



万能量子コンピュータの商用化動向



日本アイ・ビー・エム株式会社
東京基礎研究所 副所長
技術理事

おの だ ま
小野寺 民也



日本アイ・ビー・エム株式会社
研究開発
課長

ぬ ま た き ぶ み
沼田 祈史

1. はじめに

1981年5月にマサチューセッツ工科大学コンピュータ科学研究所とIBMは、「計算の物理」会議を共催した^[1]。著名な物理学者とコンピュータ科学者が一堂に会し、コンピュータの構成部品の微細化が進行するなかで、その限界と可能性が議論されたという。その中で、ノーベル物理学受賞者のリチャード・ファインマンは「自然は古典的ではない、自然をシミュレーションするなら、量子力学に基づいたものにするのがよい」と発言し、これが今日の量子コンピュータの起源とされる。

それから30有余年、量子コンピュータは、理論上のものから、ついに小規模ながら実存するものとなった。実際、IBMは執筆時点で5量子ビット及び16量子ビットの量子コンピュータをIBM Cloudから無償で誰でもアクセス可能にし、様々な実験ができる環境を提供している。

実機の出現とともに急速に量子コンピュータへの関心が高まっているが、その理由は、これまでのコンピュータ（古典コンピュータと呼ぶ）とは全く違う原理で動作し、ある程度の規模になれば古典コンピュータを遥かに凌ぐ驚異的な超並列計算が可能になると考えられているからである。

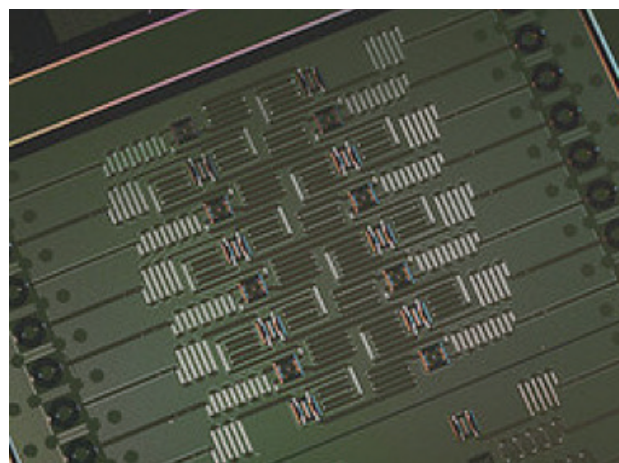
本稿では、量子コンピュータの商用化を目指す取組みである「IBM Q」について、ハードウェア、ソフトウェア、顧客との共創のネットワーク、の3つの点から、解説する。

2. 量子コンピュータのハードウェア

量子コンピュータは、重ね合わせや量子もつれといった量子系に固有の状態を生成し制御して、計算を行う。計算単位としての量子2準位系、すなわち量子ビットをどのように物理的に構成するかについては、超電導、イオントラップ、量子ドット、トポロジカル等、いくつかの方式が知られている。

IBMは超電導量子ビットを採用しており、5量子ビットのものを2016年5月に^[2]、16量子ビットのものを2017年5月に^[3]、

20量子ビットのものと50量子ビットのプロトタイプを2017年11月に発表している^[4]。図1に量子ビットと共振器を搭載したチップを示す。図2は希釈冷凍機であり、最上部は室温だが段階的に冷却され最低部では15ミリKになっており、そこにチップが装着される。



■ 図1. 量子ビットと共振器を搭載したチップ



■ 図2. IBMの量子コンピュータ外観
(希釈冷凍機の下半分を外したところ)



万能量子コンピュータにおいては、量子ビットの数だけでなく、質も極めて重要である。コヒーレンス時間、ゲート操作時間、ゲート操作エラー率、などの観点があり、それぞれ、長いほど、短いほど、小さいほど、質は高い。コヒーレンス時間は、量子ビットが量子状態を保持できる時間である。量子状態は壊れやすく保持できる時間には限りがあり、超電導量子ビットでは100マイクロ秒程度と言われている。また、量子計算は各量子ビットに種々のゲート操作を施しつつ進行するが、ゲート操作時間は1つのゲート操作に要する時間で、超電導量子ビットでは10から100ナノ秒程度と言われている。最後に、量子状態の制御は困難であり、ゲート操作は常に正しく行うことができるわけではなく、超電導量子ビットではゲート操作の種類に応じ0.数%から数%程度の割合でエラーを伴う。超電導ビットに関するこれらの数字は執筆時点のものであり、研究者の絶え間ない努力により改善していくものと思われる。また、上述のように量子ビットの構成方式には様々あるが、一般に、コヒーレンス時間が長ければゲート操作時間も長くなる、といったトレードオフの関係がある。

これまで述べてきたことからわかるように、現在の量子コンピュータは、量子ビットの質の点から近似的 (approximate) であり、数の点から小規模であると言われる。現時点で、古典コンピュータで解けない問題が解けるようになるわけでない。とはいえ、万能量子コンピュータではエラー訂正アルゴリズムが知られていることから、いずれエラー耐性があり (fault tolerant) かつ数百万ビットから数十億ビットを有する大規模な量子コンピュータが登場するものと考えられており、そうなれば、例えば、量子アルゴリズムで最も有名なショアの素因数分解を動かして、2048ビットのRSA暗号を破ることができるようになるだろう。しかし、そこまでの量子コンピュータを作り上げるには、無数のチャレンジがあり、数十年先というのが多くの専門家の見立てである。

ではなぜ量子コンピュータに未曾有の注目が集まっているのかといえば、数年後にも、近似的ではあるが中規模のものが出現するという期待があるからである。仮に100量子ビットのものが登場したとすれば、潜在力として、現在のスーパーコンピュータ比で2の70乗倍の超並列計算パワーを有するものになると考えられている。まさに想像を絶するパワーであり、今は到底解くことができない問題が解けるようになる可能性がある。ただし、そのような問題に対する量子アルゴリズムがなくてはならず、かつ、近似的な量子コンピュータで動かせるものでなくてはならない。

量子アルゴリズムの設計には、これまでとはまったく違う発

想と専門知識が必要になる。近似的中規模量子コンピュータで解くべきビジネス価値のある問題はなにか、量子アルゴリズムはどのようなものになるか、近似的量子コンピュータでどのように動かすのか、こうした課題に、世界の先進的な企業は、今から、すなわち、近似的小規模量子コンピュータを用いて、実験を重ね経験を蓄積しているのである。

3. 量子コンピュータのソフトウェア

量子コンピュータの進歩に伴い、その計算能力を最大限に引き出すためのソフトウェア技術の研究開発も進んでいる。量子コンピュータを開発している複数の企業や研究所から、量子プログラミング言語やソフトウェア開発キット (SDK) が公開されているが、プログラミングした結果をシミュレーターではなく、実機の量子コンピュータで試せる環境を無償公開しているのは、まだ限られた企業のみである。IBMが他社に先駆けて世界で初めてIBM Qを無償公開してからすでに2年がたち、ユーザー数は南極を含む7大陸全てから10万2000人以上、実験回数は約660万回、関連する論文が110本以上執筆されているなど、これまでの利用実績も高い (2018年11月現在)。

実際にIBM Qにアクセスして、量子計算させる方法は2種類あり、1つは、ウェブ・ブラウザからIBM Q Experience (QX)^[5] を使ってアクセスする方法、もう1つはPythonを使ったSDKであるQiskit (Quantum Information Science Kit)^[6] を用いる方法である。

QXは、プログラムなどのインストールなしに、アカウント登録だけでウェブ・ブラウザから手軽に誰でも量子計算が体験できる。執筆時点で5量子ビットの実機と20量子ビットの量子シミュレーターに対応している。

QXのメインとなるプログラミング画面である「Composer」は、5量子ビットの場合、音楽の五線譜のようなユーザインタフェースである (図3 (a))。右側に並んでいる量子演算ゲートを選択して、ドラッグ・アンド・ドロップで五線譜の上に置いてアルゴリズムを組んでいく。図3 (a) の回路は、ベル状態と呼ばれる $(|00\rangle + |11\rangle) / \sqrt{2}$ の状態を生成するプログラムをQX上で実装したものである。q [1] ビットにアダマールゲートHを操作し、CNOTの制御ゲートをq [1] に、目標ゲートをq [0] に操作した結果をc [0]、c [1] レジスターに格納するという計算である。

実行すると、既に誰かが同じ計算を行っている場合は、結果のキャッシュがあるのでそれを選択することで結果が確認できる。新たに実行したい場合、また、誰も思いつかなかっ



たアルゴリズムを作成した場合には、メールで結果が返ってくる。量子シミュレーションを選択した場合は、即時結果が表示される。図3 (b) は、図3 (a) の量子回路をシミュレーションで、また図3 (c) は実機で、それぞれ1,024回実行した結果の確率のグラフである。IBM Qを含め、現在の量子コンピュータは、近似的であり、ゲートの操作過程などによるエラーが含まれ、今回の結果も同様であることが分かる。

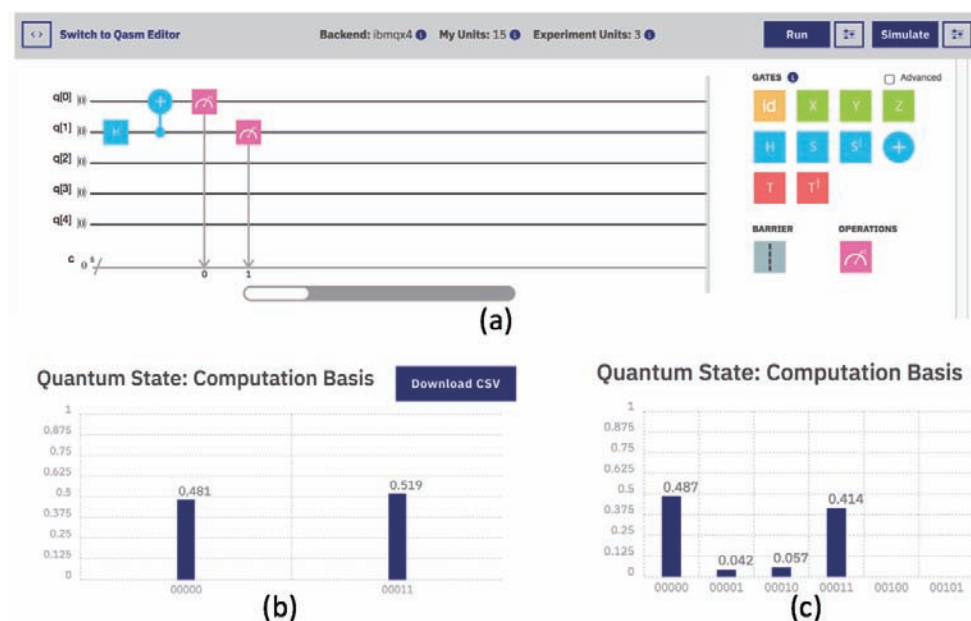
もう1つのプログラミングツールである、Python用SDKのQiskitは、量子実験や量子アルゴリズム、量子アプリケーションを作成するためのオープンフレームワークであり、QXより複雑なプログラミングが可能である。執筆時点で、無償でアクセス可能な実機は16量子ビットまで、量子シミュレーターは

32量子ビットまでである。Qiskitは、Terra、Aquaなどの要素で構成され、そのうち最も基本的な機能を持つQiskit Terraは、量子プログラミング言語であるOpenQASMを使って量子回路レベルでのプログラミングを行う。Qiskit Aquaは、アルゴリズムやアプリケーションを開発するためのもので、現時点で化学計算、人工知能、最適化などのライブラリーがあり、量子プログラミング言語は使わずに、PythonまたはGUIを利用した計算が可能となる。

Qiskit Terraのインストールは以下のとおりである (Python 3.5以上に対応)。

```
$ pip install qiskit
```

図4は、図3と同様にベル状態をQiskitで生成し、手元の



■図3. IBM Q Experienceでの実装例と実行結果 (a) Composer画面 (b) シミュレーション結果 (c) 実機での結果

```
from qiskit import QuantumRegister, ClassicalRegister
from qiskit import QuantumCircuit, Aer, execute

q = QuantumRegister(2)
c = ClassicalRegister(2)
qc = QuantumCircuit(q, c)

qc.h(q[0])
qc.cx(q[0], q[1])
qc.measure(q, c)

backend = Aer.get_backend('qasm_simulator')
job_sim = execute(qc, backend)
sim_result = job_sim.result()

print(sim_result.get_counts(qc))
```

■図4. Qiskitでベル状態を量子シミュレーションするプログラム例



マシンで量子シミュレーション計算を行うプログラム例である。

Qiskitから実機の量子コンピュータで計算を実行するためには、QXのユーザーアカウントが必要となる。QXのアカウント情報から得られるIBM QのAPIトークンをプログラムに追加し、実行するバックエンドデバイスにシミュレーターではなく実機を指定することで実機計算が実行できる。

QX、Qiskitともに、豊富なチュートリアルが公開されており、グローバー、ショアのアルゴリズムといった有名なものから、近似的小規模量子コンピュータ向けのアルゴリズム（例えば、量子化学計算など）まで掲載されている。これらを参考に独自のプログラミングが可能となっている。

4. IBM Qネットワーク

2017年12月に発足したIBM Qネットワーク^[7]は、量子コンピュータの商用化をIBMと共に推進する先進的企業の集まりで、海外からは、JPモルガン・チェース、パークレイズといった金融サービス業、ダイムラー、サムスンといった製造業、などの企業が参画している。また、世界の各拠点にハブを設け、各ハブの下にメンバー企業が加入する形態も整えており、例えば、欧州ではオックスフォード大学、米国ではオークリッジ国立研究所、日本では慶應義塾大学がハブとなっている。

2017年5月には、IBM Qネットワーク・ハブ@慶應義塾大学が、JSR株式会社、三菱UFJフィナンシャルグループ、みずほフィナンシャルグループ、三菱ケミカル株式会社の4社をメンバー企業に迎えて正式に発足した^[8]。メンバー企業は最上位のIBM量子コンピュータ（執筆時点では20量子ビット）のアクセス権を有し、慶應義塾大学量子コンピューティングセンターの教授及びIBMの研究者と共に、ビジネス利用に向けた共創活動を行っている。具体的には、第2章で述べたように、近似的中規模量子コンピュータで解くべきビジネス価値ある問題はなにか、量子アルゴリズムはどのようなものになるか、近似的量子コンピュータでどのように動かすのか、といった課題に取り組み、近似的小規模量子コンピュータの最上位のものをを用いて実験を重ねている。

5. 今後の展望

量子コンピュータは、数年で近似的中規模のマシンが開発され、今のスパコンでは解けない問題でかつ、ビジネス価値のある問題が解けるようになると考えられている。問題領域としては、量子化学、機械学習、最適化の3つであろうというのが多くの専門家が指摘するところである。量子コンピュータによって実現されるであろう速度向上については、量子化学と機械学習では指数的上昇が期待されているが、最適化の方は近似解においても数倍程度であろうと考えられている。いずれにせよ、現在は、近似的中規模量子コンピュータで解くことのできる具体的な問題を探している段階である。適切な問題を探し出すことができれば、業界を一変させるようなインパクトを持つこともあり得る。今後の展開が楽しみである。

参考文献

- [1] The Massachusetts Institute of Technology, “The Physics of Computation Conference”, <https://mitendicottthouse.org/physics-computation-conference/>
- [2] IBM, “IBM Makes Quantum Computing Available on IBM Cloud to Accelerate Innovation”, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/49661.wss>
- [3] IBM, “IBM Builds Its Most Powerful Universal Quantum Computing Processors”, <https://www-03.ibm.com/press/uk/en/pressrelease/52582.wss>
- [4] IBM, “IBM Announces Advances to IBM Quantum Systems & Ecosystem”, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53374.wss>
- [5] IBM, “IBM Q Experience”, <https://quantumexperience.ng.bluemix.net>
- [6] QISKit, “Quantum Information Software Kit”, <https://www.qiskit.org/>
- [7] IBM, “IBM Announces Collaboration with Leading Fortune 500 Companies, Academic Institutions and National Research Labs to Accelerate Quantum Computing”, <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/53483.wss>
- [8] IBM, “IBM and Keio University Announce Collaborations with JSR, MUFG Bank, Mizuho Financial Group and Mitsubishi Chemical to Accelerate Quantum Computing in Japan”, <https://newsroom.ibm.com/2018-05-17-IBM-and-Keio-University-Announce-Collaborations-with-JSR-MUFG-Bank-Mizuho-Financial-Group-and-Mitsubishi-Chemical-to-Accelerate-Quantum-Computing-in-Japan>