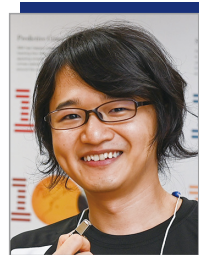


[面白い量子技術]

# 9 量子コンピュータハッカソン —コミュニティによる量子人材育成—



小林有里



松尾惇士



沼田祈史

IBM Research - Tokyo

## 量子人材育成の必要性

量子コンピュータは、従来のコンピューティング手法とは根本的に異なる仕組みを使って計算を行う新しいコンピュータだ。IBMは2016年に世界で初めてクラウド型量子コンピュータを無償公開した。この量子デバイス上での量子計算を可能とするオープンソースの量子ソフトウェア開発キットであるQiskitは、現在までに、50万回以上ダウンロードされ、ユーザは28万人を超える。また、世界最大の30台の量子コンピュータを常時稼働させ、これまでに、数千億の量子回路を実行している。現在、研究開発段階にある量子コンピュータだが、今後、量子コンピュータの技術革新が進むと、その得意とする分野では従来型コンピュータを凌駕する性能を持つことが期待されている。たとえば、分子的または化学的相互作用プロセスの解明、困難な最適化問題への対処、人工知能の能力向上などが、近い将来の応用分野として挙げられる。

一方、量子コンピュータに関する専門教育は近年まだ始まったばかりであり、現在同分野で活躍する研究者や開発者の多くは、「物理、工学、情報科学等の専門教育をそれぞれに受けた人たちが、ある時点で量子コンピューティングにかかわることになり、互いの専門領域を学び合いながら」<sup>1)</sup> 技術の発展に取り組んでいる。

量子コンピューティングを専門的に学んできた人材は限られており、社会の実課題の解決に役立つ量子アルゴリズムの実装が可能となる(量子アドバンテージ)の時代がすぐそこまで来ていると試算<sup>2)</sup>される中、量子コンピューティングの未来を担う人材の育成と確保は重要な課題の1つとなっている。

学生や個人が量子コンピューティングを使用できるようになり、量子コンピューティング業界全体の技術力を高め、また将来を支える優秀な人材の育成のために何が必要とされているのか、具体的な取り組みを紹介する。

## 合宿型のハッカソン Qiskit Camp

ハッカソンとは、あるテーマに沿って、短期間集中型でプログラミングを行うイベントである。その場で開発される新しいアプリケーションやサービスによる実用的な利点だけでなく、参加者のスキル向上も期待できる。特に専門の教育が始まってまだ日の浅い量子コンピューティングの分野においては、この教育的側面が強く、また優秀な人材を発掘する場ともなる。

IBMは2019年に世界4都市で量子コンピューティングのための合宿型ハッカソンを行っている。参加者は短期間でQiskitを使った量子コンピューティングスキルを磨く機会が得られ、またさまざまなバックグラウンド

を持つメンバとチームを組み、第一線の研究者からコーチを受けながらプロジェクトに取り組むことができる。日本では Qiskit Camp Asia として、2019 年 11 月 18 日から 4 日間、主にアジア地域の 16 カ国から、約 150 人の学生、研究者を集めて山梨県で合宿を行った。上位入賞したチームのプロジェクトは量子コンピュータのデバイスを制御するプログラムの開発や量子機械学習、量子最適化のアプリケーション、また量子ゲームなど幅広い分野に及び、新機能の実装によるオープンソースコミュニティへの貢献につながっている。

## オンラインの 量子プログラミングコンテスト

### Quantum Challenge の概要

IBM Quantum Challenge はオンライン型の量子コンピュータをつかったプログラミングコンテストとして 2019 年 9 月に第 1 回が開催され、世界 30 カ国以上から 800 名近くが参加した。第 2 回目の IBM Quantum Challenge が 2020 年 5 月、IBM の量子コンピュータがクラウド上に公開されてから 4 周年を記念するイベントとして開催され、1,745 名が 45 カ国から参加し、イベント期間中の 4 日間で、量子計算が 1 日合計 10 億回以上実行される快挙を成し遂げた。2020 年 11 月には第 3 回目の IBM Quantum Challenge が開催され、限定 2,000 人枠をめぐり世界 85 カ国から 3,300 名以上が応募するまでに成長した。

### 初年度 (2019 年) の演習問題

オンライン型量子プログラミングコンテスト IBM

■表 -1 2019 年度 Quantum Challenge の演習課題

	演習課題
第 1 週	量子計算の基礎 (量子ゲート, 量子回路, 半加算器の構築)
第 2 週	量子アルゴリズムの学習 (グローバーのアルゴリズム)
第 3 週	量子アルゴリズムの応用 (グローバーのアルゴリズムを使った Max Cut 問題)
第 4 週 (本戦)	量子アルゴリズムをつかって複数のコンビニエンスストア・チェーンを市に誘致する出店計画を立案

Quantum Challenge は、量子コンピューティングにまだ触れたことのない未経験者が、量子コンピュータの基礎から応用までを段階的に学習できるようにすることを目的としている。最初の数週間で実習を通じて量子プログラミングや量子アルゴリズムについて学んだあと、最終週では他の参加者と量子プログラムの効率を競い合う。表 -1 に 2019 年度の Quantum Challenge の週毎の演習問題課題を示した。

詳細は <https://github.com/quantum-challenge/2019> を参照のこと。次項では本戦の問題について解説する。

### 2019 年度の最終問題「コンビニ出店問題」

「IBM Quantum Challenge 2019」の最終問題は、前週までに学んだ知識やスキルを総動員して取り組む前提となっている。具体的な出題内容は以下のとおりである。

「東京の Z 市は 11 の区域からなる自治体で、すでに 4 社のコンビニ (A 社, B 社, C 社, D 社) が本社の 1 店舗を別々の区域に展開しています。

現在の出店状況は地図の通りです。地図上の各ノード (頂点) はそれぞれの区域を表しており、地図上のエッジ (線分) は、エッジの両端の区域が隣り合っていることを表しています。」(図 -1 参照)

これは「自治体のコンビニ出店プランを提示せよ」という問題で、複数のコンビニエンスストア・チェーンを市に誘致する際、各チェーン店舗 (色で示されている) から「同じチェーン店が隣接しないようにしてほしい」という条件を提示され、この条件に合致する出店計画の立案をせよという内容である。

グローバーのアルゴリズムと呼ばれる有名な量子アルゴリズムを用いて、問題の制約に基づく判定関数 (以下「オラクル」と呼ぶ) を構成することが問題を解く鍵となる。

この問題を数学的に考えると、「グラフの頂点彩色問題」として捉えることができる。グラフの頂点彩色とは、グラフの頂点に、ある制約条件を満たすように色を割り当てることであり、ここでは隣接するノードが同じ色

## 特集 Special Feature

とならないよう色を割り当てるのが制約条件となる。

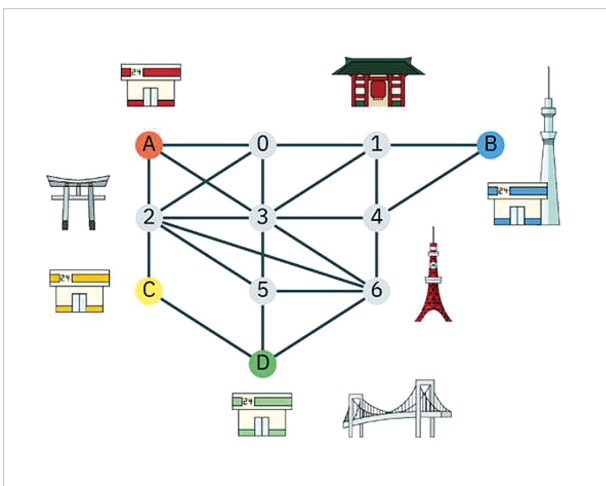
制約条件を判定するオラクルを作成するためには、隣接するノードが同じ色かどうか判定するために、まず各ノードに2量子ビットを割り当て、4色の色をそれぞれ00, 01, 10, 11のビット列で表現する。そして、隣接するノードのビット列が同じかどうかは、複数コントロールビットを持つ Controlled-NOT ゲートを用いることで可能である。すべてのエッジに対して両端のノードを比較し、その比較結果の AND を取ることで、与えられた色の割り当てが制約を満たすかどうか判定するオラクルを作成できる。

ただし使用可能な量子ビット数には32量子ビットと限りがあり、初歩的な解法の量子プログラムは実装することができないように設定されている。参加者は限られた量子ビットの中で効率の良い量子プログラムを実装するために工夫を凝らす必要がある。

## 2020 年度の演習問題

### 2020 年度の最終問題 — 惑星問題 —

2020年11月9日から30日まで開催された「IBM Quantum Challenge 2020」の最終問題は2019年度のさらなる応用版として、同じくグローバーのアルゴリズムをつかって解くことが前提となっている。出題内容は具体的には以下のとおりである(図-2参照)。



■ 図-1 IBM Quantum Challenge 2019 の最終課題の図

前提条件:

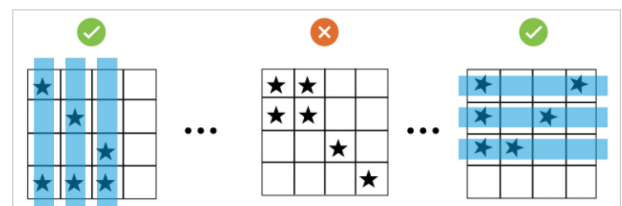
- 4×4の盤面が16個与えられている
- 各盤面に惑星が格子のマス内に置かれている
- 惑星の数は6である
- ビームを発射することで惑星を破壊できる
- ビームは垂直または水平方向にしか打てない
- ビームを発射できる本数は最大3本まで
- 16個の盤面中1つだけ上記条件では解けない盤面が混じっている

問題: 前提条件に基づいて解けない(惑星をクリアできない)盤面を特定せよ。

これは「惑星問題」と呼ばれる有名なパズルで、ここでは当然ながら、この問題を量子的に解くことが求められる。

Quantum Challengeではコンテスト期間中、各演習問題を解くためのヒントが提示されるが、最終問題においてもこのアプローチについてヒントとして提示を行っている。

この問題の解き方は多く存在するが、ここでは1つのアプローチを紹介する。それは、盤面に配置される惑星とビームの情報をそれぞれグラフのエッジとノードにエンコードし、惑星問題をグラフ理論における基本的な計算問題の1つである「頂点被覆問題」に変換して解く方法である(図-3参照)。頂点被覆問題とは、計算複雑性理論におけるNP完全に属する問題の1つで、与えられたグラフの各エッジについて端点のいずれか少なくとも一方が含まれるようなノード集合を求める問題である。盤面情報からグラフへのエンコードの際には、ビームの撃ち方をノードとし、ビームを結ぶエッジを両端のビームのどちらかで破壊できる惑星とする



■ 図-2 与えられた16個の盤面の中には、1つだけ条件に基づいて解けない盤面が隠されている。



## 特集 Special Feature

(たとえば、盤面上の3行4列目に惑星が存在する場合、3行目に撃つビームと4列目に撃つビームをそれぞれノードとし、それらのノード間にエッジを張る)。これにより、頂点被覆問題を解いた際の答えである要素数3以下のノード集合(本問題では発射できるビーム数が最大3本のため)が、すべての惑星を破壊するビームの撃ち方を表すことになる。エンコードしたグラフの頂点被覆問題を解くために、量子プログラム内で2つのオラクルを構築する。1つ目のオラクルでは、「選択したノードですべてのエッジがカバーされているかどうか?」の判定を行う。このオラクルはControlled-NOTゲートを用いたORゲートと加算器を使い、6つのエッジ(惑星)すべてがカバーされているか否かを判定することで実装可能である。2つ目のオラクルでは、「選択したノードの数(ビーム数)が3かどうか?」の判定を行う。こちらのオラクルでも加算器を用いて選択したノードの個数を判定することで実装可能である。選択したノードが両方のオラクルを満たす場合、その選択ノード(ビームの打ち方)で惑星問題を解くことが可能である。本問題では、16個の盤面の内から与えられた条件で解けない1つの盤面を見つける必要があるため、本アプローチでは2つのオラクルを組み合わせさらに二重にグローバラーのアルゴリズムを実装する必要がある。

2019年と2020年どちらのIBM Quantum Challengeにおいても、上位チームの解法は審査員の予想をはるかに超えたものであり、各チームの創意工夫には驚かされた。上位チームの解法はGitHub上で

公開されている<sup>3)</sup>ので、興味がある方はぜひ一度、目を通してほしい。

## スコアの算出について

現在IBMが技術開発を進めている量子システムは、ノイズのある小規模の量子システムである。そのため量子アルゴリズムの実装において、エラー率を高める要因になる2量子ビットのゲートや補助量子ビットの数を減らすことによって量子回路を効率化することが求められ、ここに競技性を見いだすことができる。IBM Quantum Challengeにおいても、参加者は正解にたどり着くプログラムの構築のみならず、そのプログラムの効率化をどこまで進められるかを競うことになる。スコアは回路の実装コストを測定することで決定され、以下の数式で算出された。

$$\text{コスト(スコア)} = S + 10C$$

上記算出式においてSは1量子ビットゲートの数、CはCNOT(CX)ゲートの数である。任意の量子回路は、1量子ビットゲートと2量子ビットゲートに分解することができ、2量子ビットゲートのCNOTの実装時のエラー率は一般的に1量子ビットゲートのそれと比較して10倍となる。そのため、回路の実装コストを評価するために、CNOTゲートを1量子ビットゲートの10倍に設定している。

## 量子人材育成の3つのドライバ

### Open access, open source, education

IBMでは量子人材育成のための教育の推進には、大きく3つのドライバ(推進力)「Open Access」「Open Source」そして「Education」があると考えている(図-4参照)。

1つ目のOpen Accessは、2016年5月のIBM Quantum Experienceの発表に象徴される、量子システムの一般への開放にある。それまでは研究施設内の一部の人間しか扱えなかった量子コンピュータがクラウド上に公開されることによって、世界中の人が無償で

**Hint 3**  
There are several ways to solve the final exercise. In this hint, I will explain an approach that is general and naive. The key idea is to convert an Asteroids problem into a so-called **Vertex Cover** problem.

**How to encode an Asteroids problem into a graph**

**Asteroids problem**

*	*	*	*
*	*	*	*
*	*	*	*
*	*	*	*

**Graph**

- Each node represents a row/column.
- $H_i$  represents  $i$ -th row.
- $V_j$  represents  $j$ -th column.
- Each edge represents an asteroid.
- Put an edge between node  $H_i$  and node  $V_j$  if there is an asteroid at  $(i, j)$ .

In the left example, choosing  $\{V_1, V_2, V_3\}$  can cover all the edges. The solution exactly corresponds to shooting beams at column 1, 2, and 3 vertically in the Asteroids problem.

Then, create the following 2 oracles and combine into one.

- Oracle 1: Are all the edges covered by chosen nodes?
- Oracle 2: Is the number of chosen nodes 3?

Nodes that satisfy Oracle 1 and Oracle 2 represent the solution for the Asteroids problem. Once you know how to implement the above, you can tell whether a given Asteroids problem is solvable or not. You're almost there! Good luck!

Qiskit

Dr. Ryoko

■ 図-3 コンテスト内で提示された最終問題のヒント

実機の量子コンピュータ上での計算を試すことが可能となった。常時稼働する量子システムの数は当初3つだったが、その後増え続けており、またノイズの影響によるエラー率の改善なども継続的に行われてきている。2020年12月現在、30台の量子システムがアクセス可能となったことにより、今回の「Quantum Challenge」のような数千名規模の量子イベントの開催が可能となった。

無償で誰もが家に居ながら量子実験を試行できるプラットフォームの誕生は、量子コンピューティングに触れながら学習できる機会の大きな拡大につながったといえよう。

2つ目のドライバは量子計算に必要なソフトウェアのオープンソース化である。IBMでは2016年に自社開発した「Qiskit」と呼ばれる量子コンピュータでプログラミングを行うためのツールキットをOpen Sourceとして2017年に公開した。技術的にまだ黎明期にある量子コンピュータの分野で自社開発したソフトウェアをOpen Sourceとして公開することで、この分野における技術をコミュニティの力で高めていくことができる。コミュニティにより、QiskitはOpen Sourceとして公開後50万回以上ダウンロードされている。世界中のさまざまな技術者がQiskitを評価し、機能改善の提案やドキュメントの作成などの支援を行う非常に熱心な量子コンピュータファンによるコミュニティが形成されている。

このコミュニティこそが量子コンピュータの可能性を押し



■図-4 量子人材育成の3つのドライバ

し広げ量子コンピューティングの未来を担う人材を育成する土壌となっている。

量子人材の育成には、前述のOpen Accessによって量子システムが開放され、Open Source化されたQiskitなどのソフトウェアツールが拡充されるとともに、それらを目的に応じて使いこなすための知識とスキルを獲得して具体的な課題解決に活かしていくこと、そして3つ目のEducationが重要となる。たとえば、IBMは2019年にオンラインの量子コンピューティングの教科書「Qiskit Textbook」(qiskit.org/textbook)を公開した。Qiskit Textbookは現在世界110以上の教育機関で採用され、誰もがこのオープンソースの教科書にコミュニティを通じて貢献することが可能である。Qiskitをダウンロードしなくてもオンラインでコードを実行して結果を確認しながら読み進めることができ、理論と実践の両方からアプローチしたつくりとなっている。Qiskit Textbookはコミュニティの力によって内容の拡充をはかりながら、量子コンピューティングの専門教育の土台を築くために進化を続けている。

このほか、動画で量子プログラミングについて学べるYouTubeチャンネルのコンテンツをはじめ、世界のIBMの研究所で量子コンピューティングの第一線の研究者や技術者と一緒にインターンシップを体験できるプログラムや大学の一学期分に総統する講義内容を受講できるサマースクールの開催など、量子人材の育成の観点からさまざまな取り組みが行われている。こうした中、本稿で最終問題を紹介したQuantum Challengeのような量子コンピュータのハッカソンもまた、量子人材育成の観点から、さまざまな可能性を見いだすことができる。

## 教育的価値の可能性

前述のとおり、Quantum Challengeのようなオンラインハッカソンは、数週間にわたって、量子コンピュータのある応用例について、ある程度時間をかけてじっくり学習させるような設計をすることが可能である。そこに競技性やストーリー性を加えることで、いわゆるゲー

## 特集 Special Feature

ミフィケーションを活用した学習効果が期待される。先の Quantum Challenge においても週ごとに新たなストーリー展開が用意されており、参加者は物語の主人公として週ごとの演習課題に取り組むことになる。数々の有益なヒントを与えてくれるアドバイザーのような存在である Dr. リョウコが、実験の途中で量子世界に閉じ込められる事態となり、最終問題を解くことそのものが Dr. リョウコの救出劇にもつながる仕掛けとなっている。

図-5, 図-6 は 2020 年 11 月のハッカソン参加前後で、量子コンピューティングおよび Qiskit の理解とスキルレベルについて 10 段階のスケールで自己評価を申告してもらったアンケート結果である。参加者のアンケート集計からは、ハッカソン開始前の時点では多くの参加者が初心者レベルにあたる 1 または 2 に寄っていることが見える。これに対して、参加後の結果ではスキルの中央値が 5 または 6 に移動している。

この結果から、Quantum Challenge のような量子コンピュータハッカソンには、未経験者や初心者が短期間で効率良くこの新しい技術分野を学ぶ上で参加者自身が実感できる効果が示された。

こうした学習効果を得るための鍵としては、特定の量子アルゴリズムやその応用問題を段階的に学べるような問題づくり、ストーリーやゲーム性といった要素を盛り込むこと、そして参加者同士が違いに切磋琢磨しあいながら情報交換やサポートをしあえるオンラインコミュニティの存在が挙げられる。

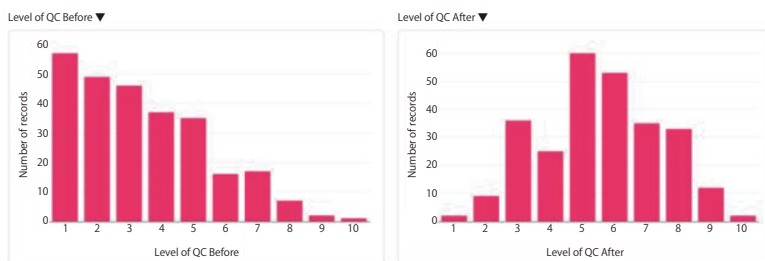
## 量子の未来のためのハッカソン

量子コンピューティングの未来を担う人材育成のために、今後も継続的な学習を支援するハッカソンやさまざまな学習体験を高める取り組みが期待される。しかし、どのような取り組みにおいても、人材育成には垣根を越えてつながることのできるコミュニティの存在がきわめて重要な役割を果たしていくことになるだろう。

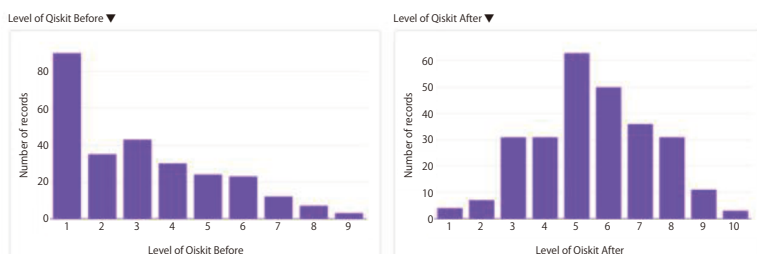
### 参考文献

- 1) MIT News : The Talent Shortage in Quantum Computing, <https://news.mit.edu/2019/mit-william-oliver-qanda-talent-shortage-quantum-computing-0123>
- 2) The Race to Quantum Advantage, <https://www.bvp.com/atlas/the-race-to-quantum-advantage/>
- 3) IBM Quantum Challenge 2020 (GitHub), <https://github.com/qiskit-community/IBMQQuantumChallenge2020>

(2021 年 1 月 19 日受付)



■ 図-5 量子コンピューティングに関する知識の変化



■ 図-6 Qiskit に関する知識とスキルレベルの変化

### ■ 小林有里 (正会員) yurik@jp.ibm.com

IBM の量子コンピュータ上で実行可能なプログラムを書くための Python ベースのオープンソース・ソフトウェア開発ツール「Qiskit」の開発者向けコミュニティを担当。量子コンピュータに関する研修やセミナー、大学での授業展開をはじめ、量子コンピュータを使ったプログラミングコンテスト、ハッカソンの主催などを通じて、量子人材の育成に注力。

### ■ 松尾惇士 (正会員) matsuo@jp.ibm.com

IBM で量子回路の最適化や量子コンピュータを用いた最適化問題用のアルゴリズムの研究を行っている。また Qiskit の開発にも注力している。第 1 回と第 3 回の IBM Quantum Challenge では問題作成と審査員も務める。

### ■ 沼田祈史 (正会員) kifumi@jp.ibm.com

IBM 入社後、ハードウェア製品の開発に従事。大学連携などの後、現在はカンタム・デベロッパー・コミュニティ所属。Qiskit Advocate としてセミナー、ハンズオン、プログラミングコンテストなどを開催。