

# 量子コンピューティング技術の産業活用に向けて

株式会社 野村総合研究所 プラットフォームサービス開発統括部  
シニアテクニカルエンジニア 渡辺 和泉

NRI インド  
プリンシパル 石垣 悟



## 1 はじめに

今日、量子技術戦略は国家レベルの重要な産業政策であり、日本国においても量子技術イノベーション戦略や量子未来社会ビジョンが内閣府・統合イノベーション戦略推進会議にて決定されたことを踏まえ、関連省庁が研究開発事業を推進している。量子技術とは、原子や電子などの量子力学的な現象を利用する技術であり、量子コンピューター、量子計測・センシングなどの実現を通して、創薬・医療、材料、金融などの多様な分野での革新的な応用が期待されている。特に量子コンピューターについては、デジタルトランスフォーメーション（DX）に活用されるAI等の革新的情報技術の一端を担う可能性がある。2011年にカナダのD-Wave Systems社が世界初の商用量子コンピューターを構築、2019年にGoogle社が量子超越性に関わる取り組みを発表するなど、先進各国の量子コンピューターの産業活用に向けた研究開発競争が熱を帯びている。日本国でも量子コンピューターの産業活用が期待されているが、現時点では古典コンピューター<sup>※1</sup>に対する優位性は限定的な段階である。

本稿においては、量子コンピューターを活用したアプリケーションである量子アプリケーションや、量子コンピューターの特性を生かした専用アルゴリズムにより構成される技術である量子コンピューティング技術がどんな可能性を秘めており、現時点でどこまで使えるものとなっているのか、またわが

国にとって量子コンピューティング技術に取り組むべき意義や、技術的、産業的課題はなにかを明らかにしたい。

第2章では量子コンピューターの基本原理や性能に関する解説を行う。第3章では量子コンピューティング技術開発に取り組む意義について説明を行う。第4章では量子コンピューティング技術の実用化に向けた課題をハードウェア面、ソフトウェア面の両面から説明する。第5章では、量子コンピューティング技術の産業活用に向けてNRIが取り組んでいる実証研究の取り組みについて紹介する。第6章では量子コンピューティング技術の産業競争力強化に向けた提言を行う。

## 2 量子コンピューターの概要

本章では、量子コンピューターとはどのようなコンピューターなのかについて簡単に説明を試みたい。文章にすると「量子力学の現象を情報処理技術に適用することで、従来型の古典コンピューターでは容易に解くことのできない複雑な計算を解くこと

※1 現在、主に商用利用されているコンピューター。CPUやメモリ等のデバイスにより構成され、電子的な情報処理により計算処理を行うコンピューターであり、富岳等のHPC（ハイ・パフォーマンス・コンピューティング）を含む

図表 1 古典コンピューターと量子コンピューターの違い

	演算単位(ビット)	計算イメージ	特徴
古典コンピューター	<p><b>ビット</b></p> <p>0 もしくは 1</p> <p>0と1のどちらかの値</p>	<p>全ての入力に対して毎回計算し、答えを評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 規則的に動作することで一意の解が確実に求まる</li> <li>● 入力数が増すと計算コストが飛躍的に増大</li> </ul>
量子コンピューター	<p><b>量子ビット(Qubit)</b></p> <p>0 1</p> <p>0と1の重ね合わせ状態を取れる (=0でもあり1でもある)</p>	<p>重ね合わせ状態を利用して一括計算</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 並列計算を実行できる</li> <li>● 量子状態が壊れやすく動作が安定しない</li> <li>● 確率的に出力されるため複数回計算が必要</li> </ul>

出所) NRI 作成

ができるコンピューター」となる。「量子力学の現象を情報処理技術に適用すること」は専門的知識がないと理解しづらいが、ここでは、量子コンピューターは古典コンピューターとは全く異なる計算原理に基づくコンピューターであることを簡単に説明する。

なぜ量子コンピューターが古典コンピューターより優れた計算能力を持つと期待されているかというと、古典コンピューターにおける情報処理の単位はビットであり、各ビットは「0」か「1」の組み合わせにより構成される。仮に N 個のビットを処理するならば、2 の N 乗個のビットの組み合わせが可能となるため、ビット数が多くなるほど、組み合わせの数も多くなり、計算時間は指数関数的に長くなる。一方、電子や陽子など原子よりも小さい量子の振る舞いを支配する量子力学の原理に基づく量子コンピューターでは、処理単位は量子ビットであり、量子が持つ「重ね合わせ」という性質により、各量子ビットは「0」と「1」の状態を同時に持つことができる。仮に N 個の量子ビットを有する量子コンピューターを想定した場合、2 の N 乗個の組み合わ

せを同時に並列処理することができるため、特定の問題に対しては、大幅に計算時間を短縮できる可能性がある（図表 1）。

## 1) 二つの計算方式である「量子ゲート方式」と「量子アニーリング方式」

量子コンピューターは問題を解く原理の違いにより、大きく「量子ゲート方式」と「量子アニーリング方式」に分けられる。また、量子コンピューターではないが、古典コンピューター上でアニーリングの計算原理を疑似的に再現した「疑似的な量子アニーリング」という手法がある（図表 2）。以下、それぞれの概要と、量子コンピューターが実現されることによって産業にどのような利益が期待されるかということを描く。

### (1) 量子ゲート方式

世界の研究開発の主流となっているのが「量子ゲート方式」である。量子ゲート方式とは、古典コンピューターで行う論理ゲートを用いたビット間の演算に対し、量子ゲートを用いて量子ビット間の演

算を並列で行うように改良したものである。量子ビットに量子ゲート回路を適用し、量子ゲート通過の状態を計測する。

「量子ゲート方式」により実現するアプリケーションとして代表的な産業活用といえば、例えば「化学」分野が挙げられる。一般的な化学メーカーの研究開発業務においては、新素材の開発のために行う物理実験の前に、どのような物質をどのように合成することで狙った機能を持つ素材を製造できるか、原子や分子の構造や性質を電子状態から厳密に解析する量子化学計算という手法がある。その目的は途方もない回数の物理実験を繰り返すことを避けるため、おおよその“当たり”をつけておくことである。しかし、量子化学計算の計算量は対象とする素材の分子サイズに応じて級数的に大きくなり、古典コンピュータでは現実的な時間内に解けない場合があるが、量子コンピュータであれば計算できるようになる可能性がある。

## (2) 量子アニーリング方式

1998年に東京工業大学の門脇正史氏と西森秀稔氏が発表した最適化問題に関する論文に着想を得たカナダのD-Wave Systems社が世界で初めて開発した量子コンピュータが「量子アニーリング方式」である。量子アニーリング方式とは、ビット（量子、古典）でイジングモデル（格子模型）を構成求解対象の最適な状態を探す仕組みであり、組合せ最適化問題を解くことに特化している。組合せ最適化問題とは一般的に「さまざまな制約の下で多くの選択肢の中から、ある指標（価値）を最も良くする変数の値（組合せ）を求めること」と説明され、具体的に想定されるアプリケーションとしては、複数の組み合わせやパターンが存在する輸送ルートや、工場の生産計画の最適化などが期待されている。具体的な

アプリケーションとして例えば、物流における「トラックの配送計画最適化」を挙げて説明したい。配送計画の策定においては、配送先の数やトラックの台数によってコースのパターン数が天文学的な数字に膨らむことがあるため、望ましい配送計画を得ることは非常に難易度が高い。さらに、ドライバーのシフト、積み荷、到着時間指定などの条件も加味しながら解く必要があるため、きわめて複雑な組合せ最適化問題を解くことになる。現状は、多くの物流現場において、属人的判断で計画が策定されている状況ではあるが、コンピュータ計算によりそれを実現する場合は、配送計画策定に特化した組合せ最適化問題を解くアプリケーションが必要となる。配送計画策定において考慮すべきパラメーターの数が増えるほど計算量は級数的に増加し、今後、物流業界において共同配送の取り組みが本格化した場合には、さらなる計算量の増大が想定される。このような場合、将来的にアニーリング方式の量子コンピュータの特性を利用し、高速で解くことができる可能性がある。

## (3) 疑似的な量子アニーリング法

前述の通り、疑似的な量子アニーリングは量子コンピュータではなく、古典コンピュータ上でアニーリングの計算原理を疑似的に再現した技術である。上述の量子アニーリング方式の量子コンピュータと同様に組合せ最適化問題を解くことを得意とする技術であり、量子コンピュータと比較するとスペックも高く、古典コンピュータを活用するため、量子コンピュータのようなハードウェア実装における課題も少ない。量子アニーリング方式、量子ゲート方式については海外勢の研究が先行しているのに対し、疑似的な量子アニーリング法は日系メーカーが優位に立っている。ただし、一定以上の

図表 2 各方式の特徴と主なプレイヤー

方式	量子コンピューター		古典コンピューター
	量子ゲート方式	量子アニーリング方式	疑似的な量子アニーリング法
方式の説明	量子ビットに量子ゲート回路を適用 量子ゲート通過の状態を計測		ビット（量子、古典）でイジングモデル（格子模型）を構成 求解対象の最適な状態を探す
主なプレイヤー	<ul style="list-style-type: none"> <li>最適化計算</li> <li>素因数分解</li> <li>化学シミュレーション</li> <li>検索アルゴリズム など</li> </ul> さまざまな分野での応用が期待 ただし、現状は基礎研究のフェーズ		組合せ最適化計算に特化 まだ発展途上ではあるものの、ゲート方式との比較でみると ビジネスへの応用検討が少し進んでいる
	超伝導	<ul style="list-style-type: none"> <li>IBM</li> <li>Google</li> <li>Rigetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>D-Wave Systems</li> <li>本源量子</li> <li>理化学研究所</li> </ul>
イオントラップ	<ul style="list-style-type: none"> <li>IonQ</li> <li>Honeywell（Quantinuum）</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>富士通</li> <li>日立</li> <li>東芝</li> <li>Fixstars</li> <li>NEC</li> </ul>
フォトニック	<ul style="list-style-type: none"> <li>Xanadu</li> <li>PsiQ</li> </ul>		
シリコン	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intel</li> <li>SQC</li> </ul>		
冷却原子	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasqal</li> <li>Atom Computing</li> <li>QuEra Computing</li> </ul>	ほか	

出所) NRI 作成

問題サイズを解こうとすると解の精度が落ちるため、本物の量子コンピューターにおける今後の技術開発を踏まえると、量子アニーリング方式の量子コンピューターの方が高性能になるとの見方をする専門家もいる。問題サイズとは、処理する対象のデータの大きさと計算処理アルゴリズムから成る、計算処理のオペレーション数により規定される。

## 2) 量子コンピューターの性能を定める基本スペック

古典コンピューターにおいては、その性能を示す代表的なスペックとして、クロック数、コア数、メモリ容量といった指標が存在する。対して、量子コンピューターにおける代表的なスペックである「量子ビット数」「エラー率」について簡単に説明する。

### (1) 量子ビット数

「量子ビット数」は、量子コンピューターの性能

を表す上で最も代表的な指標であり、量子ビット数が高ければより大きなデータを扱うことができる。裏を返すと、量子ビット数が小さい状況においては、小さなデータしか扱うことができないということになる。

### (2) エラー率

コンピューターは原則として正確な計算結果を提示することが期待されるが、機械である以上、一定のエラーが生じることは不可避である。私たちが、古典コンピューターを活用する場面で普段意識はしていないが、実際は演算処理の過程で発生する一定のエラーを訂正する仕組みが別途コンピューター内にあるため、正しい計算結果を得ることができている。重要なのは、発生するエラーの程度が許容可能な範囲に収まっているかどうかということである。量子コンピューターにおいては、量子という非常に

不安定なものをビットとして利用していることから、エラーを抑える難易度が高いため、エラー率に注目する必要がある。

### 3) 量子コンピューターの物理的な実現手法

量子コンピューターの量子ビットの実装には、いくつかの「物理的な実現手法」が用いられている。代表的な手法である超伝導方式では、超伝導回路を用いて量子ビットを作成する。マイクロ波制御装置から照射されるマイクロ波を QPU (Quantum Processing Unit) に入力し、計算処理を実施、測定装置を用いて量子状態を測定、その結果をメモリに記録する仕組みである。QPU は、量子ビットの状態を安定させ高速処理を行うために超伝導状態にする必要がある。絶対零度に近い温度、通常は数十ミリケルビンの範囲で維持することから、複雑な冷却装置が必要となる。

このほかに量子ビットとして活用する量子の種類に応じて、イオントラップ、光量子ビット、トポロジカル、中性原子等さまざまな方法があり（中には冷却装置が不要なものもある）、各社、試行錯誤が積み重ねられているものの、現時点においてどの手法が最も優れているかという結論がでていない。

### 4) 量子コンピューターの開発状況

量子アニーリング方式では、D-Wave Systems 社が 2020 年の 9 月に 5,640 量子ビット、量子ゲート方式においては IBM が 2022 年 11 月に 433 量子ビットを達成したと発表した。量子アニーリング方式と量子ゲート方式は想定するアプリケーションが異なるため、量子ビット数で両者を比較することには意味がない。古典コンピューターに対して優位性を発揮する量子ビット数に明確な閾（いき）値を

示すことは難しいが、例えば、ゲート方式の量子コンピューターの本格的な産業活用に向けては 100 万量子ビットレベルのスペックが必要になるというのが多くの専門家の見方である。言い方を換えると、現状の量子コンピューターは実験的な商用利用は始まっているものの、現実的にはまだ産業的な価値を持って使えるレベルになく、まだ古典コンピューターの方が優秀であるということである。量子コンピューターが古典コンピューターに対して優位性を発揮する時期の見通しについては、今後の研究開発動向によるが、専門家によると、量子アニーリング方式が産業活用されるまでに少なくともあと 10 年、量子ゲート方式は 20 年という見方がある。

## 3 量子コンピューティング技術の研究開発に取り組む意義

量子コンピューティング技術は、その期待される強力な計算能力を背景としてさまざまな産業の課題解決や競争力確保に寄与することに加え、われわれの社会システムをどのように最適化すべきかを考える基盤ともなり得る。

### 1) さまざまな産業課題の解決に寄与することへの期待

量子コンピューティング技術は、第 2 章で述べた通り、さまざまな産業分野への活用により、その課題解決に寄与することが期待されている。産業課題の解決に向けた高度なアプリケーション開発に当たり、古典コンピューターの計算能力がボトルネックとなっていた場合に、量子コンピューターの実現によってそれが解消されることが期待される。また、例えば配送計画の最適化が量子コンピューターにて実現できるようになると、物流の最適化だけにとど

まらず、さまざまな経済活動に伴う消費エネルギー量の抑制にもつながるため、カーボンニュートラルの実現に向けた重要なテーマでもある。

## 2) 将来における量子アプリケーション領域での優位性と産業競争力の確保

将来的に量子コンピューターが古典コンピューターに対して優位性を発揮するところまで研究開発が進んだ未来を見据え、その時点で量子アプリケーション領域において日本国が国際競争力を発揮するためにも現時点から量子アプリケーションの開発に取り組む必要がある。

また、日本が競争力を持つ産業分野における優位性維持の観点からも量子アプリケーションの開発に取り組む必要がある。例えば、わが国の化学分野は世界市場においても競争力のある産業分野だが、量子アプリケーションを開発するシステムベンダーである量子アプリベンダーが開発した量子アプリケーションにより高度な量子化学計算が可能となってしまうと化学メーカーにおける競争力が量子アプリベンダーに奪われてしまうリスクがあるため、化学メーカーとしての競争力確保のためにも量子アプリケーションの開発に取り組む必要がある。

## 4 量子コンピューティング技術の実用化に向けた現状の課題

量子コンピューティング技術によって産業上の具体的な問題を解くことが期待されているものの、現時点ではさまざまな観点で課題がある。例えば、産業で扱う問題に対して量子コンピューターのスペックが足りていないことや、具体的にどのような産業上の問題であれば大きなアドバンテージを得られるかを見極めることが難しいことが挙げられる。本

章では、このような現状の課題について量子コンピューティング技術のハードウェア面とソフトウェア面に分けて解像度を高めつつ、産業活用を意識したユーザーサイドの視点から整理する。

### 1) ハードウェア面の課題

#### (1) 具体的な問題の規模に対して量子ビット数が少ない

2023年3月現在、量子アニーリング方式の量子コンピューターとしては D-Wave Systems 社の最新機が 5,640 量子ビットを搭載している。そのコンピューターでは、複数の地点があったとき「1人で1回ずつ全ての地点を訪問する最短経路」を求める問題（この問題は組合せ最適化問題として代表的な例である巡回セールスマン問題と呼ばれる）に対して 15 地点弱の最短経路が求められる程度のスペックである。一方、古典コンピューターでは 8 万 5,900 地点の最短経路を求めることができるプログラムやアルゴリズムも存在<sup>※2</sup>している。企業の実際のビジネス上の利用では数百地点の規模の問題を解くケースも多数存在していることから、現時点では、明確に量子コンピューターの有用性を示すことが難しい。このことは巡回セールスマン問題以外の問題であっても同様の状況にある。

また、量子ゲート方式の量子コンピューターでは 433 量子ビットを搭載した IBM 社の IBM Q の最新機などが登場している。いずれのコンピューター

※2 カナダ・ウオーターラー大学の William Cook 氏によって公開されている、巡回セールスマン問題を古典コンピューターで解くプログラム (<https://www.math.uwaterloo.ca/tsp/concorde.html>) などによって、大規模な巡回セールスマン問題を解くことができる

も規模は小さいながら活用方法は盛んに議論がなされているが、従来の手法で解くことが難しいとされている具体的な産業課題を解決するには数百万量子ビットが必要であるとの見方もある中で、今のところ産業活用ができるスペックには至っていない。

## (2) 誤り訂正可能なエラー率に達するための難易度が高い

現存するいずれの量子コンピューターにおいても、量子ビットは外部環境に影響を受けやすく、その操作でエラーが発生しやすい。さらに、計算終了後、その結果を測定する過程でもエラーは発生する。正しい計算を行うため、量子誤り訂正技術が必要となるが、正しい量子誤り訂正のためにエラー率を低く抑えることが難しい。

論点はそれだけではない。計算過程でエラーが発生するのは古典コンピューターも同様であり、このエラーを効率よく訂正する手段は確立されている。一方、量子コンピューターでは量子誤り訂正を実装するに当たり、大量の量子ビットを備えた量子コンピューターが必要となる。仮に論理的に1,000量子ビット必要な規模の計算をする場合、量子誤り訂正を考慮すると物理的には100万量子ビットが必要だと考えられている。

このように、産業で実際に発生する問題を正確に解くことができるようになるためには「たくさんの量子ビット」と「低いエラー率」の2点を備えたハードウェアが必要となることをユーザーサイドは意識した上で活用検討をすべきだろう。

## 2) ソフトウェア面の課題

### (1) 量子コンピューターを使うべき問題であることを判断するために高い専門性が必要

量子コンピューターはいかなる問題でも速く解く

ことができるわけではないことはここでも述べた通りであり、得意とする問題形式は限られている。例えば、量子アニーリングで解けるとされている最適化問題であっても、わざわざ量子アニーリングに適合する問題形式にせずとも既存の手法によって十分な解を得ることができるケースも多く存在する。

これを踏まえ、解決すべき産業課題の構造を理解しながら、量子コンピューターと古典コンピューターのどちらを使うべきか判断する必要がある。その判断に当たっては「業務要件への深い理解」と「数理的な知見」の双方が求められる。なお、これら専門知識は1人の専門家が全てを有している必要はなく、外部パートナーとの連携を含め、幅広く補完していく必要がある。

業務要件を踏まえたさまざまな条件を勘案して数理的な問題に落とし込んだ結果、量子コンピューターに適合する問題となることもあるので、そのような条件を見いだすためには業務に対する深い理解が求められる。それと同時に、この深い理解を持って発見した問題を量子コンピューターにインプットできるようなアルゴリズムや数式に落とし込むことのできる知見を持ち合わせることで、どのようなアプローチで解決に導くかを明らかにすることができる。

### (2) 今のところキラーアプリとなるアプリケーションが実現できていない

大規模かつエラー率の低い高性能な量子コンピューターであれば、検索処理や素因数分解などで古典コンピューターをしのぎうる速度や精度を期待できる計算も実行できる可能性がある。このような計算はビジネス上大きなインパクトを与えることが

性が実現できたとうたう例<sup>※3※4</sup>もあるが、これらは実用性を度外視した基礎研究としての実験であり産業課題の解決へ直ちに適用できる計算を想定したものではない。このように、量子コンピューターでしか実現できないビジネス視点のユースケースは、現時点では世の中に公表されていない。量子コンピューティング技術の研究者、提供者、利用者、いずれからいわず「キラーアプリ」の出現が望まれているものの、現状は、これを実現できると明確に断言できる段階にはまだ至っていない。

この現状に対して、量子コンピューティング技術の応用先がどのようなところにありそうなのか、さまざまな業界から多面的にアイデアを出し合うことが必要であると考え。一方で、量子コンピューターが「よく理解できない魔法の箱」と認識されてしまっただけではそのようなアイデアも生まれにくい。多様なアイデアを生む風土を醸成するには、量子コンピューターのポテンシャルを世間へ正確に、かつ裾野を広く知られるよう働きかけることが有効であると考えられる。

## 5 NRIによる量子コンピューティング技術に関連する実証研究等の取り組み

前章では量子コンピューティング技術の現状の課題を述べたが、これらの課題に対して、国内外の学術界や専門組織を中心に不断の努力をもって挑戦が続いている状況である。量子コンピューターの将来的なユーザーとなりうる産業界は課題の解決をただ待つだけでなく、不完全ながらも産業活用につながりうる具体的な活用事例を積極的に社会へ提案することが重要だとNRIとしては考えている。本章ではNRIがこれまで行ってきた量子コンピューティング技術に関連する取り組みを紹介する。また、現

状どのような産業課題が最適化問題として古典コンピューターで解かれているのかに触れ、量子コンピューターへの発展の検討についても紹介する。

### 1) 古典コンピューターと量子コンピューターをハイブリッドした最適化アルゴリズムの開発

古典コンピューターでは計算結果は変わることはなく、ある入力から導かれる答えは一つとなる。この性質から、古典コンピューターは、計算処理においてあらかじめ定められた制約を必ず守ることや、何回処理を実行しても高い再現性があることが特徴である。

一方で、第2章で触れた通り、量子コンピューターはQPU内部で定まった量子状態を測定すると、確率的に結果が取り出される。そのため、ランダム性を持たせて発見的に解を求められることが特徴である。

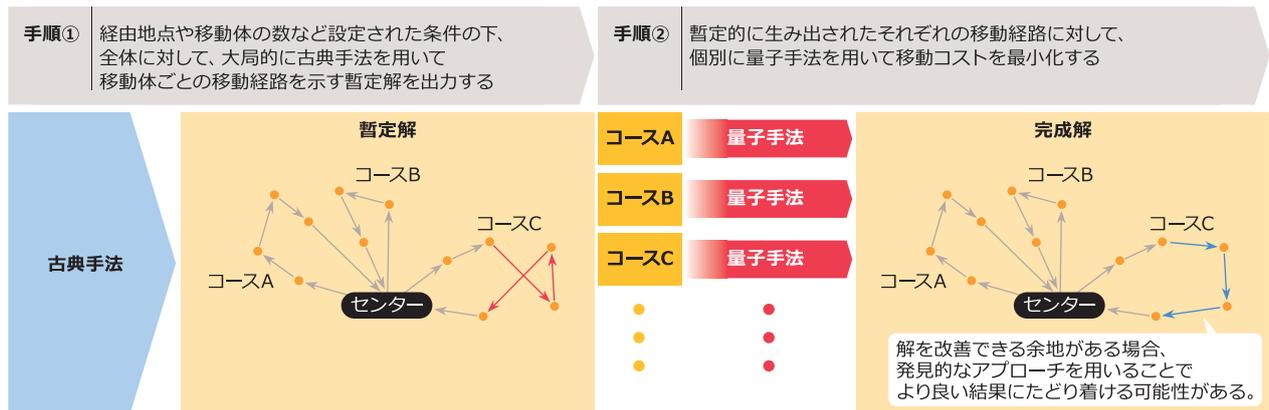
NRIは、この両者の性質をうまく組み合わせる複数の移動体の移動経路を最適化する計算を行う手法を開発した。

処理の手順の一例を紹介すると次の通りとなる。まず、古典コンピューターによって制約を確実に守りながら各移動体の移動経路を暫定的な解として得

※3 2019年、Googleは「ランダム量子回路サンプリング」と呼ばれる特定の計算において古典コンピューターよりも高速であることを実証した旨の主張をしている (<https://ai.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html>)

※4 2020年、Science誌にてH.-S. Zhongが論文“Quantum computational advantage using photons”上でガウシアンボソンサンプリングと呼ばれる特定の計算において古典コンピューターよりも高速であることを実証した旨の主張をしている

図表3 ハイブリッド最適化アルゴリズムの概略図



出所) NRI 作成

る（図表3・手順①）。次に、一つの移動体の移動経路に対して量子コンピューターが解釈できるモデル<sup>※5</sup>を一つ生成する。このモデルの生成を複数の移動体に対して同様に行う（図表3・手順②）。こうして生成されたモデルを量子コンピューターに入力することで、移動コストを最小にする複数の解を量子コンピューターから取得する。

この手法によって、古典コンピューターのみで最適化計算をするよりも全体の移動コストが小さい解を得られる可能性が高くなる。また、求解可能なレベルまで問題サイズを小さくすることができるため、量子ビット数が少ないという量子コンピューターの技術的な課題を回避することが望める。

## 2) 量子コンピューターを用いたデータセンターの設備運転計画最適化の検証

この検証は現実の具体的な産業課題に対して量子コンピューティング技術を適用した実践的な取り組みである。

脱炭素化や電力価格高騰を背景として、電力消費量の削減は社会的な面でもコストの面でも求められている。NRIではデータセンターを運用しており、電力消費量を削減するためにデータセンターにおけ

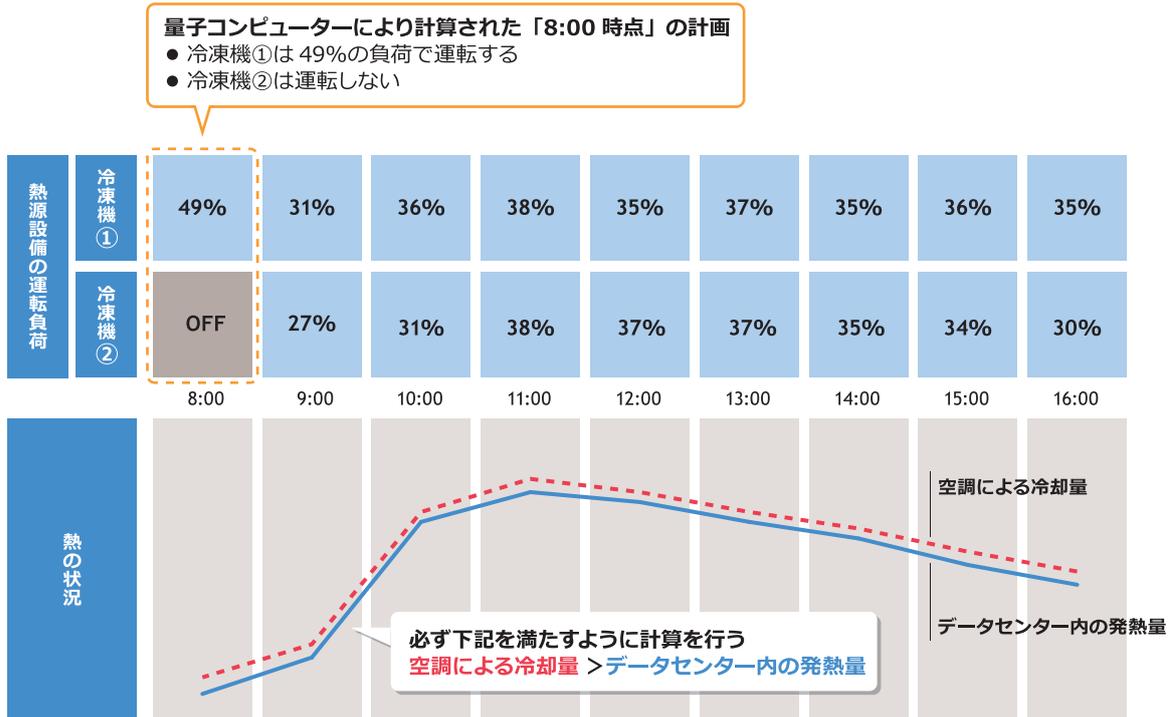
る最適な熱源設備の運転計画をシミュレーションした（図表4）。量子コンピューターを用いて、熱源設備の運転特性も加味した上で運転計画を計算した結果、特定の条件下においては電力消費量を現状よりも最大約10%削減可能であることを確認することができた。

この検証の目的は、電力消費量の削減に向けた計算を行うという直接的な目的以外にも二つある。一つは、量子コンピューターを用いた実践的な取り組みを行うことで、産業課題を量子計算に落とし込む専門性の高いノウハウをNRIとして蓄積することである。量子コンピューティング技術が発達した将来においてNRIが社会課題に対して即座に技術提供を行うためには、技術が発達する前から技術獲得を行い、現実の課題に量子計算を用いる際のプロセスを把握しておく必要がある。

そしてもう一つは、社会に対して量子コンピュー

※5 この量子コンピューターが解釈できるモデルは第2章で紹介したイジングモデルのことを指すが、イジングモデルは量子コンピューターのみで扱うことができるわけではなく疑似量子コンピューターでも扱うことができるモデルである

図表4 運転計画のイメージ



出所) NRI 作成

ティング技術の応用例を広く発信することで、その事例が人々の目に留まり、量子コンピューターが有用な技術であることを示すことにある。昨今、量子コンピューティング技術は、脚光を浴びる機会が多いが、社会からより注目を集めることは研究開発を進めるために必要なことだと考える。注目を集めることで、次なるアイデアが提案され、そのアイデアに対して投資がなされ、優秀な研究者が集まり、研究開発に還元され、さらに注目を集めるという好循環をつくり出せると考えているからである。NRIの取り組みだけでこのような循環を起こすことは難しいが、産業界全体の持続的な技術の発展に貢献したいと考えている。

### 3) 既存の最適化ソリューションに対する量子コンピューティング技術の応用検討

量子コンピューターは組合せ最適化問題を解くこ

とができるとされているものの、先述の通り古典コンピューターに対する十分な優位性を示すには至っていない。そのことは、古典コンピューターを使った従来手法でも組合せ最適化問題を解くことができるということの裏返しともいえる。

NRIでは、配送計画の最適化をはじめとしたビジネス上のさまざまな最適化問題の解決に対して、従来手法を活用した独自のソリューション「Fiboat」を開発している。このFiboatでは柔軟に業務上の制約を考慮することが可能となっており、数理最適化の専門家が業務要件に応じてチューニングした数理モデルを計算エンジンとして提供している。Fiboatの導入事例として一例を挙げると、数千台の物流トラック配車計画を最適化したことで、コスト削減効果が約10億円との試算例もある。

古典コンピューター上で動作するFiboatでは、良い解を求めるために数十分以上の時間をかけて正

確に最適化計算を行う。産業活用が難なくできるほどに量子コンピューティング技術が成熟したとき、古典コンピューターによる最適化よりも速く計算ができるのではないかと期待されている。この量子コンピューターの特性をうまく活用することで、リアルタイムもしくは高頻度の最適化計算を実行できる可能性があるため、最適化計算を適用できる業務領域が広がることを見込まれる。これを踏まえて、Fiboat で実装した最適化計算を量子計算に一部置き換えることも視野に入れながら、取り組みを進めている。

## 6 わが国の今後の量子コンピューティング領域における競争力強化に向けて

これまで量子コンピューティングに取り組む意義や、実現に向けた課題について述べてきた。最後に、わが国として量子コンピューティング技術領域における競争力を高めていくために、取り組むべき方向性について提言したい。

### 1) 量子アプリケーション開発におけるユースケースの創出

量子コンピューターの産業活用が本格化する将来を見据え、先んじて量子アプリケーション開発や、その利用における企業の経験値を積んでおく必要がある。

量子コンピューティング技術のユーザー企業側が、自社で量子コンピューターをどのように使えるのか、実際に解きたい問題をどのような数理モデルとして計算結果をどのように捉えるべきかといった試行錯誤を行う必要がある。通常システム開発と異なり量子コンピューター特有のアルゴリズムを活用する必要があるため、ユーザー企業のみで量子ア

プリケーションの要件を検討することには限界がある。よって、量子アプリケーション開発により業務プロセス効率化や顧客サービス・製品の高度化を検討している組織と全社 DX を推進している組織が協働し、量子アプリベンダーと連携しつつ、具体的な量子アプリケーション開発を進める必要がある。このような経験値を積み重ねることにより、量子コンピューティング技術開発における産業としての経験値を重ねることで産業としての競争力強化を図る必要がある。

### 2) デジタル人材の活用

量子コンピューティング技術の開発に向けては、量子コンピューターそのものの専門家や、量子物理学に長（た）けた人材でないと太刀打ちできないと考える必要はない。もちろん一部、そのような専門人材も必要ではあるが、既存のデジタルアプリケーション開発に関わっている人材をどのように有効活用していくかという観点が必要であり、量子アプリベンダーとの協業なども視野に入れて開発を進める必要がある。必要スキルとして既存技術と共通しているのは、業務プロセスやビジネス固有の課題への理解、およびそれをどのように機能要件に落とし込むかを考え、設計するスキルである。欧州でも量子アプリケーションのユーザーを育てることに力を入れている面もあり、日本企業としても、量子アプリケーション領域の競争優位性の発揮に向けて、量子人材のスキル定義、獲得、育成が必要である。

### 3) 組合せ最適化問題を捉えなおすことによる最適な社会システムの再構築

組合せ最適化問題が得意な量子コンピューターを活用することで、社会システムを最適化する可能性を秘めている。一般的に、社会環境側が許容できる

解を導出することを前提にアプリケーションの要件定義を行う。しかし、あえて社会環境側の制約を外した要件定義を行い、組合せ最適化問題を解くことで、社会環境側のあるべき制度やインフラの再定義を前提とした、上位次元での最適化が期待しうる。

例えば、工場の生産計画作成アプリケーションでは、極端な人員削減という解は現実的でないため、生産機能における雇用確保を前提条件としがちである。しかし、あえて制約を外すことで、余剰人員を他業務に配置転換し、全体の生産性向上を図るといった解を導出することが可能である。このように現時点の常識にとらわれることなく、導出された最適解に応じて、最適な社会システムを構築していく発想が必要である。

量子コンピューティング技術の開発はまだ道半ばであり、本格的な産業活用にはまだ時間を要する。しかし、ここ近年の各国による技術開発により量子コンピューターの性能は着実に向上しつつあり、将来的にはその技術活用が産業競争力の大きな源泉となる可能性がある。日本国においては、その将来を見据え、上記の提言にある通り現時点から競争力強化に向けて経験値を磨いていかなばならない。ただ、量子コンピューティング技術に限らず DX 全般における情報技術活用に向けては、そもそもデジタル技術にインプットすべき必要な情報が紙の状態のままとなっているため、デジタルデータ化が大きな課題となっていることにも触れておきたい。

今後、来るべき量子コンピューティング技術本格活用の時代に向けて、量子コンピューティング技術活用の経験値を積み重ねることによって、加速する DX 時代を生き抜くための推進力としたい。

●…… 筆者  
渡辺 和泉 (わたなべ いずみ)  
株式会社野村総合研究所  
プラットフォームサービス開発統括部  
シニアテクニカルエンジニア  
専門は、数理最適化、量子コンピューティング技術、オープンソースソフトウェアなど  
E-mail: i3-watanabe@nri.co.jp

●…… 筆者  
石垣 悟 (いしがき さとる)  
NRI インド  
プリンシパル  
専門は、業務改革・実行支援、政策立案  
支援など  
E-mail: s-ishigaki@nri.co.jp  
satoru.ishigaki@nri.com