

誤り耐性を備えた量子コンピュータの実現に向けた 光によるアプローチ

東京大学 大学院工学系研究科
福井浩介, 武田俊太郎

1. はじめに

量子情報処理は次世代のデジタル社会基盤を支える技術として重要である。例えばムーアの法則に沿って発展してきた従来の計算機の性能は限界に近づいており、異なる原理で動作しムーアの法則に依らない次世代コンピュータの登場が期待されている。その中で量子コンピュータは量子力学的な性質を動作原理とし、さらにその性質を活用することで種の問題に対して従来の計算機の性能を凌ぐことから次世代コンピュータとして大いに期待されている。また量子コンピュータだけではなく、量子情報処理はいかに技術が進歩しても情報理論的に安全性が保証される量子暗号、そして従来技術の精度や感度を凌ぐ量子計測・センシングをも可能とする。そのため量子技術は次世代の情報処理の基盤技術として、将来的に多くの社会課題を解決し安心・安全で豊かな社会の実現に貢献することが期待されている。

量子コンピュータはファインマンによる提唱を起点とし、量子誤り訂正理論の発展によりその実現が現実味を帯び、実験技術の進展を伴って急速に開発が進んできた。そして 1999 年に実現した固体素子による超伝導量子ビット技術を土台として、2011 年には組合せ最適化問題に特化した量子コンピュータである量子アニーリングマシンが商用化された。2019 年には Google 社は 53 量子ビットの汎用型の量子コンピュータを開発して従来のコンピュータに対する優位性を実証したと発表し¹⁾(厳密には計算量的な優位性を証明できていないという見解もある)、その後 105 量子ビットマシンまで開発を進めている。また IBM 社も 2023 年に 1121 量子ビットマシンをリリースし、2033 年以降には 100,000 量子ビットマシンの開発を計画している。日本でも理化学研究所で開発された 64 量子ビットの超伝導方式量子コンピュータ「叡」の運用が開始され、2026 年以降には 1000 量子ビットマシンの開発が計画されている。そして新たな産業分野での主導権を握るために、アメリカ、ヨーロッパ諸国、中国などは量子情報技術研究開発に巨額の投資を行い、超伝導方式以外にも、光方式、イオン方式、半導体方式、中性原子方式、等々さまざまな方式が競い合っている。

このように量子コンピュータの開発が進む一方で、まだまだ課題は山積みである。そして将来的にスーパーコンピュータでも解けない、かつ意味のある問題をどの方式がいち早く解くのかはまだ分からない。本稿ではその一番手になり得る他の物理系には無い優れた性能を持ち、独自の路線によって研究開発が進められる光方式^{2,3)}を概説する。光の利点を挙げると、まずエネルギースケールが大きいため室温大気中において環境からの影響をほとんど受けない点である。そのため熱雑音の影響を受ける他の物理系のように極低温または真空中で動作させる必要はない。次に、光の周波数で動作するため他の物理系より高クロック周波数である点、さらに自由空間・光ファイバ等を使ったフレキシブルな配線が可能であるためスケラビリティに優れたシステム設計ができる点がある。これらの利点から室温・大気中・高クロック周波数で動作する量子コンピュータの開発が進展してきた。加えて、これらの利点を持つ光量子技術は長年に渡り量子力学の原理実証の場としても大いに活躍してきた。例えば量子もつれ状態にある 2 光子を使った Bell の不等式の破れの実験は最たる例で、2022 年にはノー