

Toward Programming Education for Quantum Computers ( I )

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2023-03-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 村田, 嘉弘 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://saigaku.repo.nii.ac.jp/records/1542">https://saigaku.repo.nii.ac.jp/records/1542</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



# 量子コンピュータのプログラミング教育に向けて (I)

## Toward Programming Education for Quantum Computers (I)

村田 嘉弘

MURATA, Yoshihiro

### 1. はじめに

現代社会は高度な科学技術によって成り立っている。発展著しい現代科学技術の中でも情報通信、各種新素材、バイオ、創薬、先端医療機器の進歩は特に著しく、それらの科学技術の進歩には量子力学、場の量子論<sup>1)</sup>、相対性理論等が基礎理論として関わっている。例えば、量子力学におけるトンネル効果<sup>2)</sup>はジョセフソン素子やトンネルダイオード、走査型トンネル顕微鏡 (STM) 等へ応用され、物性論においては場の量子論が必須となっている。バイオや創薬で重要な量子化学は量子力学の重要な応用領域である。高高度の人工衛星を利用したGPSは相対論的効果を考慮した補正により実用化された。

このように現代の生活を支える科学技術の根底では量子力学、場の量子論、相対性理論等が重要な役割を担っているが、従来どちらかという、自然界における諸現象を解明し、諸現象によって生じる不具合を防ぐという目的のために使われることの方が多かったように思える。トンネル効果の応用など量子的な現象を積極的に利用しようとする試みはあっ

たものの、情報通信の基本はデジタルデータの正確な処理であり、量子力学や場の量子論は微細な世界で起きる困った量子的現象を防ぐために利用するという考え方が主流であった。

しかし、自然界の示す量子状態そのものや観測という操作への理解が進んだこと、量子状態を利用して計算を行うコンピュータという考え方やそのコンピュータを利用した計算アルゴリズムの提唱、量子状態を自由に制御する技術の進歩などが相俟って、1980年代以降、量子情報理論、量子コンピュータ、量子暗号、量子インターネットといった従来のデジタルデータ・デジタル通信という考え方と根本的に異なる考え方が生まれ、2014、15年頃から急速に進展してきた。これら量子技術の研究開発と社会実装は世界の主要国の重要な政策課題となり、日本も令和2年(2020年)1月より量子技術の研究開発と社会実装を進める体制作りに取り組み始めた。

量子技術の中でも量子コンピュータに対する期待は日増しに大きくなっている。完全な量子コンピュータが登場すれば現在の最速スーパーコンピュータをはるかに凌駕する演

---

キーワード：未来社会ビジョン、量子技術、量子コンピュータ、量子プログラミング教育

Keywords : visions of future society, quantum technology, quantum computer, quantum programming education

算速度を実現できると予測されており、計算困難とされて来た問題を解決することができようになると考えられている。

このような情勢の中、令和4年（2022年）4月22日に日本政府の統合イノベーション戦略推進会議より「量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～」が発表された。

本稿と「量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（Ⅱ）」は、日本政府のこの量子未来社会ビジョンを実現するときに必要な量子コンピュータのプログラミング教育について詳細な考察を行うことを目標とする。

そのため、本稿は以下のように構成されている。

1. はじめに
2. 量子技術の利用者
3. 量子未来社会ビジョン
4. 量子コンピュータの現状
5. 2030年の量子コンピュータ

注

参考文献

## 2. 量子技術の利用者

「量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～」はマスコミに大きく取り上げられ、文書中の「未来社会ビジョンに向けた2030年に目指すべき状況」の1番目「国内の量子技術の利用者を1,000万人に」は特に注目を浴びた。この項目の説明には「多様なユーザがアクセスし、ユースケースを探索・創出していくことを可能とするために量子コンピュータのテストベッドなど利用環境の整備を強力に推進する」と謳われている（〔内閣

府3〕p12）。

ここで考えてみたいのだが、量子技術の利用者1,000万人の中でも「ユースケースを探索・創出していくために量子コンピュータのテストベッドなどにアクセスする多様なユーザ」とはどのような人々であろうか。「ユースケースの探索・創出」「テストベッドにアクセス」とあるからには、ソフトウェア開発に携わるITエンジニアや、量子技術の研究者・大学院生などが考えられるのではないだろうか。人数からゆくとまずはITエンジニアであろう。

日本のITエンジニアの現状に関しては様々な調査が行われている。ITエンジニアの人数に関しては『IT人材白書2020』にIT企業のIT人材が95.9万人、ユーザー企業のIT人材が29.4万人いるとの推計値が書かれている（〔IPA〕p24 図表1-2-2、p25 図表1-2-4）。IT企業におけるIT人材の職種は比率の高いものからアプリ系技術者（38.0%）、プロジェクトマネージャ（19.6%）、運用系サービス技術者（9.2%）、インフラ系技術者（8.9%）などとなっている（〔IPA〕p24 図表1-2-3）ので、IT人材とはITエンジニアと同義であると思ってよいであろう。つまり、2019年度の調査では、日本のITエンジニアは125.3万人であると推計されている。

一方、やや古いデータではあるが、2016年に発表された経済産業省の「IT人材の最新動向と将来推計に関する調査結果」によると、IT市場拡大が中程度であるとのシナリオで、2030年には144.3万人のITエンジニアが必要になるとある（〔経産〕p7）。

この100万人規模のITエンジニアの中に、先端IT人材と呼ばれる人々がいる。「ビッグデータ」、「IoT」、「人工知能」等の先端IT技術

のサービス化や活用を担う人材との意味であり（〔経産〕 p10）、2016年の96,900人から年率5%で人材需要が伸びるとする（〔経産〕 p11〕と、2030年には約192,000人必要であるということになる。〔経産〕 p11で実際に用いられている年率15%を参考に年率10%という伸び率を用いると、2030年には約368,000人必要であるということになる。

そこで、量子技術の利用者1,000万人のうち、先端IT人材19.2万人～36.8万人が量子コンピュータなどの量子技術を利用したアプリケーションやサービスを開発する立場にあり、残り970万人前後は量子コンピュータなどの量子技術の恩恵を受けるだけの立場の人々であると考えてもそれほど的外れではあるまい。

量子技術利用者の構成が分かったところで問題となるのが、日本においてはITエンジニアのうち理系（情報系・その他理系）出身者は、先端IT従事者で62.4%、非先端IT従事者で44.2%であるということである（〔IPA〕 p190 図表3-4-6）。そして、先端IT従事者の30.2%、非先端IT従事者の34.6%が文系出身者になっている。この事実は、2030年に量子コンピュータなどの量子技術を利用したアプリケーションやサービスを開発する先端IT人材19.2万人～36.8万人のうち5.8万人～11.1万人ほどは文系出身かもしれないということの意味する。実はこれは非常に大きな問題となる。

現状では、量子コンピュータを使いこなすには一定程度以上の数学的・物理的知識が必要であり、理系出身のITエンジニアにとってもハードルが高い。もし2030年でも現在と同じような状況が続くのであれば、文系出身のITエンジニアは量子コンピュータをどのように学べばよいのか。文系学部に所属するITエン

ジニア希望の大学生・大学院生にはどのような教育を施せばよいのか。量子コンピュータを使いこなせる人材がますます必要になって来るこれからの時代に量子コンピュータのプログラミング教育はどのようにすればよいのか、この課題に対する現状での解答を与えるのが本稿と「量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（Ⅱ）」の目標である。

近未来の2030年がどのような状況であるのかを明らかにするために、次章以降、日本政府によって描かれたビジョンを読み解いてゆく。

### 3. 量子未来社会ビジョン

量子技術の進歩を受け、世界の主要国は量子技術政策を次々に発表している（表1）。

世界の主要国が次々に量子技術政策を発表する中、日本政府は令和2年（2020年）1月に国家戦略として「量子技術イノベーション戦略」（〔内閣府1〕）を立て、主要技術領域の技術開発、国際協力、量子技術イノベーション拠点の形成、量子技術イノベーション協議会の創設、知的財産戦略・国際標準化戦略、人材育成、量子ネイティブ<sup>3)</sup>の育成等を柱とした。しかし、その後、量子コンピュータの国際競争が激化し、量子技術は経済安全保障上も極めて重要であることから、令和4年（2022年）4月22日に量子技術による社会変革を目標とする「量子未来社会ビジョン」（〔内閣府3〕〔内閣府4〕）を策定した。

ただし、ビジョンを記した文書は量子未来社会実現の時期を明記しておらず、使用可能な量子コンピュータの種類もぼかしてあり、その他分かりにくい部分がある。そこで、量子未来社会ビジョンについて表2のようにまとめ直すことにする。

表1 世界の主要国の量子技術政策

国名	政策	内容
英国	量子技術国家戦略 (2014.12)	2015年～2019年 4億ポンド規模
中国	科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画 (2016)	2016年～2020年 70億元規模
EU	Quantum Manifesto (2016.5)	2019年～2028年 10億ユーロ規模
米国	量子情報科学の国家戦略概要 (2018.9) 国家量子イニシアティブ法 (2018.12)	2019年～2024年 12.8億ドル規模
独	ハイテク戦略2025 (2018) BMBF「量子技術」(2018.9) 未来パッケージ (2021.1)	2019年～2022年 6.5億ユーロ規模 2021年～2025年 20億ユーロ規模
日本	量子技術イノベーション戦略 (2020.1) 量子未来社会ビジョン (2022.4)	量子技術の研究開発 量子技術による社会変革
仏	MESRI「国家量子戦略」(2021.1)	2021年～2025年? 18億ユーロ規模

出所：[嶋田1] p 4、[内閣府1] 参考資料 p 1、[内閣府4] p 2より作成

表2から分かるように、  
「ビジョン実現に向けた取組の全体像」  
（「量子技術イノベーション戦略」の戦略  
内容と同一）  
を行うことで  
「実現のための基本的な考え方」のabc  
「未来社会を支える技術(aに基づく)」(従  
来型技術と量子技術のハイブリッド)  
を実現し、それにより  
「未来社会ビジョン」  
の世界に至る。その具体像として  
「量子技術の具体的な活用イメージ」  
がある。その方向に正しく向かうために  
「通過点（マイルストーン）：未来社会実  
現に向けた2030年に目指すべき状況」  
でチェックするという論理構成になっている。  
ただ、目標とする未来社会がいつのことであ  
るか未記載である。

「量子技術イノベーション戦略」(2020年1  
月)において「技術ロードマップ」が作成さ  
れたが、2年後の2022年4月に、「量子未来社  
会ビジョン」と併せ「量子技術イノベーショ

ン戦略 ロードマップ改訂」([内閣府2])  
が発表された。表2に登場する技術の詳細と  
実現時期はこのロードマップに書き込まれて  
おり、このロードマップによると、政府が量  
子未来社会の実現を2030年代後半以降に設定  
していることが伺われる。量子未来社会の実  
現時期に関する更なる考察は「4. 量子コン  
ピュータの現状」で行う。

表3は「量子技術イノベーション戦略  
ロードマップ改訂」([内閣府2])の目次で  
ある。技術用語の羅列ではあるが、量子未来  
社会を実現するための技術と応用範囲が垣間  
見える。

表2の「ビジョン実現に向けた取組の全体  
像」にある「量子コンピュータ(a-1)・量  
子ソフトウェア(a-1)」「量子計測・セン  
シング等(a-3)」「量子セキュリティ・ネッ  
トワーク(a-2)」が表2の「未来社会を支  
える技術(aに基づく)」に至るまでの技術ロ  
ードマップを詳細に描いているのが「量子技術  
イノベーション戦略 ロードマップ改訂」で  
ある。

このように量子未来社会を実現するための

表2 量子未来社会ビジョンの概要

項目	内容
目標	量子技術に基づくコンピューティング・センシング・通信性能の飛躍的向上により、社会全体のトランスフォーメーションを行う。その結果、経済・環境・社会が調和した未来社会を実現する。
通過点（マイルストーン）：未来社会実現に向けた2030年を目指すべき状況	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 国内の量子技術の利用者を1,000万人に</li> <li>2 量子技術による生産額を50兆円規模に</li> <li>3 未来市場を切り拓く量子ユニコーンベンチャー企業を創出</li> </ol>
未来社会ビジョン	<p>※実現時期は未記載。他資料を総合すると2040年～2050年頃以下のABCを価値観とする経済・環境・社会が調和した未来</p> <p>A 経済成長（Innovation） 量子コンピュータと従来型（古典）コンピューティングを組み合わせた次世代高速コンピューティングが仮説と検証のイノベーション創出サイクルを飛躍的に加速するなど、量子技術を活用して生産性革命など我が国の産業の成長機会の創出等の経済成長を実現</p> <p>B 人と環境の調和（Sustainability） 量子コンピュータを活用した次世代環境材料の開発やエネルギーベストミックス等によるカーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーの実現など、量子技術を活用して、人と環境が調和し、持続的に発展する社会を実現</p> <p>C 心豊かな暮らし（Well-being） 量子暗号通信による安全・安心な暮らし、高感度な量子センシング等を活用した次世代医療による健康・長寿、AI等との融合など量子・古典のハイブリッドコンピューティングによる予測技術、量子センシング等による災害予測や避難誘導システムによるレジリエントな社会など、量子技術を活用して、人々の心豊かな暮らしを実現</p>
実現のための基本的な考え方	<ol style="list-style-type: none"> <li>a 量子技術を社会経済システム全体に取り込み、従来型（古典）技術システムとの融合（ハイブリッド）により、我が国の産業の成長機会の創出・社会課題の解決</li> <li>b 最先端の量子技術の利活用促進（量子コンピュータ・通信等のテストベッド整備等）</li> <li>c 量子技術を活用した新産業／スタートアップ企業の創出・活性化</li> </ol>
未来社会を支える技術（aに基づく）	<ol style="list-style-type: none"> <li>a-1 コンピューティング 従来型技術（スーパーコンピュータ、HPC、AI・ビッグデータ等）と量子技術（量子コンピュータ）のハイブリッドにより、革新的計算サービスの実現</li> <li>a-2 通信・セキュリティ 従来型技術（情報セキュリティ、耐量子計算機暗号<sup>4)</sup>、Beyond 5G、クラウド等）と量子技術（量子セキュリティ、量子ネットワーク）のハイブリッドにより、セキュアで高度な通信の実現</li> <li>a-3 計測・センシング 従来型技術（各種センサ、医療診断装置（NMR・MRI等）、IoT等）と量子技術（量子計測・センシング）のハイブリッドによる超高精度センシングの実現</li> </ol>
量子技術の具体的な活用イメージ	<p>Usecase 1 広告戦略（a-1による） 量子コンピューティングで広告枠をリアルタイム最適化</p> <p>Usecase 2 スマートファクトリ（a-1による） 量子コンピューティングで製造プロセス・人的配置・シフト・搬出・物流等を最適化</p> <p>Usecase 3 金融（a-1や量子コンピュータ単独） 金融商品のシナリオ予測を量子コンピューティングにより即日／リアルタイムで処理。新たなリスクも含めたポートフォリオ最適化計算を量子コンピュータで行う</p> <p>Usecase 4 交通・物流（IoT、高速通信とa-1による） IoT、高速通信、AI等と量子コンピュータを組み合わせることでMaas<sup>5)</sup>、運航トラブル早期解決、EVシェア、渋滞緩和、自動運転を実現</p>



<p>量子技術の具体的な活用イメージ</p>	<p>Usecase 5 電気自動車（EV）用バッテリー（a-3による） 量子センサ搭載バッテリーによるEV走行距離の向上</p> <p>Usecase 6 次世代環境材料開発（a-1による） 量子コンピュータにより材料の機能を高速／精緻にシミュレーション</p> <p>Usecase 7 スマートグリッド（a-1による） 量子コンピューティングで電力供給をリアルタイム最適化</p> <p>Usecase 8 総合的なセキュリティ（a-2による） 求められるセキュリティ要件に応じて、量子暗号通信<sup>6)</sup>、耐量子計算機暗号等のベストミックスにより総合的なセキュリティを実現</p> <p>Usecase 9 プレインマシンインタフェース<sup>7)</sup>（BMI）（a-3による） 量子センサを用いた脳磁計測による自動運転中のモニタリングや義手操作</p> <p>Usecase10 癌や認知症の早期診断・治療（a-3による） 量子センサで1細胞レベルの状態把握、量子計測技術で小型かつ1万倍の感度を持つMRIの実現</p> <p>Usecase11 防災・減災対応（a-1による） 次世代コンピューティングでの大規模・高精度・超高速シミュレーションやリアルタイム大規模計算処理による防災・減災。平時の備えと有事の対応を強化</p>
<p>ビジョン実現に向けた取組の全体像</p>	<p>基本的考え方：「量子技術イノベーション戦略」およびa b c <u>各技術分野の取組</u></p> <p>1 量子コンピュータ（a-1） 国産量子コンピュータの研究開発の抜本的な強化 産業界への総合支援</p> <p>2 量子ソフトウェア（a-1） 量子コンピュータの利用環境の整備 ソフトウェア研究開発の抜本的な強化</p> <p>3 量子セキュリティ・ネットワーク（a-2） 量子暗号通信の利用拡大、総合的セキュリティの実現 量子インターネットの研究</p> <p>4 量子計測・センシング等（a-3） 量子計測・センシング技術の応用分野の拡大、事業化支援</p> <p><u>イノベーション創出のための基盤的取組（*）</u></p> <p>1 スタートアップ企業の創出・活性化（c）</p> <p>2 量子拠点の体制強化（b）</p> <p>3 人材の育成・確保</p> <p>4 量子技術の知財化・標準化</p> <p>5 国際連携／産学官連携</p> <p>6 アウトリーチ活動<sup>8)</sup></p> <p>7 経済安全保障等</p> <p>（*）「量子技術イノベーション戦略」の戦略内容と同一</p>

出所：[内閣府3] [内閣府4] を基に筆者作成

量子技術は多岐に亘り、それらを総合することで量子未来社会になるとされている。しかし、中心はやはり量子コンピュータである。それにも関わらず、「量子未来社会ビジョン」では、量子未来社会や2030年に使用できる量子コンピュータの種類についてもぼかしてある。プログラミング教育（特に文系向け）のためには、量子コンピュータの種類を特定す

る必要があるため、この点の考察を更に進める。

#### 4. 量子コンピュータの現状

マスコミ等では現在の最速スーパーコンピュータをはるかに凌駕する夢のコンピュータとして量子コンピュータが語られるが、そのような量子コンピュータはまだ完成しては

表3 「量子技術イノベーション戦略 ロードマップ改訂」〔内閣府2〕の目次

目次	
<p>1 技術ロードマップ</p> <p>(1) 量子コンピュータ・量子シミュレーション</p> <p>①量子コンピュータ（超伝導量子ビット）</p> <p>②量子ソフトウェア（ゲート型）</p> <p>③量子ソフトウェア（アニーリング型）</p> <p>④量子シミュレーション（冷却原子）</p> <p>⑤量子アニーリングマシン（超伝導量子ビット）</p> <p>⑥量子コンピュータ（イオントラップ量子ビット）</p> <p>⑦量子コンピュータ（シリコン量子ビット）</p> <p>⑧量子コンピュータ（光量子ビット）</p> <p>(2) 量子計測・センシング</p> <p>⑨固体量子センサ（ダイヤモンドNV中心等）</p> <p>⑩量子慣性センサ</p> <p>⑪光格子時計</p> <p>⑫量子もつれ光センサ</p> <p>⑬量子スピントロニクスセンサ（トンネル磁気抵抗センサ・スピン熱流センサ）</p> <p>(3) 量子通信・暗号</p> <p>⑭量子通信・暗号リンク技術</p> <p>⑮量子中継技術（量子メモリ・量子もつれ等）</p> <p>⑯ネットワーク化技術（構築、運用、保守等）</p>	<p>2 融合領域ロードマップ</p> <p>(1) 量子コンピュータ・量子シミュレーション</p> <p>①量子AI技術</p> <p>(2) 量子計測・センシング</p> <p>②量子生命科学（生体ナノ量子センサ）</p> <p>③量子生命科学（量子技術を用いた超高感度MRI / NMR）</p> <p>④量子生命科学（量子論的生命現象の解明・模倣）</p> <p>(3) 量子通信・暗号</p> <p>⑤量子セキュリティ技術</p>

いない。夢の量子コンピュータとはどのようなものであるのかを明らかにするため、まず、量子コンピュータおよび関連するコンピュータを表4に列挙する。

様々な用途に利用できる汎用の量子コン

ピュータは表4の左端にある「誤り耐性量子コンピュータ」であるが、まだ実現できてはいない。「量子技術イノベーション戦略 ロードマップ改訂」〔内閣府2〕によると、登場は2040年頃と予測されている。

表4 量子コンピュータおよび関連するコンピュータ

	大 ←物理的な量子性を計算原理に使っている度合い→ 小				
種類	誤り耐性量子コンピュータ	NISQ コンピュータ	量子 シミュレータ	量子アニーリン グマシン	イジングマシン
演算方式	デジタル	アナログ	アナログ	アナログ	デジタル/ アナログ
計算モデル	量子回路型 測定型 断熱型 その他	量子回路型 測定型	自然計算 (ハバードモデルなど)	量子アニーリン グ(イジングモデル)	シミュレーテッドアニーリング (イジングモデル)
実装方式	(未定)	超伝導回路 イオントラップ シリコン 光	冷却原子 イオントラップ 超伝導回路 光	超伝導回路	CMOS 光

出所：〔嶋田2〕p 8の表1.1に一部追記

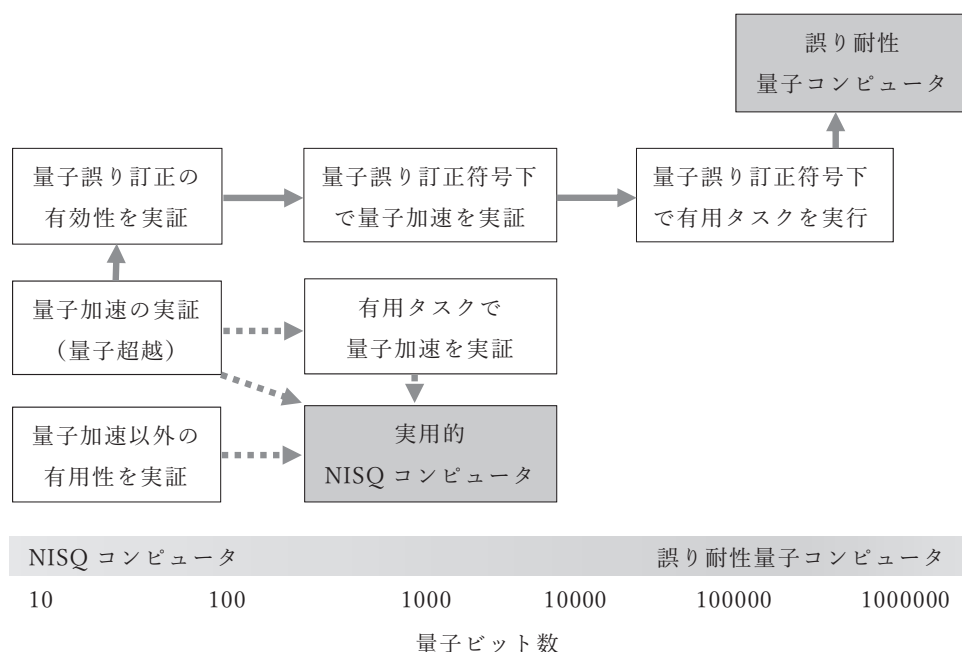


現在なんとか実現できているコンピュータは残りの4種類のコンピュータである。これらの中で「誤り耐性量子コンピュータ」に最も近い位置にあるのが「NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) コンピュータ」であり、両者の関係、開発までの道のりは図1のようであると考えられている。

「量子コンピュータのプログラミング教育に向けて(II)」でも述べるように、量子コンピュータの頭脳であるQPU (Quantum Processing Unit) は複数の量子ビットより構成されており、この量子ビットに対して量子的な操作を行うことで演算を行う。量子コンピュータが超越的な計算能力を発揮するにはこの量子ビットが大量に必要であることが分かっているが、量子ビットが増えるほど、また、演算を重ねるほど、外部との相互作用（ノイズ）により量子ビットの量子状態が壊れ、

無視できないほどに演算のエラーがひどくなる。NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) コンピュータとは、まだ誤り訂正機能が不十分で量子ビット数も多くはない量子コンピュータのことである。

誤り耐性のある量子コンピュータを実現できてはじめて、目標とする夢の量子コンピュータを実現できたと言える。そのためには、図1に示すように、従来方式のコンピュータよりも量子コンピュータの方が圧倒的に高速であること（量子超越と言う）をまずNISQで実証し、その他にも有用な点があることを実証できて、実用的なNISQコンピュータができあがったことになり、その後、実用的な量子誤り訂正法を確立し、100万個以上の量子ビットを備える量子コンピュータを実現できたとき誤り耐性量子コンピュータに到達したことになる。到達するまでの技術課題



出所：[嶋田 2] p261の図9.3

図1 誤り耐性量子コンピュータ実現までのマイルストーン

が膨大であるため、それは2040年頃であると予測（〔内閣府2〕）されている。

一方、「誤り耐性型量子コンピュータ ムーンショット目標6の取り組み」（〔北川〕）のp 2には、量子コンピュータの実現時期について以下のように書かれている：

2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現

<ターゲット>

- ・2050年頃までに、大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現する。（誤り耐性型汎用量子コンピュータは、大規模な集積化を実現しつつ、様々な用途に応用する上で十分な精度を保証できる量子コンピュータ）
- ・2030年までに、一定規模のNISQ量子コンピュータを開発するとともに実効的な量子誤り訂正を実証する。

また、p 8には以下のように書かれている：

2050 大規模化を達成し、誤り耐性型汎用量子コンピュータの実現

2040 分散処理型NISQ量子コンピュータの実証

量子誤り訂正下での有用タスク計算

2030 一定規模のNISQ量子コンピュータの開発と量子誤り訂正の有効性実証

「量子技術イノベーション戦略 ロードマップ改訂」（〔内閣府2〕）に比べると、目標達成スケジュールがかなり控えめである。しかし、〔北川〕は量子コンピュータ開発の先頭に立つ人物の手に成る文書であるので、開発上の現実的な困難を十分反映した目標に

なっているであろう。

## 5. 2030年の量子コンピュータ

3章・4章での考察を総合すると、量子未来社会ビジョンで描く未来社会は2040年～2050年頃のことであり、誤り耐性量子コンピュータが活躍する社会であると判断できる。また、そこに至る通過地点として、2030年の目標

- 1 国内の量子技術の利用者を1,000万人に
- 2 量子技術による生産額を50兆円規模に
- 3 未来市場を切り拓く量子ユニコーンベンチャー企業を創出

が設定されているが、この段階での量子コンピュータは図1にある実用的NISQコンピュータの可能性が高いと思ってよい。これで近未来に使用している量子コンピュータの種類が特定できた。

困ったことに、NISQコンピュータでのプログラミングは従来方式のコンピュータのプログラミングとは全く様相が異なる。そのため、プログラミング教育も全く別物として捉える必要がある。NISQコンピュータでのプログラミングを理解するためには、量子力学・量子情報理論から始める必要があり、理系出身のITエンジニアでもNISQコンピュータの量子アルゴリズム・量子プログラミングの修得はハードルが高い。実用的なアプリケーション開発にはかなりの努力を要する。文系出身のITエンジニアや文系学部に所属するITエンジニア希望の大学生・大学院生にとってはほとんど手が出ない領域のようにも見える。しかし、量子コンピュータを学びたいという意欲的な文系学生がいることも事実である。量子コンピュータに携わることのできる先端IT人材の数を増やすには、文系出身のITエン

ジニアや文系の学部・大学院に所属する学生でITエンジニアを目指す者にも簡単にでもこれらの内容を学習してもらう必要がある。

次の「量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（Ⅱ）」では、量子力学・量子情報理論から始め、NISQコンピュータでのプログラミング教育のための学習体系を述べることにする。

## 注

- 1) 量子力学を適応しなくてはいけない量子（電子、光子等の各種素粒子）は生成・消滅するものであり、また特殊相対性理論的な効果を考え併せなくてはいけないため、それらを整合するために場の量子論が建設されている。厳密には非相対論的な場の量子論もあり、物性物理ではその種の場の量子論が多く用いられている。ただし、場の量子論は数学的には未だ不完全である。
- 2) エネルギーの高い障壁があるにも関わらず、量子がそれをすり抜けてしまう場合があるという現象。
- 3) 早い段階から量子技術を使いこなす高い知識・技能を持った子供たち。その育成のために、児童・生徒に最先端の量子技術の内容や社会・産業等での利活用の現状や将来に興味関心を持ってもらうような取り組みを進めることになっている（〔内閣府1〕p24）。
- 4) 現在のインターネット等の通信システムの安全性は最速のスーパーコンピュータでも数千年～数万年の時間を掛けないと解けないような暗号システムによって維持されている。ところが、量子コンピュータが実用化されると、現在の暗号は短時間で解読されることが分かっている。そこで、量子コンピュータでも解読できない程度の安全性を持った暗号方式として耐量子計算機暗号が研究開発されている。
- 5) Mobility as a service（サービスとしての移動）の略。地域住民や旅行者一人一人のトリップ単位

での移動ニーズに対応して、複数の公共交通やそれ以外の移動サービスを最適に組み合わせて検索・予約・決済等を一括で行うサービスであり、観光や医療等の目的地における交通以外のサービス等との連携により、移動の利便性向上や地域の課題解決にも資する重要な手段となるもの（〔国交〕）。

- 6) 量子情報理論を応用して通信内容を秘匿化することで安全性を保つ通信方式。量子コンピュータ等の量子技術の進歩によっても安全性が脅かされることはないと言われている。
- 7) 脳情報を利用することで、脳（ブレイン）と機械（マシン）を直接つなぐ技術（インターフェース）のこと（〔文科〕）。
- 8) 具体的には以下のような普及推進活動が予定されている（〔内閣府3〕p32）：
  - ・科学館展示、SNS、動画等のメディア・コンテンツによる広報活動の充実・強化、若年層が量子技術に触れる環境づくり
  - ・量子技術に関する情報を一元的に提供する仕組み（ポータルサイト等）など情報提供の充実・強化
  - ・量子と社会をつなぐ人材（エバンジェリスト・アンバサダー等）、起業家・研究者等のフロントランナー人材のプレイアアップ（若者キャリア形成にも寄与）等

## 参考文献

- 〔IPA〕 独立行政法人情報処理推進機構 社会基盤センター編『IT人材白書2020』IPA、2020年
- 〔経産〕 経済産業省 商務情報政策局 情報処理振興課「IT人材の最新動向と将来推計に関する調査結果 ～報告書概要版～」経済産業省 第1回「第4次産業革命スキル習得講座認定制度（仮称）」に関する検討会 参考資料2、2016年（会議は2017年）
- 〔北川〕 北川勝浩「誤り耐性型量子コンピュータムーンショット目標6の取り組み」量子技術イノベーション戦略の戦略見直し検討WG（第2回）資料3、2021年

## 量子コンピュータのプログラミング教育に向けて（I）

- [国交] 国土交通省「日本版Maasの推進」HP  
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/japanmaas/promotion/index.html>
- [文科] 文部科学省「脳科学研究戦略推進プログラム 脳プロへようこそ！」HP 脳プロではどんな研究をしているの？>BMI技術  
<https://www.nips.ac.jp/srpbs/youkoso/mission/bmi.html>
- [内閣府 1] 統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」、2020年
- [内閣府 2] 統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略 ロードマップ改訂」、2022年
- [内閣府 3] 統合イノベーション戦略推進会議「量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～」、2022年
- [内閣府 4] 内閣府科学技術・イノベーション推進事務局「量子未来社会ビジョン～量子技術により目指すべき未来社会ビジョンとその実現に向けた戦略～ 概要」、2022年
- [嶋田 1] 嶋田義皓「量子技術の研究開発・政策動向」量子技術イノベーション戦略の戦略見直し検討WG（第1回）資料2、2021年
- [嶋田 2] 情報処理学会出版委員会監修、嶋田義皓著『量子コンピューティング 基本アルゴリズムから量子機械学習まで』オーム社、2020年

