

量子コンピュータを用いた 量子超越実験

藤井啓祐 | 大阪大学大学院基礎工学研究科

2019年9月にGoogleのチームによる量子コンピュータを用いた量子超越実験の論文がNASAのサーバからリークし、話題になった。その後10月に正式にNature誌から発表され¹⁾、新聞の一面で報道されるなど研究界を超えて話題になっている。量子超越 (quantum computational supremacy)²⁾ というセンセーショナルな言葉が一人歩きしている感もあり、さすがにビットコインが一時的に暴落するなど過剰反応である一方、30年以上前に提案され、いつまでたっても実現しないとされていた量子コンピュータが、その性能を評価するためにスーパーコンピュータが必要になる、というレベルまでできたことは賞賛に値する。本稿では、量子計算の仕組みについての簡単な導入とともに、今回の量子超越実験で示されたことについて解説したい (より物理的な解説は物理学会誌の解説を参照されたい³⁾)。

量子計算の仕組み

物理や量子計算の知識があまりない読者もいると思うので、簡単に量子計算の仕組みをまとめておく (詳しくは、解説記事⁴⁾ や教材⁵⁾ が公開されており、量子計算のこれまでの経緯については一般書⁵⁾ を参考にしてもらいたい)。従来の情報処理 (以下では、量子ではないという意味で、古典情報処理と呼ぶことにする) では情報は、0もしくは1の値をとるビッ

トによって表現される。物理的には、電圧やコンデンサにたまった電荷など物理的に異なる2状態によってこれら0や1といった情報が表現されている。最も基本的な物理法則では、重ね合わせ状態という異なる2状態のうちどちらが実現しているかが確定していない、という状態をとることが許されている。これを利用するのが、0状態と1状態の重ね合わせ状態である量子ビットである。数学的には、0状態と1状態をとる重みを2つの複素数 α と β を用いて表現し、2次元の複素ベクトル $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$ によって表現される。この複素数 α と β は、重ね合わせ状態を破壊し、0であるか1であるかを測定したときにそれぞれの測定結果が得られる確率 $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$ に対応し、規格化条件 $|\alpha|^2+|\beta|^2=1$ を満たす。量子ビットが1つの場合について説明したが、量子ビットが n 個ある場合も、古典ビットでとり得る 2^n 個のビット列のパターンの重ね合わせ状態が許されており、 n 量子ビット状態は、それぞれのビット列をどのような重みでとるかということを表す 2^n 個の複素ベクトルで表現される。先ほどと同じく、この複素数の絶対値の2乗がビット列をサンプルしたときに得られる確率に対応するため、この複素ベクトルも規格化条件を満たす。

量子コンピュータは、上記のような複数のビット列のパターンの重ね合わせ状態のままある意味並列的に計算を行うコンピュータである。量子コンピュータ上で実行可能な演算、すなわち量子力学で許された時間発展は、重ね合わせ状態を記述する

¹⁾ <https://dojo.qulacs.org/ja/latest/>

複素ベクトルに対するユニタリー行列 U の作用によって記述される（ユニタリー性は複素ベクトルのノルムの保存 = 確率の保存のために必要となる）。ただし、量子コンピュータの出力としてこの複素ベクトルの要素を直接得ることは許されておらず、絶対値の2乗で得られる確率分布のもとでサンプリングされるビット列のみ取得できる。このため、有用な答えを得るためには、うまく複素数を干渉させることによって確率を集める必要がある。

古典コンピュータを用いて量子コンピュータが行う計算を再現するためには、 2^n 個のパターンについてすべて並列的に計算を進める必要があり、量子ビットの数に対して指数的なメモリの確保と計算時間を要することになる。たとえば、30量子ビットの場合は複素数を 2^{30} 個確保する必要があるため、倍精度で約16ギガバイト、同様に50量子ビットの場合は16ペタバイトという途方もないメモリが必要になり、50量子ビットを超えるとスーパーコンピュータ（スパコン）でも量子コンピュータのシミュレーションが難しい領域に入ってくる。

実際には、ノイズの影響による出力の精度の低下や、実行したいタスクによっては量子コンピュータそのものをシミュレーションするよりもっと高速な古典アルゴリズムがあるため、量子コンピュータの古典コンピュータに対する優位性を実証することはなかなか難しい。たとえば、量子コンピュータを用いることによって効率良くとけることが知られている素因数分解問題では、50量子ビットしかなければ高々50ビットの素因数分解しかできない。50ビットの素因数分解であれば、スパコンを引っ張り出す必要もないだろう。今回の実験のポイントは、その計算自体にあまり意味はないが、現在のノイズを含む50量子ビット程度の量子コンピュータでもできるタスクを設定し、そのタスクに対して量子コンピュータ実機とスパコン上で走らせた既知のベストアルゴリズムとで比較をしたというものである。

ランダム量子回路による実験

Googleの実験では、上記の条件をクリアし、量子超越を実験的に検証するために、2次元正方格子状に並べられた53個の量子ビットに対して、ランダムに選ばれた1量子ビット演算と、隣接する量子ビットに作用する2量子ビット演算の繰り返すというランダム量子回路を実行し、測定をしてビット列をサンプリングするというタスクを用いている。このようなランダム量子回路の後に測定をすると、一様分布とはまったく異なり、特定のビット列が高確率で出現するというPorter-Thomas分布が得られることが知られている。この分布の特徴を利用して、実験的にサンプルされたビット列から、それが理想的な分布をどの程度再現しているかを、線形化した交差エントロピーから推定される計算の忠実度を用いて検証するという方法が、Googleが今回実験を行った交差エントロピーベンチマークとよばれる手法である。

実験では、1つのランダム量子回路に対して約 5×10^6 回のサンプリングを行い、10個のランダム量子回路から交差エントロピー忠実度を計算している。実機では 10^6 回サンプリングするのに要する時間は200秒程度である。実際に量子ビット数を最大である53量子ビットにし、量子回路の深さを20サイクルとすると、もはやスパコンをもってしても理想的な場合の確率分布の計算が難しくなるので、実験でデータが得られたとしても、交差エントロピー忠実度の計算ができない。Googleの実験では、サイクル数を浅くしたり、回路パターンを古典シミュレーションがしやすくなるように単純化したもので、交差エントロピー忠実度を推定し、その忠実度がここの演算の精度から計算される値と一致していることから、最も難しい53量子ビット、20サイクルの計算においても十分な忠実度が得られていると結論づけている。また、同じ忠実度のサンプリングを古典コンピュータで行った場合、約 10^6 コアのマシンを想定して約1万年の時間がかかると結論づけている。この見積も

りでは、数十ペタバイトにも及ぶデータを一度に確保するのではなく、計算を分割して足し合わせる方法を採用している。Google の論文がリークした直後、IBM のグループからスパコン、サミットの2次メモリを活用しすべてのデータを確保すれば、2.5日でシミュレーションできるという反論も出ている。ただし、量子ビット数があと3つでも増えると2次メモリの容量を超えてしまい（量子ビットが1つ増えると、データ量は倍になる）この方法も破綻するであろう。論文発表後に、Google のチームを率いている John Martinis が講演した内容によると、57量子ビットのマシンがすでに稼働しているとのことである。

まとめと論点

ランダム量子回路からの出力は意味のないビット列であり役に立つものではない（とはいえ検証可能量子乱数としての応用が検討されている）。今回の実験は、スパコンでもシミュレーションが難しい物理系を究極的に精密に制御したという意味合いが強い。単に、スパコンではシミュレーションが難しい系を実現する、というだけならば量子系でなくても、人間の脳やコップの中の水なども量子超越と呼べてしまうことになる。しかし、Google の論文では、この点を明確にするために量子超越の定義を以下のように定めている：

- 数学的に問題とその解が適切に定義されていること。
- プログラム可能なデバイスであること。
- どの既知の古典ベストアルゴリズムを用いても、そのタスクの実行に指数的なスケールアップの差があり、現在のスパコンと比べ圧倒的に速くタスクを実行できること。

そもそも量子系でなければ3つ目の要素をクリアすることができず、これまで実験された制御された量子系でこれらの条件をクリアしたものは存在していない。また、今回の古典コンピュータに対する優

位性は、既知のベストアルゴリズムとの実測値の比較である。特定の既知のアルゴリズムを前提とすることなく、計算機科学的における仮定に基づいてスケールアップの下限などを求める理論研究も進んでおり、この意味での量子超越の実証も今後目指すべきであろう⁶⁾。また、残念ながら今回の実験では、量子ビットの数が有限であることと、仮に量子ビット数を増やすことができたとしても量子演算にはノイズがあるため全体の忠実度は指数的に減衰してしまうため、そもそも拡張性のある議論（サイズを大きくした極限に対する議論）が展開できない。一定のノイズがあるもとで拡張性のある議論をするためには、ノイズを克服する方法である量子誤り訂正や誤り耐性量子計算を待つ必要があるだろう。今回の実験で示された精度は、量子誤り訂正を実行するに十分なレベルに到達しつつあり、今後の展開に注目したい。

参考文献

- 1) Arute, F. et al. : Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor, Nature 574, pp.505-510 (2019).
- 2) Preskill, J. : Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor, arXiv:1203.5813 (2012).
- 3) 藤井啓祐：最近のトピック：量子コンピュータを用いた量子超越実験で示されたこと、物理学会誌 (2020).
- 4) 特集 量子コンピュータ、オペレーションズ・リサーチ 6月号, Vol.63, No.6 (2018).
- 5) 藤井啓祐：驚異の量子コンピュータ—宇宙最強マシンへの挑戦—、岩波科学ライブラリー (2019).
- 6) Harrow, A., W. and Montanaro, A. : Quantum Computational Supremacy, Nature 549, pp.203-209 (2017).

(2019年12月22日受付)

藤井啓祐 fujii@qc.ee.es.osaka-u.ac.jp

2011年京都大学大学院工学研究科 博士課程終了。博士（工学）。大阪大学大学院基礎工学研究科 特別研究員（2011～2013）、京都大学白眉センター 特定助教（2013～2016）、東京大学光量子科学研究センター 助教（2016～2017）、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻、特定准教授（2017～2019）を経て、2019年から、大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻、教授。JST さきがけ研究員、情報処理推進機構（IPA）未踏ターゲット事業プログラムマネージャーを兼任。量子コンピュータのソフトウェアベンチャー、(株) QunaSys、最高技術顧問。専門分野は量子情報、量子コンピューティング。特に、量子誤り訂正、誤り耐性量子計算、測定型量子計算、量子計算複雑性、量子機械学習。