IBM **Institute for Business Value**

The **Quantum Decade**

来るべき量子コンピューティングの
時代に向けて

第 3 版

IBM

IBM の量子コンピューティングについて

最先端の技術を提供する機関と一部の先進的な企業との間で、量子コンピューティングに関するパートナーシップ締結がトレンドになりつつあります。その狙いは、これまでの技術では解決できないとされてきた問題を解決するために、量子コンピューティングのユースケースおよびアプリケーションを開発することです。そうした業界の中で、IBM は市場を牽引する最先端企業であり、量子コンピューターに関する自社人材（研究者、エンジニア、コンサルタント）を活用した IBM Quantum Network を立ち上げました。このグローバルなエコシステムには、現在、Fortune 500 にランクインする企業や、主要な学術機関、スタートアップ、国立研究所などの 180 以上の組織がメンバーとして参画しています。多様な組織から構成される IBM Quantum Network のメンバーは協業し、先進的な商用アプリケーションの実現を目的に量子コンピューティングの研究開発に取り組んでいます。IBM Quantum Network の参画メンバーは、自社の抱える主要な課題をどのように解決すべきかについて、実際に量子コンピューターを活用して実験を繰り返すことができます。現在、メンバーは IBM Cloud を経由して、127 量子ビットの IBM 量子プロセッサー「Eagle」2 つを含めた、20 以上の量子コンピューティング・システムを利用することが可能となっています。2023 年までには、1,000 量子ビットの量子コンピューターがさまざまな産業の重要課題の解決へ実用化される見通しです。詳細については、https://www.ibm.com/quantum をご覧ください。

IBM Institute for Business Value

IBM Institute for Business Value（IBV）は、業界のソートリーダー、第一線の研究者、分野ごとのエキスパートの専門知識に、グローバル・リサーチとパフォーマンス・データを組み合わせて、信頼性の高い、テクノロジーに基づくビジネス関連の知見を提供します。IBV のソート・リーダーシップ・ポートフォリオには、詳細なリサーチ、ベンチマーキング、パフォーマンス比較、およびデータの可視化が含まれ、あらゆる地域、業界、テクノロジーにおけるビジネスの意思決定をサポートします。詳細について IBV の Twitter は @IBMIBV からフォローいただけます。最新の知見をメールで入手するには、ibm.com/ibv よりお申し込みください。

The Quantum Decade

来るべき量子コンピューティングの
時代に向けて

第 3 版

The Quantum Decade

目次

ii 「The Quantum Decade」の IBM 著者のご紹介

iv 「The Quantum Decade」執筆にご協力いただいた外部有識者のご紹介

ix 序文

1 はじめに

9 第 1 章：量子に関する認識と発見の時代

29 第 2 章：量子の時代への準備と実験の威力

49 第 3 章：量子優位性とビジネス価値の追求

73 業界別ガイド

75 航空

81 銀行および金融市場

87 化学および石油

93 エレクトロニクス

99 医療

105 ライフサイエンス

111 ロジスティクス

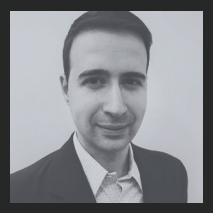
「The Quantum Decade」の IBM 著者のご紹介

インタビューやケーススタディーに参加または
貢献した IBM のチームをご紹介します。

Anthony Annunziata
Director of
Accelerated Discovery
IBM Quantum

Joseph Broz
Vice President
Growth and Markets
IBM Quantum

David Bryant
Program Director
IBM Quantum



Joel Chudow
Strategic and Industry
Partnerships Global Lead
IBM Quantum

Charles Chung
Electronics Industry
Consultant
IBM Quantum

Christopher Codella
Future of Computing
Distinguished Engineer
IBM Quantum

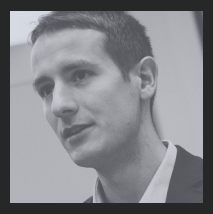
Dan Colangelo
Service Parts Planning
Program Manager
IBM Systems

Antonio Córcoles
Research Staff Member
IBM Quantum

Scott Crowder
Vice President
IBM Quantum
CTO
IBM Systems

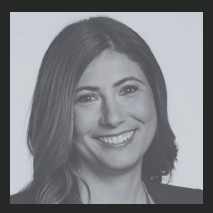
Kristal Diaz-Rojas
Chief of Staff to Jamie Thomas,
General Manager
IBM Systems

Stefan Elrington
Global Lead for Start-ups
IBM Quantum



Frederik Flöther
Life Sciences and Healthcare
Industry Consultant
IBM Quantum

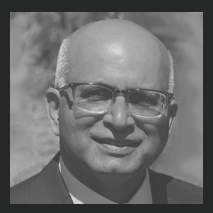
Jay Gambetta
IBM Fellow and Vice President
Quantum Computing
IBM Quantum



Jeannette Garcia
Senior Research Manager
Quantum Applications
and Software
IBM Quantum

Darío Gil
Senior Vice President
and Director
IBM Research

Jonas Gillberg
Chemicals and Petroleum
Industry Consultant
IBM Quantum



Raja Hebbar
Associate Partner & Global
Quantum Delivery Leader
for Enterprise
IBM Quantum

Heather Higgins
Industry and Technical
Services Partner
IBM Quantum

Michael Hsieh
Government Squad Leader
IBM Quantum

Noel Ibrahim
Financial Services
Industry Consultant
IBM Quantum

Blake Johnson
Quantum Platform Lead
IBM Quantum

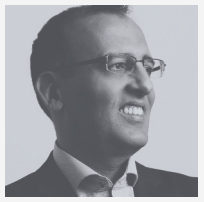
Gavin Jones
Manager, Quantum Applications
Technical Quantum
Ambassador
IBM Quantum

Mariana LaDue
Travel and Transportation
Industry Consultant
IBM Quantum

Jesus Mantas
Senior Managing Partner
IBM Global Business Services

Tushar Mittal
Senior Product Manager
IBM Quantum

Zaira Nazario
Theory, Algorithms, and
Applications Technical Lead
IBM Quantum



Imed Othmani
Industry Consulting Partner
IBM Quantum

Hanhee Paik
Research Staff Member
IBM Quantum

Bob Parney
Industrial Process
Squad Leader
IBM Quantum

Jean-Stéphane Payraudeau
Managing Partner—Offering
Management, Assets, IBM Institute
for Business Value, and Industry
Centers of Competence
IBM Global Business Services

Veena Pureswaran
Associate Partner and
Global Research Leader
for Quantum Computing
IBM Institute for Business Value

Edward Pyzer-Knapp
Senior Technical Staff Member
and Worldwide Research Lead
AI-Enriched Modeling and Simulation
IBM Research

Travis Scholten
Quantum Computing
Applications Researcher
IBM Quantum

James Sexton
IBM Fellow and Director
Data Centric Systems
IBM Research

Claudine Simson
Director, Core AI, Exploratory
Science, Major Strategic Accounts,
Global Executive Oil and
Gas/Energy/Chemicals
IBM Corporate Headquarters

Galen Smith
Supply Chain, Blockchain, AI,
and IoT Program Manager
IBM Systems

Jamie Thomas
General Manager, Systems
Strategy and Development
IBM Systems

Kenneth Wood
Global Business
Development Director
IBM Quantum

「The Quantum Decade」執筆にご協力いただいた外部有識者のご紹介

量子コンピューティングの専門家としてのご協力に厚くお礼申し上げます。

Ching-Ray Chang
Distinguished Professor
Department of Physics
National Taiwan University

Richard Debney
Vice President
Digital Technology
BP

Todd Hughes
Technical Director
Strategic Projects and Initiatives
CACI

Ilyas Khan
Founder and CEO
Cambridge Quantum Computing

Glenn Kurowski
Senior Vice President and Chief Technology Officer
CACI

Doug Kushnerick
formerly with Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research and Engineering

Sabrina Maniscalco
Professor of Quantum Information and Logic
University of Helsinki
CEO
Algorithmiq Oy

Ajit Manocha
President and CEO
SEMI

Prineha Narang
Assistant Professor of Computational Materials Science
Harvard University

Jeff Nichols
Associate Laboratory Director
Oak Ridge National Laboratory

Christopher Savoie
Founder and CEO
Zapata Computing

Irfan Siddiqi
Professor of Physics
University of California Berkeley

Colonel (Retired) Stoney Trent
Founder and President
The Bulls Run Group

Peter Tsahalis
CIO of Strategic Services and Advanced Technology
Wells Fargo

Christian Weedbrook
CEO
Xanadu Quantum Technologies

量子
コンピューティングの
研究を進めている
IBM の技術専門家

Sergey Bravyi
IBM Fellow and Chief Scientist
for Quantum Theory
IBM Quantum

Jerry Chow
IBM Fellow and Director of
Quantum Infrastructure
IBM Quantum

Antonio Córcoles
Research Staff Member
IBM Quantum

Andrew Cross
Research Staff Member and Manager
Theory of Quantum Computing
IBM Quantum

Oliver Dial
IBM Fellow and
Chief Quantum Hardware Architect
IBM Quantum

Liz Durst
Director
Quantum Computing
IBM Quantum

Ismael Faro
Distinguished Engineer and Chief Architect
Quantum Computing, Cloud, and Software
IBM Quantum

Jay Gambetta
IBM Fellow and Vice President
Quantum Computing
IBM Quantum

Jeannette Garcia
Senior Research Manager
Quantum Applications and Software
IBM Quantum

Abhinav Kandala
Research Staff Member
IBM Quantum

Katie Pizzolato
Director, IBM Quantum Strategy
and Applications Research
IBM Quantum

Sarah Sheldon
Senior Manager
Quantum Theory and Capabilities
IBM Quantum

Matthias Steffen
IBM Fellow and Chief Quantum
Architect
IBM Quantum

Maika Takita
Research Staff Member
IBM Quantum

Kristan Temme
Research Staff Member
IBM Quantum

Christy Tyberg
Senior Manager
Quantum Computing
IBM Quantum

日本語翻訳監修

（2023 年 6 月 1 日現在）

西林 泰如

Partner, Enterprise Strategy,
IBM Consulting
Japan Lead, Quantum Industrial &
Technical Services

橋本 光弘

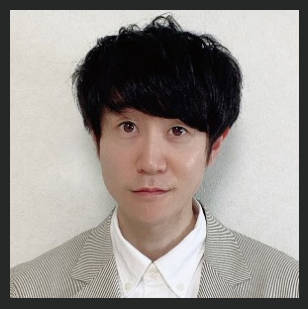
Associate Partner, Enterprise Strategy,
IBM Consulting
Japan Co-Lead, Quantum Industrial &
Technical Services

竹折 光晴

Principal Quantum Computational Scientist,
Certified Expert Data Scientist,
Quantum Industrial & Technical Services,
IBM Research

宮部 俊吾

Principal Quantum Computational Scientist,
Quantum Industrial & Technical Services,
IBM Research



山本 貴博

Quantum Computational Scientist
(IBM Certified Associate Developer),
Quantum Industrial & Technical Services,
IBM Research

島田 典明

Quantum Computational Scientist,
Quantum Industrial & Technical Services,
IBM Research

櫻井 亮

Senior Consultant, IBM Quantum Ambassador,
Enterprise Strategy,
IBM Consulting

小野寺 民也

Distinguished Engineer and Deputy Director,
IBM Research – Tokyo

小林 有里

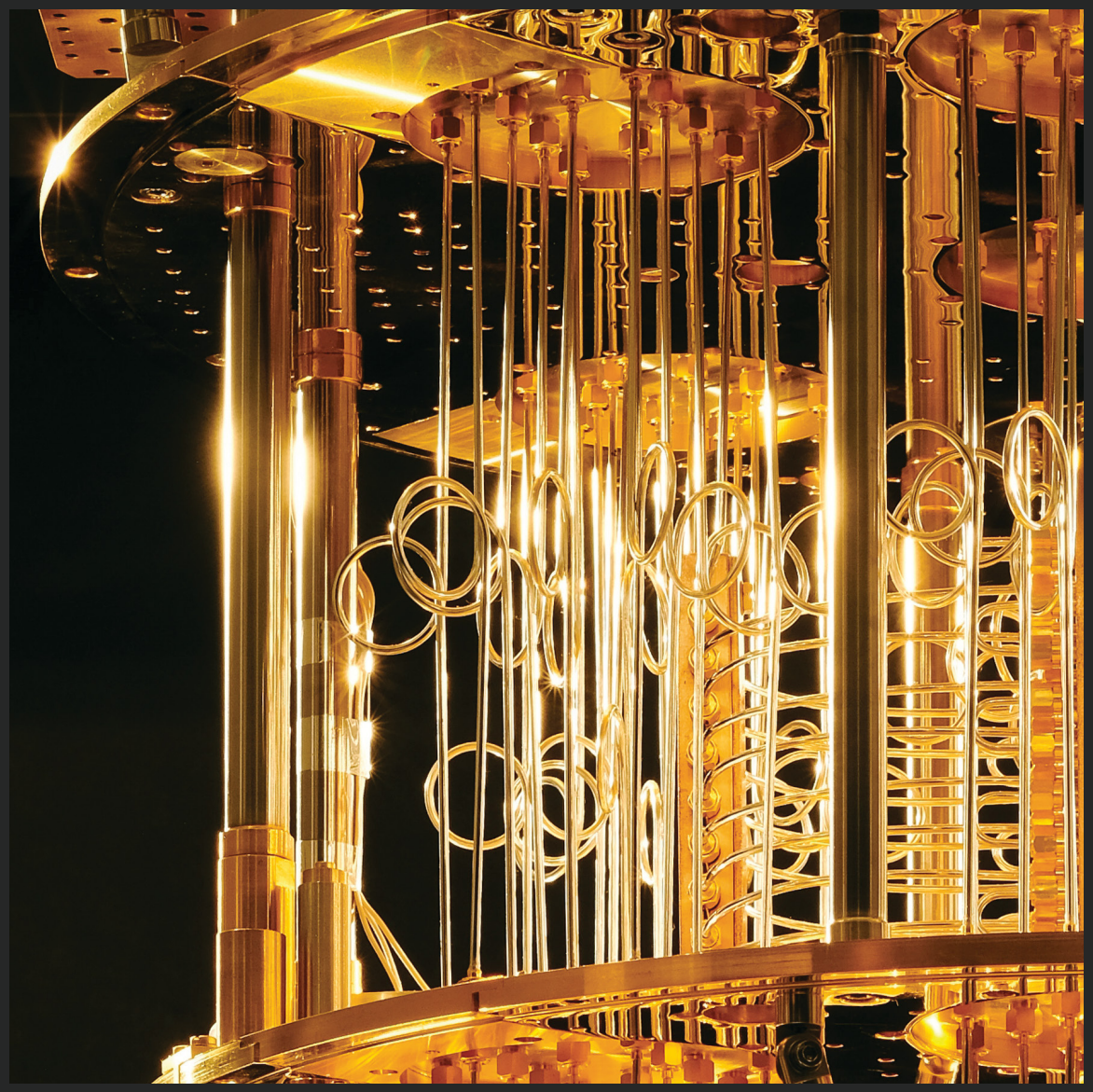
Asia Pacific Community Lead,
IBM Quantum

沼田 祈史

Quantum Developer Community,
IBM Quantum, IBM Research

Jiayun Zhu

Business Development Executive,
IBM Quantum



希釈冷凍機の内部に設置されている量子コンピューターは、絶対零度に近い温度に保たれている。マイクロ波の制御のために螺旋構造を有しており、デバイスの冷却に応じて収縮する。

Darío Gil

Senior Vice President and
Director of IBM Research

序文

まず初めに、理論が確立されました。

チャールズ・ベネットが初めて「量子情報理論」という言葉をノートに記したのは、1970 年のことでした。その後もポール・ベニオフ、リチャード・ファインマン、ユーリ・マニンなど、1980 年代初頭の量子コンピューティングのパイオニアたちは、数学と量子力学の理論に基づき、量子情報理論に関する議論・研究を継続しました。彼らの主張は明確で、「コンピューターは物理的なシステムである」というものでした。「計算できないもの」を効率よく計算したいのなら、計算について考え直さなければなりませんでした。量子力学を基にした計算モデルには大きな可能性が秘められています。それゆえ、量子コンピューターは開発されなければならなかったのです。

次に登場したのが「量子ビット」です。1998 年に 2 量子ビットの量子コンピューターが初めて作られ、理論は現実のものとなり始めました。量子コンピューターの構成要素である量子ビットは、現在の IBM では、原子のように振る舞う超伝導回路から構築されています。量子ビットは複数の状態の線形結合で表される状態をとり、干渉したり、量子もつれの状態になったりします。つまり、1 つの量子ビットの状態が変わると、量子もつれの関係にあるパートナーの状態も変化するのです。

常識では信じられないことかもしれませんが、これは本当の話なのです。

不思議で驚きに満ちた量子力学の世界は実際に存在し、私たちはその力を利用しようと取り組んできました。量子もつれの状態になったり干渉したりする量子ビットの能力によって、将来の量子コンピューターは、従来のコンピューターをはるかに上回る性能を発揮するはずです。

現在、「量子優位性」を示す実用的なアプリケーションの開発が急ピッチで進んでいます。もうじき、有用なタスクに対し、量子と古典の両コンピューターを組み合わせることで、古典コンピューターのみを使用するよりも高い性能を発揮することになるでしょう。私たちは、これを今後 10 年のうちに達成できると考えています。IBM の量子コンピューティング・システムの規模、品質、動作速度は向上し続けています。古典的な計算と量子的な計算を組み合わせるツールも強化が進んでおり、かつてないほど複雑な計算も実行できるようになりました。

もう何年も前から、量子技術の実用化へ取り組む人々が増えています。産業界と学術機関の研究者、開発者、その他の専門家たちは、クラウドを介して IBM の量子コンピューターを活用して、新しい用途を探り、実用的な問題を定式化し、量子優位性の実現を目指してきました。

この取り組みにより多くの方々が加わってほしいと強く願っています。

このタイミングで、量子コンピューターの可能性を模索することができれば、未来の世界を創造する活動に参加できるでしょう。銀行・化学・航空・大手製造業など業種を問わず、量子コンピューターは企業の競争力を高めるポテンシャルを秘めています。数千もの量子ビットの量子もつれにより、今までは不可能だった方法で自然をシミュレーションしたり、データに潜む構造を炙り出すことができるようになるでしょう。それにより、新しい素材を発見したり、より効率的にデータから洞察を抽出したり、正確にリスクを予測したりすることが可能になるはずです。

本レポート「The Quantum Decade」をお読みいただくことで、皆さまが量子コンピューティング時代へ備えるに当たり、少しでもお役に立てれば幸いです。この最新技術を活用して貴社のビジネスが来るべき「量子時代」においてますます発展されるようお祈り申し上げます。

その「量子時代」は、皆さまが思っているよりも早く到来するのですから。

アフター・コロナにおける ビジネスの優先順位

あらゆる業界が、これまでにない大きな不確実性に直面するだろう。そのような状況下で、ビジネスモデルは新しいテクノロジーの影響を受けやすくなり、その依存度は高くなる。量子コンピューティングは、解決可能なビジネスの問題の範囲を広げ、より複雑な問題への対応を実現するだろう。

Future of Computing （コンピューティングの未来）

量子コンピューティング、AI、さらには従来の古典コンピューティングをハイブリッドクラウド、ワークフローへ統合することで、この 60 年間で最もインパクトの大きいコンピューティングの革命が起きるはずだ。量子パワーを活用したワークフローは、仕事のやり方を根本的に変える可能性を秘めている。

Discovery-Driven （発見駆動型）の企業

これからの企業は、単なるデータ分析から、問題解決のための新たな方法の発見と特定を重視するようになる。これに Hyper-Automation（AI や機械学習、パッケージ・ソフトウェア、自動化ツールなどを組み合わせた一連の業務の自動化）やオープンインテグレーションを組み合わせることで、最終的にはこれまでにないビジネスモデルを創出することが期待されている。

The Quantum Decade

はじめに

この数十年間、量子コンピューターは未来のテクノロジーであると見なされてきた—もしそのテクノロジーが空想のものから現実のものになるのであれば、すべてを変えるようなものになるだろうと。量子コンピューターに何十億ドルもの研究費が投じられ、メディアで大きく取り上げられるようになった近年でさえ、現実の意思決定者からは、この分野は難解過ぎて、学者や理論家のみが追い求める遠い存在であると見なされ、敬遠されることもあった。しかし、「Quantum Decade」—企業が量子コンピューティングのビジネス価値を認識し始める時代—がますます進んでいる現在、このような見方は急速に時代遅れのものとなりつつある。

量子コンピューティングの時代が到来しつつあり、「Quantum Decade」を理解せず、これに適応できないリーダーは、一歩、いや、何年も後れを取ってしまう可能性がある。今後数年の間に、既存のビジネスモデルを破壊し、あらゆる業界を再定義するような大きなコンピューティング革命が起こると私たちは予測している。歴史的に見ても、危機は新たなテクノロジーの誕生と普及のきっかけとなってきた。第一次世界大戦では、今日でも使われている工場プロセスが導入された。冷戦では、1960 年代後半の、インターネットの前身である高等研究計画局ネットワーク（ARPANET）の設立が加速された。そして現在、COVID-19 は、アジリティー、レジリエンス、そしてデジタル成熟の加速の必要性を高めてきている。私たちは、量子コンピューティングは、既存の先端テクノロジーと組み合わさることで、科学やビジネスの発展に劇的な影響を及ぼすだろうと見込んでいる。量子コンピューティングは、世界規模の大きな課題に対する解決策の発見を加速させることで、過去数十年間にわたるテクノロジーの波よりも、ポジティブなディスラプションをはるかに急激に引き起こす可能性を秘めている。

視点
基本

量子コンピューティングの
指数関数的な力の理解

古典コンピューターのビットは、情報を 0 か 1 のどちらかで記憶する。古典力学では、物質の世界は固定された構造を持っていると考えられる。しかし原子よりも小さい物質の探索が可能になると、科学者たちは確率的な状態を捉え始めた。つまり、原子よりも小さい世界では、物質は条件次第でさまざまな性質を持つことが分かってきた。この現象を解明するために生まれたのが量子物理学である。

量子コンピューティングの力は、量子力学の 2 つの基礎となる原理である「干渉」と「量子もつれ」に依拠する。干渉の原理は、量子コンピューターが不要な解を打ち消し、正しい解を増幅することを可能にする。量子の量子もつれは、複数の量子ビットの状態を結合することで、個別の量子ビットよりも多くの情報の保有が可能になることを示す。これら 2 つの原理には古典力学上のアナロジーがなく、古典コンピューター上でモデル化するには指数関数的なリソースが必要になる。例えば、下の表にあるように、100 量子ビットの量子コンピューターの複雑さを表現するためには、地球上の原子の数よりも多くの古典ビットが必要になる。

量子ビット	2	3	10	16	20	30	35	100	280
量子もつれの状態を表すのに必要な古典ビット数	512 ビット	1,024 ビット	16 キロバイト	1 メガバイト	17 メガバイト	17 ギガバイト	550 ギガバイト	地球上の全原子の数よりも多い	宇宙にある全原子の数よりも多い

n 乗に向かって
指数関数的成長のすごさ

「第 1 次産業革命から第 2 次産業革命までの期間は約 80 年、
第 2 次産業革命から第 3 次産業革命までは約 90 年だった。
一方、第 3 次産業革命から第 4 次産業革命までの期間は、
モノのインターネット（IoT）、人工知能（AI）、機械学習、仮想現実（VR）、
4G など、半導体による革新的イノベーションのおかげで、約 45 年に短縮された。
インダストリー 5.0 までの期間は、量子コンピューティングや
その他の多くのディスラプションによって、
約 30 年にまでさらに短縮されると私は予想している」

Ajit Manocha
President and CEO
SEMI

量子コンピューティングの基本的な構成要素は、すでに存在し始めている。量子コンピューティングのためのシステムは、クラウド上においてかつてない規模で稼働しており、コンパイラーやアルゴリズムは急速に進化しつつある。また量子力学に精通した人材のコミュニティーは拡大しており、ハードウェアやソフトウェアの開発を先導する企業はテクノロジーに関するロードマップを公開している。このテクノロジーの応用可能性は、もはや理論の段階ではなく、理解を深め、戦略や計画を立てるべき実用の段階に突入している。さらなる朗報もある。将来の量子コンピューティング導入への準備は、現時点のビジネスにも役立ち始めるということだ。

量子コンピューターは古典コンピューターに取って代わるものではなく、それを拡張して補完するものだ。量子コンピューターの方がより良く解ける問題でも、古典コンピューターの必要性は変わらない。データの入出力はこれからも古典的な手続きで行われるため、量子コンピューターや量子プログラムには、古典的な処理と量子的な処理の組み合わせが必要であるからだ。

約 60 年前のムーアの法則の誕生以来、コンピューティングの進化に最も重要な貢献をもたらしているのは、従来の古典コンピューティング、そして AI の進歩である。[1] 量子コンピューティングは、古典ビット、量子ビット、そして AI の「ニューロン」から成る三位一体のテクノロジーを完成させる。量子コンピューティングだけではなく、この三位一体が生み出すシナジー効果こそが、コンピューティングの未来を牽引する力なのだ（図 1 参照）。

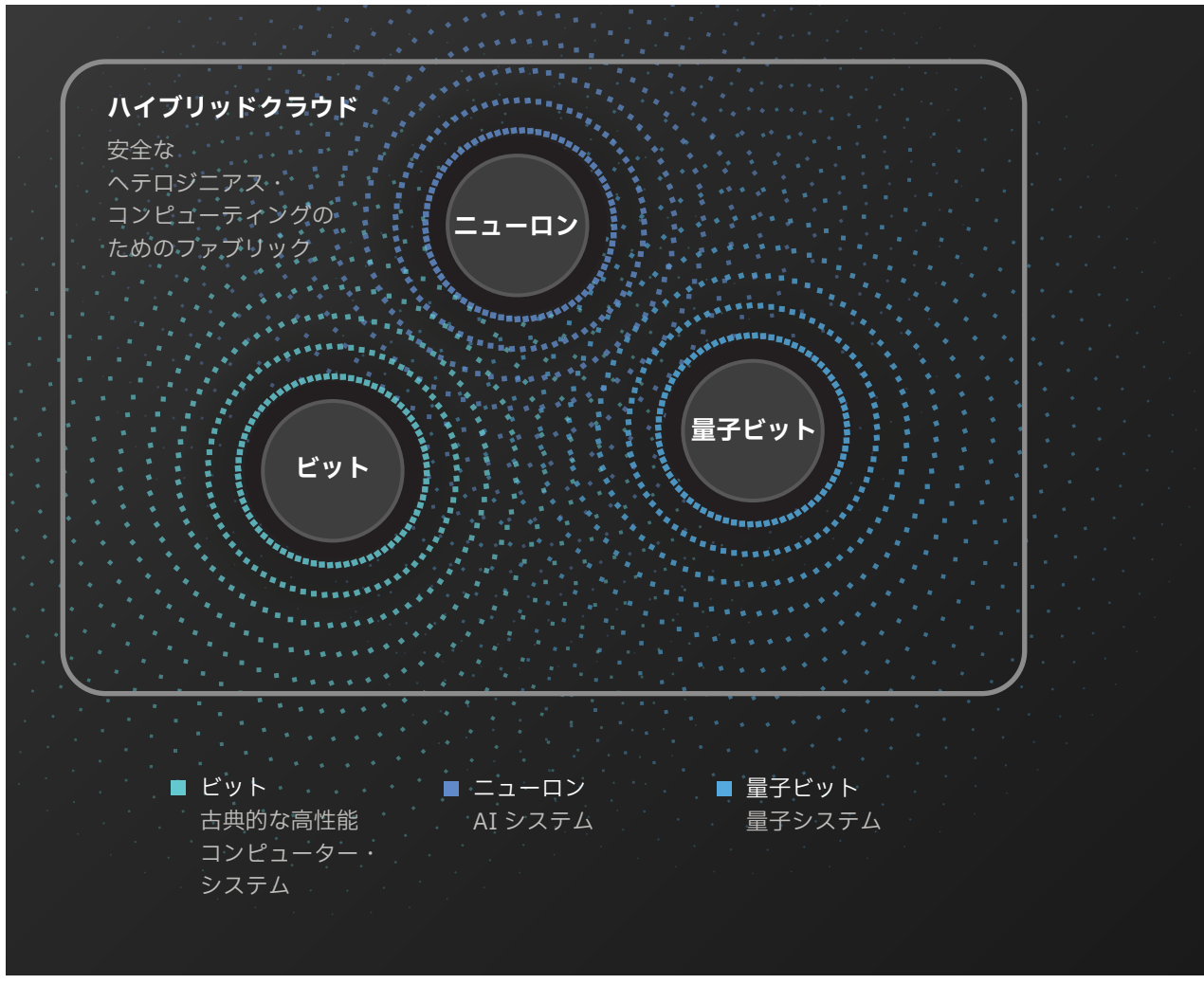


図 1

この 60 年間で最も高揚する
コンピューティング革命
3 つの主要技術の融合

これまでにIBM Institute for Business Value（IBV）は、量子コンピューティングに関する10件以上の産業・実務ベースの研究に深く関わってきた。[2] 今回の研究では、IBMの量子コンピューティング研究者をはじめ、顧客、パートナー、学術関係者など、50名以上の専門家へのインタビューを実施し、新たな洞察を得た。『The Quantum Decade』に関する本報告書は、経営層に対して、量子コンピューティングがもたらす将来のビジネス変革に備える戦略を提示する。本報告書では、特に重要な要因やテーマ、この重要な変曲点において取るべき行動を明らかにしていく。

「Quantum Decade」とはどんなものなのか。量子の力を得た世界は、どのようなものか。そして先見の明があるリーダーや組織は、自らを効果的に教育し優位な立ち位置に立つために、今、何ができるのか、何をするべきなのか。学びの鍵は、組織の進化の3つの段階―「認識」、「準備」、「優位性」にある（図2参照）。

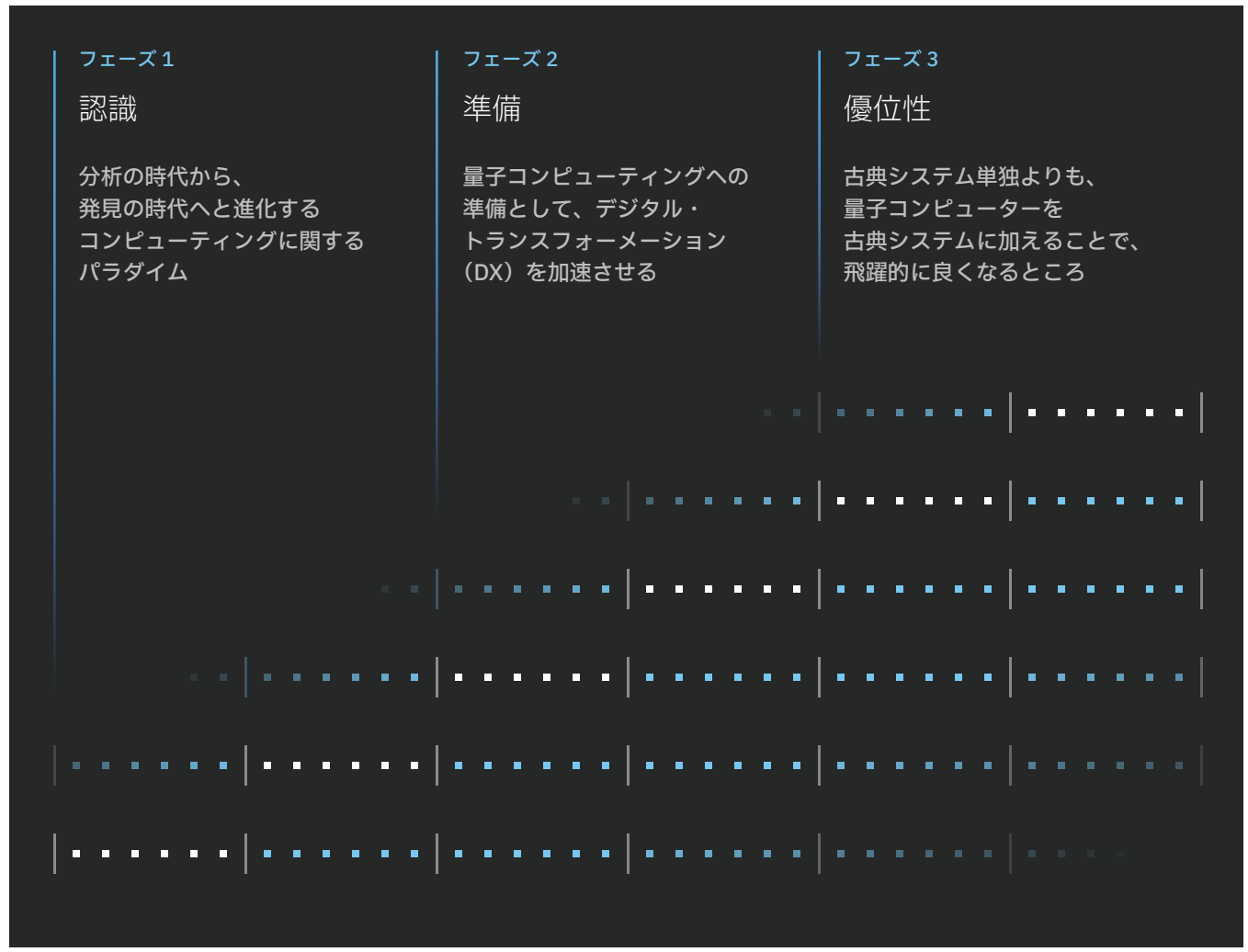


図 2

量子優位性への道のり
DXの基礎的なステップ

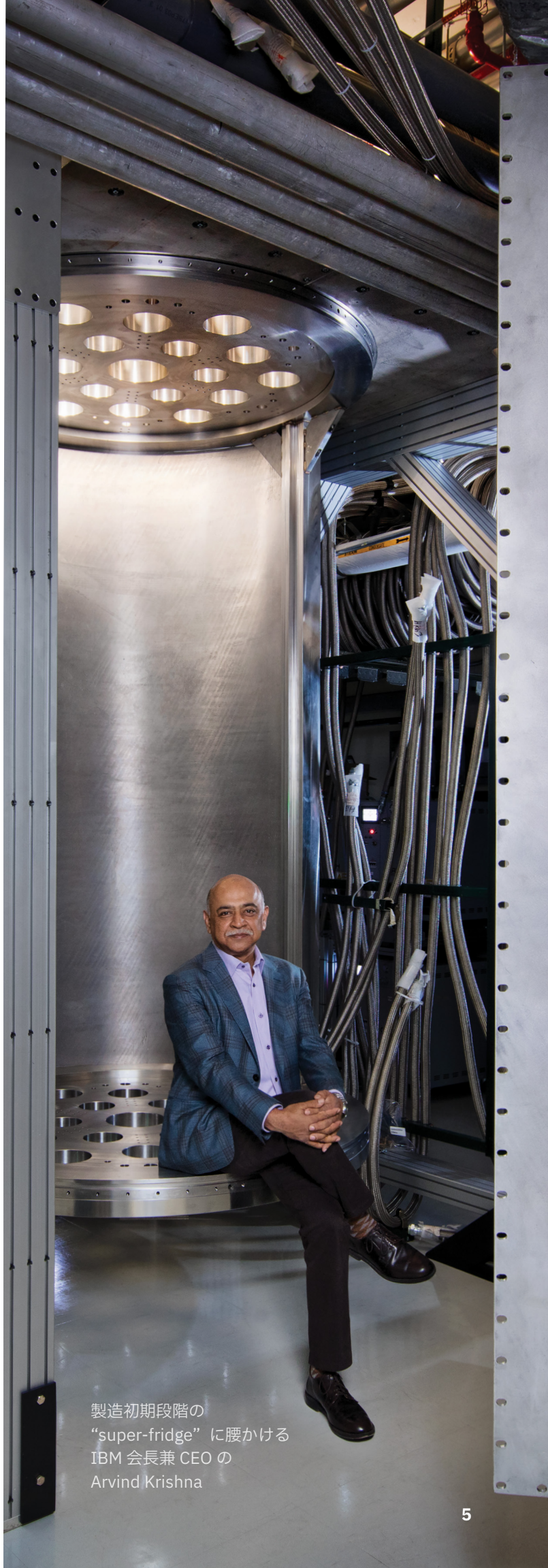
認識

IBV が 2021 年に実施した CEO 調査によると、調査対象となった 3,000 人以上の最高責任者のうち 89% が、今後 2 ～ 3 年の間にビジネス成果を上げるための重要なテクノロジーとして、量子コンピューティングを挙げなかった。[3] 短期的に見れば、これは理解できる。しかし 1,000 量子ビットの量子コンピューターは、2023 年には実現すると予測されている。[4] これからの 10 年間で、このテクノロジーが破壊的な革新を生む可能性を秘めていることを考えると、CEO は今すぐにリソースを投入してこの技術を学び、量子化への道を歩み始めるべきである。量子技術の可能性を無視することは、大きなリスクを意味する。その結果は、10 年前に AI の機会を逃した場合よりも、はるかに深刻なものになるだろう。[5]

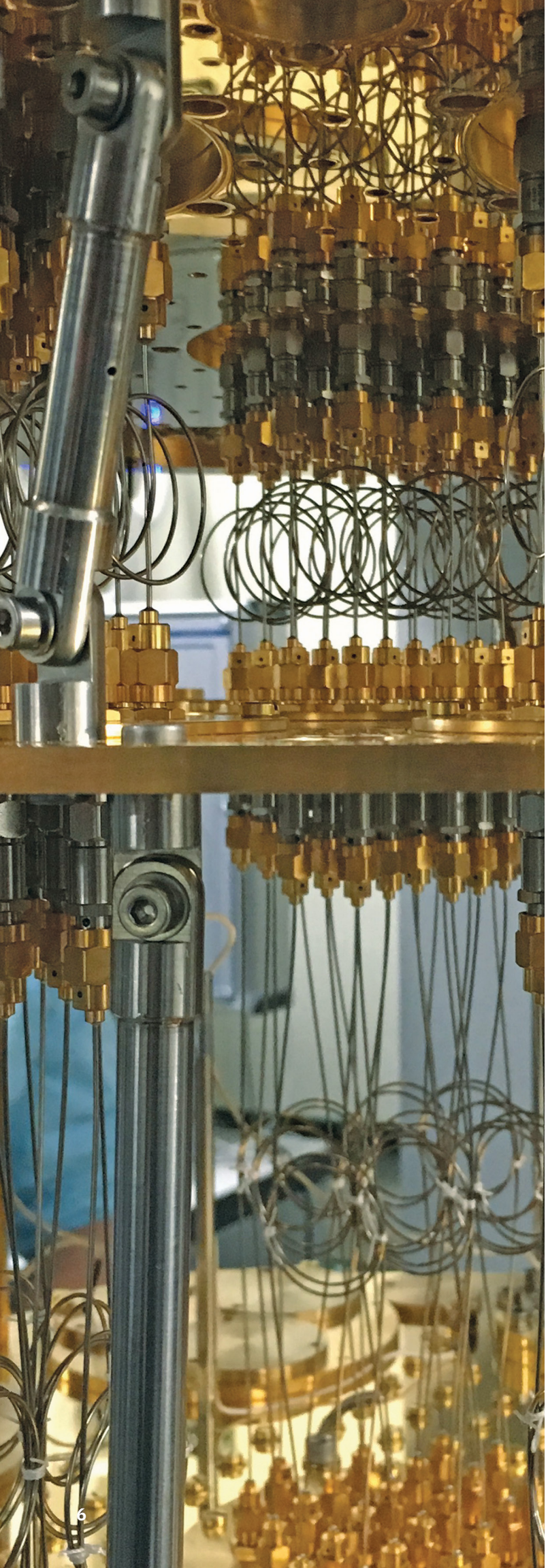
量子コンピューティング戦略のフェーズ 1 は、状況が変化していることを広く認識することだ。その主な変化とは、コンピューティング・パラダイムが、分析の時代（確立されたデータを振り返って、そこから学ぶ）から、発見の時代（将来を見据えて、シミュレーション、予測、最適化のための、より正確なモデルを形成する）へ進化したことだ。この変化により、これまで不可能だったソリューションを、実際に発見できる可能性が生まれつつある。

「Fortune 500 企業の CEO にとっては、これは一生に一度のチャンスだ。
遅れてから追いつこうだなんて思っていたら、
チャンスは早々に逃げていってしまう。
今こそ伝統にとらわれず、量子コンピューティングが
自社に何ができるのかを認識しなくてはならない」

Ilyas Khan
Founder and CEO
Cambridge Quantum Computing



製造初期段階の
“super-fridge” に腰かける
IBM 会長兼 CEO の
Arvind Krishna



準備

企業が量子コンピューティングを使って大きな問題を解決することは、まだ不可能だ。しかし量子コンピューティング技術は、そのあらゆる開発段階において、予測を上回る速さで開発が進んできている。組織のリーダーが、この新しいテクノロジーによって、事業計画やビジョンがどのように変化するかを検討するのに、現時点で早すぎるということはない。フェーズ 2 では、量子コンピューティングに関する以下の重要な問題について検討する。その問題とは、（1）量子コンピューティングにより、自社のビジネスモデルはどのように破壊され、再構築されるか、（2）現在利用している AI や古典コンピューターのワークフローは、量子コンピューティングにより、どう強化できるのか、（3）自社の属する業界にとって、量子コンピューティングでできる「キラー・アプリ」は何か、（4）社内、またはエコシステム内の量子コンピューティングの能力を深化させるためには、どうすればいいのか。今は、将来のシナリオを描き、実験や試行錯誤を行う時である。そのためには、量子コンピューティングに精通し、その可能性を社内で啓発することができる人材を探す、または育てる必要がある。また最新の量子コンピューティングを熟知したパートナーと提携することも視野に入れるべきである。

しかし、もう 1 つ同じように重要な問題がある。それは、量子コンピューターが実用化された際に、すぐに利用できるようにするためには、今組織は何をする必要があるかという問題だ。実際、量子コンピューティングの基盤を構築するということは、古典コンピューティングを強化するということも意味する。また量子コンピューティングに必要な土台を作るには、自社のデータや AI、クラウドの質を向上させる必要がある。量子コンピューティングの枠組みで DX を加速させることは、実用化への道筋を開くのみならず、今すぐ大きなメリットを得ることにもつながるだろう。結局のところ、量子コンピューティングは、古典コンピューティングを滅ぼすものではないのだ。量子コンピューティング、古典コンピューティング、AI の三位一体は、進歩的かつ反復的なパートナーシップを形成し、一緒に存在することで、それぞれが個別であるときよりもより強い力を生み出す。

「今、量子コンピューティングというと、どうやってこれを利用すればいいのかと、
研究者が試行錯誤する姿を思い浮かべるかもしれない。
しかし 10 年後には、そうした問題は解決されているはずだ。
その頃には、他の人が使っていない方法で、量子コンピューターを使うためには、
どうすればいいのか、といった問題が大切になっているはずだ」

Prineha Narang
Assistant Professor of Computational Materials Science
Harvard University

「エネルギー業界の『重要な問題』の領域では、激しい競争が繰り広げられている。
最初にそこにたどり着いた者が、大きな優位性を得ることになるだろう」

Doug Kushnerick
formerly with Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research and Engineering

優位性

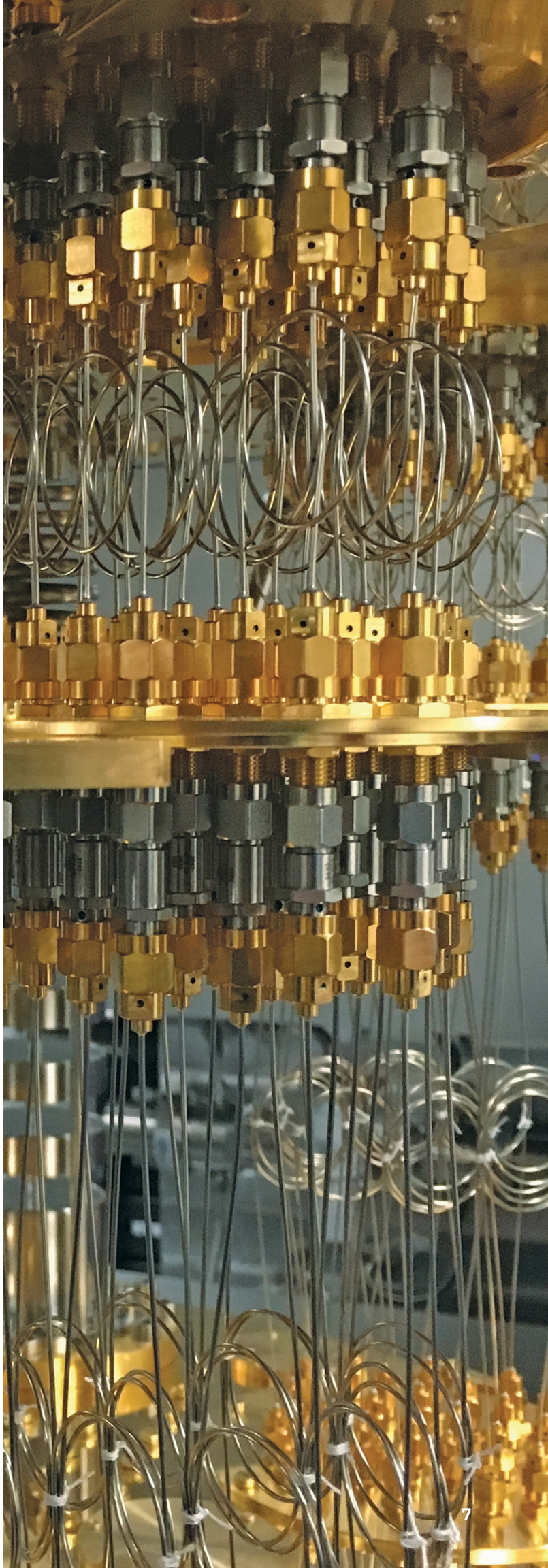
フェーズ 3 の「量子優位性」は、量子コンピューターを使って、ビジネスや科学の分野で関心のある計算タスクを、高効率、低コスト、あるいは高品質で実現できた際に生じる。これは、古典システムに量子コンピューターを加えることにより、古典システム単独のときよりもパフォーマンスが著しく良くなるときに起こる。量子コンピューティングのハードウェア、ソフトウェア、アルゴリズムの進歩が融合したとき、古典コンピューティングよりも大幅なパフォーマンスの向上が見られ、多くの業界において、優位性を持てるような新たな機会が得られる。しかし量子技術からビジネス価値を引き出すには、組織や業界を真に変革できるような適切なユースケースを優先させることが重要になる。

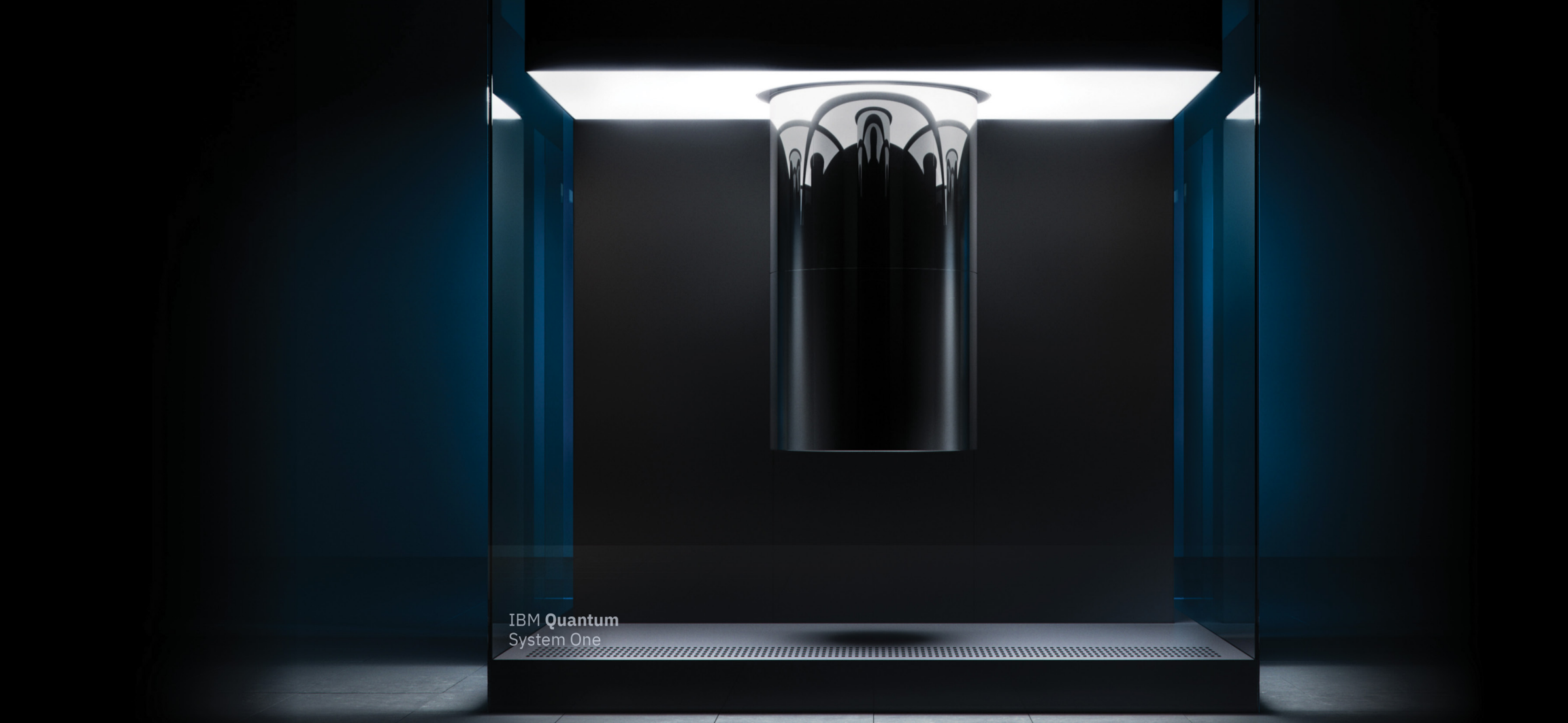
量子優位性は、一夜にして得られるものではない。しかし、優位性の確立に数カ月、あるいは数年かかったとしても、量子技術の利用と学習において指数関数的な達成につながる可能性がある。新素材の開発から、個別化医療、さらには経済全体のビジネスモデルの抜本的な転換に至るまで、変化は確実に起こっている。古典コンピューティングの能力を高め、業界変革の可能性を積極的に模索することで、組織は量子優位性を獲得するための最適なポジションに立てるのだ。

「量子コンピューティングの醍醐味を味わうのは、まだこれからだ。
量子優位性が発揮されることが予想できる応用領域がある。
一方で、まだ知られていない量子コンピューティングの適用先も広大にある。
そのような領域こそが、量子コンピューティングの可能性を再定義するだろう」

Irfan Siddiqi
Director of the Advanced Quantum Testbed
Lawrence Berkeley National Laboratory

Professor of Physics
University of California, Berkeley





IBM Quantum System One：商用化されている世界で最もパワフルな量子コンピューター

洞察

世界の問題に取り組む

新薬の開発から、財務リスクの管理、サプライチェーンの再構築など、地球規模で複雑化する社会問題やマクロ経済問題、および環境問題の解決は喫緊の課題だ。

1,000 量子ビットのマイルストーン（重要な節目）

量子コンピューティングのハードウェアは、2021 年の 127 量子ビットから、2023 年には 1,000 量子ビットに到達するだろう。さらに 2030 年までには、エラー訂正が実行可能な実用的な量子コンピューターが普及すると見込まれている。クラウドベースのオープンソースの開発環境は、量子コンピューターの利用を「フリクションレス」にするだろう。

ハイブリッド・クラウドの未来

量子プログラミングの多くは、古典ハードウェアと量子ハードウェアの相互作用を必要とする。しかし、レイテンシーや遅延が発生するため、容量を最適化するには、これを低減する必要がある。そのため、ハイブリッドクラウドが、未来の量子コンピューティングで、最も現実的な選択肢となる。

エコシステムの力

量子コンピューティングのエコシステムは、協業でのイノベーションやオープンソース開発を実施する場であり、実際の課題に量子コンピューティングを適用できるようユーザーを訓練するための優れた場に急速になりつつある。

第１章

量子に関する認識と発見の時代

登場したばかりの新しいテクノロジーについて、完全に理解することは難しい。特に、量子コンピューティングのように、複雑なものであればなおさらだ。しかしテクノロジーとビジネス戦略の両方を適切に連動させるためには、基本的な理解を深めなくてはならない。

本章では、量子コンピューティングの事例を取り上げ、変曲点を生み出すために今、何が起こっているのかを解説する。その上で、古典コンピューティング、AI、そして量子コンピューティングの三位一体により、これまでのデータ・マイニングで洞察を得る分析の時代から、実験と発見を加速させる時代へ、どのように移行していくのかを探る。また発見駆動型の環境が、企業にどのような影響を与えるかについても概説する。

「Quantum Decade」の事例

「Quantum Decade」は、ビジネスや社会が抱えるビッグ·プロブレムを、私たちはどうすれば解決できるのかといったプレッシャーの中で生まれた。そのロードマップには、2023 年までに 1,000 量子ビットの実現が、また 10 年後には量子コンピューティングの実用化が描かれている。この難しい課題を現実のものにするには、開発者のエコシステムの充実が必須となる（図 3 参照）。

ビッグ・プロブレムの解決で求められるスピード

太陽電池パネルの新素材を発明し、クリーンなエネルギーをより効率的に生産できるようになった未来を想像してほしい。航空機の部品の正確なシミュレーションを、数年ではなく数分で完了できる未来はどうだろうか。あるいは 10 年かかることもある新薬の開発を、たった数カ月で実現できたとしたら。

こうした未来は、野心的で、業界を変えるようなデータ駆動型の科学にかかっている。企業はこうした分野で発見した結果をデータとして蓄積し、AI で応用するべきだ。そうすれば、発見のサイクルは加速し、複数の組織が知識を集約して問題を解決し、業務やサービスを強化することが可能になるからだ。[6]

気候変動、世界のどこかで今もはびこる飢餓、さらなるパンデミックなど。こうした地球規模の問題を解決するには、強力な新しいツールを開発し、ブレイクスルーを達成する必要がある。ビジネスや社会が直面するこうした一連の複雑な問題を解決できる最強のツールが、量子コンピューティングなのである。

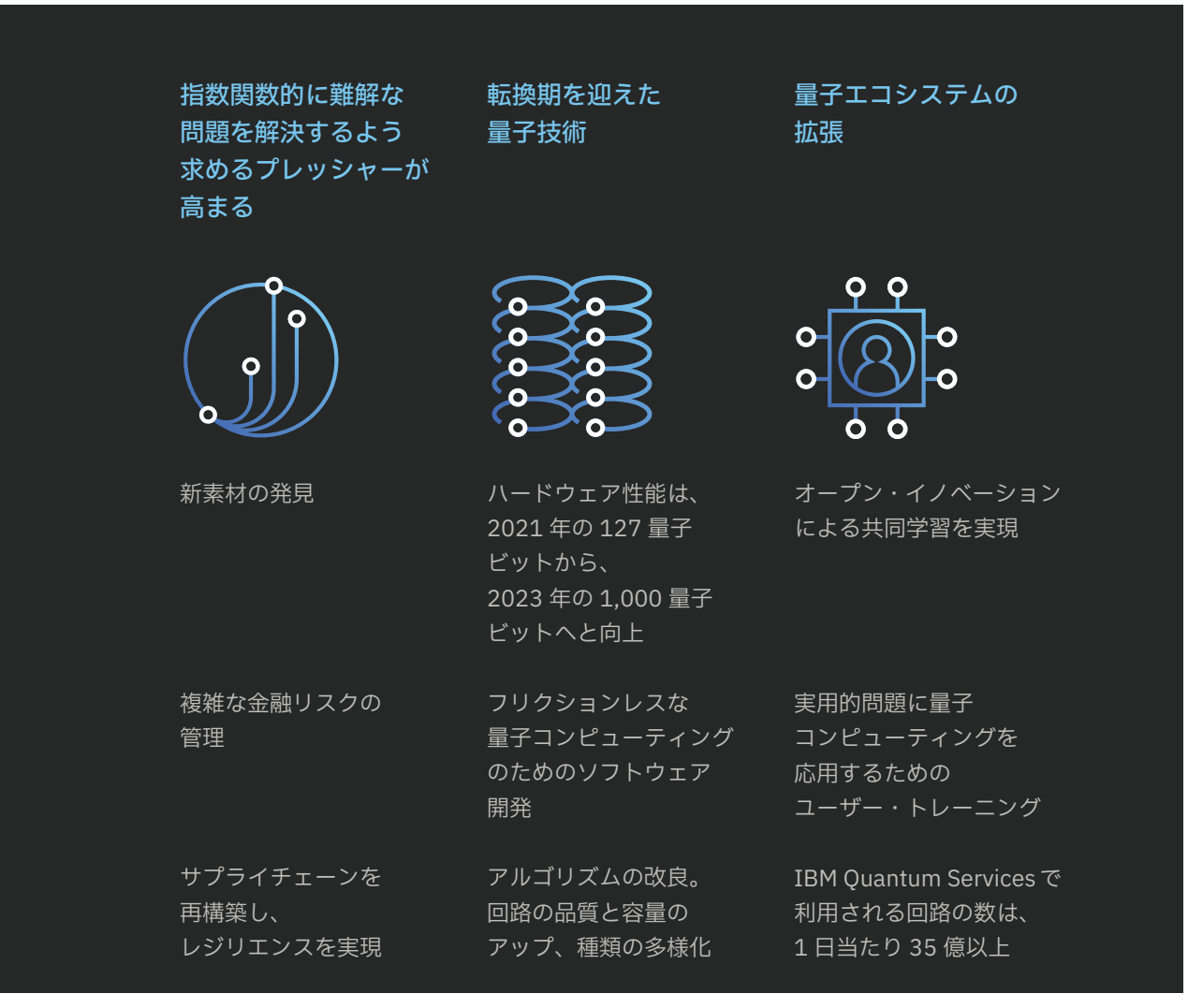


図 3

「Quantum Decade」の特徴
進化を促す 3 つの要因

「生活をさらに向上させるためには、
量子コンピューティングが必要だ。
次世代の人たちが量子コンピューティングの
恩恵を受けられるようにしなければならない」

Ching-Ray Chang
Distinguished Professor
Department of Physics
National Taiwan University

地球規模の問題を解決するために必要な情報はすでに存在しているが、それを具体的な形で利用するためのコンピューティングの能力は不十分だ。その理由を理解するためには、背景を少し学ぶ必要がある。古典コンピューターは、長い間、分析の時代を支えてきた。既存のシステムで大量のデータを処理する場合は、1 か 0 のバイナリー形式で保存された個々のビットを使用する。一方、量子コンピューターは、より多くの次元で情報を表現できる「量子ビット」を用いて、根本的に異なる方法で作動する（15 ページの「視点：量子コンピューターに関する衝撃的な事実」を参照）。量子コンピューターを使えば、量子力学の特性を利用して、膨大な数の選択肢を評価し、これまでの技術では解決が難しかった課題に対応できるようになるのだ。

量子の転換点

量子コンピューターは、決して新しいものではない。1980 年代初頭に、ポール・ベニオフやリチャード・ファインマンらによって初めて提唱されて以来、さまざまな理論化や実験の対象となってきた。[7] 1990 年代には予備的な数学とアルゴリズムの研究が行われ、2000 年代には、量子ビットを物理的に表現することに焦点が当てられた。そして 2010 年代には、マルチ量子ビットシステムの実現が可能であることが実証され、クラウド上でアクセスできるようになった（図 4 参照）。

図 4

量子の跳躍
量子コンピューティングに関わる
重要な発見や出来事

1970 年 | 量子情報理論の誕生

ポール・ベニオフによる | **1980 年**
コンピューターの量子力学モデル

1984 年 | 量子暗号（IBM）

ショアの因数分解アルゴリズム | **1994 年**

1995 年 | 量子誤り訂正

実験的な 15 の因数分解（IBM）| **2001 年**

2007 年 | 超伝導トランズモン量子ビット

IBM が IBM Cloud 上で、| **2016 年**
量子コンピューティングの
提供を開始

2017 年 | 量子実証実験、O(10) 量子ビット
ハードウェア効率の良い量子回路を
用いた量子アプリケーション（IBM）
量子誤り軽減技術の開発（IBM）
ショートデプス・サーキットによる
量子優位性の証明（IBM）

エンコードされた量子ビットの | **2021 年**
汎用ゲートの誤り軽減
量子カーネルを用いた証明可能な
指数関数的高速化

2022 年 | ノイズの多い量子プロセッサーに
おける確率的エラー・キャンセル

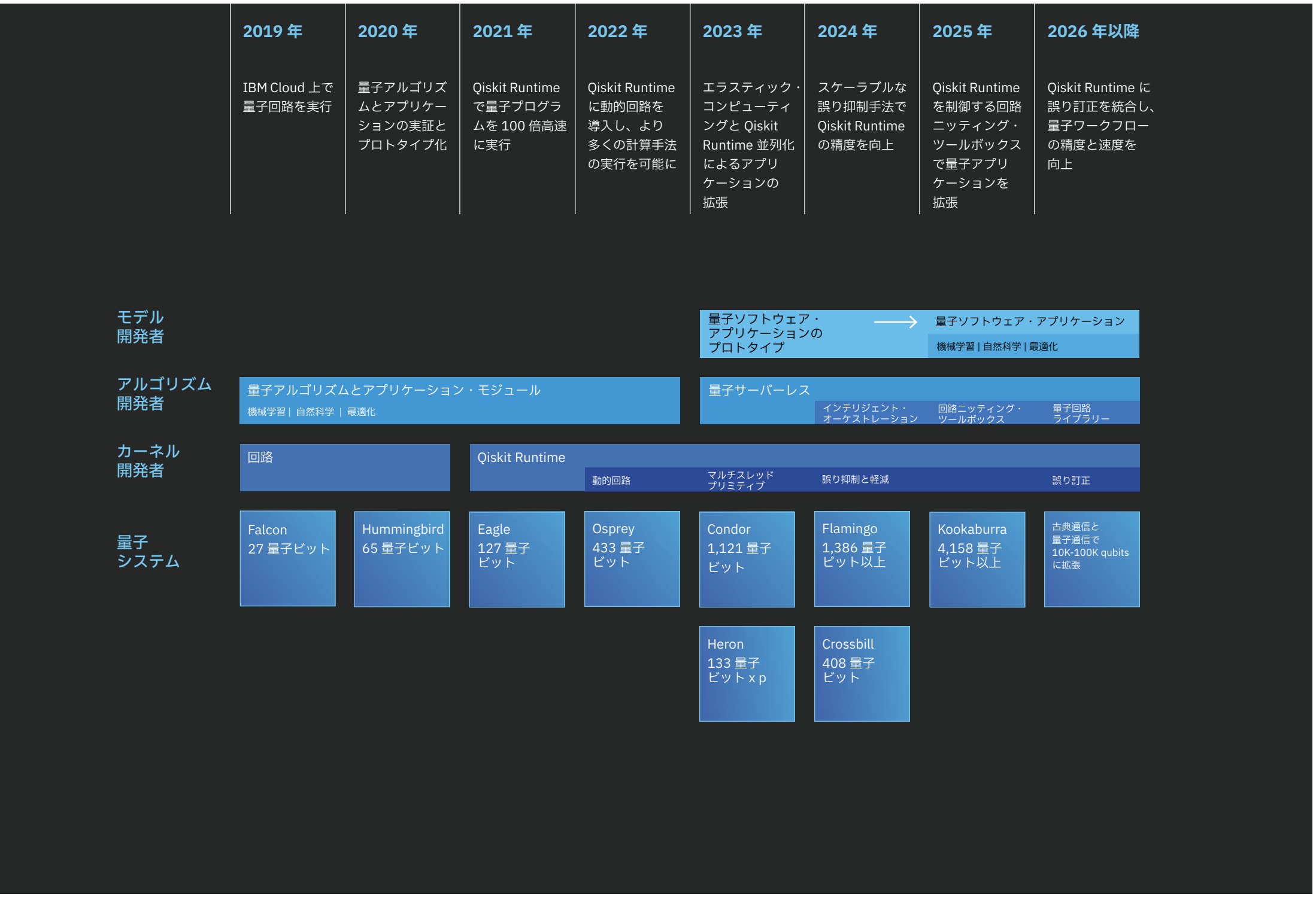


図 5

IBM 量子コンピューティングのロードマップ
最近の進展と将来展望

では今、何が起きているのだろうか。量子コンピューティングの進歩はすでに、転換点を迎えている。2020 年の時点で、量子コンピューティングの最先端は、65 量子ビットを搭載した IBM のシステムだった。21 年には 127 量子ビットへと倍増し、22 年にはその 3 倍の 400 量子ビット以上、23 年にはさらにその倍以上の 1,000 量子ビット超になると予想されている。

しかし、量子コンピューターがそのポテンシャルを最大限発揮するためには、何十万、何百万という高品質の量子ビットが必要になる可能性がある。また、量子ビット数は標石として使われることが多いが、実際には全体の一要素に過ぎず、性能のすべてを物語るわけではない。例えば、量子分野の科学者やエンジニアは、異なる種類のプロセッサーを連結して拡張可能なモジュール・システムを構築する手法を開発中で、これによって今日の限界を超えられるかもしれない。

古典的な並列化技術と量子並列化技術、そしてマルチチップ量子プロセッサーを組み合わせれば、モジュール化されたハードウェアとそれに付随する制御電子機器や極低温インフラを利用しながら、量子コンピューティングの規模を拡大することができる。ソフトウェアとハードウェアの両面でモジュール化をどれほど推し進められるかが、今後 10 年で競合他社に先駆けてスケーラビリティー（拡張性）を実現できるかどうかの鍵となるだろう。[8]

その意味で、IBM の量子コンピューティングの実現に向けたロードマップは、量子中心型のスーパーコンピューターの時代を先取りし、フリクションレス（スムーズ）に量子コンピューティングに移行する道筋を示すことになるはずだ（図 5 参照）。量子中心型のスーパーコンピューターは、量子プロセッサーや古典プロセッサー、量子通信ネットワーク、および古典ネットワークをインテリジェントな量子ソフトウェア・オーケストレーション・プラットフォームの中で連携させながら、コンピューティングの在り方を根本から変革していく。

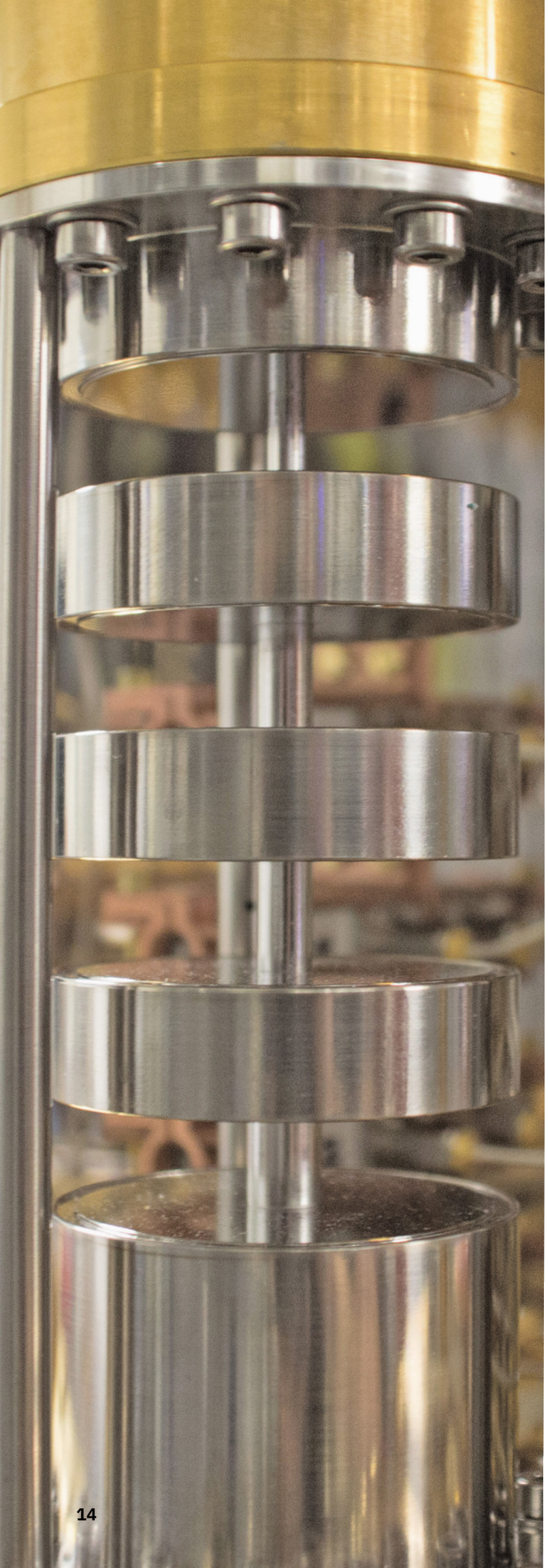
視点
量子コンピューティングで対応すべき 3 種類の問題

短期および中期的には、
量子コンピューティングは以下の 3 つの分野における
問題を解決するのに適していると考えられる。

シミュレーション
自然界のプロセスや物理系システムを
モデル化すること。

探索とグラフ化
多くの解が存在する状況の中、
最善または「最適」な解を探すこと。

代数に関する問題
機械学習への応用など。



「ムーアの法則が終焉を迎え、
古典コンピューティングが限界に達しつつある一方で、
私たちのコンピューティングに対する需要は、
急速に高まり始めている」

Richard Debney
Vice President, Digital Technology
BP

量子中心型のスーパーコンピューターは、世界の難問を解決するために必要不可欠な技術となり得る。世界中のさまざまな業界向けに最新の強力な計算空間を大規模に提供するほか、真にフォールト・トレラント（誤り耐性）* の観点から有用なアプリケーションを大方の予想よりも早期に実現できるだろう。

スケール拡張性以外の特性も求められている。2019 年、IBM は、量子コンピューターの性能を測定する目的で、量子ボリューム（QV）という指標を開発した。QV は、ゲート・エラーや測定エラー、クロストーク、デバイスの接続性、コンパイラーの効率など、高度な技術的問題に対応する。QV を利用し、計算品質の進捗状況を報告するベンダーも出始めている。

IBM は、毎年 QV を倍増させることに成功している。具体的には、IBM は 2020 年中に、QV の倍増に 3 回も成功した。この結果はムーアの法則を超越している。一方、古典コンピューティングの世界では、ムーアの法則の勢いは衰えつつある（16 ページの「視点：古典コンピューティング―ムーアの法則の問題点」を参照）。

量子コンピューティングが進化し、実用的な問題に取り組めるようになると、単位時間内にどれほどの計算処理を行えるかという点に焦点が移る。例えば、量子プロセッサーを特定タスク用のアクセラレーターとして呼び出すプログラムや、量子プロセッサーを複数回呼び出すアルゴリズムなど、量子と古典の相互インタラクションを伴うワークロードが想定される。このため、量子と古典の相互間通信を効率化できるランタイム・システム（runtime system）を用意することが、高い処理能力を実現するために不可欠となる。

このランタイムによる相互間通信は、IBM が 2021 年 11 月に提案した CLOPS（Circuit Layer Operations Per Second）のベンチマーク（性能比較）に組み込まれている。[9] CLOPS は、量子プロセッサーの回路実行速度に関連する指標であり、量子システム全体の性能を評価する指標である量子ボリューム（QV）の測定で使われるのと同様のパラメーター化されたモデル回路を複層的に実行する速度を測る。

量子ハードウェアを生産的に活用していくには、さまざまな回路に対応できることが重要であり、例えば、動的回路など、より複雑な回路を実装できるようにすることだ。これによって、量子誤り訂正に必要な基本的能力として必要な、より効率的な量子回路の構築が可能になる。量子誤り訂正では、複数の物理的な量子ビットを用いて、1 つの論理的な量子ビットに情報を符号化することにより、量子情報を保護することができる。量子コンピューターは、さまざまな問題を効果的に解決するために、多様な回路を実行できなければならない（17 ページのお客様事例「Woodside Energy 社」を参照）。

* フォールト・トレラント（誤り耐性）は、量子計算を行う個々の量子ビットに発生するノイズがあっても、正確な量子計算の結果を得られるような仕組みの実現

視点
量子コンピューターに関する衝撃的な事実

（知らなくても
よいかもしれないが）

控えめに言っても、量子コンピューティングについては直感的に理解できないことばかりだ。量子コンピューターについて、戦略を立てたり、ユースケースを評価したりするためには、それが持つ力と可能性を理解する必要があるが、あなたが量子物理学者や専門家である必要はない。その辺のことは、パートナーやエコシステムに任せればよいからだ。それでも、以下のような事実について、考えてみるのも面白いだろう。

ファクト 1：量子コンピューティングは、量子力学の「確定した状態にある物理システムは、ランダムに振る舞うことができる」という基本原理を利用している。このシステムは、2 つ以上の状態の線形結合である「重ね合わせ」という状態に依拠するものだ。

ファクト 2：古典コンピューティングにおけるビットは、0 か 1 のどちらかであるが、量子コンピューティングの量子ビットは、無数の状態を同時に備え、0 と 1 の両方を重ね合わせることができる。コインに例えてみると、コインをはじくと、表か裏かの二者択一だが、コインを回転させると、その次元の可能性は指数関数的に増大する。

ファクト 3：それと同じように、二値論理では、物事は「ある」か「ない」かの状態になる。しかし量子コンピューターにはこの制約がないため、より正確に現実を反映することができる。

ファクト 4：重ね合わせは本来、量子に限った現象ではない。例えば、複数の音が同時に鳴っているとき、周囲の空気は重ね合わせの状態になっている。量子力学に特有なのは、ある状況において量子の重ね合わせを測定すると、システムがたとえ確定した状態にあっても、ランダムな結果が得られることだ。

ファクト 5：古典ビットでは、同じものを何度測定しても、変化することはない。ビットが 0 の場合は測定結果も 0 であり、1 の場合も同様だ。しかし量子ビットでは、量子的な重ね合わせの状態にあるものを測定すると、0 または 1 を反映した古典ビットに変化する。

ファクト 6：離れた場所にある 2 つの量子ビットは、個々にはランダムな振る舞いをしながらも、不可解なほどの相関関係を示すことがある。この量子システムの特性のことを「量子もつれ」と呼ぶ。量子もつれの状態にある 2 つの量子ビットは、個別に測定すると、ランダムな結果を生む。しかしシステム全体を見ると、片方の状態はもう一方の状態に依存する。結合したシステムには、個々がバラバラの場合よりも、多くの情報が含まれている。難しい話になってきたかもしれないが、アインシュタインはこれを「不気味な遠隔作用」と呼んだ。[10]

ファクト 7：量子コンピューターは、干渉を利用して、誤った解への経路を打ち消し、同時に正しい解を含む経路を強化する。

ファクト 8：ノイズは、量子ビットの量子力学的性質を阻害する。そのため量子コンピューターは、ノイズの発生源から、隔離しなくてはならない。量子ビットを作るには、さまざまな方法がある。代表的なものとして、超伝導を利用し、量子力学的特性を自由に制御できるデバイスを開発する方法がある。しかし量子ビットを機能させるためには、宇宙の真空空間よりも冷たい、10 ～ 20mK の極低温の「スーパーフリッジ（超冷凍機）」に保管しなくてはならない。[11]

視点
古典コンピューティング

ムーアの法則の問題点

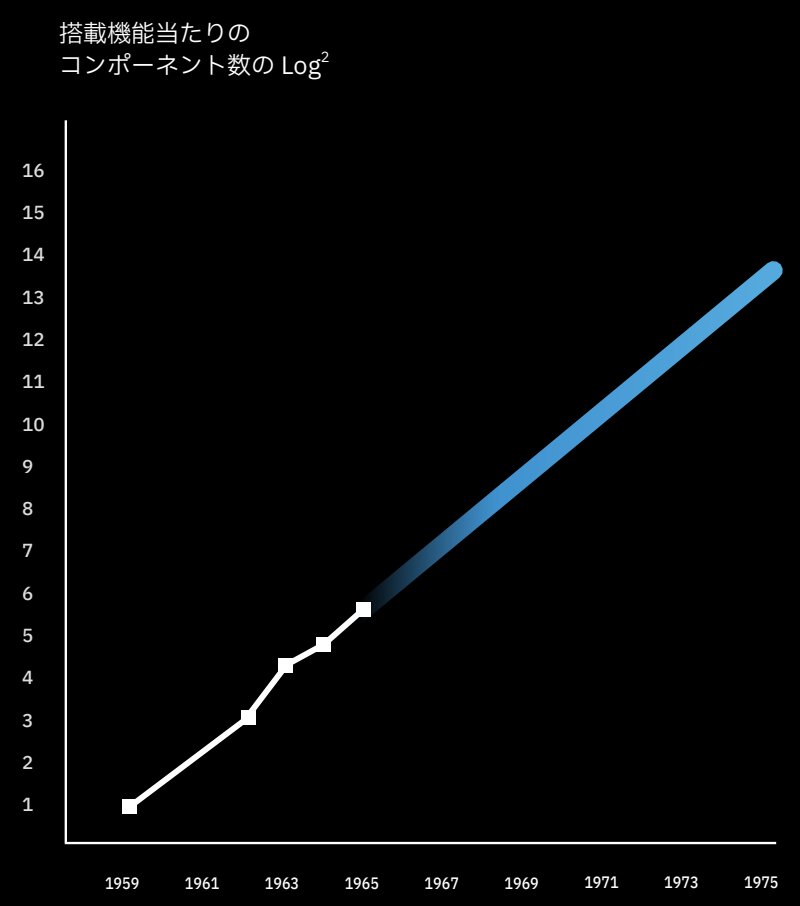
1965 年、ゴードン・ムーアは、シリコン製のコンピューター・チップの一定面積に搭載されるトランジスターの数が、年々倍増していることに気が付いた。ムーアは、この密度の倍増が、将来にわたって続くと予測した。その後、倍増にかかる期間は、18 ～ 24 カ月に修正されている。[12]

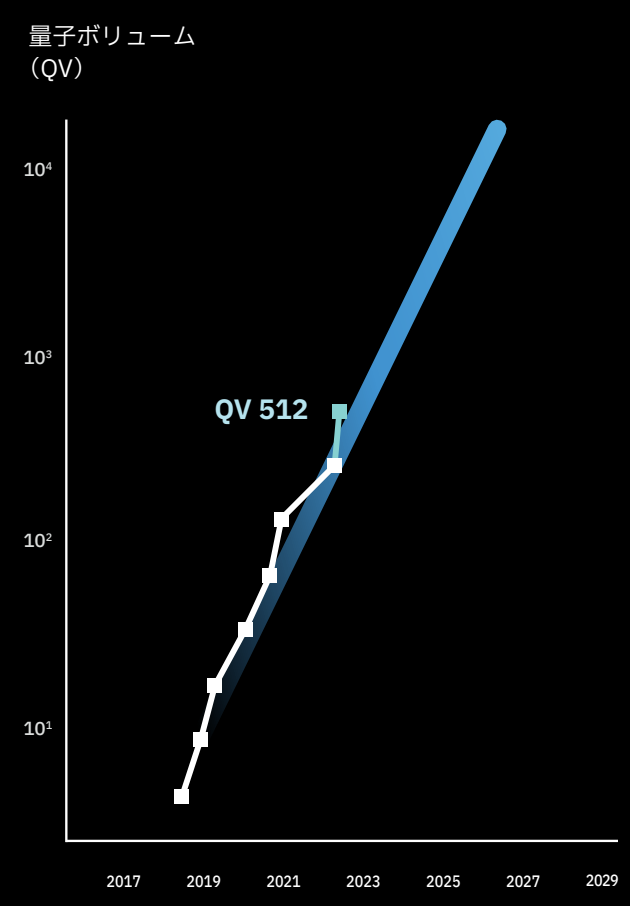
このムーアの法則がこれほど長い間成立し続けたのは、チップの設計者や技術者が、チップに搭載されている機能のサイズを、小型化し続けてきたからだ。最先端の研究所では現在、わずか 5nm（1nm は 1m の 10 億分の 1）のチップを使った実験が行われている。これらの機能は非常に小さく、原子単位で測定しなければならないものもある。

しかし今、物理的な限界がムーアの法則の前に、壁となって立ちはだかるようになった。チップ業界のリーダーたちは、ムーアの法則のペースを今後も持続するためには、膨大な費用と労力が必要だと指摘する。ある試算は、ムーアの法則をこのまま維持するためには、1971 年と比較して、18 倍の研究努力が必要になるだろうと予測する。また最新のチップを製造するために必要な施設は、2022 年までに 160 億ドル必要になると言われている。[13]

以上のことから分かるのは、古典コンピューティングの進化の速度が減速するほど、量子コンピューティングを古典的システムと統合することの重要性が高まるという事実である。

倍々ゲーム
量子ボリュームを
毎年倍増へ





Woodside Energy 社
古典的な機械学習のワークフローに、量子カーネルを導入[14]

古典的な機械学習では、分類や回帰の問題を解決するためのアルゴリズムに、カーネル（2 つのデータ間の類似度を示す指標）を使用する場合がある。通常、カーネルはデータの次元を増やして分離するために使われ、それによってアルゴリズムの精度は高まる。最近、IBM の研究者たちは、古典的なデータへアクセスするだけで、あらゆる古典的な二項分類器よりも優れた超多項式の優位性を発揮する量子カーネルの存在を証明した。

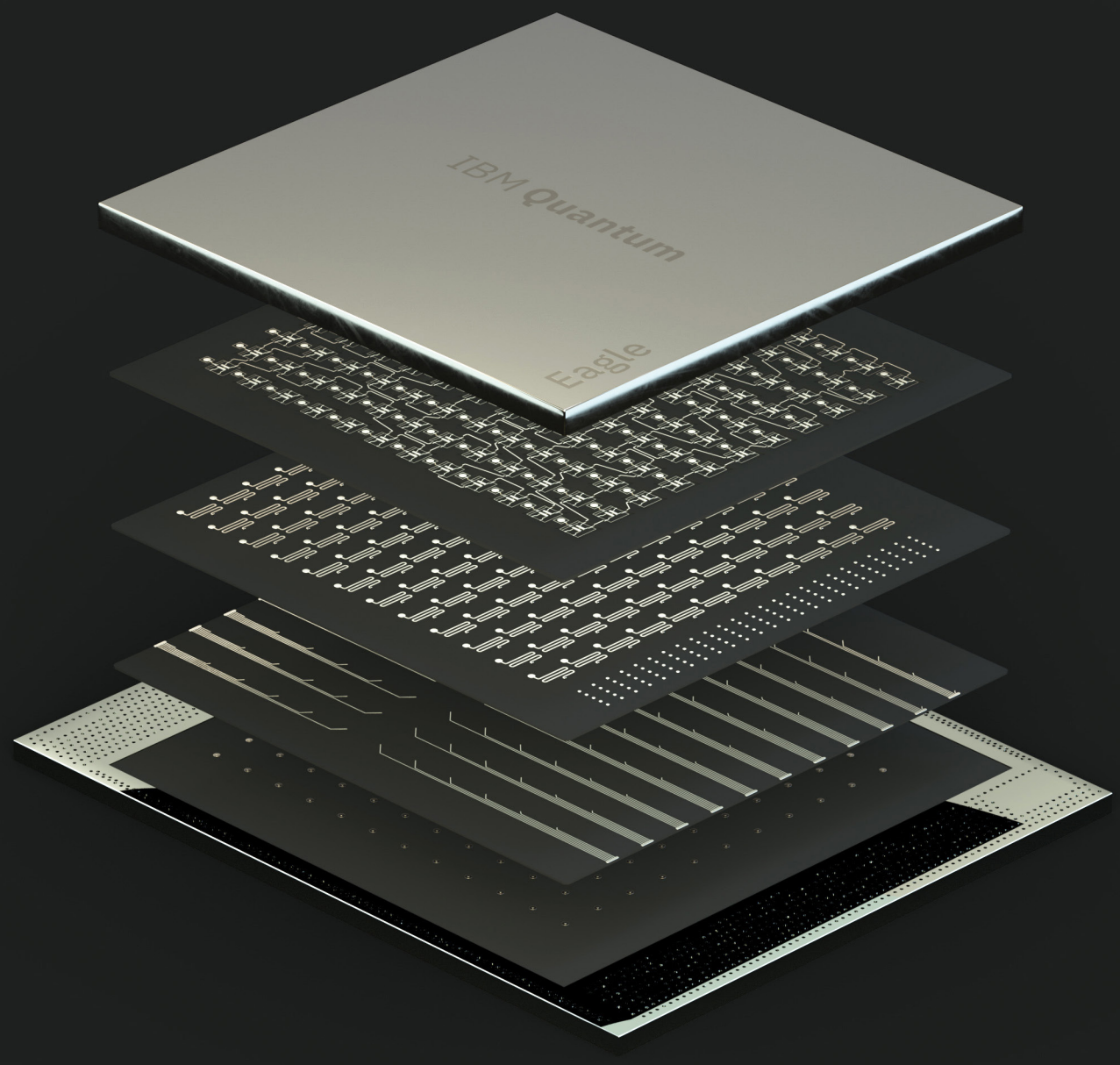
IBM の量子研究者は、オーストラリアの天然ガス生産大手 Woodside Energy 社の研究者とコラボレーションする機会を得た。果たして、この業界の古典的な機械学習のワークフローに、量子カーネルを導入することは可能だろうか。

量子コンピューティングの探求の一環として、両社のチームは、量子回路を用いてカーネルを定義する方法と、その評価に必要な量子コンピューティング・リソースの量を減らす方法を探りたいと考えた。そのためには、量子回路とカーネルの特性を結び付け、カーネルがどれだけうまく機能するかを評価する必要があった。

古典的な機械学習のワークフローで量子カーネルを使用する一般的な方法においては、すべてのカーネル値を計算するたびに、量子プロセッサーへのクエリーを実行する必要がある。このようにすべての値を評価するのではなく、量子コンピューターへの呼び出し回数を減らし、実用的なものにするために、研究チームは量子カーネルと古典的な行列補完のアルゴリズムを組み合わせる研究を開始した。この研究が成就すれば、「量子コンピューターで計算したカーネル値を集め、その情報と古典的アルゴリズムを使用すれば、未計算の値を正確に予測することができるだろうか」という疑問に答えることができる。

このアプローチを検討することで、次のような本質的な疑問が生まれた。最先端の補完技術を活用すれば、必要なクエリーの数を減らし、量子カーネルをより早く実用化できるのだろうか。量子カーネルは、業界データ・セットの分類精度を向上させるなど、Woodside Energy 社に有益なメリットをもたらすだろうか。量子回路の特性と、量子カーネルの測定のしやすさとの関係は予測できるだろうか。

Woodside Energy 社はこの研究を、今後の実験の基礎を確立するための「道筋を見極める事業（パスファインダー・プロジェクト）」と考えている。同社はこの考えに沿って、アプリケーションの構成要素として使われている他の量子回路ファミリーに関する文献を継続的に調査している。今後、追加のデータが得られれば、量子カーネルの扱いやすさや、どこで使うのが最も効果的かについての予測を、さらに精緻化することができるだろう。ユースケースとしては、このテクノロジーを坑井のログ・データの貯留層物性解析に応用することなどが考えられる。


IBM Quantum
Eagle

「量子コンピューティングは、
単に古典コンピューティングの延長線上にあるものではない。
問題をそのまま量子コンピューターに移植するだけではうまくいかない。
問題を分解して、このテクノロジーを適切な問題に、
効果的に適用できるコミュニティーの育成が必要である」

Richard Debney
Vice President, Digital Technology
BP

しかし量子コンピューティングのスピードとパワーだけでは、「Quantum Decade」は成り立たない。量子ビット数が指数関数的に増えることは素晴らしいことだが、その計算能力が現実の問題に適用できなければ、ただの抽象理論の話で終わってしまう。

幸い今では、量子の力は身近な存在だ。昔は、コンピューティング能力が欲しければ、自分でマシンを作り、インストールして、メンテナンスしなくてはならなかった。しかし現在では、高度に洗練された量子コンピューターへ、クラウドからアクセスできる。

実際に、プログラマーはノートパソコンから、量子ゲートを用いて量子回路を作ることができる。ソフトウェアがその回路をクラウド経由で量子コンピューターに送ると、量子ゲートはマイクロ波パルスに変換される。そのパルスが物理的な量子ビットを制御すると、魔法のようなことが起こる。そして、結果が古典ビットに変換されて、プログラマーに返されるのだ。[15] このフリクションレスなインターフェースこそが、今日の開発者コミュニティーに、量子コンピューティングの力を解き放つものなのである。

オープン・エコシステムの拡大

10 年前、量子コンピューティングの専門家といえば、研究室にこもる博士号を持つ物理学者だった。この人々は、今でもひっぱりだこの貴重な人材だ。しかし博士や物理学者ではない開発者のコミュニティーが、最近では現れ始めている。このようなコミュニティーには、化学者、電気技師、数学者などが参加している。彼らは、量子の概念を学び、古典コンピューティングの環境においてもそれを応用しようと努めている。

オープン・イノベーションを促すエコシステムが誕生してから、量子コンピューティング技術を実際の問題に適用するため、ソフトウェア開発者は研さんを重ねている。IBM は、そのようなオープンソース・コミュニティーの 1 つとして Qiskit を立ち上げ、量子開発者が求めるコード開発ツールやライブラリーを提供している。このコミュニティーでは、量子について学ぶ何千人もの学生のスキルアップも支援している。IBM Quantum Services では、実際の量子コンピューターを使って、1 日に 20 億個以上の量子回路が実行されている。[16]

分析から発見へ

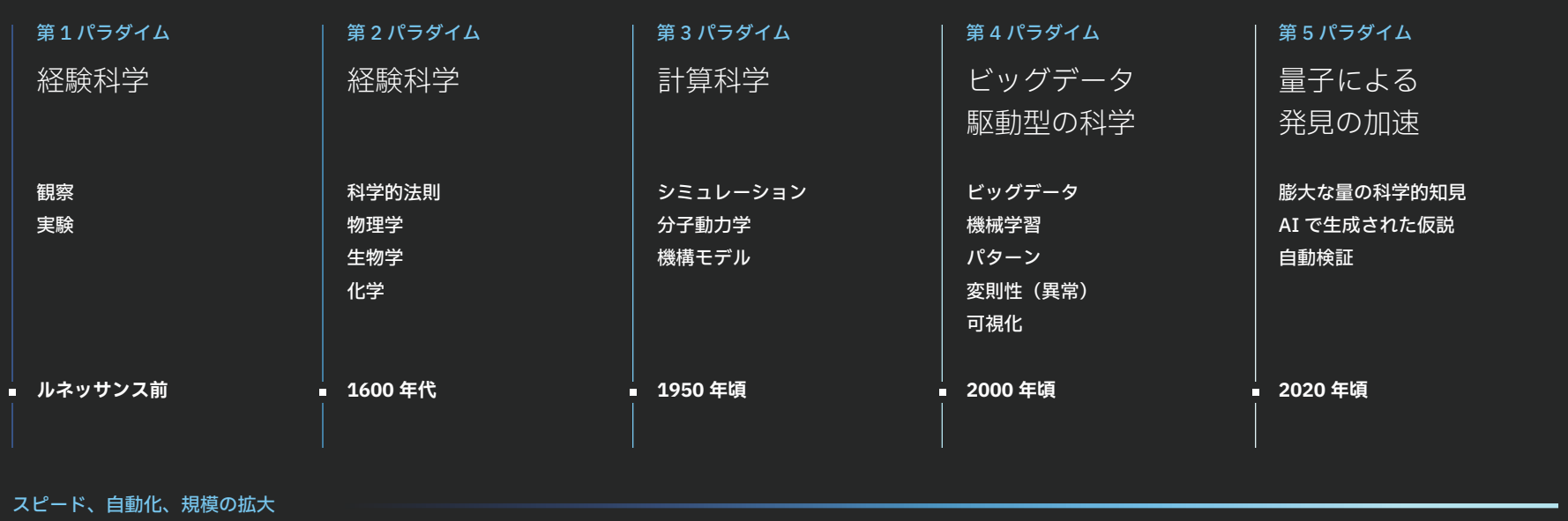
量子コンピューターの進歩は目覚ましいが、その実用化に、どのような意義があるのだろうか。また大規模で複雑な問題を処理するコンピューターの能力に、どのような影響を及ぼすのだろうか。

初期の科学は、経験と理論に基づいていた。物体の動きなどの現象を観察して計測し、それがなぜ起こるのかについて、仮説や予測を立て、繰り返し検証した。しかしコンピューター、最終的には AI やスーパーコンピューターがそれを変えた。分析の時代の到来だ。膨大な量のデータを取り込むことで、システムがどのように振る舞うかのモデルを構築できるようになった。また、化学システムをモデル化し、個々の原子を動かし、ある材料が何百万回も使用された後に、その性能がどう変化し反応するのか、シミュレートできるようになった。

しかし、まだ私たちの手が届かない課題もある。化学システムをモデル化することはできたとしても、古典的なモデルでは、すでにデータが存在する問題にしか対処できない。これらのモデルは、分子がどのように振る舞うかという物理学に基づいていないため、不正確なものとなる。今のところ、これらの欠点を解決するツールセットは存在しない。古典コンピューティングは強力だが、指数関数的な問題に対応するには、根本的な限界が存在するのである（図 6 参照）。

図 6

進歩の歴史
量子による発見の加速への道のり



IBM と Cleveland Clinic 医療の重要課題に、量子の力で対処[17]

IBM と、臨床と入院治療を研究と教育に統合している非営利の大学病院である Cleveland Clinic は、「Discovery Accelerator」を立ち上げるため、10 年間のパートナーシップを計画していることを発表した。両組織は、ハイブリッドクラウド、AI、および量子コンピューティング技術を用いた高性能コンピューティングにより、医療とライフサイエンス分野における、新たな発見を目指している。

研究者が Discovery Accelerator に期待するのは、高度な計算技術でデータを生成･分析することにより、新設の Global Center for Pathogen Research & Human Health における研究をより深化させることだ。研究対象となる分野は、ゲノミクス、シングルセル・トランスクリプトミクス、ポピュレーション・ヘルス（データを用いた健康管理）、臨床応用、化学、創薬などが見込まれている。

特筆されるのは、オンプレミス型の民間セクター向け IBM Quantum System One を、Cleveland Clinic のキャンパスに設置することだ。これは米国初の試みである。この量子プログラムには、大学、政府、業界、スタートアップ企業、その他の組織も参加する予定だ。その目的は Cleveland Clinic のグローバルな活動を活用し、今後のライフサイエンス分野における、新しい量子エコシステムの基盤としての役割を果たすことであり、量子スキルを向上し、センターのミッションを遂行することに専心する予定だ。

Cleveland Clinic は、オンプレミス型の IBM Quantum System One に加えて、IBM が現在保有する 20 台以上の量子システムに、クラウド経由でアクセスすることができる。IBM は、自社初となる 1,000 量子ビット超の次世代量子システムを 2023 年にリリースすることを目標としており、Cleveland Clinic は、初の民間セクター向けオンプレミス型システムの設置場所となる予定である。

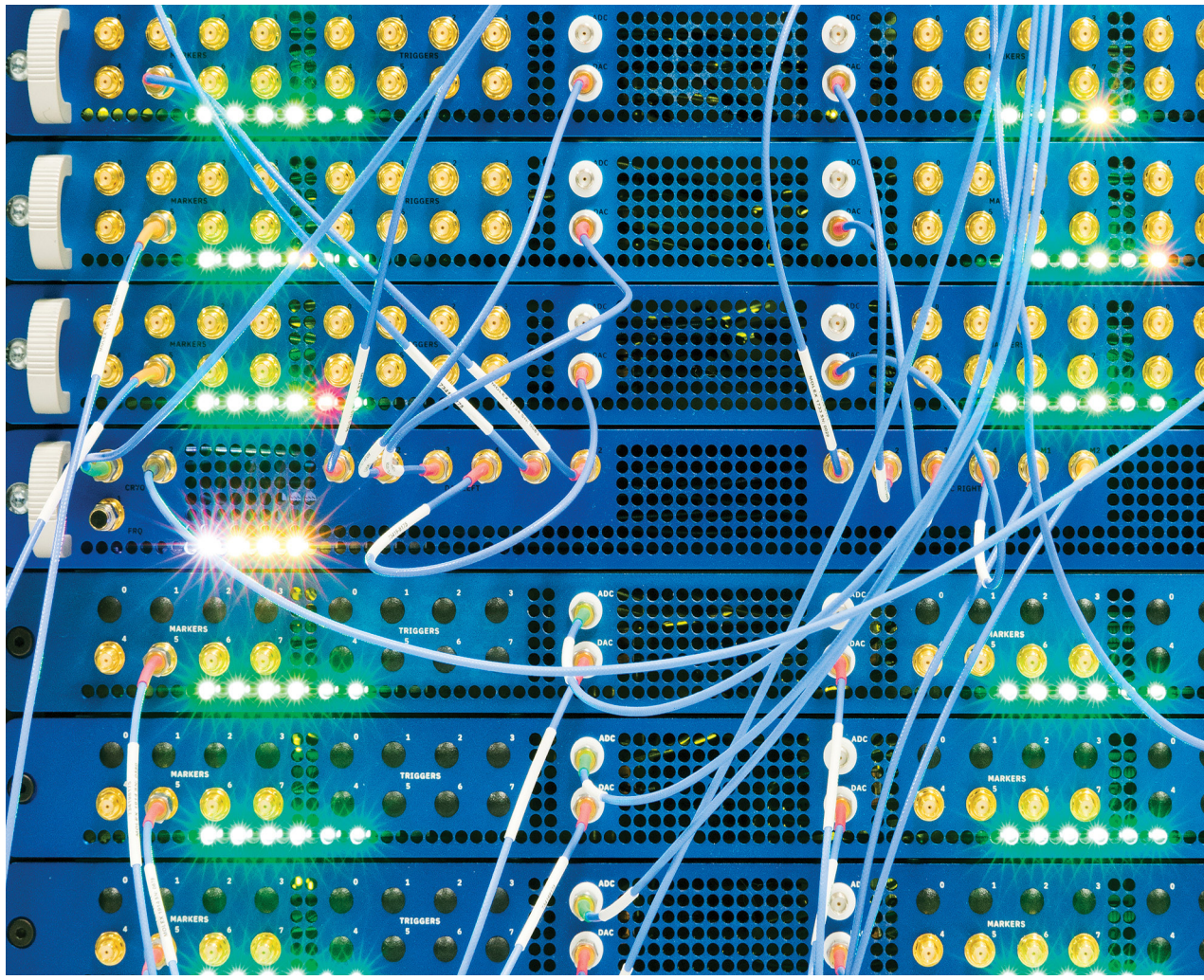
「量子コンピューティングを応用して、
今まで想像もできなかったことを１つでも発見し、
それによって私たちの研究を未来に向かって推し進めることができれば、
『Quantum Decade』は現実のものとなるだろう」

Todd Hughes
Technical Director, Strategic Projects and Initiatives
CACI

そこで登場するのが、古典コンピューターおよび AI と、量子コンピューティングとの組み合わせである。この三位一体により、発見のスピードが飛躍的に向上することが期待されている。例えば、遺伝子の DNA 鎖の１つと相補的な関係にある一本鎖の RNA 分子である「mRNA」の研究がもたらした、驚くべき成果を考えてほしい。[18] この研究により、新型コロナウイルス感染症ワクチンの開発は、急速に進展した。ウイルス遺伝子の解読からワクチンの作成まではわずか数週間で完了し、数カ月にわたる臨床試験を経て、１年後には広く販売されるまでになった。[19] ただし、これが可能だったのは、すでに 10 年分の mRNA 研究による知見がベースにあったためだ。

量子コンピューティングを使えば、このような発見のプロセス自体をさらに圧縮できるかもしれない。特に白紙の状態からスタートする場合は、量子コンピューティングは、ワクチンの開発と効果検証を大幅に加速し、未来のパンデミックがもたらすダメージを低減するだろう。

医療分野における現在のベスト・プラクティスの多くは、近似的なものにとどまっている。大規模なデータ・プールから情報を外挿し、それを各個人に適用するという手法だ。現在はまだ、トライ・アンド・エラーの手法がほとんどであり、これらは確かに洗練されてはきたが、必ずしも個々人の特性に合わせた治療法ではない。しかし量子コンピューティングの登場により、これまでの常識が覆される可能性があり、個人のゲノムに合わせる個別化医療が、現実のものとなる可能性がある（お客様事例「IBM と Cleveland Clinic」を参照）。



「材料発見のプロセスは、耐え難いほどの時間を必要とする。
企業には延々と実験を続ける暇はない。量子コンピューティングは、
このプロセスを飛躍的に容易なものにするだろう」

Doug Kushnerick
formerly with Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research

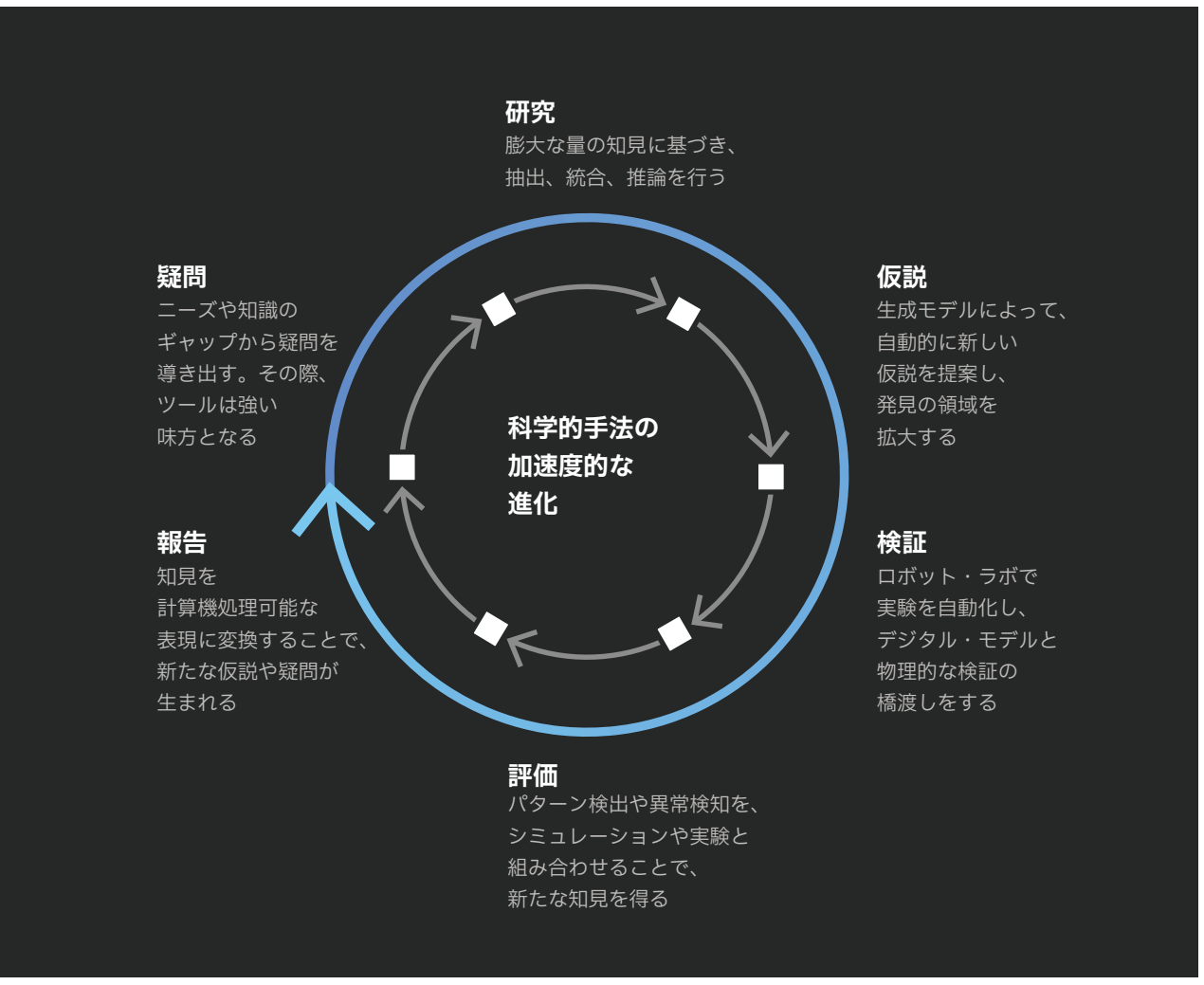


図 7
大規模化する科学的手法
疑問から仮説、報告まで

この夢は、実験のやり方を大幅に強化すれば実現できる。皆さんも子どもの頃、科学的手法の基本を学んだことがあるだろう。それは、観察から疑問、仮説、実験、結果、結論という一連の流れを経たものだ。私たちは、古典コンピューティングを用いて、このプロセスを高速化してきた。この古典コンピューティングに、AI、量子コンピューティングを加えた三位一体は、科学的手法をさらに飛躍的に強化することができる（図 7 参照）。

今まで存在しなかった、複雑なシステムをモデル化するという機能は、抽出、統合、検証を加速化させて、結論まで導き出す。私たちはすでに、AI を使って自動的に仮説を生成し、ロボット・ラボを使って物理的な実験を自動化している。さらに量子コンピューティングの能力が加われば、より多くの選択肢を物理的な実験に移る前に評価できるようになり、発見のプロセス全体が短縮されるだろう。IBM Research が発表した『2021 Science and Technology Outlook』では以下のように表現している。「科学的手法のループが、初めてひとつなぎになりつつある。ブレイクスルーを積み重ねて、自走的で連続的な終わりのないプロセスとしての発見という夢の実現に一歩ずつ近づいていくのだ。」[20]

発見の速度を加速させ、知識をいち早く実践に変換していくことで、さまざまな飛躍が可能になる。医療はその応用分野の 1 つに過ぎない。量子コンピューティングを使って、新素材を発見することは、もう 1 つのシナリオだ。これにより、ソーラー・パネルや風力発電機の効率を高める、あるいはバッテリーの寿命を延ばせる可能性がある。73 ページの「業界別ガイド」でも解説するが、それぞれの業界への応用方法は無数にある。

発見駆動型の企業

組織に注目すれば、「Quantum Decade」から生まれてくるのは、新しいタイプの発見駆動型の企業だ（図 8 参照）。クラウドが企業の仮想化を進めたように、量子は企業に新たな可能性をもたらすだろう。

インテリジェントで AI 駆動型のワークフローは、市場創出型のビジネス・プラットフォームを生み出した。コンピューティングの三位一体は、そのプラットフォームの管理・運営に革命をもたらすだろう。AI はすでに、人々の働き方を分析し、最も効率的あるいは効果的なワークフローを策定できるようになった。タスク群は、さらに、従来型システムと量子システム（1 台ないし複数台の量子コンピューターであり、古典的コンピューティング・システムと協調している）のいずれか最適な方に振り分けられていく。情報技術者がいったんワークフローを確立すれば、ユーザーはどこでどのような計算が行われているかを知る必要はない。量子コンピューターに関する専門的な知識も不要なのである。

10 年前に、AI の可能性を高く評価し、しっかりと準備を進めてきた人たちは、今優れたパフォーマンスを上げている。[21]「Quantum Decade」を迎えた現在、発見のペースは加速している。すべての企業は、この状況を注視すべきだ。

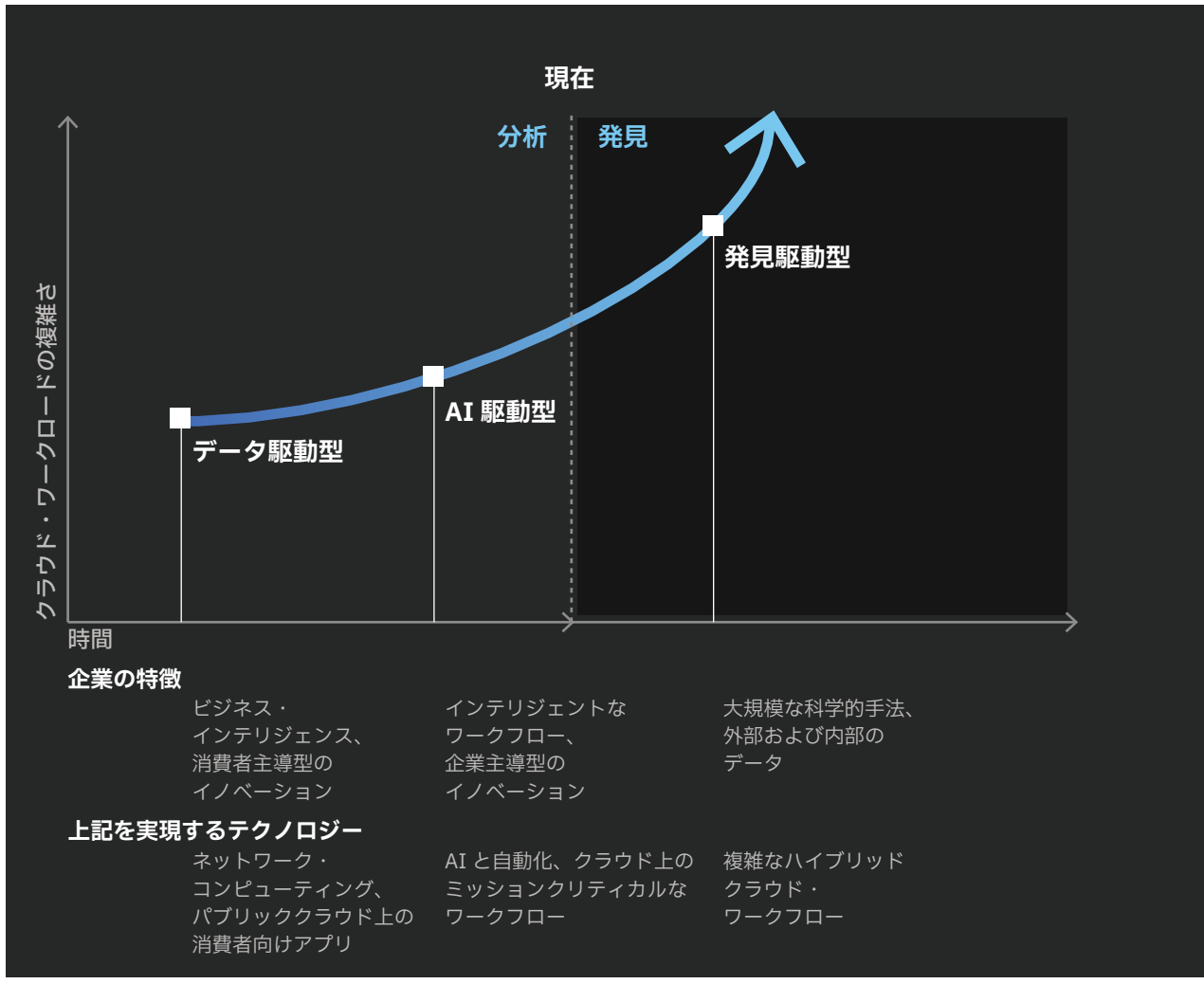
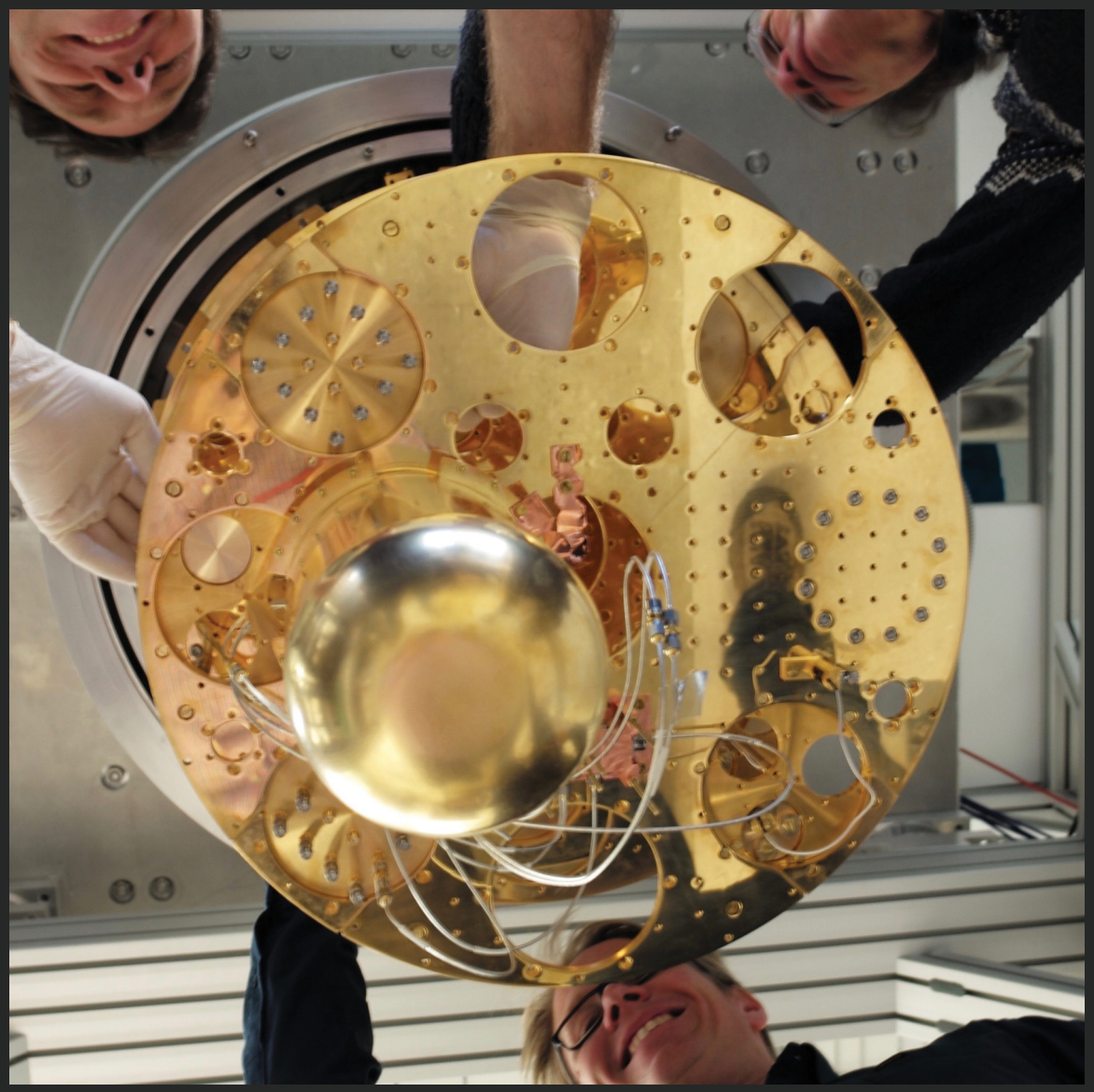


図 8

ニューノーマル
発見駆動型企業の出現



下から見上げた、
IBM Quantum cryostat

以下の質問の答えを用意しよう

質問 1

あなたの企業、経営層、取締役会が定義する量子コンピューターとは、どのようなものだろうか？

質問 2

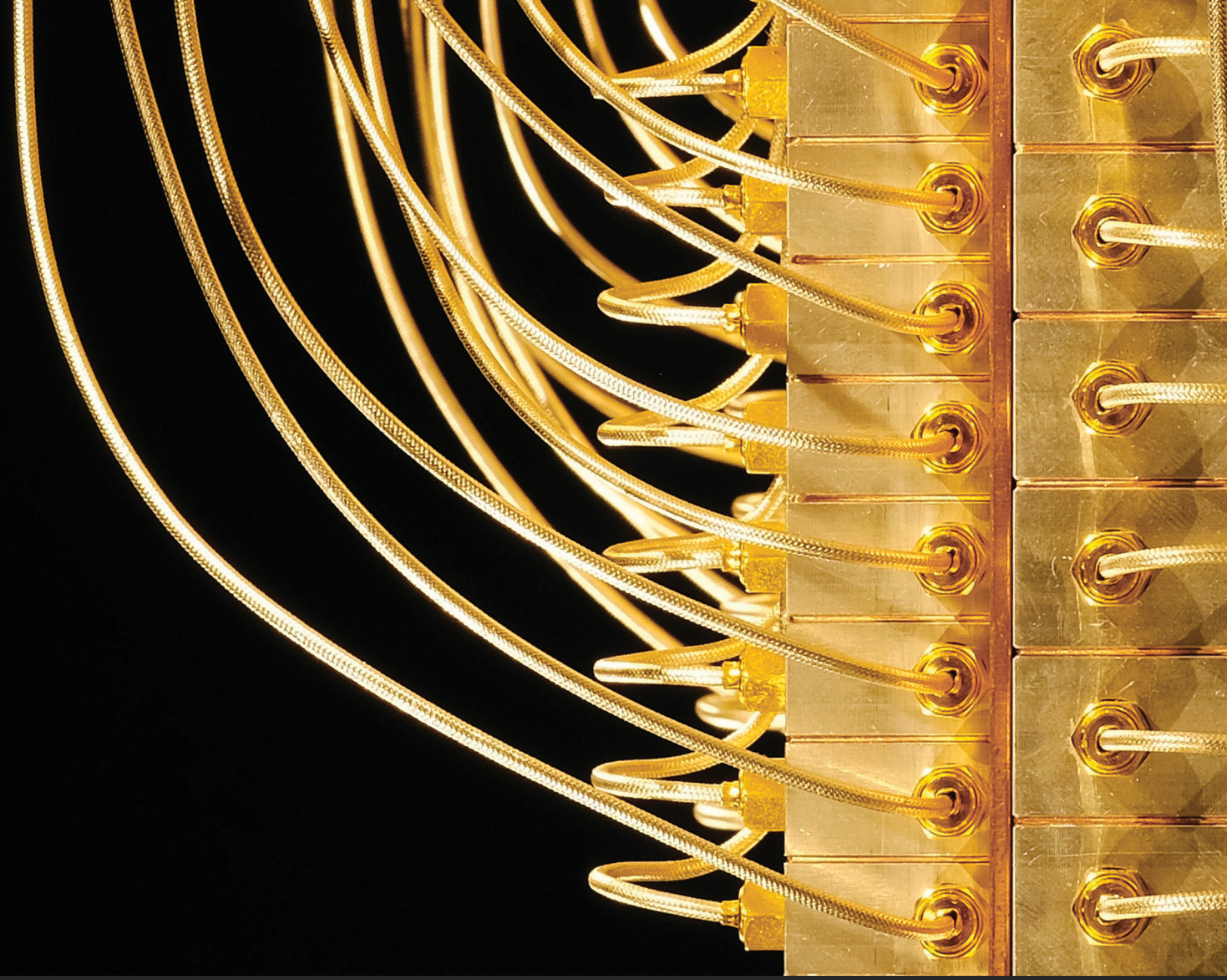
量子コンピューティングを活用する発見主導型の企業になるために、あるいはそれらの企業と対抗するために、あなたの会社は今まで何をしてきただろうか？

質問 3

量子コンピューティングの可能性を実現するため、どのような人材育成を行っているだろうか？

質問 4

クラウド上の強力で規模が拡大していく量子コンピューティングの機能にアクセスするための、見込みのあるエコシステムはどこにあるだろうか？



量子リテラシーの力

「ディープ・テック」とパートナーシップを築き、そのエコシステムに参加すれば、量子のノウハウが手に入る。あなたのチームに必要なのは、量子コンピューティングのリテラシーであり、それにより実験を行い、自社にとってのメリットを見極めることができる。

ワークフローの中の、隠れた機会

量子コンピューティングからより多くの価値を引き出すためには、量子コンピューティング活用のワークフローを精査し、古典的システムとどのように相互運用するかを考察する必要がある。しかし、量子コンピューティングのリテラシーを高め実験を繰り返すだけでは不十分だ。皆さんの古典的な組織を整備し、新しい働き方やビジネスモデルに量子コンピューティングを深く統合できるようにしておくべきだ。

単独では難しい

量子コンピューティングの進化と拡大のスピードに、ほとんどの企業はついていけない。量子コンピューティングのエコシステムに参加すれば、他では獲得が難しいテクノロジーや人材にアクセスできるようになる。

第 2 章

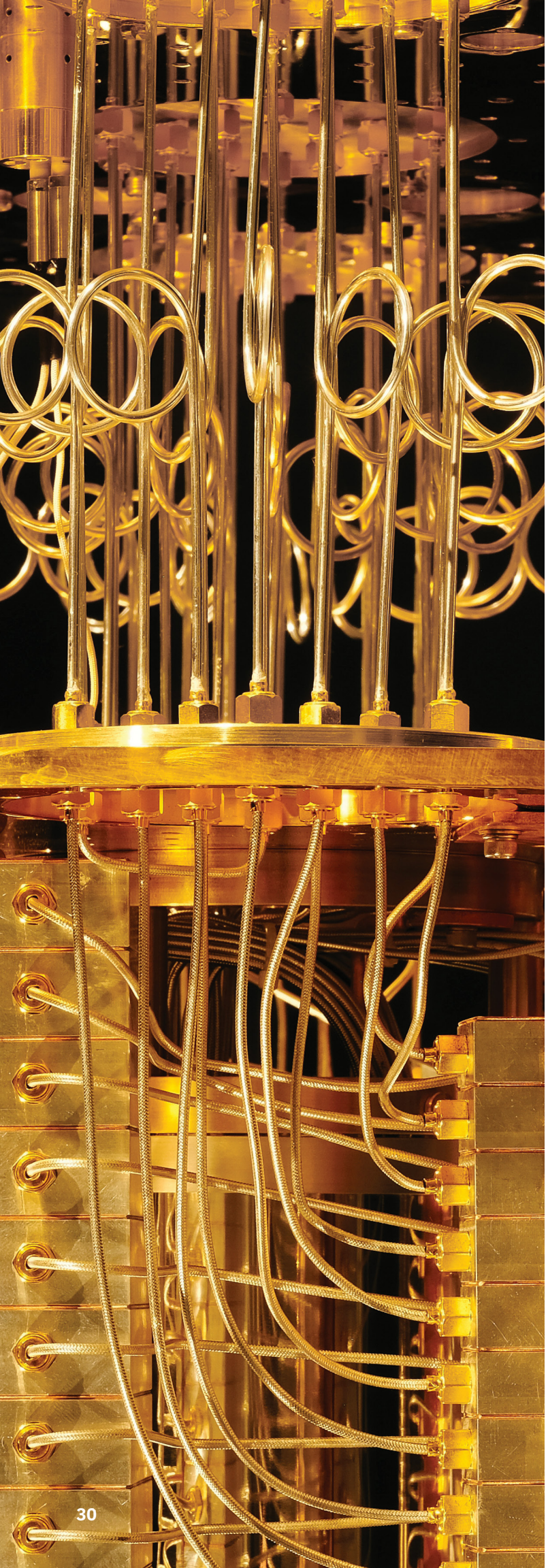
量子の時代への準備と実験の威力

「今後の 10 年で、量子コンピューティング技術をビジネスに応用する準備が整うことは間違いないでしょう。2030 年には数百万量子ビットの量子マシンが登場するはずです」と語るのは、Xanadu Quantum Technologies 社の CEO である Christian Weedbrook 氏だ。同氏はまた言う。「問題は、皆さんの準備ができているかどうかです」

この問いへのシンプルな答えは、「今すぐ行動すれば、可能性はある」だ。量子コンピューティングへの準備度とは、進化を続ける状態であり、それはイノベーションに対する全般的なアプローチや投資、新しい人材やスキル、総合的なデジタルの成熟度などによって左右される。この準備に含まれる要素は、（1）自動化ツールや AI、ハイブリッドクラウドなどの適応、（2）進化し続けるコンピューティング技術を活用して分析、実験、反復する意欲、（3）ワークフローの高度化、（4）組織のスキルセットなどである。

また業種や地域も重要な要素だ。業界によって、競争圧力や市場集中度、成長やイノベーションの必要性、量子コンピューティングが解決できる可能性は異なり、それに伴って、量子コンピューティングへの取り組み方も異なる。また国や地域によっても、投資、教育、スキル、規制などの条件や、エコシステムの利用可能性は異なり、量子コンピューティングの準備方法は、当然それに合わせなくてはならない。一方、エコシステムの方も、サポートを提供する準備ができていなければならない。いずれにせよ最適なエコシステムと連携することは、地域や業界を問わず、準備度のばらつきを抑えるための賢明な方法と言える。

このように考えてもいいかもしれない。量子コンピューターのような技術を先んじて導入することは、「複利」にお金を預けるようなものだと。アーリー・アダプターは、数年待てば、指数関数的にリードを広げることができるからだ。



デザイン性のある実験：量子リテラシーを現実の問題に応用

ここに１つうれしいニュースがある。量子コンピューティングの博士号を持ったスタッフがいなくても、量子コンピューティングを利用することはできるのだ。確かに量子ビットや重ね合わせ、量子もつれの世界は難解で、その道の専門家に任せるのが無難だと言えなくはない。最先端の知的財産を生み出すには、博士号レベルの能力が必要だ。しかし「ディープ·テック」とパートナーシップを結び、量子コンピューティングのノウハウを持つエコシステムに参加すれば、この問題は克服できる。あなたのチームに必要なのは、量子コンピューティングの可能性について理解できるリテラシーであり、組織にとってのメリットを見極める力なのである。

このリテラシーをビジネスの問題に応用することがやりがいであり、課題でもある。現在、自社が属する業界の限界はどこにあるだろうか。そこをさらに掘り下げ、その限界は、何に起因するのだろうか。一見すると手に負えないような障壁を、もし解消できれば、自社の業界はどう変化するのだろうか。コンピューティングの使い方や、ワークフローの設計において問題があるとしたら、一体どのような問題だろうか。10 年後、自社の業界や組織は、どこへ向かっているのだろうか。

現実世界における複雑な問題は、フォールト·トレラントな量子コンピューティングが実現するまで、解決できないかもしれない（「Quantum Decade」の集大成）。それは量子のリソースと古典的リソースの両方を使ってコンパイルされた、汎用的な量子プログラムを実行できる量子コンピューティングのことだ。フォールト·トレラントコンピューターには、エラーの増殖や拡散を防ぐ手順が組み込まれているため、たとえ物理的コンポーネントに不具合が生じた場合でも、量子回路をほぼ正常な状態に戻すことができる。

私たちはすでに、さまざまな問題、特に大きな問題を理解するために、量子コンピューティングをどう活用すればいいのかについて学び始めている。例えば新素材の開発には、量子コンピューティングは力を発揮しそうだ。将来的にはその能力を、地球に優しい効率的な肥料の開発や、世界の食糧供給を支えることに活かせるようになるだろう。さらに宇宙まで視野を広げれば、宇宙がどのようにして縫い合わされているのかといった大きな謎を解明できるようになるかもしれない。[22]

「経営陣は、今後 10 年間で量子コンピューティングが
何を解決できるようになるか理解しなくてはなりません。
視野を広く持ち、コストを評価し、優位性を見極めることが必要です」

Jeff Nichols
Associate Laboratory Director
Oak Ridge National Laboratory

「量子コンピューターでは、問題を単に分解するのではなく、
再検討し、再構成する」

Christopher Savoie
Founder and CEO
Zapata Computing

ここで、もっと短期的に考えてみることにしよう。量子コンピューティングへの準備を進めるためには、問題の検討、実験、反復を行い、今できることを明確にする必要がある。その際には、以下のようないくつかのアプローチを単独で、または組み合わせて行うべきだ（図 9 参照）。

— **ピラミッド型アプローチ：**業界の本質的な問題は、その性質上、複雑であることが多い。ピラミッド型のアプローチでは、まず実験と学習を繰り返しながら、古典的な分解手法とヒューリスティック（発見的）な手法を用いて、潜在的ソリューションを導き出す。その後に、量子プロセスによって最適なソリューションのサブセットが特定され、いわゆる「ピラミッド」の頂上に浮かび上がる。換言すると、古典的なアプローチを通じて一連の優れたソリューションを特定し、その後量子システムを用いて最適化を行うのだ。これにより、より規模の大きいソリューションを洗練されたものにしつつ、はっきりとした結論を導けなかった小規模な理論的オプションを超越することができるようになる。

— **分析および抽出型アプローチ：**真に複雑な問題を完全に解決するには、100 万量子ビットが必要かもしれない。今のところは、古典コンピューティングによって解決できる問題を選別し、それ以外についてのみ量子コンピューティングの圧倒的な計算能力に任せるという戦略が現実的である。これは解剖と似ていて、準備、分解、分解したパーツの解釈といったステップを経て、問題を分析する。

現在、古典コンピューティングはデータの理解、分解、処理可能な計算に使われ、量子コンピューティングの方には特殊な計算を行わせている。また、さまざまな方法によって問題を分解し、再構築するプロセスは、問題を異なる角度から見ることを可能にする。別の視点から眺めることは、量子コンピューティングの新た可能性を引き出すはずだ。

— **ベンチマーキング・フレームワーク型アプローチ：**古典コンピューティングも量子コンピューティングも、決して静的ではない。常に改良され、進化し続けており、それは特に量子コンピューティングにおいて顕著である。古典コンピューティングと量子コンピューティングの性能を比較およびベンチマークする実験を一度行い、その後改良されたハードウェア、ソフトウェア、アルゴリズム、誤り訂正機能などを用いて検証を繰り返し行う。その結果から量子コンピューティングの改善すべき点を特定し、それらをより広範な問題に戦略的に適用することで、量子コンピューティングの準備は進み、量子優位性への道が開けてくる。

量子コンピューティングの概念は難解であるが、その可能性は非常に大きい。量子コンピューティングの実験を繰り返す過程は、固定観念にとらわれない発想を私たちに要求する（32 ページのお客様事例「IBM Services Supply Chain」を参照）。自社の業界で実験を行い、シナリオを評価していく中、量子コンピューティングへの準備の具体的ロードマップを作成することで、難解な概念も身近なものとして見えてくるはずだ。そこで重要になるのは、とにかく実際に最先端の量子コンピューティング・ハードウェアを使った実験を行うことである。それは、エコシステムを仲介してもかまわない。

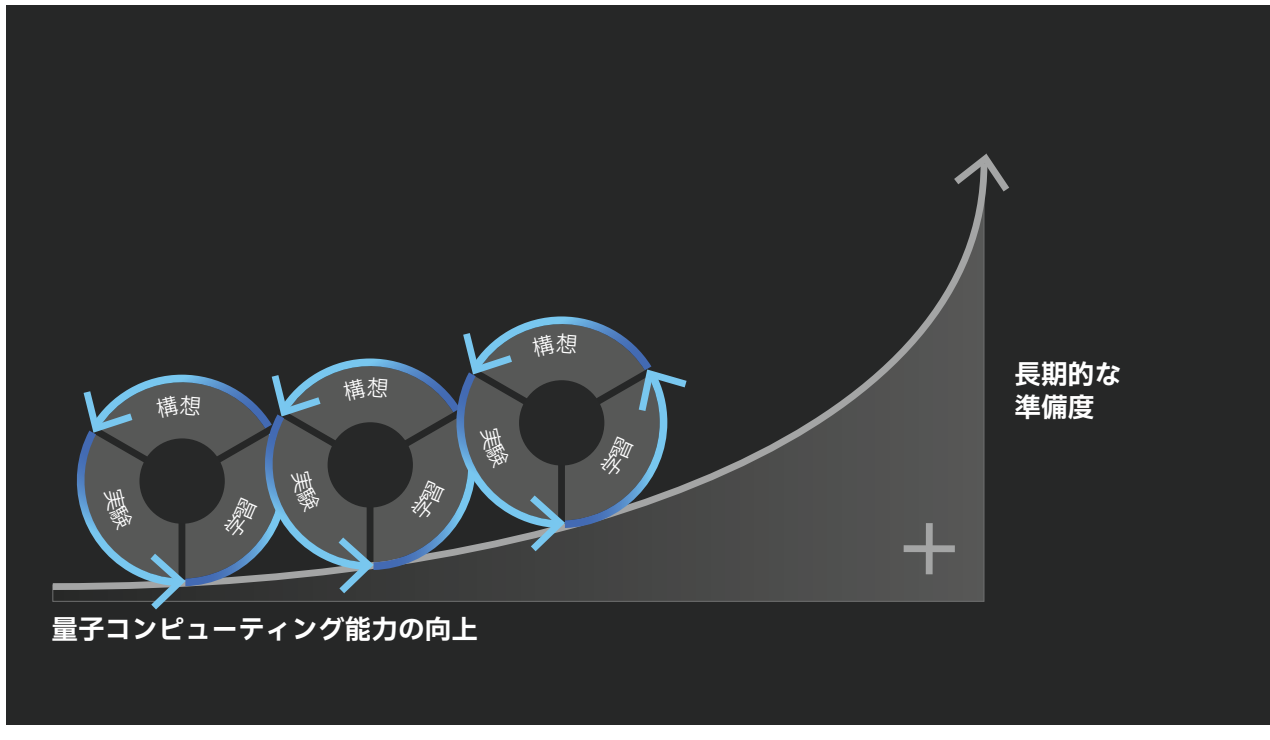


図 9
構想、実験、学習
応用学習の実験的アプローチ

IBM Services Supply Chain[23]
より正確な需要を予測するため、量子コンピューティングを活用する

未来を予測することは果たして可能なのだろうか。業界を問わず、あらゆる企業では需要予測、在庫予測、生産能力予測などを懸命に行っている。

しかし古典コンピューティングを用いた予測は、精度が低い。需要予測を例にとると、急速に変化する需要とアラインしたサプライチェーンの調整は古典技術を使うと気の遠くなるような作業だ。予測の精度がわずか 1% 改良されるだけで、財務状況は飛躍的に向上する。サービス業においては個別具体的な需要はさまざまな要因に左右されるため、的確な予測は極めて難しい。このような点を踏まえ、IBM の研究者は、需要予測をより正確に行うため、量子コンピューティングと古典コンピューティングの技術を組み合わせた実証実験の準備に取り掛かっている。

研究者たちは現在、データセンターに係る部品を保管、配送、修理するといった一連のサービスを提供する IBM Services Supply Chain（SSC）との協業を進めている。現在、IBM SSC は米国内に 114 の倉庫を保有し、在庫部品は 2,000 種以上、在庫の資産価値は数百万ドルにも及ぶ。部品は、発生した問題の深刻度に応じ、2 時間、4 時間、1 日、2 日という 4 つの時間枠以内で納品される。そのため IBM SSC は、いつ、どこで、いくつの部品が必要になるかを予測することが求められている。

研究者たちは、このシナリオに対し、2 段階のアプローチを採用した。1 つ目は、需要パターンの分類だ。パターンには以下のようなものが考えられる。

速い

需要が
継続している

遅い

需要が断続的で、
ゼロになる期間もある

不活発

需要が不活発

稀

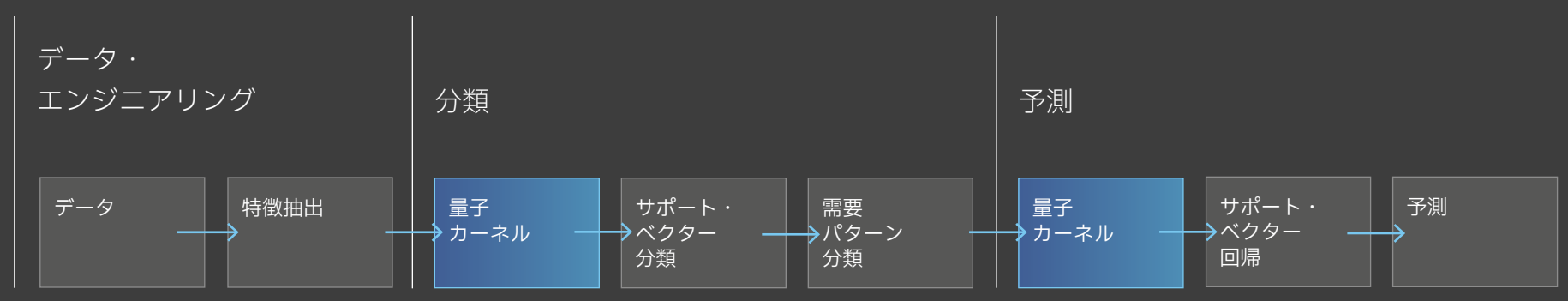
需要がわずか、
または 1 回限り

次の段階として、該当する需要パターンに適した予測アルゴリズムを実行した。分類も予測も、古典コンピューティングと量子コンピューティングを組み合わせることで行うことができる（下図参照）。2 つの技術を組み合わせて計算を行い、ワークフローの中で負荷の高い部分を量子コンピューティングで実行する。

量子力学による機械学習モデルは、より高い汎用性を実現できる可能性がある。つまり新しいデータを使えば、予測アルゴリズムは今まで以上の精度を達成できるかもしれないということだ。量子コンピューティングを使わずに古典コンピューティングだけで、これらのワークフローを完了することも可能だ。しかし研究者たちは、技術を改良し、量子コンピューティングが果たす役割を理解しつつある。IoT センサーでデータを取得する予知保全の分野などでは、量子コンピューティングは必須となるだろう。また航空機部品のメンテナンスのような安全に関わる業務においては、高い精度の量子機械学習モデルが求められる。

これらの分類と予測の作業も、多くの量子コンピューティングの実験と同様、基礎的であると同時に発展的な性質を備えており、研究者がビジネス領域での予測について量子アルゴリズムや量子能力の活用を探求する土台となる。この研究が進めば、ビジネス上の問題を量子コンピューティングにマッピングする具体的なデモンストレーションを実施できるようになる。これは重要なポイントで、「古典コンピューティングと量子コンピューティングは競合しない」ということを実証する一助となるはずだ。この 2 つはむしろ補完的な技術であり、組み合わせることでより効果を発揮する。

古典コンピューティングと量子コンピューティングの統合
予測のワークフロー



量子を活用した
プロセス・ワークフロー

量子優位性への近道は、少しずつ段階的に考えを進めることだ。特に量子コンピューティングを、ワークフローに組み込む場合には重要になる。

ワークフローは、基本的にはタスクをツリー状にまとめたもので、そこには顧客とベンダー間のやりとり、積極的な経営層への意思決定支援、効率的な従業員への研修、AI アプリケーションなどが含まれる。[24] ワークフローを作成する際に、大量で複雑なデータをタイムリーかつ包括的に処理する難しさに気付かされることがある。その結果、たとえ差し迫った需要増に直面していても、企業は概算の予測値を採用せざるを得ない。例えば流通、輸送、通信、ロジスティクスなどの複雑なネットワークを扱う場合に、そうしたケースに直面するだろう。

量子コンピューティングを利用する目的は、ほとんどの場合、ワークフロー内のプロセスやサブプロセスを加速させることだ。ワークフローを検証し、量子コンピューティングが活用できる機会や、古典コンピューターによるシステムとの連携手段が見いだせれば、量子コンピューティングを用いることで、より多くの価値が引き出せるようになるだろう（36 ページのお客様事例「OLED スクリーン」を参照）。

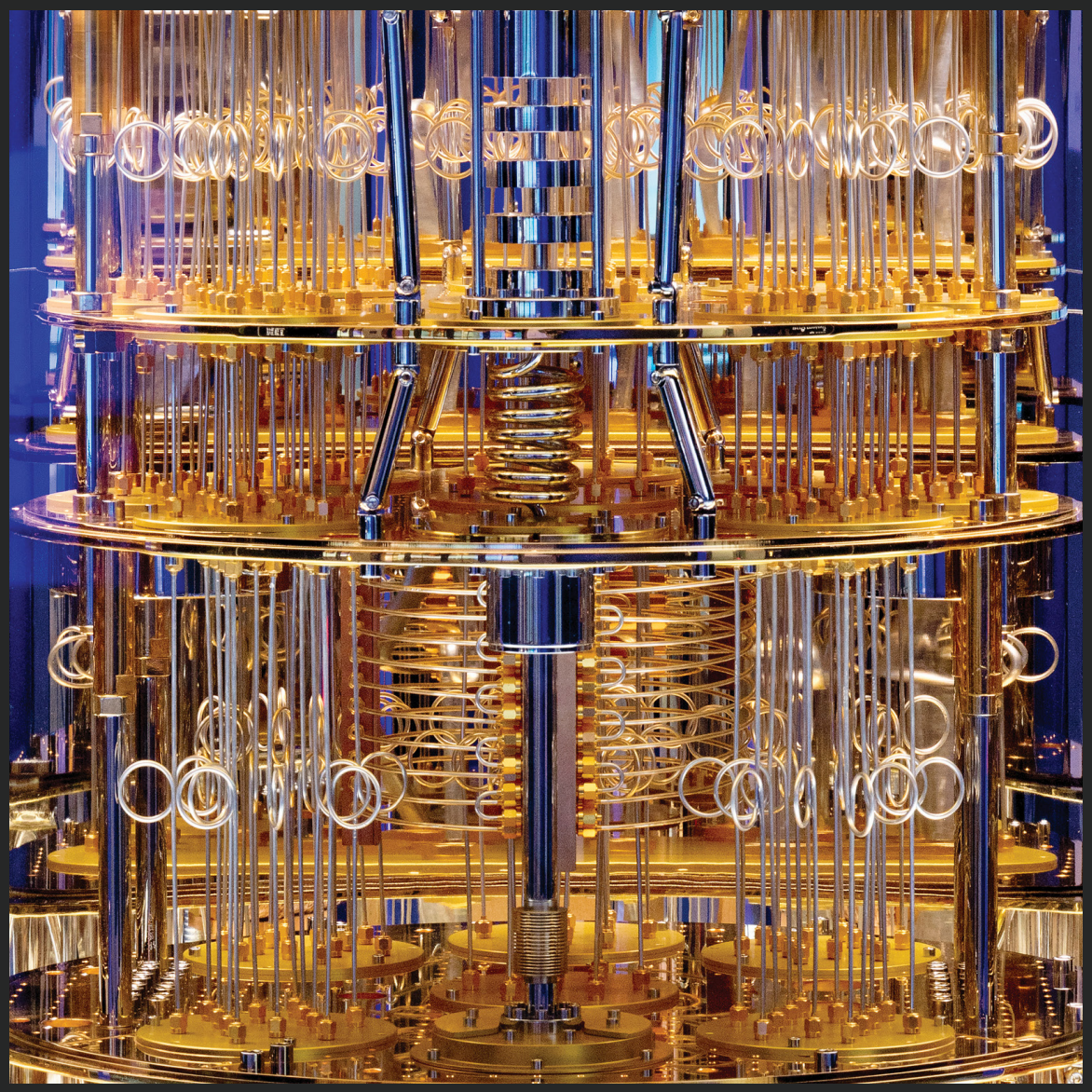
量子コンピューティングを評価するためには、業界のトランスフォーメーションに広く注目すべきである。特定のコンテキストに対して、量子コンピューティングは古典コンピューティングとどのように連携できるだろうか。ワークフローのどの部分が、量子コンピューティングに向いているのだろうか。古典コンピューティングに任せるべきか、あるいは量子コンピューティングにそのタスクは任せるべきかといったことを評価することで、ワークフローそのものに新鮮な視点をもたらし、量子コンピューティングの潜在能力を開花させる。量子コンピューティングは、今までにない効率性、シャープな方法論、内外の利害関係者との関係性の改善など、予期せぬブレイクスルーをもたらす可能性を秘めている。

「量子コンピューターは、古典コンピューターを
駆逐するものではない。量子コンピューターには、
ワークフロー内の特定の難しい最適化業務を任せるべきだ。
あくまでも付加的な役割になるだろう」

Christopher Savoie
Founder and CEO
Zapata Computing

「ワークフローのどの部分を量子コンピューティングで
対処すべきかを、より時間をかけて検討しなくてはならない。
これは神秘的な物理学の話ではなく、具体的なビジネス上の
問題や任務を、量子コンピューティングという斬新な手法で
どのように解決していくかという話なのです」

Glenn Kurowski
Senior Vice President and Chief Technology Officer
CACI



OLED スクリーン
量子コンピューティングを活用したシミュレーションで、より明るく効率的なディスプレイを[25]

人間と携帯電話の間にあるものは何だろうか。それはフラット・パネル・ディスプレイと呼ばれる画面である。ところでこの部品は、スマートフォンの中で、最も電力を消費する部品の１つであり、バッテリーの寿命を縮めてしまう。

新しい先進的な素材を使えば、より効率的で消費電力の少ない、明るいディスプレイを作ることができる。しかし、このような新素材を開発するためは、労力と時間のかかる研究が必要だ。このプロセスは、材料の特定から、開発、デバイスの試作、認定試験など、複数の開発段階にまたがっている。

今まで、この分野の開発速度は決して速いとは言えないものだった。有機発光ダイオード（OLED）ディスプレイの場合では、有機分子のエレクトロルミネッセンス現象が初めて確認（1963 年）されてから、商用の OLED ディスプレイが発売（1997 年）されるまでには、34 年間を要している。[26]

しかし量子コンピューターを利用すれば、この開発ペースを速めることができる。量子コンピューティングにより、素材だけでなく、その製造プロセスと動作条件を考慮した分子モデリングを、高い計算速度と精度で行える可能性がある。これにより新素材の商品化は、一段と迅速化される。こうしてできあがった新素材は、ディスプレイの明るさの向上、低消費電力化、低コスト化を実現し、製品化の時間を短縮させる。その結果、企業は、より魅力的で競争力のある製品を早期に提供できるようになる。

古典コンピューティングによる材料シミュレーションは、現在のところ新素材開発の限られた領域にしか行われていない。複雑で正確さを求められる分子構造のシミュレーションには、非現実的な計算時間がかかるからだ。最終的には、正確なコンピューター・シミュレーションが行えないため、労力とコストのかかる実験方法に頼らざるを得ない。

量子コンピューティングが実現すれば、ワークフロー全体を通して、量子シミュレーションができるようになる。そうなると素材や、デバイスの動作確認、製造プロセス、動作条件などについて、より現実的なシミュレーションが行える。さらに複雑で正確な分子レベルの材料シミュレーションができるようになれば、コンピューター上で生産的な実験が行えるため、コストと手間のかかる研究室での実験や製造開発を減らせるようになる。

このように、量子コンピューティングを利用した材料シミュレーションのワークフローを作成すれば、明るく低消費電力のディスプレイのような、戦略的で競争力のある製品を生み出すことができるようになる。経済的にも大きなリターンを期待できる。OLED ディスプレイの場合、これにより年間の売り上げが 1% 増えれば、3 億 2,000 万ドルもの増収になるのである。[27]

インテリジェント・ワークフロー：量子の力をプラスする

「プロセス・ワークフローだけでは、
実社会の仕事の複雑さに対応できない。
量子コンピューティングは、人、テクノロジー、
そして仕事の関係さえ変えてしまうだろう」

Colonel (Retired) Stoney Trent, Ph.D.
Founder and President
The Bulls Run Group

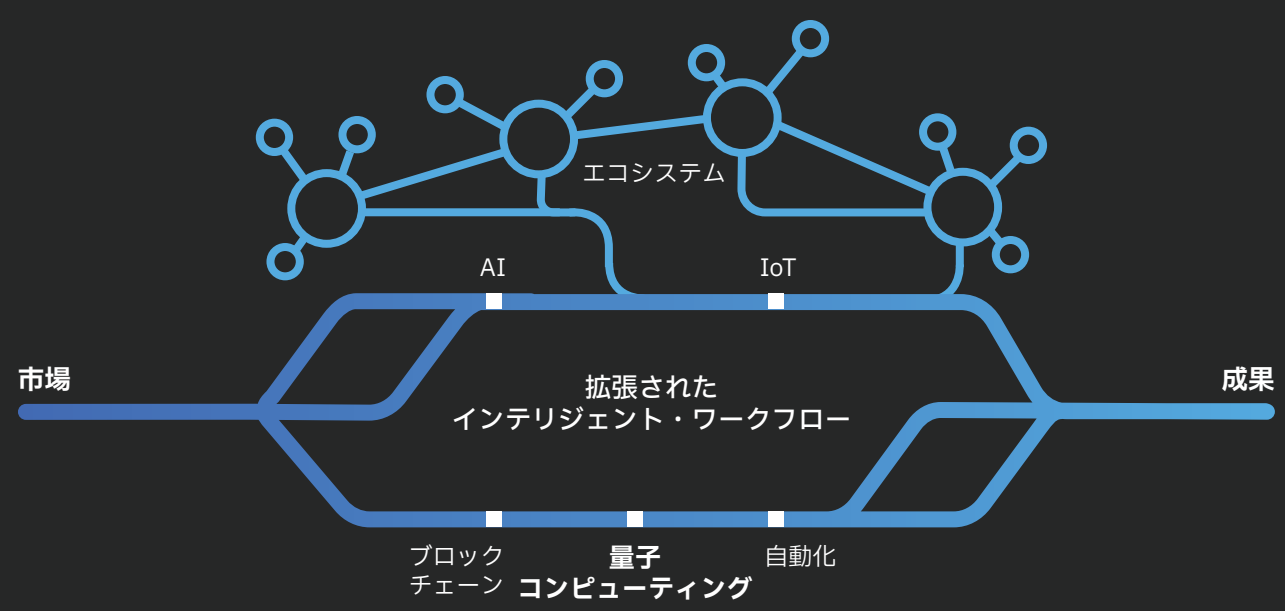
IBM では、インテリジェント・ワークフローを、「テクノロジーを活用した、拡張したエンドツーエンドのシステムであり、顧客体験を定義し、経済的な成果を生み出すもの」と定義している。[28] インテリジェント・ワークフローは、単純なプロセスに比べ拡張性が高い。これまでも自動化、ブロックチェーン、AI、5G、クラウド、エッジコンピューティングなどのテクノロジーを利用することで、卓越した成果を上げてきている。IBM の調査によると、これらの古典コンピューティング技術をワークフローで利用すれば、組織の利益は 3 倍にも膨らむ。[29] 量子コンピューティングは、この効果をさらに指数関数的に向上させる力を秘めている（図 10 参照）。

図 10

ブースター・ショット
量子コンピューティングを利用した
インテリジェント・ワークフロー

現代は、コンピューティングにより、ヘテロジニアス（異機種混在）という革命的な環境に近づきつつある。これからは、ハイブリッドクラウド上で管理されるインテリジェント・ワークフローに、古典コンピューティング、AI、量子コンピューティングが統合されるケースが増えていくだろう。

量子コンピューティングをインテリジェント・ワークフローの観点から評価すると、次のように表現することできる。プロセスは、組織のバックボーンとして機能する。インテリジェント・ワークフローは相互につながり、依存し合っており、組織の神経系の役割を果たす。ワークフローが単純なプロセスと異なるのは、エコシステムから情報を抽出し、適切な対応を感知して判断し、他のワークフローにフィードバックを送ることができるという点だ。[30] 多くの選択肢を評価する能力を持つ量子コンピューティングは、こうした点において優位である。



「2030 年の時点で、主要なクラウド・プラットフォームに
量子コンピューティングが備わっていなければ、
それは随分と奇妙なことだろう。量子は、
AI やスーパーコンピューターよりも、影響力が強まるだろう」

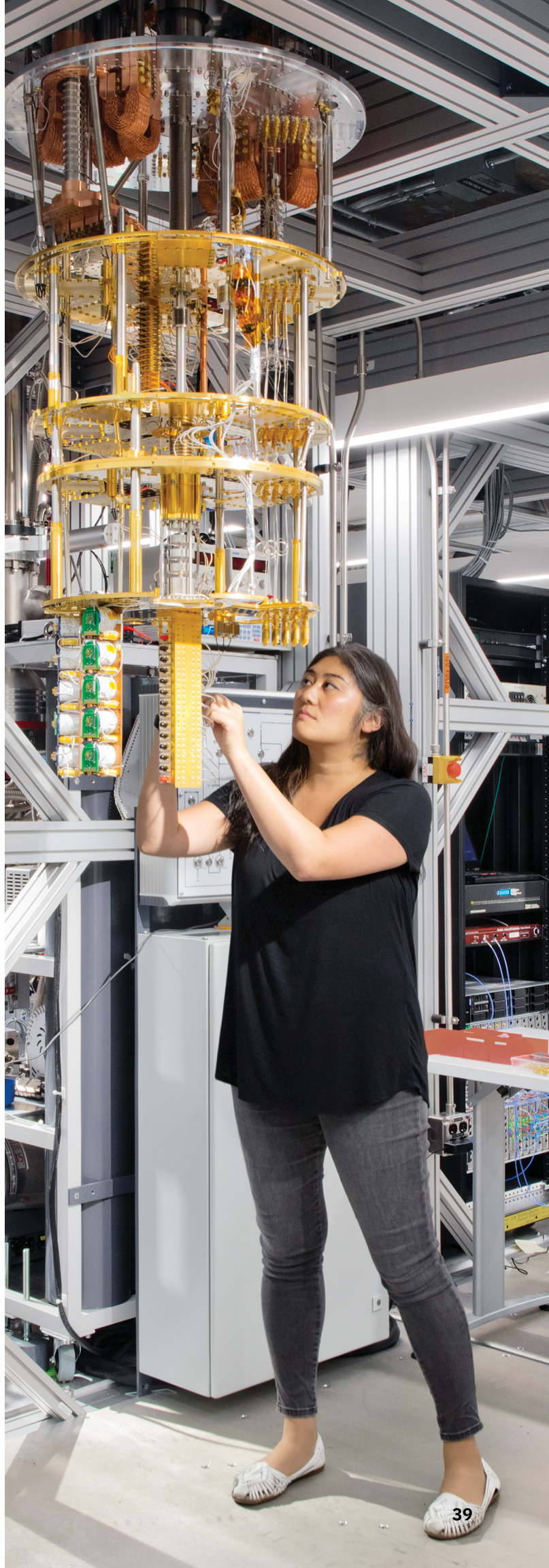
Christian Weedbrook
CEO
Xanadu Quantum Technologies

インテリジェント・ワークフローは、データと革新的技術により、創造的に作られたモデルである。インテリジェント・ワークフローを確立し、AI、データ、およびクラウドの機能を強化すれば、量子コンピューティングを実現する基盤を構築でき、同時に今すぐにもビジネスに良い効果をもたらすことが期待できる（40 ページの「視点：インテリジェント・ワークフロー」を参照）。一方で、量子コンピューティングが RSA（リベスト・シャミア・エーデルマン）暗号や ECC（楕円曲線）暗号を破壊してしまうという現実や、既存の耐量子安全性暗号への移行の必要性などについても考慮しなければならない。[31]

インテリジェント・ワークフローは、その定義からして、さまざまなテクノロジーを組み合わせたものであり、その中に量子コンピューティングも当然含まれている。インテリジェント・ワークフローは、各種のアプリケーションや技術的アプローチをつなぐ、オープンで結び付きが比較的緩い疎結合なアーキテクチャーにおいて、より力を発揮する。ほとんどの企業は量子コンピューティングをクラウド上で利用しており、インフラを自社開発しているわけではないことを考慮すると、ハイブリッド環境を活用できることは重要だ。たとえ比較的シンプルなプロセス・アプローチを採用している組織であっても、基本的なインテリジェント・ワークフローを確立すれば、量子コンピューティングに移行しやすくなる。

インテリジェント・ワークフローの枠組みの中で、量子コンピューティングは、直感的にはアクセラレーターとしての役割を担っていると最初は捉えられるかもしれない。つまり、今まで以上の計算能力が必要な場合に、古典コンピューティングを補完する形で用いられる、ブースター的な技術としてだ。しかし実際には、量子コンピューティングは、業界のビジネスモデルに根本的な変革を起こす触媒であり、新しいサービスや消費の形態を生み出す可能性すらある技術なのである。

企業がこのような革新を起こすためには、最適な機会を捉えるための指針となる戦略的なコンパスが必要だ。また旧来のビジネス環境の中で、テクノロジー、プロセス、人材の観点から、量子コンピューティングを適用できる能力を強化しておく必要がある。つまり量子コンピューティングを受け入れるためのインフラを確立し、テクノロジーが実現した暁には、いつでも始められる状態にしておかなければならない。



視点
量子コンピューティングを加速させる基盤としてのインテリジェント・ワークフロー[32]

インテリジェント・ワークフローを構築すれば、量子コンピューティングの導入準備が進むだけでなく、ビジネスを強化する特性により、組織は今すぐにでも恩恵を得ることができるようになる。以下の 4 つのステップは、新しいテクノロジーを取り入れ、データを管理し、ハイブリッドクラウド環境を実現するための大まかな枠組みである。このようなインフラが整えば、量子コンピューティングの実現を加速させるためのサブワークフローの分析も進むであろう。

1.
AI や機械学習などの新しいテクノロジーを取り入れ、仕事のやり方を変える。

他の新しいテクノロジーを応用して、高度にダイナミックなインテリジェント・ワークフローを構築し、仕事の進め方や新しいエクスペリエンスのデザインを根本的に変える。特に、量子コンピューティングとの相性が抜群の AI や機械学習の能力を強化する。

2.
データから価値を生み出す。

インテリジェント・ワークフロー全体で整理されたデータを活用し、最も重要と思われる価値を見つけ出す。堅牢なガバナンスを確立し、データや AI モデルの信頼度を高め、組織の最前線で意思決定を行えるようにする。特に複雑で量子アルゴリズムが効果を現すサブワークフローのコンポーネントを特定する。

3.
ハイブリッドクラウドを通じた展開を進める。

ハイブリッドクラウドへの移行を通じ、データにアクセスして新たな用途に活用し、インテリジェント・ワークフローを構築し、リスクのないオープンな方法でアプリケーションを刷新する。この柔軟性を利用することで、クラウドベースの量子コンピューティングを実験する機会を探究する。

4.
量子コンピューティングの加速に最も適したサブワークフローを評価する。

量子エミュレーターの各種オプションを検討する。オープンソースの量子コンピューティング・エコシステムに参加できればなお良い。このようなコミュニティーは、管理可能な規模の量子コンピューティングへのアクセスと実験用の低関与型の「研究室」を提供してくれる。量子コンピューティングが最も効果的に古典コンピューティングの機能を増強するように古典コンピューティングと量子コンピューティングの役割分担をする。

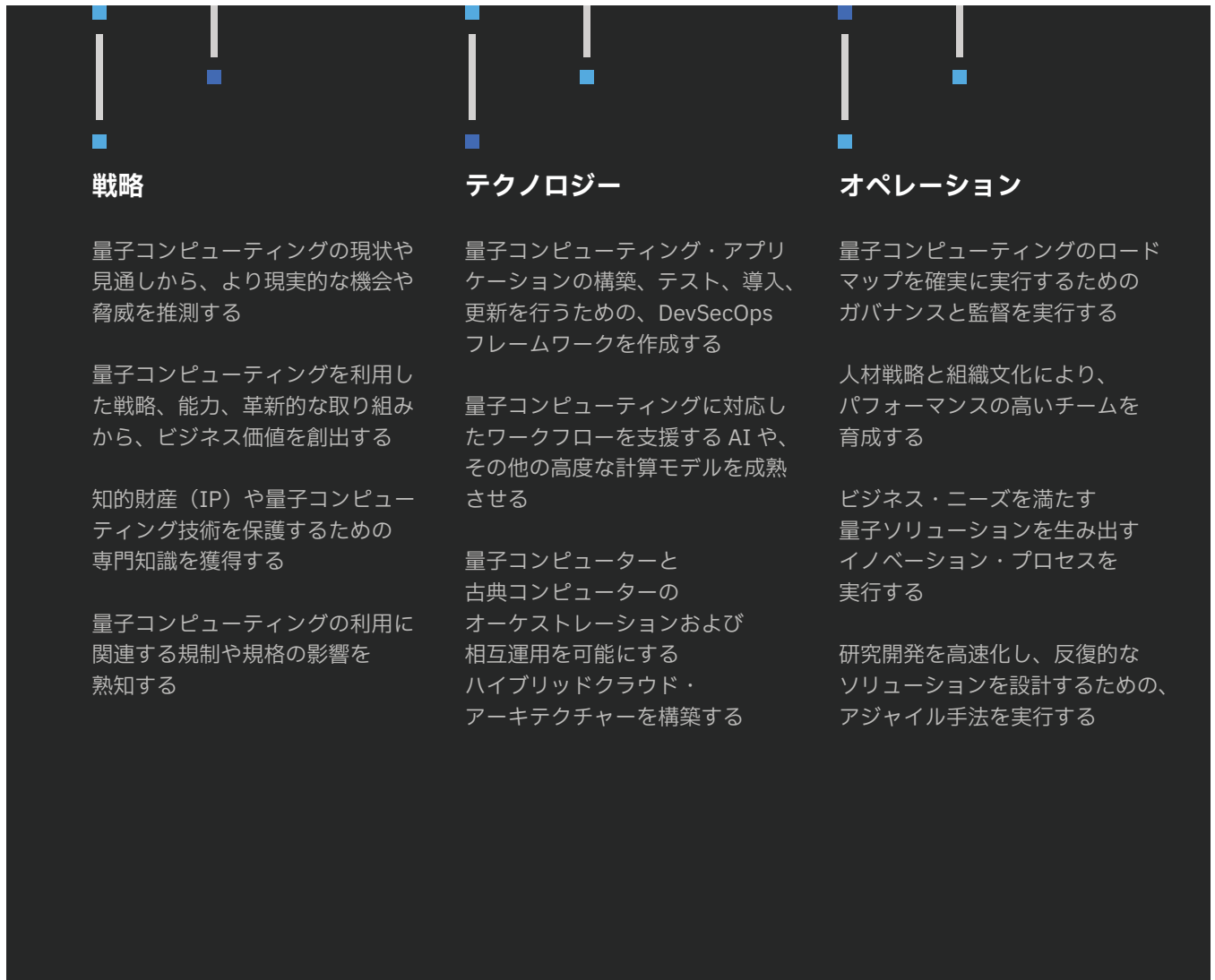
ここまで到達するには、いくつか重要な能力が必要だ（図 11 参照）。いずれも、量子技術そのものを使いこなす能力ではない。むしろ重要なのは、企業としてのスキルや技術力、将来を見据えた戦略を強化する能力である。これらによって、量子コンピューティングの革新が根付き盛んになるからだ。

今、現実的かつアジャイルで反復的に、量子コンピューティングの導入に取り組むことの意味は、単に将来、その恩恵を受け取ることだけではない。この戦略は、今日からでもビジネスに大きな利益をもたらす。例えば、ハイブリッドクラウドを利用して、最新のダイナミックなデリバリー·モデルとオープン·イノベーション·プラットフォームを構築すれば、従来型の企業でも大きなリターンを享受できる。[33] 同時に、量子コンピューティングが実用化された暁には、シームレスに統合しやすくもなる。

このように、古典コンピューティング環境を強化しながら、実験や量子コンピューティングに対応したワークフローへの投資を行うことで、量子優位性の実現に向けた道のりを加速させることができるようになる。

図 11

揺るぎない基盤
量子コンピューターに向けた
基礎の構築



量子コンピューティング・
エコシステムの人材トラック

現代の経済状況はグローバルで複雑であり、いかなる企業も自社だけの力で、すべてを行うことはできない。私たちは、パートナー、専門知識、エコシステムなどを活用しながら、利用できるものは最大限に活かし、独自の差別化された付加価値を活用し、実証している。

多くの企業にとって、量子コンピューティングの進化と成長のスピードについていくことは困難であり、「自社だけでやる」にはコストがかかり過ぎる。量子コンピューティングのエコシステムに参加すれば、他では得られないテクノロジーにアクセスすることが可能になる。また、量子コンピューティングがもたらすことの意味や、それがどのように自社のビジネス課題と関連しているかについての理解を深めることができるようになる。

ビジネス上の問題を正確に把握し、量子コンピューティングがどう役立つかを判断するためには、専門性が必要になる。企業は、社内における自前の量子コンピューティング・チームの構築に努めることもできるし、ある程度はそれも必要かもしれない。しかしエコシステムを活用すれば、社内の量子コンピューティング・チームの人材（特にディープ・テック関連）を補完する、あるいは代替することすらできる。

量子コンピューティングのスキルを持つ人材を、社内で育成・採用することは、利用可能なリソースが限られているために、とても困難である。一方、最先端のエコシステムには、すでに豊富な人材がそろっている。

エコシステムと人材のニーズを効果的にマッチさせるには、以下の質問について考えることが役立つだろう。[34]

自社が抱えるビジネス上の問題は何だろうか？ 量子技術の可能性を踏まえて、自社の問題を説明できるだけの専門性はまだ獲得していないかもしれないものの、もっと広い視野で問題点を捉えているはずだ。その問題は化学分野のシミュレーションの課題だろうか。それとも、機械学習を強化する量子アルゴリズムを求めているのだろうか。もしかしたら、主な懸念事項は、量子コンピューティングの時代におけるセキュリティーの問題かもしれない。自社の特定課題に関するユースケースにすでに取り組んでおり、業界の課題を理解している専門家たちが参画しているエコシステムが、最も効果的なエコシステムである。

量子コンピューティングと自社のビジネス課題に関して、世界をリードする組織やソート・リーダーは誰か？ 量子コンピューティングのイノベーションは急速に進んでいるため、科学的なブレイクスルーと、そのビジネス上の問題解決への応用において最前線にいるパートナーが必要である（図 12 参照）。パートナーがティア 1、あるいはティア 2 のどちらであるかによって、「勝者総取り」の勝者になれるか取り残されるかが決まってくる。

「現時点では、量子コンピューティングのスキルを習得するよりも、
スキルを持つパートナーを獲得する方が合理的だ」

Doug Kushnerick
formerly with Technology Scouting and Ventures
ExxonMobil Research

「私はまだ形成すらされていない知的資本を
管理しているのだ」

Irfan Siddiqi
Director of the Quantum Systems Accelerator
Department of Energy (DoE)
National Quantum Information Science (QIS) Research Center

コンサルタントと社内スタッフの最適な組み合わせはどのようなものか？組織にとっての最適な量子コンピューティングのエコシステムには、自社のビジネス課題に専念して取り組むメンバーや、業界のプロフェッショナルや技術専門職が含まれる。例えば、以下のようなメンバーだ。

— **量子コンピューティング技術プロバイダー：**クラウドベースの量子コンピューティング・システム、オープンソースのプログラミング・フレームワーク、チュートリアルや研究論文などの教育リソース、量子コンピューティングの研究者集団、量子コンピューティングのコンサルタント集団、技術サポート、そして量子コンピューティングの課題に積極的に取り組む協働グループのメンバーへの容易なアクセスを可能にする。

— **量子コンピューティング開発者：**オープンソース・コードやアプリケーション開発ライブラリーを用いた量子コンピューティング・アプリケーションの開発に精通し、量子コンピューターの実機にもアクセス可能である。

— **アカデミック・パートナーや大学：**関連する量子コンピューティングの研究を行っている。そして、自社チームに将来的に雇用する可能性がある量子コンピューティングの専門家を育成している。

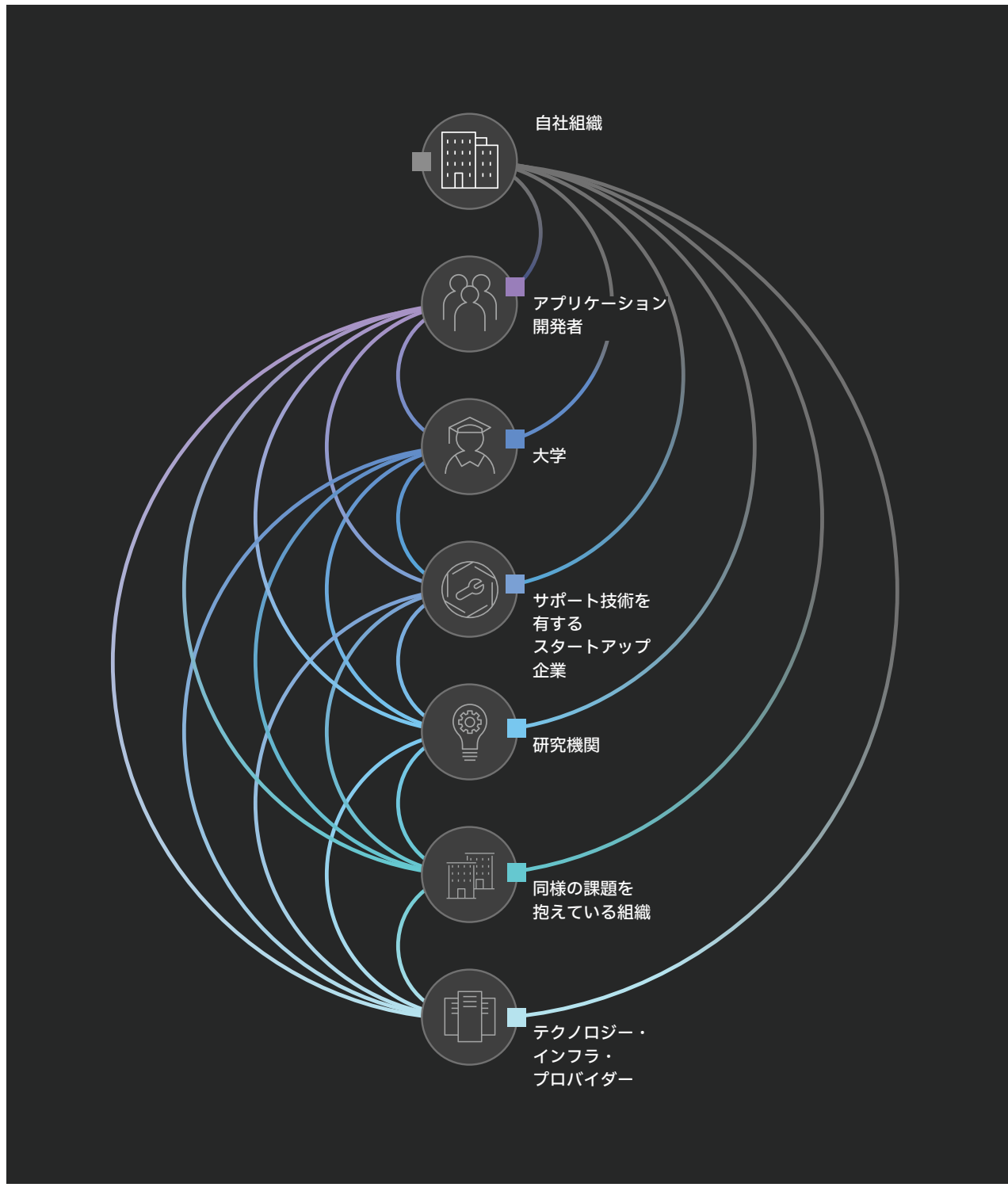


図 12
頼れるパートナーは誰だろうか？
エコシステム構成メンバーの
適切な組み合わせ

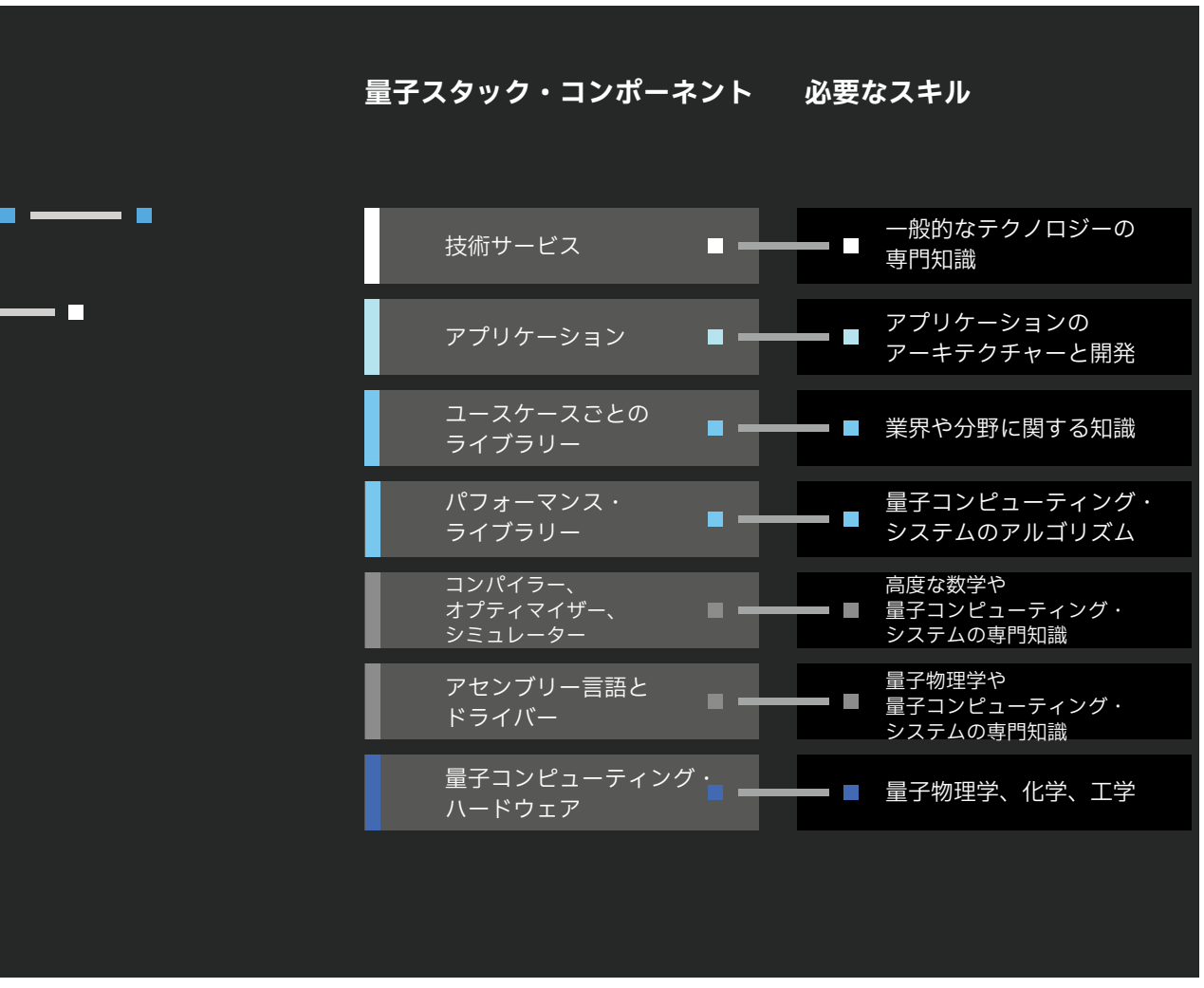


図 13

成功に向けての積み重ね
量子コンピューティングのリテラシーを獲得するために必要なコンポーネントやスキル

もし、少なくともある程度は社内で人材を育成することを優先するのであれば、最初のステップとして、コミュニティー・プラットフォームを探すことが考えられる。このような「ハンズオン」のエコシステムでは、開発者が量子コンピューティングのアルゴリズムを作成し、実際の量子コンピューティング・ハードウェアやシミュレーター上で実行するためのツールを提供する。例えば、IBM の量子コンピューティング・コミュニティーでは、オープンソースの Qiskit フレームワークを提供している。このようなプラットフォームは、重要な構成者である学生にも、企業の IT チームにも開かれている。

そこまで「ディープ·テック」ではないものとして、量子コンピューターが解決の役に立つような問題—業界を変えるようなブレイクスルーやワークフローの促進—を特定するための少人数のチームを編成するというオプションがある。チームのメンバーは、必ずしも量子コンピューティング分野の博士号レベルの専門知識を持っている必要はないものの、業界や組織のニーズに対する量子コンピューティングの適用可能性を評価できるだけのリテラシーは求められる（図 13 参照）。

量子コンピューティングのための採用を行う際には、どのような人材が最適だろうか。ロチェスター工科大学とコロラド大学ボルダー校の研究者が、興味深い洞察を紹介している。米国を拠点とする 20 社以上の量子コンピューティング企業の管理職を対象にインタビューを実施したところ、その回答から 2 つの共通する道筋が見えてきたという。

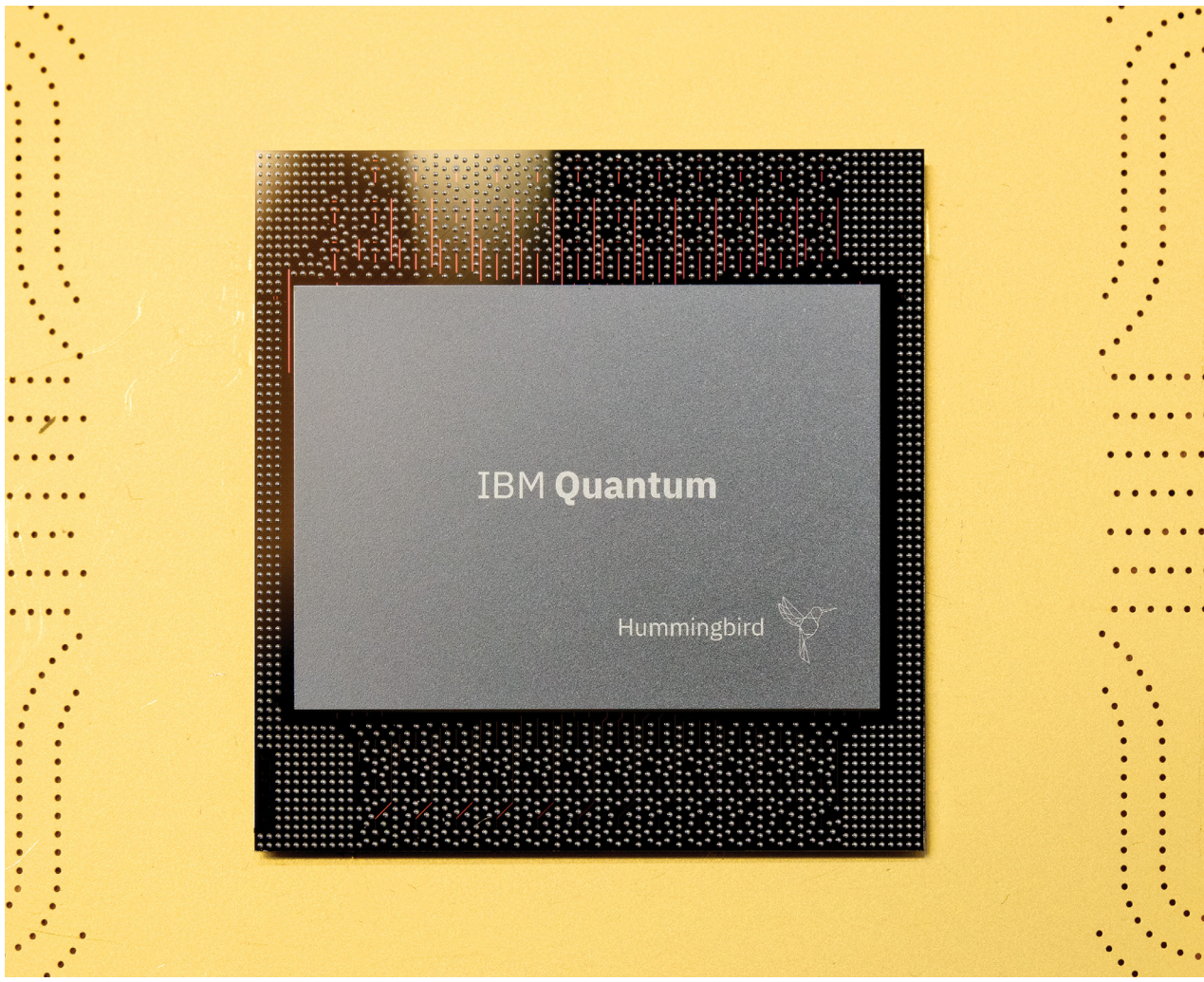
「米国の半導体業界と量子コンピューティング関連の企業は、
STEM 分野の卒業生の獲得という課題に直面している。
まず自社よりも有名なソフトウェア企業やソーシャル・メディア企業と、
エンジニアの獲得競争をしなければならない。さらに米国では、
過去 30 年間で他国と比べて、STEM 卒業生の数が減少していることも問題だ」

Ajit Manocha
President and CEO
SEMI

第一に、各社が求めているのは、量子を「意識」している人材だという。こうした人材は、量子コンピューティングの概念を幅広く理解し、その概念を検討して応用する能力を有している。すなわち私たちが「量子リテラシー」と呼ぶ能力を有する人々だ。ただし、必ずしも方程式や理論について深い知識を持っていなくてもよい。[35] IBM の専門家は、このような量子リテラシーはしばしば、再教育によって身に付けることができると指摘する。つまり、量子コンピューティングについて深く学習することを通じて、自身の分野の専門知識を強化し、その領域に量子コンピューティングを統合する方法を考え出せる人材こそが最適なのである。[36]

第二に、実践的な研究スキルを持つ人材の方が、持たない人材よりも支持されている。[37] ある IBM の業界専門家は、量子コンピューティングの高度スキルを持つ人材は現在、3,000 人程度しかいないと試算しており、その数を 2 倍から 4 倍に増やす必要がある。[38] また 2018 年 10 月、ニューヨーク・タイムズ紙は、量子コンピューティング分野で最先端の研究を行う人材の数は、世界で 1,000 人にも満たないと報じている。[39]

このような高いレベルの専門的な技術力を持つ人材を獲得することは、特に大学やスタートアップ企業、ベンダーとの人材の獲得競争がある中では、非常に困難であろう。このように人材が不足しているからこそ、独自の優秀な量子コンピューティング・チームを抱える、すでに活動中のエコシステムの魅力が高まっているのだ。



「もし『Quantum Decade』を遅らせる要因があるとするなら、
それはテクノロジーではなく、人材の不足だろう。
資金は集まりやすく、関心も高い。
テクノロジーも何とかなるだろう。問題なのは人材だ」

Prineha Narang
Assistant Professor of Computational Materials Science
Harvard University

以下の質問の答えを用意しよう

質問 1

業界を再構築するためには、手ごわそうに見える問題をどう解決すればよいだろうか？

またそのためには、あなたの会社では現在、どのような量子コンピューティングの実験ができるだろうか？

質問 2

特定のワークフロー内で、量子コンピューティングは古典コンピューティングとどう連携できるのか？

そのワークフローの中の、どのサブセクションが、量子コンピューティングに最も適しているのだろうか？

この評価結果により、事業プロセスに関する視点や可能性はどう変わるのだろうか？

質問 3

自動化、ブロックチェーン、AI、5G、クラウド、エッジなどのテクノロジーを利用するインテリジェント・ワークフローは、量子コンピューティングをつなげるための理想的な環境である。

この基盤を確立することができれば、今のビジネスにどんなメリットがもたらされるのだろうか？

質問 4

どのような手順を踏めば、自社の量子コンピューティングのリテラシーを高めることができるか？

量子コンピューティングにおける「ディープ・テック」の専門知識を得るためには、どのようなエコシステムと提携することが考えられるか？

到達点ではなく、プロセス

特定の問題に対し、量子コンピューティングの方が古典コンピューティングよりも優れていると実証された状態のことを「量子優位性」という。これは緩やかな波のように、進んだり止まったりしながらも、最終的にはテクノロジーを前進させる。

量子コンピューティングが得意とする 3 つの問題

量子コンピューターが得意とするのは、自然現象のシミュレーション、代数的問題（機械学習や微分方程式、行列など）、そして量子探索やグラフ問題である。

量子コンピューティングの「優先順位付けマトリックス」

量子コンピューティング・アプリケーションが、ビジネスに与える潜在的な影響を評価することは難しい。どの量子コンピューティング・アプリケーションが、ビジネスに最適な恩恵をもたらすかを評価する方法を、以下で紹介する。

第 3 章

量子優位性と
ビジネス価値の追求

本書 7 ページで紹介した「量子優位性」は、量子コンピューターを用いて、ビジネスや科学の分野で計算機処理を効率的に、低コストで、または高品質で実行できる状態にあるときに達成される。量子コンピューターと古典システムを組み合わせることによって、古典システムだけを使用する場合と比べて、はるかに優れたパフォーマンスを実現できる。

しかし量子優位性は、一度にすべてを変革するような万能薬ではない。むしろ曖昧で、進んだり止まったりを繰り返しながら、最終的にさまざまなビジネス価値をもたらすテクノロジーの波のようなものと言える。それぞれのユースケースには、量子優位性のための、各々のタイムラインがある。どの量子コンピューティング・システム、あるいはエコシステムのパートナーを活用するかによって、タイムラインや優位性は変わってくる。幸いなことに、量子優位性においては、あるユースケースでの成功が別のユースケースに波及するドミノ効果を生むケースも少なくないことが特徴である。

「最初のユースケースを生み出した後、指数関数的な加速が起きる場合がある。
初期のユースケースから学んだことは、他のユースケースにも広く応用できるのだ」

Sabrina Maniscalco
Professor of Quantum Information and Logic, University of Helsinki
CEO, Algorithmiq Oy

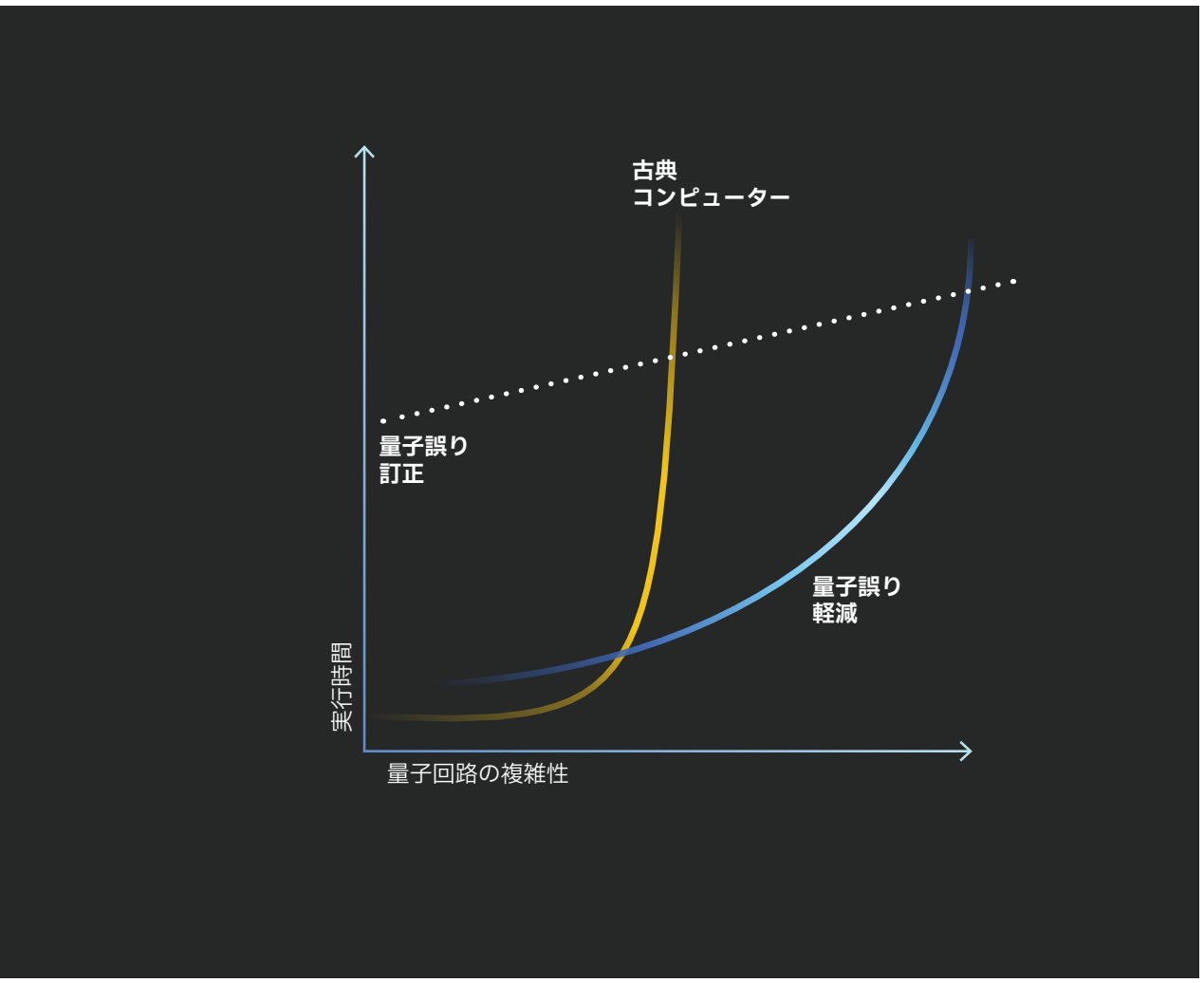


図 14

フォールト・トレラント実現への道のり
量子誤り軽減を
「中継ぎ」として活用

量子的優位性を実現させるために要する時間については、現在のシステムと方向性について、ある程度理解してから、評価すべきである。現段階の量子ビットは、ハードウェアの制約や周囲の環境からの「ノイズ」によってエラーを生じる。量子ビットは絶対零度に近い温度に保たれ、真空中に置いてノイズから守らなければ、光子や振動がデバイスに当たっただけで、その計算結果は台無しになってしまう。熱や周囲からの影響についても同様である。量子コンピューティングは、原子、電子、および、光子レベルでの相互作用のモデルである量子力学という物理学の上に成り立っている事実を、忘れてはならない。環境との組み合わせ次第で、システムが行う処理は、簡単に乱されてしまうだろう。

より正確を期するならば、量子ハードウェアの量子ビットのことを「物理的な量子ビット」と呼ぶべきだ。現在、量子コンピューティングのユースケースは、ある種のアルゴリズムで実現されているが、ノイズの多い物理的な量子ビットを使わない限り実装することはできない。物理的な量子ビットを用いても、初期の量子優位性を達成することは可能であるが、量子コンピューティングの価値を最大限に引き出すためには、論理量子ビットに移行させる必要がある。論理量子ビットは、数百の物理的な量子ビットに対してソフトウェアを組み合わせ、誤り（エラー）訂正を行うことで生成される。このタイプの量子ビットにおいては、基本ハードウェアに影響を及ぼすノイズに由来したエラーを検出し、訂正することができると考えられている。量子誤り訂正の実現は、この 10 年間における非常に重要なテクノロジー上のマイルストーンの 1 つとされている。

実際、一般的な認識では、超多項式的な高速化が証明されている量子アルゴリズムを実装する前に、フォールト・トレラントな量子プロセッサーを構築する必要がある。近年、量子誤り軽減と広義で呼ばれる手法の進化により、このフォールト・トレラントの目標へ向けて、これまでより円滑かつ持続的に進める道筋が見えてきた。これによって、ちょうど古典コンピューターの着実な進化の歴史と同じように、量子ビットのコヒーレンス* や、量子ゲートの忠実度（フィデリティー）**、処理速度が向上し、測定可能な優位性が計算にもたらされる。図 14 は、古典コンピューターと、誤り訂正機能付き量子コンピューター、および誤り軽減機能付き量子コンピューターのそれぞれについて、量子回路の複雑性と実行時間の相関関係を示している。これを見ると、量子誤り訂正の実行時間が十分に短縮されるまでの間、量子誤り軽減が中継ぎ的に役割を果たすことができる。

* コヒーレンスは量子ビットの量子性が保たれていること
** 量子ゲートは量子コンピューティングを構成する基本演算要素のことで、忠実度（フィデリティー）は量子ビットの状態が理想の量子状態にどれだけ近いかを示す

「量子コンピューティングで優位性を実現するためには、その結果に自信を持ち、
信頼できるようにならなければならない。次のように考えてみるとよいだろう。
もし量子コンピューターによって設計されたパラシュートがあったとしても、
それを身に着けて、飛行機から飛び降りることができるだろうか」

「例えば、3 つの異なる量子コンピューターの設備があったとして、
それらは同じ答えを導き出すだろうか。またエラー率や答えの内容は同じだろうか。
同じ結果が得られて初めて、自信を持つことができるようになるだろう」

Peter Tsahalis
CIO of Strategic Services
and Advanced Technology
Wells Fargo

近年では、ゼロ・ノイズ外挿（ZNE）と確率的エラー・キャンセル（PEC）という 2 つの汎用的な誤り軽減方法が開発されたことで、フォールト・トレラントの導入以前であっても、ノイズが多く浅い量子回路から正確な期待値を評価することができるようになった。

ZNE 法は、ノイズ強度が異なる測定結果を外挿することにより、ノイズのある量子回路の期待値に影響するノイズを取り消す手法である。[40]

PEC は、理論や実験の進歩で実証されているとおり、ノイズのある量子コンピューター上で、ノイズのない量子回路の推定量をすでに実現している。[41] こうした進歩の結果、ノイズのあるハードウェア上でも、期待値の精度を高めつつ、回路の規模を拡大できるようになっている。

さらに良いニュースは、こうしたアイデアが理論にとどまっていないことである。IBM はすでに、大規模プロセッサーにおける誤り軽減の有効性について実証を開始している。[42]

これから「Quantum Decade」を進むに際して、徹底的に検討しなければならない重要な問題が 1 つある。量子コンピューティングの成果が古典コンピューティングを超えたとき、どのようにすればそれを評価できるのかという問題である。それは従来の技術やコンピューターで検証できる範囲を、はるかに超えている可能性がある。理論的な研究を行う場合には、この問題はそれほど重要ではないかもしれない。しかし、現実世界に落とし込んだシナリオでは、これは厄介な難題になってしまうのである。

私たちは今、古典的な検証手法から離れ、量子コンピューティングのさまざまな「フレーバー」を利用する必要に迫られている。古典的な検証方法では、現状についていけないからだ。これは量子コンピューター自体が持つ多様性や、異なるエコシステムを評価することを意味する。あるシステムの結果を検証し、定量化することで、信頼性や精度の面で、別のシステムを上回ることができるようになる。これもまた、量子優位性の一連のインパクトの 1 つである。

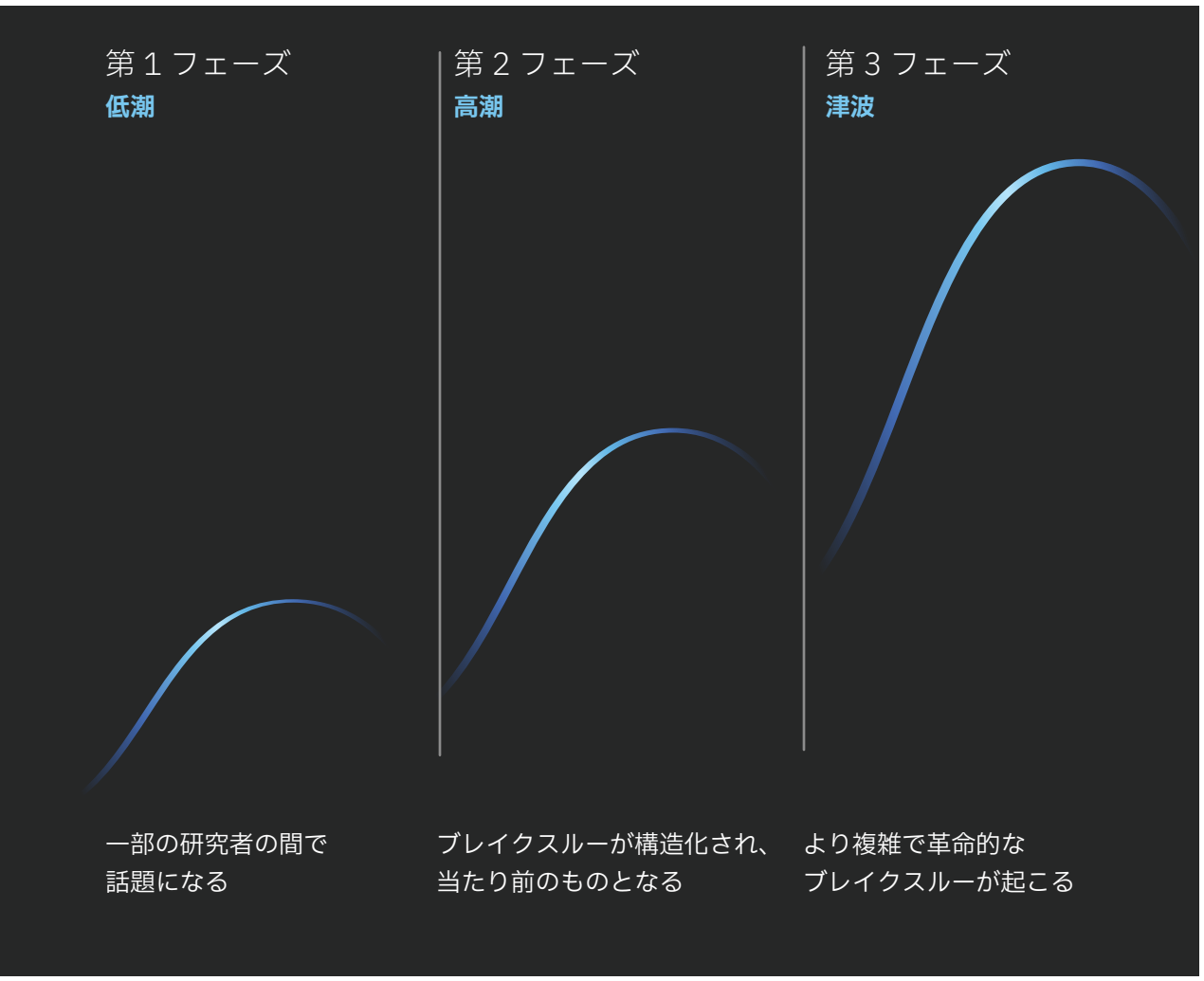


図 15

3 つのインパクト
低潮から津波へ

IBM は、3 つのインパクトが以下のフェーズで到来すると考えている（図 15 参照）。

- **第 1 フェーズ：**一部の業界や学界の研究者の間では知られているものの、世間的にはほとんど認知されていない状態。進取の気質のある人たちは、そのテクノロジーを試してみることで、そこに何らかの価値を見いだす。それから改善策、他分野への応用、新しいアルゴリズムなどを生み出していく。

- **第 2 フェーズ：**ブレイクスルーが定着・構造化され、当たり前のものとなる。量子コンピューティングに関する話題が一般化する状態。エコシステムと連携し、クラウドベースの量子コンピューティング・サービス環境で実験を行い、量子コンピューティングのテストで成功を収める企業・組織が増え始める。

- **第 3 フェーズ：**さまざまなことが変化し、産業の変革が起きる。量子 AI・機械学習が主流となって、より複雑で革命的なブレイクスルーが起こる状態。ここにおいて、「Quantum Decade」は最高潮に達する。誤りを訂正された量子計算の普及と実用化が始まる。

最終的に第 3 フェーズは、企業、エンド・ユーザー、さらには社会全体に、量子優位性の恩恵をもたらす。飛行機を腐食に強い金属で製造し、より安全に、より少ないメンテナンスで飛ばすためには、どうすればよいのだろうか。また医療業界においては、診断、治療、医薬品を今まで以上にパーソナライズするためには、どうすればよいのだろうか（22 ページのお客様事例「IBM と Cleveland Clinic」を参照）。

広い視野で見て比較すると、2010 年に AI があった位置に、現在の量子コンピューティングがあると考えている専門家もいる。このテクノロジーの指数関数的な性質のために、量子コンピューティングは今後さらに急速に発展する可能性がある。

「今から 10 年のうちに、古典コンピューティングで
40 年から 50 年もかかったことが実現するだろう。
1960 年代、70 年代、80 年代のコンピューター・サイエンスはニッチで、
ほとんど『ダーク・アート』のような存在だった。
しかし、2030 年までには、量子コンピューティングの機能について、
特に深い知識がなくても、企業が量子コンピューティングをどのように
利用できるのかを、多くの人が理解できるようになるだろう」

Ilyas Khan
Founder and CEO
Cambridge Quantum Computing

しかし、業界ごとに必要な量子コンピューティングの「キラー・アプリケーション」を見極めるためには、慎重に検討されたユースケースへの投資が必要になる。ここでは、業界ごとの量子コンピューティングの商業的可能性を評価するために、量子コンピューティングが特定の種類の問題の解決にどう役立つかを説明し、各ユースケースに優先順位を付ける方法論的アプローチを解説する。また 73 ページ以降には、業界に即したユースケースやシナリオをまとめた業界別ガイドを掲載する。これは量子コンピューティングが企業にとって、どのような意味を持つかを示す詳細なガイドである。

結局のところ、量子優位性は、どのような結果が出せるかにかかっていると言える。

「結局は、経営層はさまざまな能力を必要としているということだ。
彼らはビジネスへの答えを知りたがるが、それを実現する方法については詳しくなく、
今後もそれは変わらないだろう。ビジネス・リーダーに量子ソリューションを
そのままの形で持っていくことはせず、彼らのビジネスをよりうまく
最適化できる方法と一緒に提供しなければならない」

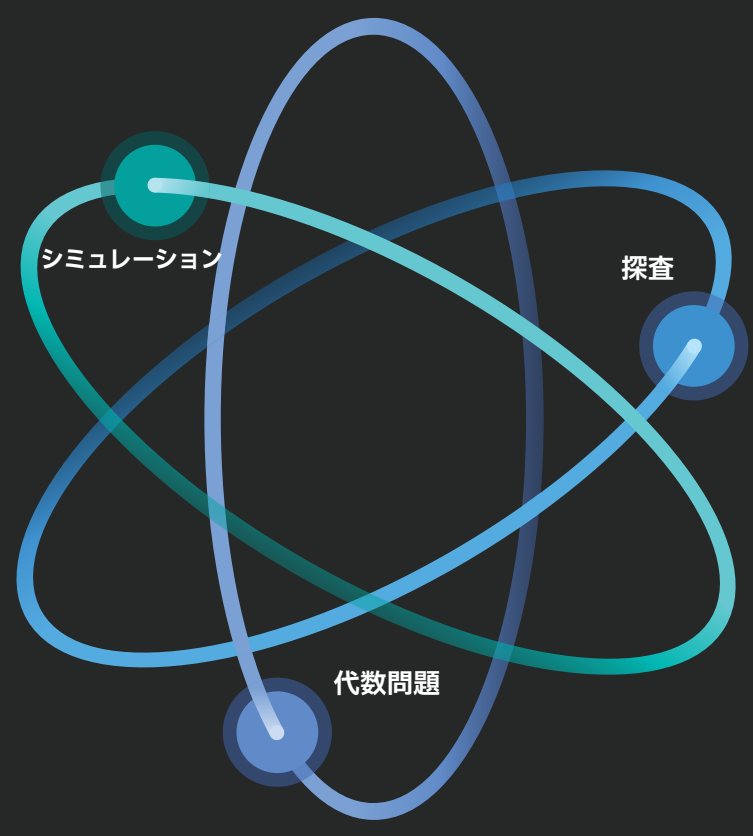
Christopher Savoie
Founder and CEO
Zapata Computing

量子コンピューティングが最も力を発揮する3 種類の領域[43]

量子コンピューターの実用化は、あなたの会社にとってどのような意味を持つだろうか。また、Quantum Advantage の候補になるのはどの領域だろうか。

量子コンピューティングは、短期的および中期的には、シミュレーション、探索、そして代数問題の 3 つの領域で、実用的な価値をもたらす可能性がある（図 16 参照）。

自然現象の量子シミュレーション
量子力学は、自然がどのように振る舞うかを微視的な根幹レベルで説明できる。そのため、量子力学に基づく量子コンピューティングは、自然界で発生するプロセスやシステムのモデル化に適している（お客様事例「IBM 研究者：水の分子シミュレーションを探る」を参照）。



■ シミュレーション
化学
創薬
素材
バッテリー

■ 代数問題
ベンダーや顧客との
適応型取引
意思決定支援
トレーニング

■ 探索
サンプリング
移動や輸送
ロジスティクスや
サプライチェーン
ネットワーク・インフラ
航空管制
業務スケジューリング

図 16
重要な出発点
期待される
量子コンピューティングの
活用方法

IBM 研究者
水の分子シミュレーションを探る[44]

未来に待っているのは、量子コンピューティング単体ではない。むしろ、量子コンピューティング、古典コンピューティング、AI の融合こそが、変革をもたらす力となる。古典的な計算と量子的な計算を自明でない方法で組み合わせ、お互いにトレードオフすることで、それぞれの能力を高め、また利用可能なリソースで実現できることを増やせるだろう。

ここで紹介する方法は、古典的リソースと量子リソースを活用して、量子相関を捉え、量子ハードウェアでシミュレーションできるシステムのサイズを 2 倍にするものである。

IBM の研究者たちは、問題の対称性を利用して、量子回路をより小さな回路に分割する技術を開発した。これにより計算上最も難しい部分を捉え、必要な量子ビット数をそれまでの回路全体の半分に抑えることに成功した。この方法によって、必要な量子ビット数を減らせただけでなく、量子回路をより浅くすることが可能となった。それぞれの小さな回路は、量子コンピューター上で個別に実行され、その出力が古典的な後処理技術を用いて統合される。

研究者たちは、この手法を水の分子シミュレーションで試行した。このケースでは、シミュレーションの難易度が高い部分を、10 個の分子軌道（波動関数）にまで狭めることが可能となった。これらの分子軌道は IBM Quantum プロセッサー上の 5 量子ビットで表現され、今までで最も正確なシミュレーションで分子の基底状態エネルギーを計算することができた。

この手法は、量子コンピューティングと古典コンピューティングを相互運用し、利用可能なリソースでできることを 2 倍にすることで、量子コンピューティング・システムの計算範囲を拡大させるポテンシャルを有している。この手法は、新しい素材を見つけるためのワークフローにも有効である。

探索とグラフ問題

最適化問題を解く鍵は、多くの答えの候補が考えられる状況において、「最善」または「最適」なソリューションを見つけ出すことにある。例として、荷物の配送スケジュールを作ることを考えてみよう。隣接する 1 地点に荷物を配送するスケジュールを作成すると、数学的にはその組み合わせは 360 万通り以上になる。[45] しかし、受取人が指定する時間帯や、遅延の可能性、輸送品の保管可能な期間などの変数を考慮すると、どのスケジュールが最適なソリューションとなり得るのか。たとえ近似法を用いたとしても、古典コンピューターにとっては、この組み合わせの数は探索するにはあまりにも多い（お客様事例「ExxonMobil 社」を参照）。

それゆえ今日の古典コンピューターは、規模の大きな最適化問題を解くときは、さまざまなショートカットを行っている。しかし残念なことに、こうして導かれたソリューションは、最適とは言えないケースが多い。量子探索・グラフの最適化の恩恵を受ける可能性が高い事業分野は、以下を含む。

- 通信事業者のネットワーク・インフラのアップグレード
- 医療機関による、治療法の最適化
- 政府当局の航空管制の改善
- 従業員の業務スケジュールの作成
- 大学の授業スケジュール

量子コンピューターが探索とグラフ問題の解決を指数関数的に高速化するという数学的な証明はまだなされていないが、研究者たちはヒューリスティックにそれを証明しようと試みている。先駆的な企業は、競合他社に先んじるために、量子コンピューティングを使って最適化問題を解決することをすでに検討している。最適化における量子優位性が示されれば、彼らの先見性もまた証明されることになる。

代数問題

代数問題としては、連立一次方程式、微分方程式（業界の問題を解決するために必要な）、機械学習に関連する問題、行列演算などが挙げられる。機械学習の手法や金融分野のオプション価格設定などの数学的な問題は、多次元のパラメーター空間上における関数のマッピングや評価と関連している。

量子コンピューターの量子ビットの状態は、それ自体が複雑な高次元空間であり、古典コンピューターではアクセスできないデータの側面を探ることができる。実際、AI と量子コンピューティングの共生は、両者の発展に好循環をもたらし始めている。例えば、量子アルゴリズムは、データクラスタリングの分野で機械学習を強化することができる。[46] 他方、機械学習は、量子システムについての理解を深めるために利用することができる。[47] この分野で恩恵を受けられる他の例としては、消費財メーカーや小売企業におけるマーケティングオファーのカスタマイズなどが挙げられる（58 ページのお客様事例「IBM Quantum とカリフォルニア大学バークレー校の研究者たち」を参照）。

ExxonMobil 社
世界の輸送ルート最適化への量子コンピューティング活用の研究[48]

日々、何万隻もの商船が海を渡り、私たちの生活に欠かせない物資を運んでいるが、そのルートやスケジュールはどのように調整されているのだろうか。世界の貿易の約 9 割は、海上輸送に依存している。1 隻当たり最大 2 万個ものコンテナを積んだ 5 万隻以上の船が、毎日 14 兆ドル相当の商品を運んでいる。

これほどの国際的な規模の航路を最適化することは、古典コンピューターの能力では困難だ。ExxonMobil 社と IBM の共同研究チームは、この問題に対処するため、最適化問題を量子コンピューターに効果的にマッピングする方法を研究している。

2019 年、ExxonMobil 社は、エネルギー企業として初めて、IBM Quantum Network に参加した。これは先進的な量子コンピューティングのシステムとツールへのアクセスを提供された組織からなるコンソーシアムである。ExxonMobil 社は、このネットワークのケイパビリティを活用して、世界中の商船の経路を量子コンピューターにマッピングする方法を検討している。

量子アルゴリズムの強みは、不正解なソリューションを減らしつつ、正しいソリューションを増幅させることができる点にある。ExxonMobil 社は、Qiskit の量子最適化モジュールを用いて、さまざまな量子アルゴリズムのテストを行った。その結果、問題の性質によって、ヒューリスティックな量子アルゴリズムは、他のアルゴリズムよりも若干優れていることが分かった。また VQE（Variational Quantum Eigensolver：変分量子固有値ソルバー）ベースの最適化は、選択されたアンザッツ（経験則に基づく推測や仮定を意味する物理学用語）に応じて、さらに優れたパフォーマンスを示した。

これらの研究は、時間的な制約条件のある他の業界やユースケースにも簡単に応用できる。具体的には、商品配送、ライドシェア・サービス、都市の廃棄物処理などだ。

IBM Quantum とカリフォルニア大学バークレー校の研究者たち

量子機械学習に向けての、勝利のアルゴリズム[49]

量子コンピューティング環境における機械学習は、研究者にとって興味深い研究対象だ。ここ数年の間、研究者たちは古典的なアルゴリズムに対する量子スピードアップが見込まれる、量子機械学習アルゴリズムを提案してきた。[50] これらの学習アルゴリズムのほとんどは、コヒーレントな量子力学的状態となったデータへのアクセスを仮定している。しかし、現在の世の中は、まだ古典的なデータによって動いている。

IBM Quantum とカリフォルニア大学バークレー校の研究者たちは、古典コンピューターでは扱うのが難しい回路を見つける可能性を探っている。またそれを利用して、古典的なデータへのアクセスだけを要する機械学習タスクにおいても優位性を示せる可能性を探っている。

教師あり機械学習の場合、この事例の研究者たちは、データをより高次元の空間、いわゆる特徴空間にマッピングする。複数の量子ビットからなる状態の空間は、それ自体がリッチで高次元である。つまり量子環境では、データは自然にそのような高次元に引き上げられる。

研究者たちは、量子回路を用いて、古典的データを複数の量子ビットからなる高次元空間にマッピングし、データ間の類似性を表す指標である量子カーネルを推定した。次に、推定されたカーネルを用いて、古典的なサポート・ベクター・マシンで、データを分離するサポート・ベクターを計算した。

2020 年末、研究者たちは、古典的データへのアクセスだけでも、量子特徴マップ回路が、考えられるあらゆる古典的な二項分類器に対して、量子優位性を有することを明確に証明した。これは将来予測や、データの特徴に基づく特性の予想、リスク分析などの応用に役立つ可能性がある。機械学習における量子優位性が、理論的に正式に証明されたのは、これが初めてのことだ。

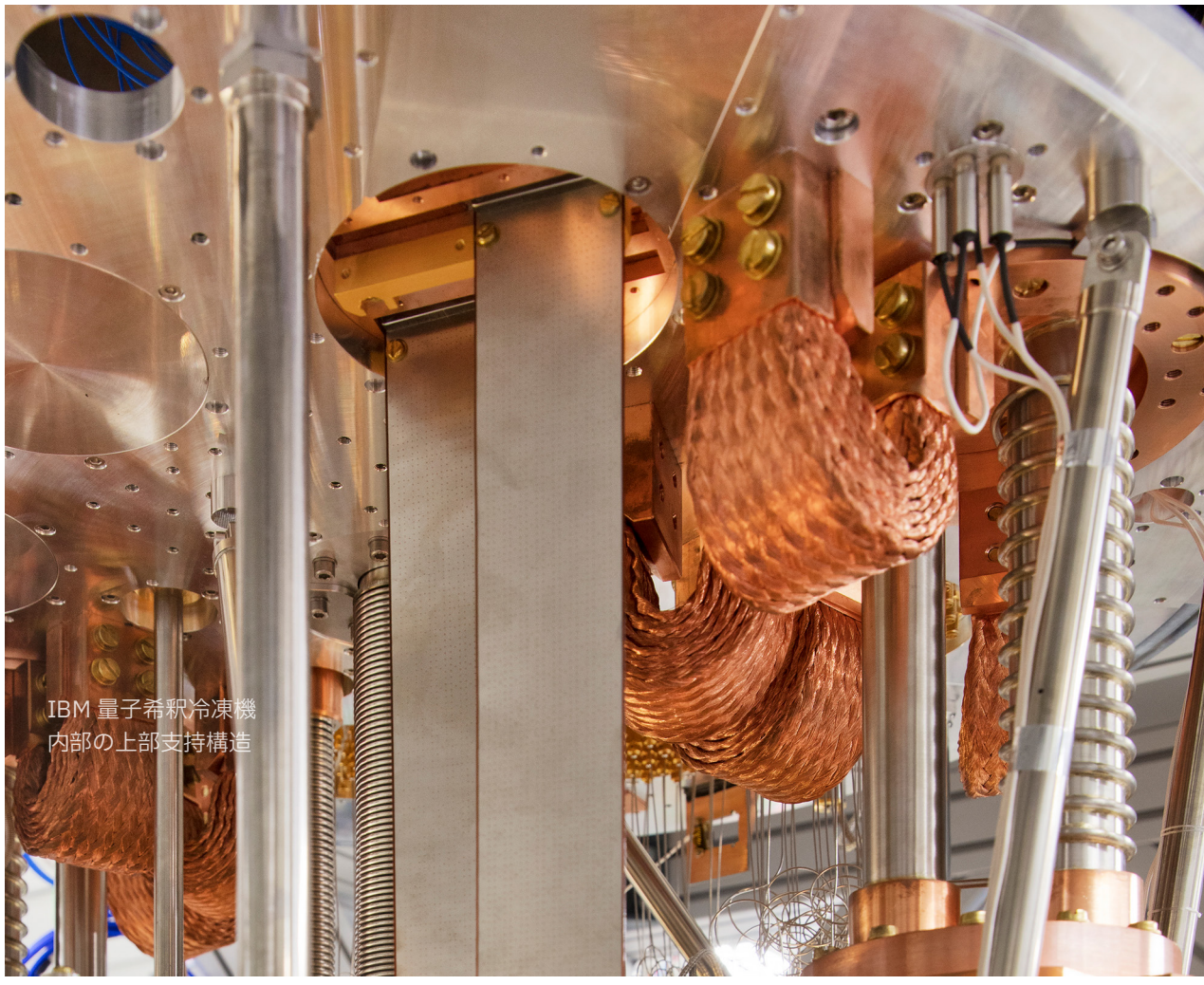
量子高速化への
たゆまぬ探求

量子コンピューティングはどのような問題解決に有効なのだろうか。この点に関しては現在、研究が活発に行われており、本レポートでも深く掘り下げる。これまで取り上げた 3 つの主要な領域は、高速化に関する時間軸や展望がそれぞれ異なっており、それに応じて量子コンピューティングがもたらす計算上の優位性がどう変わってくるのかを見ていく。

自然現象の量子シミュレーションでは、化学や物理学、生物学、材料科学といった自然科学分野における量子力学系の特性（エネルギー特性など）を計算する。物質を表現するために必要な電子配置は、組み合わせが増加していく上、非古典的な相関関係（量子もつれ）を持つことが多い。

量子コンピューティングは、量子もつれの状態を効率的に表現することができる。量子もつれは量子力学の重要な特性であり、古典コンピューターで表現するには計算リソースを指数関数的に増やす必要がある。時間発展のシミュレーションは、量子コンピューターでは多項式時間のコストで計算される。基底状態や熱状態を解明する場合などでは、一般的には指数関数的な高速化は保証されていない。しかし、局所的な相互作用のある自然系では、指数関数的な高速化を実現できるという見方が強い。

探索・グラフの問題では、振幅推定や振幅増幅といった、二次的加速を実現する量子アルゴリズムや、量子ハミルトニアンを使ったヒューリスティックなアルゴリズムを利用する。現在利用可能なアルゴリズムは、探索や最適化を指数関数的に高速化することはできないものの、わずかな高速化でも大きなコスト削減をもたらす金融やロジスティクスの業界で業務に応用することはできる。



IBM 量子希釈冷凍機
内部の上部支持構造

代数に関する問題では、量子計算によってアクセスできる大規模なパラメーター空間を利用する。カーネル法（2つのデータ間の類似度測定）を使用すれば、量子回路による非線形マッピングを通じて、ユーザー・データを表現し、量子拡張された特徴空間にマッピングすることができる。これによりユーザーは、データの関係性を単純な線形分類で明らかにすることが可能となる。

量子カーネル法では、指数関数的な高速化を実現できることが証明されている。[51] つまり、機械学習のアプローチが有効な領域であっても、データ構造が複雑過ぎて古典的な分類法では対応が困難な場合に、量子カーネル法の適用を拡大できることが示唆されている。非線形微分方程式は、重ね合わせの原理に従わない相互依存的な解に依拠することから、このカテゴリーに含まれる。

量子コンピューターを使って電子構造問題の正確なシミュレーションを行う場合は、相関エネルギーへのすべての寄与を把握するために、深い量子回路が必要になることが多い。相関の強い小さな分子系であっても同様だ。量子カーネルを表現できる各種の量子回路ファミリーも存在する。これらのカーネルは、古典コンピューターを使ってシミュレーションするのは難しいが、電子構造問題に比べると、浅い量子コンピューターでシミュレーションできる可能性がある。こうした観点から考えると、機械学習アプリケーションに関しては、量子優位性を達成するまでの道のりが比較的短いと言えるかもしれない。

今後の課題として、量子優位性の提供が約束されている化学分野および機械学習分野の各種問題について、実行時間の分析の徹底的な比較を行うことが必要だ。

以上をまとめると、業界に多大な価値を提供し、なおかつ量子コンピューターがもたらす追加的な計算能力を活用できそうなユースケースを、IBM はいくつか特定した。量子コンピューターによるメリットを最大限、享受できるのは、量子優位性について最も大きなポテンシャルを秘めるアプリケーションである。古典的手法と比べた計算速度の向上が最も大きくなる可能性があるためだ。

量子優位性の応用研究で特に有望とみられる 2 つの分野は、複雑な構造を持つデータの処理と、自然現象のシミュレーションである。これに続く第 3 の分野は探索と最適化であり、古典的なアプローチから若干ではあるが、改善が期待できる。それがささやかな進歩やイノベーションであっても、メリットとして活用できるユースケースが多数存在するため、この分野が優先度の高い研究領域であることに変わりはない。

量子機械学習アルゴリズムは回路の構成・深さの特性上、自然現象のシミュレーションに使用されるアルゴリズムよりも早く、過去の古典的手法と張り合う存在になるだろう。量子・古典の両コンポーネントを活用しながら誤り緩和も利用するアルゴリズム手法が新たにいくつも登場している。それによって現在、上記のユースケースで量子コンピューティングの活用を検討することが可能となり、同時に将来に向けたユーザーの準備を後押ししている。

IBM とボーイング（Boeing）社
古典リソースと量子リソースをハイブリッドに組み合わせることで、腐食のメカニズムを解明する量子化学研究を推進[52]

耐食性が高い材料の設計は、航空機の保守を容易にするために重要なタスクだが、このような新材料の実験は、非常に高コストであったり、現実的でなかったりする場合も多い。数値シミュレーションならば、実験材料を構成する分子系をモデル化して研究したいと思っている研究者にとって、はるかに実用的な代替手段となり得る。しかし、古典コンピューターでは分子系の近似的なシミュレーションしか実施できず、分子系の規模が大きくなるほど、近似値の精度は低下していく。

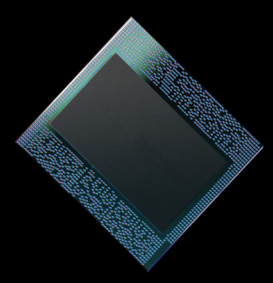
一方、量子コンピューターなら、非常に複雑な分子系でも正確なシミュレーションを計算できる可能性がある。しかし、そのような分子系は規模が大き過ぎて、現世代の量子ハードウェアでは一度にシミュレーションできない場合もある。そのため研究者たちは、「回路ニッティング*」と呼ばれる技術を使用し、大きな分子系をより小さなシミュレーション問題に分割している。

例えば量子埋め込みのような回路ニッティングの技術を利用すると、量子コンピューターの処理能力を、シミュレーション問題全体のうちの扱いやすい部分に集中させることが可能になる。また、回路ニッティングと古典的な前処理および後処理技術（化学反応時に化学系のどの部分が活性空間に含まれるかを特定できる活性空間選択など）を組み合わせれば、その解を外挿して系全体の特性を把握することも可能になる。

IBM とボーイング社の研究者が協力して開発した活性空間選択の自動化手法は、腐食だけでなく、物質の表面上で発生するあらゆる化学反応の研究用途に適している。指定された活性空間への局所的な埋め込みを活用することにより、変分量子アルゴリズムを使ってマグネシウム表面での水分子の分解を研究することも可能になった。これは当時、表面反応を調べるために量子アルゴリズムが使用された世界初の研究例の 1 つとなった。

* 回路ニッティングとは、古典計算を取り込んで量子回路の計算負荷を部分的に担当させ、どちらか一方だけでは達成できないような計算を行う手法

IBM と JSR
量子コンピューティングが形作る コンピューター・チップ製造の 未来を探究[53]



今日のコンピューターは、ますます小型化し、高性能化し続けている。著名なエンジニアで実業家でもあるゴードン・ムーア氏は 1965 年、少なくとも 10 年間は、1 つのコンピューター・チップに搭載されるトランジスターの数が 2 年ごとに倍増していくだろうと予測した。この予測は現実のものとなり、期間は 10 年にとどまらなかった。以来、優秀なエンジニアたちは、後に「ムーアの法則」として知られることになる、この 2 年ごとのマイルストーンを達成し続けてきたのである。

ムーアの法則の正確さを保つことが可能となったのは、化学的領域における、ある驚くべき工夫によるところが大きい。1980 年代、IBM のチームはフォトレジストと呼ばれる特殊な感光性材料を使ってチップにトランジスターを印刷する新手法を発見した。この技術はすぐに普及し、日本のテクノロジー企業である JSR は、世界有数のフォトレジスト・メーカーに台頭した。IBM と JSR の研究者は現在、この分野をさらに発展させていくために量子コンピューティングをどう活用できるのかについて共同で調査している。

フォトレジストとは、ひも状の長い分子と感光性分子との混合物であり、光の照射によって半導体の上に回路パターンを形成する。JSR のような企業は、絶えず新たに改良されたフォトレジスト分子の設計を行っているが、このプロセスには多くのコストと時間がかかる。また、現代のスーパーコンピューターで分子系の量子現象のシミュレーションを実施するのは難しく、新しいフォトレジストがどのような挙動を示すかは、実環境でテストしてみなければ予測しにくい。

量子力学の法則を利用して計算を行う量子コンピューターは、大きな効率化を実現できる可能性がある。このテクノロジーはまだまだ発展途上にあるが、IBM と JSR の研究者は 2022 年の論文で、「IBM Quantum」のハードウェアを使用し、フォトレジストの一部を模した小さな分子のシミュレーションを実施している。この分野の研究を続けることが、ムーアの法則を将来にわたって長く持続させるための鍵となるかもしれない。

ビジネス価値の実現につながる量子コンピューティングを活用したユースケースの峻別・優先順位付けとは[54]

「すべては“キラー・アプリケーション（ビジネス価値を実現するユースケース）”と、量子コンピューティングが産業界のどのような問題を解決できるかが重要である。インターネットの黎明期のように明白ではないかもしれないが、重要なのは突飛で難解な問題への着目ではなく、実現性がある現実的なユースケースの特定と実装なのである」

Todd Hughes
Technical Director, Strategic Projects and Initiatives
CACI

量子コンピューティング･アプリケーションがビジネスに与える潜在的影響を評価するのは難しい。それはこの新たなテクノロジーの複雑さによるところが大きいだろう。したがって、各社は、まずどの量子コンピューティング･アプリケーションが自社にとって最適なビジネス上のメリットをもたらし得るのか、評価する方法を見いだす必要があるだろう。

こうした状況 / 課題解決に役立つのが、量子コンピューティングの「Prioritization Framework（優先順位設定マトリックス）」というフレームワークである。このマトリックスを使用することで、戦略、オペレーション、イノベーション、IT、リスクなどのさまざまな分野の経営層は、量子コンピューティングを早期導入してから本格的な活用へと移行することを念頭に、量子コンピューティングが自社ビジネスに与え得る影響を評価し、量子コンピューティング･アプリケーションの優先順位を設定し、さらに量子優位性を測定することが可能となる。

優先順位設定マトリックスにおいて、量子コンピューティング･アプリケーションは以下の 4 つの特徴的なカテゴリーに分類される。

「早期結実（Early Bloomer）」
直近でのテクニカル・フィージビリティーが高く、
実装を行うことが推奨されるアプリケーション

「大器晩成（Late Bloomer）」
将来的に、大きな Quantum Advantage をもたらすことが
期待されるアプリケーション

「ワイルド・カード（Wild Card）」
将来的に、ビジネス優位性をもたらす可能性があるものの、
その確証がまだ見いだされていない（大化けする可能性がある）
アプリケーション

「成熟業界（Mature Industry）」
直近でのテクニカル・フィージビリティーが高く、
またビジネス上での相応の規模での競争優位性が
期待されるアプリケーション

検証済みの
優先順位設定
マトリックス[55]

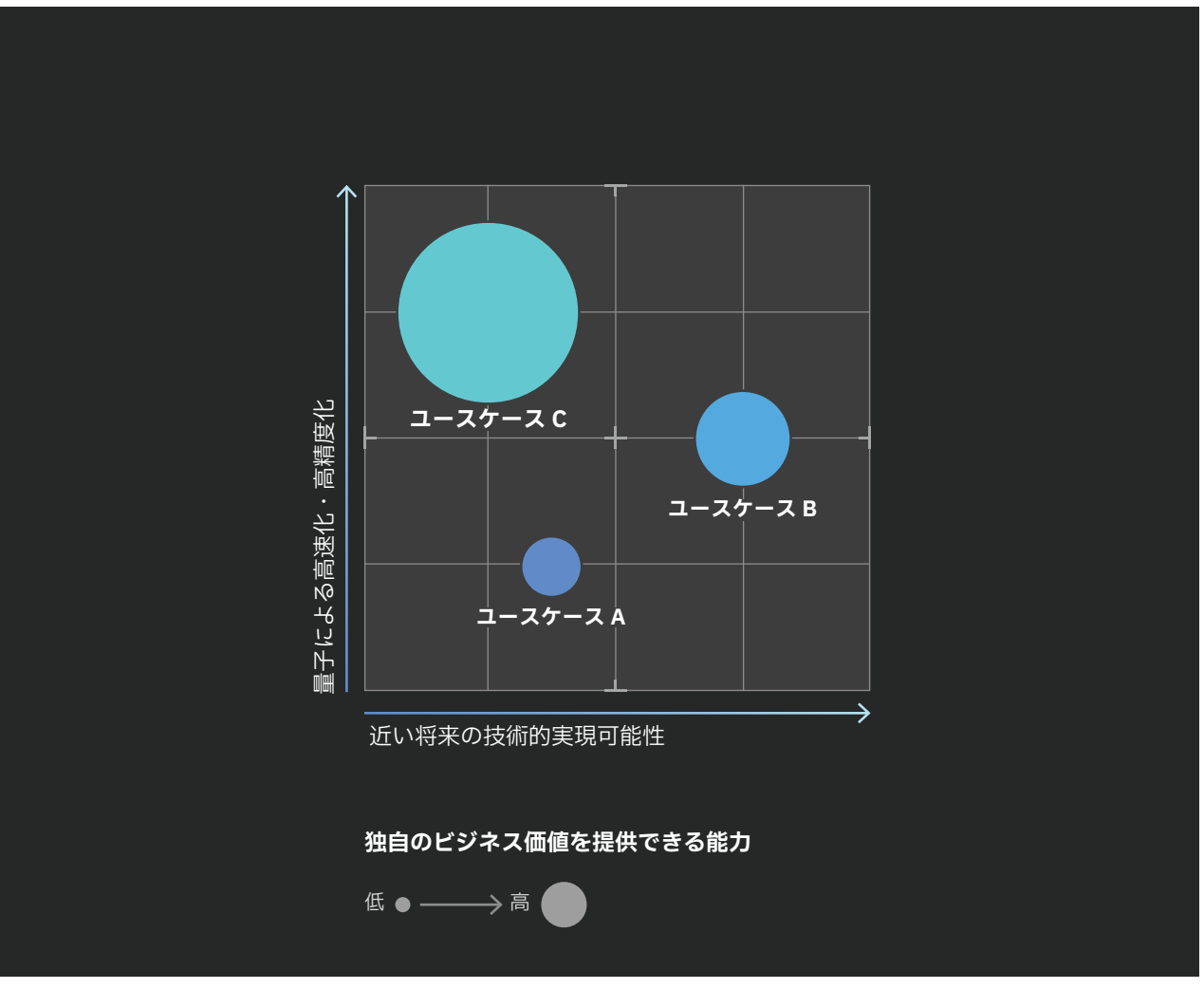


図 17

Quantum Prioritization Framework（量子優先順位設定マトリックス）
意思決定における、高速化・高精度化と技術的実現可能性のトレードオフを視覚的に表現

量子コンピューティングの「Prioritization Framework（優先順位設定マトリックス）」は、経営層が以下の 3 つの視点から各アプリケーションを評価するのに役立つ（図 17 参照）。

量子による高速化・高精度化
従来型コンピューティングに対しての
当該量子コンピューティング・アプリケーションの
技術的優位性の度合い（Y 軸）

近い将来の技術的実現可能性
直近でのテクニカル・フィージビリティー（X 軸）

独自のビジネス価値を提供できる能力
特定の企業に、独自のビジネス価値をもたらす能力
（円の大きさ）

この方法で量子コンピューティング・アプリケーションの優先順位を設定することによって、完全な形でポートフォリオの俯瞰を提示し、自社の意思決定により発生するトレードオフを可視化することができる。その結果、経営層は、これまで以上に的確な情報に加え、早期商用化戦略やコスト最適化アプローチの実践、業界の創造的破壊者としての振る舞い方など、自社の戦略的優先事項に基づいた、量子コンピューティング導入に関する適切な意思決定が可能となる。

Y 軸：量子による高速化・高精度化の度合い

量子優位性とは何よりもまず、今日の従来型コンピューターの処理能力の限界により、現時点では解決不可能、または極めて高コストとなってしまうような、特定のビジネス課題に効率的に対処することを保証するものである。[56] したがって、そのような観点から、特定のアプリケーションが量子優先順位設定マトリックスの Y 軸上のどの位置に来るかは、量子コンピューティング・アルゴリズムが従来型ソリューションと比べ、理論上どれほどの改善を実現できる見込みがあるかによって決まる。

個別のアプリケーションの量子優位性は、さまざまな形態で出現する。例えば、最適解を探し出すまでの実行時間の短縮や、より優れた問題解決アプローチによる精度の向上などが該当するだろう。

X 軸：近い将来の技術的実現可能性

量子優先順位設定マトリックスの X 軸は、グラフ上に特定された各アプリケーションを適切に実行するために必要となる量子ハードウェアおよびソフトウェアなどの技術的要件を表す。特に重要な点は、想定される量子ビットとパフォーマンスの要件である。X 軸上での位置は、チップやアルゴリズムの設計、量子ビットの相互接続性、コード内で使われているゲートや量子ビットの数、またコンパイラーの効率性といった、量子コンピューティング・ハードウェアおよびソフトウェアに関するその他の検討項目によっても影響されるだろう。

量子コンピューティング技術は黎明期にあるものの Quantum Approximate Optimization Algorithm（QAOA：量子近似最適化アルゴリズム）や Quantum Support Vector Machine（QSVM：量子サポート・ベクター・マシン）のような一部のアルゴリズムは、必要とされる量子コンピューター・ハードウェア、特に、回路の Depth（深さ）の要件が浅いことから、近い将来の実システムで力を発揮することが期待されている。その一方で、これ以外のアルゴリズムは、より高度な問題に対応するため、より成熟したシステムを必要とするだろう。[57]

円の大きさ：ビジネスへの影響

各アプリケーションは、特定の企業のビジネスに影響をもたらすことが期待されているのであるが、量子優先順位設定マトリックスの第 3 の視点は、そういった影響の規模に基づいて設定される。この視点には、各企業が独自に選定するビジネスの評価基準も組み込まれる。そのような各企業における選定プロセスにおいて、ビジネスへの影響を吟味することは、単なる経済的効果の測定にとどまらない面があることは認識しておくべきであろう。

評価基準は、市場での成果や競争の結果、および当該企業（自社）の財務上の影響をブレンドしたものでなければならない。自社の戦略目標に応じて、例えば、バリュー・チェーンの強化、オペレーションの改善、市場の創造的破壊とイノベーション、市場シェアの拡大、収益の生成、コストの削減、リスクの緩和などの各指標の値をこの視点に含めることが考えられる。

量子コンピューティング・アプリケーションの分類[58]

先に述べたように、Quantum Prioritization Framework（量子優先順位設定マトリックス）を利用することで、4 つの量子コンピューティング･アプリケーションのカテゴリーを浮き彫りにすることができる。すなわち、「早期結実（Early Bloomer）」、「大器晩成（Late Bloomer）」、「ワイルド･カード（Wild Card）」、および「成熟業界（Mature Industry）」アプリケーションである（図 18 参照）。これらのアプリケーションの多様な組み合わせをあらかじめ特定しておくことは、本テクノロジー領域の急激な進化に対し企業がすばやく対応するための備えとして有用である（68 ページの「視点：量子優先順位設定マトリックスの適用」を参照）。

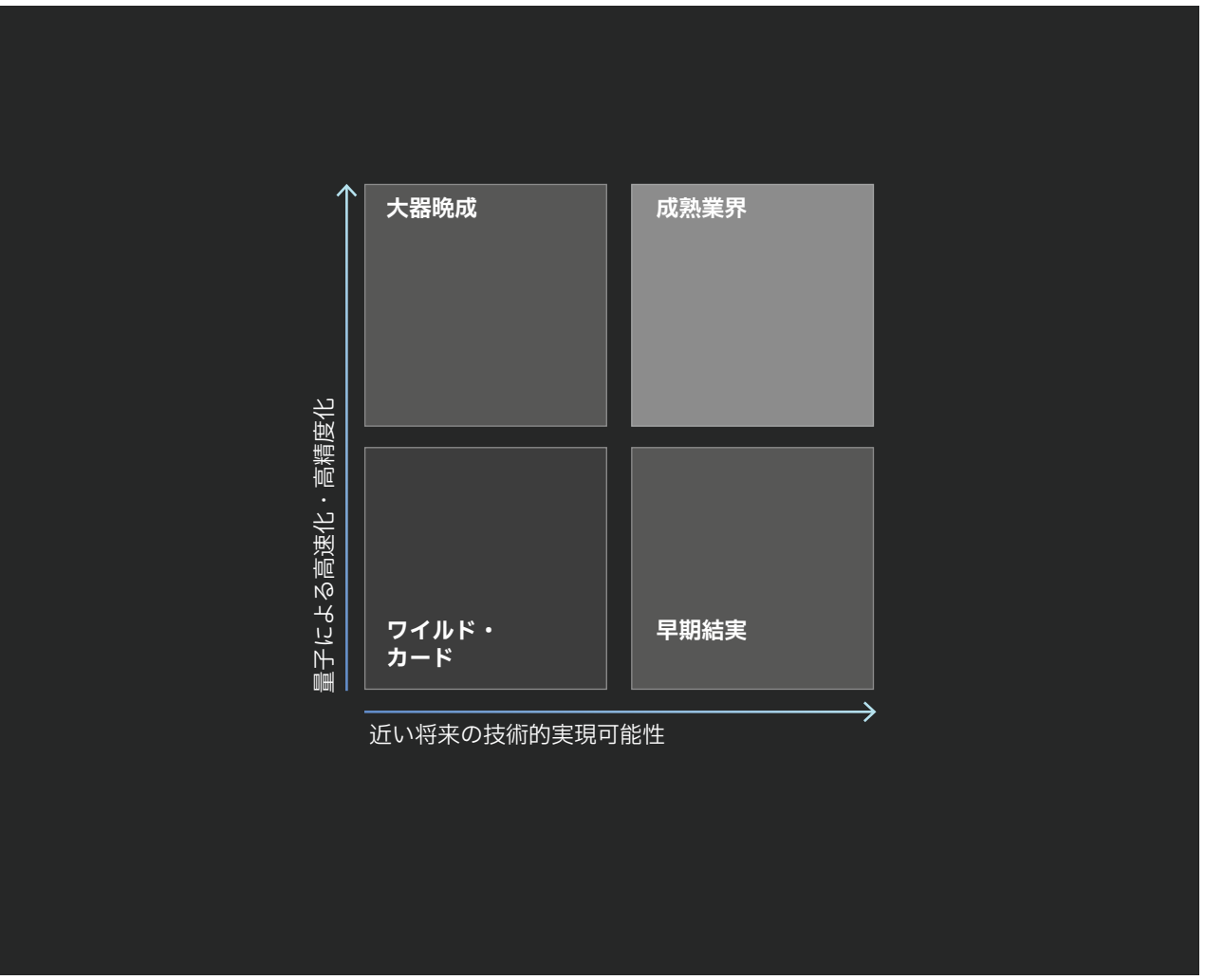


図 18

量子コンピューティング・アプリケーションのカテゴリー
多様なアプリケーションの評価・構築を通じて、量子コンピューティングへの迅速な対応を実現

早期結実（Early Bloomer）

「早期結実」に相当するアプリケーションには、極めて明白な効果がある。「早期結実」アプリケーションは、既存テクノロジーを利用しつつ運用されることから、その導入は、量子コンピューティングの活用方法を習熟する段階にある企業にとっては有意義なプロセスとなる。これらのアプリケーションを使用することは、企業が、量子コンピューティングを現在のビジネス・プロセスに統合し、さらなる量子コンピューティングの導入に向けてはずみをつける方法を理解するのにも役立つ。市場での地位を維持するためには、「早期結実」アプリケーションを他社に先駆けて最初に導入することが重要である。これらに属するアプリケーションは、競争力を保つ最低限の要件を満たすために有効だからである。

大器晩成（Late Bloomer）

「大器晩成」に相当するアプリケーションには、「イノベーターのジレンマ」問題が伴う。これらのアプリケーションは大いなる Quantum Advantage を保証はするが、同時に重要なビジネス課題を解決するためにさらに高度な量子技術をも要求する。「大器晩成」アプリケーションは、将来のビジネス価値に大幅な影響を及ぼすことで、特定の業界における競争を変革できる可能性がある。「大器晩成」アプリケーションが技術的に実現できる時期の見込みは相対的に不透明なため、企業は常に量子コンピューティング開発の進展を注視し続けなければならない。新たな量子コンピューティング・アルゴリズムやハードウェア・アプローチを利用できれば、「大器晩成」アプリケーションの技術的実現可能性は一気に高まるだろう。企業のバリュー・チェーンに多大な影響をもたらすことが想定されるため、「大器晩成」の量子コンピューティング・アプリケーションを最初に見いだし、実装した企業は、競争において圧倒的な成功を収める可能性がある。

ワイルド・カード（Wild Card）

「ワイルド・カード」に相当するアプリケーションは、現時点において、「大器晩成」アプリケーションほどの革新的な影響、Quantum Advantage をシンプルに実現できる見込みがあるわけでも、「早期結実」アプリケーションほど早期の技術的実現可能性が高いわけでもない。「ワイルド・カード」アプリケーションはうまくいく可能性もあるが、その保証はない。だが、これらを評価することは、量子コンピューティングの持つ属性が自社の将来的な成功に有用であるかどうかを把握するためには役立つ。これらのアプリケーションはいわゆる「大穴」のようなものであると言えるが、可能性を完全に排除するべきではない。今後、量子技術の進化とともに、「ワイルド・カード」アプリケーションは「早期結実」アプリケーションや「大器晩成」アプリケーションに変化する可能性もあるからだ。

成熟業界（Mature Industry）

「成熟業界」に相当するアプリケーションは、量子コンピューティングを活用する企業にとって究極の目標である。確かにいまだ、どのアプリケーションについても実際のビジネス上の観点から Quantum Advantage に到達したわけではない。しかし、例えば、量子コンピューターが十分なスケールを達成し、量子コンピューティング・アプリケーションが競争上の価値を示すことができれば、将来的に一部のアプリケーションはビジネス優位性をもたらし、企業の業務モデルや業界のバリュー・チェーンを変革することができるだろう。目下開発中のアプリケーションによって、当の開発企業が将来、市場で覇権を握るかもしれないという想定も、あながち夢物語とは言えまい。

視点
量子優先順位設定マトリックスの適用[59]

量子優先順位設定マトリックスの仕組みを説明するため、ある金融サービス取引機関によって実施された実際の量子コンピューティング・アプリケーションの調査の例を見てみよう。この金融機関は、従来型マシンで対応することが難しく量子コンピューティングによる改善が期待されている、以下の４つの用途を特定した。

1. バリュー・アット・リスク分析

より正確なリスク・シミュレーション・モデルの開発により、リスク緩和策を強化する。

2. デリバティブの価格設定

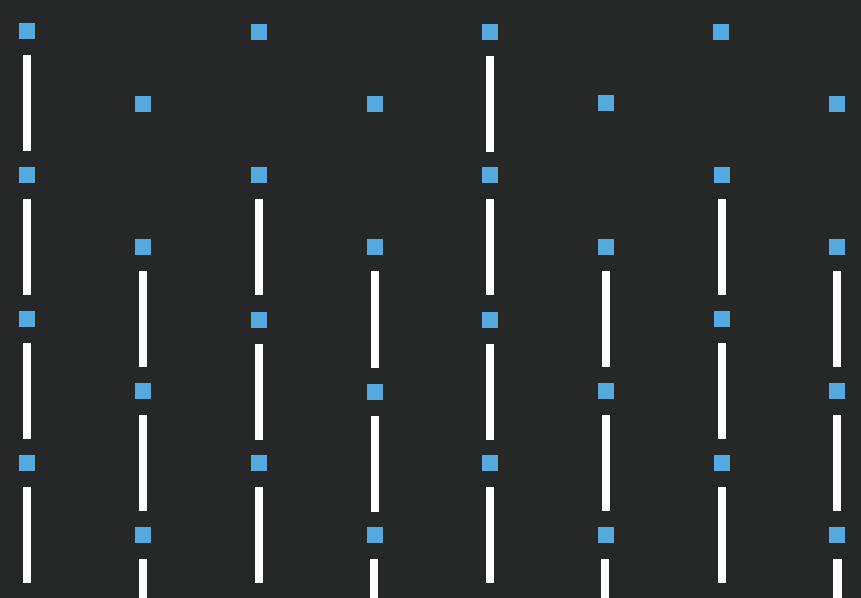
市場シナリオ・シミュレーションにより、金融資産の価格設定を改善する。

3. 不正検知

不正取引や詐欺行為にフラグを付け、異常パターンの検知を強化する。

4. 信用・資産スコアリング

顧客の支払能力や債券格付けのセグメンテーションに必要な、統計分析を強化する。

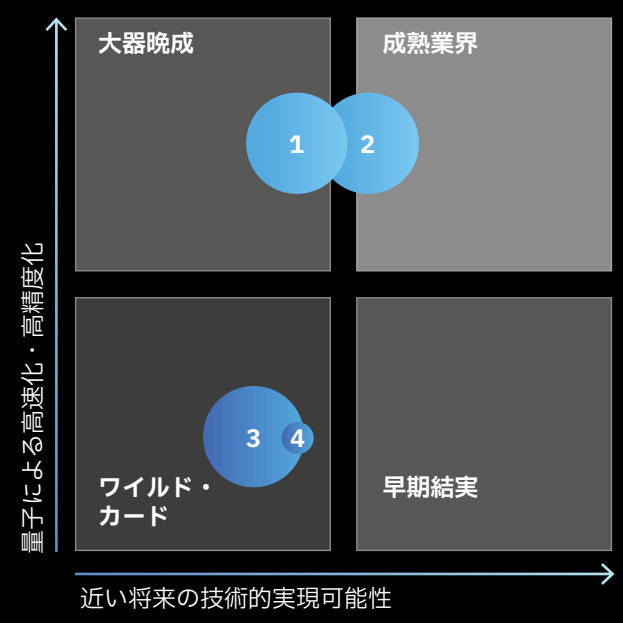


これらの有望なアプリケーションが持つ諸課題は、それぞれ対応する量子コンピューティング・アルゴリズムによって解決可能となるが、この各アルゴリズムによって、量子による高速化・高精度化のレベルや技術的実現可能性のレベルも特定できるようになるのである（図参照）。

ーバリュー・アット・リスク分析とデリバティブの価格設定は、量子振幅推定ツール（QAE）というシミュレーション・アルゴリズムを使うことで解決したり、シナリオを推定したりすることが可能である。この種のアルゴリズムは、二次関数的高速化を実現してソリューションの質を改善するのだが、そのために成熟した量子コンピューティング・システムを必要とする。このアルゴリズムと関連するアプリケーションは通常、「大器晩成」のカテゴリーとして位置づけられる。

ー不正検知および信用・資産スコアリングは、分類および予測用の機械学習アルゴリズム（QSVM）によって解決可能である。この種のアルゴリズムは、近い将来の量子システム上で実行したり、精度を高めたりすることができる。ただし、これらのアプリケーションは通常「ワイルド・カード」として位置づけられるため、量子システムの能力の拡大に伴い、都度メリットを検証する必要がある。

これらの一連のアプリケーションが全体として金融サービス業界にもたらすビジネス価値は、導入初年度から 100 億米ドルを超える可能性がある。[60] そしてそのうち半分以上が不正検知の強化とマネー・ロンダリングによる資金損失の削減をするだけで、実現できると考えられている。



4 つの量子アプリケーション

1. バリュー・アット・リスク分析
2. デリバティブの価格設定
3. 不正検知
4. 信用・資産スコアリング

関連アルゴリズム

- QAE
- QSVM

量子優先順位設定マトリックスの適用
4 つの金融アプリケーションを例に

視点

ビジネス価値を実現するための道筋[61]

ここでは、量子コンピューティングによるビジネス価値を実現するためのポートフォリオを構築する 5 つのステップを紹介する

ステップ 1

量子コンピューティング能力を獲得する。

必要な一連のスキルの獲得方法として、人材による直接獲得か、コンサルタントの雇用か、あるいは、既存の量子コンピューティング・エコシステムに参加し、そのスキルにアクセスする方法を採るか、決定する。

ステップ 2

有望な量子コンピューティング・アプリケーションを特定する。

リソースの制約、あるいは最適化のための大規模計算の必要性から、量子コンピューティング独自の能力に基づいてメリットを得られる可能性の高い、ビジネス課題・機会を選定する。

ステップ 3

各アプリケーションを量子優先順位設定マトリックス上に位置づける。

提案されている各アプリケーションのテクノロジー特性を評価する。その際、最先端の量子コンピューティング・ハードウェアおよびアルゴリズムを使用して、量子による高速化・高精度化の可能性（Y 軸）、および近い将来の技術的実現可能性（X 軸）の両方を考慮する。

ステップ 4

期待されるビジネスへの影響を見定める。

各々のアプリケーションによってもたらされる可能性がある競争優位性と、自社において期待される財務上のメリットとを分析することで、予測されるビジネスへの影響度を検証する。

ステップ 5

量子コンピューティングの導入を計画する。

量子コンピューターへのアクセス権利を獲得するか、あるいはパートナーシップを通じて最新の量子コンピューティング技術を利用するかを決定する。プロセスの再設計やリソースの割り当て調整が必要になる可能性を含め、社内ワークフローに対する量子コンピューティングのインパクト・プランを策定する。

以下の質問の答えを用意しよう

質問 1

自社は、量子優位性の「3 フェーズ」のどこに位置するだろうか？

質問 2

第 2 章で取り上げた、産業界に存在する解決が難しいとされている問題について考えてみよう。

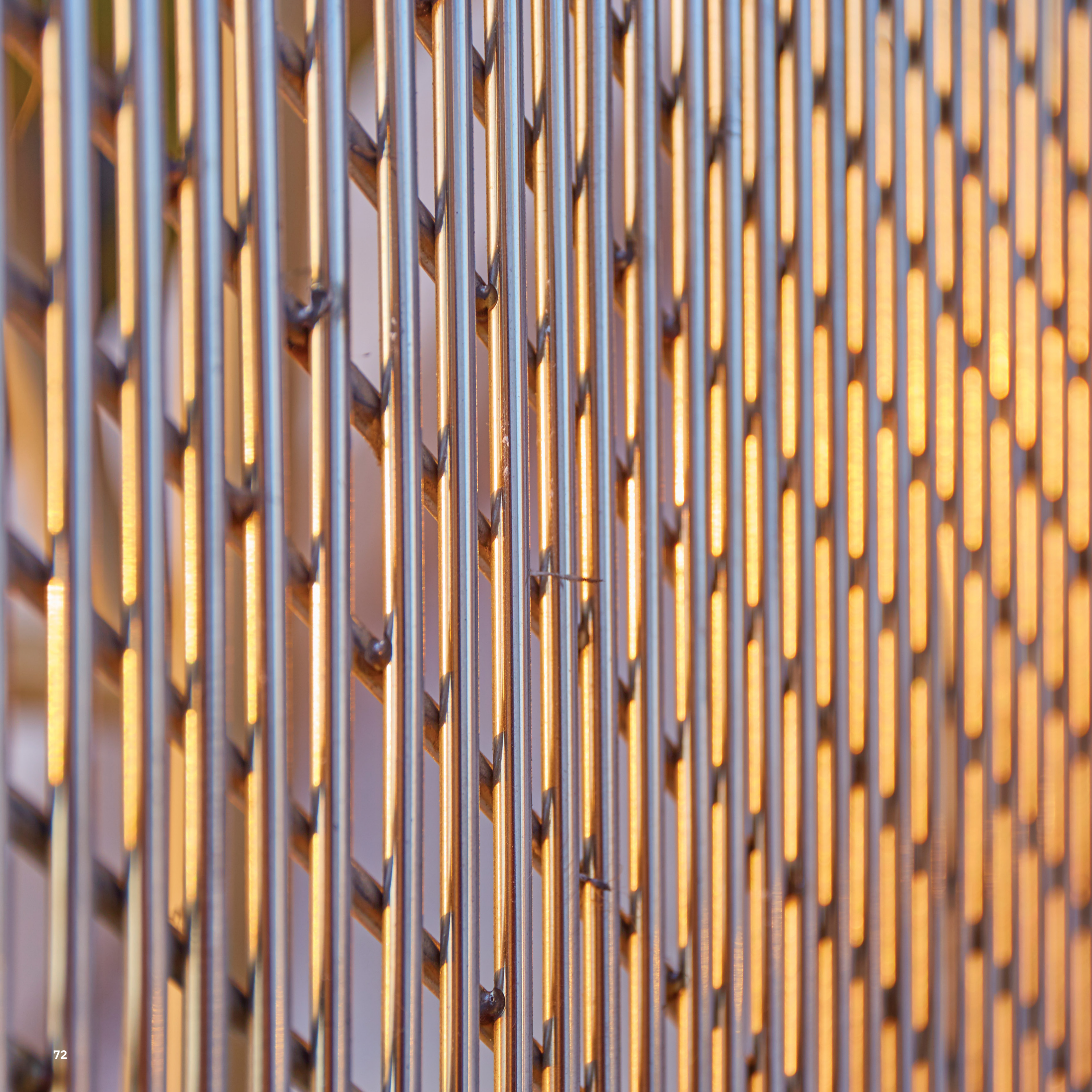
それらを解決するために、シミュレーション、探索、および代数に関するユースケースをどのように適用すればよいだろうか？

質問 3

量子優先順位設定マトリックスを試してみよう。

どのような結果が得られただろうか？

何か新しい発見はあっただろうか？



業界別ガイド

これまで述べてきたように、量子優位性は、ビジネスや科学の分野に欠かせない計算タスクの効率性や、費用対効果、または品質が、量子コンピューターを用いることで向上する場合に生じる。この優位性が生まれるのは、従来のシステムに量子コンピューターを加えた場合に得られる成果が、従来のシステム単独で得られる成果を超えたときである。

量子コンピューティングのハードウェア、ソフトウェア、アルゴリズムの進歩が融合し、古典コンピューティングよりも大幅にパフォーマンスを向上させることができれば、あらゆる業界で新しく優位性が得られる機会が生まれる。

以降のセクションでは、量子コンピューティングの採用状況について、航空、銀行および金融市場、化学および石油、エレクトロニクス、医療、ライフサイエンス、ロジスティクスという、7 つの業界における情報を提供する。各セクションで紹介する業界固有の見解やユースケースは、これから実際に量子技術に関して本格検討する際の助けとなるはずである。

量子優位性の実現にある程度時間がかかるとしても、量子に関する検討はその活用と学習の過程において、“すぐにでも”、あなたの業界やビジネスに指数関数的な成果を引き起こすだろう。

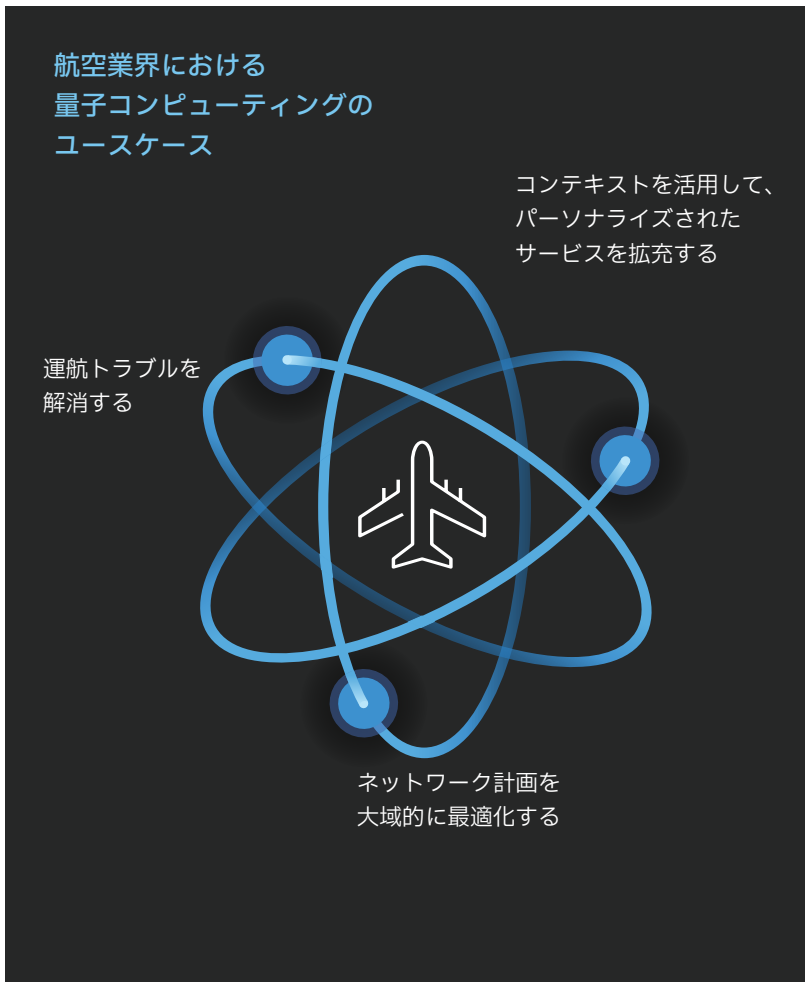
量子コンピューティング応用事例
航空

新型コロナウイルス感染症のパンデミックで最大の被害を受けた代表的な業種が、旅行業界や輸送業界の企業だ。特に記録的な損失が見込まれる航空業やホテル業では、回復基調に転じるのは 2023 年あるいは 2024 年になると予想されている。[62] 世界各地への旅行や出張を再開するには、金銭面、健康面、安全面での対策が必須だが、コロナ禍後の回復の先行きはいまだ不透明である。

今回の危機を、企業を存続させるための試練としてだけではなく、さらなる進化や成長の機会と捉えている企業もある。競合他社に対して勝つための戦略とは、企業を存続させることだけを考えるのではなく、コロナ禍で抑え込まれていた潜在的な需要を予測し、一気に成長を遂げるというものだ。このような先行者利益を得るには、新たなテクノロジーとソリューションを開拓しておく必要があり、量子コンピューティングもその 1 つに数えられる。

量子コンピューティングは、計算速度の向上、データ駆動による行動の精度向上、新しいアルゴリズムやシステム機能の創出などを通して、従来のシステムでは解決できない課題への対処を支援し、さまざまな業界に新たな可能性の扉を開くであろう。航空会社のビジネスにおける複雑な問題の解決にも、量子コンピューティングの持つ潜在能力が重要な役割を果たすことが期待される。

航空会社における運航管理の最適化と顧客体験改善の在り方は、量子優位性を活用することで、今までとはまったく違ったものになるかもしれない。以下では、そのような 3 つのユースケースを紹介する。



ユースケース

運航トラブルを解消する（IROPS）

航空会社の運航スケジュールと人員管理に大きな混乱をもたらす原因は、数多く存在する。例を挙げると、世界的な病の流行、悪天候、地震、オペレーション上の問題、技術面の問題である。こうした運航トラブルから、運航スケジュールや人員配置をいかに復旧させるかは、航空会社が対処する最も難しい問題の１つとされている。現在のソリューションは断片的で、運航関連情報の比重が高く、利用率や利益の最大化、顧客サービス、また顧客満足度への影響についてはあまり考慮されていない。

現在、航空各社では、最適ではないが運用上の問題解決をする上では許容できるレベルのアルゴリズムを、従来の古典コンピューター上で実行して、こうしたトラブルを処理している。こうした対応は「Irregular operations（IROPS）管理」と呼ばれる。現在の古典コンピューターの処理能力には限界があり、乗務員、発着枠、機器などは、逐次的かつサイロ化された方法で管理されている。そのため、システム全体の復旧には１週間以上かかる場合もあり、乗客の満足度に悪影響を及ぼす。他のフライトや空港に与える二次的影響によって、航空会社のコストがさらに増すこともある。

現在の IROPS に対するソリューションの技術的制約は、主に次の 2 つの問題に関連している。

1. データの可視化の欠如。運航トラブルの解決につながる関連データを十分に取り込めていない。
2. ソリューション開発の断片化。IROPS の問題を構成するさまざまな要素（機体、乗務員、乗客、将来的な影響）について、それぞれで異なるツールを使用しており、複数の手順で個別に解決している。そのため、非効率で部分最適なソリューションにとどまっている。

量子コンピューティングの効果が期待されているのは、2 つ目の制約「ソリューション開発の断片化」に対してである。IROPS で対応すべき範囲は非常に広く、その結果、大域的に数理最適化を行う際の計算も複雑になる。そのため、たった１つの運航トラブルを解決するにも、現在のコンピューターでは、数年あるいは数世紀かかってしまう可能性がある。しかし、量子アルゴリズムの改善や、優れたエラー訂正の方法が実現することで、航空会社では次のようなことが可能になるかもしれない。

- 将来のフライトと乗客へのソリューションに対する効果を定量的に評価することを目的とした、シナリオ・シミュレーションの速度と精度を向上させ、運航トラブルに対応できる時間内で実行すること。量子コンピューティングのアルゴリズムは、銀行や金融業界で用いられるモンテカルロ・シミュレーションで最適なシナリオを選択できる効果があることがすでに証明されている。[63]

- 運航管理センターの分析官にシミュレーション・ツールを提供すること。分析官は、事前にさまざまなシナリオを検証することで、航空管制や乗務員の作業の停止や航空輸送の遅延など、運航に支障を来す可能性のある重大事象について、その発生を回避できるようになる。現在は、こうした問題が非常に複雑なため、機能領域ごとに個別の問題解決を余儀なくされており、統合的に問題全体を解決するためのソリューションの開発は遅々として進んでいない。

- 顧客サービス担当者や自動顧客対応システムに対して、量子機械学習を活用し、IROPS に関する最適な問題解決方法を提案するアドバイザリー・ツールを提供すること。さらに当該ツールを自動顧客ケア・システムに組み込む。例えば、欠航に見舞われた乗客への補償を決める際、量子コンピューティング・アルゴリズムを使用していれば、それぞれの乗客の希望に応じて最適な補償方法を、現金、宿泊施設、アップグレードなどの複数の選択肢から担当者に提案できる可能性がある。このような顧客対応が今日にもできれば、顧客満足度がどれほど向上するか想像してみてほしい。

このように、量子コンピューティングを活用することで、復旧までの時間の大幅短縮、運航トラブルで生じるコストの削減、乗客に対する悪影響の緩和を実現できる可能性がある。

ユースケース

コンテキストを活用して、パーソナライズされた乗客サービスを拡充する

全世界の旅行業界の存続と回復に欠かせない取り組みの１つが、健康と安全対策を重視した、パーソナライズされたサービスの提供を行い、顧客の信頼と安心を取り戻すことである。特に航空会社の場合、各乗客に特化したサービスを提供し、サービスの差別化、顧客体験の向上、収益の増加につなげなくてはならない。カスタマー･エンゲージメントとサービスをパーソナライズするには、次の４つのステップが必要になる。

1. 顧客データやトランザクション・データなどのデータを収集、抽出する。
2. データ・エンジニアリングを実施し、顧客データの特性を構築する。
3. 顧客や旅程など、コンテキストの特性に基づいて、顧客セグメンテーション・モデルの学習を行う。
4. 顧客個人の旅行のコンテキストに基づき、最適なサービスのスコア化や特定を行う。

パーソナライズされたサービスを提供するシステムは、すでに存在しているが、顧客の期待に応えられるサービスを提供できていない。その大きな理由として、顧客セグメンテーションを行う段階での制約が挙げられる。現在のセグメンテーション手法の多くは、人口統計データや購買履歴データといった基本的な顧客特性は利用しているが、コンテキスト・データが組み込まれていないため、提案されるサービスの精度が低くなっている。さらに現行のシステムは多次元のセグメンテーションが行えず、旅行者の希望条件、目的、行動について、コンテキストの違いを効果的に捉えられていない。コンテキストの特性を組み込めない理由の１つが、複雑なセグメンテーション・モデルの構築に欠かせない大量のデータ要素を処理できないことである。これは、計算能力と拡張性が不十分なことに起因している。

「セグメント・オブ・ワン」（対象を個人レベルにまで絞り込む）というパーソナライゼーション戦略において、最大の課題は拡張性である。企業のデジタル･マーケティングが洗練されればされるほど、パーソナライズされた体験を提供するべき顧客の数は増えていく傾向がある。1 種類の顧客セグメント向けのランディング･ページをパーソナライズする場合と、数百のペルソナ、複数の地域、数十のサイト、数千の領域にパーソナライゼーションが必要な場合とでは、課題はまったく異なる。後者の場合、パーソナライゼーション戦略の効果を発揮するには、その規模を拡張しなければならない。

こうした問題も、量子コンピューティングを活用し、次のような高度なパーソナライゼーション・プロセスを実現することで解決できるだろう。

—顧客セグメンテーションの細分化を支援し、より複雑な顧客特性を取り込むことで、多次元の顧客セグメンテーションを可能にする。さらにきめ細かくコンテキスト･プロファイリングを行うことで、サービスにおけるパーソナライゼーションの精度を高める。[64]

—結果に関する洞察と解釈を提供する機械学習モデルの精度を高め、顧客データと顧客満足度の因果関係を、マーケティング担当者と顧客サービス担当者がより正確に理解できるようにする。

—機械学習の機能を強化し、識別可能な顧客セグメントの数や粒度を、従来の古典コンピューターでは処理できない水準にまで大きく引き上げる。

量子コンピューティングにより、コンテキストを活用した動的なパーソナライゼーションを実現できれば、航空会社にとってそのパーソナライゼーションは、付帯サービスによる収益の増加、顧客体験の質の向上、サービスの差別化に寄与するものとなるだろう。

ユースケース

航空会社のネットワーク計画を大域的に最適化する

航空会社は、コロナ禍による世界的な旅行需要の激減に加えて、新しい航路、出発間際の予約、旅程変更時の手数料免除など、顧客ニーズの大きな変化に直面している。このような課題に対処するには、動的で柔軟なネットワーク計画プロセスを構築し、過去の需要データに依存した分析から脱却しなければならない。

フライト計画や機体の割り当てから乗務員のスケジューリングに至るまで、多くのタスクがネットワークを通じてやりとりされている。そのため、ネットワークの最適化は航空会社の中心的な業務となっており、運用コストを大きく左右する。このプロセスの合理化には、多大な労力が費やされているにもかかわらず、いまだに大きな制約がある。これは主に、段階的なアプローチが採用され、つながりのない意思決定支援ツールによってサブプロセスが展開されているためである。しかも、それぞれの最適化が局所的にしか行われず、結果として、準最適・局所的・閉鎖的なソリューションが生まれていることに起因する。

例えば、飛行経路計画に、乗務員のスケジューリングが組み込まれることはほぼない。同様に、乗務員のスケジューリングにブロック・タイムは含まれず、ブロック・タイムの計画に燃料計画が考慮されることはない。その結果、望んでいた成果が得られないということがよくある。さらに、一般的にネットワーク計画では、収益管理（RM）と価格設定によってソリューションの最適化を調整できない。そのため、利益の最適化という同じ目的を持つ 2 つの重要なプロセスを、異なるモデルとパラメーターで毎日実行することになる。

連携がとれていないこのようなアプローチでは、総コスト、利益、変化への適応のいずれにおいても、満足とは言えないソリューションしか生まれない。それだけでなく、新型航空機の導入や新航路の開設など、運航上の重要な変更が行われた際には、これらが混乱の原因ともなる。収益管理や価格設定の側面から、スケジュール、収容能力、航空機の設計に基づいてサービスを最適化しても、ネットワーク計画によって、利益の最適化をベースに、これらのパラメーターが変更されてしまうことがある。航空会社がこのように問題を分散させて異なるソリューションを適用する方針を採用している主な理由は、ネットワークの最適化に関わる大域的な問題を一度で解決する方法が複雑なためだ。従来の古典コンピューターだけでこの問題を解決することは、事実上不可能だと言える。

今後、量子コンピューターと古典コンピューターが連携されるようになれば、収益管理、価格設定、コスト目標、売り上げ、顧客関係管理（CRM）を踏まえて動的に調整しつつ、機体の割り当て、スケジュール、ブロック／ゲート、乗務員、燃料を一度に最適化できるようになるだろう。その理由は、量子最適化アルゴリズムにある。このアルゴリズムを使えば、多数の解を、より幅広く、より効率的に探索できるからである。[65] 航空各社が、将来の量子技術の能力を最大限に活用するには、より一元化された運用モデルと、より緊密なデータ統合を実現し、ネットワーク運用管理の方法を変革する必要がある。このような形で量子技術の導入に成功した航空会社が、競争優位性を独占的に獲得することになるだろう。

量子コンピューティング応用事例

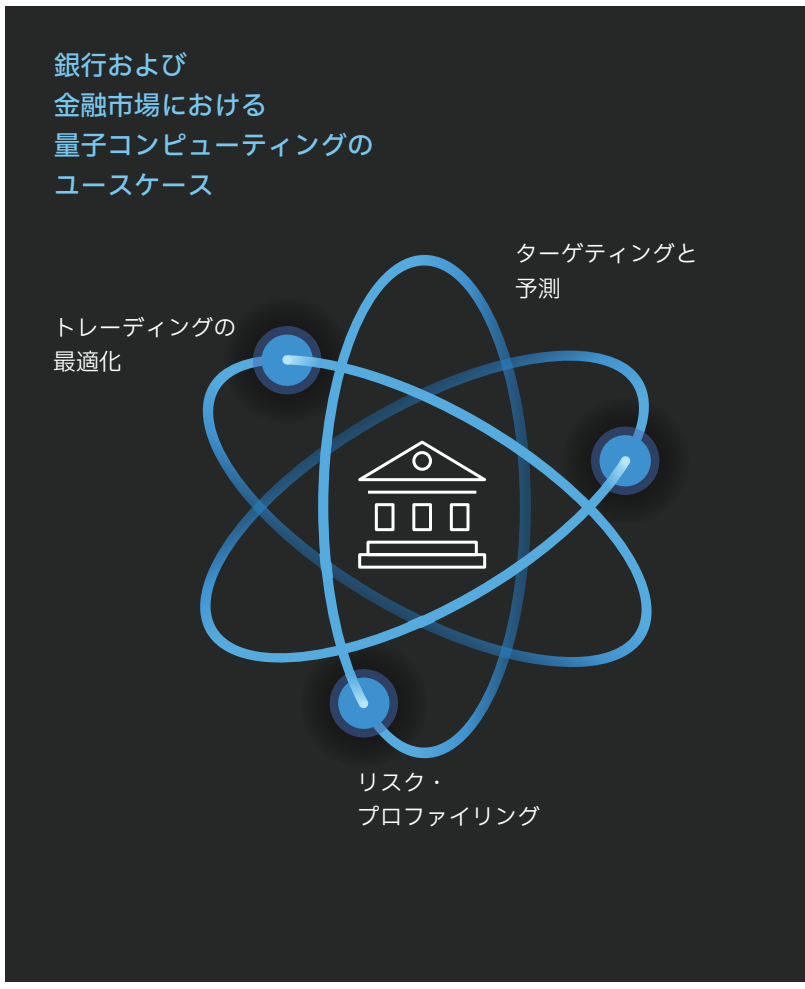
銀行および金融市場

金融業界には、非常に難解な問題に物理学をうまく応用することで解決してきた歴史がある。例えばブラック・ショールズ・モデルでは、ヨーロピアン・コール・オプションのような金融商品に対して、時間の経過に伴う価格付けに、ブラウン運動の概念を用いている。[66]

新興の量子技術についても、さまざまな金融に関する問題、特に不確実性や制約条件付き最適化を取り扱う問題への応用において、いち早く導入した金融機関が大きな先行者利益を得られるだろう。競合他社が認識できない、より収益性の高い裁定取引の機会を明らかにする計算が可能な状況を想像してみてほしい。そのほか、行動データの活用による顧客エンゲージメントの向上や、市場のボラティリティーへの迅速な対応（日中取引と夜間取引を比較するリスクの計算など）は、量子コンピューティングがもたらすと期待される具体的な便益の例である。

広範な商用利用にはまだ数年かかる見込みではあるものの、量子コンピューティングは、3 ～ 5 年以内に特定のビジネス上の問題を解決し得る画期的な商品やサービスを生み出すと期待されている。[67] また、量子コンピューティングの活用によって、金融機関が業務プロセスを刷新することも可能だろう。対象となり得る業務プロセスは、フロントオフィスおよびバックオフィスの顧客管理に関する意思決定、トレジャリー・マネージメント、トレーディング、アセット・マネージメント、リスク管理とコンプライアンスを含む事業の最適化などである。

銀行および金融市場における量子コンピューティングのユースケースは、「ターゲティングと予測」、「リスク・プロファイリング」、「トレーディングの最適化」の 3 つのカテゴリーに大別できる。



ユースケース

ターゲティングと予測

今日の金融サービス市場における顧客は、彼らのニーズや行動の変化をいち早く予測する、パーソナライズされた商品やサービスを求めている。中小金融機関の 25% が、顧客体験を軽視した商品やサービスのために顧客を失っている。[68] 顧客の行動パターンは複雑であり、その関連性のさまざまな側面を見落としていると、金融機関が最適な特徴選択によって先回りした商品提案を行うのは不可能である。こうしたことは、既存顧客のウォレット・シェア拡大や全世界で 17 億人もの銀行口座を持たない成人へのリーチといったチャンスをつかみ損ねることにつながりかねない。[69]

同様の問題は不正検知においても存在している。いくつかの推計によると、金融機関は不十分なデータ管理方法によって、最大で年間 100 億ドルもの収益を失っており、2020 年には不正行為による損失額の合計は 560 億ドルに達した。[70] 不正検知システムは依然として極めて精度が低く、誤検出率は約 80% であり、金融機関を過度にリスク回避的にさせている。[71] クレジット・スコアリングの妥当性を確実にするために、顧客の新規登録プロセスに 12 週間もかかることがある。[72] 今日のデジタル時代において、銀行取引の 70% がデジタル化されており、顧客はそんなに長々と待ってはくれない。[73] 新規顧客からのエンゲージメント獲得に時間がかかり過ぎる金融機関は、より俊敏な競合他社に顧客を奪われることになる。

顧客ターゲティングと予測モデルにとって、量子コンピューティングは大きな変革をもたらすものとなる可能性がある。量子コンピューターのデータ・モデリング機能は、データ構造の複雑さという課題ゆえに現在は不可能なパターン検出、分類、および予測において優位性を示すと期待されている。

ユースケース

リスク・プロファイリング

金融機関は、バランスの取れたリスクテイク、効果的なヘッジ取引、そして広範なストレス·テストによる規制要件への準拠について、ますます求められている。流動性管理、デリバティブの価格設定、そしてリスク計測は複雑で難解な計算となることがあり、取引リスクのコストを適正に管理するのは難しい。現在、モンテカルロ·シミュレーションは金融モデルにおいてリスクや不確実性の影響分析によく使用される手法であるが、推定誤差のスケーリングの点で制約がある。金融機関のすべてのリスクをシミュレーションするには法外なコストがかかる可能性があり、選択肢として数多くのポートフォリオを含めば、シミュレーションの完了には多数のサンプルと長い時間が必要となるだろう。

今後、バーゼル III やその見直しなど、規制、指令、および基準の相次ぐ改定が見込まれている。[74] これにより、さらに多数のリスク管理のストレス · シナリオが必要になるだろう。結果として、規制に違反した場合の罰金や是正対応を含むコンプライアンス関連のコストは、数年後には 2 倍以上に増加すると予測されている。[75]

金融機関は、より高度なリスク·プロファイリングの要求と、規制のハードルの引き上げに直面している。量子コンピューティング機能の研究と飛躍的進歩によって、前述した長時間を要するリスク·シナリオのシミュレーションをより高精度かつ短時間で実行し、さらに多くの結果をテストすることが可能になるだろう。

ユースケース

トレーディングの最適化

金融市場におけるトレーディング活動の複雑化は、とどまるところを知らない。例えば、デリバティブの評価調整モデルである XVA（X-Value Adjustment）には現在、CVA（Credit Value Adjustment）、DVA（Debit Value Adjustment）、FVA（Funding Value Adjustment）、KVA（Capital Value Adjustment）、MVA（Margin Value Adjustment）が含まれ、複雑さは格段に増している。[76]

透明性に関する規制要件が強化されたことで、より厳しい検証プロセスがトレーディングに適用されており、カウンターパーティーの信用エクスポージャーをデリバティブ・ポートフォリオのクレジットリミット利用状況に反映する必要のあるリスク管理の計算にも影響を与えている。[77] さらに、重要な投資の枠組みと手法も変化した。例えば、債券 ETF は 2024 年までに 2 兆ドルに達すると予想されている。また、環境・社会・ガバナンス（ESG）投資も勢いを増してきており、2019 年には 35 兆ドルがこの資産分野に投資された。[78]

こうした複雑なトレーディング環境において、ファンドマネージャーは、市場のボラティリティーや顧客のライフイベントの変化といった現実的な制約条件をポートフォリオの最適化に組み込むことに苦戦している。ファンドマネージャーが期待収益を推計する際には、数多くの可能性のあるシナリオと投資の選択肢をシミュレーションし、感応性を検証できると理想的である。現在のところ、市場の動きに遅れずに対処する最適なリバランス戦略を見つけるに当たっては、計算能力の限界と取引コストが大きな制約となっている。

量子技術は、こうした今日のトレーディング環境の複雑性を打開できるかもしれない。ファンドマネージャーが量子コンピューティングの組合せ最適化能力を活用することで、ポートフォリオの分散高度化、より正確に市況や投資家の目標に対応するポートフォリオ投資のリバランス、そしてより大きなポートフォリオの取引決済プロセスのコスト効率化が可能になるだろう。

量子コンピューティング応用事例

化学および石油

化学工業は、米国において国内総生産の 7%（5.7 兆ドル）を占め、約 1 億 2 千万人もの雇用を生み出している。[79] 新たな化学製品の開発には、莫大な費用と時間をかけて研究を行う必要がある。現在、研究所の実験室において、従来の化学シミュレーションは役立っているものの、分子間相互作用が複雑化するにつれて計算精度が低下するという課題がある。

巨大分子など量子力学的系のエネルギー計算において、電子の動きなどを含めたあらゆるパラメーターを反映しようとすると、古典コンピューターでは手に負えなくなる。その結果、分子のモデリング精度が低下したり、正確な解を得るのに膨大な時間がかかったりする。分子のモデリング精度は、この分野において重要度が高く、その正確性は重要である。

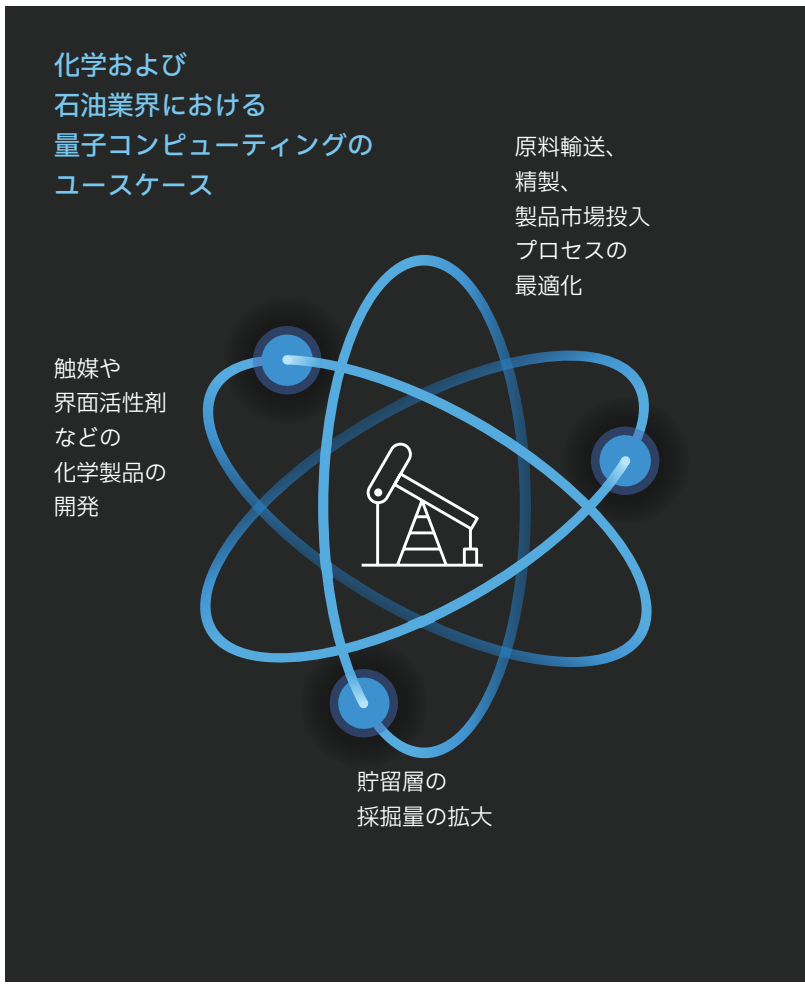
分子の電子構造を明らかにすることは、分子の反応を理解するのに不可欠である。水素（H_2）よりも分子量の大きい分子の場合、電子間相互作用や核量子効果などを正確に捉え、分子を数学的に記述しようとすると、さらに複雑になる。実際、電子間相互作用の完全な計算を従来の手法で実行すると、アルゴリズムの規模は指数関数的に増大してしまう。しかし、量子アルゴリズムを使用する場合、その性質から、化学計算の量は多項式的な増え方になると予測されている。このため量子アルゴリズムは、現時点では実現できていない正確な分子計算を、将来的に可能にする手法として有望視されている。

例えば、単純な炭化水素であるナフタレン（$C_{10}H_8$）は、116 量子ビット以下でモデリングできる。しかし、古典コンピューターでは、同じ処理に 10^{34} ビットが必要になる。[80] ちなみに 10^{34} ビットとは、2025 年までに電子的に保存されると予測される、全データ量（約 175 ゼタバイト）の 71 億倍である。[81]

量子コンピューティングは、化学物質の設計方法や、炭化水素の精製方法、石油貯留層の発見や採掘方法を変革する可能性がある。量子コンピューティングによって、今後数年のうちに、新しい化学製品開発における市場投入サイクルを短縮し、厳格化する環境規制を織り込んだ高度な投資戦略を実行できる可能性がある。これには、輸送、精製、化学プラントのプロセスなど、利益に直結する複雑なシステムの最適化などが含まれる。

量子コンピューターの技術によって、いずれは貯留層シミュレーションや地震の探査も可能になるかもしれない。そうなれば、化学および石油業界の状況は、根本から変革されるだろう。化学および石油企業によってすでに検討が進んでいる、有力な 3 つのユースケースを紹介する。

—触媒や界面活性剤などの化学製品の開発
—原料輸送、精製、製品市場投入プロセスの最適化
—貯留層の採掘量の拡大



ユースケース

触媒や界面活性剤などの化学製品の開発

このユースケースは、化学および石油企業が量子コンピューターを使用して、新しい化学的手法や化学物質の発見と開発に要する時間を短縮するというシナリオである。量子コンピューターによる量子化学シミュレーションは、古典コンピューターを併用した方法で、すでにプロトタイプが実践されている。

2017 年には、IBM が一般公開している量子コンピューターで、原子量の小さい無機塩類の水素化リチウム（LiH）と水素化ベリリウム（BeH_2）をモデリングする事例が、雑誌「Nature」の特集記事で取り上げられた。[82] 同様のハイブリッド法を応用することで、近い将来、化学・石油産業の課題を解明できるかもしれない。例えば、排出量削減に役立つ新しい触媒や、回収量を高める新しい界面活性剤の発見に、これらの知見を応用することが考えられる。こうした可能性から、化学分野が量子コンピューティングの「キラー・アプリ」になると考える人々もいる。[83]

ユースケース

原料輸送、精製、製品市場投入プロセスの最適化

分子モデリングに採用されているものと同様の（ハミルトニアンを使用した）手法が、さまざまな最適化問題に転用できると言うと、驚かれるかもしれない。その範囲は、輸送、サプライチェーンのロジスティクス、投資ポートフォリオの最適化など、多岐にわたる。[84]

このユースケースのシナリオは、化学および石油企業が、量子コンピューティングを通じて、原料輸送、精製、製品市場投入プロセスの最適な組み合わせを見極めることで、その利幅を拡大するというものである。精製への影響は、オクタン価に起因する推定年間事業損失額として把握することができる。オクタンおよび蒸気圧が規定の水準を超えることによって生じる年間損失額は、米国で 49 億ドル、EU で 42 億ドルに達している。[85]

ユースケース

貯留層の
採掘量の拡大

1856 年、パリ市の水ろ過システムの設計に取り組んでいたフランス人エンジニアのヘンリー・ダルシーは、砂を詰めた管に水を通すという単純な実験を行った。その観察結果から導き出された「ダルシーの法則」が、それ以来、貯留層シミュレーションと採掘の分野の基礎になっている。[86]

しかし、最近のナノ孔隙を用いた非在来型貯留層の開発では、このダルシーの法則が通用しない。世界のオイル・ヒエラルキーの順位が変わり、米国が世界トップのエネルギー産出国となったのは、その 1 つの結果である。量子コンピューティングは、貯留層における分子レベルの物理特性の探索を可能にすることで、地下の理解や貯留層シミュレーションの新世代を切り拓く可能性がある。

非在来型の貯留層では、液体の石油が、ガスなどの高浸透率の物質であるかのように振る舞う。そこでは、短鎖の炭化水素が優先的に回収され、長鎖の炭化水素は後に残される。この物理特性は、地下流体力学に関する従来の理解とは一致しない。

量子コンピューターを活用して、石油、水、ガスの分子と岩石表面の相互作用を分子レベルでモデリングすることは、ダルシー流動と非ダルシー流動の違いを生んでいる物理特性の解明に役立つ。もし解明されれば、相当な利益が生み出されることになるだろう。

例えば、油井の数を 10% でも減らすことができれば、非在来型石油を生産している北米の上位 32 社のネット・キャッシュ・フローは、10 億ドルの純損失（2018 年 1 月～ 9 月）から 80 億ドルの黒字に転じるだろう（油井 1 つにつき 600 万ドルという推計に基づく）。[87]

量子コンピューティング応用事例

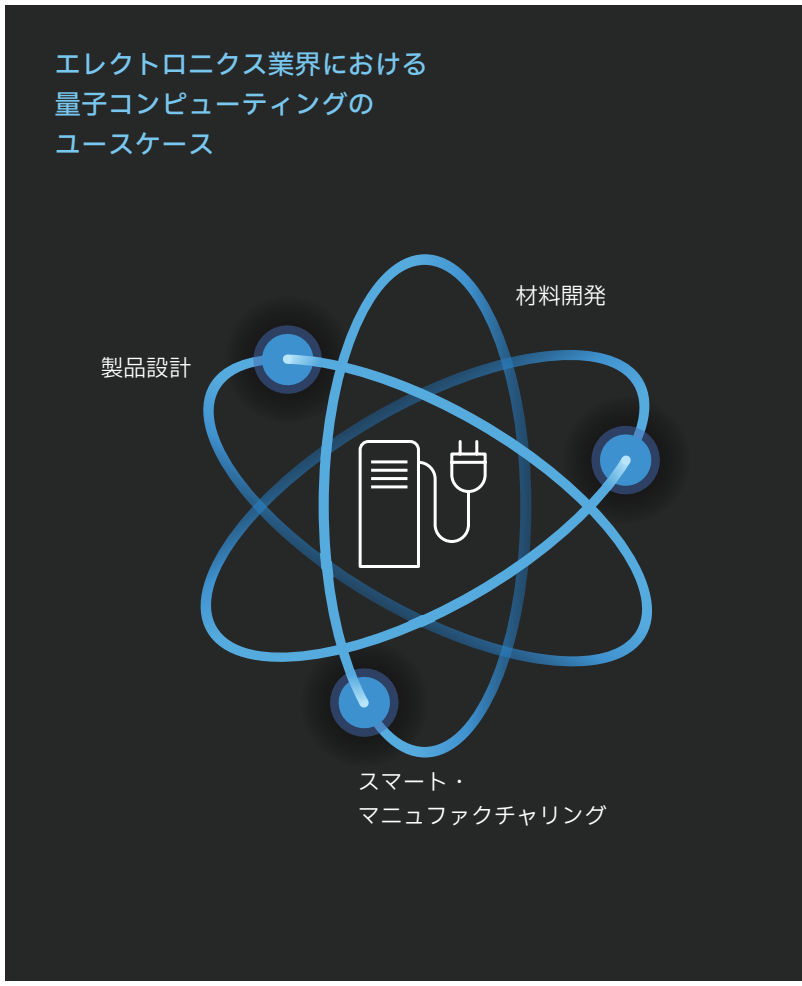
エレクトロニクス

エレクトロニクス業界を取り巻く課題は無数に広がっている。例えば、最新世代の半導体製造施設を建設しようとすれば、250 億ドルもの費用が発生する。[88] エレクトロニクス製品は設計が複雑化する一方、スマートフォンなどの従来の最大市場は拡大が頭打ちである。[89] この 50 年間で設計や製造の難易度が高まる一方で、業界全体の成長は鈍化している。

このように、現在のエレクトロニクス業界は非常に厳しい状況に置かれ、リスクやコストの増大にあえいでいる。同じ現象は他の業界でもいずれ実感されるようになるだろう。なぜなら、ほとんどの業界ではエレクトロニクス製品が要素テクノロジーとして使われているからだ。[90] エレクトロニクス業界が今日の課題にどう対応するかは、世界経済のほぼすべてのセクターに影響が及ぶ可能性がある。

量子コンピューティングは、根本的に新しいコンピューティング・パラダイムであり、エレクトロニクス業界が抱える難題に対処するための強力なツールとなる可能性がある。エレクトロニクス業界における量子コンピューティングのポテンシャルは、3 種類のユースケースを通じて示すことができる。すなわち、「材料開発」、「製品設計」、「スマート・マニュファクチャリング*」である。

* スマート・マニュファクチャリングは、製造現場だけでなく、サプライチェーン全体で広範囲にデジタル化を進め、パフォーマンス向上を目指すこと



ユースケース

材料開発

設計と製造のたゆまぬ改良によって、過去 50 年間にわたるエレクトロニクス革命がもたらされたが、今やその足取りは鈍い。世界最高クラスのスーパーコンピューターの性能が年 80% 向上していた時期もあったが、現在は 40% にとどまる。[91] その理由の 1 つは、トランジスターの小型化でコンピューター性能が高まった時代が終わりを告げつつあることである。

エレクトロニクス業界は、計算性能を向上させる他の手段も模索してきた。例えば、IBM が先鞭（せんべん）をつけた銅配線や化学増幅型フォトレジストなどの新材料の適用である。[92] しかし、古典コンピューターでは、材料のシミュレーションを実施するのは難しい。そのため材料開発では、時間とコストがかかっても、従来型の実験的手法に頼らざるを得なかった。

一例が、ユーザーとスマートフォンの接点であるフラットパネル・ディスプレイだ。消費電力が大きいためバッテリーをすぐ使い切ってしまうが、発光素子の消費電力を効率化すれば、ディスプレイ自体も効率化を図ることができる。そのためには新規材料の素子が必要だが、開発には膨大な時間が伴う。今でこそ一般的になった有機発光ダイオード（OLED）のディスプレイも、最初の論文で発表されてから実用化まで 35 年もの歳月を要した。[93]

2 次元遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）と呼ばれる材料もある。原子レベルの薄さを持つ材料で、消費電力を抑えながらトランジスターの性能を高められる可能性があり、大きな関心を集めている。TMD の化学的･物理的性質を表現するには量子力学の利用が適しているため、量子コンピューターとは好相性だが、古典コンピューターでは対応が難しい。

材料開発に時間を要する理由の 1 つは、古典コンピューターでは材料のシミュレーションが難しいことにある。材料を表現するだけでも大変である。1 種類の発光素子の分子 1 つを正確に表現するのにも、古典コンピューターを使う場合は 10^{106} ビットが必要だ。これは、宇宙に存在する原子の個数（約 10^{84} 個）よりはるかに大きい数である。一方、量子コンピューターを使用する場合は、同じ分子をわずか 354 論理量子ビットで表現することができる。さらに、このようにコンパクトな発光素子の表現を操作することでその素子の電子構造や発する色といった興味深い特性を予測可能だ。[94]

量子技術による新材料のモデル化には、広い用途がある。IBM は電子機器製造向けに、量子コンピューターを活用したより環境に優しい化学物質のモデル化に取り組んでいる。[95] また、メルセデス・ベンツ グループ社（The Mercedes-Benz Group AG）と共同で、バッテリー化学の量子シミュレーションも実施している。[96]

もう 1 つ事例を紹介しよう。発光素子の内部効率は現在、最大 25% だが、IBM は JSR や三菱ケミカルとともに、内部効率 100% のポテンシャルを持つ OLED 発光素子のモデル化を行った。[97] この発光素子を使った OLED ディスプレイは、電力効率の点で大きな優位性を実現し、市場でも貴重な強みを持つ可能性がある。OLED ディスプレイ市場におけるたった 1% の増加は年間 3 億 2,000 万ドルの価値がある。[98]

ユースケース

製品設計

エレクトロニクス業界では「設計と製造」をめぐって熾烈な競争が繰り広げられている。長期に高性能を維持できる、不備のない製品を安く提供することが目標だ。時間との闘いになるが、製品の市場投入で先行できれば、それだけ大きな優位性を享受できる。

量子最適化を利用すれば、製品開発チームがより高性能な設計を、より迅速に実現できる可能性がある。エレクトロニクス分野において、この手法はさまざまな用途に応用することができる。例えば、ネットワーク上でデータ・パケットを転送するための最速ルートを見つけることだ。さらに、電子機器の生産現場で最も収益性の高い製品ミックスと生産スケジュールを計算したり、100 億個ものトランジスターが搭載されたチップの最短配線経路を特定したりすることが考えられる。

このような最適化問題を解決することは、古典コンピューターにとって長期にわたる課題だ。しかし、最適な解が見つかれば、結果として市場で大きな強みを得られる可能性がある。配線が短いマイクロプロセッサーが開発できれば、消費電力の低減と計算性能の向上を同時に実現することができる。消費電力が特に問われるスマートフォンのアプリケーション・プロセッサー市場では、市場シェアが 1% 増加すると、年間 2 億 9,000 万ドルの追加収益を生み出せる。[99]

このような最適化問題は、古典コンピューターで解こうとする場合、考えられる解があまりにも多過ぎる点が課題となる。例えば、10 地点間の最短経路を求める場合には、300 万通り以上考えられる経路の中から最適解を見つけ出す必要がある。しかし、量子コンピューターならば、最適化問題の解をより効率的に求め、古典的な手法を補完できる可能性がある。製品設計チームはこうしたやり方によって、設計性能を短時間で高め、高品質な製品をより迅速に市場に送り出せるかもしれない。

量子コンピューターが最適化の解を見つける能力は、実はこの種のコンピューターが持つ探索能力の現れである。この能力を活かせる好例の 1 つが、設計検証作業だ。例えば、人間が毎週 2 日間は自分の仕事を進め、残りの 3 日間はその仕事をチェックするという状態を想像してみよう。これでは仕事の遂行よりも検証の方に多く時間がかかっており、遅くて非効率的なプロセスである。

しかし、電子設計の現場では、まさにこのようなことが頻繁に起こっている。例えば、マイクロチップは非常に複雑化したため、製品のサイクルタイムのうち、実際の設計作業よりも多くの割合（60%）が、チップの検証作業に費やされている。[100] また、未発見のバグが残ったままチップを発売してしまうと、会社の収益にとって大きな打撃となる場合もある。[101]

ソフトウェアは今や、ほぼあらゆる製品の一部を構成している。そして、マイクロチップと同様に、ソフトウェアも非常に複雑化しており、完全な検証は不可能である。音楽プレーヤーのような製品では、ソフトウェアのバグは単に少し気になる程度のものかもしれない。しかし、バイオメディカル・デバイスのような製品では、ソフトウェアに含まれる未発見のバグは、文字通り生死に関わる場合もある。ある調査によると、バイオメディカル・デバイスのリコールは、ソフトウェアの不具合が最大の要因で、全体の 64% を占めている。[102]

設計検証の強力な手法として、ブール充足可能性ソルバー（SAT ソルバーとも言う）が挙げられる。多くの最適化問題と同様、SAT ソルバーも古典コンピューターで扱うのは難しい。大規模で複雑な設計空間を探索し、未知のバグを発見できる確率を高めるために、SAT の量子的な解法が研究されている。[103] その狙いは、設計チームをサポートして、検証作業を迅速化し、開発する製品の信頼性を高め、完成までの時間を短縮できるようにすることである。

ユースケース

スマート・
マニュファクチャリング

競争力とレジリエンスを 2020 年代のうちに高めようとするメーカーにとって、スマート・ファクトリーと DX の重要性はさらに増している。[104] この取り組みでは AI が中心的な役割を果たし得るが、古典的な AI は能力の限界に達しつつある。

例えば、電子機器製造工場では、コストを抑え、歩留まりを向上させるために、不良品を迅速かつ正確に特定する必要がある。古典的な AI はこれまで製品検査に導入され、プロセスにスピードや一貫性などのメリットをもたらしている。しかし、その精度はまだ理想には程遠い。こうした検査用の AI は誤検出率が高く、実際には良品であるにもかかわらず不良品と判定してしまうことが多い。超高速の機械があっても、間違いが多ければ意味がない。

シリコン・ウエハーの場合、光学式自動検査での誤検出率は 10% ～ 15% で、これはあまりにも高過ぎる。[105] 5 ナノメートル製品の工場でウエハーの損失が 10% の場合、年間で 80 億ドル相当の損失となる。[106]

良品と不良品を区別する古典的な AI の能力は、根本的な限界に達している。ある分析によると、「ImageNet」データ・セットにおける画像分類のエラー率は最良でも 11% で、実行には 100 万ドルのコストがかかった。[107] 完全自動の AI 製品検査を実現するためには、エラー率を 1% 未満にする必要がある。しかし、11% のエラー率を 1% まで下げようとすると、古典的な AI の現在の傾向を元に見積もった場合、10^{20} ドルもの投資が必要だ（「10^{20} ドル」はタイプミスではなく、まさに 100 億ドルの 100 億倍を意味している）。

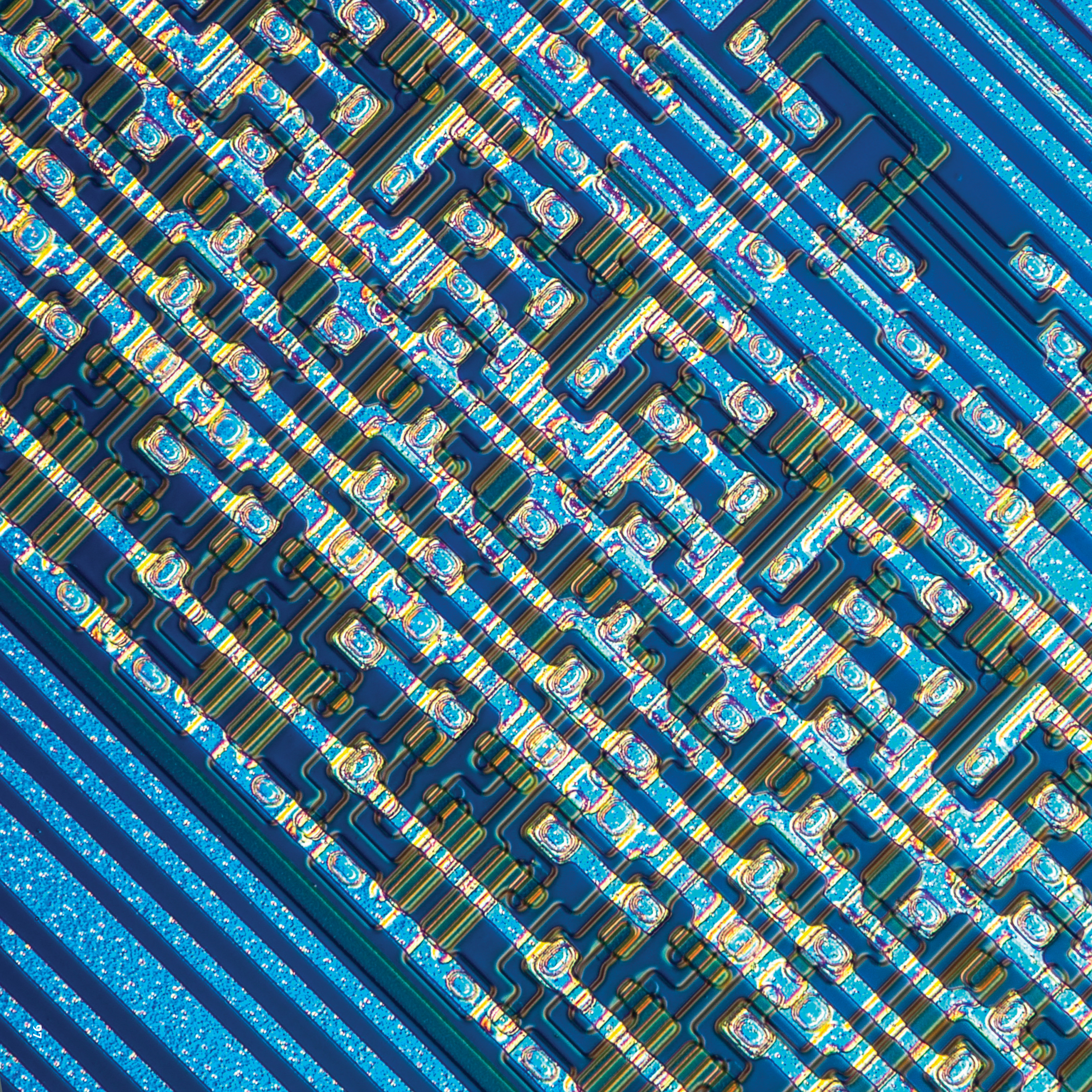
しかも、その過程で排出される二酸化炭素量は、地球全体の 100 万倍もの量に達する。[108]

しかし、今の私たちは古典コンピューティングを超える存在を手にしようとしている。量子コンピューティングのポテンシャルを活用すれば、よりスマートな AI を開発できる可能性があるのだ。

IBM の研究者が、同じ自由度を持つ、量子と古典のニューラル・ネットワーク* を比較したところ、データ・セットによっては、量子の方が古典よりも精度が高く、学習速度も速い場合があることが示された。[109] さらに、量子機械学習モデルは、少ないデータでエラー率を低減できる可能性がある。[110]

少ないデータでも学習が速い高精度な AI には、さまざまな用途が考えられる。データ・ネットワークでは、より確実にセキュリティー上の脅威を特定することができる。バイオメディカル・エレクトロニクスに活用すれば、MRI（磁気共鳴画像）で腫瘍をより確実に識別できるかもしれない。電子機器設計では、質の高い設計を迅速に特定できる可能性があり、特に設計データが乏しい、新しいプロセス・ノードに対して効果が期待できる。電気機器メーカーの場合、製品を毎年更新するために製造工程を新たに構築しなければならず、時間とデータがともに希少かつ貴重だ。このため、量子 AI を使えば、高い歩留まりの新製品を低コストで速やかに市場へ投入できる可能性がある。[111]

* ニューラル・ネットワークは人間の脳の仕組みを模倣することで、コンピューター・プログラムがパターンを認識し、データ処理を行う人工知能の一手法



量子コンピューティング応用事例

医療

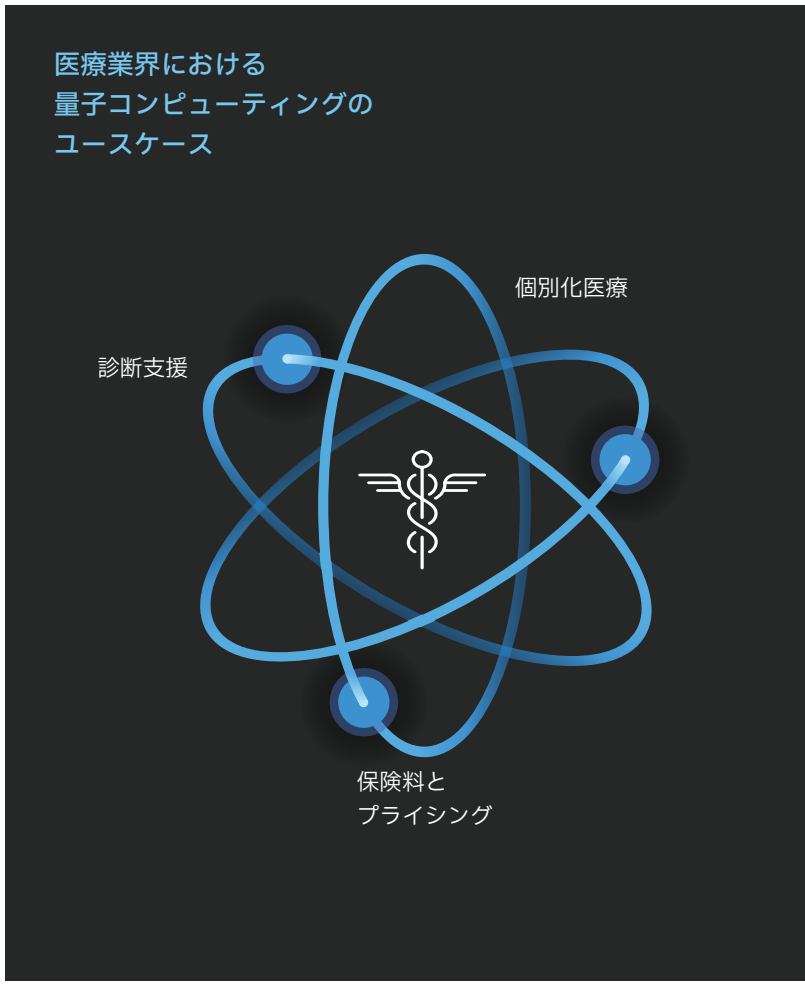
医療データ（臨床試験、疾病登録、電子カルテ（EHR）、医療機器などがもたらす情報）の量は、年平均 36% の成長率で増大している。[112] このデータは、健康の向上、医療費の削減、患者体験の向上、医療従事者の就労環境の改善という、医療の「4 つの目的」に関する課題の解決に大きく貢献している。[113] と同時に、医療サービス利用者に求められる意思決定の機会は増え、操作しなければならないシステムは複雑化する一方である。

医療の現場では、適切なデータと信頼性ある知見を提供するために、膨大な投資が行われている。業界の既存企業と新規参入企業のいずれも、健康的で予防的な行動を促進するデジタル体験の創出に取り組んでいるが、新たなデータが数多く登場し、可能性が指数関数的に増大したことで、従来のコンピューティング・システムの機能は限界を迎えようとしている。

そこに現れたのが、処理能力と速度の両面からコンピューティング性能を向上できる可能性がある、量子コンピューティングである。しかし、この量子技術を導入するには、考え方、スキルセット、IT アーキテクチャー、企業戦略などにおいて従来とはまったく異なるものが求められる。また、このテクノロジーは、セキュリティーにも即座に影響を与える。[114] 医療業界では、そのデータ・プライバシーに関する責任と課題の大きさから、セキュリティーは特に重要である。

他の業界同様、医療業界でも、量子コンピューターを従来のコンピューターと組み合わせて使用することで、これまでのコンピューティングだけでは実現できなかったことが可能になり、多大なメリットを享受できる可能性が高い。その結果、現在この業界における量子応用は、競争状態にあると言える。

医療業界で現在行われている、変革を牽引する主な量子コンピューティングのユースケースは、「診断支援」、「保険料とプライシング」、「個別化医療」の 3 つである。



ユースケース

診断支援

早期に正確な診断を効率的に下すことができれば、アウトカムが向上し、治療費は低減される場合が多い。例えば、結腸がんを早期発見できれば、生存率は 9 倍に上昇し、治療費は 4 分の 1 になる。[115] ただし、多岐にわたる症状が対象となる現在の診断方法は、複雑でコストがかかる。[116] また、一度診断が確定した後の 5 ～ 20% は、誤診であると推定されている。[117]

この 100 年間で、CT、MRI、X 線スキャンなどの医療画像解析技術は、医師にとって不可欠な診断ツールとなった。コンピューターによる医療画像の検出および診断手法は、急速に発展しているものの、このような画像の多くが、ノイズや解像度の低さ、また再現性の低さによる影響を受けるのも事実である。

これらが生じる理由の１つに、厳密な安全手順の順守義務がある。しかし量子コンピューティングにより、エッジ検出や画像マッチングといった処理手順の部分などで、医療画像分析の精度を向上できる可能性がある。分析精度が改善されれば、画像に基づく診断の正確性は大幅に高まるだろう。

さらに、最新の診断手法では、シングルセル解析が取り入れられることがある。[118] 特に、フロー・サイトメトリーとシングルセル・シーケンス・データを利用し、さまざまな技法によって取得されたデータ・セットを統合する場合には、高度な分析手法が必要となる。[119]

課題の１つとしては、細胞の分類を、多数の物理的特性と生化学的特性に基づいて行う場合である。これらの特性によって、特徴空間（予測因子が存在する抽象空間）が大きくなる（高次元になる）。このような分類は、がん細胞を正常細胞と区別する際などに重要である。量子サポート・ベクター・マシンなどの量子コンピューティングを利用した機械学習アプローチにより、分類精度が向上し、シングルセル解析診断手法の大幅な発展が期待できる。

さらに、バイオマーカーの検出と同定では、ゲノミクス、トランスクリプトミクス、プロテオミクス、メタボロミクスといった、複雑な「オミクス」からのデータ･セットの解析が必要となる。[120] このようなデータ・セットは、大きな特徴空間を伴うだけでなく、多数の特徴量の相互作用によって、従来のコンピューティング手法では検出が困難な、相互依存性、相関性およびパターンが生じる。[121] バイオマーカーによる知見を個人のレベルにまで落とし込むには、さらに高度なモデリングが必要となる。このような特徴は、量子コンピューティングがバイオマーカーの検出、ひいては個人レベルでの検出に貢献できる可能性を示唆している。

量子コンピューティングにより、医療従事者による診断精度が向上するだけでなく、侵襲的診断検査を繰り返し行う必要もなくなるだろう。個人の健康状態を継続的に観察し、分析できるようになれば、患者の負担を軽減できる。それだけでなく、医療保険業者や医療従事者は、早期診断による治療費の低減というメリットを得られる。また、メタ分析によって、より精緻な診断手順を実現し、実施する診断の内容とタイミングを判断することも可能になるだろう。これにより、さらに医療費が削減されるほか、医療保険業者と行政機関は、医療従事者と患者のための意思決定を、今まで以上に詳しいデータに基づいて下せるようになる。

ユースケース

保険料とプライシング

医療保険料の決定は複雑なプロセスである。医療保険の一般的な価格戦略の構築プロセスにおいては、多数の要素を考慮する必要がある（米国などの一部の国では、規制によって、保険料の計算に使用される要素の数が制限されることがある）。[122] こうした要素には、集団の健康レベルと疾病リスク、治療の適切性と費用、企業戦略と規制に基づく医療保険のリスク許容度などがあり、これらが複雑な相互依存の状態にある。医療保険では、すでに古典的なデータサイエンス手法の応用によってこの分野で大きな進歩を遂げているが、不確実性をさらに低減したより粒度の細かいモデルを構築することは依然として困難である。

リスク分析は、プライシング最適化における量子コンピューティングの活用が見込まれる、有力分野の１つである。集団レベルでの疾病リスクに関する洞察を量子リスクモデルと組み合わせ、経済的リスクをより効率的に計算することで、医療保険のリスクモデルとプライシングモデルはさらに洗練されたものになるだろう。[123]

価格決定に寄与するであろう量子コンピューティングのもう１つの重要な用途は、不正検知の強化である。現在、医療詐欺による被害は、米国だけでも数千億ドルに上る。[124] 古典的なデータ・マイニング手法も、医療詐欺の検出と削減にすでに役立っているが、さらに計算効率の高い手法が必要とされている。[125] 量子アルゴリズムは、通常とは異なる行為を発見し医療費の不正請求を排除するための、高度な分類とパターン検出を実現できる可能性がある。[126] 不正請求による損失を防止する体制が強化され、コストが低減したならば、医療保険は価格戦略をさらに最適化し、より安価な保険料を提示できるようになるはずだ。

価格計算機能の強化は、平均保険料の低減だけでなく、より契約者一人一人に合わせた保険料の選択肢を提供することも可能にするだろう。医療における複雑性は、価格戦略を分かりやすいものにするという課題に表れている。透明性の実現と平均医療費の低減を求める各種の新たな規制により、プライシングモデルを最適化する重要性は一層高まっている。[127]

ユースケース

個別化医療

個別化医療の目的は、予防と治療のアプローチを個人に合わせて調整することである。[128] 個別化医療では、人体生物学の複雑性に合わせて、標準治療を越えたさまざまな側面を考慮することが求められる。実際、医療行為によるアウトカムへの相対貢献度は 10 ～ 20% しかなく、残りの 80 ～ 90% は、健康に関する行動、社会経済的要因、環境要因が占めている。[129] このような多様な寄与因子間の相互依存性と相関関係によって、最適な治療効果を計算によって導き出すのは極めて困難である。

その結果、既存の治療の多くが、個人差が原因で意図した結果を達成できていない。例えば、抗がん剤治療は 3 分の 1 の患者にしか効果が見られない。また、ヨーロッパだけで毎年 20 万人もの患者が医薬品の副作用で死亡しているなど、医薬品治療が悲惨な結果に至ることもある。[130]

医療アプローチを調整する上で重要なのは、先を見越して予防的に対応することである。前述のとおり、早期治療と予防的介入によって、アウトカムが劇的に改善し、コストが最適化される傾向にある。従来の機械学習でも、さまざまな患者グループの将来の疾病リスクを、EHR に基づいて予測できる可能性があることは示唆されている。[131] それでもなお、ノイズの多さ、関連する特徴空間の大きさ、特徴間の相互作用の複雑さといった、EHR その他医療関連データの特性に起因する課題は残る。これは、量子コンピューティングを利用した「教師あり機械学習」と「教師なし機械学習」のテクノロジーによって、より早期に、より正確かつ詳細に、リスクを予測できる可能性があることを示している。[132] 将来的には、個人からのデータ・ストリームに基づく継続的な仮想診断により、特定の症状に対する個人のリスクの経時的変化を医療従事者が理解できる、そのようなツールも実現されるだろう。

しかし、個人の疾病リスクを把握するだけではまだ十分ではない。対象の個人に対して、効果的な医療介入を行う方法を知ることも、また重要である。そのための方法の 1 つが、細胞レベルでの医薬品感受性の研究である。例えば、がん細胞のゲノム特徴と医薬品の化学的特性を考慮して、がん治療薬の効果を詳細レベルで予測できるモデルは、すでに研究されている。[133] 量子コンピューティングを利用した機械学習を用いることで、この分野の研究を飛躍的に加速させ、最終的には医薬品の因果関係推論モデルを構築できるようになる可能性がある。

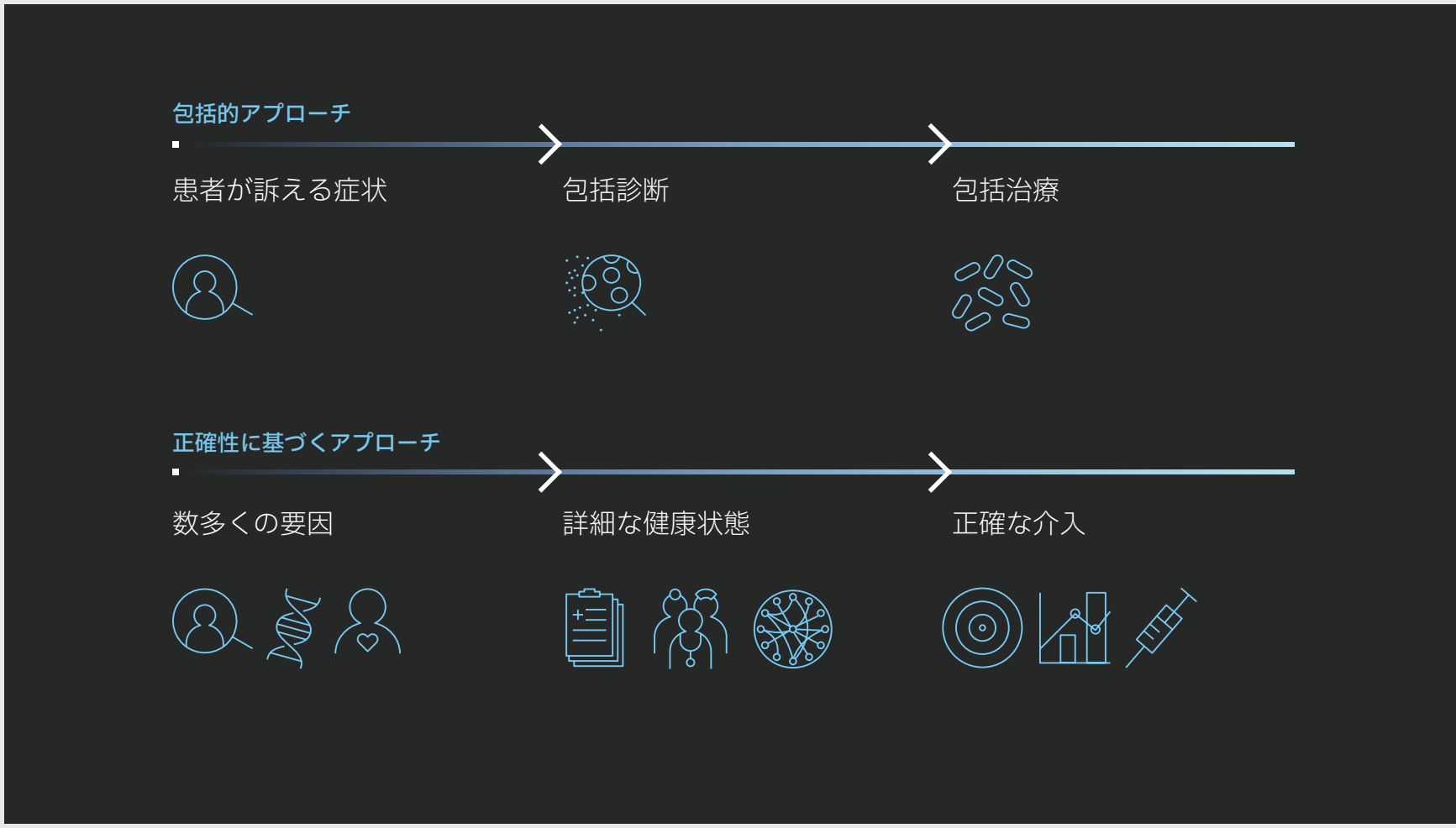
個別化医療は、介入や治療とアウトカムとの関係を特定して説明することで、個人レベルで次善の医療処置を行うという、非常に高い目標を掲げている。従来、患者の疾病の診断は、主に患者の訴える症状を基に行われてきた。これは時間がかかり、包括診断と治療はしばしば失敗に終わっていた。

現在は、医療関連データからの知見を追加で取得し、連続した正確な健康状態を効率的に特定し、パーソナライズされた介入を行うような方法へと移行しつつある（図 19 参照）。その完全な実現にはまだ長い道のりがあるが、量子コンピューティングを利用することで、この新しい枠組みに向けた進歩を加速できる可能性がある。

この枠組みが実現すれば、医療機関は継続的な治療の中で、最適かつパーソナライズされた医療サービスを提供できるようになるだろう。さらに、特定の個人に対する次善の医療行為に関する意思決定では、アドヒアランスと患者とのエンゲージメントを主要な要因として考慮することも欠かせないが、高度なコンピューティング・モデルによって、この領域にも対応できるようになる可能性がある。[134] 例えば、アドヒアランス・データを分析することで、個人に最適な介入のタイミングを割り出すことが可能になる。[135] 最終的には、このようなレベルでの健康管理を集団的に実践できるようになるだろう。[136]

図 19

量子コンピューティングには、
包括的な診断と治療から、
正確な健康状態の把握と
介入への**移行を加速する**
可能性がある。



量子コンピューティング応用事例

ライフサイエンス

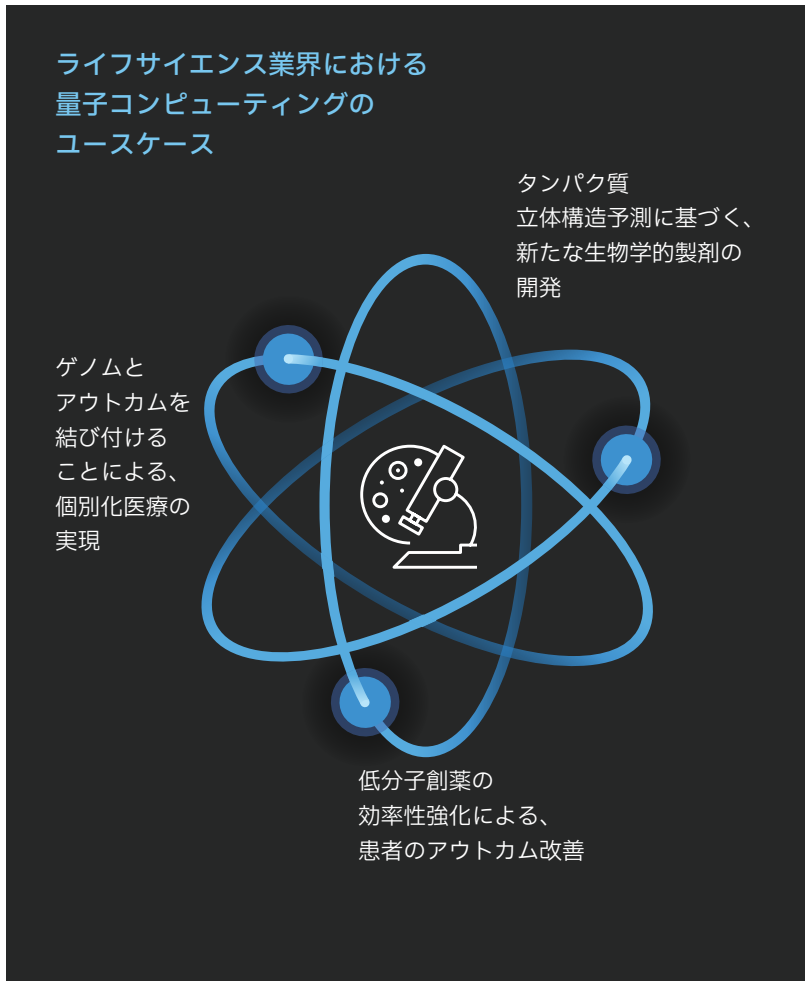
ライフサイエンスにおける主要な課題には、遺伝子配列、遺伝子構造、遺伝子機能間の関係性と、生体高分子間ならびに生体高分子および低分子（元来、体内に存在するタンパク質や医薬品に含まれる成分など）間の相互作用メカニズムの解明がある。これらの問題は複雑な計算を必要とし、ゲノム解析、医薬品設計、タンパク質立体構造予測のコアなテーマである。

こうした状況によって、現在、この業界における量子技術の応用は、技術の領域を超えた競争状態にあると言える。5 年以内には、新しい分野の専門家と開発者によって、量子コンピューティングの広範な利用が実現し、かつては解決不可能と考えられていた問題を解くことができるようになる可能性がある。[137]

低コストで効率的なシーケンス解析の普及といったトレンドに加え、「オミクス」時代が到来したことで、ライフサイエンス業界の企業は、多様性を有する新たなデータソースの活用を模索している。さらに、ライフサイエンス業界は、将来の量子コンピューティングの利点を、最も直接的に享受できる可能性が高い領域の 1 つとされている。

量子コンピューティングのユースケースの探求と実装は、量子コンピューティングのハードウェアとアルゴリズムのさらなる科学的進歩と相まって、今後数年間で可能性レベルから現実レベルに変わることが期待されている。ライフサイエンス業界では、幅広い画期的なユースケースが量子コンピューティングによって可能になると想定されている。そうしたユースケースには次のようなものがある。

—ゲノムとアウトカムを結び付けることによる、個別化医療の実現
—低分子創薬の効率性強化による、患者のアウトカム改善
—タンパク質立体構造予測に基づく、新たな生物学的製剤の開発



ユースケース

ゲノムとアウトカムを結び付けることによる、個別化医療の実現

15 年の歳月と 27 億ドルの投資によってヒトゲノムの正確な配列が解析され、その結果、配列解析にかかるコストが下がったことが、「オミクス」時代の到来をもたらした。[138] これにより、ゲノムの一次配列を理解することは、もはや科学者にとって大きな制約ではなくなった。代わって新たに研究の焦点となったのは、新しい計算ツールのメリットを活かして、ゲノム配列が機能するメカニズムの理解を深めることである。しかし、ヒトゲノムの規模（およそ 30 億の DNA 塩基対）、個体群の中に存在する多様性、健康アウトカムの多様性から、従来のアプローチによる研究には限界がある。[139]

ゲノミクスと量子コンピューティングが交わる機会としては、次のような領域が考えられる。[140]

—モチーフの発見と予測：[141] DNA、RNA、アミノ酸の配列は、すべて進化の過程で形成されてきた。生物情報科学の課題の 1 つが、これらの配列中のモチーフ（遺伝子発現を活性化または抑制するパターンなど）を特定することである。それを特定できれば、遺伝子制御のメカニズムを解き明かせる。モチーフを特定するための古典的なアルゴリズムは、存在するゲノムの長さの中から、考えられるあらゆる配列をすべて調べなくてはならない。そのため、CPU の負荷が高い。量子最適化アルゴリズムを適用することで、転写因子の結合と De Novo ゲノム・アセンブリーに対する理解をさらに深められるようになるだろう。

—ゲノムワイド関連解析（GWAS）：[142] GWAS の目的は、特定の形質または疾病と、DNA の単一の変異との関連性を発見することである。だが現在の手法では、その性質上、高次元な解析が必要となる。そのため、計算を行うのは困難である。そこで、量子コンピューティングの可能性に注目が集まっている。実験による検証が必要な遺伝子の候補数を、大幅に絞り込める可能性があるからなのだ。さらに遺伝子ネットワークとグラフモデルでも、量子コンピューティングが発展をもたらす可能性がある。

—De Novo 構造予測：[143] ゲノム配列解析情報や関連技術の飛躍的な進歩に伴い、ゲノム配列から分子構造、さらには機能への翻訳過程を解明するのが、ますます難しくなっている（図 20 参照）。ホモロジーモデルなどの高度な手法は存在しているものの、De Novo 構造を予測する古典的なアプローチの多くはスケーラビリティーが低い。[144] 例えば、理論的に存在し得るタンパク質構造の探索空間は、タンパク質の大きさによって指数関数的に増加する。そのため、総当たり型のアプローチは現実的ではない。量子コンピューティングは、RNA 分子、タンパク質、DNA タンパク質複合体などの構造予測精度を、劇的に向上させる可能性を秘めている。

これらの進歩によって、今後、強力なデジタルツインモデルのビジョンを実現できる可能性がある。[145] 薬理ゲノミクス試験で有機体を表すデジタルツインを使用することで、特定の医薬品に対する個人の経時的反応を予測し、プレシジョン・メディスン・セラピー（患者の症状に合わせた治療）の発展が促進される可能性がある。さらに、無機物を表すデジタルツインを作成し、作業手順、必要人員数、設備配置、機材などの要素をストレス・テストで比較して、研究施設や医療施設の最適化に役立てることも考えられる。医療チームが患者に「ゲノムから推測すると、あなたの治療結果は具体的にはこうなるはずです」と言えるようになる。そんな日がまったくの夢物語ではなく、現実となる日がいつか来るかもしれない。

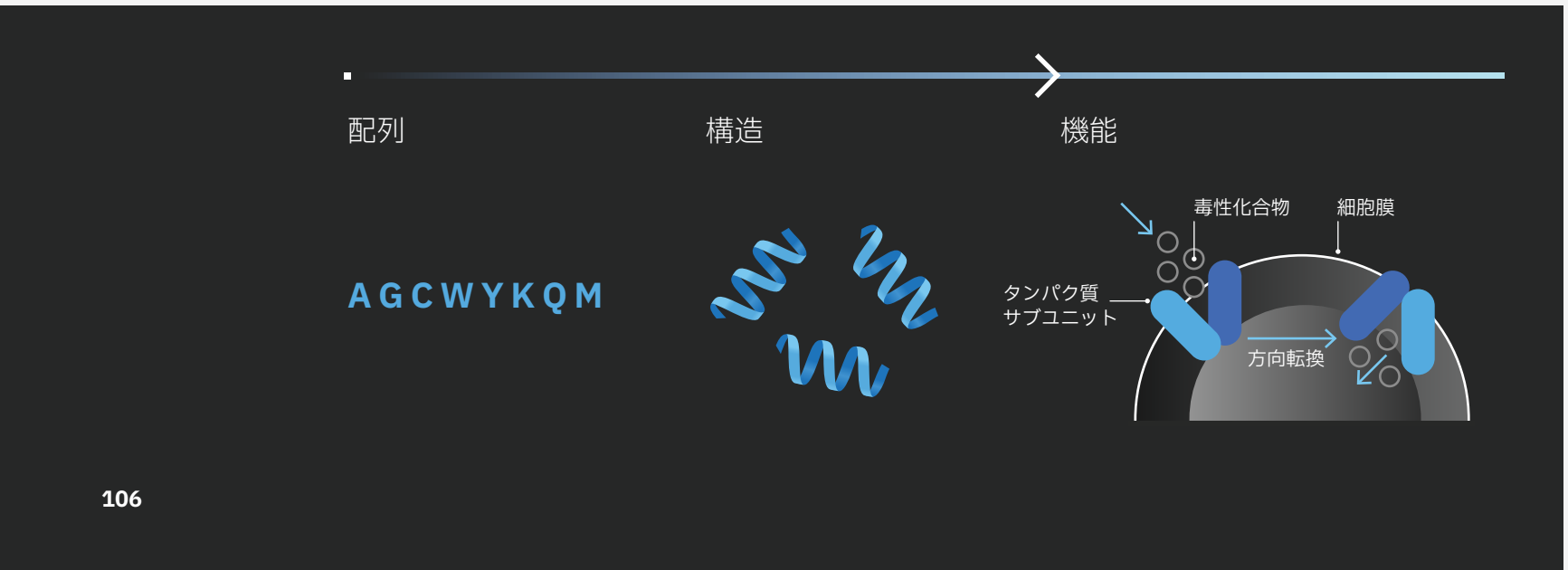


図 20
配列 - 構造 - 機能は
生物学研究の根幹をなす
原理原則である

ユースケース

低分子創薬の効率性強化による、患者のアウトカム改善

低分子医薬品設計と低分子創薬は、常に複雑な最適化を必要とするプロセスである。その目標は、疾病に関連する標的に対して活性を持つ新しい分子を設計すると同時に、体内の何千という他の標的に対する活性を低減することで、副作用と危険な毒性を回避して、患者のアウトカムを改善することにある。この目標を達成するため、通常は 200,000 個～ 106 個以上の化合物が、実験および演算ワークフローによって一次スクリーニングされ、数千個の化合物が生産された後、必要な試験一式が行われる。[146] 主にこの領域では、スクリーニングと詳細な 3D 構造に活用される分子構造の類似度算出および分類のアプローチと、標的ベースの分子化合物設計に活用される精緻なエネルギー計算において、長年にわたってコンピューティングが利用されてきた。

量子コンピューティングは、創薬における多様な応用の可能性を秘めている。[147] 量子コンピューティングを活用することで、評価対象の候補分子の数を増やすことが期待されている。例えばリード化合物の発見やオフターゲットのスクリーニングに適用されている分類方式を使用して、これらの候補分子をより精緻に評価できるようになることである。また、リード化合物の発見やリード化合物最適化におけるオフターゲットのモデリングに関連した分類や、3D タンパク質構造または最適なモデルを利用できる場合の、リード化合物の最適化で実行される物理ベースモデリングにも効果をもたらすことが期待されている。

これまでに科学文献で報告されている約 10^7 種類の有機物質と無機物質のほかに、薬理活性を持つ可能性のある分子を調査できることは重要である。実際、生体に近い分子量を持つとされる炭素系化合物の総数は、10^{60} 個ほどになる。[148] このように、膨大な未知の化学的領域が探索されずに残っていることから、この分野が大きな可能性を秘めていることは間違いない。このことは、例えば現在「オンデマンド」合成で取得できる超巨大な有機低分子化合物のライブラリーを、より正しく評価できるようなことにもつながる。[149]

分子化合物の評価の精緻化は、タンパク質リガンド複合体の分子動力学シミュレーションによって可能になる。このような領域において、量子コンピューティングは、量子力学や分子力学によるハイブリッドのアプローチと、古典コンピューター上に存在する基本パラメーター導出のための、強力なツールとなるであろう。こうした進歩は、リード化合物の最適化と、成長分野である計算プロセス化学（医薬品製造での生体触媒作用に役立つ、酵素反応性と立体選択性のモデリングなど）のどちらにも応用されるだろう。[150]

ユースケース

タンパク質立体構造予測に基づく、新たな生物学的製剤の開発

低分子医薬品とは対照的に、バイオ医薬品では、タンパク質などの高分子が医薬品となる。抗体、インシュリン、および数多くのワクチンなどのバイオ医薬品が、数十年にわたって使用されてきた。[151] 近年では、複数の疾病の治療を見据えて、バイオ医薬品に着目する製薬会社が増えてきている。バイオ医薬品の 3D 構造設計は、機能、特異性および安定性にとって重要な役割を担っている。[152]

レヴィンタールのパラドックスで説明されているように、実世界のタンパク質モデリングのケースでは、理論上存在し得る膨大な数の構造パターンの探索が必要となる（図 21 参照）。[153] 理論上存在し得るコンフォメーションの数は、タンパク質の鎖の長さによって指数関数的に増加する。そのため、その構造を古典コンピューター上で特定するのは困難とされている。例えば、1 つのモデルで、20 個のアミノ酸の鎖に存在し得るコンフォメーションは 109 通りであり、60 個のアミノ酸の鎖と 100 個のアミノ酸の鎖で存在し得るコンフォメーションはそれぞれ 10^{28} 通りと 10^{47} 通りである。[154] しかも、米国 FDA のバイオ医薬品の定義によれば、タンパク質は 40 個以上のアミノ酸で構成されている必要がある。[155]

多くのタンパク質は、既知のタンパク質構造との類似性に基づいて、的確にモデリングできる。設計上は困難とされるものの、重要な標的は、抗体の相補性決定領域における超可変の H3 ループである。このループには、通常 3 ～ 20 個、あるいはそれ以上の残基が含まれるが、こうした残基の分子構造をいかに正確に表現するかが、既存の研究において 1 つの大きなテーマとなってきた。[156]

量子コンピューティングは、理論上存在し得る膨大な構造の中から最も確度の高い構造を特定するなど、タンパク質立体構造予測における数多くの計算上の課題を克服する可能性がある。また、最近の文献では、格子上にある 2 つの一般的なコンフォメーション（αヘリックスとβシート）のペプチドを、量子コンピューティングによってスコアリングできることが証明され、タンパク質構造の探索に量子アルゴリズム活用の可能性が示唆されている。[157] 併せて、この文献には、タンパク質の力場計算を、量子コンピューティングが劇的に向上させる可能性があることも示されている。[158] 今後さらに量子ボリュームが増加することで、より多くのコンフォメーションのスコアリングを行えるよう、量子コンピューティングの能力が向上すると期待されている。[159] 既存の深層学習ネットワークを用いたタンパク質の構造予測における最近の進展は、適切な機械学習のトレーニングデータが非常に限られている中で、非天然アミノ酸を含むポリペプチドを研究する場合に、量子アルゴリズムが特に有用であることを示唆している。[160]

量子コンピューティングは、これまでに取り上げた、将来実現の可能性がある量子技術のあらゆる応用例と同様に、直接関係を持たない他分野において、新たなユースケースを実現させる可能性がある。例えば、バイオ医薬品は、低分子医薬品よりもはるかに不安定な分子構造を有する傾向にあり、バイオ医薬品のサプライチェーン、つまり製造～出荷～薬局・病院・家庭への配送という物流の最適化は複雑なプロセスになる。しかし、これもまた、量子コンピューティングによって最適化できる可能性がある。[161]

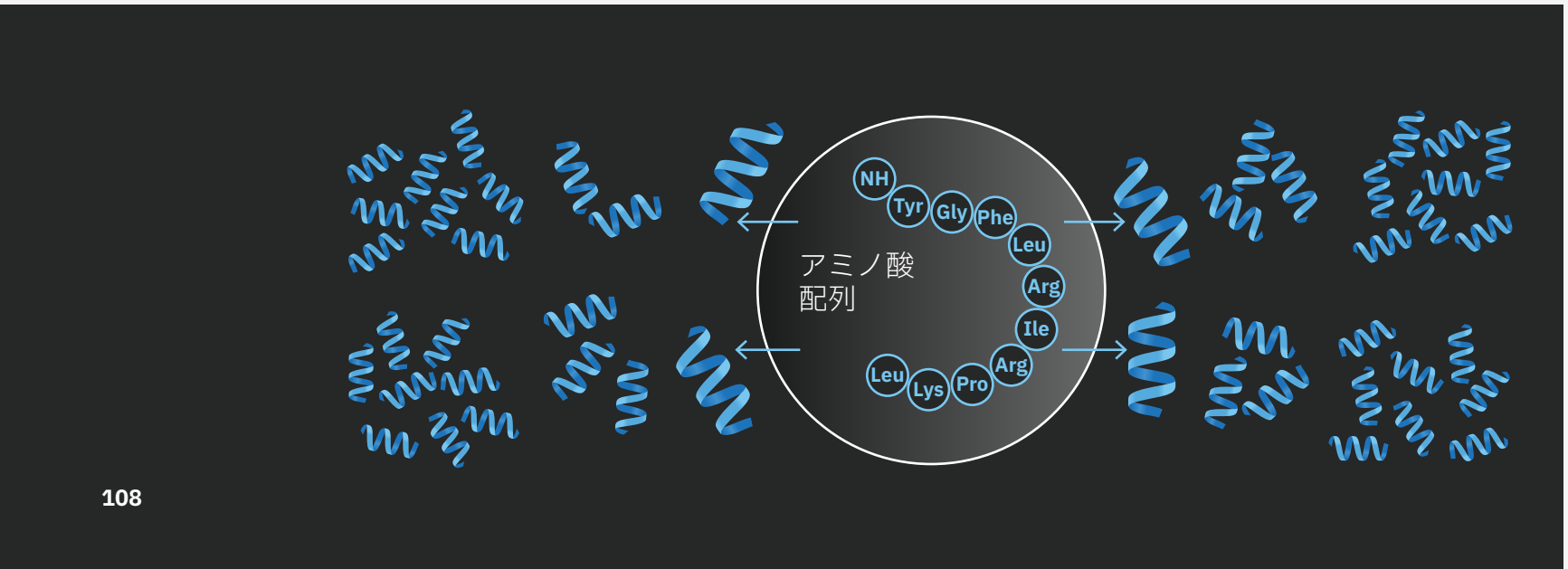
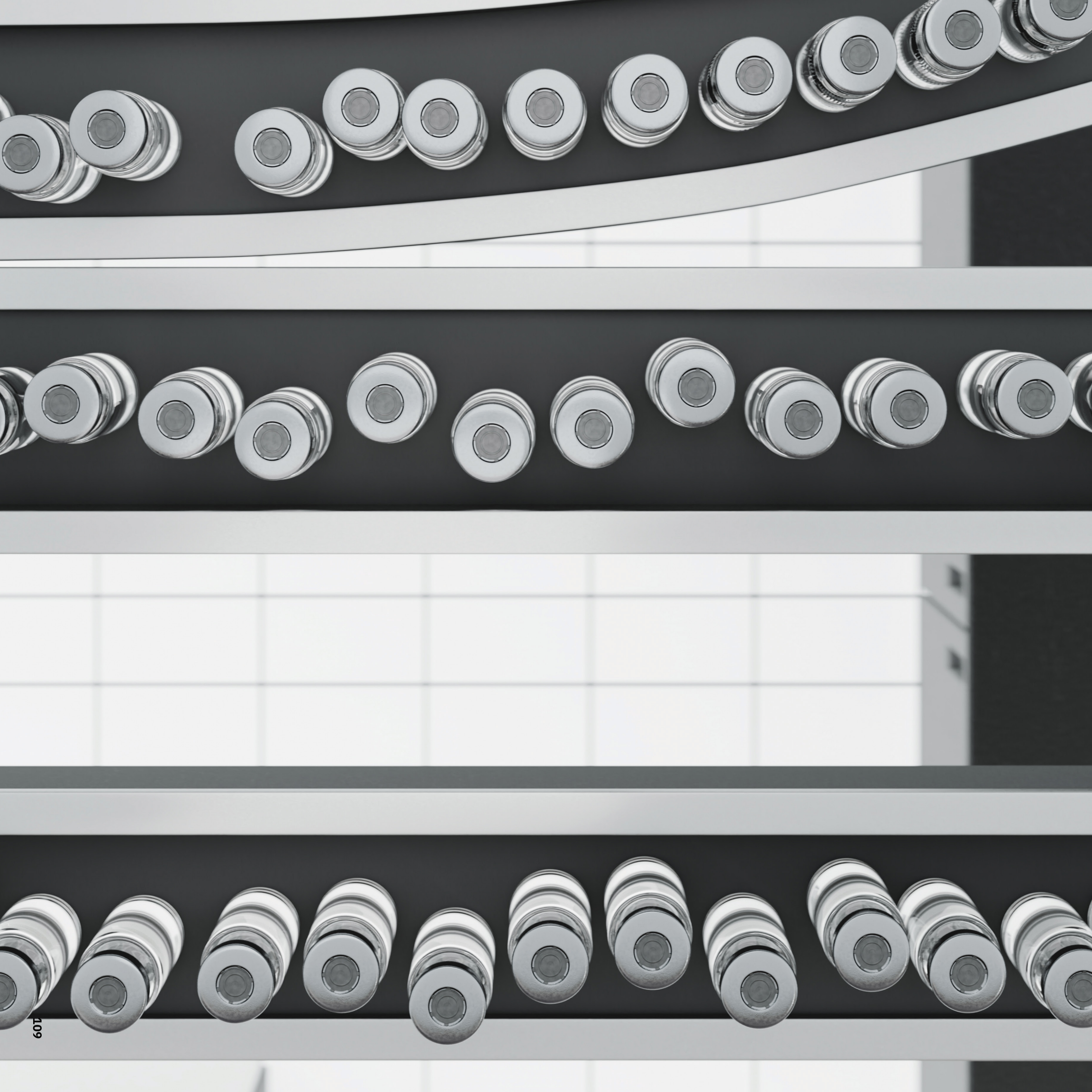
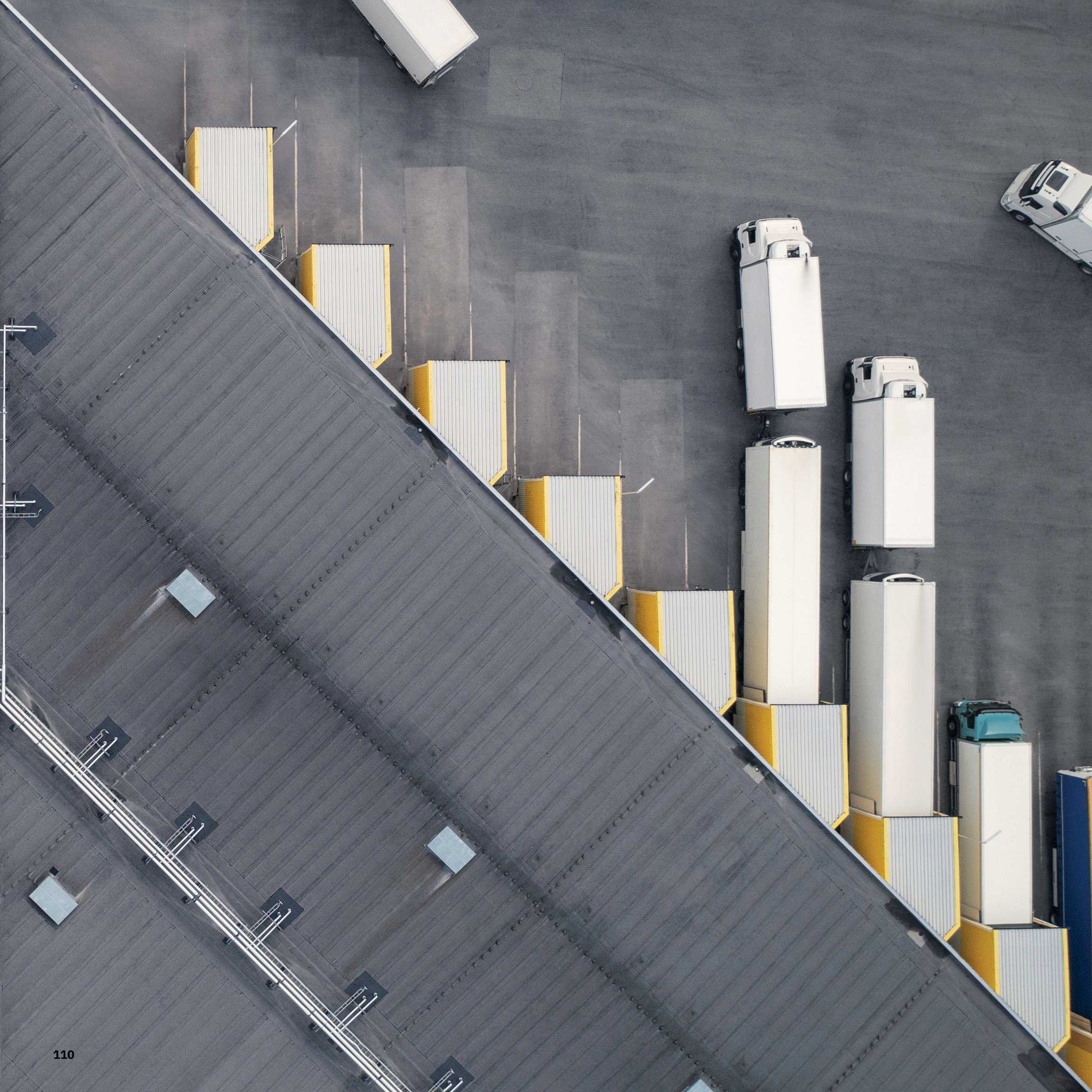


図 21

レヴィンタールのパラドックス
アミノ酸の数がわずか 100 個のタンパク質でさえ、考えられるコンフォメーションはおよそ 10^{47} 通りにも及ぶ。にもかかわらず、現実世界では、数秒で多くのタンパク質がそれぞれの構造に自然と折り畳まれる。





量子コンピューティング応用事例

ロジスティクス

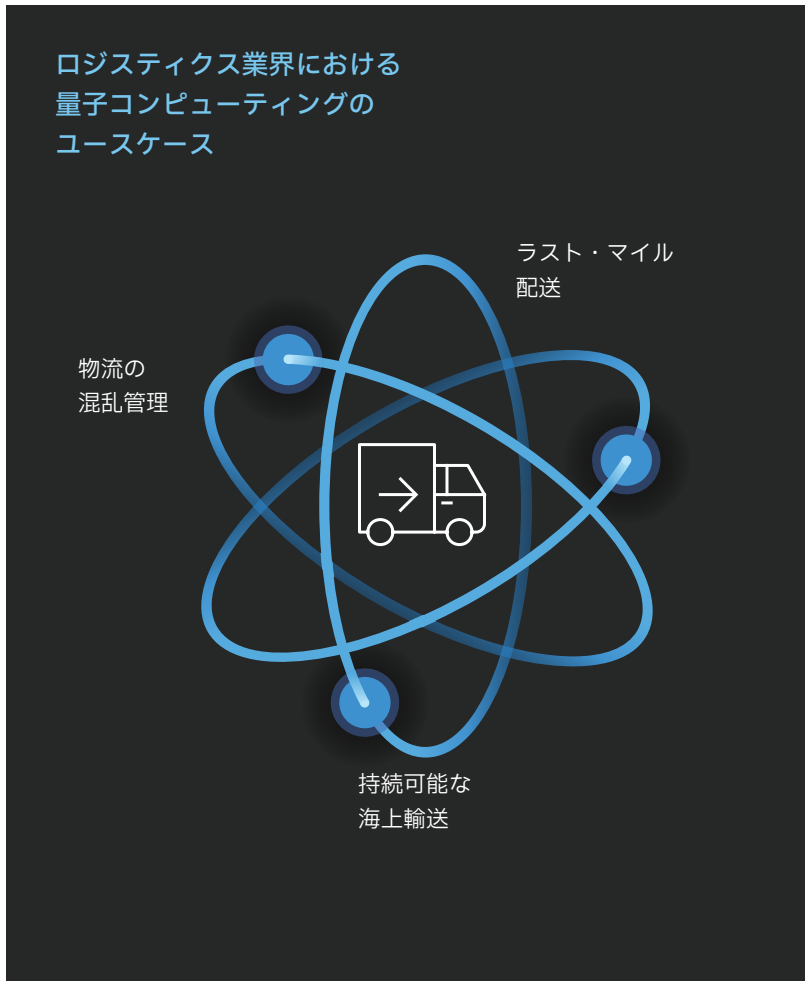
グローバル化が拡大し、国際的な貿易が盛んな現代では、輸送とロジスティクスを効果的に管理することが、経済と社会の全体を正常に機能させるために不可欠である。新型コロナウイルス感染症のパンデミック（世界的大流行）が浮き彫りにしたように、物流に混乱が生じると、企業間取引と消費者行動はともに壊滅的な打撃を受ける可能性がある。相互接続とデジタル化の進んだ今日の世界において、ロジスティクスとサプライチェーンの戦略は、かつてないほど重要性を増し、かつ複雑化していると言えるだろう。

パンデミック以前の一般消費者は、日頃利用する製品や食品がどのように輸送されてくるのかについてほとんど気にしていなかった。食料品店の商品棚は常に補充され、欲しいものが何でもすぐに手に入るのが当たり前だった。今や「サプライチェーン」というワードは一般的に耳にするし、ニュースは物流の混乱に関する話題で持ち切りだ。そうした中で、輸送の能力不足やコスト上昇、電子商取引の拡大といった課題への対応も迫られている。

ロジスティクス企業の全体目標は、最適なオペレーションを常に維持することだが、口で言うほど簡単ではない。状況が安定している時でさえ、ロジスティクス管理は非常に多岐にわたる。物流計画の策定をはじめ、製造･供給、保管・流通、輸送・出荷といった、さまざまな要素やシステムが相互につながりながら常に動いている。

企業はロジスティクス最適化モデルを利用することで、有効な調達、生産、保管、輸送を通じ、供給能力の制約を守って需要に応えながら、全体のコストを削減している。最適化モデルに含まれる情報は多ければ多いほど良い。しかし、情報が多いということは、モデルが複雑化し、必要な計算能力が指数関数的に増大することも意味する。今日のロジスティクス事業者はテクノロジーの限界に挑むような複雑な課題に直面している。こうした問題は規模が大きくなるほど、古典的コンピューティング技術だけで解決するのは難しい。

量子コンピューティングは、輸送やロジスティクスが今日直面している大きな課題に対処する上で、強力なツールへ進化する可能性を秘めている。ロジスティクスをめぐる数々の重要課題に取り組むためには、量子と古典の両コンピューターを併用することが有効である可能性が高い。ここでは３つのユースケースを検討する。「ラスト･マイル配送」と「物流の混乱管理」、「持続可能な海上輸送」である。



ユースケース

ラスト・マイル配送

オムニチャネル* の受注・配送管理（フルフィルメント）の迅速化を求める声が顧客の間で強まる中、マルチモーダル輸送（多様な輸送手段の組み合わせ）の最適化は避けて通れない。中でもラスト・マイル配送は重要だ。ラスト・マイル配送は世界のロジスティクス業界で注目点の 1 つであり、電子商取引の急成長に後押しされる形で巨大なビジネスチャンスを生み出している。2022 年の市場規模は 407 億ドルと見積もられ、32 年には 862 億ドル規模に成長すると予測されている。[162]

ラスト·マイル配送はもともとサプライチェーンの中でも特に高コストで難しい部分だが、現在の物流混乱の中で、さらに厄介な状況に陥っている。パンデミックによって電子商取引の利用は一段と広がった。消費習慣は変化し、予測不可能な需要がますます増えている。消費者の声に応える配送を実現するには、機敏に対応することが極めて重要だ。しかし、現在の配送システムは断片的で対応力に乏しいままで、大規模な物流ネットワークの最適化も限定的にしかできない。

物流大手 UPS 社による全世界での 1 日の平均配達量は 2021 年に 2,520 万個だった。このことからも、ロジスティクスの規模や複雑性は容易に理解できるだろう。[163] この規模の最適化モデルを利用するには古典コンピューティングの限界を超える必要があり、それと同時に量子コンピューティングの適用可能性を示している。

古典コンピューターを用いたラスト·マイル配送に対するソリューションは、ヒューリスティクスに基づいており、入力情報が限られている。頻繁な変化や需要の転換に対応するのも難しく、時間を要する。ラスト・マイル配送の最適化問題における状態空間は多くの場合、入力の規模に合わせて指数関数的に複雑さを増していく。このため、解の最適性ギャップ（近似解と最適解の隔たり）が大きく、実行時間も長くなり、古典コンピューティングの限界を示している。

量子アルゴリズムはより大規模で複雑なロジスティクス問題を解決できる可能性があるという研究結果も出ている。[164] こうしたアルゴリズムは解を探索する際の効率性を高め、収益性の高い配送ルートの発見や、効率的な車両管理が可能になるだろう。

大域的に輸送ルートを最適化したり、高頻度で最適化を繰り返すことで、量子コンピューターは顧客満足度を向上させるだけでなく、ドア・ツー・ドアの貨物輸送コストを大幅に削減できる可能性がある。ラスト・マイル配送の進歩は、ロジスティクス業界にゲーム・チェンジをもたらし得る。パフォーマンスが 1% 向上しただけでも、世界全体では年 4 億ドルものコスト削減が見込めるからだ。[165]

* オムニチャネルは実店舗やネットなど、すべての販売チャネルや顧客との接点を融合し、顧客へ総合的にアプローチする方法

ユースケース

物流の
混乱管理

新型コロナウイルス感染症のパンデミックは、グローバルなサプライチェーンに甚大な衝撃を与えたが、長い歴史で見れば、幾度となく繰り返されるパンデミックの１つに過ぎず、同様の問題は間違いなく将来も起きるだろう。このため、このような混乱が起きた際に迅速かつ効率的に対応・管理する能力は、ロジスティクス企業にとって引き続き重要となる。

物流の混乱に対する企業リーダーの対策は、自社のサプライチェーンにインテリジェンスとアジリティーを組み込むことだ。その際に目指すのはパフォーマンスとレジリエンスの抜本的な改善だ。データ主導のソリューションがここでは鍵を握っている。その証左に、リーダーの 73% は「データの戦略的価値を認識している」とし、64% が「データを利用して新しい機会を特定している」と答えている。[166]

混乱がもたらす影響を正確にシミュレートする能力も重要となる。迅速な対応と早期復旧を図るためだ。ただ、そのためには、航空機や列車、船舶、トラックの国際運行を管理したり、何百万もの企業や消費者にサービスを提供する必要があるため、作業は非常に煩雑になり、現行の混乱管理システムでは限界に近い。

古典的なシステムは主に、あらかじめ決められたルール・ベースで動き、手作業とアドホックなプロセスから構成される。サイロ型で順次処理的であるため限られた洞察しか得られず、復旧に必要な意思決定に活用すると不備をもたらす懸念がある。人員や設備、資材が個別に扱う準最適なアプローチしか取られていない。システム全体の復旧には、1 週間から 2 カ月以上かかることもある。さらに、多数の要素が入り組み、さまざまな依存関係が存在している複雑な環境では、混乱の先行きに関するシナリオの数が膨大となる場合がある。だが、現在の一般的なシミュレーションでは、すべての要素を考慮せずに、最も実現可能性の高いシナリオのみを特定しようとすることが多い。

量子コンピューティングを活用すれば、混乱のシナリオに関するシミュレーションをより多く実施したり、物流ネットワークに与えるさまざまな影響を定量評価したりすることができ、意思決定の質を高めることが可能となる。量子コンピューターを用いてリスクや影響を分析することで、仮説を立てて検証する「What If」シミュレーションのシナリオ数を減らせる場合がある。実行可能な時間内にこれらのシナリオを最良の結果に変換できるようにする必要がある。量子コンピューターの力を借りて、早期の復旧やコスト削減に取り組んだり、オペレーションおよび顧客サービスへ及ぶ影響を軽減できる可能性がある。さらに、量子機械学習を使って混乱事象をより正確に分類・予測することができるかもしれない。

混乱の管理システムが改善できれば、サプライチェーンの混乱によって世界的に生じた平均 1 億 8,400 万ドルもの損失を減らせるばかりか、輸送とロジスティクスに変革を起こせる可能性がある。[167]

ユースケース

持続可能な
海上輸送

世界貿易の 90% は海運に頼っていることから、[168] 海上物流ではコンテナ輸送の最適化が最優先課題となる。輸送費が過去 2 年間に上昇した結果、世界のコンテナ輸送市場は 1,500 億ドル規模に達した。[169] 世界貿易の不均衡のため、コンテナが空の状態で輸送されることも多いが、このコストはますます膨らんでいる。例えば、40 フィート・コンテナをアジアから欧州へ輸送する費用は、2019 年には 2,000 ドルだったが、現在は 15,000 ドル～ 20,000 ドルになっている。[170]

コンテナ輸送業務への古典的なアプローチは、人間の直感とアドホックな最適化ソリューションを組み合わせたものだ。シミュレーション・モデリングが採用されている港湾やターミナルもあるものの、その解は局所的である場合が多く、入力データも限られている。データに基づく洞察が不足しているため、コンテナ輸送に関する意思決定は多くの場合、「直感」に基づいて行われる。

海運業務に関連する最適化問題は、古典コンピューターでは正確な解を得られないことが多い。船団が大規模であったり、天候不順や需要変動など不測の事態が絡んだりするためだ。小規模な問題であっても、有効な解を得るまでに何時間もかかる。[171]

しかし、量子アルゴリズムを活用すれば、より正確なモデル化が可能になるかもしれない。需要予測の精度を高め、世界規模でインベントリー・ルーティング（inventory routing）* が改善できれば、海上輸送はこれまで以上に効率性や持続可能性が高まる。[172] コンテナ輸送の在り方を見直すことで、大気保全や二酸化炭素の排出削減といった社会的要請に応えられるだけでなく、年間数百万ドルものコスト削減につながる可能性もある。[173]

* 各港湾の在庫を適正に保つように船舶輸送を計画すること

注釈および出典

はじめに
The Quantum Decade

1 “Moore’s Law.” Computer History Museum. 2021 年 3 月 19 日閲覧。https://www.computerhistory.org/revolution/digital-logic/12/267

2 “Quantum computing.” IBM Institute for Business Value. https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/technology/quantum-computing

3 “2021 CEO study: Find your essential.” IBM Institute for Business Value. 2021 年 2 月。
邦訳「CEO スタディ 2021：本質を見極める - ポストコロナ時代における価値の再定義 -」https://www.ibm.com/downloads/cas/6EYBO3DN

4 IBM 社内情報に基づく。

5 Payraudeau, Jean-Stéphane, Anthony Marshall, and Jacob Dencik, Ph.D. “Digital acceleration: Top technologies driving growth in a time of crisis.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 11 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/digital-acceleration

第 1 章
量子に関する認識と
発見の時代

6 “Science and Technology Outlook 2021.” IBM Research. January 2021. https://www.research.ibm.com/downloads/ces_2021/IBMResearch_STO_2021_Whitepaper.pdf

7 Benioff, Paul. “The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines.” Journal of Statistical Physics. 1980 年 5 月。https://www.researchgate.net/publication/226754042_The_computer_as_a_physical_system_A_microscopic_quantum_mechanical_Hamiltonian_model_of_computers_as_represented_by_Turing_machines; Chow, Jerry and Jay Gambetta. “The Quantum Experience: Feynman’s vision comes into focus.” ITProPortal. 2016 年 5 月 9 日。https://www.itproportal.com/2016/05/09/the-quantum-experience-feynmans-vision-comes-into-focus/

8 Gambetta, Jay. “Expanding the IBM Quantum roadmap to anticipate the future of quantum-centric supercomputing.” IBM Research Blog. 2022 年 5 月 10 日。https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap-2025

9 Gambetta, Jay et al. “Driving quantum performance: more qubits, higher Quantum Volume, and now a proper measure of speed.” IBM Research Blog. 2021 年 11 月 1 日。https://research.ibm.com/blog/circuit-layer-operations-per-second

10 Bernhardt, Chris. Quantum Computing for Everyone. The MIT Press. 2019 年。

11 IBM 社内情報に基づく。

12 Bell, Lee. “What is Moore’s Law? WIRED explains the theory that defined the tech industry.” WIRED. 2016 年 8 月 28 日。https://www.wired.co.uk/article/wired-explains-moores-law; “Moore’s Law.” Brittanica.com. 2021 年 3 月 29 日閲覧。https://www.britannica.com/technology/Moores-law

13 Rotman, David. “We’re not prepared for the end of Moore’s Law.” MIT Technology Review. 2020 年 2 月 24 日。https://www.technologyreview.com/2020/02/24/905789/were-not-prepared-for-the-end-of-moores-law/

14 IBM 社内情報に基づく。

15 “What’s next: The future of quantum computing.” IBM Research の動画。2020 年 5 月 8 日。https://www.youtube.com/watch?v=zOGNoDO7mcU

16 IBM 社内情報に基づく。

17 “Cleveland Clinic and IBM Unveil Landmark 10-Year Partnership to Accelerate Discovery in Healthcare and Life Sciences.” IBM News Room. 2021 年 3 月 30 日。https://newsroom.ibm.com/2021-03-30-Cleveland-Clinic-and-IBM-Unveil-Landmark-10-Year-Partnershipto-Accelerate-Discovery-in-Healthcare-and-Life-Sciences
邦訳：「クリーブランド・クリニックと IBM、医療とライフサイエンスにおける発見を加速するための画期的な 10 年間の提携を発表」
https://jp.newsroom.ibm.com/2021-04-09-Cleveland-Clinic-and-IBM-Announce-Breakthrough-10-Year-Alliance-to-Accelerate-Discovery-in-Healthcare-and-Life-Sciences

18 “Messenger RNA (mRNA).” National Human Genome Research Institute. 2021 年 3 月 19 日閲覧。https://www.genome.gov/genetics-glossary/messenger-rna%20

19 Wright, Lawrence. “The Plague Year.” The New Yorker. 2020 年 12 月 28 日。https://www.newyorker.com/magazine/2021/01/04/the-plague-year

20 “Science and Technology Outlook 2021.” IBM Research. 2021 年 1 月。https://www.research.ibm.com/downloads/ces_2021/IBMResearch_STO_2021_Whitepaper.pdf

21 Payraudeau, Jean-Stéphane, Anthony Marshall, and Jacob Dencik, Ph.D. “Digital acceleration: Top technologies driving growth in a time of crisis.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 11 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/digital-acceleration

第 2 章
量子の時代への準備と
実験の威力

22 “What problems could quantum computers solve?” 動画。IBM Digital Nordic. 2020 年 2 月 20 日。https://www.ibm.com/blogs/nordic-msp/problems-quantum-computers-solve/

23 IBM 社内情報に基づく。

24 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas — Deep Dive.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 9 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise

25 Gao, Qi, Gavin O. Jones, Mario Motta, Michihiko Sugawara, Hiroshi C. Watanabe, Takao Kobayashi, Eriko Watanabe, Yu-ya Ohnishi, Hajime Nakamura, and Naoki Yamamoto. “Applications of Quantum Computing for Investigations of Electronic Transitions in Phenylsulfonyl-carbazole TADF Emitters.” arXiv.org. 2020 年 7 月 31 日。https://arxiv.org/abs/2007.15795

26 Hong, Gloria, Xuemin Gan, Céline Leonhardt, Zhen Zhang, Jasmin Seibert, Jasmin M. Busch, and Stefan Bräse. “A Brief History of OLEDs—Emitter Development and Industry Milestones.” Advanced Materials. 2021 年 3 月 4 日。https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202005630

27 Divyanshi, Tewari. “Organic LED Market.” Allied Market Research. 2020 年 4 月。https://www.alliedmarketresearch.com/organic-oled-market

28 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Core Concepts.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 5 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise

29 同上

30 同上

31 “Post-Quantum Cryptography: Post-Quantum Cryptography Standardization.” National Institute of Standards and Technology. 2021 年 4 月 6 日。https://csrc.nist.gov/Projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization

32 Foster, Mark. “Building the Cognitive Enterprise: Nine Action Areas—Deep Dive.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 9 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/build-cognitive-enterprise

33 Joshi, Shai, Varun Bijlani, Sreejit Roy, and Sunanda Saxena. “Reimagining service delivery: Emerging stronger with the new Dynamic Delivery model.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 8 月。https://ibm.co/service-delivery; Comfort, Jim, Blaine Dolph, Steve Robinson, Lynn Kesterson-Townes, and Anthony Marshall. “The hybrid cloud platform advantage: A guiding star to enterprise transformation.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 6 月。邦訳「ハイブリッドクラウド・プラットフォームの利点 - 企業変革への指針 -」https://www.ibm.com/downloads/cas/E3QX9ZM2

34 Sutor, Robert, Scott Crowder, and Frederik Flöther. “Building your quantum capability: The case for joining an ‘ecosystem.’” IBM Institute for Business Value. 2019 年 1 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumeco

35 Shein, Esther. “A more quantum-literate workforce is needed.” TechRepublic. 2020 年 11 月 18 日。https://www.techrepublic.com/article/a-more-quantum-literate-workforce-is-needed/

36 社内インタビュー。

37 Shein, Esther. “A more quantum-literate workforce is needed.” TechRepublic. 2020 年 11 月 18 日。https://www.techrepublic.com/article/a-more-quantum-literate-workforce-is-needed/

38 社内インタビュー。

39 Metz, Cade. “The Next Tech Talent Shortage: Quantum Computing Researchers.” The New York Times. 2018 年 10 月 21 日。https://www.nytimes.com/2018/10/21/technology/quantum-computing-jobs-immigration-visas.html

40 Kandala, Abhinav et al. “Error mitigation extends the computational reach of a noisy quantum processor.” 2019 年 3 月 27 日。Nature. https://www.nature.com/articles/s41586-019-1040-7

41 van den Berg, Ewout et al. “Probabilistic error cancellation with sparse Pauli-Lindblad models on noisy quantum processors.” arXiv. https://arxiv.org/abs/2201.09866

42 Temme, Kristan, Ewout van den Berg, Abhinav Kandala, and Jay Gambetta. “With fault tolerance the ultimate goal, error mitigation is the path that gets quantum computing to usefulness.” IBM Research Blog. 2022 年 7 月 19 日。https://research.ibm.com/blog/gammabar-for-quantum-advantage

第 3 章
量子優位性と
ビジネス価値の追求

43 Gil, Dr. Darío, Jesus Mantas, Dr. Robert Sutor, Lynn Kesterson-Townes, Dr. Frederik Flöther, and Chris Schnabel. “Coming soon to your business—Quantum computing: Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology.” IBM Institute for Business Value. 2018 年 11 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy. 公開以降、命名法などいくつかの情報に更新あり。

44 Eddins, Andrew, Mario Motta, Tanvi P. Gujarati, Sergey Bravyi, Antonio Mezzacapo, Charles Hadfield, and Sarah Sheldon. “Doubling the size of quantum simulators by entanglement forging.” arXiv.org. 2021 年 4 月 22 日。https://arxiv.org/pdf/2104.10220.pdf

45 IBM 社内情報に基づく。

46 Marr, Bernard. “How Quantum Computers Will Revolutionize Artificial Intelligence, Machine Learning and Big Data.” Forbes. 2017 年 9 月 5 日。https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-data/?sh=72ab8ea05609; Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe, and Seth Lloyd. “Quantum machine learning.” Nature. 2017 年 9 月 13 日。https://www.nature.com/articles/nature23474

47 Torlai, Giacomo, Guglielmo Mazzola, Juan Carrasquilla, Matthias Troyer, Roger Melko, and Giuseppe Carleo. “Neural-network quantum state tomography.” Nature. 2018 年 2 月 26 日。https://www.nature.com/articles/s41567-018-0048-5

48 Leprince-Ringuet, Daphne. “IBM and ExxonMobil are building quantum algorithms to solve this giant computing problem.” ZDNet. 2021 年 2 月 11 日。https://www.zdnet.com/article/ibm-and-exxonmobil-are-building-quantum-algorithms-to-solve-this-giant-optimization-problem/

49 Liu, Yunchao, Srinivasan Arunachalam, and Kristan Temme. “A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning.” arXiv.org. 2020 年 12 月 1 日。https://arxiv.org/pdf/2010.02174.pdf

50 IBM 社内インタビューに基づく。

51 Liu, Yunchao, Srinivasan Arunachalam, and Kristan Temme. “A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning.” Nature. 2021 年 7 月 12 日。https://www.nature.com/articles/s41567-021-01287-z

52 Gujarati, Tanvi P. et al. “Quantum Computation of Reactions on Surfaces Using Local Embedding.” arXiv. 2022 年 4 月 7 日。https://arxiv.org/abs/2203.07536

53 Motta, Mario et al. “Quantum chemistry simulation of ground- and excited-state properties of the sulfonium cation on a superconducting quantum processor.” arXiv. 2022 年 8 月 4 日。 https://arxiv.org/abs/2208.02414

54 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 6 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantumapps. 公開以降、命名法などいくつかの情報に更新あり。

55 同上

56 Sutor, Bob. “Scientists Prove a Quantum Computing Advantage over Classical.” IBM Research Blog. 2018 年 10 月 18 日。https://www.ibm.com/blogs/research/2018/10/quantum-advantage-2/; Sutor, Robert S. Dancing with Qubits. Packt Publishing. 2019 年。https://www.packtpub.com/data/dancing-with-qubits

57 Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S. Bishop, Jerry M. Chow, Andrew Cross, Daniel J. Egger, Stefan Filipp, Andreas Fuhrer, Jay M. Gambetta, Marc Ganzhorn, Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Peter Müller, Walter Riess, Gian Salis, John Smolin, Ivano Tavernelli, and Kristan Temme. “Quantum optimization using variational algorithms on near-term quantum devices.” Quantum and Science Technology. 2018 年 6 月。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aab822; Havlicek, Vojtech, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces.” Nature. 2019 年。https://arxiv.org/pdf/1804.11326.pdf

58 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 6 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantumapps. 公開以降、命名法などいくつかの情報に更新あり。

59 同上

60 “Exploring quantum computing use cases for financial services.” IBM Institute for Business Value. 2019 年 9 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/exploring-quantum-financial

61 Yndurain, Dr. Elena and Lynn Kesterson-Townes. “Prioritizing quantum computing applications for business advantage: Charting a path to quantum readiness.” IBM Institute for Business Value. 2020 年 6 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/prioritizing-quantumapps. 公開以降、命名法などいくつかの情報に更新あり。

業界別ガイド
航空

62 Kwok, Linchi. “Will the Hospitality and Travel Industry Recover in 2021?” Hospitality Net. 2021 年 2 月 18 日。https://www.hospitalitynet.org/opinion/4103064.html; “Deep Losses Continue Into 2021.” International Air Transport Association. IATA プレス・リリース。2020 年 11 月 24 日。https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2020-11-24-01/

63 Woerner, Stefan, and Daniel J. Egger. “Quantum risk analysis.” Nature. 2019 年 2 月 8 日。https://www.nature.com/articles/s41534-019-0130-6

64 Havlíček, Vojtěch, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces.” Nature. 2019 年 3 月 13 日。https://www.nature.com/articles/s41586-019-0980-2

65 Moll, Nikolaj, Panagiotis Barkoutsos, Lev S. Bishop, Jerry M. Chow, Andrew Cross, Daniel J. Egger, Stefan Filipp, Andreas Fuhrer1 Jay M. Gambetta, Marc Ganzhorn, Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Peter Müller, Walter Riess, Gian Salis, John Smolin, Ivano Tavernelli, and Kristan Temme. “Quantum optimization using variational algorithms on near-term quantum devices.” Quantum Science and Technology. 2018 年 6 月 19 日。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/aab822

業界別ガイド
銀行および
金融市場

66 Rutkowski, Marek. “The Black-Scholes Model.” University of Sydney. 2016 年。http://www.maths.usyd.edu.au/u/UG/SM/MATH3075/r/Slides_8_Black_Scholes_Model.pdf

67 Flother, Frederik, Darío Gil, Lynn Kesterson-Townes, Jesus Mantas, Chris Schnabel, and Bob Sutor. “Coming soon to your business–Quantum Computing.” IBM Institute for Business Value. 2018 年 11 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy; Lacan, Francis, Stefan Woerner, and Elena Yndurain. “Getting your financial institution ready for the quantum computing revolution.” IBM Institute for Business Value. 2019 年 4 月。https://www.ibm.com/downloads/cas/MBZYGRKY
邦訳：「金融機関による量子コンピューティング革命実現に向けた布石」
https://www.ibm.com/downloads/cas/LYWANPV9

68 Kaemingk, Diana. “Reducing customer churn for banks and financial institutions.” Qualtrics. 2018 年 8 月 29 日。https://www.qualtrics.com/blog/customer-churn-banking/

69 “Global Findex Database 2017 report, Chapter 2: The Unbanked.” The World Bank. 2017 年。https://globalfindex.worldbank.org/sites/globalfindex/files/chapters/2017%20Findex%20full%20report_chapter2.pdf

70 Watson, Greg. “The Future of Client Onboarding for Financial Institutions.” CLM Industry Trends Report Series. 2019 年 2 月。https://www.fenergo.com/blog/the-future-of-client-onboarding-for-financial-institutions/; Help Net Security. 2021 年 3 月 24 日。https://www.helpnetsecurity.com/2021/03/24/total-combined-fraud-losses/

71 Culp, Steve. “Banks Need New Approaches In Complying With Financial Crimes Regulations.” Forbes. 2018 年 3 月 5 日。https://www.forbes.com/sites/steveculp/2018/03/05/banks-need-new-approaches-in-complying-with-financial-crimes-regulations/?sh=7e5f18aa4147

72 Agrawal, Amit. “The future of client onboarding.” FinTech Futures. 2018 年 9 月 24 日 https://www.fintechfutures.com/2018/09/the-future-of-client-onboarding/

73 Havlicek, Vojtech, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. “Supervised learning with quantum enhanced feature spaces.” Nature volume 567. 2019 年 3 月 13 日。https://www.nature.com/articles/s41586-019-0980-2

74 “Basel III: international regulatory framework for banks.” Bank for International Settlements. https://www.bis.org/bcbs/basel3.htm

75 “Regulatory costs expected to more than double for financial services firms, according to survey from Duff & Phelps.” Global Banking & Finance Review. 2017 年 4 月 28 日。https://www.globalbankingandfinance.com/regulatory-costs-expected-to-more-than-double-for-financial-services-firms-according-to-survey-from-duff-phelps/; “The outlook for financial services regulation.” KPMG Horizons. 2019 年 1 月。https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2019/01/horizons-magazine.pdf

76 Chirikhin, Andrey. “Overview of Credit Valuation Adjustments.” 2017 年 6 月 29 日。https://www.linkedin.com/pulse/overview-credit-valuation-adjustments-buy-side-andrey-chirikhin/

77 “The Evolution of XVA Desk Management. Key findings from practitioners at 37 global financial institutions.” Making the Most of XVA Practitioner Perspectives Report. Fintegral and IACEMP. 2018 年 5 月。http://iacpm.org/wp-content/uploads/2018/06/IACPM-Fintegral-Making-the-Most-of-XVA-2018-White-Paper.pdf; Stafford, Philip. “What is Mifid II and how will it affect EU’s financial industry?” Financial Times. 2017 年 9 月 15 日。 https://www.ft.com/content/ae935520-96ff-11e7-b83c-9588e51488a0

78 Geddes, George. “Bond ETF assets to hit $2trn by 2024, predicts BlackRock.” ETF Stream. 2019 年 6 月 26 日。https://www.etfstream.com/news/bond-etf-assets-to-hit-2trn-by-2024-predicts-blackrock/; White, Amanda. “Investors buoyed by ESG frameworks.” top1000funds. 2019 年 6 月 25 日。https://www.top1000funds.com/2019/06/investors-buoyed-by-esg-frameworks/

業界別ガイド
化学および
石油

79 “Chemical Industry Contributes $5.7 Trillion To Global GDP And Supports 120 Million Jobs, New Report Shows.” The European Chemical Industry Council. 2019 年 3 月 11 日。https://cefic.org/media-corner/newsroom/chemical-industry-contributes-5-7-trillion-to-global-gdp-and-supports-120-million-jobs-new-report-shows/

80 IBM の計算に基づく。

81 Coughlin, Tom. “175 Zettabytes By 2025.” Forbes. 2018 年 11 月 27 日。https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025/?sh=7483bab9b6d8

82 Kandala, Abhinav, Antonio Mezzacapo, Kristan Temme, Maika Takita, Markus Brink, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. “Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets.” Nature. 2017 年 9 月 13 日。https://www.nature.com/articles/nature23879

83 Bourzac, Katherine. “Chemistry is quantum computing’s killer app.” Chemical & Engineering News. 2017 年 10 月 30 日。https://cen.acs.org/articles/95/i43/Chemistry-quantum-computings-killer-app.html

84 Stamatopoulos, Nikitas, Daniel J. Egger, Yue Sun, Christa Zoufal, Raban Iten, Ning Shen, and Stefan Woerner. “Option Pricing using Quantum Computers.” Arvix. 2019 年 7 月 5 日。https://arxiv.org/pdf/1905.02666.pdf

85 Cahill, Jay. “Minimizing Valuable Octane Giveaway.” Emerson. 2016 年。https://www.emersonautomationexperts.com/2016/industry/refining/minimizing-valuable-octane-giveaway/; “Oil Refineries Market Report 2018-2028.” MarketWatch. 2018 年 8 月 23 日。

86 “Darcy’s law.” Encyclopaedia Brittanica. 2009 年 5 月 28 日。https://www.britannica.com/science/Darcys-Law

87 Mikulka, Justin. “Fracking in 2018: Another Year of Pretending to Make Money.” Resilience. 2019 年 1 月 17 日。https://www.resilience.org/stories/2019-01-17/fracking-in-2018-another-year-of-pretending-tomake-money/; Merva, John. “Oil Economics - How Much Does An Oil And Gas Well Cost?” Seeking Alpha. 2017 年 1 月 3 日。https://seekingalpha.com/article/4034075-oil-economics-how-much-oil-and-gas-well-cost

業界別ガイド
エレクトロニクス

88 Nellis, Stephen. “EXCLUSIVE TSMC looks to double down on U.S. chip factories as talks in Europe falter.” Reuters. 2021 年 5 月 14 日。https://www.reuters.com/technology/exclusive-tsmc-looks-double-down-us-chip-factories-talks-europe-falter-2021-05-14/

89 “Consumer Electronics.” Statistica. 2022 年 3 月 24 日閲覧。https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/worldwide; Ng, Abigail. “Smartphone users are waiting longer before upgrading—here’s why.” CNBC.com. 2019 年 5 月 16 日。https://www.cnbc.com/2019/05/17/smartphone-users-are-waiting-longer-before-upgrading-heres-why.html

90 Dusina, Daniel, Jacob Seabolt, and Mitch Polich. “The semiconductor shortage: Implications for the global economy.” DBusiness. 2021 年 8 月 2 日。https://www.dbusiness.com/daily-news/the-semiconductor-shortage-implications-for-the-global-economy/

91 Fulton III, Scott. “After Moore’s Law: How Will We Know How Much Faster Computers Can Go?” DataCenter Knowledge. 2020 年 12 月 21 日。https://www.datacenterknowledge.com/supercomputers/after-moore-s-law-how-will-we-know-how-much-faster-computers-can-go

92 “IBM unveils world’s first 2 nanometer chip technology, opening a new frontier for semiconductors.” IBM. 2021 年 5 月 6 日。https://newsroom.ibm.com/2021-05-06-IBM-Unveils-Worlds-First-2-Nanometer-Chip-Technology,-Opening-a-New-Frontier-for-Semiconductors

93 内部の IBM 調査に基づく。Mertens, Ron. The OLED Handbook: A guide to the OLED industry, technology and market. 2019 年

94 Gao, Qi, et al. “Applications of quantum computing for investigations of electronic transitions in phenylsulfonyl-carbazole TADF emitters.” Computational Materials. 2021 年 5 月 20 日。https://www.nature.com/articles/s41524-021-00540-6

95 “Sustainable materials, sustainable products, sustainable planet.” IBM Research. 2022 年 3 月 23 日閲覧。動画参照。https://research.ibm.com/interactive/5-in-5/photoresists/

96 “Envisioning a new wave in power: Mercedes-Benz bets on quantum to craft the future of electric vehicles.” IBM case study. 2022 年 3 月 16 日閲覧。https://www.ibm.com/case-studies/daimler/

97 Gao, Qi, et al. “Applications of quantum computing for investigations of electronic transitions in phenylsulfonyl-carbazole TADF emitters.” Computational Materials. 2021 年 5 月 20 日。https://www.nature.com/articles/s41524-021-00540-6

98 Divyanshi, Tewari. “Organic LED Market.” Allied Market Research. 2020 年 4 月。https://www.alliedmarketresearch.com/organic-oled-market

99 “The application processor market is expected to grow at a CAGR of 5.63% from 2018 to 2023, to reach USD 38.2 billion by 2023 from USD 29.0 billion in 2018.” CISION: PR Newswire. 2018 年 11 月 26 日。https://www.prnewswire.com/news-releases/the-application-processor-market-is-expected-to-grow-at-a-cagr-of-5-63-from-2018-to-2023--to-reach-usd-38-2-billion-by-2023-from-usd-29-0-billion-in-2018--300755360.html; Garg, Sarchin. “Application Processor Market.” Markets and Markets. 2018 年 10 月

100 Salmon, Linton. “Circuit realization at faster timescales.” Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). https://pdf4pro.com/amp/view/circuit-realization-at-faster-timescales-craft-3b7078.html

101 内部の IBV 調査に基づく。

102 Alemzadeh, Homa, Ravishankar K. Iyer, Zbigniew Kalbarczyk, and Jai Raman. “Analysis of safety-critical computer failures in medical devices.” IEEE Security & Privacy. 2013 年 4 月 29 日。https://ieeexplore.ieee.org/document/6509886

103 “Multiple Qubits and Entangled States.” Qiskit. 2022 年 3 月 23 日閲覧。https://qiskit.org/textbook/ch-gates/multiple-qubits-entangled-states.html

104 “What is a smart factory?” SAP Insights. 2022 年 3 月 16 日閲覧。https://insights.sap.com/what-is-a-smart-factory/

105 Meixner, Anne. “Fabs Drive Deeper Into Machine Learning.” Semiconductor Engineering. 2021 年 9 月 7 日。https://semiengineering.com/fabs-drive-deeper-into-machine-learning/

106 Wang, Brady. “Seemingly hasty, but prudent TSMC’s new fab plan in the US.” Counterpoint Research. 2020 年 5 月 29 日。https://www.counterpointresearch.com/seemingly-hasty-prudent-tsmcs-new-fab-plan-u-s/; Clarke, Peter. “AI report compares 5nm and earlier node wafer costs.” eeNews Analog. 2020 年 9 月 22 日。https://www.eenewsanalog.com/news/ai-report-compares-5nm-and-earlier-node-wafer-costs

107 Thompson, Neil, Kristjan Greenewald, Keeheon Lee, and Gabriel F. Manso. “The computational limits of deep learning.” IBM. 2020 年 9 月 1 日。https://mitibmwatsonailab.mit.edu/research/blog/the-computational-limits-of-deep-learning/

108 内部の IBM 分析

109 Abbas, Amira, et al. “The power of quantum neural networks.” Nature Computational Science. 2021 年 6 月 24 日。https://www.nature.com/articles/s43588-021-00084-1

110 Huang, Hsin-Yuan, et al. “Power of data in quantum machine learning.” Nature Communications. 2021 年 5 月 11 日。https://www.nature.com/articles/s41467-021-22539-9

111 同上

業界別ガイド
医療

112 Kent, Jessica. “Big Data to See Explosive Growth, Challenging Healthcare Organizations.” Health IT Analytics. 2018 年 12 月 3 日。https://healthitanalytics.com/news/big-data-to-see-explosive-growth-challenging-healthcare-organizations

113 Bodenheimer, MD, Thomas, and Christine Sinsky, MD. “From Triple to Quadruple Aim: Care of the Patient Requires Care of the Provider.” Annals of Family Medicine. 2014 年 11 月／12 月。http://www.annfammed.org/content/12/6/573.full.pdf

114 Rjaibi, Walid, Sridhar Muppidi, and Mary O’Brien. “Wielding a double-edged sword: Preparing cybersecurity now for a quantum world.” IBM Institute for Business Value. 2018 年 7 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumsecurity

115 Birtwistle, Mike. “Saving lives and averting costs? The case for earlier diagnosis just got stronger.” Cancer Research UK. 2014 年 9 月 22 日。https://scienceblog.cancerresearchuk.org/2014/09/22/saving-lives-and-averting-costs-the-case-for-earlier-diagnosis-just-got-stronger/

116 Jack, Andrew. “Affordable diagnostics is the missing link in medicine.” Financial Times. 2015 年 12 月 15 日。https://www.ft.com/content/46c4e51a-9451-11e5-bd82-c1fb87bef7af

117 Singh, Hardeep, Ashley N. D. Meyer, and Eric J. Thomas. “The frequency of diagnostic errors in outpatient care: estimations from three large observational studies involving US adult populations.” BMJ Quality and Safety. 2014 年 4 月 17 日。https://qualitysafety.bmj.com/content/qhc/23/9/727.full.pdf; Graber, Mark, L. “The incidence of diagnostic error in medicine.” BMJ Quality and Safety. 2013 年 6 月 15 日。https://qualitysafety.bmj.com/content/qhc/22/Suppl_2/ii21.full.pdf

118 Wang, Daojing and Steven Bodovitz. “Single cell analysis: the new frontier in ‘Omics.’” US Department of Energy Office of Scientific and Technical Information. 2010 年 1 月 14 日。https://www.osti.gov/servlets/purl/983315

119 Andreyev, Dmitry S., and Boris L. Zybailov. “Integration of Flow Cytometry and Single Cell Sequencing.” Trends in Biotechnology. 2020 年 2 月 1 日。https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.09.002

120 McDermott, Jason E, Jing Wang, Hugh Mitchell, Bobbie-Jo Webb-Robertson, Ryan Hafen, John Ramey, and Karin D Rodland. “Challenges in biomarker discovery: combining expert insights with statistical analysis of complex omics data.” Expert Opinion on Medical Diagnostics. 2012 年 8 月 27 日。https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1517/17530059.2012.718329

121 Shahrjooihaghighi, Aliasghar, Hichem Frigui, Xiang Zhang, Xiaoli Wei, Biyun Shi, and Ameni Trabelsi. “An Ensemble Feature Selection Method for Biomarker Discovery.” IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology. 2017. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6420823/pdf/nihms-1016736.pdf

122 “How insurance companies set health premiums.” HealthCare.gov. 2020 年 5 月 8 日閲覧。https://www.healthcare.gov/how-plans-set-your-premiums/

123 Woerner, Stefan, and Daniel J. Egger. “Quantum risk analysis.” npj Quantum Information. 2019 年 2 月 8 日。https://www.nature.com/articles/s41534-019-0130-6.pdf

124 “The Challenge of Health Care Fraud.” National Health Care Anti-Fraud Association. 2020 年 5 月 8 日閲覧。https://www.nhcaa.org/tools-insights/about-health-care-fraud/the-challenge-of-health-care-fraud/

125 Obodoekwe, Nnaemeka, and Dustin Terence van der Haar. “A Critical Analysis of the Application of Data Mining Methods to Detect Healthcare Claim Fraud in the Medical Billing Process.” Ubiquitous Networking. 2018 年 11 月 3 日。https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-02849-7_29

126 Yndurain, Elena, Stefan Woerner and Daniel J. Egger. “Exploring quantum computing use cases for financial services.” IBM Institute for Business Value. 2019 年 9 月。https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-02849-7_29l

127 “Trump Administration Announces Historic Price Transparency Requirements to Increase Competition and Lower Healthcare Costs for All Americans.” US Department of Health and Human Services. 2019 年 11 月 15 日。https://www.hhs.gov/about/news/2019/11/15/trump-administration-announces-historic-price-transparency-and-lower-healthcare-costs-for-all-americans.html

128 Nilesh, Jain. “How precision medicine will change the future of healthcare.” World Economic Forum. 2019 年 1 月 1 日。https://www.weforum.org/agenda/2019/01/why-precision-medicine-is-the-future-of-healthcare/

129 Hood, Carlyn M., Keith P. Gennuso, Geoffrey R. Swain, and Bridget B. Catlin. “County Health Rankings: Relationships Between Determinant Factors and Health Outcomes.” American Journal of Preventive Medicine. 2016 年 2 月 1 日。https://www.ajpmonline.org/article/S0749-3797(15)00514-0/abstract

130 Spilker, Isabell. “A crash test dummy for medicine.” Best Practice. 2018 年 3 月。https://www.t-systems.com/de/en/newsroom/best-practice/03-2018-digital-twin/digital-twin-and-healthcare-a-crash-test-dummy-for-medicine

131 Ravizza, Stefan, Tony Huschto, Anja Adamov, Lars Böhm, Alexander Büsser, Frederik F. Flöther, Rolf Hinzmann, Helena König, Scott M. McAhren, Daniel H. Robertson, Titus Schleyer, Bernd Schneidinger, and Wolfgang Petrich. “Predicting the early risk of chronic kidney disease in patients with diabetes using real-world data.” Nature Medicine. 2019 年 1 月 7 日。https://rdcu.be/bfKPU

132 Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe, and Seth Lloyd. “Quantum Machine Learning.” 2018 年 5 月 14 日。https://arxiv.org/pdf/1611.09347.pdf

133 Menden, Michael P., Francesco Iorio, Mathew Garnett, Ultan McDermott, Cyril H. Benes, Pedro J. Ballester, and Julio Saez-Rodriguez. “Machine Learning Prediction of Cancer Cell Sensitivity to Drugs Based on Genomic and Chemical Properties.” PLOS One. 2013 年 4 月。https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0061318&type=printable

134 Fogel, Alexander L., and Joseph C. Kvedar. “Artificial intelligence powers digital medicine.” npj Digital Medicine. 2018 年 3 月 14 日。https://www.nature.com/articles/s41746-017-0012-2.pdf

135 Killian, Jackson A., Bryan Wilder, Amit Sharma, Daksha Shah, Vinod Choudhary, Bistra Dilkina, and Milind Tambe. “Learning to Prescribe Interventions for Tuberculosis Patients Using Digital Adherence Data.” Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. 2019 年 6 月 24 日。https://arxiv.org/pdf/1902.01506.pdf

136 Coleman, Jr, Charles A., Angus McCann, and Heather Fraser. “Precision health and wellness: The next step for population health management.” IBM Institute for Business Value. 2016 年 12 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/phm

業界別ガイド
ライフサイエンス

137 “5in5: Five innovations that will change our lives within five years.” IBM. 2019 年。
邦訳：「5in5: テクノロジーが 5 年以内に私たちの暮らしを変える 5 つの方法」
https://www.research.ibm.com/jp-ja/5-in-5/

138 Tirrell, Meg. “Unlocking my genome: Was it worth it?” CNBC. 2015年12月14日。https://www.cnbc.com/2015/12/10/unlocking-my-genome-was-it-worth-it.html; Kandpal, Raj P., Beatrice Saviola, and Jeffrey Felton. “The era of ‘omics unlimited.” Future Science. 2018年4月25日。https://www.future-science.com/doi/full/10.2144/000113137

139 Copeland, Libby. “You Can Learn a Lot About Yourself From a DNA Test. Here’s What Your Genes Cannot Tell You.” Time. 2020 年 3 月 2 日。https://time.com/5783784/dna-testing-genetics

140 Emani, Prashant S., Jonathan Warrell, Alan Anticevic, Stefan Bekiranov, Michael Gandal, Michael J. McConnell, Guillermo Sapiro, Alán Aspuru-Guzik, Justin Baker, Matteo Bastiani, Patrick McClure, John Murray, Stamatios N. Sotiropoulos, Jacob Taylor, Geetha Senthil, Thomas Lehner, Mark B. Gerstein, and Aram W. Harrow. “Quantum Computing at the Frontiers of Biological Sciences.” 2019 年。 https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1911/1911.07127.pdf

141 Zambelli, Federico, Graziano Pesole, Giulio Pavesi. “Motif discovery and transcription factor binding sites before and after the nextgeneration sequencing era.” Briefings in Bioinformatics. 2012 年 4 月 19 日。https://academic.oup.com/bib/article/14/2/225/208333

142 “Genome-Wide Association Studies Fact Sheet.” National Human Genome Research Institute. 2015 年 8 月 27 日。https://www.genome.gov/about-genomics/fact-sheets/Genome-Wide-Association-Studies-Fact-Sheet

143 Das, Rhiju, and David Baker. “Automated de novo prediction of native-like RNA tertiary structures.” PNAS. 2007 年 9 月 11 日。https://www.pnas.org/content/pnas/104/37/14664.full.pdf

144 Muhammed, Muhammed Tilahun, and Esin Aki-Yalcin. “Homology modeling in drug discovery: Overview, current applications, and future perspectives.” Chemical Biology & Drug Design. 2018 年 9 月 6 日。https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/cbdd.13388

145 Fuller, Aidan, Zhong Fan, Charles Day, and Chris Barlow. “Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research.” Deep AI. 2019 年 10 月 29 日。https://arxiv.org/pdf/1911.01276.pdf

146 Hughes, JP, S Rees, SB Kalindjian, and KL Philpott. “Principles of early drug discovery.” British Journal of Pharmacology. 2010 年 11 月 22 日。https://bpspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1476-5381.2010.01127.x

147 Cao, Yudong, Jhonathan Romero, Alán Aspuru-Guzik. “Potential of quantum computing for drug discovery.” IBM Journal of Research and Development. 2018 年 11 月～ 12 日 1 日。https://ieeexplore.ieee.org/document/8585034

148 Dobson, Christopher M., “Chemical space and biology.” Nature. 2004 年 12 月 15 日。https://www.nature.com/articles/nature03192

149 Lyu, Jiankun, Sheng Wang, Trent E. Balius, Isha Singh, Anat Levit, Yurii S. Moroz, Matthew J. O’Meara, Tao Che, Enkhjargal Algaa, Kateryna Tolmachova, Andrey A. Tolmachev, Brian K. Shoichet, Bryan L. Roth, and John J. Irwin. “Ultra-large library docking for discovering new chemotypes.” Nature. 2019 年 2 月 6 日。https://www.nature.com/articles/s41586-019-0917-9

150 Cao, Yudong, Jonathan Romero, Jonathan P. Olson, Matthias Degroote, Peter D. Johnson, Maria Kieferova, Ian D. Kivlichan, Tim Menke, Borja Peropadre, Nicolas P. D. Sawaya, Sukin Sim, Libor Veis, and Alan Aspuru-Guzik. “Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing.” Chemical Reviews. 2019年8月30日。https://arxiv.org/pdf/1812.09976.pdf

151 Middaugh, C.R., and R. Pearlman. “Proteins as Drugs: Analysis, Formulation and Delivery.” Novel Therapeutics from Modern Biotechnology. Handbook of Experimental Pharmacology, vol 137. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-59990-3_3

152 Johnston, Sarah L. “Biologic therapies: what and when?” Journal of Clinical Pathology. 2007 年 3 月。https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1860592

153 Levinthal, Cyrus, “How to fold graciously.” Mössbaun Spectroscopy in Biological Systems Proceedings. 1969 年。https://www.cc.gatech.edu/~turk/bio_sim/articles/proteins_levinthal_1969.pdf

154 Zanzig, Robert, Attila Szabo, and Biman Bagchi. “Levinthal’s paradox.” Proceedings of the National Academy of Science. 1991年10月7日。https://www.pnas.org/content/pnas/89/1/20.full.pdf

155 Mezher, Michael. “FDA Finalizes ‘Biological Product’ Definition Ahead of BPCIA Transition.” Regulatory Focus. 2020 年 2 月 20 日。https://www.raps.org/news-andarticles/news-articles/2020/2/fda-finalizes-biological-product-definition-ahea

156 Marks, C., and C.M. Deane. “Antibody H3 Structure Prediction.” Computational and Structural Biotechnology Journal. 2017 年 1 月 24 日。https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2001037016301118

157 Robert, Anton, Panagiotis Kl. Barkoutsos, Stefan Woerner, and Ivano Tavernelli. “Resource-Efficient Quantum Algorithm for Protein Folding.” 2019 年 8 月 7 日。https://arxiv.org/pdf/1908.02163.pdf

158 Mishra, Anurag, and Alireza Shabani. “High-Quality Protein Force Fields with Noisy Quantum Processors.” 2019 年 10 月 29 日。https://arxiv.org/pdf/1907.07128.pdf

159 Chow, Jerry, and Jay Gambetta. “Quantum Takes Flight: Moving from Laboratory Demonstrations to Building Systems.” IBM. 2020 年 1 月 8 日。https://www.ibm.com/blogs/research/2020/01/quantum-volume-32

160 Callaway, Ewen. “‘It will change everything’: DeepMind’s AI makes gigantic leap in solving protein structures.” 2020 年 11 月 30 日。https://www.nature.com/articles/d41586-020-03348-4

161 Harwood, S, C. Gambella, D. Trenev, A. Simonetto, D. E. Bernal Neira, and D. Greenberg. “Formulating and Solving Routing Problems on Quantum Computers.” IEEE Explore. 2021 年 1 月 6 日。https://ieeexplore.ieee.org/document/9314905

業界別ガイド
ロジスティクス

162 “Global Last Mile Delivery Market Report.” Apollo Reports. 2021 年。https://ibm.northernlight.com//document.php?docid=IK20220424980000030&datasource=INV&-context=copy_url

163 “Company Profile: Customer First, People Led, Innovation Driven.” UPS. 2022 年 8 月 18 日閲覧。https://investors.ups.com/company-profile

164 Phillipson, F. and I. Chiscop. “Multimodal Container Planning: a QUBO Formulation and Implementation on a Quantum Annealer.” 2020 年 7 月 3 日。arXiv.org. https://arxiv.org/pdf/2007.01730.pdf

165 “Last Mile Delivery Market Size is Projected to Reach USD 66,000 Million by 2026 at CAGR 8.9%.” PR Newswire, Valuates Reports プレス・リリース。2020 年 12 月 15 日。https://www.prnewswire.com/news-releases/last-mile-delivery-market-size-is-projected-to-reach-usd-66-000-million-by-2026-at-cagr-8-9--valuates-reports-301193012.html

166 IBM Institute for Business Value. Chief Supply Chain Officer Pulse Survey. 2022 年 4 月。未公開データ

167 Placek, Martin. “Cost of supply chain disruptions in selected countries 2021.” Statista. 2022 年 4 月 12 日。https://www.statista.com/statistics/1259125/cost-supply-chain-disruption-country/#:~:text=Cost%20of%20supply%20chain%20disruptions%20in%20selected%20countries%202021&text=Supply%20chain%20disruptions%20are%20an,according%20to%20a%202021%20survey

168 “Ocean Shipping and Shipbuilding.” Organisation for Economic Co-operation and Development. 2022 年 7 月 26 日閲覧。https://www.oecd.org/ocean/topics/ocean-shipping/#:~:text=The%20main%20transport%20mode%20for,comes%20with%20opportunities%20and%20challenges

169 Etter, Lauren and Brendan Murray. “Shipping Companies Had a $150 Billion Year. Economists Warn They’re Also Stoking Inflation.” Bloomberg. 2022年1月17日。https://www.bloomberg.com/news/features/2022-01-18/supply-chain-crisis-helped-shipping-companies-reap-150-billion-in-2021

170 Douglas, Jason and Anniek Bao. “Expensive Shipping Containers Mean Rough Sailing for Global Trade.” The Wall Street Journal. 2022 年 2 月 17 日。https://www.wsj.com/articles/expensive-shipping-containers-mean-rough-sailing-for-global-trade-11645104909

171 “ExxonMobil strives to solve complex energy challenges.” IBM ケーススタディー。2022 年 8 月 17 日閲覧。https://www.ibm.com/case-studies/exxonmobil/

172 Harwood, S, C. Gambella, D. Trenev, A. Simonetto, D. E. Bernal Neira, and D. Greenberg. “Formulating and Solving Routing Problems on Quantum Computers.” IEEE Explore. 2021 年 1 月 6 日。https://ieeexplore.ieee.org/document/9314905

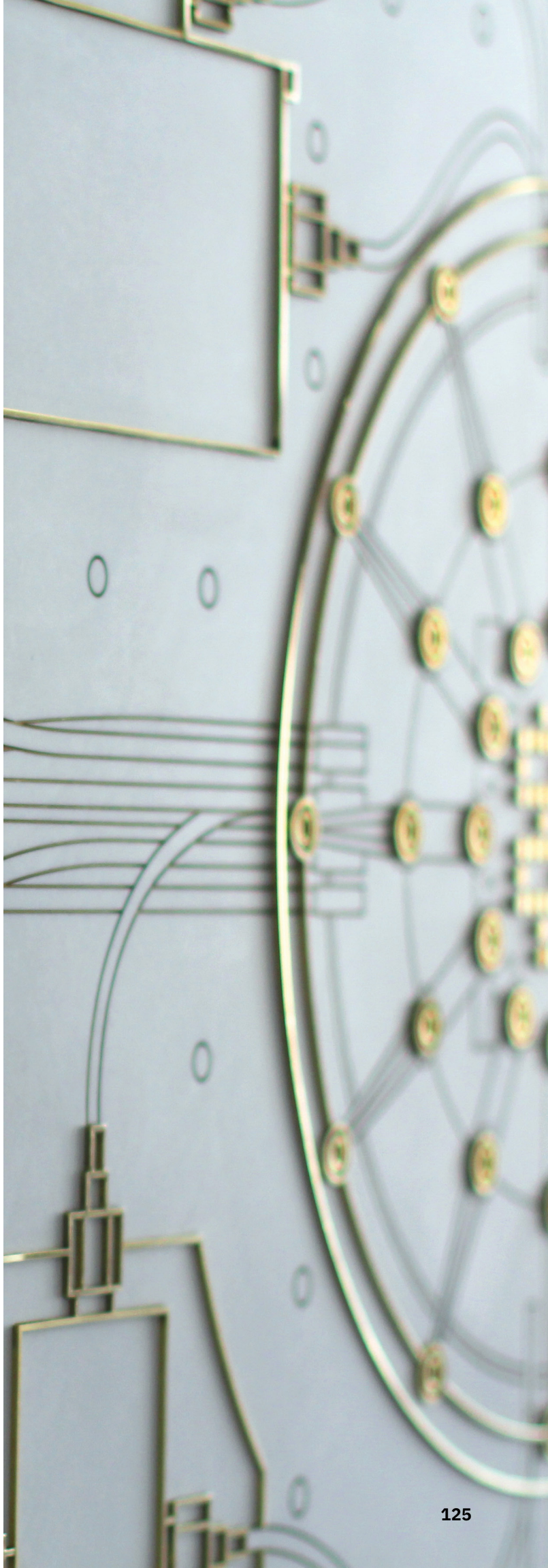
173 Fath, Jon. “The digital approach to smart container shipping.” Supply Chain Brain. 2020 年 9 月 11 日。https://www.supplychainbrain.com/blogs/1-think-tank/post/31850-the-digital-approach-to-smart-container-shipping

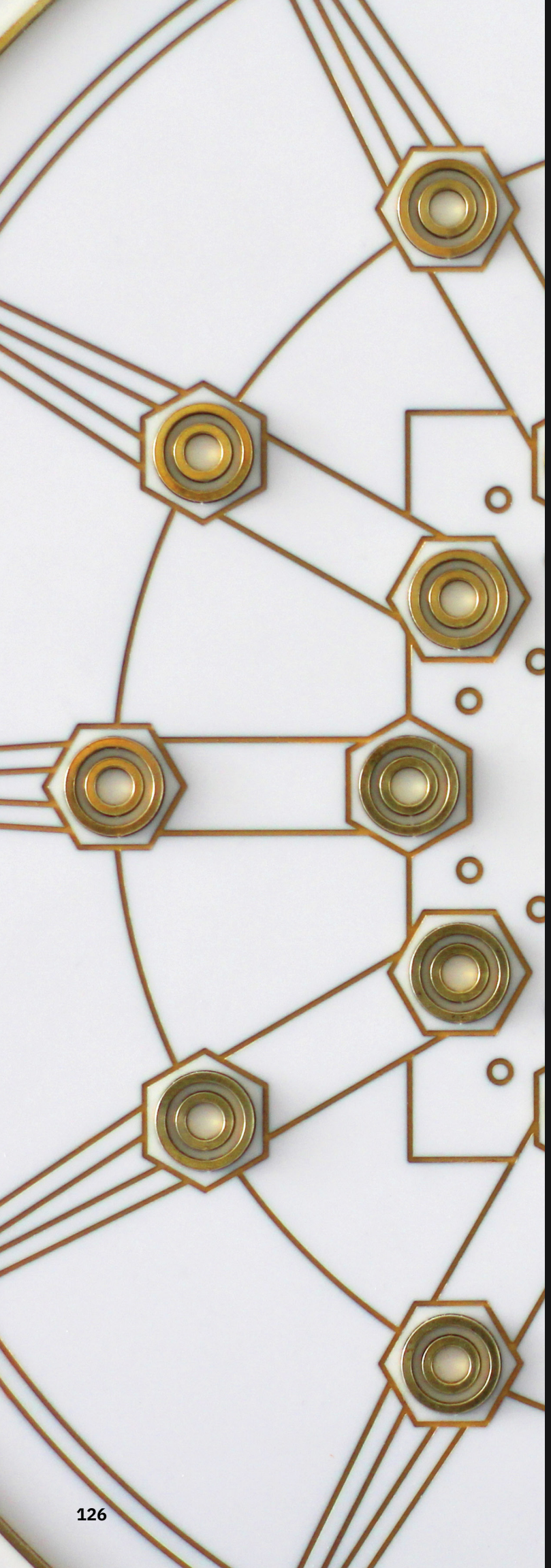
関連
レポート

Gil, Darío, Jesus Mantas, Robert Sutor, Lynn Kesterson-Townes, Frederik Flöther, and Chris Schnabel. “Coming soon to your business — Quantum computing: Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology.” IBM Institute for Business Value. 2018年11月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumstrategy

Sutor, Robert, Terry Hickey, and Lori Feller. “Taking the quantum leap: Why now?” IBM Institute for Business Value. 2018 年 2 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumleap

Sutor, Robert, Scott Crowder, and Frederik Flöther. “Building your quantum capability: The case for joining an ‘ecosystem.’” IBM Institute for Business Value. 2019 年 1 月。https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/report/quantumeco





The Quantum Decade
来るべき量子コンピューティングの時代に向けて

第 3 版

Executive sponsors

Cindy Anderson
Anthony Marshall
David Zaharchuk

Research director

Veena Pureswaran

Chief editor and lead writer

Lucy Sieger

Art director and lead designer

Anne Marie Lowin Weber

Project management

Mandy Drouin, Rachel Larkin,
and Samantha Russell

Editorial and communications support

Hugh Collins, Robert Davis, Ryan Mandelbaum,
Katia Moskvitch, Chris Nay, Steven Tomasco,
and Joanna Wilkins

Design support

Kristin Biron, Angela Finley, Bruce Jarvis,
Michael Kriegshauser, Stewart Lacey, Kristine Lawas,
Nancy Pendleton, Daritza Perez, Nate Saenz,
Jill Sherman, and Andrew Womack

Deployment and promotion

Wendy Allan, Kira Arnise, William Chamberlin,
Talita Cristina Paro Fabene, Tegan Jones,
Kirsten Main, Leah Simon, and Mya Singleton

© Copyright IBM Corporation 2022

IBM Corporation
New Orchard Road
Armonk, NY 10504
Produced in the United States of America
November 2022. Third edition.

IBM、IBM ロゴ、ibm.com は、世界の多くの国で登録された International Business Machines Corporation の商標です。他の製品名およびサービス名等は、それぞれ IBM または各社の商標である場合があります。現時点での IBM の商標リストについては www.ibm.com/legal/copytrade.shtml (US) をご覧ください。

本書の情報は最初の発行日の時点で得られるものであり、予告なしに変更される場合があります。すべての製品が、IBM が営業を行っているすべての国において利用可能なわけではありません。

本書に掲載されている情報は特定物として現存するままの状態で提供され、第三者の権利の不侵害の保証、商品性の保証、特定目的適合性の保証および法律上の瑕疵担保責任を含むすべての明示もしくは黙示の保証責任なしで提供されています。IBM 製品は、IBM 所定の契約書の条項に基づき保証されます。

本レポートは、一般的なガイダンスの提供のみを目的としており、詳細な調査や専門的な判断の実行の代用とされることを意図したものではありません。IBM は、本書を信頼した結果として組織または個人が被ったいかなる損失についても、一切責任を負わないものとします。

本レポートの中で使用されているデータは、第三者のソースから得られている場合があり、IBM はかかるデータに対する独自の検証、妥当性確認、または監査は行っていません。かかるデータを使用して得られた結果は「そのままの状態」で提供されており、IBM は明示的にも黙示的にも、それを明言したり保証したりするものではありません。

本書は英語版「The Quantum Decade - A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage」の日本語訳として提供されるものです。

KRWEWO8D ISBN: 978-1-7374011-8-6

IBM **Institute for Business Value**

ISBN: 978-1-7374011-8-6