

発展途上の量子コンピュータへの オープンなアプローチが、 イノベーションを促進する

東京大学先端科学技術
研究センター教授

中村泰信氏に聞く

昨年10月、Googleが小さな量子コンピュータを使って世界最速のスパコンを凌ぐ速さで計算をしたというニュースが世界を驚かせた。量子コンピュータというものはどういうもので、今後のビジネスや我々の生活にどのような影響を与えるのだろうか。

1999年に世界で初めて量子コンピュータの基本要素となる電子回路(量子ビット回路)の作製に成功した中村教授に、量子コンピュータの現在地と展望のほか、今後我々はどうのように接していけばよいか、などについてうかがった。

量子コンピュータとはどういうものか

村上 最近よく量子コンピュータという言葉を見聞きしますが、具体的にどういうものなのか、なかなかイメージを持ってません。量子コンピュータとこれまでのコンピュータとの違いを簡単に説明ください。

中村 従来のデジタルの世界では、情報は「0」または「1」という「ビット」の値で表されています。一方で、自然界を司る根本的な物理法則である量子力学のもとでは、ある環境下では「0」と「1」が共存するような「重ね合わせの状態」も存在することが明らかになっていきます。それを実現する回路が量子ビット回路です。その状態をうまくコントロールして重ね合わせ状態を利用した一種の並列処理を行わせると、期待する計算結果を非常に効率的に導き出せることが理論的に証明されています。この理論に基づいて実現される新しいタイプのコンピュータが量子コンピュータです。

「重ね合わせの状態」は、量子コンピュータの最も基本的な特徴であると同時に、日常生活における我々の感覚とはかけ離れていて、最も



Interviewer
京都総合経済研究所
執行役員東京経済調査部長
村上 憲司

量子コンピュータの特徴

| | 従来のコンピュータ | 量子コンピュータ |
|--------|------------|--|
| 基本要素 | 古典ビット | 量子ビット |
| 情報の持ち方 | [0] or [1] | [0] and [1] ◀重ね合わせ状態 ↓ 測定すると… [0] or [1] |

従来の半導体素子
は、「0」「1」の情報
を切り替えるときに
電流をオン・オフ
するのですが、その
ときには100万個
といったオーダーで
電子が移動します。
そのかわりに電子を
1個ずつ制御して情
報を表すことができ
れば、もつと高密度
に集積化可能な低消
費電力の回路ができ
るのではないかと考
え研究してしまし
た。そのなかで、低

理解しにくいところ
です。直感に反するこ
とを理解しろと言われ
ても難しいのは当然
です。ただし量子力学
は非常に興味深い理
論で、この点に関して
曖昧なところはあり
ません。研究者も含め
て、そういうものだ
と信じるしかないの
です。そこさえ認め
てしまえば、割合素
直に先に進むことが
できます。

村上 先生は、量子
コンピュータの基本
要素である電子回路
(量子ビット回路)の
作製に、世界で初め
て成功するという偉業
を達成されました。
その経緯をお話くだ
さい。

中村 私は、1992
年にNECに入社し、
量子コンピュータとは
直接関係のない、単
一電子トランジスタ
の研究を始めていま
した。

温下で金属配線の抵抗
がゼロになる超伝導の
状態においては、電子
1個1個が移動するの
ではなく、電子のペア
が1つ1つ移動するこ
とに関心を持ちました。
1997年に、これを利
用して量子力学におけ
る重ね合わせ状態を電
子回路の上で実現でき
たという論文を書いた
のです。当時は、物理
的な観点からの興味に
ドライブされた研究で
したので、実はこの論
文には「量子ビット」と
いう言葉は使っていま
せんでした。その後、
次のステップとして、
1999年に超伝導回路
の上で量子ビットの重
ね合わせ状態を自在に
制御したという論文を
書きました。1994年
に素因数分解の問題が
量子コンピュータで効
率的に解けるといふ論
文が発表され、イン
ターネットで使われて
いる暗号がすべて解読
されてしまうかもしれ
ないとセンセーショナル
な話題となって注目
されていたなか、実際
のコンピュータに搭載
できるかたちの電気回
路上の量子ビットが実
現したことで、量子コ
ンピュータの実現が一
歩近づいたと話題に
なりました。

量子コンピュータの開発はどこまで進んでいるのか

村上 グーグルが、53
個の量子ビットで世
界最速のスパコン(当
時)よりも高速で計算
をしたというニュース
は、世界を驚かせまし
た。量子コンピュータ
はいつごろ実用化され
るのでしょうか。また
、スパコンは今後不要
になってくるのでは
ないか。

中村 彼らが性能比較
を行ったのは、スパ
コンが非常に苦手とし
、かつ量子コンピュ
ータが最

も得意とするタイプ
の特殊な計算問題に
関してでした。それ
を差し引いてもなお
、量子コンピュータの
開発における重要な
マイルストーンであ
ると言えると思いま
す。しかし、残念な
ら現時点での量子コ
ンピュータでは、ス
パコンほど汎用的な
使い方はできません
。さまざまな社会課
題をスパコンよりも
効率良く解くという
レベルに到達するに
は、少なくとも10
〜20年はかかる
と言われています。

開発にあたっては、
雑音などにより非常
に乱されやすい量子
重ね合わせ状態をい
かに守るかということが
課題になります。そ
れにより計算の途中
で発生するエラーを
いかに減らし、また
いかにうまく修正し
ながら処理を進める
ことができるか、とい
う点が重要です。さ
らには、いろいろな
問題を処理させるた
めに、量子ビットの
重ね合わせの状態と
してデータを入力す
る必要がある場合も
あります。一度入力
されてしまえば非常
に効率的に処理でき
るのですが、現時点
ではこの入力操作が
非常に遅いことが大
きな障害となっています。
この点が解消され
れば、気象予報や金
融デリバティブの予
測といった広範なア
ルゴリズム(計算方
法)をたくさん開発
できると思われま
す。しかし今のところ
これらのボトルネック
解決に向けたハード
ルは高く、何かしら
のブレークスルーが
必要です。こうした
課題をクリアしよう
と努力がなされると
並行して、小規模な
量子コンピュータを
使って社会に役立つ
計算ができないか
という、理論的な検
討も始まっています。

実は、小規模な量子
コンピュータとしては
、すでにIBMが誰
でもアクセスできる
ようにク

ラウド上に16ビットのものを公開しています。さらに契約パートナーには53ビットのマシンも開放しています。まだできることはかなり限定されていますが、量子コンピュータに直接触れられるということは、関心を持つユーザーの裾野を広げるという意味で大きな意義を持つと思います。また、IBMは来年東大に量子コンピュータを設置すると発表しています。さらに日本だけではなくドイツの研究機関にも配置し、研究者や企業に利用してもらうという活動を展開しています。やはり多くの人が実機に触れながら研究することは重要なので、計算の中心に自由にアクセスできるような量子コンピュータを早く開発しようと我々も日々努力しているところです。

スパコンとの関係についてですが、多くの課題に対応できる量子コンピュータが完成してもスパコンは必要です。理論的には、量子コンピュータは、従来型コンピュータを包含する位置付けになります。一方で、たとえば通常の経理の計算のようなまで量子コンピュータに担わせることが効率的かと言えば、そうではありません。量子コンピュータは、あらゆる問題をスパコンよりも効率的に処理できるかという点でもないので、原理的には、量子コンピュータが不得意な問題でもスパコンと同程度の効率にはなるはずですが、現状では同じ効率ならばスパコンを使った方が実際的ということになります。

したがって、量子コンピュータが得意とする問題は量子コンピュータが担い、スパコンが得意とする問題はスパコンが担うというように、

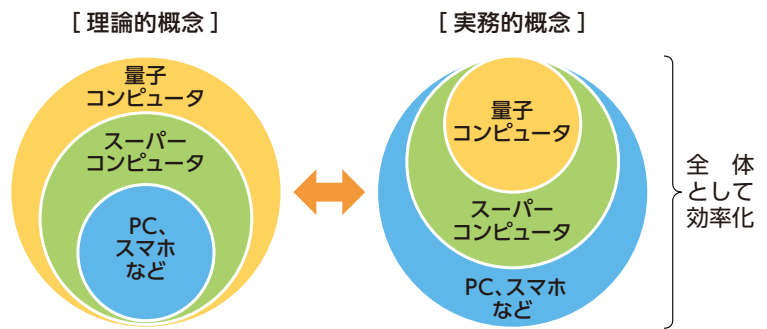
それぞれ得意な部分を受け持つて全体として最も効率的な処理をするかたちにしていくのだと思います。最近世界一となった日本のスパコン「富岳」のように、スパコンはスパコンでどんどん発展させることが必要で、量子コンピュータと共存していくのだと思います。アクセラレータという言葉がありますが、スパコンが苦手とするところをカバーするユニットとして量子コンピュータを利用するという分業スタイルがメインになっていくのだと思います。同様にパソコンやスマートフォンも原理的には量子コンピュータで作ることが可能ですが、今のところは現実的ではないと考えられています。

量子コンピュータの種類と期待される役割

村上 量子コンピュータが得意とする課題とはどういふものがありますか。たとえば、新型コロナウイルスなどの感染症に対する治療薬やワクチン開発にも役立つのでしょうか。

中村 もともと量子力学という自然の原理に則って動作しますので、量子力学に支配されている自然現象を説明したりシミュレーションした

量子コンピュータの位置づけ



高性能コンピュータの種類と特徴

| 量子コンピュータ(ゲート方式) | 量子アニーリングマシン |
|---------------------------------------|-------------|
| 汎用 (創薬、材料シミュレーションなど) 特定の計算が特に得意 | 最適化問題が得意 |
| スーパーコンピュータ | |
| 汎 用 | |

りするのは量子コンピュータを使った方が効率的であると期待されます。たとえば、化学反応のシミュレーション、薬品や素材の研究・開発などは、非常に期待されている分野です。

新型コロナウイルスなどの感染症も、分子の世界での反応と考えればその対象となりえます。ウイルスのDNAは巨大な分子ですので、なかなか計算が難しいのですが、最も核心的な部分で、量子力学的にどう振る舞うかということにシミュレーションできるようなことが期待されています。この作業においても、核となる部分は量子コンピュータで、それ以外はスパコ



中村 泰信 (なかむら やすのぶ)

1968年大阪府生まれ。1990年東京大学工学部卒業。1992年東京大学大学院工学研究科超伝導工学専攻修士課程修了、同年日本電気株式会社基礎研究所研究員。2001～2002年デルフト工科大学(蘭)客員研究員。2005年日本電気株式会社基礎・環境研究所首席研究員。2012年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻教授。2012年東京大学先端科学技術研究センター教授、2014年理化学研究所創発物性科学研究センターチームリーダー(2020年よりグループディレクター)兼務。1999年仁科記念賞、2004年アジレント欧州物理学賞、2014年江崎玲於奈賞、2019年応用物理学会業績賞、2020年米国物理学会フェローほか受賞。

視しがちですが、実際のユーザーは証明がなくても現実に計算が速ければ気にしないということ。多くの研究者やユーザー企業が、いろいろな問題に実際に適用してみても、従来のコンピュータアルゴリズムよりも速く解を得たという具体例をあげてきてい

ます。その意味で、D-Wave社が量子アニーリングマシンを実現し、誰でも触れられるようにした功績は大きいと思います。グーグルも最初はD-Wave社のマシンを購入して、「アニーリング方式」から取り組みを始めたのですが、それによって世間や投資家の目がますます量子技術に向けられてきた中で、2015年くらいから「ゲート方式」の量子コンピュータ開発に本格的に取り組み始めたのです。その意味では量子アニーリングマシンの研究が「ゲート方式」に基づいた量子コンピュータ研究の盛り上がり起爆剤となったというように感じます。

中村 従来の暗号によく使われている一つの方式は、スパコンでも解くことが困難な、大きい整数の素因数分解という問題に立脚しています。難しい問題を解くにはスパコンをもってしても非現実的な時間がかかるという事実によって安全性を担保しているのです。ところがその計算を得意とする量子コンピュータの出現によって暗号が解読されてしまう、ということでは、騒がれたわけです。一方、「量子暗号」というのは、計算の困難性に頼ることなく、量子力学の特別な性質を利用することにより盗聴できなくするという、物理的な原理で守られた「物理暗号」といわれるものです。1980年代に発明されて、ようやく実用化に近づいています。またいくつか技術的に改善すべき点も残っています。他方、従来型の暗号についても量子コンピュー

ンで計算するというように、うまく分業すると効率も精度も上がることが期待されます。**村上** 完成するまでにはもう少しかかりそうですが、その活躍が非常に期待されます。一方で、すでに量子コンピュータが実用化されているというような情報も見聞きます。**中村** 先ほどから申し上げているような幅広い課題を処理することを目指す、「ゲート方式」と呼ばれる方法に基づいた、いわゆる量子コンピュータに加え、量子アニーリングマシンと呼ばれる「アニーリング方式」に基づいたものがあります。後者ではすでに数千量子ビットを集積化した装置が実現しています。

いものを探し出すという最適化問題に有効だということ。さまざまな試みが行われています。「ゲート方式」の超伝導量子コンピュータの研究は、1999年に量子ビットが実現してから、研究現場では着々と性能向上が進展していましたが、集積度や大規模化の面で伸び悩んでいました。そういう時期に、カナダのスタートアップ企業の D-Wave 社が先陣を切って、超伝導量子ビットを集積化した「アニーリング方式」のマシンを作製し、クラウドサービスや実機の販売を始めるなど世間の注目を集めました。「アニーリング方式」は、たとえば都市で交通渋滞の発生を避けるため個別の車ごとの最適ルートを探し出すといった、複雑な最適化問題を得意とするものです。ただし、スパコンと比較して本当に優れているのか、より大規模な問題を扱えるようにスケールアップできるのか、という理論的な保証はまだありません。

一方で、我々が教訓として学んだのは、研究者は理論的な証明を重視しがちですが、実際のユーザーは証明がなくても現実に計算が速ければ気にしないということ。多くの研究者やユーザー企業が、いろいろな問題に実際に適用してみても、従来のコンピュータアルゴリズムよりも速く解を得たという具体例をあげてきてい



量子暗号は量子重ね合わせ状態という特別な状態にある信号を伝送するため、現時点では伝送ルートや距離などの制約が大きく、量子暗号の最初のユーザーとなるのは、専用光ファイバーを使うことができる政府、国防機関、金融機関といったところででしょう。今後、衛星通信も含めた技術の進展と幅広いインフラの普及が期待されます。

量子コンピュータと人間との関わり合い

タでも解くことのできない「耐量子暗号」を作ろうという動きもあります。

暗号の世界では、すでに従来の方式に見切りをつけて、新しい方式に移行する準備を進めているようです。なぜ急いでいるかといえば、今は従来の暗号で秘密が担保されていると、10年後にも量子コンピュータが実現すると読み取られてしまう可能性があり、しかも10年後でも読み取られたくない現在の情報もたくさんあるからです。しかし、暗号は通信システムの根幹にあって、共通インフラとして大きなものから、急に全面的に変更するということはできません。全体の更新に、やはり10〜20年くらいはかかる可能性があります。それなので、今から量子コンピュータが実現することを前提に、暗号システムを置き換える準備を進めているわけです。

村上 量子コンピュータが発達すると、AIもさらに発達することになるのでしょうか。その場合、人間との関わりはどのように変化するのでしょうか。

中村 コンピュータの性能が向上すればするほどAIの性能も向上します。量子AIというプロジェクトもすでに立ち上がっていますが、量子コンピュータをうまく使う、AIのための効率の良いアルゴリズムが開発されれば、AIの適用範囲が広がることになると考えられます。量子技術にかかわらず、昨今のAI研究の進展を見ていると、技術的には将来、ほとんど人間に近いアンドロイドを作ることでも可能だという気がします。私たちの生活に関わる領域をどの程度高度なAIに任せていくかというのは、きわめて倫理的、社会的な問題だと思います。そういったものを作るべきかどうか、という人間

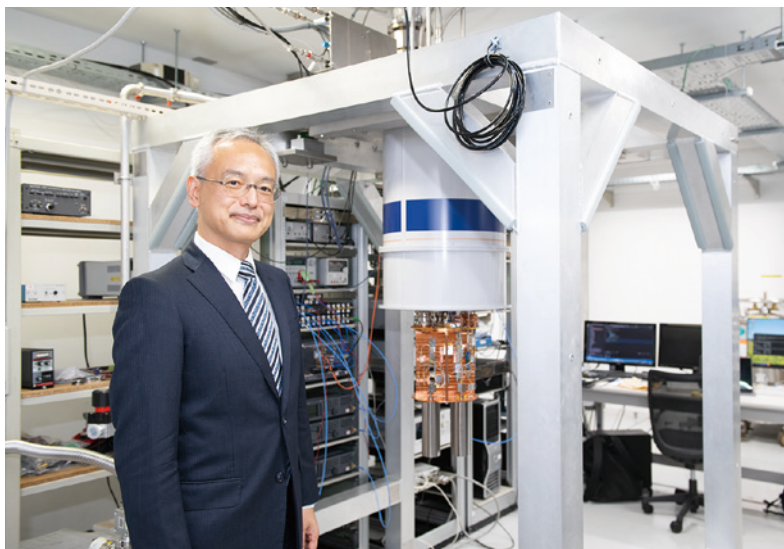
の判断が重要です。また、技術が発展すると、徐々に人間の生活が豊かになるべきなのですが、実際には忙しくなったり格差が生じたりということが起こるのは、社会の仕組みのどこがおかしいためでしょう。AI技術をいい方向に活用して、素晴らしい技術によって我々の生活がより幸福になるように仕向けていけば良いと思います。

世界の開発競争と日本の状況

村上 量子コンピュータの実現のための日本の取り組みは、世界と比べるとどうでしょうか。

中村 ここ数年、文科省をはじめ政府がかなり後押ししてくれています。それでも、米国や中国といった競争相手からはスタートが何年か遅れています。特に、両国では競うように巨額の予算を投入していますし、企業も最近大きな投資をして伸びてきています。欧州や日本はそうした動きに遅れないようにと動いているところでは、オーストラリア、カナダ、オーストラリア、シンガポールといった国々も限られた予算のなか集中的に投資しています。欧米や中国では人材層が厚く、人材育成の面でも圧倒的に優位です。日本ではまだまだ人材不足の感があり、国内外でより活発な人材交流が必要です。予算がついても人が育つにはそれなりの時間がかかります。

量子技術を発展させていくためには、それを理解して使いこなせる人材を質・量ともに育成していく必要があります。一部の分野の研究者に限られることなく裾野を広げていくことが大



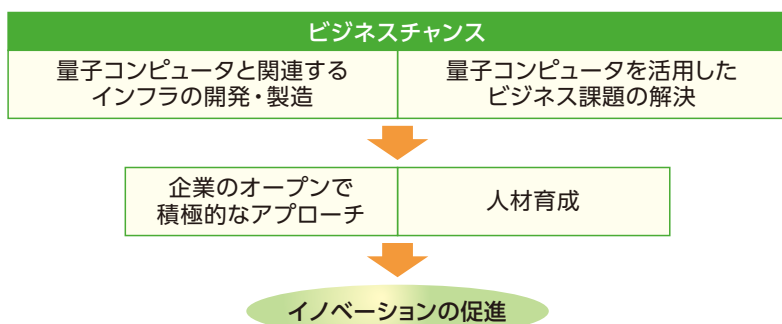
切です。多くの国で、より多くの人に量子の考え方あるいは感覚を身につけてもらおうという取り組みが始まっています。

企業としてのアプローチの方法

村上 量子コンピュータの将来性は非常に豊かだということは分かりますが、企業はどのようにアプローチしていけば良いのでしょうか。

中村 2つの側面があると思います。1つは、量子コンピュータと関連インフラの製造にかかると、ものづくりの分野です。もう1つは、量子

量子コンピュータ・ビジネスへの取り組み



コンピュータをビジネスに活用するという分野です。前者ですと、たとえば現在我々が使っているマイクロ波の同軸ケーブルやコネクタは、日本の中小企業の製品です。どのような製品を使っているかなど海外の研究者と情報交換する機会も多く、それらの製品の利用は世界中に広がっています。日本には、優れた独自の技術を持つている企業がたくさんあると思います。そうした技術が世界の量子技術のエコシステムに組み込まれるようになれば、日本にとっても良いことですし、世界に貢献することになります。我々も展示会に参加したり、インターネットで

探索したりしながら協力してくれる会社を探しています。量子コンピュータを活用するという面では、国のプロジェクトも立ち上がり、研究者や一部の上場企業だけではなく、スタートアップ企業も取り組みを始めていますので、関連の共同研究プロジェクトの集まりに参加するとか、量子コンピュータ

を実際に使ってみるとか、積極的にアプローチすると良いと思います。そういう意味でも、先ほども申し上げましたが、誰もが自由に使える量子コンピュータを早く立ち上げることが重要であると考え、目下努力しているところです。

さらには量子コンピュータの特性をよく理解し、スパコンと量子コンピュータをどう活かすかで活用すると全体で最適なパフォーマンスになるか、などといった研究・コンサル業務を専門とするスタートアップ企業も出てきています。優秀な人がこうしたスタートアップ企業にも多く就職していますので、量子コンピュータを活用したビジネスチャンスは広がっていくと思います。

村上 ただ企業から見ると、いきなり明日から量子コンピュータの検討を始めるというのはやはり敷居が高いのではないのでしょうか。

中村 そこはオープンイノベーションで進めるべきだと思います。企業が内部で一から着手するという方法は現実的ではありません。他の研究機関や大学や企業の人たちと色々な議論をしながら進めると良いと思います。特に現状においては、利害関係が衝突することを怖れてブロックするよりも、みんながオープンな姿勢で臨んだ方が、将来のためになるように思います。そういう環境を作るのも、我々の役目だと考えています。

村上 本日は、量子コンピュータとはどういうもので、その現状と課題、さらには今後企業がどのようにアプローチしていけば良いのかなど、非常に有益なお話をいただきました。ありがとうございました。