

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

2019年9月にNASAのサーバーから論文がリークしたことで、Googleの量子超越実験が一気に話題に上がった。その後、10月に入りNature誌から正式に発表された。¹⁾ さすがに、ビットコインが一時的に暴落するといった反応は過剰な反応であろう。しかし、これまでいつまでたっても実現できないと言われてきた量子コンピュータが、やっとスーパーコンピュータを用いてその性能を検証するようなレベルにまで到達したという。本稿では、今回Googleがどのような実験を行いそれが何を意味するのかを解説したい。

量子超越 (quantum computational supremacy) という言葉が初めてでてきたのは、2011年に行われたJohn Preskillによる“Quantum computing and the entanglement frontier”と題した講演である。²⁾ 量子情報科学とは、究極的に複雑にエンタングルした量子状態が織りなす世界、つまり“entanglement frontier”を探索する分野である。物理学では古くから、マクロな系は古典的に、ミクロな系は量子的に記述される (そしてそれらは整合性がとれると期待される) としてきた。一方で、数学的にも、実験的にもまだ完全には示されていないが、「古典系は量子系を効率よくシミュレーションすることができない」と多くの研究者が信じている。このような量子と古典の世界で大きな違いが生じる量子超越の時代、つまり、古典コンピュータではできないタスクを制御された量子系がこなすようなことができる時代を少しでも早く実現したい、というのが我々量子情報科学分野の研究者の夢である。そして、それが実現されると、我々のような古典的な思考では予想もできないような、自然科学の前進や量子技術による恩恵がもたらされるような未来が期待されるであろう。というのがこの講演の趣旨である。この講演の最後には、このような量子超越に比較的小さな物理系、すなわち近未来的に実験的に実現可能な100量子ビット規模の量子系で到達するための最善の方法は何だろうか? と問いかけられている。今回の実験はこの問いかけに現在の最高レベルの量子系の制御技術を用いて答えたものである。

単に、古典コンピュータではシミュレーションが難しい系を実現する、というだけならば人間の脳やコップの中の水なども量子超越と呼べってしまうことになる。また、これまで量子シミュレーションや量子アニーリングマシンなど、ある程度制御性のある量子多体系の実験も行われてきた。よく考えてみると、既存の実験系が量子超越に到達していた、ということであれば今回の実験の凄さは半減するであ

ろう。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、現在のスーパーコンピュータと比べ圧倒的に速くタスクを実行できること。

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。

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量子ビット演算を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。ショアによる素因数分解アルゴリズムなど、計算の加速が理論的に示されている (素因数分解問題が古典コンピュータで多項式時間で解けない限り) 量子アルゴリズムを利用しないのは、こういった複雑なアルゴリズムを実行するには、量子ビット数も少なくノイズレベルもまだ大きいからである。

さて、このようなランダム量子回路の後に測定をすると、一様分布とは全く異なり、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、というのを実験的に検証することになる。具体的には、 n 量子ビットのランダム量子回路 U に対するサンプリングで i 回目得られたビット列を $x_i \in \{0, 1\}^n$ とし、

$$F_{\text{XEB}} = 2^n \frac{1}{M} \sum_i P(x_i) - 1 \quad (1)$$

なる値を計算する。ここで M はサンプリングの回数とし、 $P(x)$ はビット列 x を得る確率 $P(x) \equiv |\langle x | U | 0 \rangle|^2$ とし、この値は古典コンピュータを用いて計算する。実験には様々なノイズがあるが、測定前の状態が、忠実度 F と理想的な場合の量子状態 ρ_{ideal} を用いて、

$$\rho_{\text{noise}} = F\rho_{\text{ideal}} + (1-F)\rho_{\text{res}} \quad (2)$$

と書けると仮定し、またランダム量子回路が完全にランダムであるという仮定をすると、 F_{XEB} は F に収束する。ノイズにおける仮定とランダム量子回路における仮定は、かな

り強いものであり実験的には満たされていないが、例えば、シミュレータを用いて16量子ビットおよび25量子ビットで個々の1量子ビット演算や2量子ビット演算に確率 p でノイズを導入し一つのランダム量子回路のインスタンスに対して F および F_{XEB} をためしに計算してみたが、両者はよく一致しており、また、パラメータ p から計算される忠実度の下限値、 $F_{\text{pre}} = (1-p)^{N_{1Q}+N_{2Q}}(1-2p/3)^{N_m}$ (N_{1Q} , N_{2Q} , N_m はそれぞれ、1量子ビット演算、2量子ビット演算、測定回数)ともよく一致している。³⁾

実験では、一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に対してその平均 \bar{F}_{XEB} を計算している。10⁶回サンプリングするのに要する時間は200秒程度である。 \bar{F}_{XEB} の計算には、 $P(x)$ そのものを計算する必要があるが、回路の深さ、量子ビット数、量子回路の構造を変えてシミュレーションを容易にした場合に対して、 \bar{F}_{XEB} を計算し、この値が実験的に個々の演算の忠実度の推定から得られたパラメータを用いて計算された予測値 F_{pre} とよく一致していることが確認されている。

実際に量子ビット数を最大である53にし、量子回路の深さを20サイクル ($N_{1Q}=1,113$, $N_{2Q}=430$, $N_n=53$)として、古典コンピュータにとって最も難しいランダム量子回路のパターンにすると、 \bar{F}_{XEB} は直接的に推定することはできないが、 \bar{F}_{XEB} と F_{pre} と F が一致するとすると、全体の忠実度は0.1%を上回ると間接的に結論づけられる。実験データは公開されているので、より高速な古典シミュレーション法が存在すれば、 \bar{F}_{XEB} 値を計算することもできるだろう。

では、ランダム量子回路のサンプリングがどの程度古典コンピュータにとって難しいであろうか。計算機複雑性の分野では、問題サイズに対して、どのような関数で計算時間がかかるか、というスケーリングの観点から計算の複雑さを定量化することが多い。また、計算時間の見積もりについても、特定の既知のアルゴリズムを前提とすることなく、計算機科学的に信頼性のある仮定に基づいてスケーリングの下限などを求めることを目指している。⁴⁾ 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、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。

今回の実験では、既知のシミュレーション方法を用いて、

一定の忠実度0.1%のランダム量子回路をサンプリングするのに要する時間を求めている。古典シミュレーション手法としては、53量子ビットがもつ 2^{53} 次元の複素ベクトルをすべて確保すると単精度であっても64PBのメモリを要することから、ベクトルをすべて確保する方法ではなく、経路積分法のように特定のパスの計算を行い、それを最後に足しあげるという手法を採用して見積もりを行っている。忠実度が0.1%程度でよいことも考慮すると、古典シミュレーションに要する時間も小さくなり、53量子ビット、20サイクルのランダム量子回路の場合には約 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。

これに対してGoogle論文に関する情報がNASAからリークしてすぐにIBMのスパコンチームからの反論があった。一次記憶だけではなく、二次記憶(ディスクメモリ)も用いれば、ベクトルの要素すべてを確保することができ約2.5日でシミュレーションできるという指摘である。Googleの論文における見積もりとも整合性がとれており、この見積もりは妥当であろう。これに対して、Googleの実験チームを率いるJohn Martinisは発表後行った講演で、実験データはすべてウェブ上で誰もがアクセスできるようにしているので、スパコンを使った数値実験で検証してもらいたいと言っている。また、現在57量子ビットも稼働しており近々そのデータも出てくるであろうとも言っていた。忠実度に関しても、今後精度の改善の余地が十分にあるとしており、今後の展開に注視したい。

今回の実験では量子超越、という標語がバズワード的に広がっている感が否めない。しかし、今回実験的に示された、2次元平面に並べられた量子ビットに対して99%を超える忠実度の量子演算が実現し、そのノイズは局所的なものである(個々の演算のノイズから全体の忠実度が決まる)ということは、量子誤り訂正の条件を満たしている重要なメッセージでもある。次のマイルストーンは間違いなく、量子誤り訂正の実現とそれによって物理的なコヒーレンス時間を超えて量子情報を保持し続けることであろう。

参考文献

- 1) F. Arute et al., Nature **574**, 505 (2019).
- 2) J. Preskill, arXiv:1203.5813 (2012).
- 3) https://github.com/keisukefujii/LXEB_qulacs/blob/master/LXEB_qulacs.ipynb
- 4) A. W. Harrow and A. Montanaro, Nature **549**, 203 (2017).

藤井啓祐(大阪大学大学院基礎工学研究科 fujii@qc.ee.es.osaka-u.ac.jp)
(2019年12月11日原稿受付)