

量子コンピュータの現在地と今後の展望



株式会社野村総合研究所
DX基盤事業本部 IT基盤技術戦略室 エキスパートリサーチャー
藤吉 栄二

はじめに

量子コンピュータは、バイオテクノロジーやロボットなどと並び「ディープテック (Deep Tech)」といわれるテーマのひとつである。ディープテックは社会にインパクトを与える可能性があるものの、ビジネスとして利用するには不確定要素が多く、普及には時間を要する。企業は、量子コンピュータの現状や課題を理解したうえで、量子時代の到来に向けた長期視点のロードマップの作成が求められる。

量子コンピュータブームは第二幕に突入

2019年にグーグルが「量子超越性」の達成を発表して以降、量子コンピュータへの期待が高止まりしている。2023年3月末、理化学研究所は開発を進めていた量子コンピュータのクラウド公開を開始した。全国紙や経済紙がこのニュースをトップ記事として紹介したことは記憶に新しい。

世界経済フォーラム (WEF) のダボス会議では、AIとならんで量子コンピュータが経済の発展や安全保障上、重要なテーマであることが2021年以降継続して議論されている。日本では政府が「量子未来社会ビジョン」を発表し、量子コンピュータ、量子センシング、量子暗号通信・セキュリティからなる量子技術の2030年のマイルストーンを示した。そのビジョンの推進役として、「量子技術による新産業創出協議会 (Q-STAR)」が産官学の橋渡しを行う。

今や量子技術が経済や政治にかかわるテーマとなるなか、国産量子コンピュータの発表が高い注目をもって紹介された背景には、技術立国日本の復権の“のろし”として期待されていることの証左といえよう。

この数年の量子コンピュータへの関心の高波は、1990年代後半から2000年代初頭に起こったブームに

次ぐ、2度目の波である。1994年、アメリカの数学者ピーター・ショア氏が発表した素因数分解アルゴリズム (ショアのアルゴリズム) は、RSAなどの公開鍵暗号を数時間で解けることを示した。また、1999年にはNEC基礎研究所の中村泰信氏と蔡兆申氏 (いずれも当時) が超電導回路を用いて世界初の量子ビットを開発した。いずれも量子コンピュータの実現に向けた革新的な発明であったが、ノイズの影響によって量子状態が壊れやすいという根本的な課題は解消していなかった。加えて、2001年のドットコムバブル崩壊によって、日本のコンピュータベンダーが研究への投資を縮小させた背景もあり、国内の量子コンピュータ研究は一気に停滞してしまった。

量子コンピュータブームの第二幕は、2015年ごろから幕を開けた。2015年、グーグルとNASAはD-Waveマシンの性能評価を行い、「特定の条件下では、従来のコンピュータよりも1億倍高速である」とセンセーショナルな論文を発表し世間の注目を集めた。2016年には、IBMが5量子ビットの量子コンピュータをクラウド公開し、一般のエンジニアも量子コンピュータを利用できるようになったのである。その後、マイクロソフトやアマゾンも量子コンピュータをクラウドサービスとして提供していることは周知のとおりである。グーグルが量子超越性の達成を発表した2019年からは、海外のスタートアップが巨額のリスクマネーを獲得し、ハードウェア開発やアルゴリズム研究にしのぎを削っている。さらに金融機関や製造、流通業などのあらゆる業界の代表的なユーザー企業が量子コンピュータへのチャレンジを表明している。

ユーザー企業は、最適化、シミュレーション、機械学習への活用に期待

量子コンピュータを利用すれば、従来のコンピュー

タでは膨大な計算時間を要する金融計算や素材開発のシミュレーションに適用できる。前述の「量子未来社会ビジョン」では、量子コンピュータは創薬・医療、材料、金融、エネルギー、生活サービス、交通、物流、工場などのさまざまな分野での量子技術による価値創出が可能であるという。

量子コンピュータは、「重ね合わせ」や「量子もつれ」といった量子力学の特徴を利用する。さまざまな分野で量子コンピュータの利用が期待される背景には、上記の量子力学の特性を計算に適用できる量子アルゴリズムが存在しているからである。さらにショアのアルゴリズムやグローバーのアルゴリズムであれば、従来のコンピュータの場合よりも少ない計算回数で素因数分解を行ったり、情報の検索を行ったりすることができる。量子振幅推定法というアルゴリズムを利用すれば金融計算で利用されるモンテカルロ計算を2乗加速できる。

量子コンピュータであれば計算を高速化でき、ビジネス上の差別化に貢献できるはずだ、という期待もあり、金融業や製造業、化学メーカーなどの大手企業がこぞって量子コンピュータの研究に参加しているのである（図表1）。

図表1 企業における量子コンピュータへのチャレンジ

	参加企業	主な研究テーマ
金融	ゴールドマン・サックス JPモルガン・チェース シティグループ ウェルズファーゴ BBVA スタンダード・チャータード	コモンウェルス銀行 GE Research 三菱UFJフィナンシャルグループ みずほフィナンシャルグループ イタウ・ウニバンコ
自動車	ダイムラー BMW	フォルクスワーゲン Hyundai
保険	Aioi Nissay Dowa USA	テレマティクスデータ分析
化学	アムジェン メルク コペストロ	創薬プロセスの検討 Li-airバッテリーの開発 新素材開発
物流	DHL	カーゴパッキングの最適化 海上航行する船舶の運航最適化 半導体物質の分子シミュレーション 画像検索 航空課題への適用
製造	サムスン電子 ソニー	ポーイング エアバス
その他	エネル	サウジアラムコ 電力配送 エネルギー管理の最適化

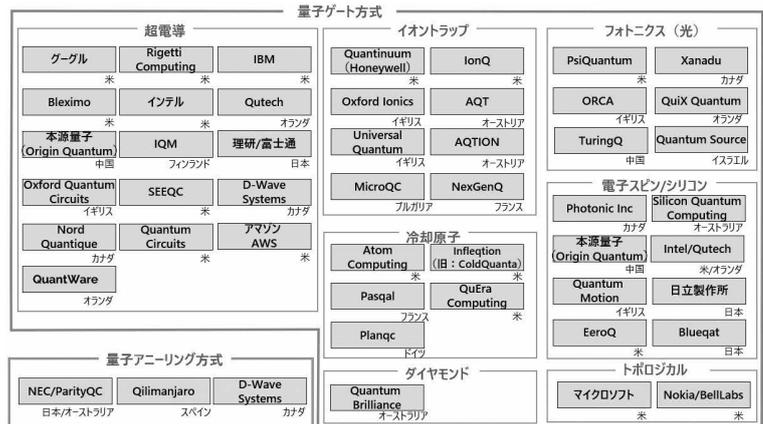
出所：公開情報をもとにNRIが作成

量子コンピュータ開発の現在地

量子コンピュータはブームの第二幕に突入したものの、第一幕で露見した技術課題を解消したわけではな

い。ハードウェア、ソフトウェアともに研究段階である。量子コンピュータの要となる量子ビットを作る手法は複数存在する。先に紹介した超電導方式のみならず、イオントラップ、フォトニクス（光）、量子ドット（シリコン量子ビット）、冷却原子などが代表的な量子ビットの実現手法があり、国内外のさまざまな企業が開発に着手している（図表2）が、現時点でどの方式が主流になるかは定かではない。

図表2 量子コンピュータの実現方式と企業



出所：公開情報をもとにNRIが作成

量子状態はノイズの影響を受けて壊れやすく、正確な計算ができないことが多い。現在の量子コンピュータの計算誤り率（エラー率）は1%、良くても0.1%程度である。実用的な計算を行う場合には、エラー率を10のマイナス6乗以下に抑えなければならない。加えて量子コンピュータで高速に問題を解くことを保証するアルゴリズムは10個程度しか見つからない。

ノイズに起因する計算誤りへの対処と、従来のコンピュータの計算性能を凌駕するための量子ビットの大規模化の両立は至難の業である。現在、IBMやアマゾン、マイクロソフトは量子コンピュータをクラウドサービスとして提供しているが、彼らのサービスも同様である。誤解を恐れずいえば、現在利用可能な量子コンピュータは、業務用途というより量子コンピュータの動作を学ぶための教材、あるいはノイズがある量子コンピュータでも利用できる新しい量子アルゴリズムを開発するための検証機としての位置付けのほうが適切であろう。

海外勢は積極ロードマップとリスクマネーの獲得で研究を加速

海外では、IBMやグーグルなどの大手クラウドプレイヤーが、2030年前後を目標に100万量子ビットの量子コンピュータ開発に向けたロードマップを発表している。スタートアップへの投資は旺盛である。たとえば、ハードウェア開発ではPsiQuantum（サイクオンタム）社は6億65百万米ドル（約898億円）、Quantinuum（クオンティニウム）は3億25百万米ドル（約429億円）を資金調達している。量子ソフトウェア開発では、Zapata Computing（ザパタ・コンピューティング）は67百万米ドル（約90億円）、Classiq（クラシック）は62百万米ドル（約84億円）といった具合である（2023年3月時点のレート、1ドル=135円で計算）。海外のスタートアップは一見ブラフとも捉えかねない高い目標を掲げながら、優秀な人材と巨額の資金を獲得している（図表3）。

一方、日本では量子ソフトウェアの開発を行うQunasysが総額約17億円の投資を受けているものの、量子コンピュータ研究は総じて公的資金頼りである。理化学研究所がクラウド公開した超電導型の量子コンピュータも64量子ビットであり、IBMの422量子ビットに比べると見劣りしてしまう。量子ビットの規模の大きさを世間の注目を集める海外勢に比べ、日本はノイズを抑制するための量子ビットの実装方法など基盤技術の研究では着実に成果を上げつつある。ロードマッ

プに対する注目度とリスクマネーの獲得で研究を進める海外勢と、地道であるが着実に研究ステップを踏んでいく日本の、どちらのアプローチが優れているかは、技術の基礎研究である現段階では断言が難しい。

「量子の冬」に備える

近年、海外では、AIが経験した普及のサイクルにならって「量子の冬」がくるのでは、という懸念の聲が上がっている（図表4）。米国でSPAC上場したりゲティ・コンピューティング（RGTI）やD-Waveシステムズ（QBTS）の株価は、米国における上場廃止の基準値である1ドル前後を推移するなど市場の目は厳しい。売上に対してコストが大幅に超過する傾向が続いている。現時点での量子ビジネスは、国家プロジェクトへの参画や単発のPoC（概念検証）頼りであり、世間の期待と現実には大きな乖離があることをくしくも証明してしまった。

量子コンピュータは、バイオテクノロジーや宇宙開発などと並んで「ディープテック（Deep Tech）」といわれるテーマのひとつである。ディープテックは、社会的な変革をもたらす技術として期待されるものの、技術が成熟しておらず、かつユーザーの受容に時間を要する。量子コンピュータの場合、ノイズの影響に耐性を持ち、古典コンピュータの計算性能を凌駕するFTQC（エラー耐性量子コンピュータ）が、実現するのは20年後とも30年後ともいわれている。2023年3月末に理化学研究所がクラウド公開を開始した量子コ

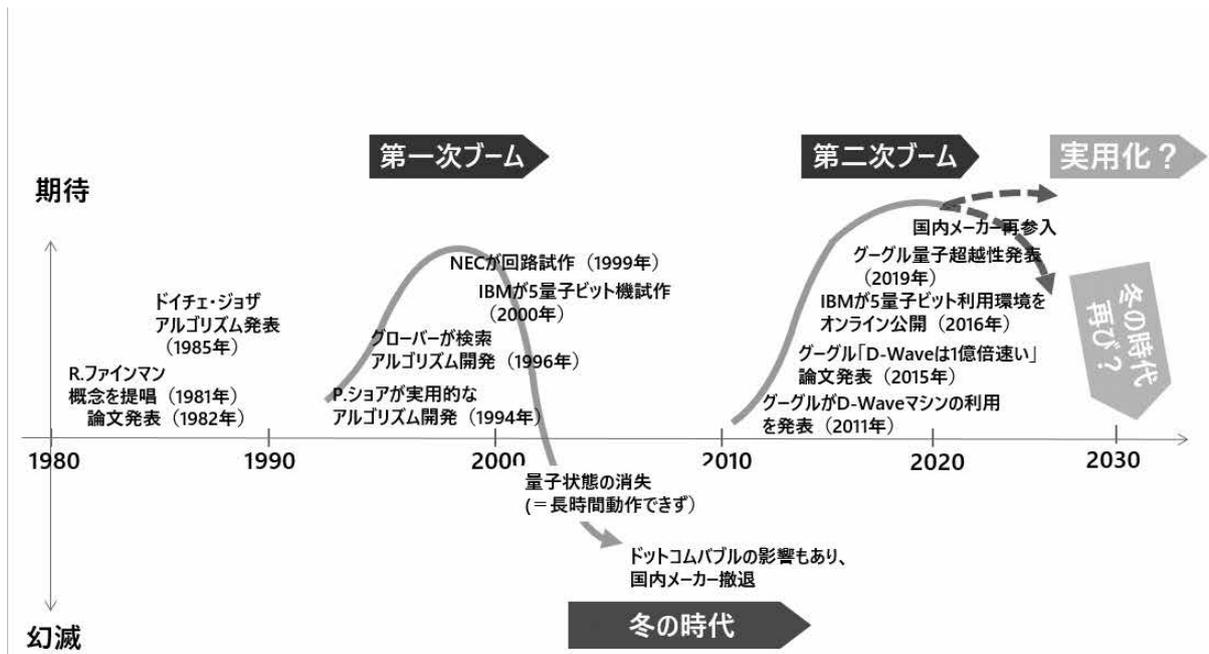
図表3 主要スタートアップの資金調達状況（2023年3月時点）

プレイヤー	設立国	事業の概要	資金調達総額	
ハードウェア	PsiQuantum	米国	光量子コンピュータ	\$665M（約898億円）
	Quantinuum	米国/イギリス	イオントラップ量子コンピュータ、量子ソフトウェア	\$325M（約429億円）
	IQM	フィンランド	超電導方式量子コンピュータ	€238M（約333億円）
	Xanadu	カナダ	光量子コンピュータ	\$235M（約317億円）
	Infleqtion (旧ColdQuanta)	米国	冷却原子量子コンピュータ	\$184M（約284億円）
	OriginQuantum	中国	超電導方式量子コンピュータ	\$152M（約205億円）
	Atom Computing	米国	冷却原子量子コンピュータ	\$81M（約96億円）
	Oxford Quantum Circuits	イギリス	超電導方式量子コンピュータ	\$46M（約65億円）
	Oxford Ionics	イギリス	イオントラップ方式量子コンピュータ	£37M（約60億円）
	ソフトウェア	Zapata Computing	米国	ソフトウェアプラットフォームOrquestra
Classiq Technologies		イスラエル	量子回路設計不要のソフトウェア	\$61.8M（約84億円）
Q-CTRL		オーストラリア	量子アルゴリズム、量子センシングソフトウェア	\$43.4M（約59億円）
QCWare		米国	量子アルゴリズム、量子ソフトウェア	\$41.4M（約55億円）
1QBit		カナダ	量子コンピュータ用ソフトウェア開発	\$35.6M（約48億円）
Qunasys		日本	量子コンピュータ用ソフトウェア開発	\$12.8M（約17億円）

※1ドル（\$）=135円、1ポンド（£）=159円、1ユーロ（€）=140円で計算

出所：野村総合研究所

図表4 量子コンピュータへの期待と不安



出所：野村総合研究所

ンピュータを含め、今後10年間にわれわれが利用可能な量子コンピュータは、NISQ（ノイズがあり中規模程度の量子ビットをもつ量子コンピュータ）である。ノイズの影響を排除するためのさまざまなエラー補正機能が施されているものの、正しい計算結果を得られないこともある。極論すれば、従来のコンピュータのほうが計算の精度も計算に要するコストも優位である。

そんななか、IBMのクリシュナCEOは2023年のダボス会議において「量子技術は材料、化学、暗号化、最適化の問題を含む世界に驚異をもたらすことができる。2025年までにこのような問題が量子コンピュータによって解決されるのを見ることができる」と発言した。また、米国のゴールドマン・サックスは2021年4月に、5～10年以内に登場するNISQの量子コンピュータを使って実行可能な新しいアルゴリズムをQC Ware（QCウェア）と共同で開発したと発表した。デリバティブ（金融派生商品）のリスク分析などに必要な「モンテカルロシミュレーション」に適用すると宣言している。

これらの精力的なコメントは、現時点の量子コンピュータが決して楽観的なものではなく、当面は企業のビジネスに優位な成果をもたらす存在にはならないことに対する裏返しとも捉えることができる。しかしながら、IBMやアマゾンなどの大手ITベンダーは、エコシステムの構築に向けた動きを加速させ、日本では「量子未来社会ビジョン」を旗印にした国家プロジェ

クトがこれから始動する。量子コンピュータが将来登場することは間違いない。むしろ問題にすべきは、企業は段階的に進化していく量子コンピュータをどう使いこなすか、自社ビジネスの差別化要素として位置づけられるかである。

量子コンピュータを利用できる人材の育成は一筋縄ではいかない。従来のコンピュータを使う場合との違いの理解も含めて、幅広いスキルが求められる。近年は、GPUなどの既存の計算機を用いた量子シミュレータの提供が始まっており、量子にこだわらなくとも疑似的に量子計算を行える。

自社にとっての量子人材とは何か。量子時代が到来する前に、検討すべきではないだろうか。

（筆者略歴）

2001年より野村総合研究所にて先端技術の調査研究に従事。量子コンピュータやAugmented Human（人間拡張）などの先端テクノロジーの動向調査、コンサルティングを中心に活動中。専門は、モバイル端末やセンサーなどのデバイステクノロジー、5Gなどの無線通信技術や、量子コンピュータなど。