



量子コンピューティングによる ビジネス革命の時、来たる

パラダイム・シフトをもたらすテクノロジーを使いこなすための
5つの戦略

Executive Report

Quantum computing



本レポートで取り上げる 内容

量子コンピューティングがビジネスに革命を
起こす可能性

今すぐ行動を起こすべき理由

量子技術によりビジネス優位性を確立する
ための5ステップのロードマップ

IBM が提供するサービス

IBM は、科学やビジネスでの利用を目的とした初のユニバーサル量子コンピューターの開発を進めています。IBM Q Experience と Qiskit を利用すれば、IBM の量子コンピューター、シミュレーター、教育リソースのほか、量子コンピューティングの研究を行っている共同コミュニティにも自由にアクセスできます。IBM Q Network の参加組織は、コラボレーションはもちろんのこと、IBM Cloud 経由で、より大規模な IBM Q システムをはじめとする最先端テクノロジーの利用が可能となります。IBM Q Consulting は、戦略コンサルタント、量子技術研究者およびさまざまな Industry の業界専門家が、お客様による量子コンピューティング活用の戦略策定を支援し、ハイパフォーマンスと、量子コンピューティングが導き出すビジネス優位性の創出をお手伝いします。詳細については ibm.com/ibmq をご覧ください。

量子コンピューティングによる飛躍の時

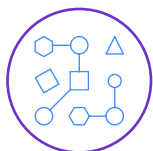
量子コンピューティングは、世界に変革をもたらす商用化の段階を迎えつつある。特定の問題を解決するために、量子コンピューターがもつ驚異的な能力を他社に先駆けて採用しようとするアーリー・アダプターは、新たなビジネスモデルの創出につながる革新的進化を手にする可能性がある。先駆的ビジョンを掲げるビジョナリー企業は、「Quantum Ready」（量子コンピューティング適用が整った段階）となるために、新しい量子コンピューティングのエコシステムと連携を始めている。このように、先見の明がある企業は、複雑なビジネス上の問題に対処するためのユースケースや関連アルゴリズムの調査・検討をすでに開始している。本レポートでは、量子コンピューティングがビジネスに引き起こすパラダイム・シフトを考察し、今すぐ行動を起こすべき理由を明らかにするとともに、量子技術への対応により、ビジネス優位性を確立して企業を発展させるための5つの提案を行う。

量子コンピューティングとは

量子コンピューティングは、自然界における量子力学の法則を活用することで、従来の情報処理のあり方を抜本的に変える。量子のふるまいには「重ね合わせ」と「もつれ」という2つの特性があり、これらを量子コンピューターで活用すれば、従来型（または「古典」）コンピューターでは対応が困難な問題を解決できる可能性がある。

- **重ね合わせ (Superposition)**：従来型コンピューターは、「1」または「0」を使って表現する2進数のビットによって演算を行っている。他方、量子コンピューターは、「1」と「0」だけではなく、量子ビットが取りうる組み合わせ（または「重ね合わせ」）の量子ビットを使用できる。したがって、 n 個の量子ビットを持つ量子コンピューターは、 2^n の n 乗通りの重ね合わせを作り出すことができる。これによって量子コンピューターは、膨大な数の候補の中から、特定の種類の問題について従来型コンピューターよりも効果的に回答を導き出すことが可能となる。
- **もつれ (Entanglement)**：量子の世界では、2つの量子ビットが、たとえ何光年離れた場所にあったとしても、強い相関関係のある動きを示すことができる。量子コンピューティングはこのもつれの性質を使って、対になる量子ビット同士が相互依存関係にあることに基づいて起こるさまざまな問題を符号化して処理する。

量子コンピューターでは、量子の「重ね合わせ (Superposition)」と「もつれ (Entanglement)」という特性を利用して、ビジネス価値を高める最適解を膨大な可能性の中から迅速に探し出すことができる。将来、量子コンピューターは、特定の問題については今日の従来型コンピューターをはるかに凌ぐスピードで解を導き出すことができるだろう（図1参照）。そのため、桁外れに複雑なビジネス上の問題にも対応できる可能性も考えられるようになる。もつとも、今考えられる限りにおいては、従来型コンピューターに限界があるからと言って、すべてが量子コンピューターに取って代わられるということでは必ずしもない。まずは、量子コンピューターと従来型コンピューターを連携させたハイブリッド・アーキテクチャーが開発され、困難な問題の一部を量子コンピューターに「アウトソース」する形が期待されている。



従来型コンピューターの能力を理論上 2 倍にするには、トランジスターの数を 2 倍にする必要がある。対して量子コンピューターは、いくつかのアプリケーションのために 1 量子ビットを追加するだけでよい。



将来の量子プロセッサーでは、カフェイン分子のシミュレーションが実行できる。 同じことを従来型コンピューターで実行しようとすれば、地球の大きさの 10% 以上にもなる超巨大コンピューターが必要になるだろう。



近い将来、量子コンピューターは新しい材料の設計に役立つだろう。 これにより、将来的にはさらにパワフルな量子コンピューターを開発できる。

図 1

従来型コンピューターをはるかに超えたスピードを実現する量子コンピューティングの潜在的可能性¹

スケーリング・タイプ	問題解決までの処理時間				
従来型アルゴリズム (指数関数時間)	10 秒	2 分	330 年	3,300 年	宇宙の年齢
量子アルゴリズム (多項式時間)	1 分	2 分	10 分	11 分	24 分以内

量子コンピューティングについては、すでに一部の業界を変革する可能性が取りざたされている。例えば、現在の計算化学の方法論は、従来型コンピューターでは正確に方程式を解くことができないという理由から、「近似」に大きく依拠している。しかし、量子アルゴリズムであれば、現在では正確にモデリングすることが困難な、長期間に及ぶ分子の精緻なシミュレーションなどを実行できる可能性があることから、革新的な新薬の発見や、医薬品開発にかかる年数の大幅な短縮などが期待されている。

また、量子コンピューティングにより、今日最も複雑な問題の 1 つであるロジスティクスの最適化に関しても解決できる可能性があり、これによってコストと二酸化炭素排出量の大幅な削減を実現することも期待されている。例えば、1 兆ドル規模の海運業界において、世界規模で経路を改善することを考えてみよう。量子コンピューティングによって、コンテナの使用率や出荷量をわずかでも改善することができるならば、海運業者は数億ドルものコストを削減することが可能となる。先見の明がある企業は、競合他社に先んじることで量子コンピューティングがもたらすメリットを享受すべく、すでに専門知識の蓄積を開始しており、どのユースケースが自身の業界にとって有益となるかを調査している。

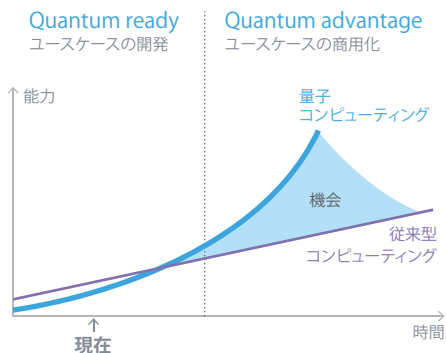
Quantum Advantage の夜明け

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かった一部のビジネス上の問題を解決する、いわゆる「Quantum Advantage」（量子コンピューティングの優位性を活用することが可能な段階）の時代が目前に迫っている。例えば、「Constant-depth quantum circuits（定数深さ量子回路）」は、従来型の回路よりも強力であることがすでに実証されている。² 図2に、特定のビジネス・ユースケースにおける Quantum Advantage の位置づけを示す。ビジネス・ユースケース毎に Quantum Advantage が、いつ発生するかは不確実性も伴うものの、今後5年間の市場規模予測は、約5億米ドル～290億米ドルと非常に幅が広がっている。³

新しいテクノロジーがもたらす多くのビジネス機会への期待から、量子コンピューティングのエコシステムも加速度的に発展している。量子に関する研究成果をビジネスの世界に適した技術へと転換させるべく、研究者とテクノロジー・プロバイダー間のパートナーシップやスタートアップ企業が次々と誕生している。量子コンピューターを開発しているテクノロジー企業は、すでに各社と提携して、想定されるユースケースの特定や量子アルゴリズムの開発、実際の量子コンピューター上でのソリューションのテストを進めている。このように、量子テクノロジーを持った各企業の取り組みが急速に拡大していることから、最初の商用アプリケーションの誕生も早まるものと期待されている。

図2

Quantum Ready から Quantum Advantage へ



量子:エネルギーなどの物理量の
最小量または最小単位。⁴

ビジネスに合った適切な量子コンピューターを選ぶ

さまざまな種類が存在する量子コンピューターが同じような機能で構成されているわけではなく、またこれらが同じように問題を解けるわけでもない。機能が最も限定されたものから多用途なものまで、量子コンピューターは通常 3 つの種類に分類される。すなわち、「量子アニーリング」、「NISQ コンピューティング (Noisy Intermediate-Scale Quantum Computing)」⁵、そして「フォールト・トレラント・ユニバーサル量子コンピューティング」である。

量子アニーリングに関しては、「従来型コンピューティングと比べて意味があるほどの加速を実現しない」というのが、科学コミュニティにおけるコンセンサスである。⁶さらに、量子アニーリングは、フォールト・トレラントなユニバーサル量子コンピューティングへと至る進化の道筋からは外れており、科学界の中では、真の量子コンピューターとは見なされていない。

短期的には、NISQ コンピューターが、ビジネス優位性をもたらす可能性が最も高く、現に今、多くの新しいアルゴリズムが NISQ のために作られている。さらに NISQ コンピューターは、スケールアップを重ねるほど、量子コンピューティングの究極の目標であるフォールト・トレラントなユニバーサル量子コンピューターに近づいていく。そして、従来型マシンよりもはるかに迅速に重要なビジネス課題や科学の問題に対処できることが期待されている。

フューチャー・ショックを避けるために：今すぐ行動しなければならない理由

量子コンピューティングに今すぐ取り組むべき理由とは何であろうか。テクノロジー企業や競合他社は、予想をはるかに超える速さで量子時代を招来している。今日のトレンドを注視している企業は、そうでない企業から業界でのリーダーシップを奪い取る可能性すらある。現在、企業各社は以下3つの理由から、Quantum Readyを進めている。

- 量子コンピューターは、特に金融、ヘルスケア & ライフサイエンス、化学・生物学、材料開発、人工知能（AI）の各分野で、業界のバリュー・チェーンを変革する可能性を期待されている。
- 量子コンピューティングの学習曲線が急勾配なことから、フォロワー（追従者）的アプローチを取ると、その遅れを取り戻すために膨大な追加コストが必要となる。
- また、社内で「量子コンピテンシー・センター（量子コンピューティングに係る中枢機能）」の立ち上げに時間がかかる。

量子コンピューターには、業界のバリュー・チェーンを変革できる可能性がある

量子コンピューターは、従来型コンピューターでは難しかった極めて複雑な問題にも対処できる可能性があるため、さまざまな業界を変革することが期待されている。将来の量子コンピューターによって、金融、ヘルスケア & ライフサイエンス、化学・生物学、材料開発、人工知能（AI）を始めとするさまざまな分野で、製品が革新的進化を遂げる可能性がある。そして、これを採用するビジョナリー企業は、市場シェアと収益性を急拡大させるだろう。このような量子コンピューティングの問題解決能力は、競争優位性の定義を一変させるとともに、ビジネスのオペレーションモデルやバリュー・チェーンを変革させ、業界全体を抜本的に変える可能性さえ秘めている。

「物事に対する見方を変えると、 物事そのものも変化する」

マックス・プランク、量子物理学の父⁷

例えば、通常ロジスティクス・システムの最適化は、「ハブとスポーク」のネットワーク・モデルをベースとしている。大規模なロジスティクス・ネットワークにおいて、多様な要件を満たす個々のポイント間経路を最適な形で設計することは非常に複雑であるため、従来型のスーパー・コンピューターでは、すぐに対応不能な状態に陥ってしまう。このような最適化問題のあらゆる可能性を調べようとする、たとえネットワーク内に拠点が数百しかない場合でも、処理に何十億年もかかる可能性がある。しかし、量子コンピューティングであれば、この可能性の領域をはるかに短い時間で調査できるはずとされている。例えば、飛行機の運行スケジュールを最適化したい場合、量子コンピューティングでは、ある特定の日に数百もの目的地へ飛ぶ数千人の旅客のニーズに合わせて、その場でフライト・スケジュールを作成することができる。これにより、旅客の移動時間の短縮や空路の混雑緩和、飛行機の燃料コスト削減などのメリットがもたらされる。ロジスティクス・ネットワーク設計の最適化のために、量子コンピューティングによるソリューションを開発する企業は、ロジスティクスが成功の鍵を握る業界において、そのリーダー的地位を一気に引き寄せることができるだろう。

素早いフォロワー（追従者）的アプローチでは、追いつくのに膨大なコストがかかる

より直線的あるいは段階的に発展する技術開発と異なり、量子コンピューティングの場合は、フォロワー（追従者）的アプローチは効果が薄いと考えられる。その理由は以下の通りである。

- 量子コンピューティングの学習曲線の勾配が急である。
- 急激な技術革新に「追いつく」のに膨大なコストがかかる。

量子コンピューターが従来型コンピューターよりもはるかに迅速に問題を解決できるユースケースを考えてみよう。例えば、エレクトロニクス業界または輸送業界向けに、現存する物質と比べて極めて軽量で丈夫な専用素材を設計したとする（図2参照）。このような革命的な素材を迅速に開発したメーカーは、短期間のうちに競合他社を出し抜くことができるだろう。この新たな「量子対応」のマーケット・リーダーは、学習曲線を上昇しつつ、この画期

的な素材の微調整を行ったり、他の用途向けにカスタマイズした新素材を開発したりすることで、競合よりもさらに大きな優位性を迅速に確立することが可能となる。

量子コンピューティングはその学習曲線が急勾配であるため、いわゆる迅速な対応をとるフォロワー（追従者）であったとしても、すぐに先行者に追いつくのは極めて困難であることがこの例からわかる。その結果、一部の業界では「勝者総取り」のシナリオをたどる場合もある。たとえ特定のユースケースで追いつくことができたとしても、社内における専門知識の獲得、高性能インフラへのアクセス権の調達、有利なパートナーシップを築くための資金調達、必要な能力を持った企業の買収などのために、膨大な関連コストがかかる可能性が高い。

社内で「量子コンピテンシー・センター」を作るためには時間がかかる

今ではほとんどの企業が量子コンピューティングを認知はしているものの、その多くは、差し迫ったビジネス変革に必要な人材や専門知識を有しておらず、その獲得においても容易ではない状況下にいる。量子コンピューティングを扱える人材自体が限られている上、スキルを持った人材をめぐる熾烈な獲得競争も起こりつつある。

また、適切な人材を獲得できたとしても、量子コンピューティングが既存のビジネスに与える影響についての理解を深めるために、さらに何年も費やす可能性が高い。最近の技術的転換期を例にとると、ビッグデータのワークロードを加速させるための GPU への移行に 10 年近くかかっている。このように、新しいテクノロジーを活用してそのコンピテンシーを発揮させるためには、非常に長い時間がかかることは明白である。

量子技術によってもたらされる、業界を抜本的に変革する可能性、卓越した問題解決能力、そして量子技術に関するスキルを持った人材の獲得が困難である現状を鑑みると、先行者たんとする企業は、今すぐ行動を起こすべきであろう。

「高度に発達したテクノロジーは
魔法と見分けがつかない」

アーサー・C・クラーク、未来派の作家⁸

ビジネスのために Quantum Advantage をつかみ取る

量子コンピューティングの商用化は、ビジネスにとってどのような意味をもつのだろうか。短中期的にみると、量子シミュレーション、量子最適化、および AI・機械学習の3つの分野でビジネス上の革新的価値をもたらす可能性がある（図3参照）。

量子シミュレーション

量子力学は、自然の根本的な成り立ちを説明する学問であり、量子コンピューティングは、自然界に存在するプロセスやシステムをモデリングするのに最適な手法であると言える（9ページのIBM ケース・スタディーを参照）。この卓越した能力は、例えば、長寿命のバッテリーを開発している電気自動車メーカーに、新たな可能性を切り拓く可能性がある。また、バイオテクノロジーのスタートアップ企業は、患者一人ひとりのニーズに合った新薬を迅速に開発できるようになるかもしれない。電力会社においては、送電コストの削減もありうるだろう。さらに、肥料の製造がより効率的にできれば、世界の農作物栽培に大きく貢献できる可能性もある。

図3

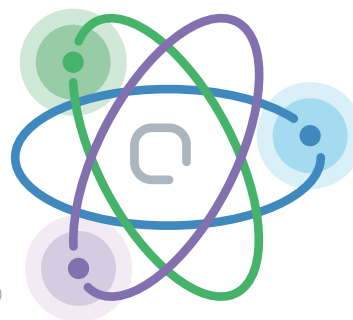
想定される NISQ 量子コンピューティングの用途

機械学習

意思決定サポート
ベンダー・顧客間の
アダプティブな
インタラクション
(要素技術としての)
サンプリング/
トレーニング

シミュレーション

化学 (Chemistry)
ヘルスケア&ライフ
サイエンス (創薬など)
素材・材料



最適化

金融サービス
製造
ロジスティクス/サプライチェーン
航空管制・トラフィック管理
通信ネットワークインフラ
各種作業スケジューリング

量子最適化

最適化問題を解決する秘訣は、多くの選択肢が存在する状況で、最善もしくは「最適」なソリューションを見つけることである。例えば、宅配便の配送スケジュールを作成することを考えてみる。配送を 10 件、連続した時間枠でスケジュールする場合、数学的には 360 万通りの組み合わせが存在する。⁹だが実際には、受取人による時間指定や遅延の可能性、輸送品の保存可能期間などの変数も加わり、それらを考慮すると、一体どのスケジュールが最適なソリューションとなりうるのだろうか。たとえ近似の技術を適用したとしても、従来型コンピュータで判別するには依然、選択肢数が莫大すぎるのである。

そのため、今日の従来型コンピュータは、大幅なショートカットを講じることで、大規模な最適化問題を解決している。しかし、残念ながらそのようなソリューションは、最適な水準に達しない場合も存在しうる。したがって、以下のような企業は、量子最適化によってメリットを享受できる可能性がある。

- 自社のリスク最適化の強化を図る金融サービス会社
- ネットワーク・インフラをアップグレードする通信会社
- 患者の治療を最適化する医療プロバイダー
- 航空管制の改善を図る航空機関
- マーケティングのオファーをカスタマイズする消費財および小売企業
- 従業員の作業スケジュールを作成する企業
- クラス開講のスケジュールリングを行う大学

IBM 研究者が量子コンピューター上で史上最大の分子シミュレーションを実施

『Nature』誌の 2017 年 9 月 14 日号の表紙を飾った IBM の研究者たちは、量子コンピューター上でこれまでで最大の分子である水素化ベリリウム (BeH_2) のシミュレーションを行った。¹⁰ 彼らは、NISQ コンピューターである 7 量子ビットの IBM Q システムのうち、6 量子ビットを使用することで、 BeH_2 の基底状態を測定することに成功した。基底状態とは、最低エネルギー状態を指し、化学反応を把握するための重要な測定値の 1 つである。この BeH_2 のモデルは、従来型コンピューター上でもシミュレーションが可能であり、量子コンピューターから得た結果を検証することで、さらに複雑な化学反応をモデリングするという、短期的な量子システムの実現に向けた次のステップが切り拓かれた。今まで以上にパワフルな量子システムが構築され、付随するツールや技術が開発されることで、化学とライフサイエンスの分野に画期的なアプリケーションがもたらされるものと期待されている。

JP Morgan Chase 社、Quantum Advantage を研究

今日では、数多くの投資商品やポートフォリオの組み合わせ、実現可能な金融シナリオなどが無数にある。したがって、金融アドバイザーにとって、想定されうるすべてのオプションを評価した上で、カスタマイズされた金融ポートフォリオを構築し、それを管理することはほぼ不可能と言ってもいい。

一方、量子コンピューターは、各クライアント固有の評価基準に合わせて、カスタマイズされたリスク・シナリオと評価を実行しつつ、無数の投資オプションの可能性を精査することができる。

JP Morgan Chase 社は、IBM との協力を通じて、取引戦略やポートフォリオ最適化、資産評価、リスク分析などの分野で Quantum Advantage を追求しながら、すでに量子コンピューティングの実験に取り組んでいる。¹¹ 実際、コストはかかるものの、その分見返りも大きい。仮に金融機関が量子コンピューティングを使って競争優位を確立できたら、競合他社に追いつかれる前に、クライアントと株主の両方に対して数十億ドル規模の利益を還元することも可能である。

最適化問題に関して言えば、量子コンピューティングが指数関数的な加速を実現するということを、まだ誰も数学的根拠を持って示していない中、研究者たちは、日々この命題に試行錯誤を重ねながら取り組んでいる。先見の明がある企業は、競合他社に先んじる形で、すでに量子コンピューティングを用いて最適化問題の解決に挑んでいる。この先見によって示される期待を現実の競争優位性に転換するには、まず最適化問題において Quantum Advantage が機能することを実証する必要がある（JP Morgan Chase 社のケース・スタディーを参照）。

量子強化型の AI・機械学習

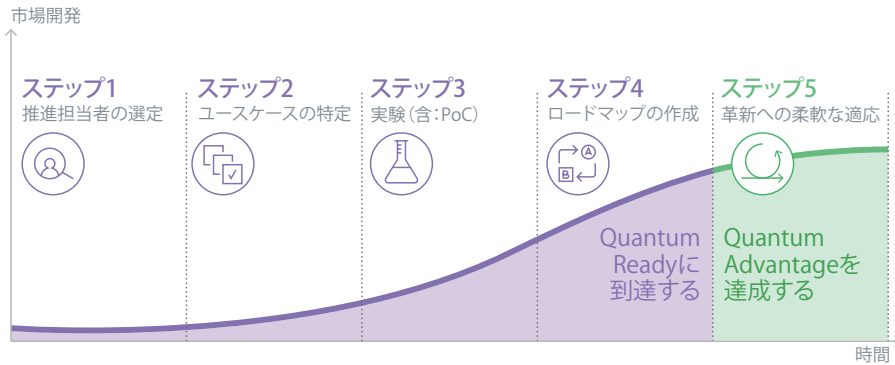
量子コンピューティングは、従来型コンピューターでは処理しきれない膨大な可能性の精査ができる能力で、AI の熟練度を向上させることもできる。実際、AI と量子コンピューティングの共生関係から、両分野が発展する好循環が生まれつつある。例えば、量子アルゴリズムによってデータ・クラスタリングの分野で機械学習を強化できる一方、¹² 機械学習を用いて量子システムへの理解を深めることも可能である。¹³

量子対応のコグニティブ・コンピューターは、最終的にはほぼすべての業界で採用されると考えられており、専門職には先進的で高度な意思決定サポートを、従業員には的を絞った即応的なトレーニングを、また顧客には独自にカスタマイズされたベンダーとの柔軟で良好な関係を提供する。

5つの戦略で量子の未来へ突き進む

NISQ を早期に導入した企業は、経営モデルを劇的に革新し、業界初の製品を開発することによって、競合他社の機先を制することができる。先駆者としての地位を築きたいなら、今こそ、Quantum Ready となる時である（図 4 参照）。

図 4
量子の未来への道のり



「自然は古典力学ではなく量子力学に従う…自然を模倣したいのなら、量子力学の法則に則って行うべきである…」

リチャード・ファインマン、アメリカの物理学者、1981年¹⁴

量子コンピューティングへのロードマップ作成に速やかに着手する

企業が量子コンピューティングを導入するまでのロードマップの作成に当たり、以下を行う必要がある。

- 量子コンピューティングとは何か、また業界にどのような影響を及ぼす可能性があるかを理解する。
- 量子コンピューティングによって競争優位を確立しうるビジネス課題を特定する。
- 自社のビジネス課題に、NISQ コンピューティング・テクノロジーを適用することで引き出せる潜在的価値を評価する。
- 企業戦略の意図に沿った次のステップも考慮して、量子コンピューティングのロードマップを作成する。

IBMQ Consulting は、コンサルタント、量子研究者、業界専門家を招いたインタラクティブなワークショップの開催を通じて、量子コンピューティングが企業の事業戦略と将来の成長にどのように適合しうるかの理解が促進されるよう支援する。¹⁵

1. 量子推進担当者を選定する

企業は、量子コンピューティングによってどのようなメリットが得られるのか、より深く学ぶべきであろう。まずは、以下の手順から始めることが推奨される。

- 自社において卓越したスキルをもつプロフェッショナルの中から数名を、「量子推進担当者」に指名する。
- 量子推進担当者は、量子コンピューティングについての理解を深めるだけでなく、量子が業界に与える影響、競合他社の対応、ビジネスにもたらされるメリットを把握する責務を負う（「量子コンピューティングへのロードマップ作成に速やかに着手する」を参照）。
- 量子推進担当者が経営層に定期的に報告することで、自社内での啓発を促進し、進捗状況を戦略目的に適合させる。

2. 量子コンピューティングのユースケースや関連する価値提案を特定すべく措置を講ずる

量子推進担当者は、まず量子コンピューティングがどのように機能し、ビジネス上の課題や機会にどのように対処できるかを理解し、そのうえで、量子コンピューティングによって競合他社を大きくリードできる具体的な領域を特定する任を負う。

量子システム独自の能力や、そのアドバンテージを加速させる能力といった視点から機会を評価する。量子アプリケーション開発の進捗状況を量子推進担当者に監視してもらうことで、商用化可能なユースケースの特定を早期化する。量子に関する研究を確実にビジネス成果につなげられるよう、サプライチェーン最適化の新たな方法や画期的な製品・サービスの創出など、できるだけ有望な量子コンピューティング・アプリケーションを選択する。

3. 実際の量子システム上で実験を行う

実際の量子コンピューターに触れることで、量子コンピューティングがどのようなものかを体感する（「量子コンピューターを試してみよう」を参照）。量子コンピューティングによって、どのようにビジネス課題を解決できるか、また既存のツールとどのように連携可能か、量子推進担当者に理解してもらう。量子ソリューションが、すべてのビジネス課題に適するとは限らない。推進担当者は、従来型コンピューターでは解決が困難で、かつ最も優先度の高いユースケースに対するソリューションに焦点を当てる必要がある。

4. 量子コンピューティングの導入に向けたロードマップを作成する

現実に行う可能な後続ステップを含む、量子コンピューティングのロードマップを作成する。その際、競争上の大きな障壁や継続的にビジネス優位性を生み出す可能性を、常に念頭に置いて作成する。また、自社の Quantum Ready を加速させるため、新興の量子コミュニティに参加することも検討する。これにより、特定の量子アプリケーション開発を強化できる研究者や進化する業界アプリケーション、テクニカルなインフラなどにもアクセスしやすくなる。

5. 量子コンピューティングの未来について柔軟な発想を体得する

量子コンピューティングは急速に進化している。数あるテクノロジーや開発ツール・キットの中から、業界標準になりつつあるもの、またはその周辺にエコシステムが形成されつつあるものを探り当てる。新たな革新的進化のために、エコシステム・パートナーの変更も含め、量子開発プロセスに対するアプローチの調整が必要になることを想定しておく。また、長期的視点から、自社の量子コンピューティングのニーズの変化に着目する。特にどのビジネス課題が量子コンピューティング・ソリューションから最もメリットを受けるかが明確になるにつれ、起こるニーズの変化に留意する。

量子コンピューターを試してみよう

IBM Q Experience と Qiskit を利用すれば、IBM の量子コンピューターやシミュレーター、教育リソースのほか、量子コンピューティングの研究を行っている共同コミュニティにも自由にアクセスできる。¹⁶ 量子アルゴリズムと実験は、「Qiskit」と呼ばれる Python ベースのオープンソース・プログラミング・フレームワークを使って開発・実施されている。利用可能なリソースとしては、シミュレーションや最適化問題を解決できる Jupyter ノートブック・チュートリアルのほか、¹⁷ 量子コンピューティング用の新たなアプリケーションの発見方法や、量子コンパイラのような新しい機能の開発方法といったトピックを扱う、120 本を超える研究論文などが含まれる。化学や AI、あるいは最適化に関する専門家であったとしても、まだ量子コンピューティングに見識が浅い場合は、量子アルゴリズムの幅広いオープンソース・ライブラリーである「Qiskit Aqua」を活用して、広く世界に実在するアプリケーションを検索して、試すこともできる。今日までに、南極大陸も含め、7 大陸の企業や教育機関に勤める 10 万人以上のユーザーが、IBM Cloud 経由で IBM Q Experience を使って、650 万件以上もの量子実験を実施している。

新興の量子コンピューティング・コミュニティーに参加する

テクノロジー・プロバイダーとビジョナリー企業間のパートナーシップが拡大中である。彼らの狙いは、これまで対処することが困難であった問題を解決すべく、量子コンピューティングのユースケースや関連するアプリケーションを開発することに他ならない。IBM Q Network は、Fortune 500 企業や世界有数の学術機関、スタートアップ企業、国立研究所などから構成されるグローバルなエコシステムであり、IBM の量子コンピューター、研究者、エンジニアおよびコンサルタントともつながっている。参加者は、量子コンピューティングの進化を加速させるためのコラボレーションを通じて、商用アプリケーションの開発を促進している。¹⁸

IBM Q Network に参加する企業や団体は、実在する問題が実際の量子コンピューター上でどのように対応づけられるかについて、実験を行うことができる。今日では、IBM Cloud 経由で 20 量子ビットの IBM Q 量子プロセッサにアクセスすることができる。将来的には、50 量子ビットの量子コンピューターが利用可能になることが予定されている。

Quantum Advantage をつかむ準備はできているか

将来にわたって、従来型コンピューターでは絶対に解決できないビジネス上の課題が存在する。したがって、未来の Quantum Advantage に備えて、今こそ、自社の量子対応に着手すべき時である。

自社の量子コンピューティングに関する意識や知識は、現在、どの程度の水準にあるか。

自社の業界、特にバリュー・チェーンは、量子コンピューティングによって破壊的な影響を受けるか。

自社が競争優位を確立する上で、シミュレーションや最適化、機械学習といった領域に関して、特に重要な課題は何か。

量子コンピューティングのどのユースケースが、自社のビジネスおよび競争上、最大の価値をもたらすか。

競合他社の方が先に量子ソリューションを利用することが判明した場合、どのような対応をとるべきか。

著者紹介

Dario Gil 博士は、IBM Research の最高執行責任者（COO）である。IBM Research は、13 の研究所に 3,000 人以上の研究者を抱えるグローバルな組織で、情報技術のフロンティア拡大を目指している。博士は、AI および量子コンピューティングを担当するバイス・プレジデントでもあり、IBM の AI に関するグローバルな研究と IBM の量子コンピューティング・プログラムの責任者である。

連絡先：[@dariogila](https://twitter.com/dariogila) (Twitter)、[linkedin.com/in/dario-gil-58575713](https://www.linkedin.com/in/dario-gil-58575713) (LinkedIn)、dgil@us.ibm.com

Jesus Mantas は、IBM Global Business Services のマネージング・パートナーであり、グローバル戦略、製品・サービス、コグニティブ資産、M&A を担当し、IBM Institute for Business Value も配下に置いている。35 年以上にわたり、テクノロジーによるクライアント・ビジネスの変革に携わってきた。また、IBM のヒスパニック系多様性の推進役を務め、若い女性に AI 技術を教えるイニシアチブの指揮を執っている。

連絡先：[linkedin.com/in/jmantas](https://www.linkedin.com/in/jmantas) (LinkedIn)、[@jmantas](https://twitter.com/jmantas) (Twitter)、jesus.mantas@us.ibm.com

Robert Sutor 博士は、IBM Research の量子コンピューティング戦略およびエコシステムを担当するバイス・プレジデントである。革新的なリーダーかつテクノロジストであり、量子コンピューティング、AI、ブロックチェーン、アナリティクス、データ科学、モバイル・アプリおよびテクノロジー、クラウド、ソーシャル・メディア、オープンソース、業界研究に関する深い専門知識を有する。

連絡先：[@snarky_android](https://twitter.com/snarky_android) (Twitter)、[linkedin.com/in/bobsutor/](https://www.linkedin.com/in/bobsutor/) (LinkedIn)、sutor@us.ibm.com

Lynn Kesterson-Townes は、IBM Institute for Business Value のグローバル・クラウドおよび量子担当リーダーである。マネージメント・コンサルティング、事業開発、戦略プランニング、マーケティング、M&A の分野で 20 年以上にわたる経験と専門知識を有する。

連絡先：[@LynnKesterson](https://twitter.com/LynnKesterson) (Twitter)、[linkedin.com/in/lynnkesterson](https://www.linkedin.com/in/lynnkesterson) (LinkedIn)、lkt@us.ibm.com

日本語翻訳監修

西林泰如

日本アイ・ビー・エム株式会社 戦略コンサルティング & デザイン
統括 シニア・マネージング・コンサルタント

IBM Q Ambassador

総合電機メーカー、米系戦略コンサルティング・ファームを経て、IBM に参画。専門はビジネス・テクノロジー両輪に関する、経営企画・経営戦略、事業開発・事業戦略、提携・投資 /M&A、海外進出（米国シリコンバレー、シンガポール等での海外駐在経験）、情報通信・インターネット技術（日米 120 件を超える特許の筆頭発明者）。IBM では、Global Digital Strategy Group に所属。IBM がリードする破壊的テクノロジーによる革新をテーマに、経営戦略・事業戦略、デジタル戦略、オペレーション戦略、組織チェンジ・マネージメント、テクノロジー・データ戦略の戦略業務に従事している。工学修士（MEng）、および経営管理修士（MBA）。

連絡先：yasuyuki.nishibayashi@ibm.com

橋本光弘

日本アイ・ビー・エム株式会社 戦略コンサルティング & デザイン
統括 マネージング・コンサルタント

IBM Q Ambassador

日本学術振興会特別研究員（DC1）、国内大手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・機械・エネルギー・金融業界のコンサルティング・プロジェクトに参画。専門領域は全社戦略（中期経営計画、ポートフォリオ戦略、シナリオ・プランニング）、新規事業戦略、M&A（ビジネス・デューデリジェンス、PMI）、オペレーション改革、組織再編。近年は特に IoT・AI・ブロックチェーン等のテクノロジーを活用した新規事業戦略策定やオペレーション改革をテーマにしたプロジェクトを多数手掛けている。博士（工学）。

連絡先：hashimit@jp.ibm.com

Frederik Flöther 博士は、IBM Q Consulting のグローバル・ライフサイエンス・リーダーで、量子物理学の博士号を持つ。特に、量子コンピューティングや AI などの次世代技術を用いることで、クライアントと協力しながら価値を向上させる取り組みを継続している。

連絡先：[linkedin.com/in/frederikfloether](https://www.linkedin.com/in/frederikfloether) (LinkedIn)、frederik.floether@ch.ibm.com

Chris Schnabel は、IBM のグローバル量子コンピューティング・オファリング・マネージャーである。技術面およびエンジニアリングの観点から戦略を策定し実行する豊富な経験に加え、高い分析能力を持つリーダーとして、IBM の量子コンピューティングに関連する製品・サービスを統括している。

連絡先：[@chrischnabel](https://twitter.com/chrischnabel) (Twitter)、[linkedin.com/in/Schnabel](https://www.linkedin.com/in/Schnabel) (LinkedIn)、chris.schnabel@us.ibm.com。

協力者

Anthony Annunziata 博士、Jerry Chow 博士、Jay Gambetta 博士、Joe Raffa

調査方法

公開されている研究論文や記事の総合的なレビューのほか、本レポート用に、IBM Q に関わる IBM の経営層、科学者、研究者、製品・サービスのマネージャーやコンサルタントとのインタビューも実施した。量子に関連するスタートアップ企業、ベンチャー・キャピタル、大学および量子テクノロジー・プラットフォーム・プロバイダーに所属する該当分野の専門家からも話を聞いた。

関連するレポート

Sutor, Robert and Heather Higgins. "Taking the quantum leap: Why now?" IBM Institute for Business Value. February 2018. ibm.biz/whyquantum

邦訳:「量子コンピューティングによる飛躍の時 – なぜ今始めるのか」

<https://www.ibm.com/downloads/cas/LMAPW78R>

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. July 2018. ibm.biz/quantumsecurity

量子に関する最新の研究結果は、ibm.biz/ibvquantum に掲載していく予定です。

詳細について

IBM Institute for Business Value の調査結果の詳細については iibv@us.ibm.com までご連絡ください。IBM の Twitter は [@IBMIBV](https://twitter.com/IBMIBV) からフォローいただけます。発行レポートの一覧または月刊ニュースレターの購読をご希望の場合は、ibm.com/iibv よりお申し込みください。

スマートフォンまたはタブレット向け無料アプリ「IBM IBV」をダウンロードすることにより、IBM Institute for Business Value のレポートをモバイル端末でもご覧いただけます。

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、急速な変化を遂げ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 グローバル・ビジネス・サービスの IBM Institute for Business Value は企業経営者の方々に、各業界の重要課題および業界を超えた課題に関して、事実に基づく戦略的な洞察をご提供しています。

注釈および出典

- 1 多項式関数 ($a=1$ の場合に a^n) と指数関数 ($a=1$ かつ $k=10$ の場合に $a^k n$) に基づく IBM 社内の分析
- 2 Sergey Bravyi, David Gosset, Robert Koenig. “Quantum Advantage with Shallow Circuits.” Cornell University Library. <https://arxiv.org/abs/1704.00690>
- 3 “Quantum Computing Market by Revenue Source, Application (Simulation, Optimization, and Sampling), Industry (Defense, Banking & Finance, Energy & Power, Chemicals, and Healthcare & Pharmaceuticals), and Geography—Global Forecast to 2023.” marketsandmarkets.com. August 2017. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-computing-market-144888301.html?gclid=EAlaQobChMI9qarxla_2glVkJFuGCh022AfdEAAYASAAEgKnxFD_BwE, Vlastelica, Ryan. “Why Goldman sees veggie burgers among the future’s most exciting technologies.” MarketWatch. Dec. 15, 2017. <https://www.marketwatch.com/story/why-goldman-sees-veggie-burgers-among-the-futures-most-exciting-technologies-2017-12-13>
- 4 「quantum」の定義。Cambridge Dictionary. <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/quantum>. Accessed July 9, 2018.
- 5 Preskill, John. “Quantum computing in the NISQ era and beyond.” Cornell University Library. July 31, 2018. <https://arxiv.org/abs/1801.00862v3>
- 6 Vincent, James. “Biggest ever quantum chip announced, but scientists aren’t buying it.” The Verge. Sept. 28, 2016. <https://www.theverge.com/2016/9/28/13057414/quantum-computer-d-wave-2000-qubit-chip>

-
- 7 goodreads. "Max Planck > quotes." https://www.goodreads.com/author/quotes/107032.Max_Planck. Accessed July 9, 2018.
 - 8 "Arthur C. Clarke quotes." BrainyQuotes. https://www.brainyquote.com/quotes/arthur_c_clarke_101182. Accessed July 9, 2018.
 - 9 $10! = 363$ 万
 - 10 IBM press release. "IBM Pioneers New Approach to Simulate Chemistry with Quantum Computing." Sept. 13, 2017. <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53137.wss>
 - 11 IBM press release. "IBM Announces Collaboration with Leading Fortune 500 Companies, Academic Institutions and National Research Labs to Accelerate Quantum Computing." Dec. 14, 2017. 邦訳: 「IBM、量子コンピューティングの開発を加速する IBM Q Network を発表、日本から、JSR、日立金属、本田技術研究所、長瀬産業、慶應義塾大学が参画、ビジネスおよびサイエンス向けの量子コンピューティングの実用的用途を探索」 <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53483.wss>. Kahn, Jeremy. "IBM Taps Samsung, JPMorgan, Daimler in Quantum Computing Push." Bloomberg. Dec. 14, 2017. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-14/ibm-taps-samsung-jpmorgan-daimler-in-quantum-computing-push>
 - 12 Marr, Bernard. "How Quantum Computers Will Revolutionize Artificial Intelligence, Machine Learning and Big Data." Forbes. Sept. 5, 2017. <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-data/#1cb5483e5609>. Biamonte, Jacob, Peter Wittek, Nicola Pancotti, Patrick Rebentrost, Nathan Wiebe, Seth Lloyd. "Quantum machine learning." Nature. Sept. 13, 2017. <https://www.nature.com/articles/nature23474>

-
- 13 Torlai, Giacomo, Guglielmo Mazzola, Juan Carrasquilla, Matthias Troyer, Roger Melko, Giuseppe Carleo. "Neural-network quantum state tomography." *Nature*. Feb. 26, 2018. <https://www.nature.com/articles/s41567-018-0048-5>
 - 14 Feynman, Richard. "On quantum physics and computer simulation." *Los Alamos Science*. Number 27 2002. <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-02-4969-02>
 - 15 "Jump-start quantum computing with IBM Q Consulting." *ibm.com*. <https://www.research.ibm.com/ibm-q/consulting/> Accessed July 9, 2018.
 - 16 "Welcome to the IBM Q experience!" *ibm.com*. <https://quantumexperience.ng.bluemix.net/> Accessed July 9, 2018.
 - 17 Available through the open-access Qiskit GitHub repository at <https://github.com/Qiskit>
 - 18 "IBM Q Network: Bringing quantum out of the lab and into the world." *ibm.com*. <https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/#/>. Accessed July 9, 2018.

© Copyright IBM Corporation 2018

IBM Corporation
New Orchard Road
Armonk, NY 10504

Produced in the United States of America
November 2018

IBM、IBM ロゴ、ibm.com、Watson 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「Coming soon to your business – Quantum computing - Five strategies to prepare for the paradigm-shifting technology」の日本語訳として提供されるものです。

