技術の開発を行うとしている⁵⁴。

(3) ドイツ

2018年9月、連邦政府は研究開発・イノベーションの包括的な戦略として「ハイテク戦略2025」を決定し、ドイツを量子技術研究の分野で世界最先端に発展させるとの目標を掲げた⁵⁵。

また、同月に連邦教育研究省（Bundesministerium für Bildung und Forschung: BMBF）は、量子技術に関する研究開発の枠組みプログラム「量子技術—基礎研究から市場へ—」を発表し、2018年から2022年までの間に、量子技術の研究開発に6億5000万ユーロ（830億円）を投資するとした。重点を置く研究分野として、量子コンピュータ、量子通信、量子計測、量子システム実現のための基礎技術が挙げられた⁵⁶。さらに、2020年1月には、量子コンピュータ分野の研究開発プログラムを拡充し、3億ユーロ（380億円）の追加投資を行うことが発表された⁵⁷。

(4) オランダ

量子コンピュータの研究開発は、デルフト工科大学（TU Delft）とオランダ応用科学研究機構（Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek: TNO）が共同で設立した研究拠点「QuTech」を中心に進められている。政府及びTNO等の研究機関はQuTechに対し、2015年からの10年間で1億3500万ユーロ（170億円）を投資するとしている⁵⁸。量子コンピュータ開発に取り組む企業からの投資も呼び込んでおり、米国の大手半導体メーカーのインテルは、2015年から10年間にわたるQuTechとの協働計画を進めている。同社はQuTechへ総額5000万ドル（52億円）を支援するほか、人員や設備の提供も行っている⁵⁹。

2019年9月には、オランダの量子技術に関係する研究機関が「量子技術国家アジェンダ」を策定し、オランダが量子技術分野で世界最先端となるために取り組むべき研究開発、市場化、人材育成などに関する方策を示した⁶⁰。政府は翌年2月、同アジェンダの取組を実施するため、今後5年間で2350万ユーロ（30億円）を投資することを発表した⁶¹。

⁵⁴ “Rigetti Computing to Lead £10M Consortium to Launch First Commercial Quantum Computer in UK,” September 2, 2020. GlobeNewswire Website <<http://www.globenewswire.com/news-release/2020/09/02/2087495/0/en/Rigetti-Computing-to-Lead-10M-Consortium-to-Launch-First-Commercial-Quantum-Computer-in-UK.html>>

⁵⁵ “Leitfaden für die Zukunft,” 2018.9.5. BMBF Website <<https://www.bmbf.de/de/leitfaden-fuer-die-zukunft-6862.html>>; Federal Ministry of Education and Research (BMBF), *Research and innovation that benefit the people: The High-Tech Strategy 2025*, September 2018, p.35. <https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Research_and_innovation_that_benefit_the_people.pdf>

⁵⁶ Federal Ministry of Education and Research, *Quantum technologies: from basic research to market*, September 2018. <https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Quantum_technologies.pdf>

⁵⁷ “Einen Spitzenplatz im Quantencomputing sichern,” 2020.1.31. Quantentechnologien Website <<https://www.quantentechnologien.de/artikel/einen-spitzenplatz-im-quantencomputing-sichern.html>>

⁵⁸ “Dutch invest €135m in developing a quantum computer,” *DutchNews*, 2015.6.1. <<https://www.dutchnews.nl/news/2015/06/dutch-invest-e135m-in-developing-a-quantum-computer/>>

⁵⁹ “QuTech quantum institute enters into collaboration with Intel,” 2015.9.3. QuTech Website <<https://qutech.nl/2015/09/03/qutechentersintocollaborationwithintel/>>

⁶⁰ Quantum Delta Nederland, *National Agenda for Quantum Technology*, September 2019. <<https://quantumdelta.nl/TUQ/wp-content/uploads/2020/04/NAQT-2019-EN.pdf>>

⁶¹ “State Secretary Mona Keijzer invests €23.5 million in quantum technologies,” 2020.2.18. QuTech Website <<https://qutech.nl/2020/02/18/state-secretary-mona-keijzer-invests-e235-million-in-quantum-technologies/>>

3 中国

2006年2月に国務院が発表した「国家中長期科学技術発展計画綱要（2006～2020年）」において、重大科学研究の4領域の1つに「量子制御」が指定された。また、2016年8月に国務院が発表した「科学技術イノベーション第13次5か年計画（2016～2020年）」では、「量子通信・量子コンピュータ」が、国が長期にわたって安定的に支援する重点領域に指定された⁶²。

2015年、中国科学院は大手IT企業のアリババグループと共同で「中国科学院—アリババ量子計算実験室」を共同設立し、量子コンピュータの開発に取り組むことを発表した。2030年までに50～100量子ビットの量子コンピュータの試作機を開発するとの研究計画を定めている⁶³。また、量子技術の中心的な研究拠点として、安徽省の合肥市に「量子情報科学国家実験室」を建設する計画が2017年から進められており、総工費は70億元（1100億円）に上るとされる⁶⁴。

III 量子コンピュータの研究開発に関する日本の政策動向

1 政策文書における量子技術の位置付け

我が国の5年間ごとの科学技術政策の方針は「科学技術基本計画」として定められている⁶⁵。平成28（2016）年1月に策定された第5期（2016～2020年度）の科学技術基本計画においては、光・量子技術が「新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術」であるとして、国による戦略的な強化が求められる技術の1つに位置付けられた⁶⁶。

また、各年に国が重点的に取り組むべき科学技術やイノベーションに関する施策をまとめた「科学技術イノベーション総合戦略」にも量子技術に関連する施策が掲げられている。平成26年（2014）6月に閣議決定された「科学技術イノベーション総合戦略2014」では、情報通信やナノテクノロジーなどを下支えする分野として、「光・量子科学」が挙げられた。以降、毎年「科学技術イノベーション総合戦略」において量子技術に関する施策が取り上げられている⁶⁷。平成30（2018）年度以降は「科学技術イノベーション総合戦略」に代わって「統合イノベーション戦略」が策定されているが、量子技術の研究開発の世界的な展開を受け、光・量子技術を重要な技術と位置付けた上で、国際競争力を維持・向上させる取組を行うとしている⁶⁸。

しかし、量子技術の国家的な中長期戦略は、次に述べる「量子技術イノベーション戦略」が令和2年（2020）に策定されるまで存在せず、関係府省が個別に研究開発を進めていた⁶⁹。

⁶² 科学技術振興機構研究開発戦略センター「主要国の研究開発戦略（2020年）」2020.3, pp.177-180. <<https://www.jsst.go.jp/crds/pdf/2019/FR/CRDS-FY2019-FR-02.pdf>>

⁶³ 「中国科学院とアリババ、量子計算実験室を共同設立」2015.7.31. Science Portal China ウェブサイト <https://spec.jst.go.jp/news/150705/topic_5_03.html>

⁶⁴ “National quantum info lab construction urged,” *China Daily*, 2019.3.11. <<https://www.chinadaily.com.cn/a/201903/11/WS5c85a605a3106c65c34edce6.html>>

⁶⁵ 令和2（2020）年に「科学技術基本法」（平成7年法律第130号）が改正されて「科学技術・イノベーション基本法」となったことに伴い、第6期となる2021年度からの5年間を対象とする計画は「科学技術・イノベーション基本計画」として策定される。

⁶⁶ 「科学技術基本計画」（平成28年1月22日閣議決定）pp.13-14. 内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>>

⁶⁷ 「科学技術イノベーション総合戦略」同上 <<https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/index.html>>

⁶⁸ 「統合イノベーション戦略」（平成30年6月15日閣議決定）pp.77-78. 同上 <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/tougo_honbun.pdf>

⁶⁹ 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）」2020.1.21, p.3. 首相官邸ウェブサイト <<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushisenryaku2020.pdf>>

2 量子技術イノベーション戦略

平成 30 (2018) 年 12 月に開催された「第 3 回統合イノベーション戦略推進会議」において、「今後イノベーションを進める上で重要な 3 つの分野」の 1 つとして、「人工知能」、「バイオ」と並び「光・量子技術」が掲げられた。同会議議長の菅義偉官房長官は、光・量子技術について、有識者会議を設置して、具体的な戦略の策定を開始するよう指示した⁷⁰。

これを受けて、政府の統合イノベーション戦略推進会議の下に設置された「量子技術イノベーション」に関する有識者会議において、戦略策定に向けた議論が行われた。翌令和元 (2019) 年 7 月の中間報告⁷¹を経て、令和 2 (2020) 年 1 月に開催された第 6 回統合イノベーション戦略推進会議において、量子技術に関する我が国初の国家戦略として「量子技術イノベーション戦略」が正式に策定された。また、中長期的観点から今後必要となる取組を抽出した「技術ロードマップ」も発表された⁷²。

量子技術イノベーション戦略は、目指すべき社会像として「生産性革命の実現」、「健康・長寿社会の実現」、「国及び国民の安全・安心の確保」を掲げ、それらの実現のために、①技術開発戦略、②国際戦略、③産業・イノベーション戦略、④知的財産・国際標準化戦略、⑤人材戦略の 5 つの戦略を定めている⁷³。これらの戦略の主な内容は別表のとおりである。

なお、「量子技術イノベーション戦略」の策定のために組織された有識者会議は発展的に改組されて「量子技術イノベーション会議」となり、国内外の動向把握や戦略のフォローアップに当たることとされている⁷⁴。

3 我が国の主な研究開発プロジェクト

(1) 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)

文部科学省は、平成 30 (2018) 年度から 10 年間の計画で「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」(Q-LEAP)⁷⁵を実施している。研究開発を行う技術領域として、「量子情報処理」、「量子計測・センシング」、「次世代レーザー」の 3 領域が設定され、各領域に年間 10 億円規模の支援を行うことが計画されている⁷⁶。

これらのうち、「量子情報処理」の領域に量子コンピュータ関連の研究課題が設定され、同領域の中核プロジェクトと位置付けられる「Flagship プロジェクト」において、①超伝導量子コンピュータ及び②量子ソフトウェアの研究開発が行われている⁷⁷。①超伝導量子コンピュータの研究開発では、100 個以上の超伝導量子ビットを実装したマシンを開発し、クラウドサービスによる提供を実現することなどが目標とされている。②量子ソフトウェアの研究開発では、

⁷⁰ 「第 3 回統合イノベーション戦略推進会議議事録」同上 <<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/dai3/giji3.pdf>>

⁷¹ イノベーション政策強化推進のための有識者会議量子技術イノベーション「量子技術イノベーション戦略 (中間報告)」2019.7.30. 同上 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushi2019_hokoku_honbun.pdf>

⁷² 統合イノベーション戦略推進会議 前掲注(69)

⁷³ 同上, pp.5-24.

⁷⁴ 同上, p.25.

⁷⁵ 「経済・社会的な重要課題に対し、量子科学技術を駆使して、非連続的な解決 (Quantum leap) を目指す研究開発プログラム」と文部科学省は位置付けている。「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」(光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) ガバニングボード (第 1 回) 資料 2-1) 2018.3.29. 文部科学省ウェブサイト <https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/033/shiryu/_icsFiles/afiedfile/2018/11/14/1403605_1.pdf>

⁷⁶ 同上

⁷⁷ これらの分野において我が国は強みを有するとされる。統合イノベーション戦略推進会議 前掲注(69), pp.9,13.

NISQ マシン用のソフトウェア開発と超伝導量子コンピュータへの実装、量子コンピュータを用いた機械学習手法の実問題への適用などが目標とされている。また、これらの Flagship プロジェクトと連携しつつ、互いに補い合う「基礎基盤研究」として、超伝導以外の方式の量子ビットの開発や、実機を活用した量子ソフトウェア開発など、6件の課題が設定されている⁷⁸。

(2) ムーンショット型研究開発制度

「ムーンショット型研究開発制度」は、実現が困難であるが大きなインパクトが期待される「ムーンショット目標」を国が定め、その達成のための研究開発を国が支援する仕組みである⁷⁹。

令和2（2020）年1月の総合科学技術・イノベーション会議において、「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」との目標がムーンショット目標の1つとして設定された⁸⁰。同年9月、目標実現に向けた研究開発を担うプロジェクトマネージャーが公募により採択され、超伝導、イオントラップ、半導体、光の各方式による量子コンピュータの実現に向けたハードウェアの研究開発のほか、複数の量子コンピュータを接続するための通信・ネットワークの研究開発や、量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発が同年11月以降に行われることとなった⁸¹。研究開発の予算規模は、令和2・3年度の委託予定額として、ハードウェア分野が42億円、通信・ネットワーク分野が9.5億円、理論・ソフトウェア分野が1.6億円となっている⁸²。

おわりに

現在のコンピュータ社会を支える半導体産業の発展の背景には、技術の高度化が高性能な製品を生み、高性能な製品が企業の収益を増加させ、収益の増加によって研究開発投資が増加し、研究開発投資の増加が優秀な研究者や周辺産業を集積させ、それによって更に技術が高度化するという好循環の働きがあったとされる⁸³。

量子コンピュータの研究開発においても、このような好循環が機能することが期待されるが、そのためにはまず、現状の技術レベルの下で、商業的な利用価値がある NISQ マシンを実現することが第一歩となると考えられる。これを実現することが企業の研究開発投資や人材の呼び込みにつながり、技術の高度化の好循環が始まるきっかけとなるからである⁸⁴。

⁷⁸ 「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 量子情報処理技術領域 研究課題」科学技術振興機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/joho/kadai.html>>

⁷⁹ 内閣府政策統括官（科学技術・イノベーション担当）付未来革新研究推進担当「ムーンショット型研究開発制度の概要」2020.7. <<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/gaiyo.pdf>>

⁸⁰ 文部科学省「ムーンショット目標 6 研究開発構想」2020.2. 科学技術振興機構ウェブサイト <https://www.jst.go.jp/moonshot/koubo/202002/pdf/pd_wg6.pdf>

⁸¹ 北川勝浩「目標 6 における研究開発の進め方等について」（第 2 回ムーンショット型研究開発制度に係る戦略推進会議 資料 4-5）2020.9.14, pp.6-10. 内閣府ウェブサイト <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/senryakusuishin/2nd/paper4_5.pdf>

⁸² 科学技術振興機構「目標 1、2、3、6 における前回の助言等への対応について」（第 3 回ムーンショット型研究開発制度に係る戦略推進会議 資料 2-1）2020.12.25, pp.13-16. 同上 <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/senryakusuishin/3rd/paper2_1.pdf>

⁸³ 情報処理学会出版委員会監修、嶋田義皓『量子コンピューティング—基本アルゴリズムから量子機械学習まで—』オーム社, 2020, pp.255-256.

⁸⁴ 同上

こうした段階に到達するまでは、近い将来に市場化が見込めないと企業が判断し、研究開発投資が過少となるために研究開発が停滞するいわゆる「死の谷」の状態となる可能性があり、この「死の谷」を越えるために政府による支援が重要な役割を担うとの指摘がなされている⁸⁵。

我が国の政府も、量子コンピュータに関連する戦略やロードマップを策定し、国を挙げた研究開発をスタートさせた。しかし、最終的な目標である誤り耐性量子コンピュータの実現には長期に及ぶ研究開発が必要とされる。技術の高度化が着実に進むよう、国内外の研究開発や政策の動向を注視しつつ、長期的な視点に立った研究開発の推進が求められる。

別表 「量子技術イノベーション戦略」の主な内容

戦略	主な内容
① 技術開発戦略	<ul style="list-style-type: none"> 量子技術の基盤となる主要技術領域として「量子コンピュータ・量子シミュレーション」、「量子計測・センシング」、「量子通信・暗号」、「量子マテリアル（量子物性・材料）」の4領域を設定。それぞれの領域の重点技術課題について技術ロードマップを策定し、それらに基づいて研究開発を支援する。 量子コンピュータに関しては、超伝導量子ビット方式に重点を置きつつ、幅広い方式の研究開発を推進する。2020年代中盤までに50量子ビット程度で量子超越性を実証し、2020年代末までに100～1000量子ビットでNISQマシン向けのアルゴリズムの実証を行う。誤り耐性量子コンピュータの実現は2040年頃を見込む。 量子コンピュータと人工知能技術を融合させた「量子AI技術」など、量子技術と関連技術を組み合わせた新たな技術領域の研究開発を支援する。
② 国際戦略	<ul style="list-style-type: none"> 欧米を中心とする量子技術に関する高い研究・技術レベルを有する国や地域との間で、政府レベルでの多国間・二国間の協力枠組みを整備・構築する。 安全保障の観点から、「外国為替及び外国貿易法」（昭和24年法律第228号）に基づく安全保障貿易管理を強化する。
③ 産業・イノベーション戦略	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、知的財産管理、人材育成等に至るまで一貫通貫で取り組む国際的な研究開発拠点として「量子技術イノベーション拠点（国際ハブ）」を整備し、国内外の優れた研究者・技術者や企業等からの投資を呼び込む。 産学官のステークホルダーが参画し、量子技術の産業・社会での利活用等について検討するコンソーシアムとして「量子技術イノベーション協議会（仮称）」を創設する。 量子技術に関する大学発・企業発のベンチャー企業の創設や、それらに対する投資を促進するための環境を整備する。
④ 知的財産・国際標準化戦略	<ul style="list-style-type: none"> オープン・クローズド戦略に基づいて知的財産の戦略的な権利化や利活用の推進を行う。 社会実装に近い量子技術や関連技術について、国際標準の獲得に向けた支援を行う。
⑤ 人材戦略	<ul style="list-style-type: none"> 大学等における量子技術分野の講座・専攻の設置や、量子技術に関する体系的な教育プログラムの開発により研究者や技術者の育成を進める。 国外の優れた研究者や技術者を招へい・確保する取組を進めるとともに、国内の研究者が国外の大学等で量子技術に関する研究開発に携わる機会を確保する。 将来を担う研究者や技術者の確保のため、高等学校や高等専門学校の段階で量子技術や関連する学問分野を学ぶ機会を提供し、早期の段階から量子技術を使いこなす高い知識や技能を持つ「量子ネイティブ」（Quantum Native）を育成する。

（出典）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）」2020.1.21, pp.6-24. 首相官邸ウェブサイト <<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushisenryaku2020.pdf>> を基に筆者作成。

⁸⁵ 同上