

# 国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau  
National Diet Library

論題 Title	社会実装（実用化）と社会への影響及び課題
他言語論題 Title in other language	Social Implementation/Practical Applications and Impact on Society and Issues
著者 / 所属 Author(s)	山本 俊 (YAMAMOTO Takashi) / 大阪大学大学院基礎工学研究科 / 量子情報・量子生命研究センター (QIQB) 教授、野口 裕信 (NOGUCHI Hironobu) / 大阪大学量子情報・量子生命研究センター (QIQB) 特任准教授、松岡 智代 (MATSUOKA Tomoyo) / 大阪大学量子情報・量子生命研究センター (QIQB) 産学共創准教授 株式会社 QunaSys COO、町田 尚子 (MACHIDA Naoko) / 大阪大学量子情報・量子生命研究センター (QIQB) 特任准教授
書名 Title of Book	量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Quantum Information Technologies)
シリーズ Series	調査資料 2021-6 (Research Materials 2021-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-03-30
ページ Pages	—
ISBN	978-4-87582-888-4
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	量子情報技術の社会実装について、企業動向や特許動向、人材育成、それらを包括するエコシステムの形成といった観点から解説する。

\* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

\* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。



国立国会図書館

National Diet Library, Japan

## 第3章 社会実装（実用化）と社会への影響及び課題

### 【要旨】

量子情報技術が進歩し、理解され、社会実装される時代では、アカデミア、インダストリー、ユーザ、ビジネスなどの様々な領域にまたがった活動が活発化してくる。それぞれの領域において、様々な人材が活動し、それらの結果として、量子情報技術が社会に影響を及ぼすようになる。これらの活動を後押しする各国の施策に関しては第4章で記述することにして、本章では、主にインダストリー、ユーザ、ビジネスに関係が深い企業動向や特許動向、アカデミアに関係が深い人材育成、それらを含むエコシステムの形成について、幅広い視点から議論する。

### I 量子情報技術の今後の展開と期待される社会像

これまで、第1章及び第2章において、量子情報技術の誕生から現在までの発展と今後の展開を、その原理や技術的な側面を中心に専門家の視点で解説した。量子コンピュータや量子シミュレータはクラウド上で利用できるサービスが始まるようになり、量子センシングは現場での利用が可能なレベルにまで技術が進んでいる。それらの量子デバイスをつなぎ、セキュア通信を実現する量子通信・ネットワークでは量子暗号通信の商用サービスが開始され、その次の量子インターネットのフィールド実験が進みつつある。

これまで一部の専門家のものであった量子情報技術は、今や広く開放され、様々な人々の議論の的になっており、現在はまさに量子2.0の社会実装の黎明期である。量子2.0は人類が手にし得る究極の技術であり、その適用範囲はあまりにも広く、量子2.0が実装された社会像を描くことは筆者の手に余るが、一つの例として内閣府ムーンショット型研究開発制度の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」が目指す社会像を以下に挙げておく<sup>(1)</sup>。

- ・ 量子コンピュータを含む量子技術を応用し、様々な分野で革新を生み出し、知識集約型社会へのパラダイムシフトや既存の社会システムを変革する。
- ・ 目標の達成とその過程においてスピン・オフ、スピン・アウトする量子技術により、産業競争力の強化、革新的な医療と健康管理、デジタル情報時代の安全とセキュリティを確保する。
- ・ 材料開発では、詳細な機能分析により、既存材料の性能を最大化するとともに、新しい性能を持つ材料の開発を加速する。
- ・ エネルギー分野では、高精度量子化学計算による窒素固定法や高効率人工光合成法の原理を解明するとともに、工学的応用手法を開発する。
- ・ 創薬分野では、より大きな分子系における量子化学シミュレーションにより新薬の発見を促進し、合理化されたワークフローによってコストを削減する。

\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和4（2020）年2月25日である。

(1) 「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」内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub6.html>>

- ・ 経済分野では、迅速でエネルギー消費の少ない逐次大規模計算により、短期的ポートフォリオの最適化と長期的リスク分析に対応する。
- ・ 輸送、交通等の物流分野では、巡回セールスマン問題等の最適化問題を解き、サプライチェーンとスケジューリングの合理化による交通渋滞を緩和する。
- ・ 大規模シミュレーションと AI による天気予報の精度の向上、災害の早期警報、企業価値の高精度予測及び金融商品の取引戦略の強化を実現する。

このような未来の社会像に向けた社会実装のフェーズでは、様々な視点から量子情報技術を議論していく必要があると言えよう。

本章では、現在、量子情報技術に取り組む企業の期待や戦略を含めた動向、開発された量子情報技術を利用するユーザ企業の取組、企業の枠を超えた協議会やコミュニティ形成、「ハードウェア」、「ミドルウェア」、「ソフトウェア」、「ユーザ」を巻き込んだエコシステムの形成やその課題等を国内外の情勢を踏まえて解説し、それらを支える人材育成、大学教育システム、資格制度や特許出願動向の国内外情勢を解説する。

執筆：大阪大学大学院基礎工学研究科／

量子情報・量子生命研究センター（QIQB）教授 やまもと たかし 山本 俊

## II 量子情報技術に取り組む企業の動向

### 1 量子コンピュータに係る企業動向

#### (1) なぜ今量子コンピュータが注目されているのか

2010年代になって量子コンピュータが産業界で一躍脚光を浴びることになった。その要因はいくつも考えられるが、本節では、デジタル化、IT化の進展によって生じた量子コンピュータへの期待を、人工知能（AI）技術の発展と米国系巨大IT企業の経営戦略上の課題と関連付けて説明する。

機械学習や深層学習など、特定のタスクに対し一定の計算量を要するAI技術は、画像処理や時系列処理などのアプリケーションの基本的な性能向上に寄与するため、あらゆる製品・サービスに浸透してきている。このため、携帯電話やIoT機器といったエッジデバイスやクラウドサービスを提供する企業のデータセンターのメインフレームなど、タスクを実行する計算機全般に求められる計算能力の、更なる高度化が求められている。

従来のコンピュータ（古典コンピュータ）は、ムーアの法則（Moore's law）と呼ばれる半導体集積化の経営戦略に従って、また、大規模並列化の手法を採用することによって、計算能力を増大させており、この試みは今なお世界中で継続中である。一方、この古典コンピュータとは異なる仕組みに基づいて動作する量子コンピュータは、特定のアルゴリズムにおいて、少ない量子ビット数で古典コンピュータの計算能力を凌駕することが知られているが、実用化には程遠い開発段階であることも同様に周知されている。この量子コンピュータが今なぜ注目を集めているのか、表1に記載された米国系巨大IT企業の製品・サービスを参照しながら考察する。

エッジデバイスからクラウドサービス提供に至る垂直統合型のサービスを展開している米国系巨大IT企業は、これまでIntel等が販売してきた汎用プロセッサを採用してきたが、最近では自社でプロセッサを開発、製造し、利用する方針に転じている。自社で展開している多数のエッジデバイスやSaaS（Software as a Service）、アプリケーションにおいて、AI技術を用いた高負荷な計算タスクを実行する場合、それらと連携して実行されるクラウドサービスのサーバー上の計算タスクや消費電力量は飛躍的に増大する見込みである。ただでさえ自社が展開する製品、サービスの利用度が高まる中で、このような計算資源を逼迫（ひっばく）する問題が生じるのは、彼らにとって死活問題である。そのため、自社の製品・サービスにおいて、少しでも性能、消費電力の視点で最適化されたプロセッサを採用することが当該企業の経営戦略上大変重要な課題となっている<sup>(1)</sup>。

一方、量子コンピュータの有望な応用先として考えられているのは、材料、薬剤等の開発に利用される量子化学計算<sup>(2)</sup>のほか、件のAI技術である。量子機械学習と呼ばれる分野の発展により、将来的に量子コンピュータが、AI技術関連の特定タスクにおいて、内製プロセッサ

\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和4年（2022）年2月3日である。また、日本円換算は令和4（2022）年2月分報告省令レートに基づき、1ドル=114円、1ユーロ=129円、1豪ドル=82円として行い、適宜四捨五入した。

(1) 津田建二「GAFAなど大手IT企業が自社向け半導体の開発に力を入れるわけとは—半導体入門講座(1)—」2020.6.18 MINSAKUウェブサイト<<https://minsaku.com/articles/post605/>>; 大越章司「Google、Microsoftに続いてAmazonもプラットフォームがプロセッサ開発を手掛けるわけ」2018.12.5. ITmedia エンタープライズウェブサイト<<https://www.itmedia.co.jp/enterprise/articles/1812/05/news059.html>>

(2) 原子や分子の構造やエネルギー等の物理量を電子状態から解析する手法。

で構成されたスーパーコンピュータよりも高い計算能力を示すかもしれない。したがって、米国系巨大IT企業にとって、自社で抱える量子コンピュータの性能の向上は、従来型のプロセッサの性能向上と同様に、自社で抱える全ての製品・サービスに対して、他社との競争優位をもたらす可能性を秘めており、それゆえ注目され、研究、開発、投資が盛んに行われている。量子コンピュータは現在、ノイズによって生じる量子ビットの制御に誤りが存在する状況下で計算を行うNISQ（Noisy Intermediate-Scale Quantum）マシンとして利用されている段階にあり、ノイズによって生じる量子ビットの誤りを訂正する機構が実装される誤り耐性量子コンピュータは、その本格利用の段階には程遠い状態であるため、競争優位を獲得するまでにはまだまだ長い期間を要する見込みである。

ここまで、量子コンピュータが注目を浴びているのは、AI技術の普及がもたらした米国系巨大IT企業の経営課題の解決につながる可能性があるためである、と説明してきた。次節以降、量子コンピュータを構成するハードウェアからソフトウェアに及ぶ階層ごとに、企業の量子コンピュータ研究開発や事業化に関する動向を紹介する。

表1 米国系巨大IT企業の製品・サービス一覧

製品カテゴリ／企業	Google	IBM	Microsoft	Amazon	Intel
エッジデバイス向けプロセッサ	・ Google Tensor	-	・ Microsoft SQ2	-	・ Core i9
エッジデバイス	・ Pixel ・ Chromebook ・ Chromecast ・ Home ・ Nest Hub	-	・ Surface ・ HoloLens ・ Xbox ・ Kinect	・ Echo & Alexa ・ Fire TV ・ Kindle ・ Amazon Go ・ ロボタクシー（ズークス）	-
OS、ソフトウェア開発環境	・ Android ・ WearOS ・ Android Auto ・ <i>Cirq</i>	・ Red Hat ・ z/OS ・ <i>Qiskit</i>	・ Windows ・ <i>Azure Quantum Development Kit</i>	-	-
SaaS（Software as a Service）、アプリケーション	・ Google 検索 ・ Gmail ・ Google Map ・ <i>Open Fermion</i> ・ <i>TensorFlow Quantum</i>	・ Watson	・ Microsoft 365 ・ Azure IoT	・ Amazon	-
PaaS（Platform as a Service）	・ GCP	・ IBM Cloud ・ <i>IBM Quantum Experience</i>	・ Azure ・ <i>Azure Quantum</i>	・ AWS	-
クラウド利用ハードウェア向けプロセッサ	・ TPU（AI用途） ・ <i>Sycamore</i> ・ <i>他社 QPU (IonQ)</i>	・ Telum（AI用途） ・ <i>Falcon</i> ・ <i>他社 QPU (IonQ)</i>	・ <i>他社 QPU (Honeywell, IonQ, IQbit)</i>	・ Graviton ・ <i>他社 QPU (Rigetti, IonQ, D-Wave)</i>	・ Xeon ・ <i>Horse Ridge</i>

（注1） 太字斜体は量子コンピューティング製品・サービスを表す。QPU（quantum processing unit. 量子処理ユニットの意）。

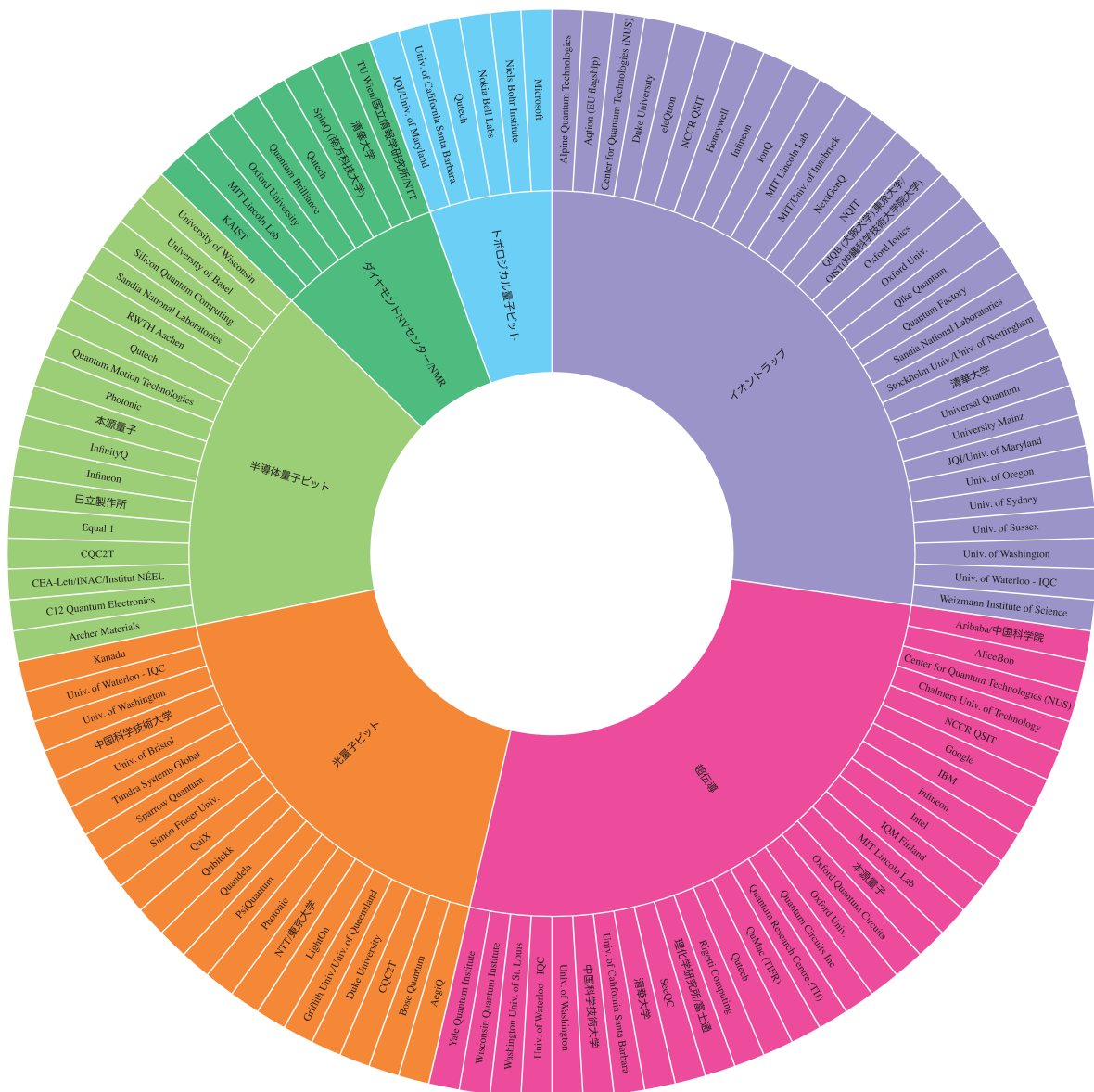
（出典） 2021年9月11日に開催された、応用物理学会一般公開シンポジウム「量子コンピュータ：システム構築のための技術と期待されるアプリケーション」における、日立製作所水野弘之氏の発表資料を基に2021年11月筆者作成。



## (2) プロセッサを取り巻く企業の動向

本項では量子コンピュータのプロセッサを研究、開発、事業化するプレイヤーの動向を、その物理的実現方式別に紹介する。図1に量子コンピュータの代表的な企業、研究機関を物理的実現方式ごとに分類した。図中にて物理的実現方式は超伝導方式、イオントラップ方式、半導体量子ビット方式、光量子ビット方式、ダイヤモンドNVセンター<sup>(3)</sup>／NMR<sup>(4)</sup>方式、トポロジカル量子ビット方式と分類したが、プロセッサが実現していない後者2方式に関する本文での説明は割愛した。他にも冷却中性原子方式が存在するが、こちらは次節の量子シミュレーションに係る企業動向で説明する。

図1 プロセッサの物理的実現方式ごとに分類した量子コンピュータの代表的な企業及び研究機関



(出典) LinkedInにおいて Michel Kurek 氏が投稿した図を基に 2021 年 11 月筆者作成。

(3) ダイヤモンドの空孔を利用した室温で動作できる量子素子のこと。  
 (4) 核磁気共鳴のこと。分子の核スピンを量子素子とする。

## (i) 超伝導方式

ゲート型量子コンピュータに搭載されるプロセッサの物理的実現方式のうち、超伝導方式の開発が最も先行している状況にある。米国系巨大IT企業のIBM、Googleや、米国スタートアップ企業のRigetti Computing、中国巨大IT企業のAlibabaなどがこの方式を採用している代表的な企業である。

IBMは、2000年代半ばから当該方式の量子コンピュータの研究を行っており、2010年代半ばに数量子ビットの量子ビットデバイスを実現し、2016年に世界で初めてクラウド上で量子コンピュータを公開した。2021年11月現在は5量子ビット搭載のCanaryと27量子ビット搭載のFalcon、更に127量子ビット搭載のEagleを含む20台以上のシステムがクラウド上で商用稼働している。2022年に433量子ビットを搭載するOspreyを、2023年に1121量子ビットを搭載するCondorをリリース予定であると発表した。1000（物理）量子ビットを利用して誤り訂正可能な論理量子ビットが1ビット実現できるという見立てから、Condorのリリースが誤り訂正可能な量子コンピュータの実用化に向けた一つのマイルストーンであると彼らは考えている<sup>(5)</sup>。

カリフォルニア大学サンタバーバラ校のJohn Martinis氏が率いる研究グループは、2014年4月に量子誤り訂正の閾値（しきいち）に関する要求を満たす水準で5量子ビットとその演算を実現した。GoogleはMartinis氏のチームを吸収し、超伝導方式の量子コンピュータ開発を本格化させた<sup>(6)</sup>。2019年10月、53量子ビットを搭載したSycamoreというチップを使用してランダムな量子回路からなる計算を実行した。この計算はスーパーコンピュータでも1万年かかる見積り<sup>(7)</sup>のところをわずか200秒でかつ十分な正確さで実行できたため、量子超越が実証できたとして話題になった<sup>(8)</sup>。2021年5月には、量子AI部門を統括するHartmut Neven氏が、2029年までに100万物理量子ビット（1000論理量子ビット）からなる誤り訂正可能な商用量子コンピュータを構築する目標を掲げている<sup>(9)</sup>。

Rigetti Computingは、IBMで量子コンピュータ開発に取り組んでいたChad Rigetti氏によって2013年米国に設立されたスタートアップ企業であり、2020年8月に資金調達ラウンド<sup>(10)</sup>のシリーズCにおいて7100万ドル（約81億円）を資金調達した<sup>(11)</sup>。同社は特別買収目的会社（SPAC）との合併によって株式公開企業となることを目指している<sup>(12)</sup>。自社のクラウドサー

(5) Jay Gambetta「IBM、量子技術のスケールアップに向けたロードマップを発表」2020.9.18. IBM ウェブサイト<<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/ibm-quantum-roadmap/>>

(6) Klint Finley, "The Man Who Will Build Google's Elusive Quantum Computer." 2014.9.15. WIRED website <<https://www.wired.com/2014/09/martinis/>>

(7) IBMのグループは古典コンピュータでも2日半で実行可能であると反論しているが、量子コンピュータのほうが高速であることに変わりはない。

(8) Elizabeth Gibney, "Hello quantum world! Google publishes landmark quantum supremacy claim," *Nature*, Vol.574 No.7779, 23 October 2019, pp.461-462. <<https://doi.org/10.1038/d41586-019-03213-z>>; Frank Arute et al., "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor," *Nature* vol.574 No.7779, 23 October 2019, pp.505-510. <<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>>

(9) Sara Castellanos, "Google Aims for Commercial-Grade Quantum Computer by 2029," *Wall Street Journal*, May 18, 2021. <<https://www.wsj.com/articles/google-aims-for-commercial-grade-quantum-computer-by-2029-11621359156>>

(10) スタートアップ企業の初めての資金調達から株式上場や事業会社への売却に至るまでの期間で、投資家がスタートアップ企業へ投資をする際の段階を指す。シードラウンドは起業前から直後の企業が実施する資金調達ラウンドで、シリーズAからDにかけて資金調達の際に発行する優先株式の種類が異なる。

(11) Frederic Lardinois「量子コンピュータのRigettiが約83億円のシリーズCラウンドをクローズ」2020.8.5. TechCrunch ウェブサイト <<https://jp.techcrunch.com/2020/08/05/2020-08-04-rigetti-raises-79m-series-c-for-its-quantum-computing-platform/>>

(12) 2021年10月6日付プレスリリース。"Rigetti Computing, a Global Leader in Full-Stack Quantum Computing, Announces Plans to Become Publicly Traded via Merger with Supernova Partners Acquisition Company II." Rigetti Computing website <<https://www.rigetti.com/merger-announcement>>



ビス及び Amazon Braket<sup>(13)</sup> から同社の量子コンピュータへのアクセスを提供している。2021年10月現在 Aspen-9 という 32 量子ビット搭載のプロセッサを商用化しており<sup>(14)</sup>、2021 年中に 100 量子ビット以上を搭載するプロセッサを商用化する予定であるという<sup>(15)</sup>。

実機の商用化には至っていないものの、Amazon は John Preskill 氏など量子コンピューティング分野の名高い研究者を擁するカリフォルニア工科大学をパートナーに据えて、2021 年 10 月に AWS 量子コンピューティングセンターの開設を公表した<sup>(16)</sup>。

Alibaba は 2015 年に中国科学院と共同で量子計算実験室を設立し、2025 年までに量子シミュレーションを 2015 年当時の世界最速のスパコン水準まで引き上げ、2030 年までに 50 から 100 量子ビット搭載の量子コンピュータを開発し、プロセッサの大量生産技術を把握する研究計画を立てている<sup>(17)</sup>。同社は 2018 年より 11 量子ビット搭載の量子コンピュータのクラウド利用を提供している<sup>(18)</sup>。

企業による事業化には至らずとも、超伝導方式の量子コンピュータ開発に取り組む研究機関はいくつか存在する。中国において、中国科学技術大学の潘建偉氏が率いる研究チームが、2021 年 5 月に「祖冲之号」という 62 量子ビットの量子コンピュータプロトタイプを開発し、同コンピュータ上でプログラム可能な 2 次元量子ウォーク<sup>(19)</sup>を実現したと発表した<sup>(20)</sup>。日本では、国立研究開発法人として量子コンピュータ研究開発を担う理化学研究所が、2021 年 4 月に量子コンピュータ研究センターを立ち上げた<sup>(21)</sup>。また同月、富士通は超伝導量子コンピュータの実用化に向けて、同センター内に理研 RQC-富士通連携センターを設立し、1000 量子ビット級への大規模化を可能とする研究開発を実施している<sup>(22)</sup>。

## (ii) イオントラップ方式

先行する超伝導方式に追随して研究、開発、事業化されているのがイオントラップ方式で、近年特に企業の合併等の活発な動きが見られている。当該方式の量子コンピュータを研究、開発、事業化している代表的な企業として、IonQ と Honeywell が知られている。

IonQ は 2015 年にメリーランド大学の Christopher Monroe 氏とデューク大学の Jungsang Kim 氏

(13) “Amazon Braket.” Amazon Web Services website <<https://aws.amazon.com/jp/braket/>>

(14) “How we’ve evolved.” *ibid.* <<https://www.rigetti.com/what-we-build>>

(15) “Rigetti Advantage 2020:1.6 Hardware Roadmap: Andrew Bestwick,” 2020.1.23. YouTube website <<https://www.youtube.com/watch?v=C5JDIQbf5I>>

(16) Nadia Carlsten, “Announcing the opening of the AWS Center for Quantum Computing,” 26 Oct 2021. Amazon Web Services website <<https://aws.amazon.com/jp/blogs/quantum-computing/announcing-the-opening-of-the-aws-center-for-quantum-computing/>>

(17) 「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://spc.jst.go.jp/news/150705/topic\\_5\\_03.html](https://spc.jst.go.jp/news/150705/topic_5_03.html)>

(18) “Alibaba Cloud and CAS Launch One of the World’s Most Powerful Public Quantum Computing Services,” 2018.3.1. Alibaba Cloud website <<https://www.alibabacloud.com/ja/press-room/alibaba-cloud-and-cas-launch-one-of-the-worlds-most>>

(19) ランダムウォークの量子版。ランダムウォークする粒子位置の確率分布の分散が時刻  $t$  に比例するのに対し、量子ウォークする粒子位置の確率分布の分散は時刻  $t$  の 2 乗に比例する。

(20) 「中国、62 ビット量子コンピュータの開発に成功」 2021.5.10. AFP BB ニュースウェブサイト <<https://www.afpbb.com/articles/-/3345835>>; Ming Gong et al., “Quantum walks on a programmable two-dimensional 62-qubit superconducting processor,” *Science*, vol.372 Issue 6545, pp.948-952, 26 May 2021. <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.abg7812>>

(21) 理化学研究所「新センター「量子コンピュータ研究センター」開設」 2021.4.1. <[https://www.riken.jp/pr/news/2021/20210401\\_1/index.html](https://www.riken.jp/pr/news/2021/20210401_1/index.html)>。

(22) 理化学研究所・富士通株式会社「理化学研究所と富士通、超伝導量子コンピュータの実用化に向けて連携センターを開設」 2021.4.1. <<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2021/04/1.htm>>

によって共同設立されたスタートアップ企業である<sup>(23)</sup>。2021年現在、同社の量子コンピュータは32量子ビットを搭載し、2028年には32物理量子ビットで誤り訂正するアルゴリズム量子ビット（Algorithmic Qubits）が1024個搭載された量子コンピュータをリリースする予定である<sup>(24)</sup>。同社の量子コンピュータにはGoogle、AWS、Azureのクラウド環境からアクセス可能である。また2021年4月、同社はIBM社が提供しているSDK（ソフトウェア開発キット）であるQiskit用にプロバイダライブラリ<sup>(25)</sup>をリリースした<sup>(26)</sup>。

Honeywellは1885年に設立された電子制御システム等を事業に抱える企業で、Honeywell Quantum Solutionsという事業部が当該方式の量子コンピュータを開発している。10量子ビット搭載のSystem Model H1をリリースしており<sup>(27)</sup>、MicrosoftのクラウドサービスであるAzure quantumからアクセスできる<sup>(28)</sup>。2021年6月、同社の量子ソリューション部門は、量子コンピュータのソフトウェア領域及びサイバーセキュリティ領域等で事業を展開するCambridge Quantum Computingと合併し、Honeywellが株式の過半数を保有する形で新会社を設立し2億7千万ドル（約831億円）以上を投資すると発表した<sup>(29)</sup>。

日本には当該方式で量子コンピュータ開発を行っている企業はいないが、ムーンショット<sup>(30)</sup>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」<sup>(31)</sup>における研究開発プロジェクト「イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ」<sup>(32)</sup>にて、沖縄科学技術大学院大学（OIST）量子情報物理実験ユニット高橋優樹氏の研究グループ<sup>(33)</sup>、東京大学先進科学研究機構野口篤史氏の研究グループ<sup>(34)</sup>及び、大阪大学量子情報・量子生命研究センター（QIQB）豊田健二氏の研究グループ<sup>(35)</sup>がイオントラップ方式の量子コンピュータ構築に取り組んでいる。

### （iii）半導体量子ビット方式

半導体量子ビット方式の量子コンピュータの研究開発を行っている代表的な企業として、半導体素子メーカーとして有名なIntelやオーストラリアのスタートアップ企業であるSilicon

(23) ほぼ毎年の資金調達を実施し、2019年3月に元Amazon Primeの役員であるPeter Chapman氏をCEOに迎え、2021年3月にSPAC（特別目的買収会社）であるdMY Technology Group IIIとの合併によって株式公開企業となることを目指し、10月に上場が実現した。日本からはSoftbank Investment Advisorsが同社に投資しており、2021年6月に戦略的提携を行うと発表された。IonQ website <<https://ionq.com/company>>

(24) Peter Chapman, “Scaling IonQ’s Quantum Computers: The Roadmap.” 2020.12.9. *ibid.* <<https://ionq.com/posts/december-09-2020-scaling-quantum-computer-roadmap>>

(25) 他社プロバイダ（ここではIonQ）のコンピューティングリソースを利用するために定型化された、プログラムの集まりのこと。

(26) Frederic Lardinois・Naoki Tsukamoto「IonQがIBMの量子コンピュータ開発キット「Qiskit」をサポート」2021.4.13. Tech Crunch ウェブサイト <<https://jp.techcrunch.com/2021/04/13/2021-04-12-ionq-now-supports-ibms-qiskit-quantum-development-kit/>>

(27) Honeywell website <<https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum/quantum-computer>>

(28) 「Honeywell プロバイダー」Microsoft Docs website <<https://docs.microsoft.com/ja-jp/azure/quantum/provider-honeywell>>

(29) 「世界最大の単独型量子コンピューティング会社について知っておくべきこと」2021.6. Honeywell website <<https://www.honeywell.com/jp/ja/news/2021/06/what-you-should-know-about-quantum-computing-company>>

(30) 「ムーンショット型研究開発制度」内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>>

(31) 「ムーンショット目標6」科学技術振興機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/index.html>>

(32) 「イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ」同上 <[https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/63\\_takahashi.html](https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/63_takahashi.html)>

(33) 「量子情報物理実験ユニット」沖縄科学技術大学院大学ウェブサイト <<https://groups.oist.jp/ja/equip>>

(34) 東京大学先進科学研究機構ウェブサイト <<https://www.sqei.c.u-tokyo.ac.jp/index.html>>

(35) 「イオンを用いた量子情報処理（豊田グループ）」大阪大学量子情報・量子生命研究センター（QIQB）ウェブサイト <<https://qiqb.osaka-u.ac.jp/labs/toyoda-gr/>>

Quantum Computing が挙げられる。

Intel は、2015年にオランダのデルフト工科大学とオランダ応用科学研究機構（TNO）の共同設立研究機関である QuTech に10年間で5000万ドル（約57億円）投資する協働パートナーシップを結んでいる<sup>(36)</sup>。2019年に当該方式の Horse Ridge<sup>(37)</sup>を開発し、1K（-272.15℃）の温度で量子ビット操作を実現し、2020年12月には Horse Ridge II<sup>(38)</sup>を開発して4Kの温度での量子状態の読み出しと複数量子ビットの操作を実現した。これは超伝導方式等に求められる mK（1千分の1）の温度管理に比べれば管理が飛躍的に容易な温度である。

Silicon Quantum Computing はニューサウスウェールズ大学の Michelle Simmons 氏が2017年に8300万豪ドル（約68億円）以上の政府系基金を基に創業したスタートアップ企業で、2020年9月に前述の John Martinis 氏のグループが参加し注目を浴びた<sup>(39)</sup>。同社は2023年までに10量子ビット搭載のプロセッサプロトタイプを、2030年までに誤り訂正機能を実現できる100量子ビットのプロセッサを、2030年中期を目途に同社のプロセッサでユーザと多様なユースケースを引き付けるようなソリューションの提供を目指している<sup>(40)</sup>。

日本では日立製作所<sup>(41)</sup>が2021年9月、電子を一つずつ閉じ込める量子ドットアレイを形成し、アレイに電子を閉じ込めて制御するための CMOS（相補型金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）回路を同一チップに混載できる半導体プロセス「Q-CMOS」を発表した。2027年からの中期経営計画期間中に量子コンピュータの実験的なクラウドを公開することを目指している<sup>(42)</sup>。

#### (iv) 光量子ビット方式

光量子方式を採用する量子コンピュータの開発を行っている代表的なスタートアップ企業として、カナダの Xanadu や米国の PsiQuantum が知られている。

Xanadu は Christian Weedbrook 氏によって2016年に設立され、2019年に資金調達ラウンドのシリーズ A にて3200万ドル（約36億円）を資金調達した。さらに、SDTC（Sustainable Development Technology Canada. 持続可能な開発技術に関するカナダ政府の資金配分機関）や DARPA（米国国防高等研究計画局）から助成を受けている<sup>(43)</sup>。同社は世界で初めて当該方式の量子コンピュータをクラウドで公開し、6か月ごとに搭載する量子ビット数を2倍にする計画を立てている<sup>(44)</sup>。2021年現在、8量子ビット、12量子ビット、24量子ビットを搭載する同社の量子コ

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

(37) L. Petit et al., “Universal quantum logic in hot silicon qubits,” *Nature*, Vol.580, [2020.4.16], pp.355-359. <<https://arxiv.org/pdf/1910.05289.pdf>>

(38) “Fact Sheet: Intel’s Horse Ridge II Streamlines the Complexity of Quantum Control Systems,” 2021.2.8. Intel website <[https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2021/02/Intel-Horse-Ridge-II\\_Fact-Sheet-650989.pdf](https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2021/02/Intel-Horse-Ridge-II_Fact-Sheet-650989.pdf)>

(39) Paul Smith-Goodson, “Quantum Computing’s New Dynamic Duo: John Martinis And Michelle Simmons,” 2021.1.11. Forbes website <<https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2021/01/11/quantum-computings-new-dynamic-duo-john-martinis-and-michelle-simmons/?sh=77bc555bee86>>

(40) Silicon Quantum Computing website <<https://sqc.com.au/>>

(41) 日立製作所ウェブサイト <<https://www.hitachi.co.jp/>>

(42) 朴尚洙「日立がシリコン量子ビットの開発に向け前進、超伝導量子ビットを超えるか」2021.9.15. MONOist ウェブサイト <[https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/2109/15/news059\\_3.html](https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/2109/15/news059_3.html)>

(43) Paul Smith-Goodson, “Xanadu Brings Photonic Quantum Computing To The Cloud,” 2020.9.9. Forbes website <<https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2020/09/09/xanadu-brings-photonic-quantum-computing-to-the-cloud/?sh=2de6d21264e6>>

(44) Emil Protalinski, “Xanadu launches quantum cloud platform, plans to double qubits every 6 months,” 2020.9.2. VentureBeat website <<https://venturebeat.com/2020/09/02/xanadu-phonics-quantum-cloud-platform/>>



ンピュータそれぞれに対し、クラウドからアクセスできる<sup>(45)</sup>。

PsiQuantum はスタンフォード大学及びブリストル大学の Jeremy O'Brien 氏が 2016 年に創立し、2021 年 7 月には資金調達ラウンドのシリーズ D にて 4 億 5 千万ドル（約 513 億円）の資金調達を実施している<sup>(46)</sup>。

他のプロセッサメーカーが注力する物理的実現方式を問わず、搭載する量子ビット数が中規模な状態での利用に留まる直近の NISQ 時代での活用を目標の一部に掲げている中で、同社は NISQ 時代の目標は設けず、誤り訂正可能な 100 万量子ビット搭載のプロセッサの開発を目標に掲げているという特徴がある<sup>(47)</sup>。

中国科学技術大学の潘建偉氏のチームは当該方式の量子コンピュータを利用してボゾンサンプリング問題<sup>(48)</sup>を古典コンピュータよりも 100 兆倍高速に実行できたことから量子超越を主張している<sup>(49)</sup>。日本では NTT が光量子コンピュータの実現に向けて理化学研究所及び東京大学と共同で研究を実施している<sup>(50)</sup>。

### (3) ミドルウェアを取り巻く企業の動向

量子コンピュータプロセッサ中の量子ビットを操作するために、超伝導方式、イオントラップ方式、半導体量子ビット方式ではマイクロ波が、光量子ビット方式では偏光板やビームスプリッターといった光学素子が利用されている。より上位の階層によってプログラム化された命令を用いてプロセッサを制御する量子コンピュータの階層をミドルウェアと呼び、近年特にマイクロ波を用いて量子ビットを操作するミドルウェアが事業化されている。

2018 年にイスラエルで創業されたスタートアップ企業の Quantum Machines は、超伝導方式、半導体量子ビット方式、ダイヤモンド NV センター方式、冷却中性原子方式の量子ビットを操作できるミドルウェアを開発している<sup>(51)</sup>。マイクロ波によって量子ビットを制御する同社製品の Operator-X は、2021 年 9 月時点で 15 か国の企業、大学、その他の組織で利用されている<sup>(52)</sup>。

米国の電子計測機器メーカーである Keysight は、超伝導方式、イオントラップ方式、半導体量子ビット方式の量子ビット制御が可能な製品を取り揃えている<sup>(53)</sup>。

日本でも 2021 年大阪大学発のスタートアップとして QuEL<sup>(54)</sup>が創業された。QuEL は超伝導方式、イオントラップ方式のいずれの方式の量子コンピュータ上でも量子ビットの制御が可能な汎用ミドルウェアを開発している。

(45) “Xanadu Quantum Cloud.” Xanadu website <<https://www.xanadu.ai/cloud>>

(46) “PsiQuantum.” Golden website <<https://golden.com/wiki/PsiQuantum-PBDGXRA>>

(47) PsiQuantum website <<https://psiquantum.com/>>

(48) 複数のボゾン（例：光子）の時間発展後（例：光路ネットワークを通過後）における測定結果の確率分布を求める問題。量子コンピュータを使えば古典コンピュータより問題のサイズ（入力ボゾンの個数）の増加に対し指数的に早く解ける可能性がある問題として知られている。

(49) Tom Simonite 「中国の研究チームが達成した「量子超越性」が意味すること」 2020.12.5. WIRED ウェブサイト <<https://wired.jp/2020/12/05/china-stakes-claim-quantum-supremacy/>>; Han-Sen Zhong et al., “Quantum computational advantage using photons,” *Science* Vol.370 Issue6523, 2020.12.3, pp.1460-1463.

(50) 日本電信電話ほか「世界初、ラックサイズで大規模光量子コンピュータを実現する基幹技術開発に成功 ～光ファイバ結合型量子光源を開発～」 2021.12.22. <<https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/12/22/211222a.html>>

(51) Quantum Machines website <<https://www.quantum-machines.co/>>

(52) Maria Deutscher, “Quantum Machines reels in \$50M for its quantum computer orchestration platform,” 2021.9.6. siliconANGLE website <<https://siliconangle.com/2021/09/06/quantum-machines-reels-50m-quantum-computer-orchestration-platform/>>

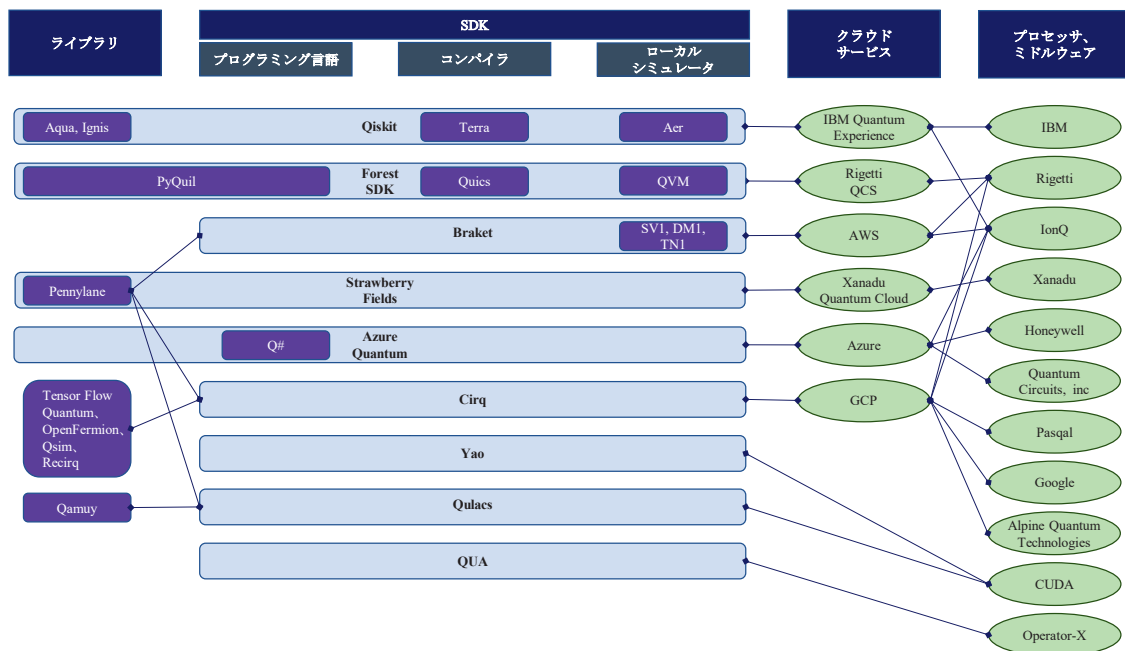
(53) 「量子ソリューション」 Keysight website <<https://www.keysight.com/jp/ja/solutions/emerging-technologies/quantum-solutions.html>>

(54) QuEL website <<https://quel-inc.com/ja/home/>>

(4) ソフトウェア開発環境、クラウドサービスを取り巻く企業の動向

プロセッサやミドルウェアに必要な計算を実行させるために、ユーザ側で実行しなければならない処理をソフトウェア開発環境（SDK）としてまとめたものが複数存在する。SDKのなかでも量子アルゴリズムに特化したプログラミング言語や、プログラミング言語をより機械語に近い形式に翻訳するコンパイラ、ローカルシミュレータなどが存在する。また、必要な時にだけ呼び出すことができるライブラリ<sup>(55)</sup>が、SDKに含まれていることもある。このほか、プロセッサへの命令はクラウドサービスを介して送るのが一般的な利用形態となっている。図2にソフトウェア開発環境、クラウドサービス、プロセッサ等の接続関係を示した。

図2 量子ソフトウェア開発環境、クラウドサービス、プロセッサ等の接続関係



(出典) 各社ウェブサイトを基に 2021 年 11 月筆者作成。

自社独自開発のプロセッサを商用化している IBM、Google、Rigetti、Xanadu は、そのプロセッサを動作させるために、それぞれ Qiskit<sup>(56)</sup>、Cirq<sup>(57)</sup>、Forest SDK<sup>(58)</sup>、Strawberry Fields<sup>(59)</sup> と呼ばれる SDK とクラウドサービスを提供している。同様に、現時点で独自のプロセッサを用いたサービスを提供していない Microsoft や AWS は、複数他社のプロセッサを制御できる SDK とクラウドサービスとして、それぞれ Azure Quantum<sup>(60)</sup> と Amazon Braket を提供している。IonQ は IBM、Microsoft、Google、Amazon という米国巨大 IT 企業のクラウドサービスから軒並み利用できる状況にある。

このほか、現時点でプロセッサとの接続はなく、手元の古典コンピュータから、「量子コンピュータで計算を実行したらどのような結果が得られるか」を計算する、量子コンピュータの

(55) 特定の機能をもつプログラムを定型化して、他のプログラムから呼び出しができる状態にしたもの。  
 (56) Qiskit website <<https://qiskit.org/>>  
 (57) “Cirq.” Google Quantum AI website <<https://quantumai.google/cirq>>  
 (58) pyQuil website <<https://pyquil-docs.rigetti.com/en/v2.3.0/>>  
 (59) “Tutorials.” Strawberry Fields website <<https://strawberryfields.ai/photronics/demonstrations.html>>  
 (60) “Azure Quantum.” Microsoft Azure website <<https://azure.microsoft.com/ja-jp/services/quantum/>>



シミュレータとして開発された SDK も存在する。代表的なシミュレータとして、大阪大学と大阪大学発スタートアップ企業の QunaSys によって共同開発された Qulacs<sup>(61)</sup> や、中国科学院等の支援により 羅秀哲氏らが開発した Yao<sup>(62)</sup> が知られている。

量子コンピュータのプロセッサそのものではないものの、ミドルウェア階層でサービスを実施している Quantum Machines は、自社の製品 Operator-X による制御をソフトウェア側で統合管理するプラットフォームとして、QUA<sup>(63)</sup> を提供している。

量子化学計算や量子機械学習といった特定の分野での量子アルゴリズムのソフトウェア実装を助けるライブラリも活発に開発されている。Google の SDK である Cirq を例にとると、機械学習ライブラリとして広く利用されている TensorFlow<sup>(64)</sup> 内で量子機械学習が実行できる TensorFlow Quantum<sup>(65)</sup> や、化学・材料開発に応用されるフェルミ系の量子シミュレーション<sup>(66)</sup> を実行できる OpenFermion<sup>(67)</sup> 等がライブラリとして利用できる。

図2のように量子コンピュータのソフトウェアといっても数々のコンポーネントが存在するようになったが、一つの言語でデータ変換、最適化、コンパイル、プロセッサへの命令形式へのマッピングを実行し、異なるシミュレータ、プロセッサでのプログラム実行を出力できるコンパイラ兼ソフトウェアツールキットとして staq<sup>(68)</sup> をウォータールー大学のグループが開発している。同様の試みはオークリッジ国立研究所のグループによる XACC<sup>(69)</sup> にも確認される。

## 2 量子シミュレーションに係る企業動向

量子シミュレーションは、冷却原子等を用いてイジング型量子スピン系をはじめとする量子多体系<sup>(70)</sup> をそのまま実装するという試みで、実装をソフトウェア化することによって最適化問題への応用等にも適用可能である。また最近ではゲートを実装することで前項と同様に量子コンピュータを製作するという動きが見られている。

2011年にパリ・サクレ大学量子研究所からスピンオフして創業された Pasqal<sup>(71)</sup> は、2021年7月に100個以上のリユードベリ原子<sup>(72)</sup> を用いて2次元反磁性体<sup>(73)</sup> 量子シミュレーション

(61) 「Qulacs ドキュメンテーション」 Qulacs Documentation website <<http://docs.qulacs.org/ja/latest/>>

(62) Yao website <<https://yaoquantum.org/>>; Xiu-Zhe Luo et al., “Yao.jl: Extensible, Efficient Framework for Quantum Algorithm Design,” *Quantum*, vol.4, 2020. <<https://arxiv.org/pdf/1912.10877.pdf>>

(63) Quantum Machines website <<https://www.quantum-machines.co/solutions/cloud-infrastructure>>

(64) TensorFlow website <<https://www.tensorflow.org/?hl=ja>>

(65) 「TensorFlow Quantum は、量子古典ハイブリッド機械学習のためのライブラリです。」 *ibid.* <<https://www.tensorflow.org/quantum?hl=ja>>

(66) 電子がフェルミオンであるという特徴を生かして基底関数に仮定をおくことで、計算を簡略化している量子シミュレーションのこと。

(67) “OpenFermion.” Google Quantum AI website <<https://quantumai.google/openfermion>>

(68) Matthew Amy and Vlad Gheorghiu, “staq— A full-stack quantum processing toolkit,” *Quantum Science and Technology*, Vol.5 No.3, July 2020 <<https://arxiv.org/pdf/1912.06070.pdf>>

(69) XACC website <<https://xacc.readthedocs.io/en/latest/#>>

(70) 量子力学の法則に従う多くの粒子が相互作用する状態。イジング型は各粒子が同じ位置を占めており、上向き又は下向きの状態を取る変数が隣り合う粒子の変数と相互作用するという問題を扱っている。

(71) Pasqal website <<https://pasqal.io/>>

(72) 最外殻電子が高い主量子数に励起された原子のこと。当該原子同士が互いに長距離相互作用をし、原子間配列や相互作用の強さを制御することができる。富田隆文「冷却原子を用いた量子シミュレーション—リユードベリ原子編—」(2021年度 Quantum Education for Future Technologies 量子技術教育プログラム第5回冷却原子量子シミュレーション講義資料) UTokyo OCW ウェブサイト <[https://ocw.u-tokyo.ac.jp/lecture\\_files/11447/5/notes/ja/QEd\\_05\\_2\\_tomita.pdf](https://ocw.u-tokyo.ac.jp/lecture_files/11447/5/notes/ja/QEd_05_2_tomita.pdf)>

(73) 磁場をかけたときに磁場の逆向きに磁化される物質のこと。

ンを実行したことを報告した<sup>(74)</sup>。機械学習の分類問題をグラフ構造の相似度に関する問題に置き換えて、冷却原子による量子シミュレーションで解かせる実証実験を実施している<sup>(75)</sup>。2007年に英国で創業したスタートアップ企業である ColdQuanta<sup>(76)</sup>は、冷却原子方式の量子シミュレーション用途のコンピュータ Hilbert を2021年中に100量子ビット搭載のクラウド利用コンピュータとして上市する予定である。2018年に米国で創業された Atom Computing<sup>(77)</sup>は2021年7月に資金調達ラウンドのシリーズAにて1500万ドル（約17億円）を調達したと発表した。アルカリ土類金属の各スピンを量子ビットとして100量子ビットサイズの量子シミュレーションを実行できるシステム Phoenix を構築している<sup>(78)</sup>。2018年にハーバード大学及びマサチューセッツ工科大学の研究者らによって米国で創業された QuEra は、楽天から出資を受けている。2021年11月に256量子ビットを用いて量子シミュレーションを実行したと発表した<sup>(79)</sup>。2024年には物質の新状態探索、機械学習、ロジスティクス等への応用が可能になる1024量子ビットのプログラム可能な量子コンピュータを公開予定である<sup>(80)</sup>。

### 3 量子計測・センサに係る企業動向

本節では量子計測・量子センサの中で事業化段階に至っている、又は事業化段階に近いと言われている、冷却原子を用いたセンシング及びダイヤモンドNVセンターを用いたセンシングに係る企業の動向を紹介する。

#### (1) 冷却原子を用いたセンシングに係る企業動向

原子重力計は、冷却原子を用いたセンシングを応用した原子干渉計を用いて、高精度に重力加速度を測定する。従来利用されていたレーザー干渉型方式よりも高い精度で計測できるため、測地学や資源調査といったフィールド調査への応用が期待されている。スタンフォード大学で初めて製作された原子重力計は容易に移動できる大きさのものではなかったが、その後、各国でフィールド応用のために求められる可搬性のある原子重力計の開発が進められた<sup>(81)</sup>。

パリ天文台の LNE-SYRTE 研究所からスピンオフした Muquans 社<sup>(82)</sup>は、フランスにて2011年に創業された。同社は、ルビジウム原子のレーザー冷却を行う光学系を簡素化したことにより、従来機よりも小型化した可搬型原子重力計<sup>(83)</sup>を販売している。シンガポールで2018年に

(74) Pascal Scholl et al., "Quantum simulation of 2D antiferromagnets with hundreds of Rydberg atoms," *Nature* Vol.595, [2021.7.8], pp.233-238. <<https://www.nature.com/articles/s41586-021-03585-1>>

(75) "Machine Learning – Pasqal's Quantum Computers can be used on concrete industrial problems," 2021.10.26. Pasqal website <<https://pasqal.io/2021/10/20/machine-learning-pasqals-quantum-computers-can-be-used-on-concrete-industrial-problems/>>; Louis-Paul Henry et al., "Quantum evolution kernel: Machine learning on graphs with programmable arrays of qubits," *Physical Review*, A 104, 032416 <<https://journals.aps.org/pr/a/pdf/10.1103/PhysRevA.104.032416>>

(76) ColdQuanta website <<https://coldquanta.com/>>

(77) Atom Computing website <<https://atom-computing.com/>>

(78) "Atom Computing Unveils First-Generation Quantum Computing System — Appoints New CEO After Closing \$15 Million in Series A Funding," 2021.7.21 *ibid.* <<https://atom-computing.com/atom-computing-unveils-first-generation-quantum-computing-system-appoints-new-ceo-after-closing-15-million-in-series-a-funding/>>

(79) Siobhan Roberts, "This new startup has built a record-breaking 256-qubit quantum computer," 2021.11.17. MIT Technology Review website <<https://www.technologyreview.com/2021/11/17/1040243/quantum-computer-256-bit-startup/>>

(80) QuEra website <<https://www.quera.com/>>

(81) 根来誠監修『量子センシングハンドブック—量子科学が切り拓く新たな領域—』エヌ・ティー・エス, 2021, p.200.

(82) Muquans website <<https://www.muquans.com/>>

(83) "Absolute Quantum Gravimeter." *ibid.* <<https://www.muquans.com/product/absolute-quantum-gravimeter/>>

創業した Atomionics 社<sup>(84)</sup> の原子重力計を利用すると、トラックやボートに乗せたままの計測で地下構造のイメージングを行うことが可能である。

原子重力計と同様に冷却原子を用いたセンシングを応用した光格子時計は、現在利用されているセシウム原子を用いたマイクロ波時計の精度を2桁上回る18桁精度での時間計測が可能で、衛星搭載による全球測位衛星システム（GNSS）の構築や高速大容量通信のタイミング同期等への応用が期待されている<sup>(85)</sup>。

EUの量子フラッグシッププロジェクト<sup>(86)</sup>の一つである iqClock コンソーシアム<sup>(87)</sup> に参画している Teledyne Technologies 社<sup>(88)</sup> は、Teledyne e2v<sup>(89)</sup> という量子技術グループを組織して、実環境での光格子時計に利用する真空制御システムを開発している。同コンソーシアムにて、NKT Photonics<sup>(90)</sup> がフォトニック結晶の開発を、TOPTIKA Photonics 社<sup>(91)</sup> がレーザー系の製造を、Acktar 社<sup>(92)</sup> が真空チャンバーのコーティングを、CHRONOS Technology 社<sup>(93)</sup> がベンチマークを、BT Group<sup>(94)</sup> がタイミング同期の実運用要件に関するフィードバックを担当している。冷却原子に関する技術領域を専門とする ColdQuanta は、2025年までに光格子時計を販売することを目指している<sup>(95)</sup>。

## (2) ダイヤモンド NV センターを用いたセンシングに係る企業動向

ダイヤモンド NV センターは固体中のスピンとして群を抜く長いコヒーレンス時間<sup>(96)</sup>を持ち、電場、磁場、温度、圧力、pH の高感度センサとしての応用が期待されている。特に磁気センサとしては、脳磁計測、心磁計測、車載センサ、細胞内計測、タンパク質構造解析といった分野で利用が考えられている<sup>(97)</sup>。

2017年にスイスで創業した Qnami<sup>(98)</sup> は、バーゼル大学発のスタートアップ企業である。同社はダイヤモンドNVセンターをセンサとして用いて、原子スケールで物質の磁場分布を画像化する磁気顕微鏡を販売している。EUの量子フラッグシッププロジェクトの一つである MetaboliQs<sup>(99)</sup> に参画している NVision<sup>(100)</sup> は、MRI 医療画像の高解像度化への応用を目指している。日本で

(84) ATMiONiCS website <<http://www.atomionics.com/index.html>>

(85) 根来監修 前掲注(79), p.183.

(86) 2018年10月に開始した10年間で10億ユーロ（約1290億円）規模の量子技術イニシアチブファンド。欧州の研究領域におけるリーダーシップや卓越性の確立及び拡大、量子技術における競争優位な欧州産業の始動、並びに欧州を当該領域の革新的な研究、開発、投資にとって動的かつ魅力的な地域とすることを目標としている。Quantum Flagship website <<https://qt.eu/about-quantum-flagship/introduction-to-the-quantum-flagship/>>

(87) iqClock website <<https://www.iqclock.eu/>>

(88) Teledyne Technologies website <<https://www.teledyne.com/>>

(89) “Teledyne e2v.” iqClock website <<https://www.iqclock.eu/teledyne-e2v.html>>

(90) NKT Photonics website <<https://www.nktphotonics.com/>>

(91) TOPTIKA Photonics website <<https://www.toptica.com/>>

(92) Acktar website <<https://www.acktar.com/>>

(93) CHRONOS website <<https://www.chronos.co.uk/index.php/en/>>

(94) British Telecom website <<https://www.bt.com/>>

(95) ColdQuanta 製品資料 (“ColdQuanta Product Deck Summer 2021,” p.13. <[https://d0a3a3e8-d614-4d24-b573-4d0cbd11e5d6.filesusr.com/ugd/3b7560\\_460091df0ddc42f48f16c814ee49837d.pdf](https://d0a3a3e8-d614-4d24-b573-4d0cbd11e5d6.filesusr.com/ugd/3b7560_460091df0ddc42f48f16c814ee49837d.pdf)>)

(96) 量子ビットが重ね合わせ状態を保つことができる時間のこと。

(97) 根来監修 前掲注(79), pp.57-58.

(98) Qnami website <<https://qnami.ch/>>

(99) MetaboliQs website <<https://www.metaboliqs.eu/>>

(100) NVision website <<https://www.nvision-imaging.com/>>



はセンサ材料に関して、光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)<sup>(101)</sup> の固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出プロジェクト<sup>(102)</sup> に参画している住友電工<sup>(103)</sup> がダイヤモンド結晶の純粋化に関し、また日新電機<sup>(104)</sup> がイオン注入に関し開発を行っている。<sup>(105)</sup>

#### 4 量子ネットワークに係る企業動向

本節では量子ネットワーク分野のうち、乱数生成器、量子鍵配送に関して、製品に着眼して企業動向を紹介したあと、各国での量子鍵配送ネットワークの敷設状況を概観する。

##### (1) 乱数生成器

従来のコンピュータは、疑似乱数と呼ばれる厳密には乱数でない数列を乱数とみなして計算を実施している。下記に紹介する製品は、量子情報理論に基づく、確実な不規則性を有する乱数を生成する。このような乱数は通信のセキュリティ向上に役立つと考えられている。

2001年にスイスで創業された ID Quantique<sup>(106)</sup> は Quantis QRNG と呼ばれる製品ラインナップを取り揃えており、乱数生成器が組み込まれた PCI スロット<sup>(107)</sup> の Quantis PCIe<sup>(108)</sup> やネットワーク機器の Quantis Appliance 2.0<sup>(109)</sup> を販売している。

2017年にスペインで創業された QUSIDE<sup>(110)</sup> は、半導体レーザーの位相拡散過程を利用した、FPGA<sup>(111)</sup> エンジニア向けの組込み型乱数生成器 FMC400<sup>(112)</sup> を販売している。2015年に英国で創業された Crypto Quantique<sup>(113)</sup> は、IoT 機器に取付け可能なシリコンチップ上で、デバイスの ID と暗号鍵の生成を実施できる QDID<sup>(114)</sup> を商用化している。

##### (2) 量子鍵配送

量子鍵配送 (Quantum Key Distribution: QKD) は、暗号化された通信を確立する前に、共通暗号鍵の情報を量子状態に埋め込み伝送することで第三者の盗聴を検知可能にする技術である。

ID Quantique はイーサネット<sup>(115)</sup> と相互運用可能な Cerberis XG QKD System<sup>(116)</sup> 等を販売して

(101) 「光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP)」科学技術振興機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/>>

(102) Q-LEAP 量子計測・センシングウェブサイト <<https://www.qms.e.titech.ac.jp/>>

(103) 住友電工ウェブサイト <<https://sumitomelectric.com/jp/>>

(104) 日新電機ウェブサイト <<https://nissin.jp/>>

(105) Yikang Zuo et al., “Synthetic Diamond for Nitrogen Vacancy Sensor and Its Applicability,” *Sumitomo Electric Technical Review*, No.92, [2021.4]. <[https://sumitomelectric.com/sites/default/files/2021-04/download\\_documents/E92-14.pdf](https://sumitomelectric.com/sites/default/files/2021-04/download_documents/E92-14.pdf)>

(106) ID Quantique website <<https://www.idquantique.com/>>

(107) 周辺機器をコンピュータ内部のマザーボードに接続するための端子のこと。

(108) “Quantis QRNG PCIe New Generation.” ID Quantique website <<https://www.idquantique.com/random-number-generation/products/quantis-qrng-pcie/>>

(109) “Quantis Appliance 2.0.” *ibid.* <<https://www.idquantique.com/random-number-generation/products/quantis-rng-appliance/>>

(110) QUSIDE website <<https://quside.com/>>

(111) Field Programmable Gate Array のこと。製造後もプログラムにより内部の論理構成を変更することが可能なデバイスである。

(112) “Your High-Performance Quantum Entropy Source.” *ibid.* <<https://quside.com/products>>

(113) Crypto Quantique website <<https://www.cryptoquantique.com/>>

(114) “What is QDID?” *ibid.* <<https://www.cryptoquantique.com/products/qdid/>>

(115) 有線ローカルエリアネットワークにおける通信規格のこと。

(116) “QKD and quantum computing.” ID Quantique website <<https://www.idquantique.com/quantum-safe-security/products/cerberis-xg-qkd-system/>>

いる。東芝は、2020年10月にQKDプラットフォーム製品の事業化を発表した<sup>(117)</sup>。2017年にシンガポール国立大学の量子技術センターからスピンオフしたSpeQtral<sup>(118)</sup>は、衛星方式のQKDソリューションを開発しており、大陸間などの長距離量子暗号通信への適用を目指し、東芝とも協業している<sup>(119)</sup>。2013年に米国で創業したQubitekk<sup>(120)</sup>や2016年にカナダで創業したQEYNet<sup>(121)</sup>も同様に衛星方式のQKDソリューション開発に注力している。2018年にカナダで創業されたQuantropi<sup>(122)</sup>は、非対称暗号化技術<sup>(123)</sup>、対称暗号化技術<sup>(124)</sup>、乱数生成技術を組み合わせたQiSpaceというプラットフォーム事業を展開し、公開鍵暗号基盤（Public Key Infrastructure: PKI）の置き換え、電子署名、暗号の強化といったユースケースを提示している<sup>(125)</sup>。2017年にストーニーブルック大学からスピンオフしたQunnect<sup>(126)</sup>は、量子もつれ光子対の生成、室温環境下での量子メモリ、量子もつれスワッピング、周波数の変換・ロッキング、伝送中の情報ロス保護、ハイブリッドネットワーク同期といった量子ネットワーキング技術全般の開発に取り組んでいる<sup>(127)</sup>。

### (3) 量子鍵配送ネットワーク

米国はDARPA主導により世界で最も早くQKDネットワークを都市圏（ボストン地区）に構築していた<sup>(128)</sup>。2018年に創業したQuantum Xchange<sup>(129)</sup>は、初めにニューヨーク、ニュージャージー間に、最終的にはボストンからワシントンDCに及ぶ東海岸沿いにQKDネットワークを敷設する予定である<sup>(130)</sup>。

日本では2010年から情報通信研究機構（NICT）<sup>(131)</sup>、NTT<sup>(132)</sup>、NEC<sup>(133)</sup>、三菱電機<sup>(134)</sup>、東芝らがQKD装置を東京の光ファイバー網で相互接続し、東京QKDネットワークとして試験運用を行っていた<sup>(135)</sup>。その後2015年からは革新的研究開発推進（ImPACT）プログラム<sup>(136)</sup>の

(117) 「量子暗号通信システム事業を開始」2020.10.19. 東芝ウェブサイト <<https://www.global.toshiba/jp/news/corporate/2020/10/pr1901.htm>>

(118) SpeQtral website <<https://speqtral.space/>>

(119) 東芝デジタルソリューションズ「シンガポール SpeQtral 社と東芝デジタルソリューションズ 東南アジアにおける量子暗号通信ビジネスで協業」2021.8.31. 東芝ウェブサイト <<https://www.global.toshiba/jp/company/digitalsolution/news/2021/0831.html>>

(120) Qubitekk website <<http://qubitekk.com/>>

(121) QEYNet website <<https://www.qeynet.com/>>

(122) Quantropi website <<https://www.quantropi.com/>>

(123) 暗号化と復号化に異なる鍵を利用する暗号技術のこと。

(124) 暗号化と復号化に同じ鍵を利用する暗号技術のこと。

(125) “TrUE Technologies.” Quantropi website <<https://www.quantropi.com/technology/>>

(126) Qunnect website <<https://int.quconn.com/>>

(127) “Our Quantum Toolbox.” *ibid.* <<https://int.quconn.com/products-2>>

(128) BBN Technologies, *DARPA QUANTUM NETWORK TESTBED, final technical report*, AFRL-IF-RS-TR-2007-180, July 2007. Defense Technical Information Center website <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a471450.pdf>>

(129) Quantum Xchange website <<https://quantumxc.com/>>.

(130) “The Unhackable Quantum Network is Coming to the US.” *ibid.* <<https://quantumxc.com/media-coverage/the-unhackable-quantum-network-is-coming-to-the-us/>>

(131) 情報通信研究機構ウェブサイト <<https://www.nict.go.jp/>>

(132) NTT ウェブサイト <<https://group.ntt.jp/>>

(133) NEC ウェブサイト <<https://jpn.nec.com/>>

(134) 三菱電機ウェブサイト <<https://www.mitsubishielectric.co.jp/>>

(135) 玉木潔ほか「東京 QKD ネットワーク」『NTT 物性科学研究所の研究活動』vol.21, 2011.7. p.37. <[http://www.brl.ntt.co.jp/J/activities/file/report10/Report\\_2010J.pdf](http://www.brl.ntt.co.jp/J/activities/file/report10/Report_2010J.pdf)>

(136) 「革新的研究開発推進プログラム」情報通信研究機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/impact/>>



一つである「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」<sup>(137)</sup>のプロジェクト2「量子セキュアネットワーク」、2018年からは戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)<sup>(138)</sup>の第2期課題「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術」に採択され、2017年時点でQKD装置が他国と比較して暗号鍵生成率及び光ファイバーの伝送距離で性能優位性を示したほか、医療、安全保障分野等において実用化に向けた数々の実証実験も進められている<sup>(139)</sup>。

欧州では2004年からEUの研究開発プロジェクトとしてSECOQC (Secure Communication based on Quantum Cryptography) が開始され、2008年にはウィーン市内に都市圏QKDネットワークを構築した<sup>(140)</sup>。2019年には欧州13か国に跨るQKDテストベッド構築プロジェクトであるOpenQKD<sup>(141)</sup>が開始された。2022年2月時点で、同プロジェクトには大企業が14社、中小企業が4社、研究開発機関が9機関、学術機関12及び国立機関2が参画している<sup>(142)</sup>。

中国では墨子号という量子通信衛星が打ち上げられ、2017年に同衛星を使って、北京とウィーンの間でQKDによって量子暗号通信が確立された状態でのビデオ会議に成功した。2021年1月時点で、上海、合肥、済南、北京を結ぶ2000kmもの光ファイバーと2600kmの衛星間リンクが結ばれたQKDネットワークが敷設されている<sup>(143)</sup>。

執筆：大阪大学量子情報・量子生命研究センター(QIQB) 特任准教授 野口 裕信のぐち ひろのぶ

(137) 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」同上 <[https://www.jst.go.jp/impact/hp\\_yamamoto/index.html](https://www.jst.go.jp/impact/hp_yamamoto/index.html)>

(138) 「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP: エスアイピー)」内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>>

(139) 藤原幹生・佐々木雅英「3 量子光ネットワーク技術 3-1 量子鍵配送ネットワーク研究開発の現状」『情報通信研究機構研究報告』63巻1号, 2017, pp.9-18. <<https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/houkoku-vol63-1/K2017Q-03-01.pdf>>; 武岡正裕「Tokyo QKD Network: 量子暗号ネットワークテストベッドの構築と利活用」p.14. NICT総合テストベッドウェブサイト <[https://testbed.nict.go.jp/event/pdf/sympo\\_05-3.pdf](https://testbed.nict.go.jp/event/pdf/sympo_05-3.pdf)>; 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術研究開発計画」2021.6.30. <[https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/6\\_hikari.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/6_hikari.pdf)>

(140) SECOQC website <<https://secoqc.network/>>

(141) OpenQKD website <<https://openqkd.eu/>>

(142) “Who we are.” *ibid.* <<https://openqkd.eu/partners/>>

(143) Hamish Johnston, “Quantum cryptography network spans 4600 km in China,” 2021.1.7. Physics World website <<https://physicsworld.com/a/quantum-cryptography-network-spans-4600-km-in-china/>>

### Ⅲ ユーザ企業の取組

#### 1 量子コンピュータへの期待

現時点では、量子コンピュータは特に以下の四つの技術領域と応用が期待されている。

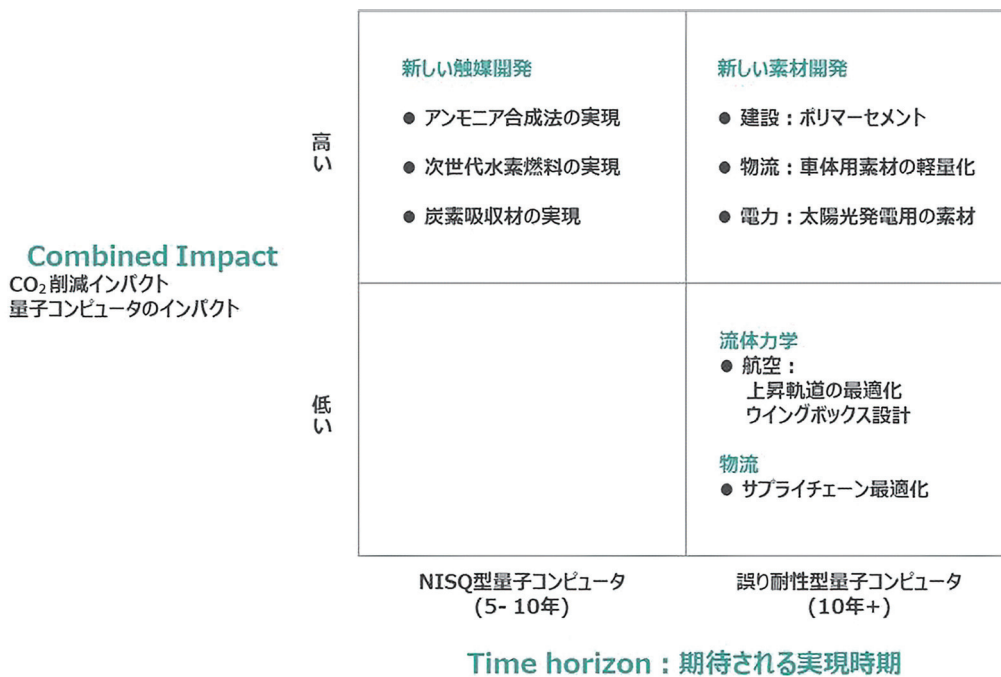
- ・シミュレーション（Simulation）：創薬や素材開発への応用など
- ・最適化（Optimization）：最適な物流経路構築への応用など
- ・機械学習（Machine Learning）：自動運転への応用など
- ・暗号理論（Cryptography）：より堅牢な暗号構築への応用など

これらの応用に向けて世界的に様々な産業の企業が量子コンピュータのユースケース（活用例）の探索に取り掛かっている。ボストンコンサルティンググループの試算では、量子コンピュータの産業応用によって、今後15～30年の経済価値は以下のように報告されている。

- ・シミュレーション（Simulation）：1600億～3300億ドル（ユースケース数：10）
- ・最適化（Optimization）：1000億～2200億ドル（ユースケース数：4）
- ・機械学習（Machine Learning）：1500億～2200億ドル（ユースケース数：4）
- ・暗号理論（Cryptography）：400億～800億ドル（ユースケース数：1）

シミュレーション領域は、他の応用領域に比べて経済価値が高く試算されている。その理由は、シミュレーション技術は既に材料開発など多様な産業への応用が見込まれているからである。例えば、気候変動問題の解決に貢献するイノベーションの実現にも量子コンピュータへの期待が高まっている（図1）<sup>(1)</sup>。

図1 気候変動問題解決に寄与すると考えられる技術



\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和4（2022）年2月28日である。

(1) Jean-François Bobier et al., "What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing?" 2021.7.21. Boston Consulting Group website <<https://www.bcg.com/ja-jp/publications/2021/building-quantum-advantage>>; Jean-François Bobier et al., "A Quantum Advantage in Fighting Climate Change," 2020.1.22. *ibid.* <<https://www.bcg.com/publications/2020/quantum-advantage-fighting-climate-change>>

(出典) Jean-François Bobier et al., “What Happens When ‘If’ Turns to ‘When’ in Quantum Computing?” 2021.7.21. Boston Consulting Group website <<https://www.bcg.com/ja-jp/publications/2021/building-quantum-advantage>>; Jean-François Bobier et al., “A Quantum Advantage in Fighting Climate Change,” 2020.1.22. *ibid.* <<https://www.bcg.com/publications/2020/quantum-advantage-fighting-climate-change>> を基に筆者作成。

## 2 企業の枠を超えた活動の推進

政策と連携し量子コンピュータの産業応用を促進する狙いから、米国やドイツでは企業が中心となった協議会<sup>(2)</sup>が設立されている。日本でも2021年5月には量子技術による社会構造変革を目指す民間企業11社により「量子技術による新産業創出協議会」(Q-STAR)が設立され、2021年9月現在、24社が参画している(図2)。同協議会では、技術調査や技術の活用方法について企業の枠を超えた検討を進め、産業化を推進することを目的としている。

図2 量子技術による新産業創出協議会の設立会員

**量子技術による新産業創出協議会 設立記念シンポジウム**

**設立会員** (2021.9.1現在)

協議会の趣旨に賛同し、業界の枠を超えた24社が参画

(会社名五十音順)

伊藤忠テクノソリューションズ (株)	凸版印刷 (株)
SBSホールディングス (株)	トヨタ自動車 (株)
キヤノン (株)	日本電気 (株)
JSR (株)	日本電信電話 (株)
住友商事 (株)	(株) 日立製作所
SOMPOホールディングス (株)	富士通 (株)
第一生命保険 (株)	(株) みずほフィナンシャルグループ
大日本印刷 (株)	三井住友海上火災保険 (株)
(株) 大和証券グループ本社	(株) 三井住友フィナンシャルグループ
(株) 長大	三井物産 (株)
東京海上ホールディングス (株)	三菱ケミカル (株)
(株) 東芝	三菱電機 (株)

実行委員会  
委員長  
島田 太郎

(出典) 「量子技術による新産業創出協議会 設立記念シンポジウム」2021.9.1. 量子技術による新産業創出協議会 発起人事務局ウェブサイト <<https://supportoffice.jp/qstar-sympo2021/>>

## 3 日本の産業特性を活かした取組事例

協議会の活動に加え、日本の産業特性を活かしたユーザ企業の実績も活発化している。

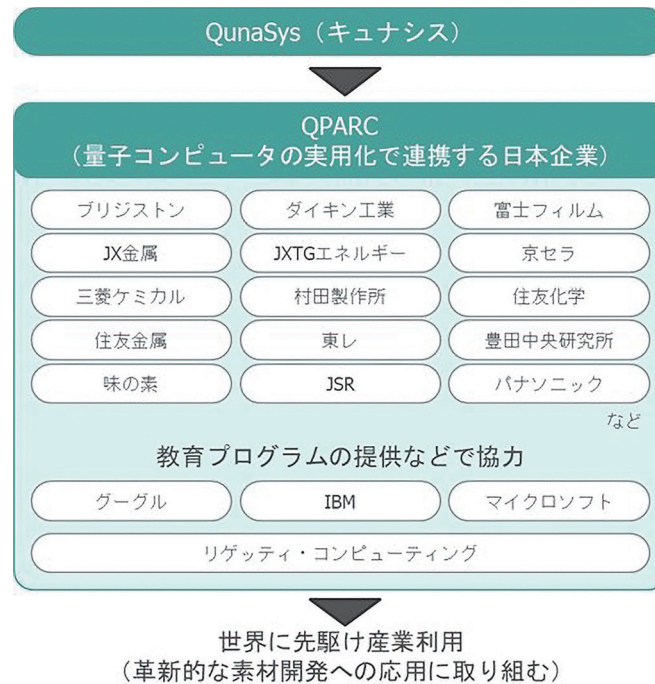
日本の国際競争力が高い産業の一つに素材産業が挙げられるが<sup>(3)</sup>、国内の約50社の化学・素材産業の企業が一堂に会し、材料開発分野への量子コンピュータの応用を目指すコミュニティ「QPARC」も生まれている(図3)。

海外のコンソーシアムを見渡しても、特定の産業で50社以上の企業が参画し量子コンピュータの応用の検討を進める事例は稀有であり、日本の特性を活かした産業化推進モデルとして期待される。

(2) 米国: QED-C website <<https://quantumconsortium.org/>>、ドイツ: QUTAC website <<https://www.qutac.de/?lang=en>>

(3) 経済産業省素材産業課「素材産業におけるイノベーションの役割と期待」2018.1. <[https://www.meti.go.jp/policy/mono\\_info\\_service/mono/chemistry/downloadfiles/180112materials-innovation.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/downloadfiles/180112materials-innovation.pdf)>

図3 材料化学領域のオープンイノベーション：QPARC



(出典) 「量子計算機で「新たな次元」へ キュナシス CEO 楊天任」  
『日本経済新聞』2020.6.24, p.11 を基に筆者作成。

#### 4 世界のエコシステムの形成と活性化に向けた課題

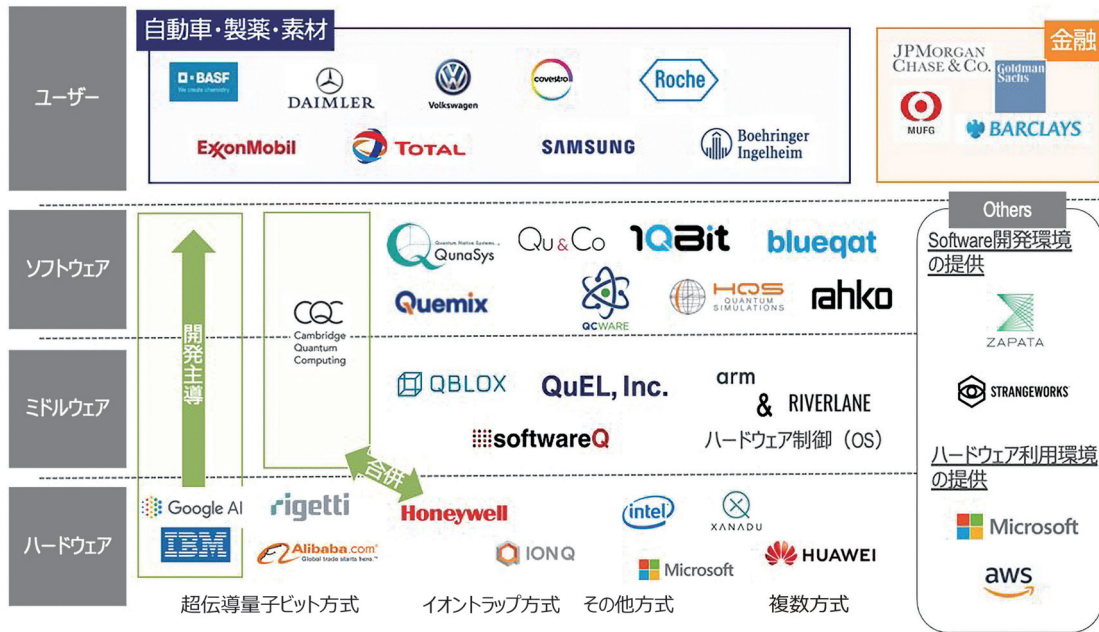
量子技術は、2010年以降の技術開発の進展を受け、にわかには産業化が進みつつあるものの、いまだ産業としては萌芽期にあり、エコシステムの形成も緒に就いたばかりである。本項では、現在のエコシステムの概況と、今後の活性化に向けた課題について述べる。

##### (1) 現在のエコシステムの概況

現在の量子技術プレイヤーは、その主要取り組み領域に応じて、「ハードウェア」、「ミドルウェア」、「ソフトウェア」、「ユーザ」に大別して捉えることができる（図4）



図4 現在のエコシステム概況



(出典) 筆者作成。

古典コンピュータの萌芽期同様、研究開発投資力のあるビッグプレイヤー（米 Google や米 IBM 等）が、ハードウェアからソフトウェアまで垂直統合的に取り組む傾向にある一方、参入障壁の低いソフトウェアレイヤーにおいてスタートアップの参入が相次ぎ、各社が特色のあるアプリケーションの開発を進めている。ミドルウェアについては、ソフトウェアほどプレイヤー数は多くはないものの、近年参入が増えており、今後盛り上がり期待される領域である。また、少し違った観点として、ハードウェアの利用環境を提供するプラットフォーム的立ち位置のプレイヤーも存在する。米 Microsoft や米 AWS 等がこれに該当し、2020 年頃からクラウドサービスの提供を開始している<sup>(4)</sup>。化学や金融、自動車等の産業ユーザは、これらの「量子ベンダー」と有償の協業関係を結び、各種専門的知見を取り入れながら、自社の PoC（概念実証）や研究開発を推進している。その意味で、実は既に、量子ベンダーにとって一定のマーケットは存在していると言えよう。

一方で、現時点ではエコシステムのあるべき姿はほとんど見えていないというのが実情である。1993 年にジェームス・ムーア（James F. Moore）がビジネスエコシステムという用語を定義した後<sup>(5)</sup>、ビジネスを生態系になぞらえてその発展の要諦を論じる試みが様々になされてきたが、マルコ・イアンシティ（Marco Iansiti）によれば、産業発展にはエコシステムの健全性が重要とされる。さらに、その健全性は、①生産性（投下資本利益率、イノベーションの伝達）、②堅牢性（プレイヤー生存率、エコシステム持続率）、③ニッチ創出（企業の多様性、技術の

(4) Krysta Svore, "Azure Quantum is now in Public Preview," 2021.2.1. Microsoft Cloud Blogs website <<https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/2021/02/01/azure-quantum-preview/>>; "AWS Announces General Availability of Amazon Braket," 2020.8.13. Amazon Press center website <<https://press.aboutamazon.com/news-releases/news-release-details/aws-announces-general-availability-amazon-braket/>>

(5) James F. Moore, "Predators and Prey: A New Ecology of Competition," *Harvard business review*, Vol.71 Iss.3, May-June 1993, pp.75-86.



多様性)の三つの指標で測ることが提案されている<sup>(6)</sup>。特に産業の黎明期においては、①生産性や②堅牢性を担保するほどには実体が追いついていないため、③ニッチ創出、すなわち多様な企業の参入と多様な技術の創出が、エコシステムの健全性にとって最も重要な要素であると考えられる。

現在の量子産業エコシステムは、あくまで各社が自社の得意領域を線引きした結果でしかなく、多様な企業の参入と多様な技術の創出が動機付けされる構造に最適化されているとは言い難い。今後のエコシステムの活性化に向けては、「参入障壁の低減」、「プレイヤーメリット」等の視点を踏まえた、企業参入・技術創出へのインセンティブへの配慮が求められるであろう。さらにその上で、将来的な①生産性や②堅牢性の向上まで見据えてあるべき姿を描画し、段階的に業界構造を発展させながら、エコシステムの健全性を長期的に担保する試みが必要となると考える。

## (2) エコシステム活性化に向けた課題

では、具体的には、どのような検討課題が存在しているのでしょうか。「共創の場形成支援プログラム (COI-NEXT) 政策重点分野 (量子技術分野) 量子ソフトウェア研究拠点 (QSRH)」<sup>(7)</sup>における政策検討WGの議論を基に整理すると、代表的なものとしては、以下のようなものが挙げられる。

### ① 産業ロードマップの策定を通じた動機付け

発展目覚ましいとは言え、多くのユーザ企業にとって、量子技術のインパクトはいまだ不透明である。もちろん技術開発の不確実性については許容せざるを得ないが、許容した結果としてどのようなインパクトが自社にもたらされるかという点が明確でなければ、(特にガバナンスが徹底されている大企業においては) 研究開発に経営資源を投じることは難しい。

特に、国や産業界等、ある程度の規模の共同体として量子技術の発展を牽引するのであれば、産業インパクトを明確に想起できるようなロードマップを整備し、ユーザ企業にとっての動機付けを促進することの重要性は高い。

### ② 水平分業化によるプレイヤー参入の促進

前項で述べたとおり、現在のエコシステムは、研究開発投資力のあるビッグプレイヤーが垂直統合的に全ての技術スタックに取り組み、その中で比較的分業が容易なソフトウェアから一部のミドルウェアのレイヤーにスタートアップが集中しているという構造になっている。これに対して、古典コンピュータや多くのエレクトロニクス製品の業界においては、意図的に各レイヤーを標準化し水平分業化を図ることで、新規プレイヤー参入とそれによる技術発展・コスト削減を実現している。

(6) マルコ・イアンシティ, ロイ・レヴィン (杉本幸太郎訳) 『キーストーン戦略—イノベーションを持続させるビジネス・エコシステム—』 翔泳社, 2007. (原書名: Marco Iansiti and Roy Levien, *The Keystone Advantage*, Boston: Harvard Business School Press, 2004.)

(7) 量子ソフトウェア研究拠点ウェブサイト <<https://qsrh.jp/>>

もちろん、自動車業界のように、システム・インテグレータの果たす役割が大きい場合には水平分業が業界の発展を妨げる可能性もあるため<sup>(8)</sup>、その是非は慎重に判断する必要はあるが、今後の量子技術発展に向けては、純粋な研究開発投資の増強のみではなく、このような業界構造側からのアプローチも視野に入れた検討が必要であろう。

### ③ 将来的なマネタイズ（収益化）に向けたスキーム整備

プレイヤー参入促進のためには、上述のような「参入障壁の低減」に加え、「マネタイズの確実性」についても配慮が必要である。

ハードウェアベンダーとユーザの取引はイメージがわかりやすいが、その場合、分業された各レイヤーにどのように利益配分を行うかは、エコシステム全体にとって重要な論点である。ソフトウェアについては、既に存在する各種マーケットプレイスのような形で、ユーザが自ら必要なソフトウェアを選択し、都度課金するという形は考えやすい。一方で、ミドルウェアについてはそのような形は機能させづらく、特許ライセンスを中心としたマネタイズが適合しやすいかもしれない。

これまでも各社個別に検討を行なっている内容ではあるが、今後は、レイヤー横断的な議論の中で、エコシステム全体にとってあるべきスキームを見出す取組も必要であろう。

## IV 人材育成・大学教育システム

### 1 人材育成の現況

量子情報技術は近年になり発展した学術領域であり、実社会への応用のためには基礎研究の積み重ねが必要不可欠である。これは同時に、量子人材育成システムの整備や進学及び研究に際した継続的な財政支援の必要性を示唆している。一方で、日本の大学における体系的な量子技術教育システムは未発達であることに加えて、博士後期課程への進学者は2000年代以降減少傾向にある<sup>(9)</sup>。こうした中でも、例えば光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）の量子人材教育プログラムの採択課題の一つは、国内の量子技術における高等教育のスタンダードの確立を目指すものであり<sup>(10)</sup>、今後の運用が期待される。また、東京大学にて1・2年生向けに開講される講義「量子技術と量子コンピュータ」では定員の約3倍の応募があるなど<sup>(11)</sup>、若年層の関心の高さも窺える。このような産学からの需要に応えるように、今日では大小様々な量子技術教育の場が設けられている。本節ではそれらを概観するとともに、海外における量子人材育成の実際について述べる。

(8) マイケル・G. ジャコバイズ, ジョン・ポール・マクダフィー「価値移転をめぐる4つのルール バリュチェーン覇者の条件」『Diamond ハーバード・ビジネス・レビュー』39(6), 2014.6, pp.104-115.

(9) 「科学技術指標 2020 3.2.3 大学院博士課程入学者」文部科学省科学技術・学術政策研究所ウェブサイト <[https://www.nistep.go.jp/sti\\_indicator/2020/RM295\\_32.html](https://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2020/RM295_32.html)>

(10) 「【共通的コアプログラム】量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発」科学技術振興機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/jinzai/pdf/jinzai.pdf>>

(11) 五神真「Society 5.0 ビジネス加速に向けた量子戦略の更新」（第9回量子技術イノベーション会議 資料2-2）2021.10.7, p.17. 内閣府ウェブサイト <<https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/9kai/siryoy2-2.pdf>>

## 2 量子技術発展に求められる人材

量子技術とは既存の学問から全く切り離されたものではなく、現在までに培われた古典コンピュータの計算理論や制御技術などの知識の下で理解されるものである。そうした実状を踏まえると、量子技術発展に求められる人材として、技術を作り出す研究者と、実装し改善する開発者が求められる。このうち開発者については日本の産業にポテンシャル人材が存在すると考えられ<sup>(12)</sup>、今後研究が進むにつれて既存技術の応用が可能であろう。一方で、研究者は大学等のアカデミック機関で長期的に育成すべき人材である。これからの量子技術を支える人材は、大学・研究機関が積極介入し、包括的かつ統合的に育成することが必要であると言えよう<sup>(13)</sup>。

## 3 量子人材育成の取組

### (1) 日本における量子人材育成の取組

上述したように、大学において量子技術を体系的に学ぶための専攻や学部学科は存在しないが、前述のQ-LEAPでは、量子技術の次世代を担う人材の育成を強化するための「人材育成プログラム」が設置されている<sup>(14)</sup>。採択課題には量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発やサマースクールの計画があり、各地に点在する量子技術の研究者を講師として集めるなど、量子技術を使いこなす高い知識・技術を持った「量子ネイティブ」の育成拠点を構築するものとなっている。似たような取組として、情報通信研究機構（NICT）による量子ネイティブ人材育成プログラム「NICT Quantum Camp」がある<sup>(15)</sup>。当プログラムでは約1年間の基礎講座及びグループワーク等を通じて量子ICTの基礎について学ぶほか、研究開発などのアウトプットを出す場にもなっている。また、大学が主催するイベントとして「量子情報春の学校」が毎年開催されており、量子情報技術を学ぶ学生及び若手研究者の交流の場となっている<sup>(16)</sup>。

### (2) 民間企業による貢献

量子人材育成において民間企業が担う役割は大きい。IBMでは2016年に量子コンピュータをクラウド上に公開して以来、オンライン上で様々なコンテンツを提供している。量子計算用フレームワーク「Qiskit」<sup>(17)</sup>の他、量子プログラミングコンテスト「Quantum Challenge」<sup>(18)</sup>及び量子サマースクール「Qiskit Global Summer School」<sup>(19)</sup>を開催している。2021年1月には企業内人材の育成を目指すユーザ研究会「IBM Community Japan」を開始しており、業種・職種を超えたコミュニティ活動を行っている（図5）。

(12) 「第3部 デジタル時代の人材」情報処理推進機構『DX白書 2021—日米比較調査にみるDXの戦略、人材、技術—』2021。<<https://www.ipa.go.jp/files/000093701.pdf>>

(13) 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.23. 首相官邸ウェブサイト <<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushisenryaku2020.pdf>>

(14) 「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」科学技術振興機構ウェブサイト <<https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/index.html>>

(15) 「NICT Quantum Camp」情報通信研究機構ウェブサイト <<https://nqc.nict.go.jp/>>

(16) 「量子情報春の学校2021」（主催：京都大学研究連携基盤量子情報ユニット）<<https://sites.google.com/view/qinfospring2021/home>>

(17) “Open-Source Quantum Development.” Qiskit website <<https://qiskit.org/>>

(18) 「量子プログラミング・コンテスト開催」2021.10.6. IBM THINK Blog Japan ウェブサイト <<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/fall2021-quantum-challenge-japan/>>

(19) “Qiskit Global Summer School 2021: Quantum Machine Learning.” Qiskit website <<https://qiskit.org/events/summer-school/>>



図5 IBM Community Japan



(出典) IBM Community Japan ウェブサイト <<https://www.ibm.com/ibm/jp/ja/ibmcommunityjapan.html>>

その他、NECなどの企業9社は東京大学に「量子ソフトウェア」寄付講座を設置し、2022年度からは本格的に講座を開始する予定である<sup>(20)</sup>。スタートアップ企業のQunaSysも量子人材育成に力を入れている。同社では材料開発企業を対象とした量子コンピュータの応用検討コミュニティ「QPARC」を運営しており、基礎講座に加えてユーザ企業を交えたユースケース探索を行っている<sup>(21)</sup>。

### (3) 海外における量子人材育成の取組

海外においても量子人材育成に関する様々な取組が行われている。米国のハーバード大学では2022年秋から量子理工学の博士課程を開始する。量子技術分野の学位の提供は世界初となる<sup>(22)</sup>。同大学ではK-12の生徒（幼稚園から高校まで）向けの量子技術教育の基礎項目として、九つのキーコンセプトを挙げている<sup>(23)</sup>。シカゴ大学とオランダのデルフト工科大学では、学部の副専攻で量子情報学を専攻できる<sup>(24)</sup>。マサチューセッツ工科大学では一般向けの量子コンピューティング講座を「MIT xPRO」にて行っている。講座は量子情報の基礎から応用に加え、企業のマネジメント層やソフトウェアエンジニアを対象とした内容となっている。この他にも、海外の量子教育コンテンツはオンラインにて多数提供されており、代表的なオンライン講義サイトedXでは、ハーバード大学やマサチューセッツ工科大学による量子技術に関する講義動画を提供している<sup>(25)</sup>。米国国立科学財団（National Science Foundation: NSF）は、2020年に量子技術教育のカリキュラムの開発を目指す「QuSTEAM」を設立した。このプロジェクトでは五つの大学（シカゴ州立大学、シカゴ大学、オハイオ州立大学、ミシガン州立大学、イリノイ大学）

(20) 「東京大学「量子ソフトウェア」寄付講座の設置について（プレスリリース）」2021.5.24. 東京大学理学系研究科・理学部ウェブサイト <<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/press/2021/7387/>>

(21) QPARC ウェブサイト <<https://www.qparc.qunasys.com/>>

(22) “Harvard Launches PhD in Quantum Science and Engineering,” 2021.4.23. Harvard University, Graduate School of Arts and Sciences website <<https://gsas.harvard.edu/news/stories/harvard-launches-phd-quantum-science-and-engineering>>

(23) “Teaching the next generation of quantum scientists,” 2020.5.22. Harvard University, John A. Paulson School of Engineering and Applied Science website <<https://www.seas.harvard.edu/news/2020/05/teaching-next-generation-quantum-scientists>>

(24) “Undergraduate Program: Molecular Engineering Major and Minors.” University of Chicago, Pritzker School of Molecular Engineering (PME) website <<https://pme.uchicago.edu/undergraduate-program/undergraduate-major-and-minors/>>; “Minor Quantum Science and Quantum Information.” QuTech Academy website <<https://qutechacademy.nl/bachelor/>>

(25) “Quantum Computing Courses.” edX website <<https://www.edx.org/learn/quantum-computing>>



と連携し、量子情報科学、技術、工学、人文科学、数学（QuSTEAM）を組み合わせた学部カリキュラムを開発し、量子人材の育成を目指すものとなっている<sup>(26)</sup>。

## V 資格制度と人材育成

IBM では、2021年4月に量子コンピュータのプログラム開発支援フレームワーク「Qiskit」を用いた量子コンピュータの開発者認定資格の提供を開始した<sup>(27)</sup>。この資格は量子コンピュータ産業の将来的な発展に伴い、量子人材の雇用が加速化することを見据えて提供されたものであり、既存産業において開発経験のある人材が量子コンピュータ産業での雇用機会を得やすくするという狙いがある<sup>(28)</sup>。開発者認定資格のほかにも、IBMはQiskit Advocateを2019年から提供している<sup>(29)</sup>。Qiskitコミュニティに対して積極的に貢献する個人をサポートするためのグローバルプログラムであり、Qiskitコミュニティへの貢献実績や試験及び面談を経て認定される。日本においてQiskit Advocateは定期的にQiskitを用いた量子アルゴリズムの講義やハンズオンを行っており<sup>(30)</sup>、人材育成とコミュニティ形成に貢献していると言えよう。

執筆：大阪大学量子情報・量子生命研究センター（QIQB）産学共創准教授  
株式会社 QunaSys COO 松岡 智代

---

(26) QuSTEAM website <<https://qusteam.org/about>>

(27) 「IBM、量子コンピュータ業界初の開発者認定資格を提供開始」2021.4.7. IBM THINK Blog Japan ウェブサイト <<https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/quantum-developer-certification/>>

(28) 同上

(29) “Qiskit Advocate Program.” Qiskit website <<https://qiskit.org/advocates/>>

(30) 同上

## VI 特許出願動向

### 1 国内及び海外の特許出願概況

日本国特許庁への特許出願総件数は、年間40数万件出願されていた2001年をピークに減少しており<sup>(1)</sup>、2020年は28万8472件であった。他方、世界の特許出願総件数は増加傾向にあり、2010年は約199万7000件であったが、2019年には約322万4000件に達した。この10年間で1.61倍に増加している主な要因は、中国人による中国国家知識産権局への特許出願件数の増加である。世界のPCT国際出願（特許協力条約に基づく国際出願）<sup>(2)</sup>総件数も2010年以降増加傾向にあり、2020年の出願件数は27万4764件で過去最高を記録し、出願人居住国別の割合を見ると1位は中国で25.0%、2位は米国21.4%、3位は日本18.4%でこの上位3か国で全体の64.8%を占めている<sup>(3)</sup>。

### 2 量子コンピュータ及びその関連技術に関する特許出願動向

#### (1) 調査対象及び調査方法

量子ビット生成、量子誤り訂正、量子回路、ゲート操作、量子ソフトウェア等を含む量子コンピュータ及びその関連技術に関する特許出願動向の調査を行った。調査範囲と調査方法は次のとおりである。

##### (i) 調査範囲

①出願年（優先権主張<sup>(4)</sup>年）：2005～2019年<sup>(5)</sup>

②出願先国（地域）：以下の国又は地域への出願、及び、PCT国際特許出願

オーストラリア、オーストリア、ベルギー、ブラジル、ブルガリア、カナダ、中国、クロアチア、キューバ、キプロス、チェコ、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、インド、アイルランド、イスラエル、イタリア、日本、韓国、リトアニア、ルクセンブルク、モナコ、モンテネグロ、モロッコ、ニュージーランド、フィリピン、ポーランド、ポルトガル、ルーマニア、ロシア、シンガポール、スロバキア、南アフリカ、スペイン、スウェーデン、スイス、台湾、タイ、チュニジア、ウクライナ、英国、米国、ベトナム、EPO<sup>(6)</sup>、EAPO<sup>(7)</sup>、GCC<sup>(8)</sup>、OAPI<sup>(9)</sup>、ARIPO<sup>(10)</sup>

③使用データベース：Orbit Intelligence（Questel社）

\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和4（2022）年1月13日である。

(1) 特許庁編『産業財産権制度125周年記念誌—産業財産権制度この15年の歩み—』特許庁、2010、p.39。

(2) 一つの出願願書を条約の規定に従って提出することによって、PCT加盟国である全ての国に同時に同出願したことと同じ効果を与える出願制度。特許協力条約（Patent Cooperation Treaty: PCT）については、吉藤幸朔、熊谷健一補訂『特許法概説 第13版』有斐閣、1998；橋本良郎『特許関係条約 第4版』発明協会、2005等を参照。

(3) 特許庁『特許行政年次報告書 2021年版』2021、pp.2、5-6。

(4) 先の出願の出願日へ遡及効果が生じるよう、後の出願時に行う手続。優先権制度を利用したもの。パリ条約における優先権制度や自国において定める優先権制度がある。例えば、吉藤、熊谷補訂 前掲注(2)、pp.34、351を参照。

(5) 調査実施日2021年9月20日においてデータベースに収録されている範囲で抽出。出願日から出願公開までの期間及びデータベース収録に要する期間に配慮し2005年から2019年までの15年間とした。

(6) 欧州特許庁。European Patent Office <<https://www.epo.org/>> の略称。

(7) ユーラシア特許庁。Eurasian Patent Organization <<https://www.eapo.org/en/>> の略称。

(8) 湾岸協力理事会特許庁。Gulf Cooperation Council Patent Office <<https://www.gccpo.org/DefaultEn>> の略称。

(9) アフリカ知的財産機関。Organisation Africaine de la Propriété Intellectuelle <<http://www.oapi.int/index.php/en/aipo/presentation/member-countries>> の略称。

(10) アフリカ広域知的財産機関。African Regional Intellectual Property Organization <<https://www.aripo.org/member-states/>> の略称。

## （ii）調査方法

IPC<sup>(11)</sup>、CPC<sup>(12)</sup>、キーワードを用いて検索し特許文献の母集合を得た後、特許請求の範囲に量子暗号や量子通信、量子センサーが記載された出願をノイズとして除去し、量子コンピュータ及びその関連技術に関する特許出願（パテントファミリー<sup>(13)</sup> 総件数 2,699 件）を母集団として得た。

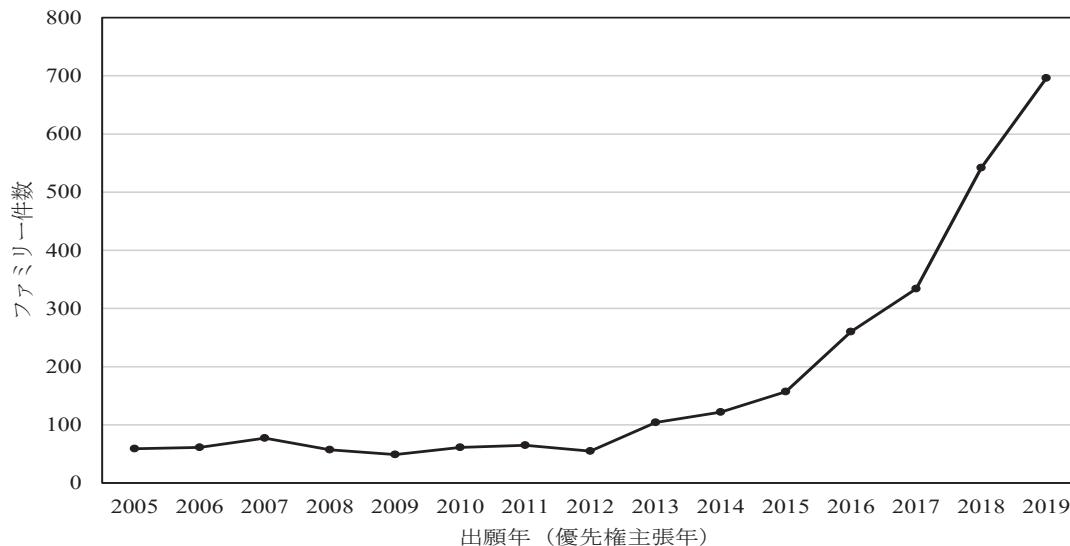
キーワードには、QUANTUM COMPUTOR, QUANTUM PROCESSOR, QUANTUM INFORMATION PROCESSING, QUANTUM CALCULATATION, QUBIT, ISING MACHINE, ANNEAL, GATE, QUANTUM NEURAL NETWORK, QUANTUM LOGIC, QUANTUM CIRCUIT, QUANTUM SUPREMACYを組み合わせて使用した。

## （2）全体傾向

出願年（優先権主張年）別にパテントファミリー件数（以下「ファミリー件数」）を調べたものが図1である。2005年から2012年まで各年数十件の出願が行われているが、それ以降は飛躍的に増加し続け、2019年には700件に迫る数の出願が行われている。特許出願総数そのものが世界的に増加傾向にあるとは言え、量子コンピュータ関連技術における出願数増加率は非常に目覚ましい。

総数 2,699 件のうち、パテントファミリーに含まれる特許出願全てが設定登録されているもの<sup>(14)</sup>は 1,513 件（56.1%）、いずれかの特許出願が係属中のものが 852 件（31.6%）、全てが取下・失効等により権利消滅しているものが 333 件（12.3%）であった。

図1 ファミリー件数年次推移



（出典）筆者作成。

(11) International Patent Classification. 国際特許分類。

(12) Cooperative Patent Classification. 共通特許分類。

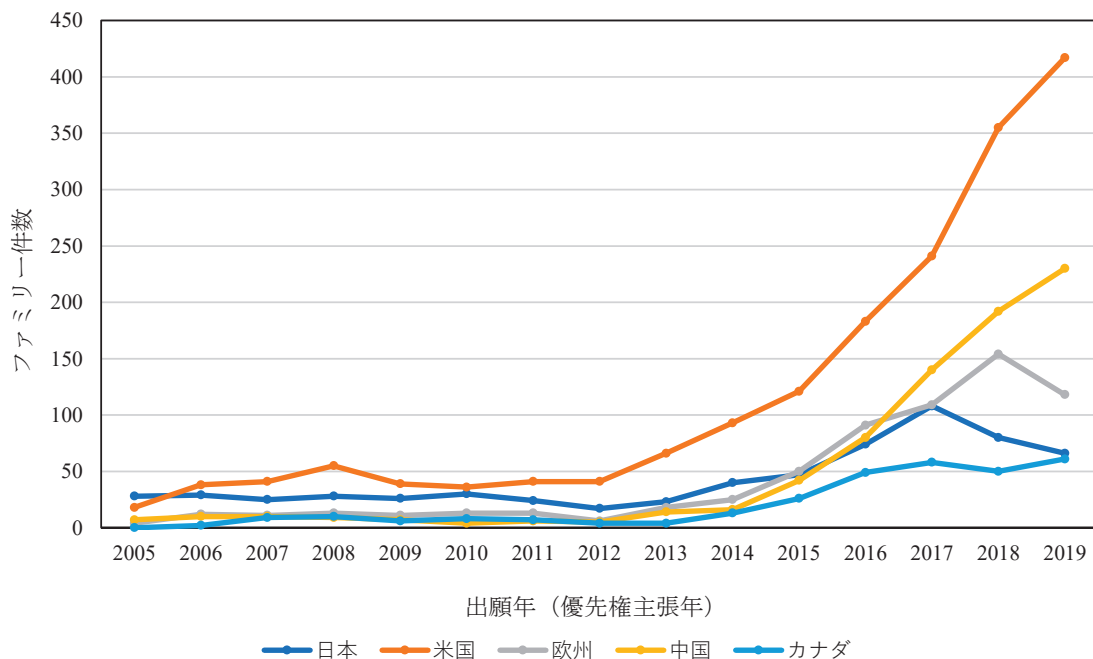
(13) 同一の特許出願に由来する一群の出願グループ。優先権を利用して出願した特許出願グループをいう。

(14) 特許権が付与されることが認められ所定の手続を経て権利が成立したものの。

### (3) 出願先国（地域）別出願動向

母集団となるパテントファミリーに含まれる個別出願がいずれの国に出願されたかに着目して国別に件数をカウントし、件数の多い上位5か国（地域）である日本、米国、欧州、中国、及び、カナダへの出願ファミリー件数の年次推移をグラフ化した（図2）。2005年から2010年頃までは日本と米国への出願件数が比較的多いが、その後、特に2014年以降は米国への出願が飛躍的に増加し続け、2019年には400件以上に上ることが確認された。欧州、中国、カナダへの出願は2015年頃より増加傾向にあり、特に中国は増加率が高く、2017年以降には米国に次ぐファミリー件数となっている。一方、日本への出願は2017年に100件を上回った後、減少傾向にあり、特許権取得対象国すなわち市場としての日本の注目度が低下しているように見受けられる。

図2 出願先国（地域）別ファミリー件数年次推移



（注） 欧州は欧州特許庁（European Patent Office: EPO）への出願及びEPO加盟国への個別出願の合計値とした。

（出典） 筆者作成。

### (4) 出願人別出願動向

出願人別にファミリー件数（2005～2019年における総件数）を調べたところ、表1に示すとおりトップ20位までの企業及び研究機関のうち11機関が米国の企業又は研究機関であった。上位5社はファミリー件数100件以上を出願しており、カナダのD-Wave Systemsを除く4社はいずれも米国大手IT企業である。また、D-Wave Systemsの他、Rigetti、IonQ、1QBit、Zapata Computingなどの海外スタートアップ企業がランクインしているほか、日本企業ではNTT、日立、東芝、富士通、NECが多数出願していることが確認された。中国のHefei Origin Quantum Calculating Technology（以下Hefei社）は2017年から出願が確認され（表2）、量子コンピュータ関連技術に新規参入した企業<sup>(15)</sup>であることを反映しているものと考えられるが、2019年時点で

(15) Li Ziyue, "China's Origin Quantum has raised funds to catch up with IBM," February 5, 2021. Nikkei Asia website <<https://asia.nikkei.com/Business/36Kr-KrASIA/China-s-Origin-Quantum-has-raised-funds-to-catch-up-with-IBM>>



累計 50 件出願していることが確認された。

これらの出願人の保有特許に関する権利存続状況を調べたところ、100 件以上出願している上位 5 社のうち Intel は権利消滅した特許の割合が高く、他の 4 社と比較して特許の設定登録前に権利放棄するケースが多いことが示唆された。Northrop Grumman Systems や NTT、日立、東芝はいずれも 2000 年代後半から継続的に出願している企業であり、既に設定登録された特許件数の割合が高い。スタートアップである IonQ、1Qbit、Zapata Computing は、2010 年代から出願が確認され、本調査実施日において出願係属中の割合が高く今後の動向が注目される（表 2、図 3）。

表 1 出願人別ファミリー件数上位ランキング

順位	出願人	件数
1	IBM（米国）	314
2	Intel（米国）	156
3	D-Wave Systems（カナダ）	131
4	Microsoft（米国）	123
5	Google（米国）	120
6	Northrop（米国）	94
7	NTT（日本）	59
8	日立（日本）	50
8	東芝（日本）	50
8	Hefei（中国）	50
11	Rigetti（米国）	40
12	富士通（日本）	36
13	NEC（日本）	33
13	IonQ（米国）	33
15	MIT（米国）	30
16	1QBit（カナダ）	29
17	科学技術振興機構（日本）	24
17	Harvard College（米国）	24
17	Yale University（米国）	24
20	Zapata Computing（米国）	23

（注） D-Wave Systems は DWSI ホールディングスの子会社に再編され、D-Wave Systems 保有特許出願の一部が DWSI へ移管されているが、ここでは移管前の出願人である D-Wave Systems の特許出願としてカウントした。組織再編については“Form N-CSRS: 180 DEGREE CAPITAL CORP.” SEC Report website <<https://sec.report/Document/0000893739-20-000028/>>を参照。

（出典） 筆者作成。

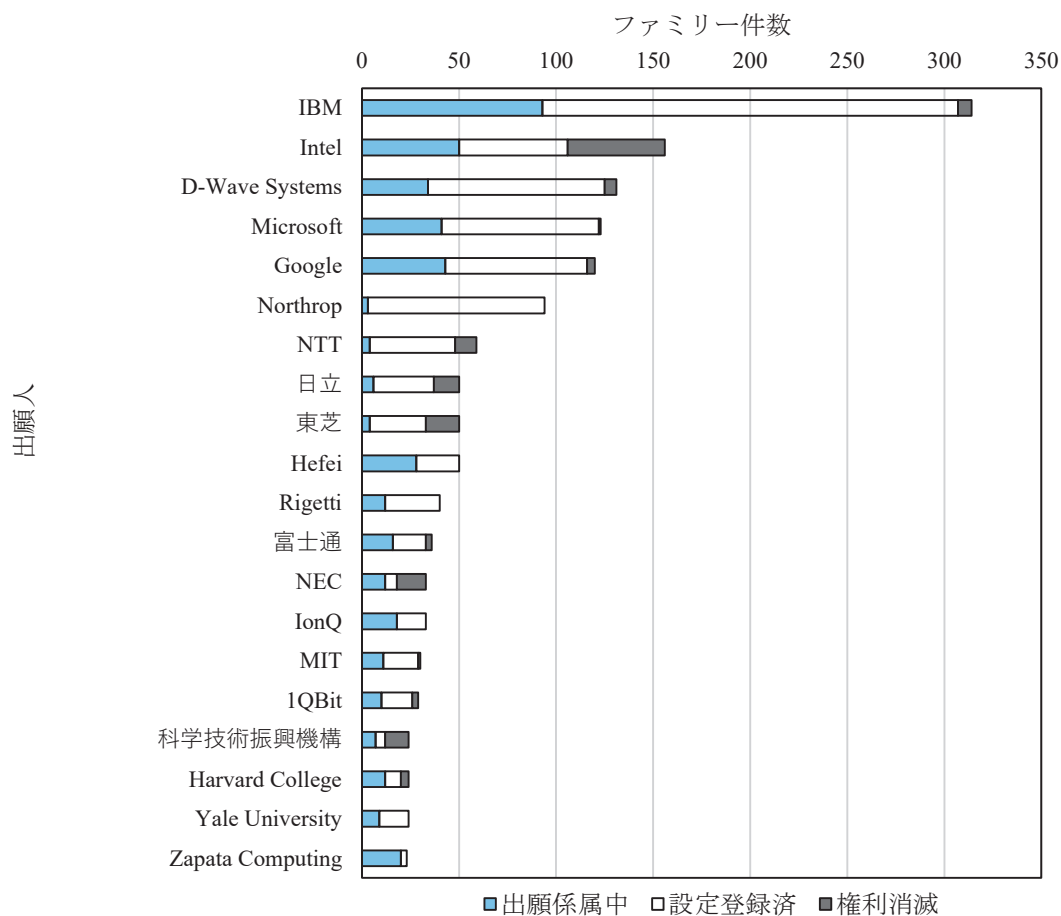
表2 上位出願人の出願ファミリー件数年次推移

順位	出願人	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	計
1	IBM	0	0	4	2	2	0	2	2	9	5	20	12	44	98	114	314
2	Intel	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	59	38	43	14	156
3	D-Wave Systems	4	7	16	13	2	4	3	6	15	6	7	10	8	13	17	131
4	Microsoft	2	1	1	0	2	2	1	6	10	8	9	10	18	16	37	123
5	Google	0	0	0	0	0	0	0	2	7	4	13	20	26	24	24	120
6	Northrop	0	0	5	2	1	6	7	3	1	6	10	11	12	23	7	94
7	NTT	8	8	3	1	1	6	6	1	7	6	2	1	5	1	3	59
8	日立	1	2	1	1	4	1	3	0	1	14	7	3	3	5	4	50
8	東芝	6	0	5	4	3	4	2	3	0	3	5	6	1	3	5	50
8	Hefei	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	17	32	50
11	Rigetti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	7	12	10	3	40
12	富士通	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	7	1	11	12	36
13	NEC	1	4	1	6	4	1	2	0	0	0	0	0	1	1	12	33
13	IonQ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	15	16	33
15	MIT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	1	2	5	13	30
16	IQBit	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	14	3	3	5	29
17	科学技術振興機構	0	5	4	4	1	0	1	0	0	1	0	0	1	3	4	24
17	Harvard College	0	0	2	0	0	1	2	1	2	1	1	1	5	5	3	24
17	Yale University	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	8	3	2	5	3	24
20	Zapata Computing	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	14	23

(注) D-Wave Systems はDWSIホールディングスの子会社に再編され、D-Wave Systems 保有特許出願の一部がDWSIへ移管されているが、ここでは移管前の出願人である D-Wave Systems の特許出願としてカウントした。組織再編については“Form N-CSRS: 180 DEGREE CAPITAL CORP.” SEC Report website <<https://sec.report/Document/0000893739-20-000028/>> を参照。

(出典) 筆者作成。

図3 上位出願人の保有特許に関する権利存続状況



(注) D-Wave SystemsはDWSIホールディングスの子会社に再編され、D-Wave Systems保有特許出願の一部がDWSIへ移管されているが、ここでは移管前の出願人であるD-Wave Systemsの特許出願としてカウントした。組織再編については“Form N-CSRS: 180 DEGREE CAPITAL CORP.” SEC Report website <<https://sec.report/Document/0000893739-20-000028/>> を参照。

(出典) 筆者作成。

表3 上位出願人の国（地域）別保有特許ファミリー件数  
（出願係属中又は設定登録されたファミリー件数）

出願人	日本	米国	欧州	中国	カナダ
IBM（米国）	110	305	118	141	10
Intel（米国）	3	101	20	37	0
D-Wave Systems（カナダ）	23	116	27	28	13
Microsoft（米国）	2	115	86	33	1
Google（米国）	43	93	99	78	81
Northrop（米国）	71	92	84	5	75
NTT（日本）	48	4	2	2	2
日立（日本）	33	27	7	1	0
東芝（日本）	26	25	4	0	2
Hefei（中国）	0	0	0	50	0
Rigetti（米国）	0	31	20	0	0
富士通（日本）	33	31	18	15	3
NEC（日本）	6	7	9	0	0
IonQ（米国）	11	33	17	14	0
MIT（米国）	1	26	11	2	2
IQBit（カナダ）	11	16	11	6	18
科学技術振興機構（日本）	8	6	2	3	1
Harvard College（米国）	4	15	10	3	8
Yale University（米国）	15	21	22	11	22
Zapata Computing（米国）	1	21	16	1	12

（注） D-Wave Systems はDWSI ホールディングスの子会社に再編され、D-Wave Systems 保有特許出願の一部がDWSI へ移管されているが、ここでは移管前の出願人であるD-Wave Systemsの特許出願としてカウントした。組織再編については“Form N-CSRS: 180 DEGREE CAPITAL CORP.” SEC Report website <<https://sec.report/Document/0000893739-20-000028/>> を参照。欧州は欧州特許庁（European Patent Office: EPO）への出願及びEPO加盟国への個別出願の合計値とした。

（出典）筆者作成。

各出願人の保有する特許ファミリー件数を出願先国（地域）別で記載したものが表3である。出願先国（地域）は図2と同じ国（地域）とした。米国企業はもちろんのこと、カナダのD-Wave Systems や日立、東芝、富士通などの日本企業も米国への出願数が多い傾向にあり、多くの企業が量子コンピュータ関連技術の市場を米国と想定しているであろうことが示唆される。一方、中国企業であるHefei社は米国、欧州、日本、カナダへの出願がなく中国への出願のみである点が他の出願人と相違する。前述のとおり中国人による中国国家知識産権局への特許出願件数が増加している点を鑑みると、Hefei社は自国での出願権利化を優先しているものと考えられる。

執筆：大阪大学量子情報・量子生命研究センター（QIQB）特任准教授 ま ち だ    な お こ  
町 田    尚 子