

最先端の量子コンピューター「IBM Q」

従来のコンピューターの限界を超えた計算能力で新たな時代を切り拓く

ビッグデータ解析や深層学習など多量のデータから知見を引き出す技術は、昨今の人工知能活用の原動力となっています。しかし、有用な知見を導き出すために膨大な可能性の組合せを調べる必要があり、現在最高性能のコンピューターでもその組合せの全てを効率的に調べることは困難です。そのような「組合せ爆発」に対応するため、量子力学の原理をフルに活用するのが量子コンピューターです。

IBMは2017年5月に最先端の量子コンピューター「IBM Q」を公開すると同時に、商用向けの量子コンピューターのプロトタイプを構築すべく新たなロードマップを策定しました。長らく理論の領域にとどまっていた量子コンピューターはいよいよ現実化しつつあり、今まで計算できなかったさまざまな問題に新たな突破口を与え、私たちの未来を大きく変えようとしています。

本稿では、量子コンピューターの原理を紹介し、IBM Qが目指している近未来における応用について述べます。

▶▶ 1. 量子コンピューターとは

量子コンピューターとは量子力学に基づいたコンピューターのことで、古典物理学に基づいた従来のコンピューターが情報をビット列で保持し処理する代わりに、それを量子ビットで行う計算機構のことです。量子力学というと、多くの人は難しいと思うかもしれませんが、実際に量子力学の原理の中には直感的でないものがあり、専門家ですら理解に苦しむ面もあります。しかしそこに、従来のコンピューターの能力を凌駕する新しいコンピューターが、近い将来誕生する可能性があります。量子力学への理解度にかかわらず、量子コンピューターの基本原理とその応用について知ることが重要になっています。

ムーアの法則が限界に達しつつある今、単なるデバイスの微細化だけで計算能力を向上させることは困難であり、量子コンピューターのような新しい計算の仕組みを活用する研究は避けて通ることができません。例えば、新材料と創薬の分野において、従来のコンピューターによる量子化学のシミュレーションでは限界が見えてきました。一方、量子コンピューターは超並列な計算が可能な

ため、同シミュレーションに現れる組合せ爆発の問題の一部を解決できると考えられています。同様の問題を抱えている金融、人工知能、サプライチェーン最適化などへの応用も期待されています。

従来のビット列は1種類の状態しか保持できないため、1回の計算で1通りの可能性しか調べられません。量子コンピューターは、基本単位である量子ビットで複数の状態（以降、量子状態）を重ね合わせて同時に保持できるため、複数通りの可能性を並列に調べることができます。この量子ビットを操作する量子ゲートで構成する量子コンピューターは、量子状態の干渉を適切に施して量子ビットを観測すれば、解きたい問題の解を従来のコンピューターよりも高速に取り出すことができます。ただし、量子デバイスの実装のハードルはともかく、量子状態の干渉を適切に施す方法は自明ではない上、量子ゲートの制約などもあり、量子アルゴリズムを設計するのは容易ではありません。そのため、量子コンピューターは長い間、限られた科学者の研究道具に過ぎませんでした。

2016年にIBMがクラウド通じて一般公開した5量子ビットの量子コンピューターと、2017年5月に発表し

た16量子ビットの量子コンピューターである通称「IBM Q」は、この新しい計算機構が実験室の中だけの存在ではなくなる時代が到来したことの証と言えます[1](図1)。今日では大学や研究機関だけでなく、IT各社は競って研究開発を活発化させて量子コンピューターのビジネス覇権を競い合うようになり、連日ニュースを賑わすようになっていきます。

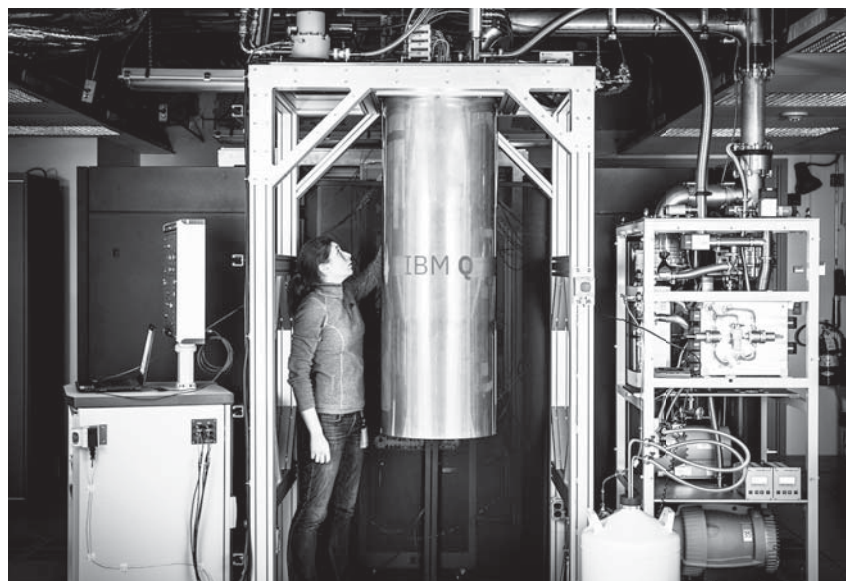
組合せ最適化問題の計算に提案されている、いわゆる量子アニーリング型のコンピューターについても耳にするようになりました。しかし、量子アニーリング型のコンピューターは、IBMをはじめとするIT企業が研究開発のゴールとする万能量子コンピューターと異なり、計算能力が限定的です。特に、実環境のノイズに対する対策がまだ見つかっておらず、従来のコンピューターよりも高速に組合せ最適化問題を解くことができるのかという論争が、理論と実験の両面で続いています。

一方、IBM Qが目指している万能量子コンピューターは、組合せ最適化問題の一部や量子系のシミュレーション、既存のインターネットの暗号の基礎となる素因数分解など、従来のコンピューターにとって難しい問題を高速に計算できることが理論的に証明されており、その実現に向けて長期的な視点で研究が進められています。

▶▶ 2. 量子コンピューター誕生の背景

量子コンピューターが誕生するきっかけの一つは、1960年代にIBMのRolf LandauerとCharles Bennettが始めた計算のエネルギー効率性の追求にさかのぼります。計算過程が常に可逆、つまり、入力から出力が一意に定まり、その逆も成立するような計算モデルは可逆計算と呼ばれています。Landauerはエネルギー効率の良い計算は可逆計算であることを示唆し、Bennettは従来のコンピューターで計算できるあらゆる関数は可逆計算モデルでも計算可能であることを1970年代に証明しました[2]。量子コンピューターは可逆計算モデルの一つであるため、省エネルギーの計算モデルであるほか、その計算能力が従来のコンピューターと少なくとも同じであることが分かり、注目されるきっかけとなりました。

量子コンピューターの計算能力が従来のコンピューターを上回る可能性を最初に示したのは物理学者のRichard Feynmanでした。同氏は1981年MIT(マサチューセッツ工科大学)での講演で、従来のコンピューターは量子系のシミュレーションのために指数的な組合せの可能性を調べなければならない問題に直面することを指摘し、量子コンピューターは量子状態の重ね合わせを利用することで、その問題を効率的に対処できることを示唆しました。



絶対零度に近い環境で動作しているこの量子コンピューターは、独自のAPIでクラウドを経由して操作できる。

図1. IBMが一般公開した量子コンピューターIBM Qの外観

それから約10年後の1994年にPeter Shorが素因数分解の量子アルゴリズム[3]を発見し、計算機科学分野で量子コンピューターへの注目度が一気に高まりました。さらに1995年、Shorらが示した量子誤り訂正符号の存在が、量子コンピューターの実現を近づけました。量子誤り訂正符号によってノイズのある実際の環境でも複雑な量子アルゴリズムを実行する回路を構成できます。その後もデータベース探索の高速化につながるGrover探索[4]など数々の量子アルゴリズムが提案され、近年は人工知能の要素技術である機械学習の量子アルゴリズムも見つかり、従来のコンピューターを凌ぐ量子コンピューターの計算能力が理論的に次々と解明されていきました。

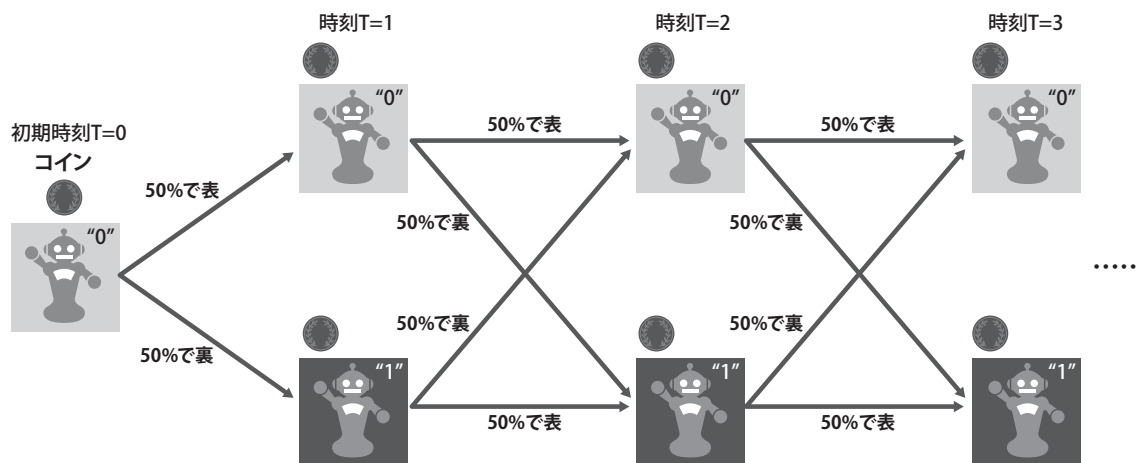
一方、量子コンピューターを実現するデバイスに関する研究も進められています。2000年、当時IBMに在籍していたDavid DiVincenzoは量子コンピューターの要件をまとめました[5]。その要件は、スケール可能な量子ビットのデバイス、量子状態を十分長い時間保つことなどで構成されており、それらを全て満たすデバイスを実装することは困難と見られていました。しかし、近年の超電導素子の技術革新のおかげで小規模の量子コンピューターが実現できるようになり、前述したShorの素因数分解やGrover探索、機械学習の実用的な量子アルゴリズムを実行できるエラー耐性を備えた大規模量子

コンピューターの実現にはまだ時間がかかるものの、今後数年以内に従来の大型計算機を用いても計算できない問題を解く中規模量子コンピューターが実現できる可能性が出てきました。その実現と応用は、今後数年最もホットな話題になりそうです。

▶▶ 3. 量子コンピューターはなぜすごいのか

直近の量子コンピューターの有効な応用の一つは、Feynmanが示唆した物理系のシミュレーションです。特に、量子系のシミュレーションの各ステップでは、考慮すべき系の状態数が爆発的に増えるため、従来のコンピューターでは計算が困難です。一方、量子コンピューターの場合、シミュレーションする系の状態を量子ビットで表現できるため、複数の状態を量子ビットの重ね合わせで効率的に評価することができます。分子や化合物など新材料の発見や創薬においてこのようなシミュレーションが必要なケースが多くあります。

中長期的の応用としては最適化や機械学習があります。Quantum Algorithm Zoo[6]に300以上の量子アルゴリズムがリストアップされており、従来のコンピューターのアルゴリズムよりも、それらのほとんどの量子アルゴリズムの方が高速であることが証明されています。そのような高速化を可能にしたのは、量子コンピューター特有の「量子重ね合わせ」と「量子もつれ」の効果です。



初期時刻は白マスにいたロボットは、次の時刻以降は白マスか黒マスにいる確率はそれぞれ五分五分になるが、実際は各時刻にロボットはどちらかのマスにしか存在しない。

図2. コイン投げの結果に従って移動する探索ロボット

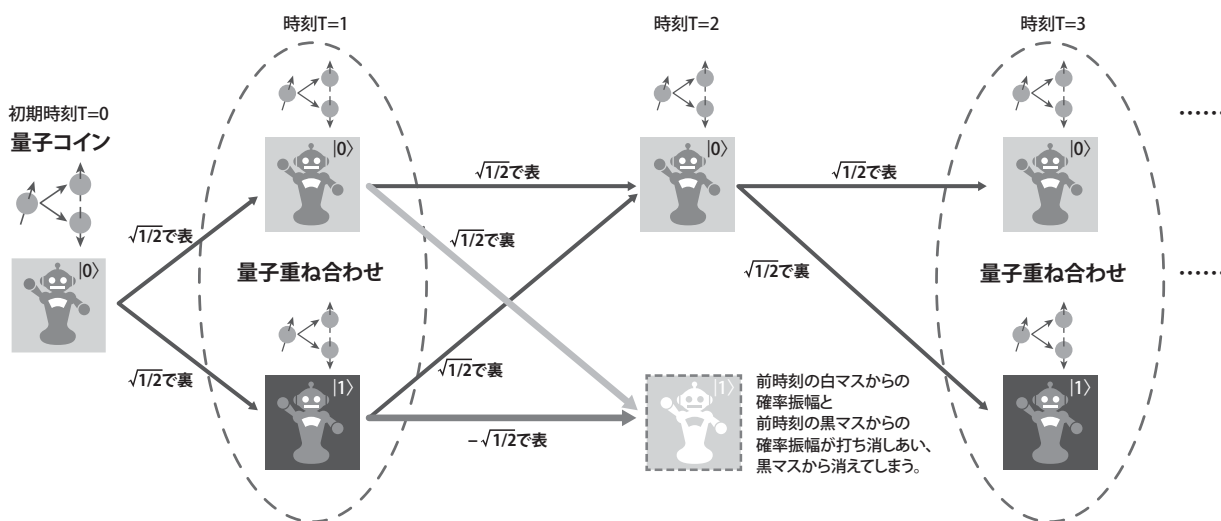
3.1. 超並列計算を可能にする「量子重ね合わせ」

量子コンピューターの原理を理解するためには、その最小の情報単位である1量子ビットと従来の1ビットの違いを理解する必要があります。1ビットは常に「0」か「1」のどちらかにしかありませんが、1量子ビットは同時に「0」と「1」の両方にもなりえます。これがいわゆる量子重ね合わせです。ただし、「0」と「1」が重ね合わさった量子状態の量子ビットを観測することで、「0」か「1」のどちらかに収束します。つまり、私たちがその量子ビットを観測すると、そこから得られるのは従来の1ビットと同様、「0」か「1」のどちらかです。観測結果が100%の確率で「0」か「1」になる1量子ビットの量子状態を量子力学ではそれぞれ $|0\rangle$ と $|1\rangle$ とで表現します。そして、「0」が確率 $|a|^2$ で、「1」が確率 $|b|^2$ で観測できる1量子ビットの量子状態は、 $a|0\rangle+b|1\rangle$ で表現します。aとbは確率振幅と呼ばれる値で、一般的に複素数ですが説明を簡単にするために本稿ではaとbを-1と1の間の実数に限定します。その場合、 $|a|^2$ と $|b|^2$ はそれぞれaとbの絶対値の自乗に相当し、その合計は100%の確率を表します。通常、確率は常に正であるため重ね合わせる時に常に強め合うことしかできませんが、量子の確率振幅は正と負の値を取り得るため、量子状態を重ね合わせした時に強め合う効果以外にも、打ち消し合う効果も得られます。

ここで量子ビットの確率振幅と従来のビットの確率の違いを説明する例として、1量子ビットと1ビットを使ってマスを探るロボットを考えてみます。探索ロボットは白黒のマスで作業すると仮定します。

まず従来のビットを用いる場合を紹介します。ロボットは自分がいるマスを記憶するために、白マスなら「0」、黒マスなら「1」というように1ビットを用いることにします。そして、時刻が1進むごとにロボットが今のマスにとどまって探索を続けるか、隣の黒マスに移動して探索するかをコイン投げの結果で決めるものとします。具体的には、コイン投げの結果が「表」なら今のマスにとどまり、「裏」なら異なる色のマスに移動することとします。コイン投げの確率が五分五分ならば、ロボットの初期時刻の位置によらず、次の時刻にロボットが白マスか黒マスにいる確率もやはり五分五分になります。この場合、ロボットの位置は50%の確率で「0」、50%の確率で「1」と書くことができます(図2)。

次に量子ビットを用いる場合を紹介します。ロボットは自分の位置が白マスか黒マスかを1量子ビットを用いて、白マスなら $|0\rangle$ 、黒マスなら $|1\rangle$ 、と表すことにします。次に、コイン投げを量子操作の一つであるアダマール変換に基づいて行うものとします。アダマール変換の詳細は割愛しますが、ロボットの現時刻の位置を表す状態が $|0\rangle$ なら、次時刻の位置は確率振幅 $1/\sqrt{2}$ で $|0\rangle$ にと



初期時刻は白マスにいたロボットは、次の時刻に白マスと黒マスの両方に同時に存在するが、次時刻に確率振幅の干渉で必ず白マスに戻る。以降はその繰り返しとなる。

図3. 量子コイン投げの結果に従って移動する探索ロボット

どまり、または同じ確率振幅 $1/\sqrt{2}$ で $|1\rangle$ に移動します。一方、ロボットの現時刻の位置が $|1\rangle$ なら、次の時刻の位置は確率振幅 $1/\sqrt{2}$ で $|0\rangle$ に移り、確率振幅 $-1/\sqrt{2}$ で $|1\rangle$ にとどまります。ロボットはどちらの位置にいても次のマスへの位置はそれぞれ確率50% ($1/\sqrt{2}$ と $-1/\sqrt{2}$ の確率振幅の絶対値の自乗がそれぞれ $1/2$) で従来のビットと同じですが、量子ビットの場合は現時刻の位置が $|1\rangle$ の時、次時刻は負の確率振幅にとどまることに留意しながら、量子ビットを用いるロボットの位置の変化を **図3** で確認しましょう。

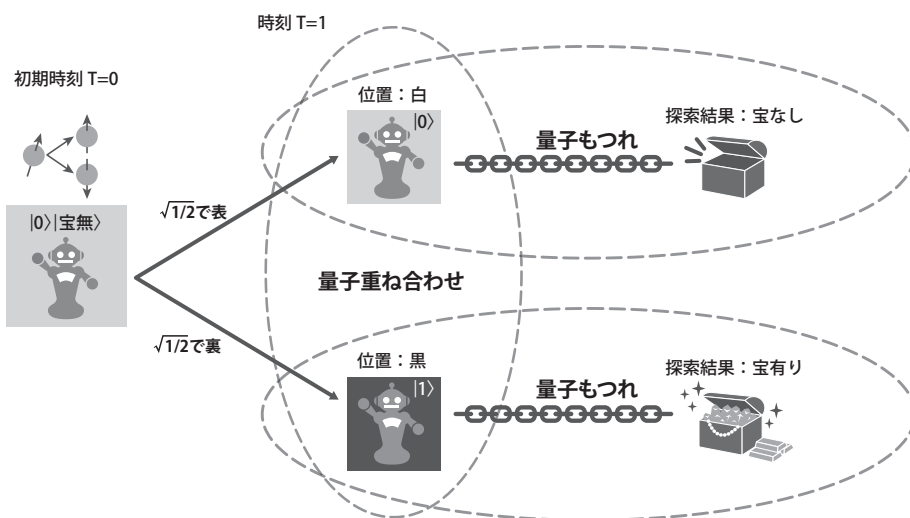
初期時刻にロボットは白マスにいて、1量子ビットの状態は $|0\rangle$ です。次の時刻に量子コイン投げによりロボットの量子ビットは $1/\sqrt{2}|0\rangle + 1/\sqrt{2}|1\rangle$ に変化し、「0」か「1」はそれぞれ五分五分の確率で観測できるので、先ほどの従来のビットの時と同じです。ただし、量子ビットを観測しなければ、量子重ね合わせの効果によりロボットは白マスと黒マスのどちらにも同時に存在することになります。その次の時刻に再び量子コイン投げを行うと今度は従来のビットの場合とは異なる結果になり、ロボットの位置は初期値の白マスに戻ってしまいます。これは、白マスにいる状態 $|0\rangle$ が量子コイン投げによって $1/\sqrt{2}|0\rangle + 1/\sqrt{2}|1\rangle$ に変化して、黒マスにいる状態 $|1\rangle$ が量子コイン投げによって $1/\sqrt{2}|0\rangle - 1/\sqrt{2}|1\rangle$ に変化するため、 $1/\sqrt{2}|0\rangle + 1/\sqrt{2}|1\rangle$ の量子重ね合わせの状態からロボッ

トが量子コイン投げを行うと、 $|0\rangle$ の確率振幅は、直前のマスからの確率振幅が同じ符号のため増幅する一方、 $|1\rangle$ の確率振幅は、直前のマスからの確率振幅が異なる符号のため干渉で打ち消し合います (**図3**)。

従来のビットの場合、ロボットがどのマスにいるかは常に五分五分の確率ですが、量子ビットの場合は、量子重ね合わせと確率振幅の干渉の効果で、ロボットは偶数ステップでは初期の白マスに、奇数ステップでは白黒の両方のマスに五分五分の確率で存在します。このように量子重ね合わせと確率振幅をうまく活用し、ある段階で複数の状態 (例えば、計算の中で考慮しなければならない全可能性に相当する状態) を同時に調べて、適切な操作で次の段階でとある限られた状態 (例えば、計算の結果に相当する状態) に収束できるのが特徴です。

3.2. 従来の統計学で説明できない相関を作り出す「量子もつれ」

量子コンピューターのもう一つ特有な効果である量子もつれ (または、量子エンタングルメント) は、量子重ね合わせから目的の計算結果を引き出すために欠かせません。量子もつれは、複数の量子ビットで表せる量子状態がそれらを構成する個々の量子ビットの量子状態の単純な積で表せない時に存在します。例えば、量子もつれによって2量子ビットの量子状態が、2つの独立した1量子ビットの量子状態では表せない場合です。先ほどの探索ロボッ



初期時刻は白マスにいたロボットは、量子重ね合わせで次の時刻に白マスと黒マスの両方に同時に存在するが、それぞれの位置での宝の有無を記憶すれば、位置と探索結果の記憶の間に量子もつれが生じ、片方が観測で確定したらもう一方もそれに応じて確定する。

図4. 量子コイン投げの結果に従って移動し、探索結果を記憶するロボットの様子

トを使って説明しましょう。

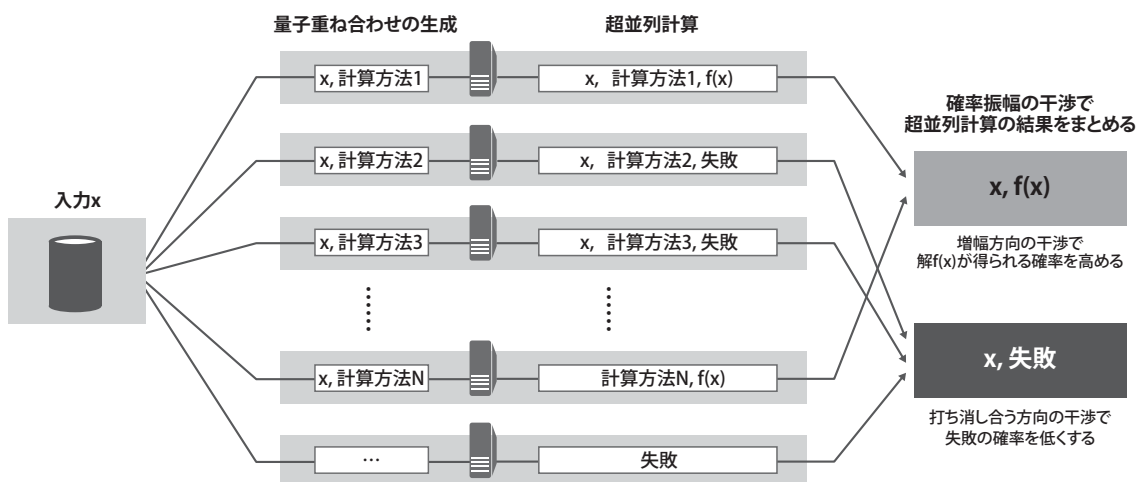
仮に黒マスに宝物があると仮定します。先ほどの例ではロボットは自分がいるマスの位置を1量子ビットで記憶していましたが、ロボットが宝物を発見したかどうかを記憶するために、さらに1量子ビットを使うこととします。なお、ロボットは宝物があるマスを探した場合必ず宝物を発見できるものと仮定します。ロボットの状態はマスの位置と宝物の有無の2量子ビットで表すことができます。初期時刻に白マスにいるロボットの状態を $|0\rangle|0\rangle$ と表します。第一量子ビット(左)が位置を、第二量子ビット(右)が宝物の有無を表します。次の時刻に量子コイン投げでロボットは移動し、ロボットが黒マスに移動した場合は宝物を発見します。その時のロボットの状態は $1/\sqrt{2}|0\rangle|0\rangle + 1/\sqrt{2}|1\rangle|1\rangle$ で、第一と第二の量子ビットの両方とも「0」か「1」が五分五分で観測されますが、もし量子ビットのどちらか一方の値が観測により決まると、もう一方の量子ビットの値も決まってしまう関係にあります。この場合、第一量子ビットと第二量子ビットの間に量子的な絡み合いができ、それを量子もつれと呼びます。

例えば、第二量子ビットのみに着目して観測を行う場合、第一量子ビットの値がその観測結果によって瞬時に変化します。つまり、観測する前にロボットの位置は白マスと黒マスにそれぞれ確率50%ずつありますが、第二

量子ビットを観測したらロボットの位置は、観測の結果が宝有りなら黒マス、宝なしなら白マス、と100%確定します(図4)。量子コンピューターではこの量子もつれの効果が以下のようによく利用されます。第一量子レジスター(複数の量子ビットのまとまり)に計算結果の候補値を、第二量子レジスターにその計算結果が適切かどうかのフラグを割り当てます。この第二量子レジスターのフラグが適切と高い確率で観測できたら、第一レジスターからは対応する計算結果が得られ、量子重ね合わせで得られた多くの解候補から欲しい解をうまく取り出すことができます。

以上の量子重ね合わせと量子もつれの効果を活用する量子アルゴリズムは、一般に次のように実行します(図5)。まず、入力 x から計算したい解を $f(x)$ と仮定します。この $f(x)$ を計算するための方法は複数ありますが、量子アルゴリズムでは全計算方法の組合せに対応する量子重ね合わせを前述したアダマール変換などで生成した後に、全ての計算方法に対して超並列に解となる $f(x)$ を計算します。計算方法が適切であれば $f(x)$ は正しく得られますが、そうではない場合もあります(図5の「失敗」)。計算方法と計算結果、つまり、 $f(x)$ または失敗、との間に前述の量子もつれで相関を作った後に、確率振幅の干渉を利用して最終的に計算したい解 $f(x)$ のみを残します。

実際に従来のアルゴリズムを凌ぐ代表的な量子アルゴ



問題の入力 x から計算を開始し、量子重ね合わせで全計算方法を超並列に調べ、解 $f(x)$ か失敗かの仕分けの結果を量子もつれで計算方法と相関を持たせる。その後、確率振幅の干渉を経て計算の結果を取り出す。高い確率で観測から解 $f(x)$ を得るには、量子重ね合わせと確率振幅の干渉の設計が重要になる。

図5. 入力 x から解 $f(x)$ を計算する量子コンピューターの計算フローの代表例

リズムのほとんどは、図5のような計算フローに従います。例えば、Shorの素因数分解ではアルゴリズムのキーとなる周期性の抽出に量子重ね合わせと量子もつれが有効で指数関数的な高速化に成功しました。またGroverの量子探索アルゴリズムは、量子重ね合わせと確率振幅の性質をうまく利用し、構造のない探索問題でも従来の探索アルゴリズムに比べて多項式関数的な高速化を実現しました。Shorの素因数分解と比べて高速化の効果は高くありませんが、その適用範囲は広く、数々の量子探索アルゴリズムの基礎となっています。

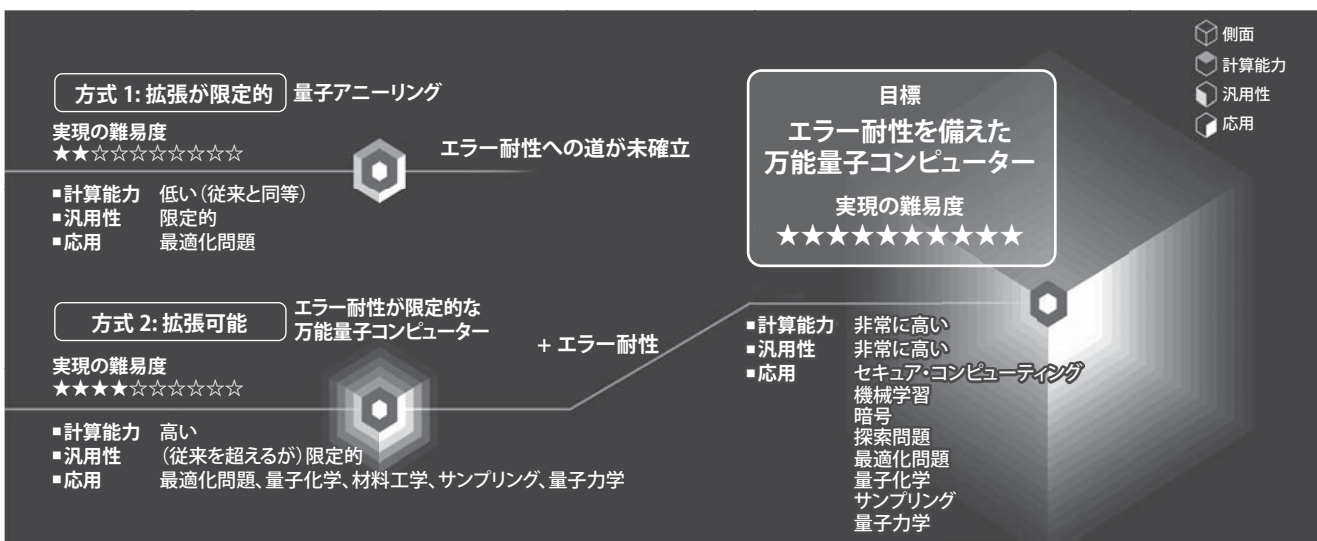
例えば、著者の一人が京都大学のチームと発見した量子アルゴリズムは、Groverの量子探索を使い、N枚のコインの中にk枚だけ重さが異なるコインを量子的な天秤を約 $k^{1/4}$ 回用いて発見します。この量子アルゴリズム[7]も図5のとおりに行われます。その他、特殊なモデルの下で線形方程式を解く量子アルゴリズム[8]も知られており、大規模なレコメンデーション・システム[9]や機械学習など、その原理を応用したさまざまな手法が報告されています。また、最適化においては特定の条件下で半正定値計画 (SDP) を高速化できる量子アルゴリズム [10]も見つかっており、今後の人工知能と最適化を革新させる技術として量子コンピューターへの期待が高まりつつあります。

▶▶ 4. 量子コンピューターの実現

IBMは量子コンピューターの基礎理論だけでなく、早い段階から万能量子コンピューターの実現に向けた研究開発を行ってきました。量子ゲートを組合せて汎用的な計算を行う量子コンピューターは万能量子コンピューターと呼ばれます。

2001年には核磁気共鳴器 (NMR) を量子コンピューターに応用し、Shorのアルゴリズムで小規模な素因数分解が実行できることを世界で初めて示しました[11]。後にNMR型の量子ビットの大規模化が困難であることが知られ、超電導に基づく量子コンピューターの研究開発が始まりました。その成果が2016年6月に発表した5量子ビットの量子コンピューターと、2017年5月に発表し一般公開した16量子ビットの量子コンピューターです。この16量子ビットの量子コンピューターは2017年7月現在では万能量子コンピューターの中で最先端のものですが、さらにそれを上回る量子コンピューターの開発が進められています。

一般公開された量子コンピューターは「IBM Q experience」[12]という名称でクラウドを通じて誰もが簡単に利用できます。現在の超電導に基づく量子コンピューターにはプロセッサを絶対零度近くまで冷やす特殊な冷却装置が必要で、一般のオフィスやデータセン



IBM Qは将来的にエラー耐性を備えた万能量子コンピューターの実現に向けて、現在はエラー耐性が限定的な万能量子コンピューター方式を採用している。

図6. 量子コンピューターの方式とその応用と計算能力

ターに設置することが容易ではありません。そのため、クラウド経由で量子コンピューターにアクセスする方法が今後の量子コンピューターの主要な運用モデルになる可能性が高いと考えられています。大学や研究機関、他のIT企業は、同様の運用モデルで量子コンピューターの研究開発を活発化させ、超電導のほか、イオントラップ、光学デバイス、準粒子などさまざまなデバイス方式で万能量子コンピューターの実現を追求しています。

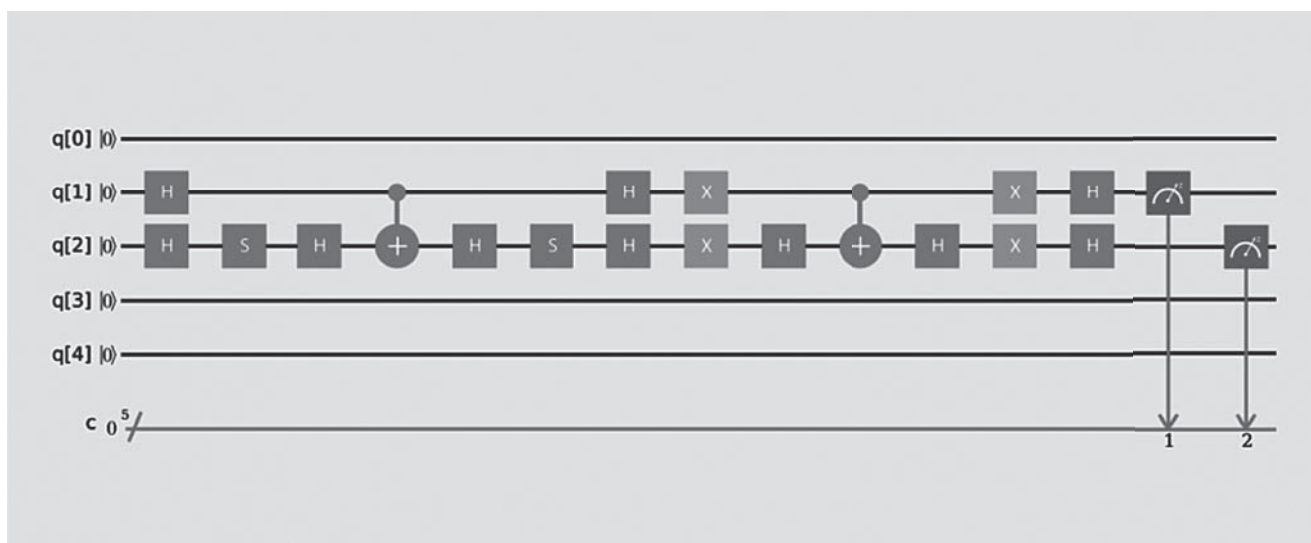
素因数分解などを従来のコンピューターよりも高速に解くには、エラー耐性を備えた万能な量子コンピューターが必要です(図6の右)。長期的にはそれを実現するために高度な量子誤り訂正の研究が行われている一方で、短期的には性能が限定的ながらも量子コンピューターの実装とその応用の研究が行われています。近年注目されているのはエラー耐性が限定的な万能量子コンピューターと量子アニーリングです(図6の左)。前者はIBMが取り組んでいる対象で、小規模ながら自由に量子ゲートを組合せてプログラムを書くことができ、創薬や新材料発見などの応用への期待も高まっています(図6の左下)。50量子ビット程度のこの種の量子コンピューターが実現できれば、現存するスーパーコンピューターでは効率的に計算できないレベルの問題が解けると考えられています。

一方、量子ビットの構造を特定の問題に特化したものは、アナログ量子コンピューターと呼ばれます。量子ビッ

トの構造を再構成することができないため、想定外の問題への応用は難しいものの、実現が比較的容易と見られています。焼きなまし法に特化した量子アニーリングはアナログ量子コンピューターをさらに特殊化したものです(図6の左上)。エラー訂正のメカニズムはなく前述した量子コンピューターより計算能力が限定的と考えられます。量子アニーリング系の量子アルゴリズムが従来のアルゴリズムよりも高速かどうかは、理論や実験の観点から議論が行われており、このタイプの量子コンピューターの性能に対して懐疑的な科学者もいます。

▶▶ 5. クラウドから利用できるIBM Q experience

IBMはクラウドを通じてIBM Q experienceという量子コンピューターのAPIを一般公開しており、ユーザーは「Composer」という独自のユーザー・インターフェース上で量子回路を設計し、シミュレーターと実際のデバイスで量子コンピューターを体験できます。図7はComposer上の2量子ビットのGrover探索の量子回路の例です。ユーザーは量子ゲートを配置して量子回路を設計することで量子アルゴリズムを実装することができます。解きたい問題の入力を表すビット列を回路の左から流し、1量子ビット、ないしは、2量子ビットを操作する量子ゲートを組合せて適用することで量子重ね合わせの状態を操作して、最後に観測して問題の解を表すビット列を得ること



q[0]からq[4]までの5量子ビットのうち、回路でq[1]とq[2]のみが利用される。計算は回路の左端のゲートから実行され、図5のフローのとおり、量子重ね合わせを作り、超並列計算を実施し、確率振幅の干渉を経て最後に右端で正解を取り出す観測が行われる。

図7. Composerによる標準的な量子ゲートから構成される2量子ビットのGrover探索の回路の例(解は`01`の場合)

ができます。従来の論理ゲートと量子ゲートはその効果が異なるものの、ゲートを配置して回路を設計するという方法は視覚的なので量子回路で量子アルゴリズムを試す敷居が低くなると期待されます。IBM Q experienceで用意されている量子ゲートは任意の回路を設計するのに十分な種類がそろっています。また、ユーザーが独自に新たな量子ゲートを定義することも可能で、よりコンパクトな回路を設計することもできます。

ゲート数が多く複雑な回路が必要とする大規模量子アルゴリズムの実装にはPythonベースのソフトウェア開発キット (SDK)も提供されていて、量子コンピューターと従来のコンピューターを組合せたハイブリッドな計算を実行するのに適しています。このSDKを用いる量子化学や組合せ最適化などの代表的な量子アルゴリズムの実装例も公開されています。専門家の科学実験の用途でIBM Q experienceは既に20本以上の論文に利用されており、一般ユーザーからも音楽作成や海戦ゲームなど一風変わった応用が報告されています。2017年8月時点では140カ国以上から5万人以上のユーザーと合計100万回以上の実験の実績があり、日本のユーザー数は国別でトップ5に入っています。また、QuTiPのようなオープンソースの量子系シミュレーション・ソフトで量子アルゴリズムを実装できますが、実際の量子コンピューターを操作できるのはIBM Q experienceが世界初です。

▶▶ 6. IBM Qが切り拓く 量子コンピューターの可能性

現在実現されている量子コンピューターの規模はまだ大きくないものの、量子化学におけるシミュレーション、とりわけ、分子構造や化学反応の分析等に大いに役立つと考えられています。例えば、材料の研究に従来のコンピューターと量子コンピューターのハイブリッドな手法が有用であることが報告され[13]、材料合成や創薬や金融などの応用に同様な手法が応用されることが期待されています。

今後研究が進みエラー耐性を備えた大規模な量子コンピューターが実現されたとしても、従来のコンピューターの機能の全てが置き換えられることはないでしょう。人工知能の分野で深層学習の高速化にGPUやFPGAなどの専用のプロセッサが利用されているように、量子コンピューターも従来のコンピューターが苦手としている計算の一部を担っていくことになるでしょう。

IBMでは高い精度で物質の性質を調べる目的で量子化学のシミュレーションに小規模な量子回路を活用する研究が進められており[14]、分子構造の分析において成果が出始めています[15]。図8は従来のコンピューターと小規模量子コンピューターのハイブリッド・アプローチのフレームワークの例です。

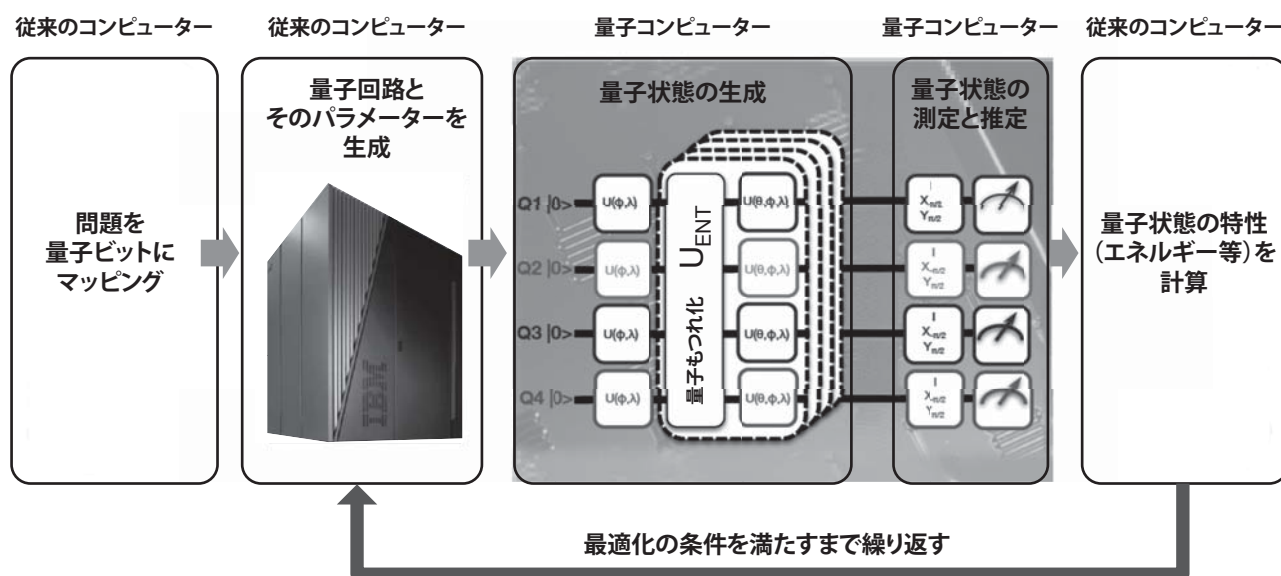


図8. 新材料や創薬などに利用される従来コンピューターと量子コンピューターのハイブリッド法の仕組み

7. 量子コンピューター時代の到来に向けて

量子コンピューター向けのアルゴリズムの開発を行うためには、単に量子コンピューターそのものの開発が進むだけでは不十分です。周辺技術として、量子コンピューターのシミュレーターや専用の開発環境、例えば、高水準プログラミング言語や線形代数などの用途に特化したライブラリーの開発も欠かすことができません。現状はこれらが全てはそろっていないため、量子コンピューターのプログラミングはまだ容易ではありません。

また量子力学の原理が私たちの直感に合わないことが多いため、量子コンピューターを理解する壁が高いという側面もあります。しかし、IBM Q experienceを通じて実際に量子コンピューターを体験することで、量子コンピューターへの理解とその応用が浸透していくことを期待しています。事実、MITをはじめ欧米の大学では、既にIBM Q experienceを授業に取り入れ始めており、日本においてもdeveloperWorksを通じて大学等での利用が進められています[16]。今後量子コンピューターの開発環境が整備されていくとともに教育が行われることにより、量子コンピューターを使いこなせる人材がますます増えていき、量子アルゴリズムの開発とその応用も増えていくでしょう。

現在はまだ量子コンピューターの黎明期であるため、量子コンピューターに備わる量子ビット数も小規模で、実行できるプログラムの内容も限定的です。しかし、過去のコンピューターの歴史を振り返ると、量子コンピューターが爆発的に進化して社会のさまざまな分野で活用されるような将来が、すぐそこにあると容易に想像できます。IBMはそれに向けて、IBM Research Frontiers Institute (RFI) [17]等の枠組みを通じて、パートナー企業と専門家との協業のもと実問題に適した量子アルゴリズムの研究開発を推進していきます。

[参考文献]

- [1] "IBM Builds Its Most Powerful Universal Quantum Computing Processors", Press Release, 2017/05/17, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/52403.wss>
- [2] C.H.Bennett: "Logical Reversibility of Computation", IBM J.Research and Develop.17, pp.525-532 (1973).

- [3] P. Shor: "Polynomial-time Algorithms for Prime Factorizations and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", SIAM J.Computing, 26, pp.1484-1509 (1997).
- [4] L.K.Grover: "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search", ACM symposium on Theory of computing (STOC), pp.212-219 (1996).
- [5] D.P.DiVincenzo: "The Physical Implementation of Quantum Computation", Fortschr.Phys., 48, pp.771-783 (2000).
- [6] S.Jordan: "Quantum Algorithm Zoo", <http://math.nist.gov/quantum/zoo/>
- [7] K.Iwama, H.Nishimura, R.Raymond, and J.Teruyama: "Quantum Counterfeit Coin Problems", International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC), p.73-84 (2010).
- [8] A.W.Harrow, A.Hassidim, and S.Lloyd: "Quantum Algorithm for Solving Linear Systems of Equations", Physical Review Letters 15(103):150502 (2009).
- [9] I.Kerenidis and A.Prakash: "Quantum Recommendation Systems", arXiv:1603.08675 (2016).
- [10] F.G.S.L.Brandao and K.Svore: "Quantum Speed-ups for Semidefinite Programming", arXiv:1609.05537 (2016).
- [11] Vandersypen, et al.: "Experimental Realization of Shor's Quantum Factoring Algorithm using Nuclear Magnetic Resonance", Nature 414, 6866, pp. 883 - 887 (2001).
- [12] "IBM Quantum Experience", <https://www.research.ibm.com/ibm-q/learn/>
- [13] Bauer et al.: "Hybrid quantum-classical approach to correlated materials", Phys.Rev.X 6, American Physical Society (2016).
- [14] K.Temme.S, Bravyi.J.M, Gambetta: "Error Mitigation for Short Depth Quantum Circuits", arXiv:1612.02058 (2016).
- [15] Kandala et al.: "Hardware-Efficient Quantum Optimizer for Small Molecules and Quantum Magnets", arXiv:1704. 05018 (2017).
- [16] 沼田新史: "IBM Quantum Computingで計算してみよう", <https://www.ibm.com/developerworks/jp/cloud/library/cl-quantum-computing/index.html>
- [17] IBM Research Frontiers Institute (RFI), <http://www.research.ibm.com/frontiers/>



日本アイ・ビー・エム株式会社
東京基礎研究所
量子アルゴリズム&ソフトウェア
リサーチ・スタッフ・メンバー

ルディー・レイモンド
Rudy Raymond

京大大学院情報学研究所の博士後期課程修了。博士(情報学)。博士論文は「量子質問計算量および量子ネットワーク符号に関する研究」。量子学習理論、および、量子計算量と量子通信量に関する論文と講演が多数。IBMで最適化、データ解析・機械学習を活用するプロジェクトに参画し、人工知能技術の応用に貢献。2015年日本オペレーションズ・リサーチ学会待ち行列研究部会論文賞を共同受賞。最近は動的ボルツマンマシンの研究にも従事。



日本アイ・ビー・エム株式会社
東京基礎研究所
量子アルゴリズム&ソフトウェア
リサーチ・スタッフ・メンバー

今道 貴司
Takashi Imamichi

京大大学院情報学研究所数理工学専攻の博士後期課程修了。博士(情報学)。2010年に日本IBM東京基礎研究所に入所して、現在は組合せ最適化および機械学習の研究に従事。