



エレクトロニクス 産業における 量子コンピューティングの 可能性

新材料の発見、設計、製造の分野で、
新たな道を切り拓く

はじめに

「量子コンピューティング」と聞くと、いかにも複雑そうに思えるのだが、事実、複雑である。

ただ、エレクトロニクスの分野では、これまでも設計から納品に至るまで、技術的な複雑さは珍しいものではなかった。さらに持続可能な世界の実現に向けて、製品の最終廃棄までも対応を迫られている。しかも、極小の半導体から、地球を周回する人工衛星に至るまで、電子部品は技術の不可欠な構成要素である。

デバイスや機械がかつてないほど進化を続けている一方、エレクトロニクス・メーカーが抱える複雑さは、軽減するどころか、むしろ増大している。電子機器の設計、研究、製造における極めて難しい課題を克服するためには、新たなアプローチが必要だ。

例えば、動的な AI システムは、私たちの生活をより良いものにし、コミュニケーションを支える機器をより便利なものにする力を秘めている。しかし、そのためには 1,000 億個ものトランジスターを搭載できるような、非常に強力なチップが必要となる。生産のスケジューリングやサプライチェーンの最適化も、世界規模で検討する必要があるだろう。そして最も大切なことは、これからは地球に優しく、入手しやすい新材料を開発しなくてはならないということである。

こうした変革の担い手になると目されるのが量子コンピューティングだ。IBM はその可能性を探るため、2016 年に 5 量子ビットの量子コンピューターへのオープン・アクセスを開始した。¹ 2022 年に至るまで、量子コンピューティングの成長のスピードは加速度を増し、適用可能なユースケースの模索の取り組みはより活発になっている。IBM は、IBM Quantum Network を通じて、世界の主要なエレクトロニクス企業と共に、ソリューションの共同開発を進めている。Samsung Advanced Institute of Technology (サムスン電子総合技術院)、東芝、ソニー、日立製作所、LG 社などの業界の巨人たちと協業できることに IBM は感謝し、また謙虚な気持ちで取り組む所存である。²

未来は、今ここから始まる。未来を皆さんと共に築く日が来ることを心待ちにしている。

Bruce Anderson

Managing Partner,
Global Electronics and Automotive,
IBM Consulting
(IBM コンサルティング、
グローバル・エレクトロニクス & オートモーティブ、
マネージング・パートナー)
baanders@us.ibm.com
linkedin.com/in/bruceanderson/

著者



Charles Chung

Quantum Industry Consultant,
Electronics, IBM
(IBM、エレクトロニクス、
量子業界コンサルタント)
Charles.Chung@ibm.com
linkedin.com/in/charles-chung-311a91

博士号を有するエンジニアであり、著者としても活躍する。コンシューマー・エレクトロニクス、遺伝子シーケンシング、車載センサーなどの多様な用途向けに、35 種類以上の電子・半導体製品およびソリューションを開発するプロジェクトに携わる。Semiconductor Industry Group (SEMI) とペンシルベニア大学の Singh Center for Nanotechnology で、諮問委員を務める。

Imed Othmani

Industry Partner, IBM Quantum
(IBM Quantum、
インダストリー・パートナー)
iothmani@ca.ibm.com
linkedin.com/in/imedothmani

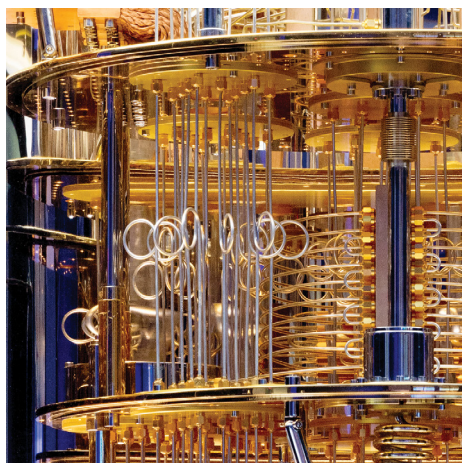
IBM Quantum のインダストリー・パートナー。量子コンピューティング業界を牽引し、世界中の製造部門における技術導入の取り組みを主導する。エレクトロニクス、自動車、航空宇宙など、流通および製造業のクライアントと数多く協働。量子コンピューティング、人工知能、デジタル・トランスフォーメーション (DX)、ビジネス・イノベーションなどの幅広い分野で 25 年以上の国際経験を有し、新興技術を活用して企業のビジネス変革を支援する。業界団体のイベントや大学からゲスト・スピーカーとして招聘された経験も豊富である。

日本語翻訳監修

橋本光弘

日本アイ・ビー・エム株式会社
IBM コンサルティング事業本部
経営戦略コンサルティング
アソシエイト・パートナー

日本学術振興会特別研究員 (DC1)、国内大手総合電機メーカー研究員 (中央研究所、米国研究所他) としてストレージ・デバイスの研究開発に従事。その後、米系戦略コンサルティング・ファームおよび IBM にて、電機・化学・機械・金融業界のコンサルティング・プロジェクトに参画。専門領域は全社経営改革、M&A / PMI、IT / DX 戦略策定・変革推進、オペレーション改革。近年は、特に量子コンピューター・IoT・AI などのテクノロジーを活用した新規事業戦略策定、営業 / IT 領域のオペレーション改革、大規模 M&A / PMI 案件を多数手掛けている。博士 (工学)。



主な ポイント

量子コンピューティングを導入することにより、エレクトロニクス業界は3つの主要領域でパフォーマンスやコストの課題を解決することが可能になる。

■ 先端材料により、製品の性能を高める

電子製品に新たな性能を付加し、まったく新しい製品群を生み出すような先端材料の開発には、数十年の期間を要する場合もある。量子コンピューティングを、古典コンピューティングと合わせて使えば、より高速で正確なシミュレーションが可能になり、新材料の実用化が加速される。

■ 設計を改良し、実用化を早める

今日の電子設計はあまりに複雑なため、企業は難しいトレードオフに直面している。設計を丁寧に行い、時間をかけてエラーを確認し、製品のリリースを遅らせるか、あるいは製品は早々にリリースするが、最適とは言えない設計で我慢し、かえって高くつくかもしれないバグを容認するのかの二者択一である。しかし、量子コンピューターを使えば、企業は電子設計を迅速かつ徹底的に最適化し、検証できるようになり、製品の市場投入までの期間を短縮することができるようになる。

■ AI のスマート化により、製造をスマート化する

電子機器を製造する過程において、量子機械学習*を活用すれば、古典AIを使ったときよりも正確に合格品と不良品を区別できるようになる。これにより、製造コストは下がり、より信頼性の高い製品が作れるようになるはずだ。

* 量子機械学習とは、量子コンピューターを活用した機械学習のこと

新しい コンピューティング・パラダイム

エレクトロニクス業界は数多くの課題に直面しており、課題解決はより難しいものとなっている。例えば、最先端の半導体製造設備には、250 億ドルもの費用がかかる。³ 電子製品の設計がより複雑化する一方で、スマートフォンのような従来型の巨大な製品市場の成長が止まる。⁴

過去 50 年間にわたり、設計と製造の難易度は高まる一方であり、業界のパフォーマンスは伸び悩んでいる。

要するに、この業界が歩む道は、より困難で、リスクが高く、高価なものになりつつあるということだ。だが、その影響はエレクトロニクス業界にとどまらない。電子技術は、さまざまなことを可能にする実現技術であり、その製品は事実上あらゆる業界で使われているからだ。⁵ エレクトロニクス業界が直面する課題にどう対応するかによって、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・パラダイムである(5 ページの「視点: 基礎」を参照)。古典物理学には存在しない現象を活用することで、これまで不可能だった計算を実現する。量子コンピューティングはエレクトロニクス業界が抱える問題のいくつかを解決する強力なツールとなる可能性を秘めている。

IBM は、何十年もの間、チップ技術の革新に努めてきたのと同様、⁶ 量子コンピューティング技術の最前線にも立ち続けてきた。1981 年、IBM は量子コンピューティングに関する最初の会議を共同開催した。⁷ 2016 年には、世界で初めて量子コンピューターを一般に公開した。⁸ このように量子コンピューターへのアクセスを提供することで、IBM は世界中の研究者や開発者が新しい量子アルゴリズムを開発できるよう支援し、量子コンピューターの進歩に貢献してきたのである。

私たちは今、「量子の 10 年」に突入している。⁹ IBM の量子コンピューティング・ロードマップは、この技術の将来の能力を企業が活用するための道しるべとなるはずである(6 ページの図 1 参照)。

基礎¹⁰

古典コンピューターのビットは、情報を0か1として扱う。ところが、科学者たちが原子よりも小さい物質を探索できるようになると、物質は非常に不思議な挙動を取ることが分かってきた。例えば、2つの場所に同時に存在する「重ね合わせ」や、どれだけ離れた場所にあっても、神秘的に結びついた動きを示す「もつれ」といった現象である。これらの現象を探求し、理解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は、物理学のいくつかの側面を活用する。中でも特に重要なのが、「重ね合わせ」と「もつれ」の2つだ。量子コンピューターは「重ね合わせ」の原理を使い、複数の状態を同時に表現し、計算をする。量子の「もつれ」によって、複数の量子ビット（キュービット）を互いに結びつけ、個別の量子ビットよりも多くの情報を保有する。

古典力学に「もつれ」と同様の現象は存在せず、仮に古典コンピューターでモデル化しようとすると、指数関数的なリソースが必要になる。例えば、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、地球上に存在する原子の数よりも多くの古典ビットが必要になる。

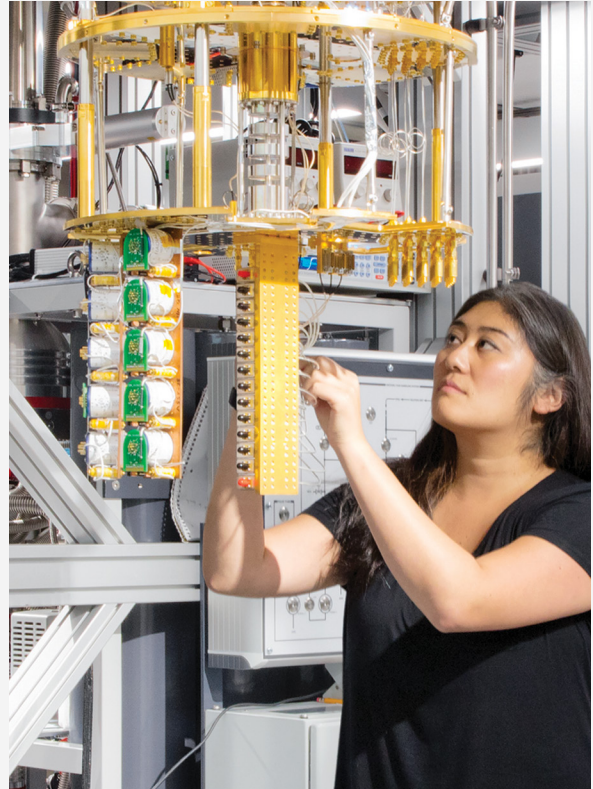


図 1

IBM の量子コンピューティング・ロードマップ

最近の展開とこれからの展望



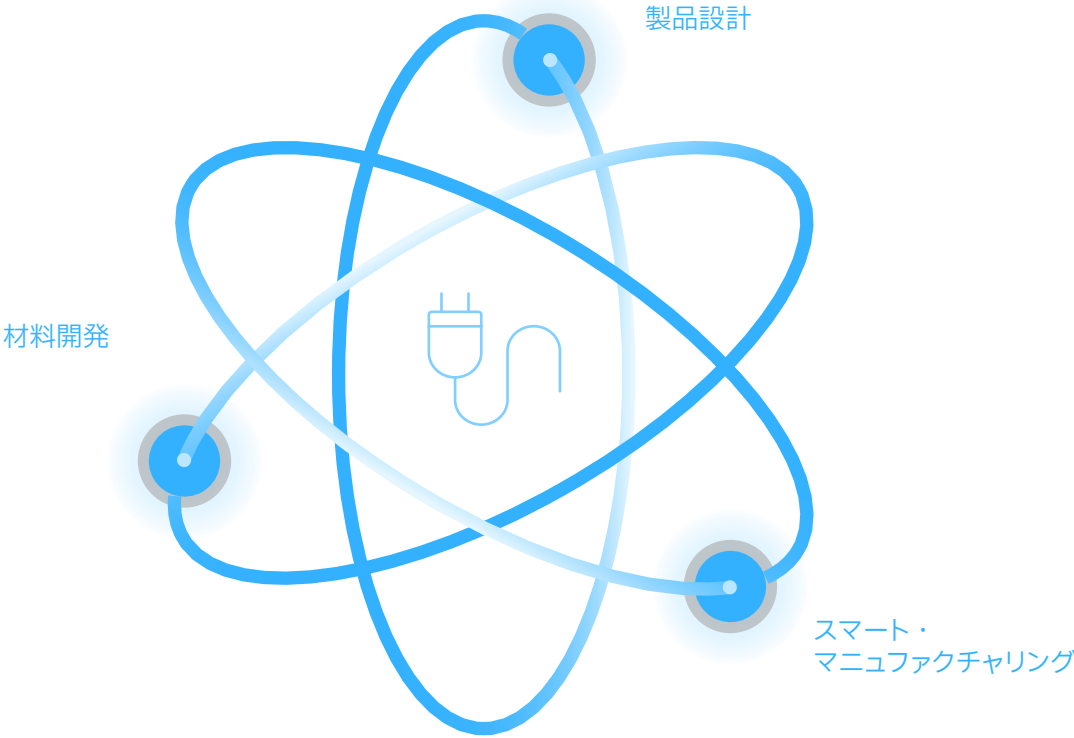
量子コンピューティングのビジネスでの競争優位性が明らかになるにつれ、その注目は高まりつつある。量子コンピューティングについて理解せず、それが自社の業務にどのような影響を与え得るかを把握していないリーダーは、これからは後れを取ってしまうことだろう。量子コンピューティングは急速な進化を遂げつつあるが、その初期の知的財産の多くは独占 / 寡占化する可能性がある。2017 年から 2021 年までに出版された 3,300 以上の特許分野の中で、量子コンピューティングは出願が最も急速に増えたトップ 5 の分野の 1 つになっている。¹¹ 量子コンピューティングの進化のスピードに、確実についていける者はごく少数しかないだろう。

量子コンピューティングには、エレクトロニクス業界が抱えるさまざまな課題を解決する方法としての大きな可能性がある。本レポートでは、エレクトロニクス業界の 3 つの主要な応用分野（化学シミュレーション、最適化と探索、AI と機械学習）において、量子コンピューティングの可能性を具現化する 3 つのユースケース（図 2 参照）を紹介する。

- 1. 材料開発：量子シミュレーションの力を発見と実用化に活かす
- 2. 製品設計：量子探索で開発と検証を加速させる
- 3. スマート・マニュファクチャリング：量子機械学習で歩留まりを高め、コストを削減し、品質を向上させる

図 2

エレクトロニクス分野における
量子コンピューティングのユースケース



材料開発： 量子シミュレーションの力を 発見と実用化に活かす

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。¹² 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。¹³ しかし、古典コンピュータでは、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。

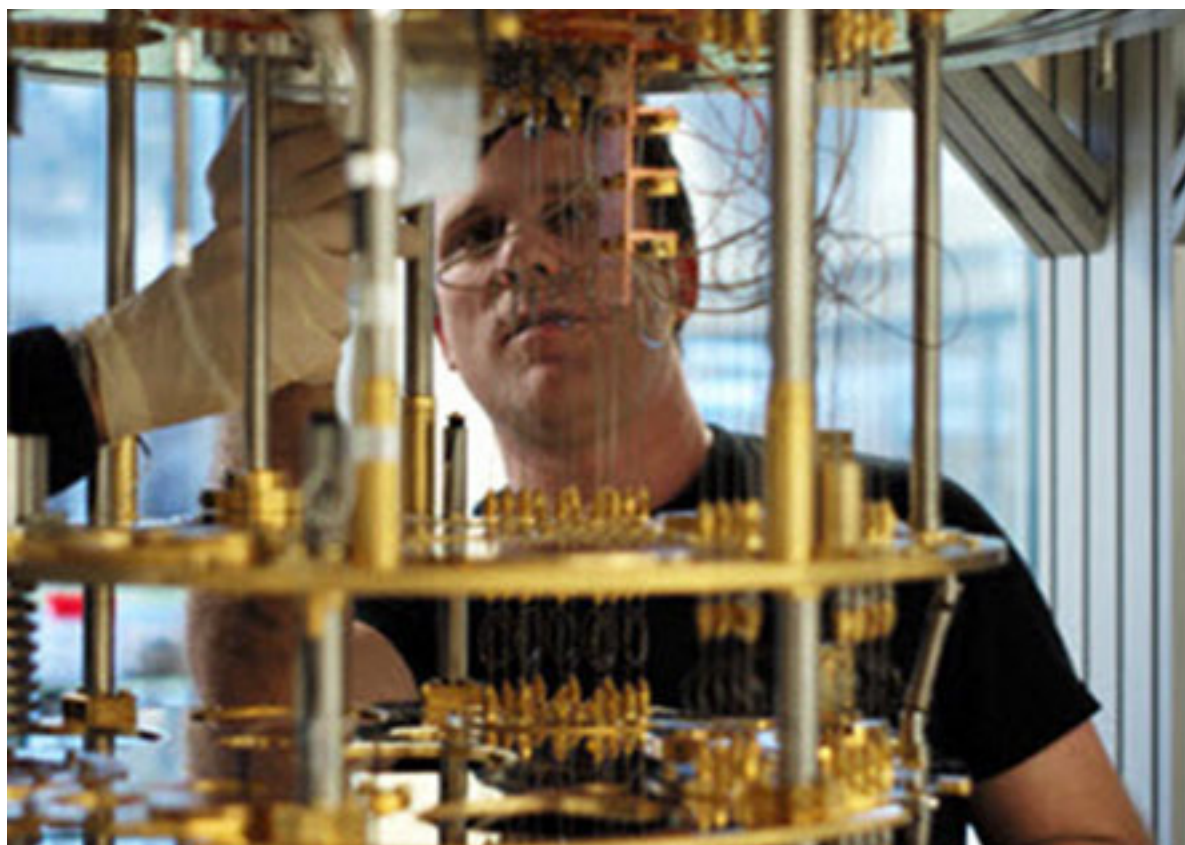
一例が、ユーザーとスマートフォンの接点であるフラットパネル・ディスプレイだ。消費電力が大きいためバッテリーをすぐ使い切ってしまうが、発光素子の消費電力を効率化すれば、ディスプレイ自体も効率化を図ることができる。そのためには新規材料の素子が必要だが、開発には膨大な時間が伴う。今でこそ一般的になった有機発光ダイオード（OLED）のディスプレイも、最初の論文で発表されてから実用化まで 35 年もの歳月を要した。¹⁴

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、量子コンピュータとは好相性だが、古典コンピュータでは対応が難しい。

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。¹⁵

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。¹⁶ 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。¹⁷

もう1つ事例を紹介しよう。発光素子の内部効率は今、最大25%だが、IBMはJSRや三菱ケミカルと共に、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。¹⁸ 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。¹⁹



製品設計： 量子探索で開発と検証を 加速させる

エレクトロニクス業界では「設計と製造」をめぐる熾烈な競争が繰り広げられている。長期に高い性能を維持できる、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、最適な解が見つければ、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。²⁰

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す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。²¹ 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。²² 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。²³

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 ソルバーともいう）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。²⁴ 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。



スマート・マニファクチャリング： 量子機械学習で歩留まりを高め、 コストを削減し、 品質を向上させる

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。²⁵ 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すぎる。²⁶ 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。²⁷

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。²⁸ 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。²⁹

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。³⁰ 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。³¹

^{*} 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

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。³²

量子優位性³³

ビジネスや科学の分野で関心のある計算タスクを、量子コンピューターを使って、効率を高め、コストを低減し、品質を高めたときに、「量子優位性」が生じたと言う。古典システムと共に量子コンピューターを活用することで、古典システムを単独で使用したときよりも著しくパフォーマンスが高まったときに、量子優位性が生まれる。量子コンピューティングのハードウェア、ソフトウェア、さらにはアルゴリズムが融合的に進化してこそ、古典コンピューティングを大幅に上回るパフォーマンスが実現でき、業界横断的な優位性が確保されるのだ。しかし量子コンピューティングからビジネス価値を引き出すためには、組織や業界を真に変革することができるような適切なユースケースが重要になってくる。

量子優位性の実現は、一夜にして成せるものではない。しかし、数カ月、あるいは数年かかったとしても、利用と学習の面から見た進歩の程は指数関数的なものとなり得るのである。新材料の開発から、個別化医療、さらには経済全体にわたるビジネスモデルの抜本的な転換に至るまで、変化は確実に起こりつつある。古典コンピューティングの能力を高め、量子コンピューティングを活用した業界変革の可能性を積極的に探究する組織こそが、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である。



アクション・ガイド

量子コンピューターは、今日のエレクトロニクス業界に破壊的な変化をもたらす可能性を秘めている。しかしはっきり言えることだが、量子コンピューティングは直感で扱えるような簡単なものではない。このテクノロジーを理解し、活用するためには、多くの時間とリソースを費やす必要がある。

さらに、古典か量子かといった二者択一の問題ではないことを理解しておく必要がある。競争優位性を確立するためには、2つのコンピューティング・テクノロジーの強みを補完的に組み合わせる方が、はるかに

戦略的である。そのためには、量子コンピューティングだけでなく、古典コンピューティングと量子コンピューティングの複雑な相互作用についても熟知する必要がある。

組織が量子コンピューティングを検討し始めてから、実際に導入する準備が整うまでに、数年、あるいはそれ以上かかることもある。ビジネスの世界において、これは生きるか死ぬかを決定しかねないほどの時間である。様子を見ている間に、破壊される者になるか、破壊する方に回るのかの分かれ道を通り過ぎてしまう。

量子コンピューティングに今すぐ備えるための方法を、以下にいくつか紹介する。

情報に基づいた意思決定を行えるよう、組織内で専門家を育成する

量子コンピューティングの学習は難しく、習得するには何年も要するのが普通だ。量子コンピューティングを扱える人材は希少であるため、多くの場合、組織内で専門家を育成する必要がある。技術職と営業職の両方から人材を選りすぐり、スキルアップを図るべきだ。こうして、組織の目的や制約条件に合わせながら、量子コンピューティング技術を活用する能力を育成するのである。

最も重要で説得力のあるユースケースを特定する

自分の組織が量子コンピューティングを導入した場合、メリットだけでなく、起こりうる脅威についても明確にする。ユースケースを特定すれば、実際に行動した場合の時間的な制約を見積もることができる。

ユースケースを、量子コンピューティングを探索するための概念実証（PoC）に落とし込み、それを自社の戦略にどう組み込むかを検討する

量子コンピューティングの専門家と提携して、プロトタイプを開発する。必要となるハードウェアとソフトウェアのプラットフォームを確保する。量子コンピューターの準備が整った時点で、自社のコードも利用できるように、拡張性を考慮した量子コンピューティング・コードを検証する。

中核となるワークフローを見直す

ワークフローの中で、量子優位性のメリットを得られる可能性のあるステップを特定する。量子コンピューティングと古典コンピューティングのワークフローとデータフローがどのように交錯するのかを理解する。量子と古典のコンピューティングをどのように組み合わせれば、互いに活用できるかを学ぶ。量子コンピューティングの可能性を最大限に活かすには、デザイン思考を採用して、自社のプロセスを端から端まで徹底的に検討することがカギとなる。

Expert Insights について

Expert Insights は、ニュース価値の高いビジネスや関連テクノロジーのトピックについて、ソート・リーダーの見解を伝えるレポートです。世界中の該当分野の専門家との対話に基づいて作成しています。詳細については、IBM Institute for Business Value (iibv@us.ibm.com) までお問い合わせください。

変化する世界に対応するためのパートナー

IBM はお客様と協力して、業界知識と洞察力、高度な研究成果とテクノロジーの専門知識を組み合わせることにより、急速に変化し続ける今日の環境における卓越した優位性の確立を可能にします。

IBM Institute for Business Value

IBM Institute for Business Value (IBV) は、20 年以上にわたって IBM のソート・リーダーシップ・シンクタンクとしての役割を担い、ビジネス・リーダーの意思決定を支援するため、研究と技術に裏付けられた戦略的洞察を提供しています。

IBV は、ビジネスやテクノロジー、社会が交差する特異な立ち位置にあり、毎年、何千もの経営層、消費者、専門家を対象に調査、インタビューおよび意見交換を行い、そこから信頼性の高い、刺激的で実行可能な知見をまとめています。

IBV が発行するニュースレターは、ibm.com/ibv よりお申し込みいただけます。また、Twitter (@IBMIBV) や、LinkedIn (linkedin.com/showcase/ibm-institute-for-business-value) をフォローいただくと、定期的に情報を入手することができます。

関連レポート

The Quantum Decade: A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage

邦訳「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 -」

<https://www.ibm.com/downloads/cas/KRWEW08D>

The CTO Revelation: Redefining responsibility, accelerating discovery

邦訳「CTO の登場とそのインパクト - 組織内の責任分担を再定義し、発見を加速させる -」

<https://www.ibm.com/downloads/cas/LJE3GE6A>

Forging the future of supply chains: A playbook of 5 essential strategies

邦訳「サプライチェーンの未来を切り拓く - プレイブック - 5つの必須戦略 -」

<https://www.ibm.com/downloads/cas/DRNVYBGK>

注釈および出典

1. Mandelbaum, Ryan. “Five years ago today, we put the first quantum computer on the cloud. Here’s how we did it.” IBM Research. May 4, 2021. <https://research.ibm.com/blog/quantum-five-years>
2. Smith-Goodson, Paul. “IBM Adds LG Electronics To Its Massive 170+ Member IBM Quantum Network.” Forbes. Jan 25, 2022. <https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2022/01/25/ibm-adds-lg-electronics-to-its-massive-170-member-ibm-quantum-network/?sh=2837dea36e07>
3. Nellis, Stephen. “EXCLUSIVE TSMC looks to double down on U.S. chip factories as talks in Europe falter.” Reuters. May 14, 2021. <https://www.reuters.com/technology/exclusive-tsmc-looks-double-down-us-chip-factories-talks-europe-falter-2021-05-14/>
4. “Consumer Electronics.” Statista. Accessed March 24, 2022. <https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/worldwide>; Ng, Abigail. “Smartphone users are waiting longer before upgrading—here’s why.” CNBC. com. May 16, 2019. <https://www.cnbc.com/2019/05/17/smartphone-users-are-waiting-longer-before-upgrading-heres-why.html>
5. Dusina, Daniel, Jacob Seabolt, and Mitch Polich. “The semiconductor shortage: Implications for the global economy.” DBusiness. August 2, 2021. <https://www.dbusiness.com/daily-news/the-semiconductor-shortage-implications-for-the-global-economy/>
6. Markoff, John. “IBM’s Robert H. Dennard and the chip that changed the world.” IBM THINK Blog. November 7, 2019. <https://www.ibm.com/blogs/think/2019/11/ibms-robert-h-dennard-and-the-chip-that-changed-the-world/>
7. Bennett, Charles and Olivia Lanes. “Celebrating the 40-year anniversary of the Physics of Computation Conference.” IBM Research. March 15, 2021. <https://research.ibm.com/blog/qc40-physics-computation>
8. The Quantum Decade: A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage. IBM Institute for Business Value. 2021. 邦訳「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 -」
<https://www.ibm.com/downloads/cas/KRWEWO8D>
9. 同上
10. 同上
11. “Fast growing technologies of 2021.” IFI CLAIMS. 2021. <https://www.ificlaims.com/rankings-tech-growth-2021.htm>
12. Fulton III, Scott. “After Moore’s Law: How Will We Know How Much Faster Computers Can Go?” DataCenter Knowledge. December 21, 2020. <https://www.datacenterknowledge.com/supercomputers/after-moores-law-how-will-we-know-how-much-faster-computers-can-go>
13. “IBM unveils world’s first 2 nanometer chip technology, opening a new frontier for semiconductors.” IBM. May 6, 2021. <https://newsroom.ibm.com/2021-05-06-IBM-Unveils-Worlds-First-2-Nanometer-Chip-Technology,-Opening-a-New-Frontier-for-Semiconductors>
14. Mertens, Ron. The OLED Handbook: A guide to the OLED industry, technology and market. 2019. Also based on internal IBM research.
15. Gao, Qi, et al. “Applications of quantum computing for investigations of electronic transitions in phenylsulfonyl-carbazole TADF emitters.” Computational Materials. May 20, 2021. <https://www.nature.com/articles/s41524-021-00540-6>
16. “Sustainable materials, sustainable products, sustainable planet.” IBM Research. Accessed March 23, 2022. See video. <https://research.ibm.com/interactive/5-in-5/photoresists/>
17. “Envisioning a new wave in power: Mercedes-Benz bets on quantum to craft the future of electric vehicles.” IBM case study. Accessed March 16, 2022. <https://www.ibm.com/case-studies/daimler/>

18. Gao, Qi, et al. "Applications of quantum computing for investigations of electronic transitions in phenylsulfonyl-carbazole TADF emitters." *Computational Materials*. May 20, 2021. <https://www.nature.com/articles/s41524-021-00540-6>
19. Divyanshi, Tewari. "Organic LED Market." Allied Market Research. April 2020. <https://www.alliedmarketresearch.com/organic-oled-market>
20. "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. November 26, 2018. <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>; "Application Processor Market—Global Forecast to 2023." Markets and Markets. Accessed April 18, 2022. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/application-processor-market-129689032.html>
21. Salmon, Linton. "Circuit realization at faster timescales." Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Accessed March 16, 2022. https://www.darpa.mil/attachments/ObscurationandMarking_Slides.pdf
22. Based on internal IBV research.
23. Alemzadeh, Homa, Ravishankar K. Iyer, Zbigniew Kalbarczyk, and Jai Raman. "Analysis of safety-critical computer failures in medical devices." *IEEE Security & Privacy*. April 29, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6509886>
24. "Multiple Qubits and Entangled States." Qiskit. Accessed March 23, 2022. <https://qiskit.org/textbook/ch-gates/multiple-qubits-entangled-states.html>
25. "What is a smart factory?" SAP Insights. Accessed March 16, 2022. <https://insights.sap.com/what-is-a-smart-factory/>
26. Meixner, Anne. "Fabs Drive Deeper Into Machine Learning." *Semiconductor Engineering*. September 7, 2021. <https://semiengineering.com/fabs-drive-deeper-into-machine-learning/>
27. Wang, Brady. "Seemingly hasty, but prudent TSMC's new fab plan in the US." Counterpoint Research. May 29, 2020. <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*. September 22, 2020. <https://www.eenewsanalog.com/news/ai-report-compares-5nm-and-earlier-node-wafer-costs>. Internal IBV analysis.
28. Thompson, Neil, Kristjan Greenewald, Keeheon Lee, and Gabriel F. Manso. "The computational limits of deep learning." IBM Research. September 1, 2020. <https://mitibmwatsonailab.mit.edu/research/blog/the-computational-limits-of-deep-learning/>
29. Internal IBV analysis.
30. Abbas, Amira, et al. "The power of quantum neural networks." *Nature Computational Science*. June 24, 2021. <https://www.nature.com/articles/s43588-021-00084-1>
31. Huang, Hsin-Yuan, et al. "Power of data in quantum machine learning." *Nature Communications*. May 11, 2021. <https://www.nature.com/articles/s41467-021-22539-9>
32. 同上
33. The Quantum Decade: A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage. IBM Institute for Business Value. 2021. 邦訳「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 -」<https://www.ibm.com/downloads/cas/KRWEWO8D>

© Copyright IBM Corporation 2022

IBM Corporation
New Orchard Road
Armonk, NY 10504

Produced in the United States of America | May 2022

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を提供され、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「Exploring quantum computing use cases for electronics - New horizons in discovery, design, and manufacturing」の日本語訳として提供されるものです。

