

量子コンピューティング

未来のテクノロジーは、
もうここにある



01

量子コンピューティングとは	2
量子物理学	2
量子コンピューターと「キュービット」	2
「重ね合わせ」と「もつれ」	4
技術上の障壁を克服するために	5

02

量子コンピューティングの応用	7
人工知能	8
暗号化	8
防衛	9
情報通信	10
エネルギー	10
気候変動・農業	11
医療	11
金融	12

03

主なプレイヤー	13
金融機関・巨大IT企業	13
日本における量子技術への投資と技術発展	15
量子コンピューティングのイノベーションをリードしている主な組織	15

04

貴社に導入するために、PwCができること	17
用途の探索	17
活用事例の特定	17
PwCの専門チーム	18
世界を代表するIT企業との連携	18
未来創造型コンサルティングサービスの提供	18



量子コンピューティング——

第5次産業革命

「第4次産業革命」という言葉を耳にしたことがある人は多いでしょう。人工知能、ブロックチェーン、データアナリティクスなどに代表されるエクスポネンシャルテクノロジーが発達し、人々の生活、交流、働き方、ビジネスの方法、政府のあり方にまで大きな影響を及ぼしている現象を表す言葉です。

そしてついに、第5次産業革命が始まろうとしています。それを可能にするのが、量子コンピューティングです。

近年、コンピューティング技術は強力なイノベーションを続けてきました。とはいえ、その裏にある基本的概念に変化はなく、従来どおり0と1を使った二進法の演算が基本でした。ところが量子コンピューティングという新世代コンピューティングには、パワーやスピードといった視点を超えて、これまでにない課題解決法を生み出すことや、従来のコンピューターが扱いきれない問題に対応するといった、新しい可能性が期待されています。

かつて蒸気機関やマイクロプロセッサが産業のあり方を一変させたように、量子コンピューターは新しいビジネスや産業を生み出す可能性があります。同時に、人工知能、資源探査、化学品や医薬品の開発、資産運用といった既存の産業も、その姿を大きく変えることになるかもしれません。

「ムーアの法則」の終焉と 「ネーヴンの法則」の登場

この現象に最初に気付いたのは、GoogleのQuantum Artificial Intelligence Labでリーダーを務めるHartmut Neven氏でした。「ネーヴンの法則」は、従来のコンピューターに比べて量子プロセッサがいかに速く進歩するのか、あるいは演算処理の高速化がいかにスピーディーに進むのかを表したもので、その速さは「ムーアの法則」を上回るとされています。

量子プロセッサは二重指数関数的に成長するため、「何かが起きているようには見えません。何も起きていないと思っていると、ある日突然、自分が別世界にいることに気付くのです」とNeven氏は語ります。「私たちは今、そういう現象を体験しているのです」

こうしたことを背景に、Googleは2019年10月23日に量子超越性の達成を発表しました。報道によると、世界最速の従来型スーパーコンピューターが1万年かかる計算を、Googleの量子コンピューターは3分20秒で完了できるそうです。

それはもうすでに、起きている——このことを、今、強調しておきたいと思います。

Marc HADDAD
Partner, FS Consulting
Technology & Innovation

量子コンピューティングとは

量子コンピューティングの可能性を理解するには、量子物理学の基礎知識が必要です。

量子物理学

量子物理学は、原子レベルの物質を研究する学問です。

「あなたは今、どこにいますか？」と尋ねられたとき、例えば「パリにいます」などと答えることができます。経度と緯度を示せば、さらに正確です。物理学者は、直接測定できるものを「オブザーバブル（観測可能量）」と呼びますが、「位置」はその一例です。

物理学の世界では数百年にわたり、オブザーバブルは単純な数字で表すことができるものであり、十分に正確な測定を行えば、あらゆる時点において絶対的な数字を特定できるという前提のもとに、物質の相互作用を予測するモデルを作ってきました。この方法は大半の対象となるシステム（系）において非常に有効に機能しています。

しかし、研究対象となるシステム（系）がどんどん細かく分割されるようになった結果、物質の奇妙な振る舞いが発見されます。量子系においては、物質が不規則に動いているように見えるのです。そのため量子系を測定するときは、量子素子の物理状態に従って変化する確率的関数を用います。

量子コンピューターと「キュービット」

では、量子物理学とITはどんな関連があるのでしょうか。

量子のメカニズムを活用して、従来のコンピューターよりも効率的に演算を行うのが量子コンピューターです。従来のコンピューターでは、データの最小単位として「ビット」を使います。ビットは「0」と「1」を羅列したもので、これによって情報を管理し、演算を実行します。コンピューターは通常、指示によってビットを操作し、データを保存したり指示を実行したりしています。

現代社会では多数の情報が生み出され、計算も複雑化しています。このまま情報が増加すれば、一般的なプロセッサで「0」と「1」の組み合わせを操作する方法は限界に近づくでしょう。量子コンピューターは新しいデータ単位「キュービット (qubit)」を使い、全く異なる方法でデータの設計と処理を行います。

キュービットは「量子ビット (quantum bit)」のことです。従来のビットに比べるとひとつひとつの構造が複雑です。そして、同時に複数の「状態」で存在することが可能です。そのため、より多くの情報を保持して同時に処理できます。それゆえ、処理速度を大きく向上させることができるのです。キュービットには「重ね合わせ」や「もつれ」と呼ばれる、従来のビットにはない性質があります。

このまま情報が増加すれば、一般的なプロセッサで「0」と「1」の組み合わせを操作する方法は限界に近づくでしょう。量子コンピューターは新しいデータ単位「キュービット (qubit)」を使います。

2ビットの演算を処理する場合について考えてみましょう。従来型コンピューターの場合、00、01、10、11の4通りの状態が考えられます。この4つをひとつずつ処理していくのが、従来のプロセッサです。一方、キュービットを用いる場合、4つの演算を一度に処理します。キュービットも0と1になり得ますが、0でもあり1でもあるという、中間的な状態を演算に用いることもできるのです。

従来型コンピューター

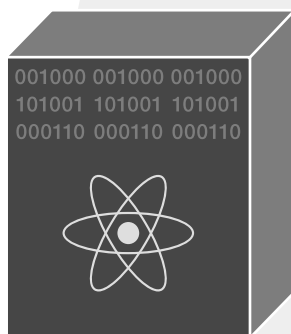


取り得る状態の数は0と1で決定

0 ← または → 1

値は決定的であり、同じインプットを用いた演算を繰り返した場合、同じ結果が導かれる。

量子コンピューター



取り得る状態は無限



値は確率的に測定され、複数の可能性を同時に検討し、一連のあり得る結果を整理し、正しい結果に収れんする。

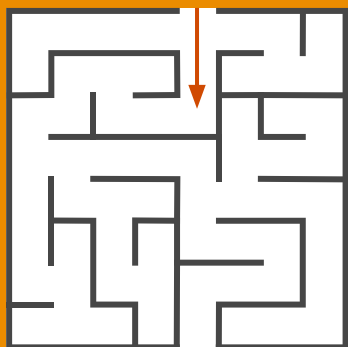
「重ね合わせ」と「もつれ」

量子力学の説明は非常に複雑です。例を用いて、量子力学の主要要素である「重ね合わせ」と「もつれ」を説明しましょう。



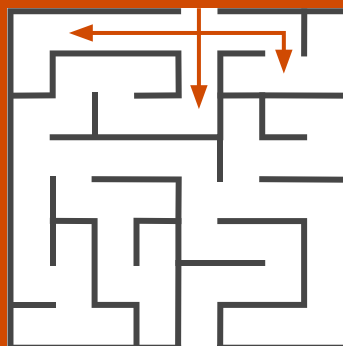
「重ね合わせ」とは、端的に言えば、複数の状態を同時に与えることができるという量子系の性質のことです。下記の迷路問題を解いてみましょう。

従来型コンピューター



従来型のコンピューターは、分岐点に来るたびに方向をひとつずつ探索します。行き止まりに当たると引き返し、別の方向を試すということを、出口が見つかるまで繰り返します。

量子コンピューター

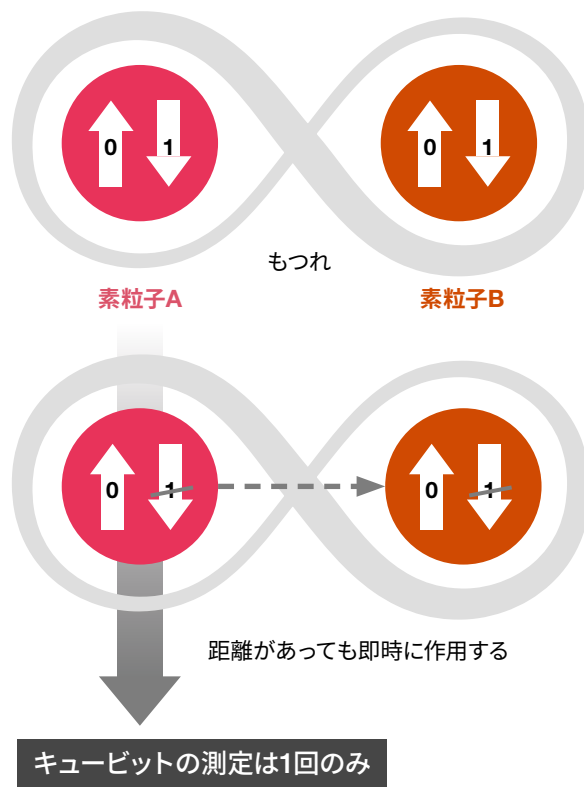


量子コンピューターは、「重ね合わせ」を行い、分岐点に来ると、全ての方向をひとつの「状態」として探索します。つまり量子コンピューターは、全ての道を同時に試すわけです。進み得るルート（その中に、出口につながるルートも含まれています）を試す個々の状態を全て重ね合わせ、ひとつの「状態」として処理をするということです。



「もつれ」は、2つのキュービットが相互関係を形成する現象で、アインシュタインが言う「不気味な遠隔作用」が基になっています。2つのキュービットは、距離がどれくらい離れているかに関わりなく、相手に依存した量子状態を持ちます。従来型コンピューターで表現すると、メモリ内の全てのビットに対し、それぞれ他の全てのビットと連携させる論理ゲートが存在するようなイメージです。

この2つの性質が量子コンピューター特有の並列性を可能にしているため、プログラム設計の自由度が増し、従来型よりも高い性能を実現できるのです。





技術上の障壁を克服するために

量子コンピューターの開発には、さまざまな障壁が存在します。主な障壁には以下のようなものがあります。

キュービットの安定性

キュービットの生成に使われる量子物体は、一定の量子状態を短時間しか維持できない場合があります。演算を実行するためには、キュービットの状態が一定時間維持され、しかも相互作用が可能でなくてはなりません。

すなわち、より複雑で信頼性の高い量子情報プロトコルを実現するために、キュービットの寿命を延ばすことと、相互作用するキュービットの数を増やすことが課題になります。

キューディットとキュートリット

規模の大きいキュービット系の安定性維持に努力するよりも、計算に必要なシステム（系）の次元を増やそうとする研究が行われています。キューディット（qudit）は、3以上の状態を取り得る量子物体です。多層的であるため、量子演算の操作に関わるプロセスの効率が向上します。また一部の計算タスクが簡素化され、その結果、量子コンピューターの実現に必要な回路も簡素化されます。3つの状態を持つシステム（系）からはキュートリット（qutrit）（3N）が生成され、安定性が比較的高いため、一貫性のある量子演算に必要な時間が短縮されます。そのため、量子コンピューターの小型化に資するだけでなく、キュービットの不安定性による課題を解決できるという大きなメリットがあります。

量子コンピューティングに関する基準

全ての破壊的な新技術と同様に、量子コンピューティングについても、共通言語となる定義と体系が必要です。2019年6月、IEEE Standards Associationは、量子コンピューティングの使いやすさ向上を目的に新基準を設定する「IEEE P7130™—Standard for Quantum Computing Definitions」プロジェクトを立ち上げました。

こうした動きは物理学とテクノロジーの両面を発展させ、幅広い可能性の開拓につながります。人工知能など最新のデジタル技術に影響を及ぼし、未来のデジタル革命を促進していくでしょう。

量子超越性

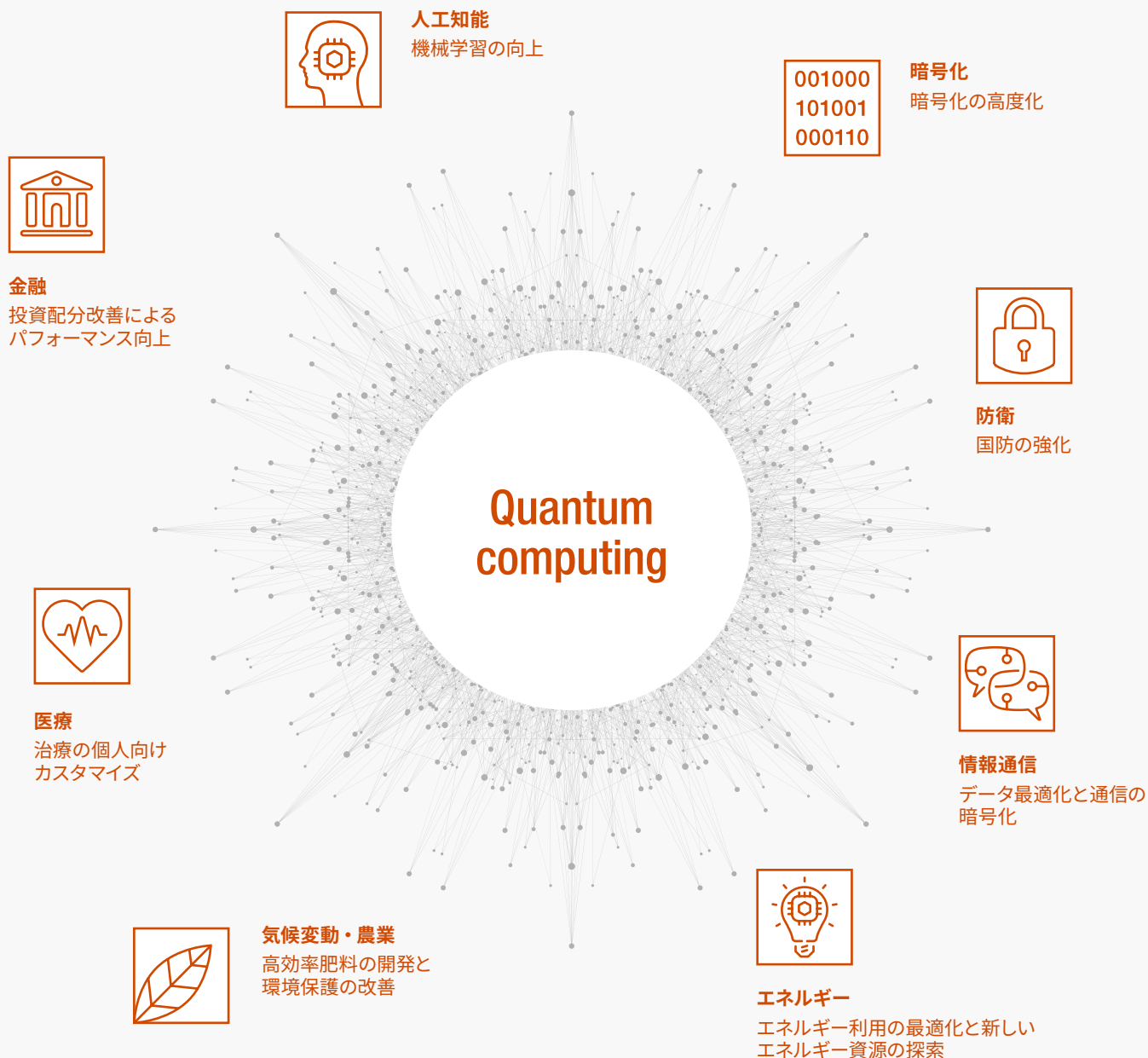
シミュレーションを行う際、従来型コンピューターは変数をひとつずつ処理しなければならないのに対して、量子コンピューターは全ての変数を同時に処理します。この技術によって、あらゆる場面で、極めて短時間で最適な意思決定ができるようになります。とはいえ、量子コンピューターは従来型コンピューターの補完的存在であるため、従来型コンピューターを完全に代替するものにはならないでしょう。量子コンピューターは高度に複雑な計算に使われる一方、ビデオチャットアプリケーションによる通信や情報の共有や配信といった一般的な用途（商用・私用を問わず）は、引き続き従来型コンピューターが担うことになると思われます。

量子超越性とは、量子コンピューターが従来型コンピューターでは解決できない課題を効率的に解決できるようになることを意味しています。現在、一日も早い実現に向けて、エンジニアやアナリストが協力して取り組んでいます。本レポートの冒頭でも述べたように、Googleは、2019年10月末に量子超越性を達成したと発表しました。そのため、競合他社もすぐに追随すると思われます。



量子コンピューティングの応用

量子コンピューティングは、さまざまな産業に影響を及ぼします。すでに多くの企業が、自社事業の発展を期待して量子コンピューティングへの投資を決めています。近い将来に向けて、他社を先導するポジションを確保しておきたいという目的もあります。量子コンピューティングの応用が産業界にもたらすと考えられるメリットの例を、以下に示します。





人工知能

人工知能分野は、機械学習という革新的な概念が原動力となって発展を続けています。機械学習では、ニューラルネットワークを数理モデル化するためのアルゴリズム構築が必要です。

機械学習のニューラルネットワークは、生物の神経ネットワークと同様に、論理を結合したり、一般化のルールを抽出したりする能力を持っています。従って、事前に処理されたサンプルデータを読み込む（学習フェーズ）と、これを分析・解釈したり、これをもとに新しいデータを予測（推論フェーズ）したりすることができるわけです。

機械学習の特殊なものに、ディープラーニングがあります。大量の複雑な数学関数（ディープネットワーク）を使い、コンピューターに自律性を獲得させる学習方法です。ディープラーニングは学習フェーズにおける人間の介入を大幅に縮小でき、また元になるデータの事前処理も不要です。

ここに量子コンピューターが登場すると、人工知能の活用が一気に進むのではないかと考えられます。ビッグデータの時代を迎えた今、大量のデータがやり取りされ、利用可能なデータの処理が従来型コンピューターでは追いつかなくなっているのが現状であり、また、量子コンピューティングの高度な数学の力を活用すれば、機械学習の学習フェーズの効率化が可能だからです。ディープラーニングは基盤となる数学関数の重要度が非常に高いため、とりわけ大幅な効率化が期待できます。

量子コンピューティングは、人工知能が大量のデータセットを検索・分析できるようにするための主要なソリューションのひとつになると見られています。すでにその可能性に着目し、新しい活用法の開拓に取り組んでいる組織もあります。IBMとIBM-MIT Watson AI Labは現在、数年前の完成をめどに、機械学習の向上に役立つ量子アルゴリズムの開発と試験を実施しています。すでに特徴マップやデータ分類の改善に成功しており、IBM Qのテクノ

ロジーを用いて、分類エラーに対処するソリューションも発見しています。

001000
101001
000110

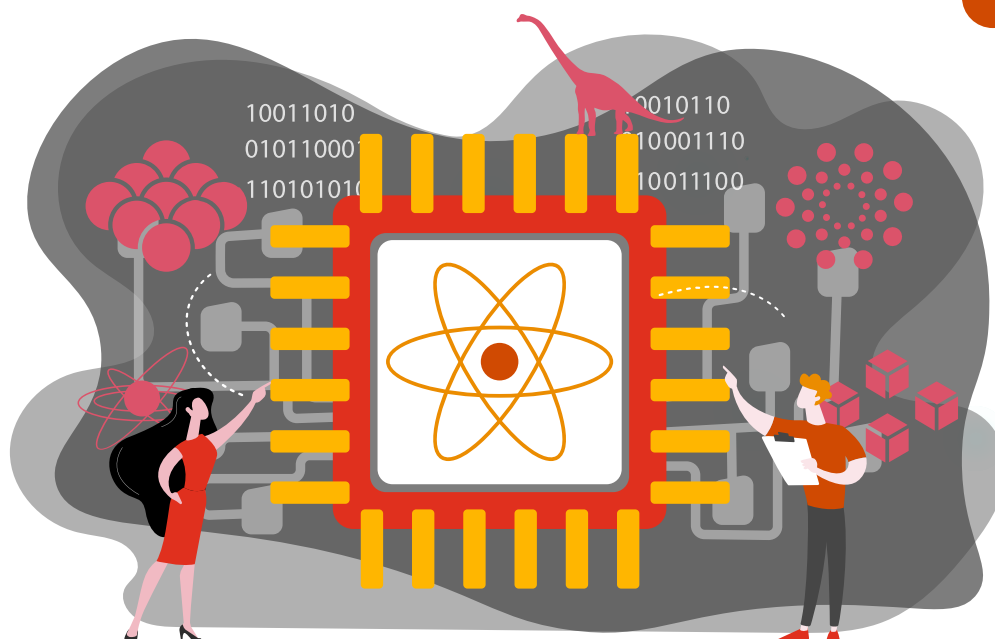
暗号化

暗号化とは、データを暗号化したり、プレーンテキストをスクランブル化して、「鍵」となるコードがなければ解読できないようにするものです。

この分野において、量子コンピューティングは大きな脅威と見られています。確かに、量子コンピューターは高度な数学能力を備えているため、現在使われている非常に複雑なコードも、やが

て解読できるようになると考えられています。バーチャルな資金の移動を基盤とする現在の経済では、とりわけ銀行取引の暗号が解読されてしまうことは重大なリスクです。逆に言えば、資金移動の安全性確保における好機も、まさにこの点に存在しています。

もし量子コンピューターが既存の暗号を全て解読できると証明されたら、量子コンピューティングを用いて作った暗号コードが非常に高い信頼性を得るでしょう。



専門家の意見によれば、どれほど高性能なものであっても一般的なコンピューターが暗号化コードを解読するには、宇宙の誕生以来の年月に等しいほど長い年月がかかると考えられています。

実は、量子コンピューターの攻撃に耐える暗号アルゴリズムは、すでに存在します。「ポスト量子暗号」と呼ばれるものです。ただし、まだ十分に効率的なフォーマットを備えているとは言えません。格子暗号、多変数暗号、ハッシュ暗号は量子アルゴリズムであり、公開鍵のセキュリティに有効だとされています。

格子とは、ユークリッド空間に存在する規則的な点の集合であり、それぞれ等間隔で並んでいます。

格子を用いた計算問題を解くには、格子上に固定された中央点（「原点」と呼ばれます）に、最短の道筋のみを使って到達する必要があります。

ポスト量子暗号については、Googleが2019年7月初旬に、Chrome上で実験を行うと発表しました。この実験は、量子鍵だけで構成されるのではなく、既存の暗号鍵に加えてポスト量子鍵交換アルゴリズムを実装するという試みです。そのため、現時点では、新たに実装した鍵は、従来型のコンピューターでも突破可能となっています。



防衛

前段落で述べた暗号化技術は、防衛産業にも応用が可能です。量子情報科学の分野では、防衛関連の新しい応用例がいくつも生み出されようとしています。それらは「量子」という言葉でひとくくりになされがちですが、いずれも個別に検討すべき価値のある事例です。量子鍵配信（QKD）、量子暗号解析、量子センシングは、それぞれ異なった方法で戦略的安全保障の進化に貢献します。例えばQKDは、通信の安全性を高めることによって防御面のメリッ

トを短期間で実現することができます。一方、電子暗号解析は、攻撃的能力が強い技術ですが、完成に時間がかかります。この技術は非常に有望ですが、まだ開発の初期段階である点に留意しなければなりません。

米国は2018年9月に公表した「National Strategic Overview for Quantum Information Science」の中で、量子センシングを「量子のメカニズムを利用し、測定の基本的正確性を強化したり、センサーや測定における新たな体制やモダリティを可能にしたりするもの」と説明しています。

こうした新しい能力は、軍事において明確な優位性をもたらしてくれると考えられます。また、英国ではDefense Science Expert Committeeが、重力センサー（量子重力計）は、その能力が向上すれば潜水艦など海中を動く集団を検知することができるようになるので、重要性が増すだろうと強調しました。



情報通信

現代の情報通信は、即時性が向上し、マルチチャネル化が進んでいます。量子技術の応用で特に大きな影響を受けるのは、以下の4分野です。

- 量子暗号化：既存の暗号プロトコルの刷新
- 量子ネットワーク：電気通信ネットワーク帯域幅の拡張
- 量子インフラストラクチャー：ルーティングとネットワークインフラの最適化
- 量子インターネット：地球上のあらゆる任意の2点間で、量子ビット（キュービット）の伝送が可能

EUではQuantum Technology Flagshipという10年間の大規模なプログラムが始まりました。技術開発を加速し、研究から技術革新を生み出すことが目的です。

このプログラムの中のプロジェクトのひとつであるCiViQは、複数の電気通信事業者が合同で量子コミュニケーションプロジェクトに取り組む初の事例です。Orange、Deutsche Telekom、Telefonicaが参加しています。目的は、量子で強化された物理レイヤーを開発し、現代的な暗号化技術との統合を可能にすることであり、アプリケーションやサービスにおける安全性を確保することです。

2019年9月2日、パイロットプロジェクトのOPENQKDが始まりました。今後、欧州数カ国に試験用の量子コミュニケーションインフラ施設を設置し、情報通信、医療、電力供給、行政サービスの各分野に不可欠なアプリケーションのセキュリティ強化を目指します。



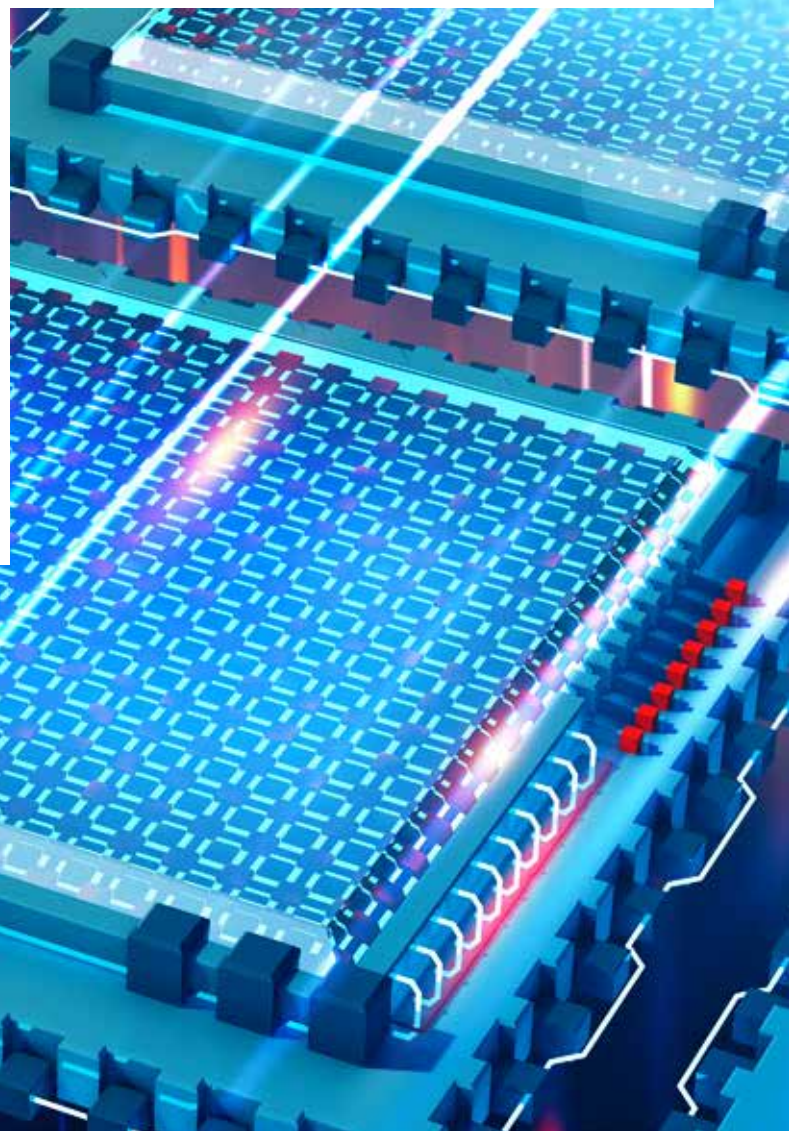
エネルギー

再生可能エネルギーの需要が高まり、高度に最適化されたエネルギー管理システムが必要になっています。再生可能エネルギーは、資源そのものはゼロコストですが、日照、天候、風速の変動など、さまざまな理由で発電量の予測が難しいという問題があります。

最近では、太陽光、風力、水力を組み合わせたハイブリッド発電システムを活用して安定供給を目指す取り組みが進んでいます。そのシステムでは、最もコストの低い発電の組み合わせを特定するために最適化を行います。そのときに活躍するのが量子コンピューティングです。

具体的には、例えば施設設置場所の配置問題に 응용が可能です。所定のエネルギー需要と利用可能な資源量のもとで、太陽光発電所や風力発電所などの発電施設をどこに配置すれば、開設コストや輸送コストを最も低くできるかの特定に使えます。

量子コンピューティング技術の可能性に対し、エネルギーセクターの期待はますます高まっています。ExxonMobilは2019年初めにIBMと合意契約を結び、量子コンピューティングを利用した次世代のエネルギー生産技術や製造技術の開発を開始しました。





気候変動・農業

量子コンピューティング技術の能力は非常に優れているため、気候問題や地球温暖化問題の解決に向けて、さまざまな応用を期待することができます。

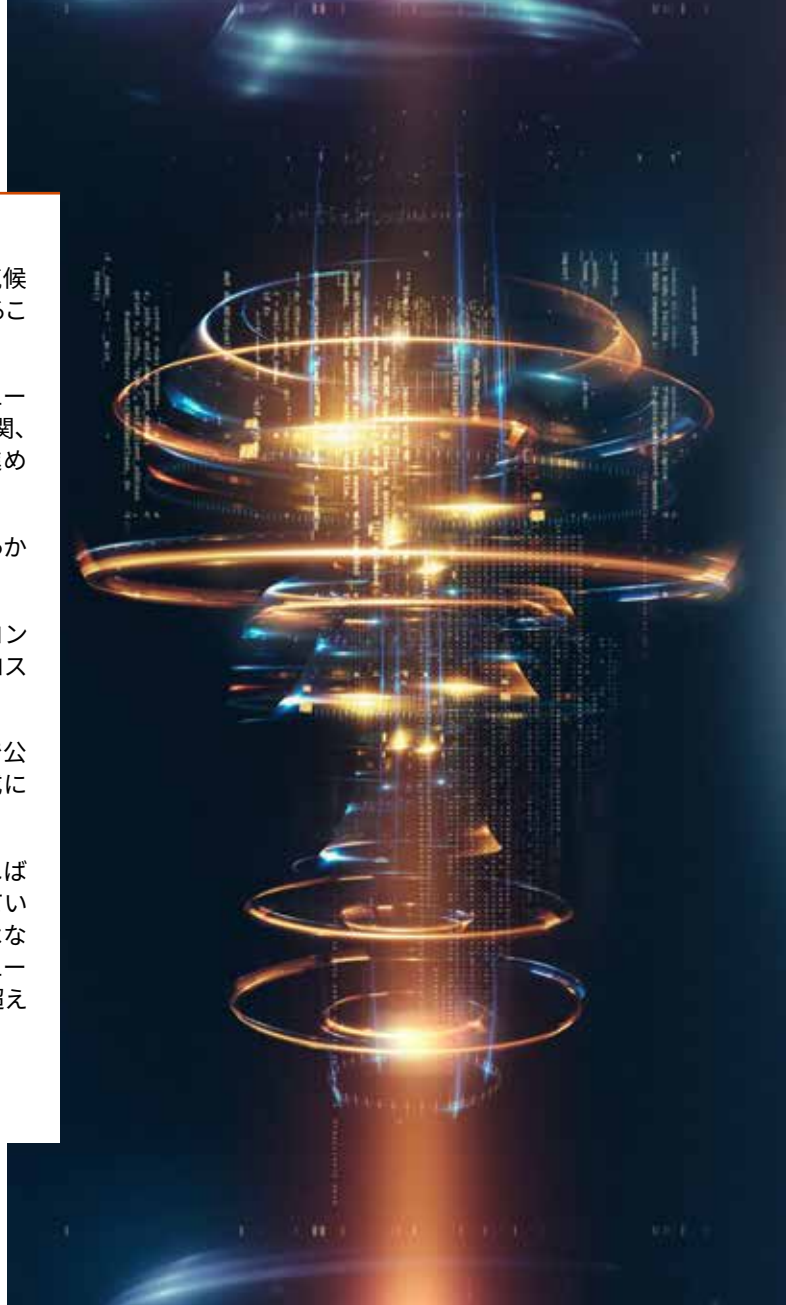
世界全体の食料消費量が劇的に増加していますが、量子コンピューティングで農業の手法を大きく改善できる可能性があります。教育機関、企業、政府などが共同で量子コンピューティングの研究や実験を進めるに従い、実現の可能性はさらに高まるでしょう。

同様に、カーボンフットプリント（二酸化炭素排出量）減少のきっかけになる技術が開発され、減少が加速する可能性もあります。

こうした難解な世界的課題の解決に資するのみならず、量子コンピューターは消費エネルギーが非常に少ないため、採用が進めばコストが下がり、化石燃料への依存を減らす効果も期待できます。

この分野の例として、フォルクスワーゲンは、世界各地の都市で公共交通機関のルートを最適化するレガシーアプリケーションの作成に量子コンピューターを使用しました。

企業各社はすでに、量子コンピューティングの流れに乗らなければならないという圧力を感じ始めています。しかしその原動力となっているのは、一社のためのイノベーションや技術的競争力強化ではなく、より広い共通の目標です。すなわち、世界全体におけるコンピューターの使用パワーが、それを支える地球全体の消費電力の限界を超えないようにすることです。



医療

現代社会は、大量の医薬品を消費しています。しかし残念なことに、患者に適切な治療が施されないケースも少なくありません。近い将来、量子コンピューティングの技術を活用し、患者一人ひとりの特性を考慮した個別の治療を提供することができるようになるかもしれません。人間のDNAは、天文学的な数の情報で構成されており、これを解析できるのは、量子コンピューティングレベルの強力な技術だけです。こうしたデータ処理によって、最適なゲノム配列決定が可能になり、個々の症例の理解が進むと思われます。

量子コンピューティングが可能にするもうひとつのソリューションが、最も効果的な治療薬の決定です。各疾病の種類ごとに、薬剤の効果を効率的かつ迅速に比較し、最適な治療薬を特定することができます。

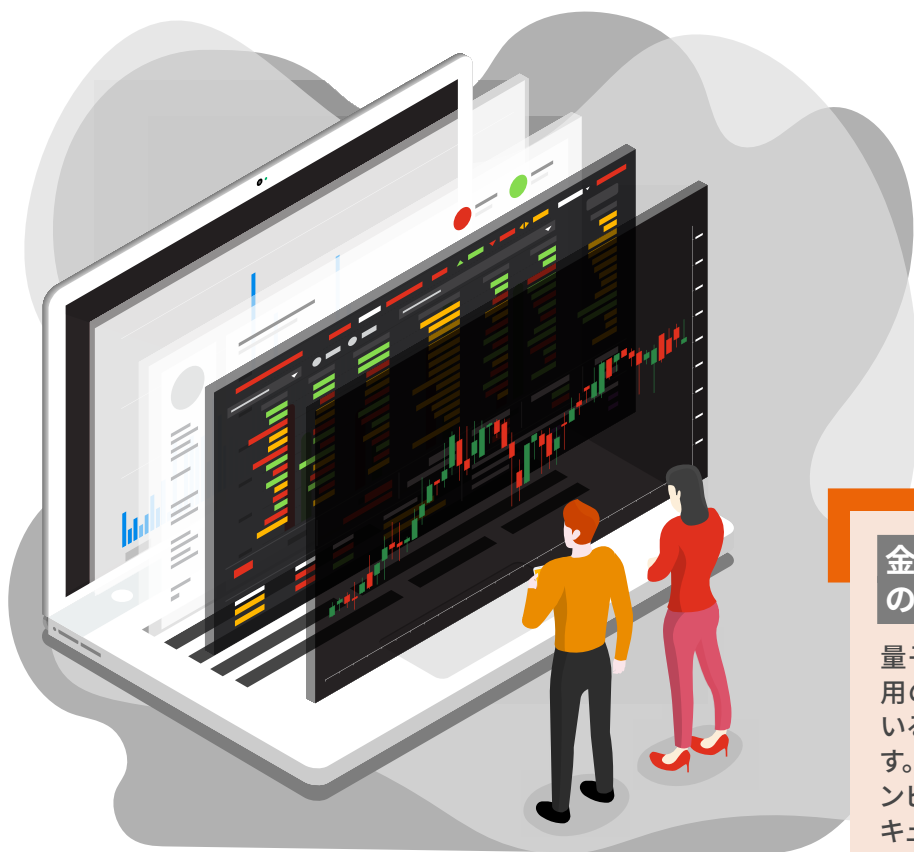
量子コンピューティングは、アルツハイマー病やパーキンソン病など、近年増加している疾病の治療手段としても役立つかもしれません。研究者は、ある人が将来アルツハイマー病に罹患するかどうかの予測ツールのひとつとして、人工知能が有効だと考えています。人工知能の予測能力が向上すれば、将来の患者の特定も可能になるのです。本レポートで述べたとおり、量子コンピューティングは人工知能を向上させ、同時に人工知能が持つ可能性も大きく広げます。

金融

金融業界では、量子コンピューティングを使った新しいソリューションの開発がすでに始まっています。BCC Researchの「Quantum Computing」によると、量子コンピューティング技術によって得られる利益率は非常に高いと予測されています。

金融モデルの構築は、実働環境での実験ができないため非常に複雑なプロセスが必要な場合があります。しかし、あり得る全ての方法を一度に試すという量子コンピューティングの特長を生かすことで、効率的な結果を得ることができると考えられます。例えば誤差や時間のロスを劇的に減らし、最適な道筋を瞬時に特定することが可能になります。このメリットは、特にアービトラージ（裁定取引）において非常に有望視されています。現状、金融取引における可能性の数が膨大すぎて、デジタルコンピューターの処理能力を超えそうになっていますが、量子コンピューティング技術を使えば、その問題は即座に解決されるでしょう。

さらに、量子コンピューター特有の性質であるランダム性も大きな利点のひとつです。そもそも金融市場は確率的なものであり、両者の性質は一致しているのです。量子コンピューティング技術で大量のシナリオをランダムに生成し、それをもとに投資成果の配分を評価することが可能になります。



金融におけるPOC（概念実証） の実例

量子コンピューティングの金融への応用の好例が、Stefan Woerner氏が率いるIBMの研究チームが行った実験です。IBMには20キュービットの量子コンピューターがありますが、そのうち3キュービットを使ってモンテカルロシミュレーションを行いました。サンプルを絞り込んだ概念実証実験ではありましたが、将来に期待が持てる結果となりました。量子コンピューターの能力がさらに向上すれば、金融分野におけるシミュレーションや予測での実用化が進むと思われます。

主なプレイヤー

金融機関・巨大IT企業

量子コンピューティング技術に関する取り組みで最も有名なもののひとつが、IBMが立ち上げたQ Networkというプロジェクトです。IBMは企業各社と提携してネットワークを構築し、参加企業はIBMのクラウドを通じて20キュービットの最先端量子コンピューティングシステムを利用できます。量子コンピューティングに近い環境の中でIBMのシミュレーターを使い、同じアイデアや事業を共有し、テストや開発をすることが可能となっています。金融業界からはJP Morgan Chase、Barclaysといった大手銀行がすでに参加しています。両行とも、2020年の事業戦略にこの技術の導入を盛り込む予定です。

JP Morgan ChaseとBarclaysは、今後数年間に量子コンピューティングの影響を大きく受ける業務として、財務リスクと不正検知をあげています。

一方、BBVAもIBM Qハブに参加していますが、関与は限定的です。同行はCSICと二者協定を結び、ポートフォリオ管理や顧客サービスの最適化におけるさらなる開発を目指しています。

同様に、二者協定によって量子コンピューティングを活用したソリューション開発に乗り出す大手金融機関は、他にもあります。ABN AmroとQuTechの協定もその一例で、多様な通信者間で、複雑で固有のコードの交換が可能になる新しい形式の量子鍵配信の開発を目指しています。

その他にも、量子コンピューティングの最先端企業D-WaveにはGoldman Sachsをはじめとする大手金融機関からの投資が集まるなど、注目すべき動きが多数見られます。

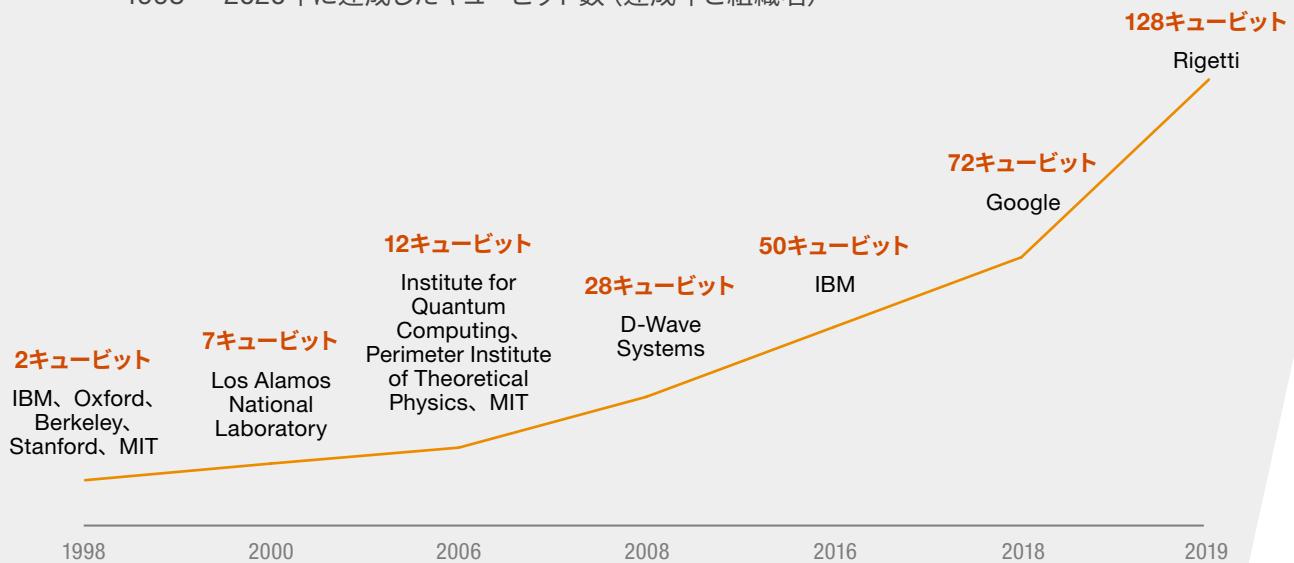


2019年1月に開催されたConsumer Electronics Show (CES) でIBMは、同社初の商用量子コンピューター、Q System Oneを公開しました。50個のキュービットを使い、量子状態を90マイクロ秒維持できます。また従来型コンポーネントと量子コンポーネントの両方を搭載しています。IBMは以下のように発表して、商用量子コンピューターが既存の従来型コンピューターを追い越すには、まだしばらく時間がかかるだろうと明言しています。

「IBM Q Systemは、処理数が多く、複雑すぎて従来型コンピューターでは処理できないと現在考えられている問題に、いつの日か取り組むことを目指して設計されています」

パワーを増す量子コンピューター

1998～2020年に達成したキュービット数（達成年と組織名）*



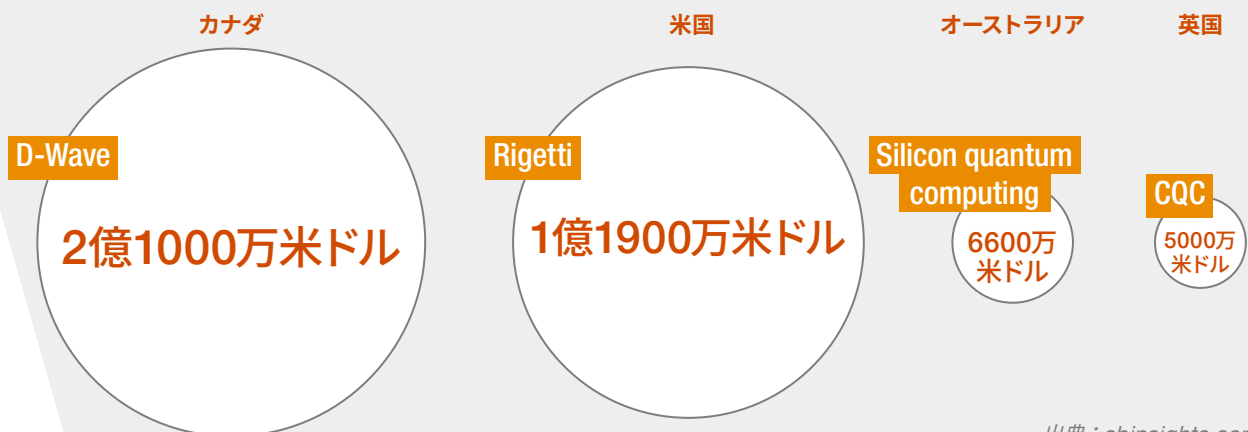
出典：MIT、Qubit Counter

この業界の中で、5000万米ドルという資金を調達できる民間企業は少数です。1億米ドル以上調達できる企業となると、さらに限られます。そのため量子コンピューティングの商業利用は（ハードウェアおよびソフトウェアともに）、大きな話題にはなっているものの、実際にはまだ揺籃期にあると言えます。

量子コンピューティング企業の中で、最も順調に資金を調達しているのはD-Waveで、これまで2億1000万米ドルを獲得しています。続いてRigetti Computing（1億1900万米ドル）、Silicon Quantum Computing（6600万米ドル）、Cambridge Quantum Computing（CQC）（5000万米ドル）となっています。

注目すべきは、2013年以降に実施された量子コンピューティング企業への投資のうち、70%近くを上記の4社が占めている点です。また総投資額は、昨年2018年に史上最高額を記録しました。

量子コンピューティング事業に5000万米ドル超の資金を調達したスタートアップ企業（2019年1月7日現在）



出典：cbinsights.com

日本における量子技術への投資と技術発展

内閣府のムーンショット型研究開発制度では、Society 5.0に向けて、2050年までの量子コンピューターにおける開発目標を定め、20年度の概算要求では量子技術関連で約300億円を要求。

ただし、他国の米国政府は2018年12月に「国家量子イニシアチブ法」を定め、量子情報科学を推進するために5年間で総額12.8億米ドルを投資。

日本での量子コンピューターの開発に必要な基礎技術、ハードウェア（コンピューター本体）、ネットワーク（量子中継や量子メモリ等）およびソフトウェア（アルゴリズム等）の研究開発は他国と異なり、民間企業中心ではなく、大学を中心に進めていることが特徴。

また、欧州連合は10年間で総額10億ユーロを投資し、中国政府も2020年に「量子情報科学国家実験室」の設立に向けて、760億元を投資。

量子コンピューティングのイノベーションをリードしている主な組織

量子コンピューティングのイノベーションに取り組んでいる組織のうち、過半数を中小企業とスタートアップ（40%）、大学（33%）が占めています。また上位10組織の大半が、オックスフォード、ハーバード、MITといった名門大学や、IBM、Microsoft、Googleといった大手IT企業です。

D-Wave Systems（カナダ）は先日、キュービット間の結合密度を増やした新世代量子コンピューティングシステムと、機械学習への応用に向けたプラットフォームやプロダクトを展開するため、5000万米ドルの資金を調達したと発表しました。

IBMは2019年4月、同社と提携して量子コンピューティングの共同研究を加速したいと望む世界の大学がIBM Q Networkに多数参加したと発表しました。またIBMは、学术界や産業界で、次世代コンピューティングの影響を受ける職業に就こうとする学生のために、必要な素養を身に付けられるカリキュラムを開発しています。

ウォータールー大学（カナダ）は、論文の公開（229本）や学会論文集（61本）の作成を活発に行っています。研究内容には、例えば、量子アプリケーション開発の主な制約要因である、光子の精密測定などがあります。また先日、適切に設計された工学

機械装置を用いれば、破壊を伴わずに、単一量子のレベルで幅広い振動数のフォノン信号の検出が可能であることを示す研究を発表しました。

公的資金による助成が最も多いのは、オックスフォード大学（英国）で、62件、1億1759万米ドルとなっています。その半分以上が国家機関であるGTRから拠出されています。同大学は2016年以降、量子コンピューターの開発に向けて格子系と高性能センサーの研究に注力しています。

出典：

<https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-closes-50m-facility-fund-next-generation-quantum-computers>

<https://newsroom.ibm.com/2019-04-25-Leading-universities-partner-with-IBM-to-accelerate-joint-research-and-drive-educational-opportunities-in-quantum-computing>

<https://blog.linknovate.com/quantum-computing-leaders-must-know/>

QxBranch/Rigetti

主な活動

QxBranchは、データアナリティクスを中心に、量子コンピューターのソフトウェア開発を強力に押し進めています。同社が目指しているもののひとつが具体的なイベント予測の支援で、例えば高度な選挙予測モデルの構築などを実際に行っています。

最新ニュース：2019年7月11日、Rigetti Computingはフルスタック能力を拡充するため、QxBranchを買収しました。Rigetti Computingは、人類が直面する重大な課題の解決に向け、世界最高の能力を持つコンピューターの構築に取り組んでいます。

QC WARE

主な活動

QC Wareは、企業がさまざまな量子コンピューティングプロジェクトを実行できるように支援しています。同社は、量子アルゴリズム開発者を多く抱えているため、プロセス最適化、モンテカルロ法、機械学習など、量子コンピューティングの能力を活用して多くのサービスを提供しています。

最新ニュース：QC Wareは、米国エネルギー省の助成金を獲得したと発表しました。対象となったのは、量子コンピューティングを利用して複合材料および化学システム（系）の理解を促進する活動です。同社の持つ専門能力を生かし、SLACと共同で、従来型と量子のハイブリッドアルゴリズムを開発します。

D-wave

主な活動

1999年に設立されたD-Waveは、量子コンピューティングの可能性を信じて取り組む、業界を代表する企業のひとつです。企業や組織が今後直面しそうな科学技術の問題、国防上の問題、ビジネス上の問題について、とりわけ複雑な問題の解決に量子コンピューティングが役立つ可能性があることを示すため、熱心に取り組んでいます。

D-Waveは実社会に役立つ量子コンピューティングアプリケーションに注力しており、企業、政府、研究機関、学術機関などに価値を提供しています。

最新ニュース：D-Waveは、次世代の量子コンピューティングシステムの名称がAdvantage™になったと発表しました。Advantage™は2020年半ばに、同社の量子クラウドサービスであるLeap™経由で利用できるようになるということです。商業用の量子アプリケーションの開発加速を目的に設計されたAdvantage量子システムは、新しいハードウェアとソフトウェアプラットフォームを強化しており、量子コンピューティングアプリケーションを迅速かつ容易に提供できるようになります。

IBM

主な活動

IBMはMicrosoftとは対照的に、量子コンピューターのハードウェア面に力を入れており、先般、50キュービット量子コンピューターを発表して、この分野のトッププレイヤーとしての地位を確立しました。

IBMはすでに、量子コンピューター開発者向けのプロトタイプを提供しており、同社のクラウドサービス経由で20キュービットの量子コンピューターを利用できます。こうした取り組みを通じて、社会実装可能なアプリケーションの開発を目指しています。

最新ニュース：IBMは、量子コンピューターの商業化が3～5年以内 to 実現すると期待しています。

Microsoft

主な活動

Microsoftによると、同社は量子コンピューティングを最もイノベティブな技術のひとつと位置付け、その研究開発に力を入れています。特にソフトウェアプラットフォームの開発と量子コンピューターのアーキテクチャー構築を中心に取り組んでいます。

また、量子コンピューター向けに独自のプログラミング言語も開発しています。

最新ニュース：2019年5月6日、Microsoftはコンピューティング開発ツール、Quantum Development Kitをオープンソース化すると発表しました。Q#コンパイラやシミュレーターも含まれ、2019年7月にGitHubで公開されました。

Google

主な活動

Googleは、短期的課題を実社会と理論上の両面において解決することを目指し、量子コンピューティングセクターに向けた量子プロセッサとアルゴリズムの開発に取り組んでいます。

同社は量子コンピューティングが今後、AIなどイノベティブな分野で重要な役割を果たすことになると確信しており、それを踏まえて現在、専用の量子ハードウェアとソフトウェアの構築に全力をあげています。

最新ニュース：2019年10月23日、Googleは、量子コンピューター開発の重要な節目である量子超越性を達成したと発表しました。



貴社に導入するために、 PwCができること

用途の探索

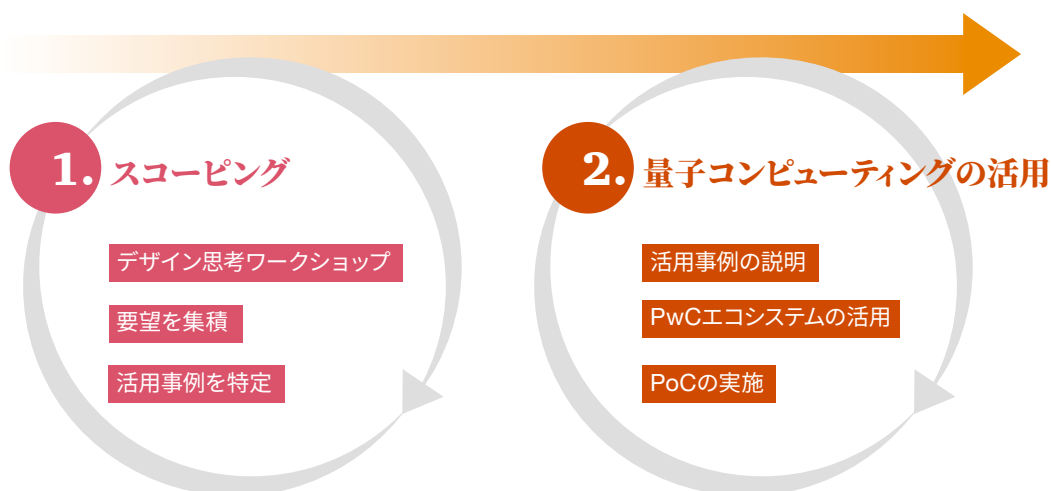
量子コンピューティングはまだ発展途上の技術です。そのため、クライアントとともに、活用の可能性を探ることが第一歩だと考えています。クライアントが現在、どのようなプロセスやテクノロジーを使っているかを調べ、エコシステム全体を見ながら、量子コンピューティングの導入方法を検討します。

用途の探索に当たっては量子コンピューティングに関するPwCの専門力を活用しますが、これはクライアントとの協力を前提としたアプローチです。第1段階としてスコーピングを行い、次に、改善点を共に見つけます。

活用事例の特定

2方向いずれかのアプローチで、活用事例を特定します。

- アプローチ1：PwCがこれまでの経験で発見した活用事例を提案し、貴社に適用する。
 - 金融セクターの場合：リスク検知と不正検知、ポートフォリオ管理の最適化など
 - 暗号化
 - AIと組み合わせ、計算を高速化
 - その他
- アプローチ2：貴社チームと共同で調査・検討を実施し、貴社プロセスからダイレクトに有望な活用事例を開発する。調査・検討は、以下のプロセスで行います。



PwCの専門チーム

PwCコンサルティングでは、専門のエキスパートが、次の事項について支援を行います。

- 貴社における量子コンピューティングの技術とその影響についての理解を促進する。
- メリットとリスクを説明する。
- 貴社事業と結びついた活用事例を提示する。
- シミュレーションとしてPOC（概念実証）を実施する。



PwCの専門チーム

テクノロジー業界向けコンサルティングサービス部門内に、量子コンピューター担当チームを設置し、拡充を図っています。



具体的事例をもとにした 技術テストが可能

PwCはあらゆる業界の経験を有しているため、金融、医薬、暗号化など、実際の適用事例をもとにテストを実施することが可能です。



IT専門家との連携

量子コンピューティング分野の優れた知見を有するエキスパートと連携し、具体的な応用事例を提案いたします。



常にテクノロジーの 最先端で

具体的な適用事例の決定から、実働プロトタイプの提供まで、クライアントが初めて見る明日のテクノロジーを提供いたします。

世界を代表するIT企業との連携

量子コンピューティングは、単なる新しいテクノロジーではありません。グローバルエコシステムの一部であり、ロボティクスからブロックチェーンに至るまで、最新テクノロジーの枠組みを変える力を持っています。

PwCはこれまで、MicrosoftなどIT開発のトップ企業と協力し、RPAやAIなど、さまざまなテクノロジーを活用してきました。量子コンピューティングについても、クライアントに具体的なアプローチを提案できるよう、そうしたIT企業と連携を構築していきます。

世界の巨大IT企業が莫大な投資をすでに行っていることは、本レポートを通じてご理解いただけたかと思いますが、加えて、投資銀行などの大企業もこの技術に資金を投じています。

PwCも日々新しいテクノロジーに対応し、各プロジェクトに最適な相手との連携に努めています。

Google、Microsoft、IBMの各社は、量子コンピューティングが業務運営の方法に革命を起こすと確信しています。PwCはそうしたITリーダーと連携し、最新の量子コンピューティング技術をクライアントの日常業務プロセスに活用していきます。

未来創造型コンサルティングサービスの提供

PwCでは量子コンピューティングを含む、未来創造型のコンサルティングサービスを提供しています。

①Technology Laboratoryについてはこちら

<https://www.pwc.com/jp/ja/services/consulting/technology-consulting/technology-laboratory.html>

②Future Design Labについてはこちら

<https://www.pwc.com/jp/ja/industries/technology/tech-consulting/future-design-lab.html>

③Future of Manufacturing Working Groupについてはこちら

<https://www.pwc.com/jp/ja/industries/technology/tech-consulting/future-design-lab/future-of-manufacturing-working-group.html>



おわりに

本レポートでは、量子物理学を用いたコンピューターについて、その概念、利点、問題点、応用の可能性、主なプレイヤーについて解説しました。

量子コンピューターは、一部のタスクを従来型コンピューターより、はるかに効率的に処理するので、ある種のアプリケーションのための新しいツールとなり得ます。しかし、従来型コンピューターの完全な代替とはならないでしょう。むしろ、システム最適化といった量子コンピューターが得意とする能力を発揮するためには、従来型コンピューターのサポートが必要なのです。

量子コンピューターの登場によって、さまざまな分野で問題の解決が進むでしょう。とりわけエネルギー、金融、医療、航空宇宙などが恩恵を受けられると思われます。

量子コンピューティングの能力は、気候変動との闘いや創薬を始め、疾病治療、交通渋滞解消、機械学習の時間短縮などに有効です。このようにパワフルな新技術は、人類の利益のために活用されるべきです。

AIと組み合わせれば、機械学習が大幅にスピードアップし、全く新しい可能性が開けてくることが期待されています。すでに多くの企業が、この新技術の可能性を理解しています。

- 巨大IT企業が、大規模なリソースを投入しています。
- 主要な業界（投資銀行、医薬など）では、そうした巨大IT企業との連携構築をすでに始めている他、社内にチームを編成して、技術の発展状況の追跡も始めています。
- 多くの大学も、研究への投資を進めています。

去る2019年10月、Googleは量子超越性の達成を宣言しました。これが刺激となって機運が高まり、他の企業も量子コンピューターへの取り組みを強化するでしょう。量子超越性はますます現実味を帯び、そこには無限の可能性が広がっています。

計算を効率的に行いたい、サイバーセキュリティを強化したい、あるいは、とにかく最先端技術から取り残されたくないなど、各社の目的はさまざまですが、いずれにしても量子コンピューティング技術はもう手の届くところまで来ており、数年以内の実用化も視野に入っています。

次世代イノベーションは、量子コンピューティングによって引き起こされます。

Authors & your contacts



Marc HADDAD

Partner

PwC Consulting
marc.k.haddad@pwc.com
www.linkedin.com/in/marcadad



Geoffrey SCHINASI-HALET

Manager

PwC Consulting
Geoffrey.schinasi-halet@pwc.com

Co-authors



Amin EL MOUTAOUAKIL

Amin.el.moutaouakil@pwc.com



Jasmine SAF

jasmine.saf@pwc.com



Souleymane BELHOUCAT

souleymane.belhouchat@pwc.com

PwC Japanグループ

www.pwc.com/jp/ja/contact.html



PwCコンサルティング合同会社



三山 功

ディレクター

テック系スタートアップ・外資系コンサルティング会社などを経て、PwCコンサルティング合同会社に入社。

デザイン領域の未来創造手法とビジネスコンサルティングやデジタルコンサルティングのノウハウを融合した「思索的未来デザイン (Speculative Future Design)」を活用し、日本企業の指数関数的成長 (Exponential Growth) の実現を支援。特に2030年～2050年頃の未来世界の創造と、それを応用したバックキャスト型の価値共創プログラムを数多く手掛ける。

2020年1月にはFuture Design Labを設立し、担当ディレクターとして活動をしている。本組織の設立を通じて、より組織的・体系的に産官学を横断したアドバイザリーサービスの提供を行っている。



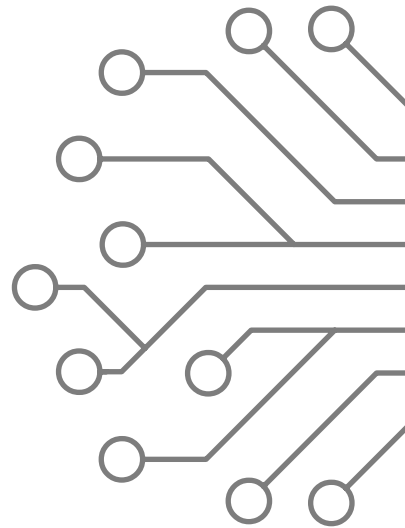
バックマン・フィリップ

シニアアソシエイト

日系企業メーカーでグローバル人事および新規事業の立ち上げを経て、PwCコンサルティング合同会社に入社。

グローバルパートナーシップの構築を専門とし、日系企業とシリコンバレーのエマージングテックベンチャー企業とのビジネスモデル構築および日本向け商品開発などに携わる。

現在は、シリコンバレーの最先端テックベンチャー企業とのエコシステム構築に注力、日本における量子コンピューティングの活用を推進している。



www.pwc.com/jp

PwC Japanグループは、日本におけるPwCグローバルネットワークのメンバーファームおよびそれらの関連会社（PwCあらた有限責任監査法人、PwC京都監査法人、PwCコンサルティング合同会社、PwCアドバイザリー合同会社、PwC税理士法人、PwC弁護士法人を含む）の総称です。各法人は独立した別法人として事業を行っています。

複雑化・多様化する企業の経営課題に対し、PwC Japanグループでは、監査およびアシュアランス、コンサルティング、ディールアドバイザリー、税務、そして法務における卓越した専門性を結集し、それらを有機的に協働させる体制を整えています。また、公認会計士、税理士、弁護士、その他専門スタッフ約8,100人を擁するプロフェッショナル・サービス・ネットワークとして、クライアントニーズにより的確に対応したサービスの提供に努めています。

PwCは、社会における信頼を築き、重要な課題を解決することをPurpose（存在意義）としています。私たちは、世界157カ国に及ぶグローバルネットワークに276,000人以上のスタッフを有し、高品質な監査、税務、アドバイザリーサービスを提供しています。詳細は www.pwc.com をご覧ください。

本報告書は、PwCメンバーファームが2019年12月に発行した『Quantum Computing』を翻訳したものです。翻訳には正確を期しておりますが、英語版と解釈の相違がある場合は、英語版に依拠してください。

電子版はこちらからダウンロードできます。 www.pwc.com/jp/ja/knowledge/thoughtleadership.html

オリジナル（英語版）はこちらからダウンロードできます。 www.pwc.fr/fr/publications/data/quantum-computing-une-technologie-du-futur-a-portee-de-main.html

日本語版発刊年月：2020年8月 管理番号：I202007-01

©2020 PwC. All rights reserved.

PwC refers to the PwC network and/or one or more of its member firms, each of which is a separate legal entity. Please see www.pwc.com/structure for further details.

This content is for general information purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.