



量子コンピュータにおける計算高速性と信頼性のジレンマ

～計算結果の正しさの効率的な検証技術による量子エラーの克服～

Dilemma between quantum speedup and computational reliability
- Overcoming errors by efficient verification methods for quantum computing -



NTT コミュニケーション科学基礎研究所 メディア情報研究部

竹内 勇貴

Yuki Takeuchi

●プロフィール

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 メディア情報研究部 准特別研究員。2014年大阪大学基礎工学部卒業。2018年同大学基礎工学研究科博士課程早期修了。博士(理学)。同年日本電信電話株式会社入社。リサーチアソシエイトを経て、2023年より現職。量子情報処理の研究に従事。日本物理学会、情報処理学会各会員。

量子コンピュータは、現在のコンピュータよりも高速な計算を可能にすると期待されており、世界中で研究されています。一方で、量子コンピュータは周波数揺らぎなどのノイズによるエラーが発生しやすく、エラーにより正しい答えを出力できなくなる場合があります。そのため、信頼性の高い量子コンピュータを実現するためには、量子コンピュータの計算結果が正しいかを検証する技術が重要です。本講演では、量子計算の高速性の起源である量子重ね合わせが計算結果の検証を困難にするというジレンマに触れつつ、私たちがどのような方法でそのジレンマを回避しているのかをご紹介します。

量子コンピュータは、スーパーコンピュータ(スパコン)を含めた現在のコンピュータよりも高速な計算を可能にすると期待されており、世界中で研究・開発が進んでいます。この高速計算を可能にしているのが、量子コンピュータ特有の現象である量子重ね合わせ(量子並列性)です。現在のコンピュータは、全ての情報を、0または1の値を取るビットを使って表現します。一方で、量子コンピュータは、量子ビットによって情報を表現します。量子ビットは、通常のビットと違い、0と1が50%

ずつというような不思議な状態を取ることが出来ます(図1)。これが量子重ね合わせという現象であり、量子コンピュータはこの現象を用いて、現在のコンピュータには困難な並列処理を行っています。

このように高速計算に有用な量子重ね合わせですが、エラーに弱いという性質もあります。例えば、0と1が50%ずつという状態が、0が49%、1が51%という状態に変化するような小さなエラーが複数回発生することで、最終的な量子コンピュータの計算結果が全く正しくないものになってしまいます。そのため、高速に正しく動作する量子コンピュータの実現には、量子コンピュータのエラーに対処する技術が重要です。代表的な技術の一つとして、“量子コンピュータの検証[1]”(図2)があります。これは、量子コンピュータが出力した答えが正しいかどうかをチェックする技術です。小学生の時に筆算の答えを確かめるために検算をしたり、会社の資料に間違いが無いダブルチェックをしたりしたことがある方も多いのではないのでしょうか。まさに、量子コンピュータが出力した答えに同様のことを行うのが、本技術の目的です。本技術は、

どのようなエラーに対しても適用できるため、エラーの詳細を把握するのが困難な状況で特に威力を発揮します。例えば、遠隔地にある量子コンピュータのエラーを把握するのは困難ですが、本技術によりエラーの影響を受けることなく量子コンピュータをクラウド化しネットワーク経由で世界中から広く活用できる可能性が拓けます。また、本技術は、他のエラー対策技術である量子エラー訂正が適用できないような、エラー発生確率が高い状況でも適用可能なため、他技術と併用する取り組みも進んでいます。

このように、量子コンピュータの計算結果の検証は、エラー対策およびクラウド化に必須の技術ですが、実はとても難しい作業です。特に、量子コンピュータの高速計算の起源となっている量子重ね合わせによって、検証が難しいというジレンマがあります。例えば、小学生の時に行った筆算の検算のように、量子コンピュータの計算結果を、精度の高いスパコンで再計算するという方法が考えられます。しかし、量子重ね合わせは量子ビット特有の現象であり、スパコンであっても効率良く再現することが出来ません。つまり、この方法では量子コンピュータが短時間で行った計算を検算するために、数年かかるということが起きてしまいます。また、現在のコンピュータではビットを扱うため、起こるエラーはビットの反転(0が1に、1が0に反転するエラー)のみです。しかし、量子コンピュータでは、重ね合わせ具合が変化するようなビット反転以外のエラーも発生します。つまり、量子コンピュータの計算結果の検証を行うためには、現在のコンピュータよりも多くの種類のエラーが起こっていないかをチェックする必要があります。このように、量子重ね合わせは、量子コンピュータに高い計算能力を与える一方で、正しい答えを出力しているかの信頼性の面でネガティブな影響を及ぼしています。



図1：ビットと量子ビットの違い

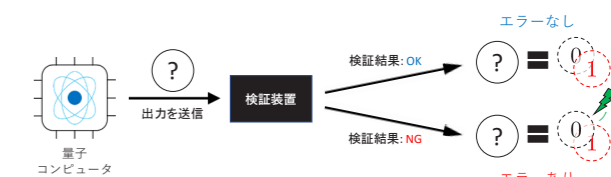


図2：量子コンピュータの出力の正しさの検証

●参考文献

[1] J. Eisert, D. Hangleiter, N. Walk, I. Roth, D. Markham, R. Parekh, U. Chabaud, E. Kashefi, "Quantum certification and benchmarking," *Nat. Rev. Phys.* Vol. 2, pp. 382-390, 2020.
[2] Y. Takeuchi, Y. Takahashi, T. Morimae, S. Tani, "Divide-and-conquer verification method for noisy intermediate-scale quantum computation," *Quantum*, Vol. 6, p. 758, 2022.