

## 特集にあたって

久木田 真吾 (防衛大学校)

十数年前まで、量子力学特有の性質を利用したさまざまな技術、いわゆる量子技術がここまで注目を集めることは想像し難かった。本誌の読者である OR 分野の方々にとっても、量子力学は『ミクロな物理現象を説明する特殊な理論』に過ぎなかったのではなからうか。しかし近年、量子技術は急速にその存在感を増した。2018 年には本誌でも『量子コンピュータ』の特集が生まれ、それ以降も関心はさらに高まり続けている。

現在では、量子技術は巨大 IT 企業やスタートアップによる巨額の投資、国家レベルの戦略の対象となっている。私たちは、単に「量子の振る舞いが不思議だ」と驚く段階を過ぎ、その不思議な性質をいかにして「制御可能なリソース」として工学的に手なずけるかという段階に差し掛かっている。

一方で、『量子技術で何ができるのか』という問いに対する理解は、必ずしも深まっているとはいえない。量子コンピュータを使えばあらゆる計算が速くなる、と思われがちだが、実際に大幅な高速化が見込めるのは特定の問題に限られる。加えて、現在の量子デバイスが抱えるノイズの深刻さや、誤り訂正に必要なリソースの大きさは、なかなか伝わりにくい。本特集のねらいは、こうした期待と現実のギャップを少しでも埋めるべく、量子技術の現在地を複数の視点から提示することにある。

各記事の概要を紹介する。まず、山本薫氏 (NTT コンピュータ&データサイエンス研究所) は、量子センシングについて論じている。量子もつれを利用した高感度計測の可能性と、事前に把握できない未知のノイズが計測結果にバイアスをもたらす問題、およびそれを量子エラー抑制法で低減する考え方を解説している。

次に、中原幹夫氏および Juha Vartiainen 氏 (IQM Quantum Computers) は、超伝導量子コンピュータのハードウェア開発について論じている。誤り訂正をもたない現行の量子コンピュータ (NISQ) と、誤り訂正を組み込んだ将来の量子コンピュータ (FTQC) それぞれの概要を述べたうえで、QPU のトポロジーと誤り訂正符号の選択が密接に関わることを、IQM での開発事例を交えて解説している。

続いて、近藤康氏 (近畿大学) は、NMR (核磁気共鳴) 装置を用いた量子コンピュータの学生実験への導入について論じている。原子核のスピンを量子ビットとみなし、学生実験向けに開発した NMR 装置で制御・観測を行い、簡単な量子アルゴリズムを実装するまでを、量子力学の基礎と対応づけながら紹介している。

さらに、谷村省吾氏 (名古屋大学) は、量子力学「そのもの」の数理構造について論じている。波動関数や行列といった具体的な表現の背後にある物理量の非可換性という代数構造に着目し、そこから量子力学特有の性質がいかに導かれるかを、具体例とともに解説している。

最後に、筆者 (久木田) の記事では、量子ビットとは何かという基本的な問いから出発する。確率ビットとの対比を通じて量子ビットの状態を幾何学的に捉え、測定仕組みや重ね合わせと確率混合の違いを説明する。そのうえで、量子ビットの制御に伴うエラーと、それを抑制する複合パルス的手法を紹介し、特集を締めくくります。

### 【本特集で用いられる主な量子用語・数理詳説】

量子技術の数理的基盤は線形代数と確率論にあるが、独特の「行間」が障壁となることが多い。OR の専門家が自身の知見と接続できるよう、各概念および数式上の作法を整理しておく。

- **ブラ・ケット記法**: 量子系の状態は複素ヒルベルト空間上の単位ベクトルであり、これを慣習的にケットベクトル  $|\psi\rangle$  という記法で表す。これに対応する双対ベクトルをブラベクトル  $\langle\psi|$  と表す。ブラベクトルとケットベクトルを用いて構成される  $\langle\phi|\psi\rangle$  (内積) が、量子力学の計算で主要な役割を果たす。括弧、つまりブラケット  $\langle\phi|\psi\rangle$  を縦棒のところで二つに分けたので、ブラ・ケットという名前がついている。
- **量子ビット**: 量子ビットは  $\mathbb{C}^2$  (複素 2 次元ベクトル空間) を状態空間とする、情報を担いえる最小の量子系である。量子技術の文脈では、古典的なビット 0, 1 になぞらえ、この空間の二つの基底ベクトルを  $|0\rangle, |1\rangle$  と定義することが多い。一般の 1 量子ビット状態は

これらの基底の線形結合  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  ( $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ ) で表される。

- **状態空間のテンソル積**:  $n$  量子ビットの量子状態を表す空間は、個々のビットに対応するヒルベルト空間のテンソル積  $\mathcal{H}_1 \otimes \cdots \otimes \mathcal{H}_n$  として記述される。この空間の次元は  $2^n$  となり、 $n$  に対して指数関数的に増大する。この巨大な空間の中には、古典的に記述できない領域が広く存在する。系 1 が状態  $|0\rangle$  にあり、系 2 が状態  $|1\rangle$  にある場合、全体の状態は  $|0\rangle \otimes |1\rangle$  などと表記されるが、自明な場合にはしばしばテンソル積の記法は省略され、 $|0\rangle|1\rangle$  や、 $|01\rangle$  などと書かれることがある。
- **エルミート共役 ( $A^\dagger$ )**: 演算子  $A$  の随伴演算子。行列

表示では、各成分の複素共役をとって転置したものに対応する。量子力学において、観測可能な物理量は  $A = A^\dagger$  (エルミート演算子) と対応づけられ、その固有値は常に実数となる。また、量子ゲート (時間発展)  $U$  は  $U^\dagger U = I$  (ユニタリ演算子) で表される。なお、無限次元のヒルベルト空間ではエルミート性と自己共役性の区別など、少々注意が必要である。

- **プランク定数  $\hbar$** : 量子論的方程式に登場する、ミクロな世界のスケールを規定する物理定数である。「エネルギー」と「時間発展のスピード」を相互に換算するスケール因子とも見なせる。 $\hbar$  は極めて小さな値 ( $\approx 10^{-34}$  J·s) であり、マクロなスケールでは量子効果は直接見えにくい。