



## 「量子コンピューティング」を学ぶ

～ “量子” の性質を利用した次世代コンピュータがもたらすもの～

近年、AI やビッグデータ解析などの普及を背景に、より高度な計算能力が必要とされているにも関わらず、「コンピュータの進化は限界を迎えた」と言われている。そうした中、既存のコンピュータとは桁違いの計算能力を実現する「量子コンピューティング」への期待が急激に高まりつつある。世界規模で開発競争が繰り広げられている一方で、その原理や仕組みがなかなか理解されない量子コンピューティングについて解説しよう。

### ■ そもそも「量子コンピュータ」とは？

「量子コンピュータ」とは、その名の通り「量子」の性質やふるまいを利用したコンピュータのこと。では「量子」とは何かと言うと、原子や電子など、ミクロの世界における物質の単位のことだ。

この量子に関する学問を「量子力学」と言う。量子力学は「ニュートン力学」など、従来の物理学では説明できない現象をも説明し得る新たな理論として、20世紀になって発展したものだ。量子コンピュータの原理を理解するためには量子力学の知識が必要と思われがちだが、決してそうではない。

量子力学は「人間の直感と反している」と言われるように、容易に理解できるものではない。量子コンピュータの提唱者の一人で、ノーベル物理学賞に輝いたファインマン博士も「もし量子力学を理解したと思ったら、それは量子力学を理解していない証拠」と語っているほどだ。このため本項では、量子力学については、あえて深入りしていない。詳細を知りたいという人は、それぞれ専門書を紐解いてもらいたい。

### ■ 量子コンピュータが利用する「重ね合わせ」とは

量子コンピュータが主に利用するのは、量子が示す「重ね合わせ」と呼ばれる現象だ。

「重ね合わせ」とは、ある物体が同時に複数の状態で存在していること(状態の共存)を意味している。

こうした量子現象が、どうコンピュータと関わるのだろうか？ よく知られているように、従来のコンピュータを構成するデジタル回路(電子回路)ではデータを「0」と「1」の組み合わせで表現している。

デジタル回路の1ビットが「0」か「1」かのどちらか、すなわち2つの状態を示すのに対し、量子コンピュータの1ビット(1量子ビット/1キュービット)は「0と1が重なり合った状態」も表現できる。これにより、1つの回路で並列的な計算が可能になることから、既存のコンピュータとは比較にならないほど高速な計算ができるというわけだ。(図1)

よく「量子コンピュータが実現すれば、あらゆる暗号が瞬時に解読される」と言われるのは、こうした並列処理による計算速度の速さに基づいている。

### ■ 近年、量子コンピュータが注目される理由

量子コンピュータが注目されている背景には、現代社会が求める計算能力の高度化に、従来型コンピュータでは対応し切れないという課題がある。

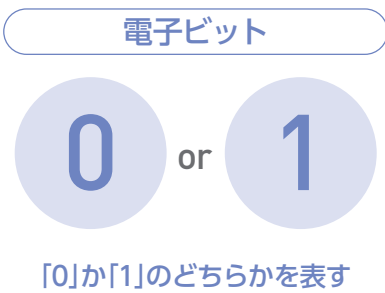
複雑さを増す社会課題の解決に向けて、AIやビッグデータ解析といった先進技術が期待されている中、それらが解決策を導くためには、従来とは比較にならないほどの高い計算能力が求められる。

従来型コンピュータは「ムーアの法則」と呼ばれるように、一定の周期で半導体の集積度を高めることで計算能力を向上させてきた。しかし、集積度を高めるための微細化には、おのずと限界がある。そこで、従来型コンピュータとは桁違いの計算能力を持つ量子コンピュータへの期待が高まり、その実用化が急がれているのだ。

### ■ 量子コンピュータに何ができるのか？

量子コンピュータには、ただ膨大な計算を高速で行

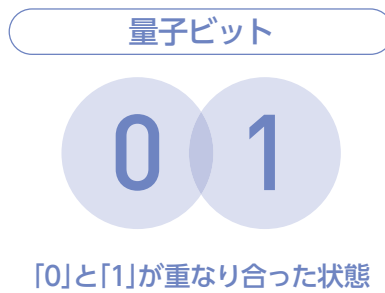
▶図1 重ね合わせと量子ビット



**例 4ビットの場合**  
2の4乗(16通り)の数字を表せるが一度に計算できるのは1つの数字だけ

0000	0001	0010	0011
0100	0101	<b>0110</b>	0111
1000	1001	1010	1011
1100	1101	1110	1111

**nビットの計算能力**  
2n乗通りの数字を表せるが、一度に計算できるのは1つの数字だけ



**例 4量子ビットの場合**  
2の4乗(16通り)の数字を同時に計算できる

<b>0000</b>	<b>0001</b>	<b>0010</b>	<b>0011</b>
<b>0100</b>	<b>0101</b>	<b>0110</b>	<b>0111</b>
<b>1000</b>	<b>1001</b>	<b>1010</b>	<b>1011</b>
<b>1100</b>	<b>1101</b>	<b>1110</b>	<b>1111</b>

**n量子ビットの計算能力**  
2のn乗通りの数字を同時に計算できる

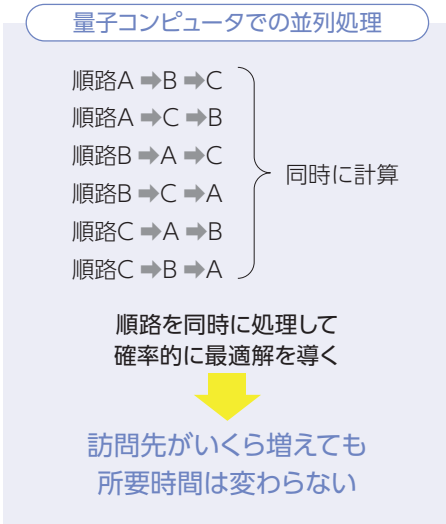
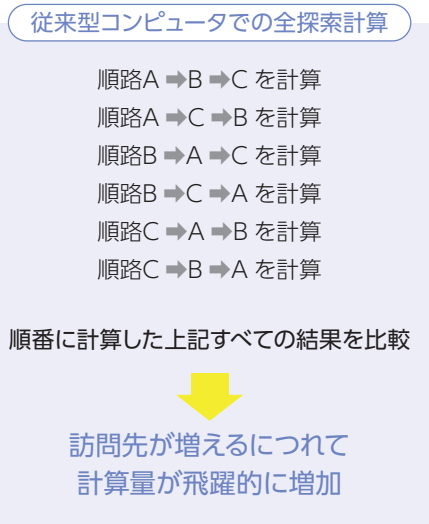
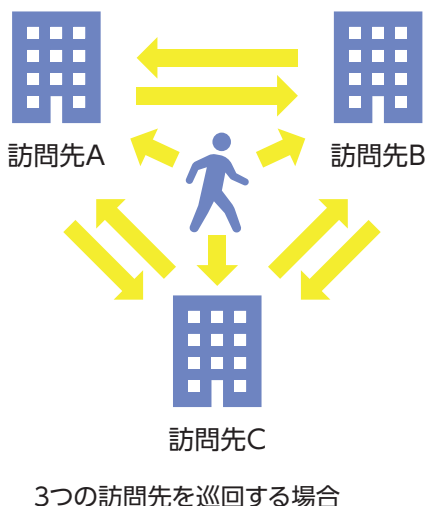
うというだけではなく、従来型のコンピュータでは難しいとされていた高度で複雑な計算への対応が期待されている。中でも注目度が高いのが「組合せ最適化問題」への対応だ。

組合せ最適化問題とは、多くの選択肢の中から、どの組み合わせが最適かを導き出すもので、よく挙げられる例に「巡回セールスマン問題」がある。これは、セールスマンが多くの商談先を巡回する際に、最も効率的な順序を計算しようというものだ。

商談先が2~3か所ならまだしも、10か所、20か所となれば、その組み合わせは膨大な数となり、容易には回答できない。

あらゆる組み合わせについて、従来型コンピュータで計算して最適解を求めようとする、膨大な時間がかかってしまう。これに対し、量子コンピュータであれば「重ね合わせ」を利用して、あらゆる組み合わせを並列的に計算し、瞬時に最適なルートを導き出すことができる。(図2)

▶図2 巡回セールスマン問題とは



**コラム 「0」と「1」が重なり合った状態とは？**

量子コンピュータについて学ぼうとした際に、多くの人がつまずくのが「重ね合わせ」だろう。デジタル回路に慣れた私たちにとって「0と1が重なり合った状態」とはどんなものかは、容易には理解しがたいものがある。

そこでイメージして欲しいのが「コインが回転している状態」だ。コインの回転が終わると「表」か「裏」かのどちらかを示すが、回転中は「表と裏が重なり合った状態」と言える。

コインが止まった結果をもとに計算するのが従来型コンピュータで、回転中の状態で計算するのが量子コンピュータと考えれば(あくまで観念的なものだが)、その違いがイメージできるのではないだろうか。

従来型コンピュータ      量子コンピュータ

組合せ最適化問題は、セールスマンを巡回させるような業種だけでなく、様々な産業分野の課題解決に期待されている。配送ルートや生産ラインのレイアウトなどはイメージしやすいだろうが、他にも、新薬開発におけるタンパク質の配列や、株式投資におけるポートフォリオ最適化など、組合せ最適化問題は、あらゆる産業分野の課題に潜んでいると言っても過言ではない。(図3)

やがて量子コンピュータが実現した際に重視されるのは、量子コンピュータに何をさせるか、すなわち、どこに組合せ最適化問題があるのかを見出すセンスや知見ではないだろうか。

## ■ 量子コンピュータの実現に向けた ■ 多様なアプローチ

従来型コンピュータでは解決できない問題に対応すべく、幅広い分野で期待が高まる量子コンピュータ。近年、世界レベルでの開発競争が激化しているとはいえ、その実現にはまだまだ時間がかかると言われている。

というのも、そもそも量子自体に未解明の部分が多く、量子ビットをいかに実現するかについても、超伝導現象を用いるものや、光量子を用いるものなど、多様な手法が模索されている状況だからだ。

2000年代中頃まで、「量子コンピュータ」と言えば、既存のコンピュータにおける「論理ゲート構造(※1)」に相当する「量子ゲート方式」が主体であったが、近年になって「イジングマシン(※2)方式」と呼ばれる新た

なアプローチでの研究がスタートしている。

量子ゲート方式のような汎用性はないが、それだけに実現が容易と言われているイジングマシン方式の中でも、最も実用化に近いと注目されているのが「アニーリング方式」だ。実際、2011年に世界初の商用量子コンピュータを発表して話題を呼んだ、カナダのD-Wave Systemsも、この方式を採用している。

「アニーリング」とは金属加工における「焼きなまし」を意味しており、逐次的な処理でなく、並列的な処理によって短時間で回答を導くことで、特に「組合せ最適化問題」への対応力が高いとされている。

- ※1 論理ゲート構造：「1」と「0」の2種類の数字を、「ゲート」と呼ばれる各種スイッチによって処理することで、様々な計算を行う仕組み
- ※2 イジングマシン：解決すべき課題を様々な変数からなる構造式(イジングモデル)で表現し、その総和(エネルギー)が最少となる状態(=最も安定した状態)を統計的に見出す仕組み

## ■ 富士通が選んだアプローチ ■ 「アニーリング方式」とは?

D-Wave Systemsが開発したアニーリング方式の量子コンピュータは、量子ビットに超伝導体を使用しているため、大型の冷却装置が必要なことや、まだビット数が限られているなど、課題も残されている。

これに対し、富士通研究所が2016年に発表した「デジタルアニーラ」は、その名の通り、デジタルとアニーリングを融合したもの。実用化に時間を要する量子ビットを用いるのではなく、既存のデジタル回路で、アニーリング方式による課題解決を可能にしている。

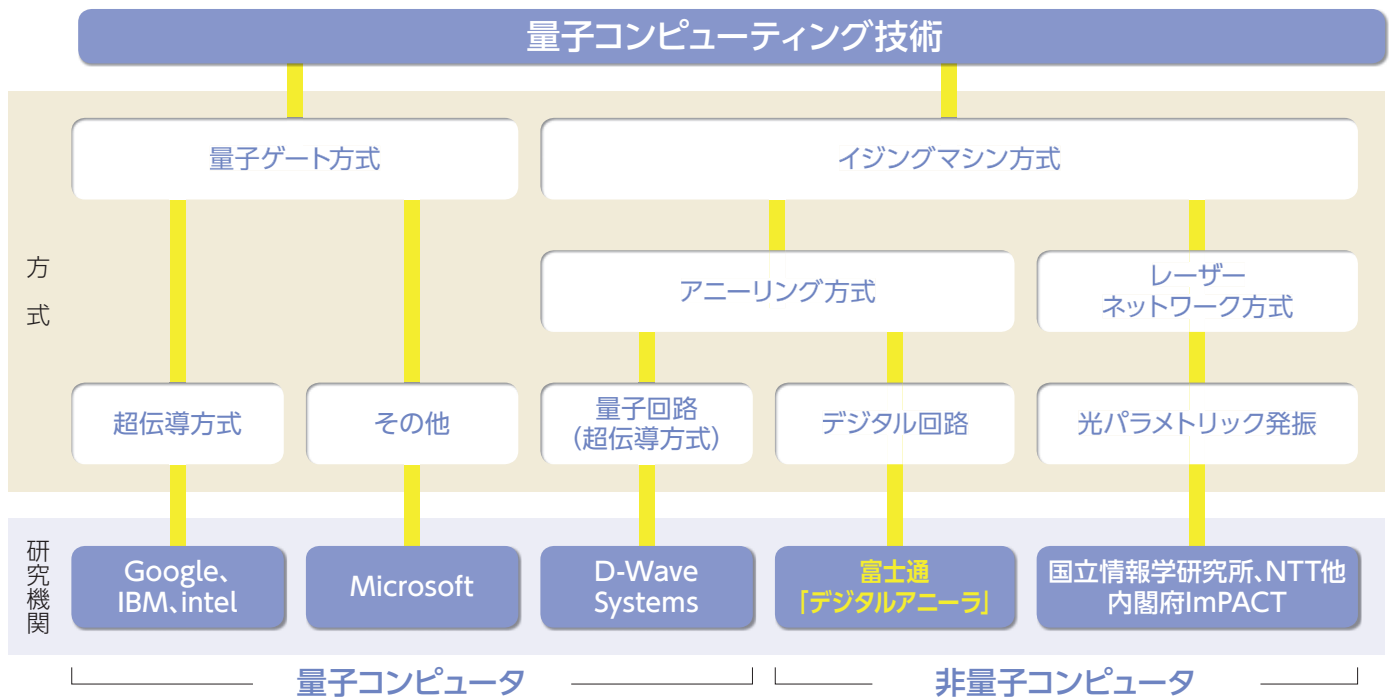
「デジタルアニーラ」は、常温環境で安定動作すると

▶ 図3 あらゆる産業分野に潜む「組合せ最適化問題」





▶図4 量子コンピューティング技術の分類(概略)



いうデジタル回路の優位性を活かし、早期の実用化を達成。すでに「クラウドサービス」と「オンプレミスサービス」、さらには専門エンジニアがサポートする「テクニカルサービス」でのサービス提供を開始しており、8,192(2の13乗)ビットという大規模な計算能力で、様々な産業分野における課題解決が期待されている。

実際には量子ビットを使用していないことから、富士通研究所では「デジタルアニーラは量子コンピュータではなく、量子にヒントを得た新たなコンピューティング技術」と説明している。このため本稿では、より広義の概念として「量子コンピューティング」という表現を用いて、図のように分類した(図4)。とはいえ、量子コンピューティングの世界はまだ黎明期にあり、現状の分類や用語も、あくまで暫定的なものとして捉えるべきだろう。

## ■ 「デジタルアニーラ」を駆使した幅広い共創

富士通研究所の「デジタルアニーラ」は、量子コンピューティングの分野で世界トップクラスの研究実績を持つトロント大学との共同研究から生まれ、その商用化に当たっては、世界で初めて量子コンピュータ向けソフトウェアを商用化した1QBit社(カナダ)と協業している。

デジタルアニーラによる課題解決や価値創出を、より幅広い領域で実現していくためには、今後もこうし

た外部との「共創」が欠かせない。そこで富士通研究所は、早稲田大学内に共同研究拠点を開設。金融や交通・物流、デジタルマーケティングなど、実社会における組合せ最適化問題をデジタルアニーラで解決する共同研究を2019年4月より開始した。また、2019年2月には世界最大級の技術者コミュニティ「Topcorder」を活用して、デジタルアニーラによる課題解決のコンテストを開催している。

こうした取り組みが、デジタルアニーラを含めた量子コンピューティングの普及を後押しするとともに、これまで解決困難だった複雑な社会課題の解決につながっていくはずだ。

- 富士通関連サイト  
デジタルアニーラ  
<https://www.fujitsu.com/jp/digitalannealer/index.html>
- やさしい技術講座「デジタルアニーラ」  
<https://www.fujitsu.com/jp/group/labs/resources/tech/techguide/list/digital-annealer/index.html>

※デジタルアニーラは株式会社富士通研究所の登録商標です。

〈監修〉

株式会社富士通研究所 デジタルアニーラ・ユニット 市場創出プロジェクト

シニアエキスパート 藤澤 久典 氏

シニアマネージャー 木村 浩一 氏

編集委員 井川 祥子 明治安田システム・テクノロジー株式会社