

# 量子回路シミュレータの性能分析とモデル化による性能推定

青木 望美 (指導教員：小口 正人)

## 1 はじめに

量子コンピュータは量子の性質を利用したコンピュータであり、素因数分解などの一部の問題について高速な計算が可能であると言われている。しかし量子は非常に繊細なためノイズの影響を受けやすく、現存する量子コンピュータでは完璧で実用的な挙動をする段階には達していない。量子回路シミュレータは従来型コンピュータ上で量子コンピュータの挙動を表現するシミュレータであり、量子コンピュータ実機の研究と同時並行的に量子アプリの開発をする際などに有用である。しかし、量子回路シミュレータ間の性能特性は明らかでなく、また量子回路実行時間の推定も困難な場合が多い。

本研究では複数種類の量子回路シミュレータの性能分析を行うとともに、一部シミュレータの量子回路実行時間の推定を可能にするモデルの提案と精度の検証を行う。これにより、量子回路シミュレータ実行時の効率的な計算資源利用への貢献を図る。

## 2 実験

### 2.1 実験概要

シミュレータ間の性能特性比較では、ランダムな量子回路(QV[4]回路)、シーケンシャルな量子回路(QSB[2]回路)の2種類を使用する。使用する量子回路シミュレータはQiskit Aer[1], Qulacs[3], mpiQulacs[5]の3つであり、実験サーバはRX2540サーバ、FX700サーバ、S9200サーバの3つである。ただし、mpiQulacsはFX700サーバでのみ動作させる。

量子回路実行時間の数式モデル作成において、1量子ゲートを対象に以下の回路について実行時間の計測を行う。分析対象の量子回路シミュレータはQulacs、実験環境はFX700サーバである。

- 1qubitにつきひとつ、1種類の1量子ゲートを作用させる(実験1)
- 1qubitにつき指定した数だけ、1種類の1量子ゲートを作用させる(実験2)
- 指定したqubitにひとつ、1種類の1量子ゲートを作用させる(実験3)

### 2.2 実験結果

#### 2.2.1 性能特性比較

はじめに量子回路実行時間について、測定結果を表1に示す。

また、量子回路実行中、全てのシミュレータ、環境でユーザ時間割合は100%近い値であった。

キャッシュミス率は一般に低いほど性能が良いとされるが、量子回路シミュレータでの計測では高速に動作するシミュレータほどキャッシュミス率が高い場合があり、キャッシュミス率を低く抑えるほど性能を引き出すことができるとは限らない可能性がある。

表 1: 量子回路実行時間 (秒)

サーバ名	Qiskit Aer		Qulacs		mpiQulacs	
	QV	QSB	QV	QSB	QV	QSB
RX2540	129.1	280.7	119.0	233.8	-	-
FX700	77.5	223.5	49.5	57.0	19.5	27.4
S9200	34.0	70.3	44.1	81.6	-	-

最後に、メモリバンド幅はRX2540サーバとFX700サーバの2つの環境において、Qiskit AerよりもQulacsとmpiQulacsの方がメモリバンド幅の値が高く、高速に動作しているという結果であった。しかしS9200サーバ環境においてはメモリバンド幅の値が低いQiskit Aerシミュレータの方が高速に動作していた。量子回路シミュレータのメモリアクセスと演算を繰り返す動作から、メモリバンド幅を引き出すことで高速化に繋がると考えられたが、この点はさらに詳細な分析が必要と考えられる。

#### 2.2.2 モデル化のための実験結果と提案モデルの検証

実験1の結果を図1に示す。この結果から、いずれの1量子ゲートも実行時間の類似性が高いと考えられる。量子回路実行時間は、その伸び方から、1qubitから12qubit、13qubitから20qubit、21qubitから29qubitの3段階に大きく分けられる。これはFX700サーバのキャッシュ容量の影響であると考えられる。

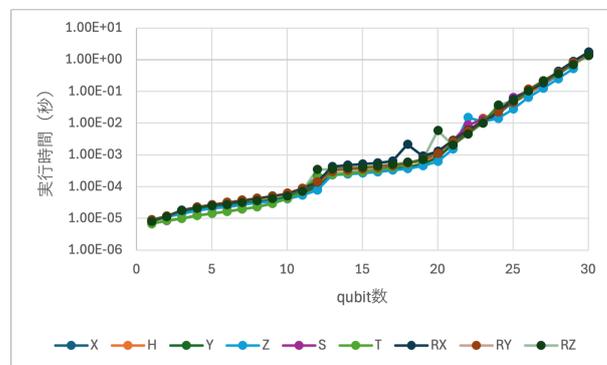


図 1: 実験1 実験結果

実験2の結果を図2に示す。グラフ中のqubit数は25から29個、量子ゲートはXゲートである。この結果から、適用する1量子ゲートをひとつずつ増やすと実行時間が線形に伸びることがわかる。

また実験3の結果、target qubitに関わらず、実行時間の伸び方は実験1の結果と同様であった。

これらの結果を踏まえ、量子回路実行時間推定のための数式モデルを以下の3通り作成した。これらのモデルを、上から順にモデル1、モデル2、モデル3とする。なお、このグループ分けは後述のモデルにおける係数等の値を回帰分析で求める際に利用する。

- 1-11qubit は線形、13-20qubit、21-29qubit は指

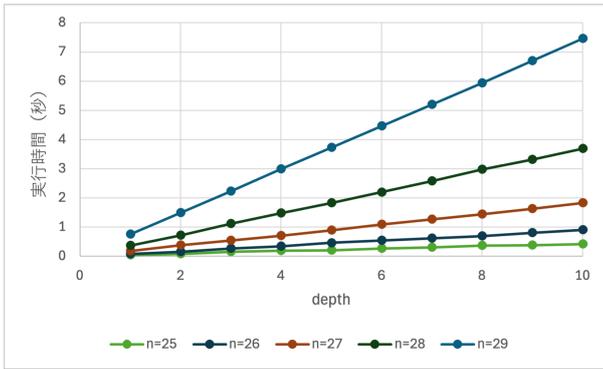


図 2: 実験 2 実験結果

数的

- 1-11qubit, 13-20qubit, 21-29qubit すべて指数的
- 1-12qubit, 13-20qubit, 21-29qubit すべて指数的

例として、指数的モデルは  $T$  を量子回路実行時間、 $N$  を量子ビット総数、 $n$  を target qubit 番号の最大値、 $d$  を target qubit に作用させる 1 量子ゲートの個数としたとき、以下のように近似できると考えられる。  $a_k$  と  $b_k$  は target qubit ごとに与えられる。

$$T = \sum_{k=1}^n (a_k \times 2^N + b_k) \times d$$

提案した 3 つのモデルに基づいて予測した量子回路実行時間と実際の量子回路実行時間を比較したグラフを図 3 に示す。この結果から、21 から 23qubit の予測時間は実際の実行時間との乖離がわずかに大きく感じられる。

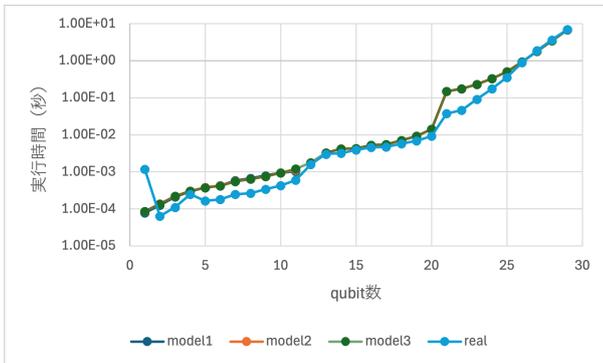


図 3: 提案モデル 3 種類による推定時間と実際の実行時間の比較

最後に、3 つのモデル間の予測精度を、1 から 11qubit の範囲について、実際の実行時間との平均二乗誤差をとる形で比較した。その結果を表 2 に示す。この結果から、qubit 数が 12 の場合を除外し、すべてのグループを指数的モデルで表現したモデル 2 が最も精度が良いことがわかる。

### 3 まとめと今後の課題

本研究ではまず、3 種類の量子回路シミュレータを複数の環境下で性能分析し、その特性の比較を行った。

表 2: 提案モデルの精度比較

モデル	平均二乗誤差
モデル 1	$2.11 \times 10^{-7}$
モデル 2	$2.09 \times 10^{-7}$
モデル 3	$2.17 \times 10^{-7}$

その結果、環境によって処理が高速なシミュレータが異なり、ひとつの環境下ではメモリバンド幅を引き出しているほど処理が高速であるという仮説と異なる結果が出たため、これらの点についてはさらに詳細な分析が必要と考えられる。

続いて行った量子回路実行時間推定モデルの作成では、提案した 3 モデルのうち、12qubit を含まず、すべてのグループを指数的モデルで著したモデルが最も精度が良いことがわかった。しかし、21 から 23qubit の範囲の予測精度はまだ改善の余地があると考えられる。

今後は量子回路シミュレータの計算資源の有効活用に向け、メモリバンド幅などについてのさらに詳細な分析を行い、性能向上に向けたアプローチの模索を行う。また、量子回路実行時間の推定を行う数式モデルのさらなる精度向上に向け、他のアプローチの検討を行う。さらに、他の実験環境におけるモデルの作成と比較を行う。

### 謝辞

本研究の一部はお茶の水女子大学と富士通株式会社との共同研究契約に基づくものであり、JST CREST JPMJCR22M2 の支援を受けたものである。

### 参考文献

- [1] Qiskit Aer simulator, [https://qiskit.org/documentation/tutorials/simulators/1\\_aer\\_provider.html](https://qiskit.org/documentation/tutorials/simulators/1_aer_provider.html).
- [2] Quantum Software Benchmarks, <https://github.com/yarostiq/quantum-benchmarks>.
- [3] Qulacs ドキュメンテーション - Qulacs ドキュメント, <http://docs.qulacs.org/ja/latest/index.html>.
- [4] Cross, A. W., Bishop, L. S., Sheldon, S., Nation, P. D. and Gambetta, J. M.: Validating quantum computers using randomized model circuits, *Phys. Rev. A*, Vol. Vol. 100, p. p.32328(online) (2019), DOI: 10.1103/PhysRevA.100.032328.
- [5] Satoshi, I., Masafumi, Y., Takumi, H., Akihiko, K., Akihiro, T., Hiroshi, N., Naoto, F. and Kohta, N.: mpiQulacs: A Distributed Quantum Computer Simulator for A64FX-based Cluster Systems, *Distributed, Parallel, and Cluster Computing* (2022).