

EAJ 報告書_2019-01

情報社会を先導する量子コンピュータ研究開発 戦略



平成31年（2019年）4月8日

公益社団法人日本工学アカデミー
量子コンピュータ研究開発戦略プロジェクト

2019 年 5 月 15 日
公益社団法人日本工学アカデミー

日本工学アカデミーは、工学・科学技術全般の発展に寄与する目的で設立された産学官の指導的技術者を会員とする団体です。会員の豊かな経験や知識、幅広いネットワークを活用したプロジェクトチームを中心に、広く会員外からの協力も得て、調査提言活動を進めています。その成果をまとめ、社会が目指すべき方向性に関して、官公庁、立法府、産業界、学会、研究機関等に先導的、創造的な施策を提言し、社会実装を目指します。

「情報社会を先導する量子コンピュータ研究開発戦略プロジェクト」

は、次の時代のコンピュータとして期待が持たれ、欧米中で大型の研究開発投資がなされている量子コンピュータにつき、開発の現状と実現へ向けた技術課題の調査を行い、日本としての施策提言の検討を進めてまいりました。今般、本報告書の原案がまとめられ、政策提言委員会での査読を受け、理事会での審査を経て、最終版を確定しましたので、工学アカデミーとしての発出を理事会で決めました。広くご活用いただくことを期待します。

本報告は、公益社団法人日本工学アカデミー「量子コンピュータ研究開発戦略」プロジェクトの調査研究結果を取りまとめ公表するものである。

**公益社団法人日本工学アカデミー
量子コンピュータ研究開発戦略プロジェクト**

リーダー	曾根純一	正会員、国立研究開発法人科学技術振興機構 上席フェロー
PO	中村道治	正会員、国立研究開発法人科学技術振興機構 顧問
幹事	萬 伸一	国立研究開発法人理化学研究所 コーディネーター
	水野弘之	株式会社日立製作所 研究開発グループ 基礎研究センタ 主管研究長
	嶋田義皓	国立研究開発法人科学技術振興機構 フェロー
	宮下 哲	国立研究開発法人科学技術振興機構 フェロー
委員	石原 直	正会員、東京大学 名誉教授
	蔡 兆申	東京理科大学 理学部 教授
	藤井啓祐	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
	川畑史郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 研究グループ長

本報告の作成にあたり、以下の方々に御協力いただいた。

オブザーバ

大久保達也	正会員、東京大学大学院工学系研究科 研究科長/教授
中村泰信	正会員、東京大学大学院工学系研究科 教授
荒川泰彦	正会員、東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任教授
伊藤公平	慶應義塾大学理工学部 教授
木村康則	正会員、国立研究開発法人科学技術振興機構 上席フェロー
西森秀稔	東京工業大学科学技術創成研究院 教授

要旨

半導体の微細化限界が顕在化する中、これまでコンピュータの性能向上を支えてきた半導体集積回路のムーア則に従った高性能化は期待できない。また、処理すべき情報量が増大するにつれ、ノイマン型の演算方式の限界が顕在化しつつある。一方で、高度情報化社会におけるコンピュータの高性能化への要求は増大する一方であり、演算方式の革新が今、求められている。このような中であって、量子コンピュータは従来のコンピュータとは全く異なる原理で演算を実行し、コンピュータの技術革新候補として期待されている。このため、米中欧で競い合うように、量子コンピュータ開発の大型の国家研究開発計画が開始されている。日本は量子コンピュータの概念形成の過程において重要な貢献を行っており、基礎研究の蓄積では海外に劣るものではないが、応用開発では遅れを取っている。このため、以下の提言を行う。

- (1) 国策による量子コンピュータ試作機の開発とそのために必要な技術開発を推進する拠点の形成が必要である。実機試作は世界の中で日本の存在感を高め、資金や情報、さらには優秀な人材の吸引力となる。また個々の技術の有用性を評価する実運用検証機としても、上記試作機の実在は重要である。上記拠点での量子コンピュータの開発は、材料科学、量子物理学、電子工学、コンピュータ科学の広範な専門領域の研究者の連携によってなされるべきである。
- (2) 基本論理構造、演算手法を含む量子ソフトウェア研究の支援も重要である。技術蓄積が必要な量子ビット演算素子を含むハードウェアの開発と異なり、量子コンピュータのための新たな量子ソフトウェアの研究は自由な発想で行うことが可能であり、今、急速な発展段階にある。
- (3) 長期的には次代を担う人材の育成が重要であり、そのための体制作りが求められる。量子コンピュータ実現に向けた研究開発は今後、多くの紆余曲折が予想される。量子コンピュータの開発競争を勝ち抜くためには、長期的視点で研究が継続できる体制が必要であり、そのための人材育成が鍵となる。
- (4) 米中欧（ドイツ、イギリス）では量子演算や量子検出・計測といった量子技術に対して、期間が5～10年間、予算額が年間で100億円を越す規模の国家計画が動き出している。日本がこれらの国々と互角に量子技術の研究開発で競っていくためには、同等規模の予算投入が必要である。量子コンピュータの開発が量子技術の中核的課題であることを勘案すると、年間予算50億円規模の量子コンピュータ研究開発に対する国家計画の構築が必要であると考えられる。

目次

第1章 本プロジェクトの背景と目的	1
第2章 量子コンピュータが必要な理由	2
第3章 期待される応用分野	4
3-1. 量子化学計算	4
3-2. 量子機械学習	5
第4章 開発の現況	7
4-1. これまでの経緯	7
4-2. 量子アニーリング方式と量子ゲート方式	9
4-3. 国内外の研究資金投資状況と開発状況	10
第5章 研究開発課題	13
5-1. ソフトウェア開発	13
5-2. システム・基本設計（ソフトウェアの側面から）	14
5-3. 量子回路最適化・コンパイラ	14
5-4. 量子ビット集積回路	15
5-5. 量子コンピュータ・システム（ハードウェアの側面）	16
5-6. 量子コンピュータ研究開発ロードマップコンピュータ	17
第6章 量子コンピュータ開発に必要な施策	20
6-1. 量子コンピュータ試作機構築の重要性	20
6-2. 求心力を有する研究開発拠点の必要性	21
6-3. 次代を担う若手人材育成の必要性	22
第7章 まとめ	24
<参考資料> 審議経過	25

第1章 本プロジェクトの背景と目的

IoT (Internet of Things : 物のインターネット) 時代が到来し、AI (Artificial Intelligence : 人工知能) が登場することで、世の中で日々生み出される大量の情報が有効に活用され、我々の生活に多大の恩恵をもたらすことが可能になるろうとしている。このような高度情報社会の実現のためには、大量の情報を処理し、人知を超える有益な情報を生み出す高性能のコンピュータの存在が必要である。しかしながら、これまでコンピュータの高性能化を牽引してきた半導体素子の微細化路線、すなわちムーアの法則に陰りが見え始めてきており、時代が要求する膨大な演算能力を実現するためには、コンピュータの基本論理構造も一新する必要性が生まれている。そのような中で、現在のコンピュータでは到底実行不可能な複雑で高度な計算を可能にするコンピュータとして量子コンピュータへの期待が高まっている。量子コンピュータの概念は 1980 年代に提唱され、その後、その概念を具現化し、有効に機能させるために基本設計 (アーキテクチャ)、演算手法 (アルゴリズム)、演算素子とその集積化 (デバイス) といった種々の側面で多くの基礎的成果が積み上げられてきた。この間、日本の研究者もその発展に対し、多大の貢献を行ってきた。従来のデジタルコンピュータ (量子コンピュータに対する言葉として古典コンピュータとも呼ばれる) が 0 と 1 の二値で表されるビットに論理ゲート操作を施すことで演算を実行するのに対し、量子コンピュータでは、量子ビットと呼ばれる 0 と 1 の重ね合わせ状態を作りだし、複数の量子ビット間にもつれや干渉といった量子現象を引き起こすゲート操作を施すことで演算を実行する。そのような量子ビット演算を有効に活用できる演算手法を生み出すことで、量子コンピュータでは古典コンピュータにとって膨大な演算を瞬時に実行することが可能になる。しかしながら前述の量子状態は、外界から様々な形で到来する微小な電磁雑音、あるいは動作温度がもたらす熱雑音によって容易に壊され、所望の演算が実行できなくなる。このような雑音削減のため、極低温での動作が必要になるが、そのような環境下でも、超伝導機器等で出現する微妙な量子コヒーレンス現象¹を精密に制御し、量子ビット演算を行うのは容易ではなく、従来の演算技術を凌駕する量子演算を実行するには数十年程度の技術開発が必要と考えられていた。しかるに量子ビット演算を実行する超伝導機器を用いた回路の高度化、それを制御する周辺電子技術の進展、量子誤り訂正方式の進展、さらには高度の情報処理を量子ビット演算回路で実行する新たな演算手法の創出により、量子コンピュータの実現が一気に視界に入ってきた。量子コンピュータとしては特殊な形態である量子アニーリング・マシン²をカナダの D-Wave System 社が 2011 年に商用化することで、従来のコンピュータの能力をはるかに超える量子コンピュータへの期待が一気に高まってきた。

このような状況を受けて、IBM 社、Google 社、Intel 社といった世界展開の IT 企業が超伝導演算回路を用いた量子コンピュータの研究開発に着手、最近では Alibaba 社、Huawei 社を始めとする中国の IT 企業も研究開発を開始している。このような動きに触発され、各国で多くのベンチャー企業が量子コンピュータの開発を目指して設立されている。米国、欧州、中国で、将来の情報社会における量子コンピュータの可能性をにらみ、大型の国家予算に

¹ 量子コヒーレンス現象・時間 : 量子力学ではものの物理的状態 (量子状態) は波動関数で表示される。量子コヒーレンスとは同じひとつの粒子 (量子) が二つ以上の状態に対応する波動関数の重ね合わせ状態にあること。この状態は外界からの擾乱によって容易に破壊され波動としての干渉性を失う。干渉性を失う時間を量子コヒーレンス時間と称する。

² 量子アニーリング・マシン : 東工大の門脇・西森によって提唱されたイジング・モデルの最低エネルギー状態にたどりつく理論を土台に演算手法を構築、量子コンピュータとして上記プロセスを実行可能とした。セールスマン問題のような最適化問題で力を発揮する。

よる研究開発計画が動き始めている。日本においてもQ—LEAP³と称される文部科学省の大型研究計画、あるいはJSTのCREST、さきがけ、ERATOなどで量子コンピュータに関する研究計画が開始されている。

上記のように量子コンピュータ実現への期待が高まっているが、そのための技術障壁は高く、今後、多くの技術革新が望まれると共に、全く新しい基本設計思想、演算手法、演算回路、周辺機器等が生まれてくる可能性がある。その意味で、まだ開発競争の勝負は決着しておらず、長丁場が予想される開発競争に、日本がしっかりと加わり、先導的役割を果たせるような研究開発体制の構築が今、求められている。量子コンピュータ実現への技術障壁は高く、日本単独での達成は難しい。日本はしっかりと海外に目を向け、その研究開発能力の高さを発信することで、大きな存在感を示し、海外と有力な連携を構築し、研究開発を加速すべきである。

量子コンピュータの実現のためには大きく三つの技術領域が必要である。一つ目は量子ビットと呼ばれる基本演算素子を集積化し、量子ビット集積回路としての動作を可能にすることである。ここでは量子ビットの動作を理解し、制御するために量子力学や材料科学の知識が、また集積回路を構築するために電子工学の知識が必要となる。二つ目は、応用目的に合わせて演算手法を考案し、量子ビット集積回路を動作させる様々な階層のソフトウェアの開発である。ここではコンピュータ科学の知識が必要となる。三つ目は量子ビット集積回路が動作する特殊環境（超伝導量子ビットの場合は極低温冷凍機、イオントラップ量子ビットの場合は超高真空装置）への実装から始まって、情報の入出力を制御する室温下の高速電子回路技術の構築に至るまで、ハードウェアとしてのコンピュータシステムを構築することである。ここではマイクロ波工学、半導体による超高速電子技術、低温実装技術などの広範な分野のエンジニアリングが必要となる。特に極低温下の量子ビット集積回路と室温下の制御回路との情報の入出力に対しては、熱の流入を抑える、また入出力配線ケーブルでの遅延を低減し、高速の制御を実行するとの目的で、できる限り多くの制御動作をヘリウム温度（4.2K）等の低温環境下の超高速電子回路で実行することが望まれる。上記のように量子コンピュータの実現には、広範な専門分野の研究者、技術者が協力しあうことが必要となる。日本でも量子ビット集積回路の開発と量子ソフトウェアの開発に関して国家研究計画による支援が始まっている。今後はこれらに加えて、量子ビットの集積度向上に伴い、重要度が増大する三つ目の技術領域の開発をも支援し、国策として象徴となる量子コンピュータ試作機の実行することが急務と考える。これを実行するためには上記の広範な専門分野の研究者、技術者が集結し、連携を可能とする量子コンピュータ実現のための拠点が必要であり、海外に対し、日本の量子コンピュータ開発の窓口として存在感を高めることが望まれる。

以下、本報告書では、第2章、第3章で量子コンピュータが必要とされる理由、具体的に適用が期待される応用分野、第4章で国内外における開発の現況、第5章で研究開発の具体的な内容とその課題、最後に第6章で日本がこの分野で先導的な役割を果たすための施策提言を述べ、第7章でまとめる。

第2章 量子コンピュータが必要な理由

我々の生活空間、あるいは働く場には多くのセンサーが付与され、必要に応じて多様か

³ Q-LEAP：量子科学技術（光・量子技術）を駆使して非連続的な解決（quantum leap）を目指す「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」。量子情報処理、量子計測・センシング、次世代レーザーをテーマに、技術領域毎にFlagshipプロジェクトと基礎基盤研究を実施する。研究期間は2018～2027年度の10年間。

つ大量の情報（ビッグデータ）が吸い上げられ、それらがクラウド側に伝送される。クラウド上の超高速コンピュータでは大量の複雑な情報の解析がなされ、我々に新たな情報サービスを提供する。いわゆる IoT/AI 時代の到来だが、取り扱うべき情報量は指数関数的に増大しており、2020 年には 40 ゼットバイト（ZB）[2-1] に達すると言われている。このような大量のデータを取り扱うためには、超高性能のコンピュータが必要になってくるが、コンピュータの高性能化を牽引してきた半導体素子の微細化による半導体集積回路の高性能化が微細化寸法 10 ナノメートルに達するにつれ、難しくなっている。また取り扱う情報量が増大するに伴い、情報処理速度や消費電力の面で、従来のノイマン型コンピュータの限界が顕在化してきている。一方で、市場はコンピュータの能力の増大を強く要求しており、これに応えるためには半導体素子の微細化だけでは困難であり、従来のノイマン型演算方式を乗り越える非ノイマン型の設計思想の登場が必要になっている。量子コンピュータは全く新しい演算方式に基づいており、特定の問題に対しては桁違いに高速の処理が可能なが既に数学的に証明されており、非ノイマン型のコンピュータの代表として期待されている。量子コンピュータはどんな問題に対しても高速に解を提供できるわけではなく、将来も従来のノイマン型のコンピュータが大部分の情報処理を担当するであろうが、高度の AI 処理、複雑な物質の設計に必要な科学技術計算等、従来型コンピュータでは実行が困難な問題に対し、アクセラレータとして従来型コンピュータを支援する役割を果たすと考えられる。

上記のように量子コンピュータへの期待は高いが、その実現には、固体中に出現する脆弱な量子現象を制御することが必要であり、実現ははるか先の話であると思われてきた。しかるに 1999 年に超伝導回路で量子現象を制御することで、量子コンピュータの基本演算動作に対応する量子ビットの動作が実証されて以来 [2-2]、量子コンピュータとしての可能性を示す量子ビットの量子コヒーレンス時間は数ナノ秒から数百マイクロ秒にまで5桁も増大してきた。また、カナダの D-Wave Systems 社が、量子アニーリング・マシンを 2011 年に商用化することで量子コンピュータの開発競争に火が付き、現在では 100 個の量子ビットを超す集積化が実現されている。

このように量子コンピュータの具体的な姿が描けるようになってきたことで、将来の情報社会を先導する非ノイマン型のコンピュータとしての期待が現実のものになろうとしている。しかしながら、その実現には第 5 章で述べるように多くの技術的課題が山積しており、その道のりは長いと予想される。量子コンピュータの開発では欧米が先行しているが、長い道のりのスタートラインに立った段階にあり、日本として研究開発を加速し、海外に対し、存在感を発揮する必要があると考える。

[参考文献]

[2-1] “全世界のデジタル情報量、2020 年には 40 ゼットバイトに“、

<https://www.itmedia.co.jp/enterprise/article/1212/12/news049.html>

[2-2] Y. Nakamura et. al., “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box”, Nature Vol. 398, pp786-788 (1999).

第3章 期待される応用分野

現在、情報処理の観点から量子コンピュータに期待される応用先は大きく二つの流れがある[3-1]。一つは量子化学計算に代表される量子系のシミュレーション、もう一つは量子機械学習である。いずれも汎用性のある計算であり、その適用先の産業分野は、材料・製造、化学・創薬、ICT、医療、娯楽・ゲーム、サービスなど広大である（図 3-1）。本章では演算手法の観点から有望視されている応用分野を眺める。

なお、数学的に有効性が証明されている革新的演算手法に素因数分解を行うショアの演算手法[3-3]があり、この演算手法を利用した量子コンピュータが実現されると、大きな数の素因数分解の困難性を利用して安全性が担保されている現在の RSA 暗号が短時間で解読できてしまう。この暗号解読の脅威が現実のものになるには、数百万を超す量子ビットが集積された誤り耐性のある量子コンピュータが必要であり、現状では実現はかなり先になると予想されるため、ここでは議論を省く。

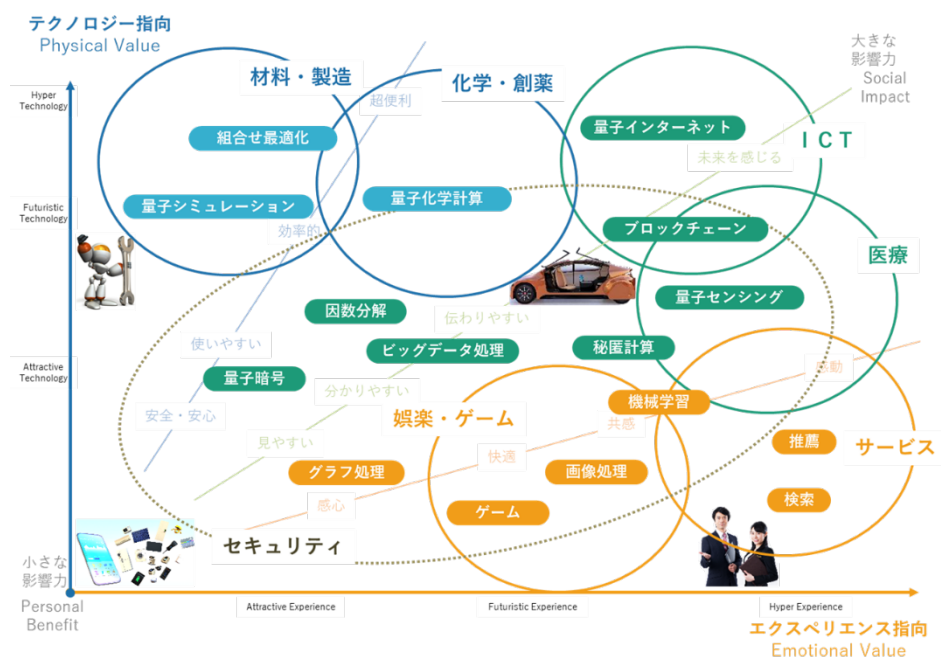


図 3-1 量子コンピュータの応用先
（文献[3-2]より許可を得て掲載）

3-1. 量子化学計算

数値シミュレーションは科学研究だけでなく産業上の多くの場面で重要な役割を果たす。とりわけ、化合物の物性やシステムのダイナミクスなど、偏微分方程式などで与えられる基本方程式だけから複雑な系の性質を解析的に予測することは困難であるため、数値シミュレーションが重要となる。多くの電子が互いに相互作用を及ぼしあう量子多体系の場合には、電子数やスピン軌道数の増加に対して扱うべき物理的な状態数が指数関数的に増大するため、数値シミュレーションの難易度は急激に高くなる。系を記述するハミルトニアンは巨大となるため、通常は厳密対角化せず DFT（密度汎関数理論）や CC（結合クラスター理論）などの近似解法を用いる。

「量子力学に従う自然を効率よくシミュレーションしたければ量子力学のルールに従って動作するコンピュータを作る必要がある」というFeynmanの指摘[3-4]の通り、古典コンピュータ（従来のノイマン型コンピュータ）による量子多体系の効率的な計算が困難であることと、それを量子コンピュータであれば指数関数的に加速できることは表裏一体

である。量子系のエネルギー固有値を求める問題では、位相推定法を用いることで現在知られている最高の古典的演算手法より速く計算できることが知られている[3-5]。この方法では量子ビット数や量子ゲート操作精度といったハードウェア上の性能に対する要求は高く、長期的に登場が期待される誤り耐性量子コンピュータ⁴上で動作させる演算手法と見なすべきである。

より近い将来で実現可能なハードウェア（NISQマシン⁵）を前提として、その上で動作する量子・古典ハイブリッド型の演算手法が近年精力的に研究されている[3-6]。代表的な演算手法として変分法を量子コンピュータ上で実行するVQE（Variational Quantum Eigensolver：変分法による量子固有値解法）が知られ、超伝導量子ビットでのデモンストレーションも報告されている[3-7]。この方法は、変分パラメータを含む量子ゲート操作と観測によってエネルギー期待値を求める量子演算部分と、変分パラメータを変化させてエネルギー期待値を最小化する古典最適化部分からなり、適切なユニタリ変換を選ぶことで量子ゲート操作回数の少ない計算が可能である。また、補助量子ビットが不要であることや、系統的な誤りに対する堅牢性など、NISQマシンに望ましい性質をもつが、解の高精度化には多数の観測が必要となる。

励起状態についても同様の枠組みで計算することができ、基底状態との重なりにペナルティを課す方法[3-8]や、励起演算子を用いる方法[3-9]、部分空間探索 VQE[3-10]などが提案されている。励起状態のエネルギー固有値を精度良く求めることは、量子コンピュータが古典の従来手法に対して優位性を示す応用先と有望視され、世界中で精力的に研究が進められている。

3-2. 量子機械学習

機械学習は産業応用上インパクトのある汎用技術であり、量子コンピュータによって効率的に機械学習タスクが実行できるようになれば、そこで開かれる市場機会は膨大である。量子機械学習で期待されているのは、古典コンピュータでは認識することが難しいパターンの効率的な認識である[3-11]。前節で紹介した量子系のシミュレーションとは異なり、この場合の問題設定自体は量子力学とは無関係だが、量子コンピュータは量子力学のもつ線形代数構造を活用して巨大行列の固有値や特異値を効率的に計算できる。

量子コンピュータによる機械学習は、指数関数的に高速に特定の一次方程式を解くことができる Harrow、Hassidim、Lloyd による量子演算手法（HHL 演算手法と呼ばれる）を発端として、量子サポートベクターマシン、量子リッジ回帰、量子深層学習など誤り耐性量子コンピュータ上での実行を想定した多数の量子演算手法の提案がある。これらの演算手法が要求するハードウェア性能は現時点での NISQ マシンでは未達であるが、それを可能にすべく、データ入出力やリソース推定について精力的な研究が進められている。

量子化学計算と同様に、機械学習タスクについても、近い将来に実現が期待される NISQ マシン上での動作が期待される量子・古典ハイブリッド型の演算手法が注目されている。代表的なものに量子回路モデルで組合せ最適化問題を解く QAOA（Quantum Approximate Optimization Algorithm：近似的量子最適化演算手法）が挙げられる[3-12]。機械学習タスクのひとつである分類問題を重み付き MAXCUT 問題として定式化し、QAOA で最適解を求めるというデモンストレーションが Rigetti Computing の研究者らによって行われた[3-13]。特徴量空間として量子状態を利用する考え方は、変分量子回路により教師あり機械学習を

⁴エラー耐性量子コンピュータ：量子誤り訂正符号により多数の物理的な量子ビットを論理量子ビットに符号化し、大規模な計算を精度保証付きで実行できるデジタル量子コンピュータ。

⁵ NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)：小～中規模でエラー耐性がない近似的な量子コンピュータ。

行う QCL (Quantum Circuit Learning : 量子回路学習) [3-14]や量子コンピュータ上でカーネル関数を推定して古典サポートベクタマシンを最適化する手法[3-15]など、昨今の AI ブームに伴って研究が活発化しており、NISQ マシンの応用先として期待が高まっている。

[参考文献]

- [3-1] 『量子コンピュータ／イジング型コンピュータ研究開発最前線～基礎原理・最新技術動向・実用化に向けた企業の取り組み～』, 情報機構 (2019).
- [3-2] CRDS, 『戦略プロポーザル みんなの量子コンピューター～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～』, CRDS-FY2018-SP-04 (2018).
- [3-3] P. W. Shor, "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring", Proceeding of 35th IEEE FOCS, pp.124-134, Santa Fe, Nov 20-22 (1994).
- [3-4] R. P. Feynman, "Simulating physics with computers," International Journal of Theoretical Physics, 21, pp. 467-488 (1982).
- [3-5] Daniel S. Abrams and Seth Lloyd, "Quantum Algorithm Providing Exponential Speed Increase for Finding Eigenvalues and Eigenvectors", PRL. 83, 5162 (1999).
- [3-6] Yudong Cao et.al., "Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing", arXiv:1812.09976 (2018).
- [3-7] Abhinav Kandala et.al., "Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets", Nature 549, 242 (2017).
- [3-8] Oscar Higgott et. al., "Variational Quantum Computation of Excited States", arXiv:1805.08138 (2018).
- [3-9] Jarrod R. McClean et. al., "Hybrid quantum-classical hierarchy for mitigation of decoherence and determination of excited states", Phys. Rev. A 95, 042308 (2017).
- [3-10] Ken M Nakanishi et.al., "Subspace-search variational quantum eigensolver for excited states", arXiv:1810.09434 (2018).
- [3-11] J. Biamonte et. al., "Quantum machine learning", Nature, 549, 195 (2017).
- [3-12] E. Farhi et. al., "A quantum approximate optimization algorithm", arXiv:1411.4028 (2014).
- [3-13] J. S. Otterbach et.al., "Unsupervised Machine Learning on a Hybrid Quantum Computer", arXiv:1712.05771 (2017).
- [3-14] K. Mitarai et. al., "Quantum circuit learning", Phys. Rev. A 98, 032309 (2018).
- [3-15] Vojtěch Havlíček et.al., "Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces", Nature 567, 209 (2019).

第4章 開発の現況

4-1. これまでの経緯

量子コンピュータの歴史は、1980年に Benioff が量子系においてエネルギーを消費せずに計算が行えることを示したことに端を発し[4-1]、1982年には Feynman も量子演算が古典計算に対し、指数関数的に有効ではないかと推測している[4-2]。また、それ以前の1959年に Feynman はカリフォルニア工科大学での講演において、原子分子段階ではまだ活かされていないスペースが十分にある（There's plenty of room at the bottom）という有名な言葉を残している[4-3]。1985年には、Deutsch によって量子チューリングマシンが定義され[4-4]、1989年に量子演算回路が考案されている[4-5]。1990年代に入ると、Deutsch と Jozsa による「ドイチュ・ジョサの演算手法」[4-6]、Vazirani と Bernstein による「万能量子チューリングマシン」と「量子フーリエ変換」の演算手法[4-7]などが提案されたが、中でも最もインパクトが大きかったのは、1994年にベル研の Shor が示した「ショアの演算手法」である[3-3]。この演算手法を用いた量子コンピュータが実現されると、現在、素因数分解の困難性を利用して安全性を担保している RSA 暗号が短時間で解読される可能性があることから、学术界、産業界から量子コンピュータが広く注目されるようになった。その後も Steane や Shor らによって「量子誤り訂正演算手法」や[4-8, 4-9]、Grover による「グローバーの演算手法」[4-10]、西森秀稔らによる「量子アニーリング法」[4-11]が提案された。このように古典コンピュータよりも本質的に高速な量子コンピュータが可能であるとの理論的状況証拠が示され、いわゆる第一次量子コンピュータブームを迎えたものの、当時、量子コンピュータを実際に動作させるハードウェアを作ることは技術的には非常に困難とされていた。

そのような中、1999年、NEC の中村泰信らが超伝導回路を用いて世界で初めて固体素子により量子ゲート（1量子ビット）が実現できることを実証した[4-12]。また、2008年には Wineland が個々にイオンをレーザー冷却して補足することが出来ることを示したことで[4-13]、個々の量子もつれ状態にあるイオンをマニピュレーションするイオントラップ型量子コンピュータの研究が進展したものの、誤り訂正符号理論がハードウェアに要求する量子ビット数とエラー率が非現実的な値であり、処理能力向上の技術的な見通しが得られず、次第にブームは下火となっていた。

2000年代に入り、新しい誤り訂正符号の手法がいくつか発見され、当初0.01%しか許されなかった誤り閾値は1%程度まで緩和されたが、依然として誤り耐性量子コンピュータ開発の技術障壁の高さが存在する中、2011年に突如として「世界初の商用量子コンピュータ」を謳ったマシンをカナダ D-wave Systems 社[4-14]が発表した。このマシンは量子アニーリング法を用いた最適化問題に特化した専用計算機で、初号機（D-wave One）は128個の量子ビットを搭載していた。2013年には512量子ビットを搭載した2号機（D-wave Two）を発表し、Google や NASA などが購入して試験を開始したことで、量子コンピュータブーム再燃のきっかけとなった。その後も2015年に D-wave 2X（1024量子ビット）、2017年に D-wave 2000Q（2048量子ビット）を次々に発表している。

一方、この頃、量子ゲート方式の量子コンピュータでも大きなブレークスルーあった。2014年、米カリフォルニア大学サンタバーバラ校（UCSB）の Martinis グループは、それまでの限界を破る高精度の量子ビット（1量子ビットゲート忠実度99.92%、2量子ビットゲート忠実度99.4%、測定忠実度99%）の開発に成功し、エラー訂正がほぼ実行可能な5量子ビット量子コンピュータを動作させることに成功した[4-15]。このブレークスルーはこれまでの超伝導量子ビット開発の長年の蓄積によるところが大きく、超伝導量子ビットの寿命（コヒーレント時間）は電荷雑音対策、共振器による電磁場モード閉じ込め、動的デ

カップリング、表面・界面効果の希釈など、様々な技術の積み重ねによって、この 20 年弱で 5 桁程度向上している。

Martinis らの結果は、表面符号による量子誤り訂正に必要な誤り率 1 % の閾値を満たし、このまま系の大規模化が実現すれば理論上は誤り耐性量子コンピュータが実現できることを意味していたため、研究者のみならず、企業や投資家が抱いていた量子コンピュータ実現可能性に対する心理的バリアを取り除く結果を招くこととなった。結果として、同じく 2014 年には Google が Martinis グループを自社雇用することで研究支援を開始し、第二次量子コンピュータブームに火がつくことになる。

第二次ブームの特徴は、「量子コンピュータをいかに作るか」という工学的なフェーズに入ったことである。実際に、超伝導量子ビット方式の量子コンピュータに関しては、Google、IBM、さらにはベンチャ企業の Rigetti computing が開発競争を繰り広げている。Intel はオランダのデルフト工科大学の量子技術研究機関である QuTech とともに、超伝導量子ビット方式および半導体量子ビット方式で参戦している。また、それ以外の方式による量子コンピュータを目指すベンチャ企業としては、イオントラップ方式の IonQ、光量子方式の Xanadu なども登場している。Microsoft は、量子コンピュータのためのソフトウェア、量子演算手法の研究開発に加え、マヨラナ粒子と呼ばれるトポロジカルに保護された新方式量子ビットの開発を行うために Station Q という研究計画の下、米国内のみならず、米国外の複数の大学との共同研究を実施している。

現状、量子コンピュータのハードウェアとして、超伝導量子ビット方式で 20 量子ビットの集積回路が動作確認済、50~70 量子ビットの集積回路が完成 (Google、Intel + QuTech、IBM)、評価中という状況であり、この数年の間には 100 量子ビットが達成されると期待されている。ただし、量子ビットの数が増えたとしても演算精度が低いと性能を発揮することができないため、演算精度にも注目していく必要がある。

実際の量子コンピュータは、一つ一つの量子ビットに生じる誤りはわずかであっても、計算を長く続けるとそれが積み重なって間違った演算結果を生んでしまう。このような誤りを含む小規模な量子コンピュータを、2018 年にカリフォルニア工科大学の John Preskill は「Noisy Intermediate-Scale Quantum computing : NISQ」と呼んだ[4-16]。それ以前の 2012 年に Preskill は「量子超越性」という言葉を提唱している。これは 50 量子ビット前後で量子コンピュータが得意な問題を解いたときに古典コンピュータを演算速度で上回ると言われるもので、現在、上述の米国企業その他、欧州、中国、日本を中心に、多くの研究者・技術者が「量子超越性」を目指した研究開発に凌ぎを削っている。

以上、述べてきた量子コンピュータ開発の経緯を図 4-1 にまとめておく。

1980年代	米国で量子コンピュータの概念提唱(ファインマン、ベニオフ、ドイッチュ)
1994年	ピーター・ショア による素因数分解アルゴリズム * 現在のRSA暗号が一瞬に解読可能(学会、産業界が量子コンに注目)
1995年	ピーター・ショア による量子誤り訂正符号
1998年	西森、門脇 による量子アニーリング理論
1999年	中村、蔡 らによる超伝導量子ビット * 固体素子で量子ビットを初めて実現、集積化の可能性を提示
2011年～	D-Wave Systems社 (加)が量子アニーリングマシンを市販。 「D-Wave one」(128量子ビット@2011)、「D-Wave two」(512量子ビット@2013)
2013年	Googleが「D-Wave two」を「購入し」、「量子AIラボ」設立
2014年	UCSBのMartinis 等が高忠実度量子ビット実現 * 量子誤り訂正が適用可能に Google がUCSBのMartinisグループを自社雇用
2017年	IBM が20個の量子ビットを備えたプロセッサを発表、クラウド上でのサービス開始 D-Wave Systems 社が「D-Wave 2000Q」(2048量子ビット)をリリース
2018年	Google が72量子ビットのプロセッサ「Bristlecone」の着手を発表 Alibaba が11量子ビットのプロセッサでクラウドサービス開始 IBM が「IBM Q System One」(20量子ビット)の商用開始 Ion Q社 が160量子ビットを搭載したデバイス発表、動作は11量子ビット

世界中で量子コンピュータ開発競争激化

(図 4-1) 量子コンピュータ開発の経緯一覧図

4-2. 量子アニーリング方式と量子ゲート方式

前節で述べてきたように 2013 年にいち早く商用化を実現したのは量子アニーリング・マシンであるが、最近は量子ゲート方式を用いて量子コンピュータを実用化しようとの流れが研究の主流になっている。量子ゲート方式によるコンピュータは古典コンピュータに対して圧倒的な優位性を持つことが、いくつかの問題に対して数学的に証明されている。これに対し、量子アニーリング方式による優位性は解くべき問題に依存し、数学的な優位性が完全には証明されてはいない。量子アニーリング方式では、カナダのD-Wave System社が先行しており、2000 量子ビットを超えるマシンを開発し、種々の応用に適用し、その有効性を実証しようとしている段階にある。量子アニーリングでは、横磁場の基底状態から出発した量子状態を、無限の時間をかけて（正確には断熱定理の条件下で時間発展させて）、所望の最適解（解きたい組合せ最適問題の解）に対応する量子状態へと推移させる。しかしながら、現存する量子アニーリング・マシンでは上記の量子状態の推移を無限時間ではなく有限時間で行っている。したがって、基底状態ではなく、ある有限温度の熱分布状態に到達している可能性が高い。問題の解を速く得ようとすればするほど、必ずしも最適ではない解に到達する可能性が高くなる。しかし、逆に言えば、この状態を何度も実行することで、熱分布状態のサンプリングが実行でき、最適解を推測できる可能性がある。最近の動向として、量子力学的な多体相互作用を横磁場に代わる量子揺らぎ⁶として導入する動きがある。これによって量子アニーリングはゲート型量子コンピュータが目指してきた万能性を有することも知られており[4-17]、量子アニーリング方式と量子ゲート方式の開発が同じ方向に進む可能性がある。どちらの方式も演算素子段階、あるいは実装段階で要求される課題は類似であるため、量子アニーリング方式の進化した姿は量子ソフトウェ

⁶ 横磁場以外の量子揺らぎ：量子アニーリングではイジング・モデルに加えて単純な一定の横磁場を量子揺らぎとして加えるが、その横磁場をもっと複雑な磁場に置き換える。

https://quantum.fixstars.com/introduction_to_quantum_computer/quantum_annealing/ising_model/theory/

アの研究課題として追及することを前提に、以下では量子ゲート型を想定して議論を進めていく。

4-3. 国内外の研究資金投資状況と開発状況

【米国】

米国では、2009年に国家科学技術会議 (NSTC) が「A Federal Vision for Quantum Information Science：量子情報科学に関する国家ビジョン」を公表し、それを受ける形で全米科学財団 (NSF) が「量子情報科学における学際的研究プログラム」(年間 400 万ドル (2015 年)、1 件あたり数千万円規模の科学研究補助金) を開始した。NSF が 2016 年 8 月に発表した「NSF が未来に向けて投資すべき 10 のビッグアイデア」における六つの「研究アイデア」のうちの 하나가「Quantum Leap (量子飛躍)」、また四つの「プロセス・アイデア」のうちの 하나가「NSF としてのコンバージェンス研究の拡大」であった。これを受け、2017 年 8 月にコンバージェンス研究関連の支援領域として「量子飛躍」が設定され、三つの課題が採択された。以降も「量子飛躍」領域の公募は続き、「量子システムにおける革新的な進歩」や「量子通信のための統合プラットフォーム」などが採択課題となっている。量子コンピュータの量子化学への適用については、EAGER (EARLY-CONCEPT GRANTS FOR EXPLORATORY RESEARCH) 計画を通じて量子飛躍の公募が開始され、10 の検討領域が示されている。

2018 年には、科学技術政策局 (OSTP) 及び NSTC 科学委員会の量子情報科学小委員会 (SCQIS) が「国家量子情報科学戦略の展望 (National Strategic Overview for Quantum Information Science)」と題する報告書を公開すると同時に、エネルギー省 (DOE) 及び NSF がそれぞれ量子情報科学 (QIS) 研究開発計画への資金提供を発表した。上記の国家戦略では基礎研究への支援を強調しており、DOE は最先端量子試験用プラットフォームの構築・運用など、大学や国立研究所による 85 の課題に対して、今後 2～5 年間で 2 億 1800 万ドルを投入する。一方、NSF は、量子センシングや演算技術、量子通信などの分野に 3100 万ドルを拠出する予定である。

さらに同年 12 月には、国家量子先導戦略法 (National Quantum Initiative Act) が成立し、2019 年からの 5 年間で 12 億 5000 万ドルが量子技術研究に投じられる。この分野を強化している中国や欧州を念頭に、OSTP の下に設置する国家量子調整室 (National Quantum Coordination Office) が研究成果、専門知識の集約や人材育成までを含めた包括的な戦略、基本計画をまとめる予定である。

【欧州】

欧州では、オランダのデルフト工科大学に 2013 年に QuTech が開設された。これを契機に、オランダ政府は翌年「量子技術」を科学技術外交における四つの「National Icon」の一つに位置づけ、研究推進構想として大規模な政府投資を行うことを発表した。QuTech は、Microsoft や Intel などと共同研究を行うなど産業連携にも取り組んでおり、欧州の量子科学技術研究の中心的な担い手として注目されている。2016 年、QuTech の研究者を中心とした多数の研究者により「Quantum Manifesto」が発表された。それに応じる形で欧州委員会は Horizon 2020 の枠組みの中で「Quantum Flagship」計画のロードマップを公表し、量子通信、量子シミュレーション、量子演算技術、量子センシングの重点領域のほか、欧州が独自に注目する二つの新興領域 (量子ソフトウェアと量子コントロール) を定めた。2018 年秋には Quantum Flagship に採択された 20 の課題が発表され、10 年間で 10 億ユーロが投じられることになっている。

欧州の中では、ドイツ政府が量子技術に積極的であり、「Quantentechnologien - von den Grundlagen zum Markt (量子技術 - 基礎研究から市場へ)」という 2018 年からの 5 年計画に約 6 億 5000 万ユーロを投資している。また、イギリスでは 2014 年から進められている The

UK National Quantum Technologies Programme（5年で2億7000万ポンドの予算）の下、UK National Network of Quantum Technology Hubs が開始されている。

【中国】

中国では、科学技術に関する基本政策である「国家中長期科学技術発展計画綱要 2006～2020 年」において、重大科学研究の一項目として「量子制御」が位置づけられている。また、「第 12 次五カ年計画 (2011～2015)」においても、量子情報処理、量子シミュレーション、量子通信および情報保全が重要な領域に指定された。2015 年には、中国科学院 (CAS) が IT 企業の Alibaba と共同で「量子演算実験室」を設立し、量子情報科学の先進的研究、量子コンピュータの開発に取り組むことで合意した。約 5 億円/年の予算で、両社の技術的強みを活かし、以下の研究計画を定めている。

- ・ 2025 年までに、量子コンピュータによる量子化学シミュレーションを 2015 年時点における世界最速スーパーコンピュータの水準にまで高める。
- ・ 2030 年までに 50～100 量子ビットの汎用の量子コンピュータ（試作機）を開発し、量子コンピュータ用集積回路の大量生産技術を確立する。物理層の設計・製造から、演算法実行の独自開発に至るまで、汎用の量子演算機能を実現し、ビッグデータ処理などの重大かつ実質的な問題に応用する。

2018 年には 11 量子ビットの量子コンピュータをクラウド提供するなど活発な研究開発を進めている。また、安徽省合肥市の 37 ヘクタール（およそ 400 万平方フィート）の土地に、100 億ドル規模の量子情報科学国家実験室を建設中である（2020 年開設予定）。量子計測学と量子コンピュータの構築という二つの大きな研究目標を掲げており、どちらも国防・軍事的活動と民間開発の双方を支援するための取り組みである。

【日本】

我が国では、量子情報処理を含む量子技術は、「ナノテクノロジー」や「ライフサイエンス」などの分野に組み込まれた個別の研究計画として散発的に研究開発が進められてきたが、中長期的な展望にもとづく政策的な後押しによって量子技術を一体的に進めることは行われて来なかった。2017 年 8 月に文部科学省量子科学技術委員会が「量子科学技術（光・量子技術）の新たな推進方策」を発表し、「超スマート社会」における新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術として、量子情報処理、量子計測・センシング、極短パルスレーザー、次世代レーザー加工を重視する推進方策を打ち出した。研究投資計画としては、2016 年に JST の CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」、さがけ「量子の状態制御と機能化」、ERATO「中村巨視的機械プロジェクト」が発足した。2018 年には文部科学省が量子科学技術（光・量子技術）を駆使して非連続的な解決（quantum leap）を目指す「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」を開始している。Q-LEAP においては、プログラムディレクター（PD）の研究開発マネジメントの下、量子情報処理（主に量子シミュレータ・量子コンピュータ）、量子計測・センシング、次世代レーザーの三領域でそれぞれネットワーク型研究拠点を形成し、領域毎に Flagship プロジェクトと基礎基盤研究が 10 年の予定で実施されている。超伝導量子コンピュータの研究開発、固体量子センサーの高度制御による革新的センサーシステムの創出、先端レーザーイノベーション拠点の三課題が採択されているものの、海外に比べると予算規模が一桁少ないのが現状である。

【参考文献】

- [4-1] P. Benioff, “The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines”, J. Stat. Phys. Vol. 22, pp563-591 (1980).

- [4-2] R. P. Feynman, “”, Int. J. Theor. Phys. Vol. 21, pp467-488 (1982).
- [4-3] R. P. Feynman, "There's Plenty of Room at the Bottom", 29th annual meeting of the American Physical Society at Caltech (1959).
- [4-4] D. Deutsch, “Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer”, Proc. Roy. Soc. Lond. A Vol. 400, pp97-117 (1985).
- [4-5] D. Deutsch, “Quantum computational network”, Proc. Roy. Soc. Lond. A Vol. 425, pp37-90 (1989).
- [4-6] D. Deutsch and R. Jozsa, “Rapid solution of problems by quantum computation”, Proc. Roy. Soc. Lond. A Vol. 439, pp553-558 (1992).
- [4-7] E. Bernstein and Umesh Vazirani, “Quantum Complexity Theory”, SIAM J. Comput. Vol. 26, pp1411-1473 (1997).
- [4-8] A. Steane, "Multiple Particle Interference and Quantum Error Correction", Proc. Roy. Soc. Lond. A Vol. 452, pp2551-2577 (1996).
- [4-9] A. R. Calderbank and P. W. Shor, "Good Quantum Error-Correcting Codes Exist", Phys. Rev. A Vol. 54, pp1098-1106 (1996).
- [4-10] L. K. Grover, “A fast quantum mechanical algorithm for database search”, Proceedings of 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing (STOC), pp212-219, Philadelphia, May 22-24 (1996).
- [4-11] T. Kadowaki and H. Nishimori, “Quantum annealing in the transverse Ising model”, Phys. Rev. E Vol. 58, pp5355-5363 (1998).
- [4-12] Y. Nakamura et. al., “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box”, Nature Vol. 398, pp786-788 (1999).
- [4-13] R. Blatt and D. J. Wineland, “Entangled states of trapped atomic ions”, Nature Vol. 453, pp1008-1015 (2008).
- [4-14] D-wave Systems Inc., <https://www.dwavesys.com/home> (2019年4月5日) .
- [4-15] R. Barends, et. al., “Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance”, Nature Vol. 508, pp500-503 (2014).
- [4-16] J. Preskill, “Quantum computing in the NISQ era and beyond”, arXiv:1801.00862 (2018).
- [4-17] J. D. Biamonte and P. J. Love, Physical Review A. 78, 012352(2008).

第5章 研究開発課題

量子コンピュータは因数分解や検索などの特定の問題を効率的に計算できる量子演算手法が複数知られているほか、3章で述べたように量子化学計算や機械学習での利用も期待されている。しかし、現時点では、いずれも実用サイズの計算を実行するにはハードウェアは未開発である。ハードウェアの中心となる量子ビット集積回路の開発目標は、量子ビット高集積化と高忠実度・高操作性の量子ゲート実装、そして量子誤り訂正符号の実装による大規模化であるが、量子誤り耐性が付与された大規模な量子コンピュータの開発には20～30年程度要すると見られる[5-1, 2, 3]。その開発にはソフトウェアやコンピュータの基本設計（アーキテクチャ）の視点もまだ不足している[5-4]。一方で、3章で述べたように、誤り訂正符号を実装しないNISQマシンの開発により、量子コンピュータのより近場での実用化を目指そうとの動きも近年、活発化している。

これらの量子コンピュータの実現に向けては、量子ソフトウェア（5-1,2,3）、量子ビット集積回路（5-4）、量子コンピュータ・システム（ハードウェアの側面から）（5-5）の三つの技術領域の研究開発が必要になる。図5-1には、誤り耐性量子コンピュータに関する基本設計（図5-1）の階層構造を示す。図中、上位階層が量子ソフトウェア、下位階層が量子ビット集積回路に相当する。以下では、この上位階層から下位に向かって研究開発課題を順次述べていく。

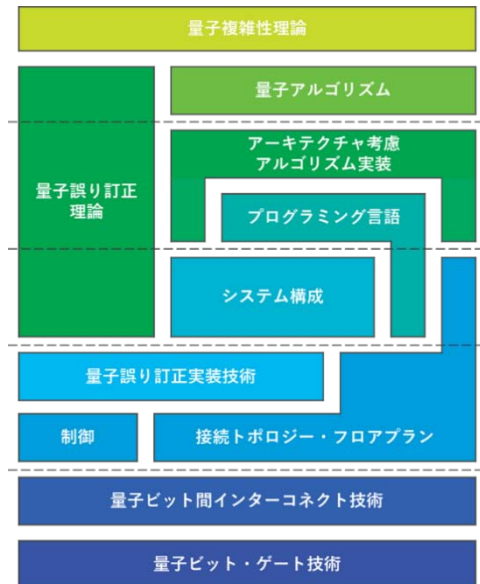


図 5-1 誤り耐性量子コンピュータの階層構造
（文献[5-1]より抜粋・JST-CRDS で和訳）

5-1. ソフトウェア開発

ハードウェア実装技術の進展に伴って、その情報処理能力を最大限引き出すためのソフトウェアの重要性も増してきている。量子コンピュータ用のソフトウェア開発の支援には、プログラミング言語、ライブラリ、コンパイラ、デバッガに加えて、後ろ盾として高性能シミュレータも必要である。現時点では、量子回路という下位階層の視点で演算手法を考えプログラミングする必要がある、そのことが量子化学や機械学習などの分野の専門家と量子情報を経験知として持つ量子演算手法開発者との連携を妨げている。上位の階層に位置するソフトウェアの視点で、問題や制約条件の定式化・表現能力を拡大し、それを機械語に翻訳してハードウェアやシミュレータに適切に関連付けして検証することが重要である[5-5]。

量子プログラミング言語やコンパイラ[5-6]、さらにはシミュレータやライブラリを含むソフトウェア開発プラットフォーム[5-7]は既にいくつかの提案があるが、より高い階層への抽象化や検証・最適化をさらに改善することで、量子演算手法開発者が直面する障壁を大幅に低減可能と期待できる。また、位相推定、グローバ探索、量子ウォーク、変分法、行列積演算など頻出のサブルーチンや量子情報処理固有の操作（測定基底の変換、テレポーテーションなど）を関数・ライブラリとしてまとめることも重要である[5-8]。

短期的には NISQ マシンを用いた量子・古典ハイブリッド計算を念頭に、既存のプログラミング言語やフレームワークから量子プログラムを呼び出せるような統合開発環境が整うようになると、より一層効率よく量子ソフトウェア開発ができるようになるだろう。このような環境の整備は、量子コンピュータ分野の裾野拡大にも効果的である。

5-2. システム・基本設計（ソフトウェアの側面から）

量子コンピュータの基本設計思想は、ハードウェアの規模拡大に伴ってその重要性が増してくる[5-9]。量子コンピュータの基本設計を左右する最も大きな要素は、量子誤り訂正符号である。誤り訂正がある場合とない場合では層構造は大きく異なり、どのように構造化するかは基本設計上の重要なテーマである。現状の 5～50 量子ビットの NISQ マシンを基本設計思想の変更なしにそのまま 100 万量子ビットの系などに大規模化することは不可能である。構成要素の粒度・抽象度、要素間インターフェイス、古典・量子の命令フロー、量子・古典部分のインターフェイスなど、複雑な相反する得失関係の下で決定・設計すべきことは多い。現在のコンピュータの成熟した層構造を最初から目指すのではなく、ある程度、応用領域ごとに特化した基本論理構造を模索するような方向性も提案されている[5-10]。

誤り耐性量子コンピュータでは量子誤り訂正符号方式の選択が、システム構成や各要素の相互関係を決定するだけでなく、物理的な量子ビットの配列や接続性など下位階層の実装状態までも深く影響を及ぼす。超伝導量子ビット系で有望視されている誤り訂正符号は、トポロジカル量子誤り訂正符号の一つである二次元表面符号である[5-11]。この符号は、二次元正方格子状に配置された複数の量子ビット上で動作し、許される誤り閾値が約 1%と高く、誤りの検出・訂正には最近傍量子ビット中の 2 量子ビットゲートまでしか必要としないため、ハードウェアとしての実装がしやすい特徴をもつ。また、二次元正方格子の各辺をそのまま伸ばせば誤り耐性を決める因子である符号距離が大きくなるという高い拡張性も利点である。しかし、単純に二次元平面に量子ビットを配置して配線も同一平面に実装しようとする、必然的に中央部にある量子ビットへの接続は困難となるため、TSV（Through Silicon Via：シリコン貫通電極）やフリップチップボンディングのような三次元実装技術が不可欠となる。

誤り耐性量子コンピュータの演算性能にとって重要な要素は、誤り訂正の速度である。具体的には、誤りを検出するために物理的な量子ビットの測定を行い、その測定結果を解析、誤り訂正の制御信号を量子ビットに送り返す必要がある。このときのデータ量は、量子ビット数やモジュールのクロック周波数に依存するが、現在用いられている暗号の解読を可能とする本格的な誤り訂正量子コンピュータの場合は数十ペタバイト/秒でデータを転送・解析する必要も出てくると見積もられ[5-12]、古典の情報処理としても難易度が高い。

5-3. 量子回路最適化・コンパイラ

量子コンピュータの基本設計を行ううえで解決すべき長期的な研究開発要素として、上述の誤り訂正符号による物理ビットの論理ビット化という抽象化の他に、ゲート操作の抽象化の側面も重要となる。まず量子回路で書かれた量子演算手法に登場する連続量のゲート操作（たとえば回転操作）を有限の精度の離散的な操作に分解する必要があり、精度に

応じて最適なゲート分解を行う演算手法提案[5-13]はあるが、最適化を行うコンパイラは未発達である。

さらに、これらのゲート列を量子誤り訂正符号で記述されるゲート列に分解する必要がある。表面符号上、ゲート操作の実行が困難な特定のゲートをなるべく避けるような最適化やそのようなゲートの利用を可能とするためのマジック状態⁷生成に必要な無数の量子回路まで含めて全体を最適化するマジック状態機能ユニットの提案[5-15]などが知られている。将来的には、最適化された量子回路が元の量子回路と等価であるか検証するツールも必要になるだろう。

5-4. 量子ビット集積回路

現在まで、量子コンピュータ実現に有望と考えられている量子ビット演算集積回路は、超伝導現象とイオントラップ現象を用いた基本素子の構成からなる。これらは既に 100 量子ビット内外の集積化がなされ、量子ビット演算回路としての動作も実証されている。将来的には、Si 量子ドット集積回路 [5-16]、室温で動作可能で日本独自の発想に基づく光量子ビット演算回路 [5-17] にも期待がかかる。

Si 量子ビット集積回路は、まだ数ビットの動作が実現された段階ではあるが、先行する超伝導量子ビット集積回路に比べ、コヒーレンス時間が長い、Si 集積回路の製造技術が適用できる等の利点を持つため、系の処理能力を向上していく上では大きな強みとなる。シリコン量子ビットのもつポテンシャルは、Intel 社も注目しており、QuTech とともに超伝導量子ビットと並行して Si を土台としたスピン量子ビット方式の検討を進めている。

これらの候補機器の現状の位置づけを、ゲート忠実度とゲート速度を尺度に図 5-2 にまとめる。ゲート忠実度は 99% がひとつの目安だが、100% に近づくほど誤り訂正符号を施すことが容易になる。ゲート速度は高速なほど、演算が速く実行できるだけでなく、量子コヒーレンス時間内にどれだけの演算回数が実行可能か、演算の深さを決めるうえでも重要なパラメータである。なお、光量子ビット演算回路に関しては基本的な概念実証段階にあり、特性に関しては未知な部分多く、図へのプロットは控えるが、今後の進展に期待がかかる。

⁷ マジック状態：量子誤り訂正符号上では一部の論理量子ゲートが直接実行できない。マジック状態と呼ばれる特殊な補助状態を使うことで、量子誤り訂正符号上で実行出来る論理量子ゲートだけから、汎用の量子演算に必要な論理量子ゲート群を構成することができるようになる。

ゲート忠実度

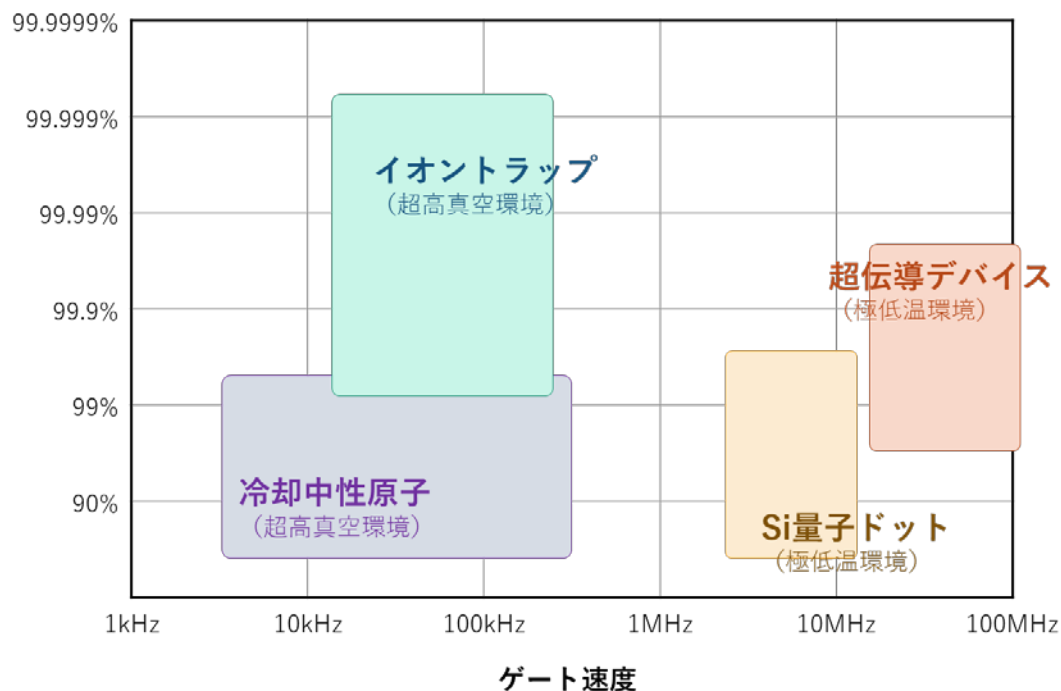


図 5-2. 量子ビット実現系の比較
(文献[3-2]より許可を得て編集、掲載)

これらの量子ビット演算回路では、量子ビットとしての集積度、量子コヒーレント時間、量子ゲート操作の忠実度といった基本特性の向上が今後、重要となる。超伝導量子ビット機器における量子コヒーレンスの劣化は素子が集積化される集積回路上の材料欠陥も要因と考えられ、その同定、制御、隔離には材料科学の研究者の関与も必要となってくる。マイクロ波パルスの量子ビット素子への効率的な投入に集積回路の三次元実装も重要な課題となる。一方、量子誤り訂正に関する発想の集積回路上への実装では、電子工学者とコンピュータ科学者の連携が必要となってくる。

なお、Si 量子ドット集積回路は超伝導量子ビット集積回路同様、極低温の希釈冷凍機中に実装され、マイクロ波パルスによってゲート操作が実行されるため、関連機器の部分を除けば、ハードウェアシステム実装、マイクロ波制御回路含めた周辺電子技術等は本報告書で前提としている超伝導量子ビットを用いた量子コンピュータと同様の議論が展開できる。一方でイオントラップや冷却原子を用いた量子ビット機器では極低温の環境は不要な代わりに超高真空の動作環境が必要になり、ゲート操作もレーザー光パルスを用いるため、システム実装の様子が全く異なってくる。本報告書ではコンピュータ・システムの開発では技術的に先行している超伝導量子コンピュータを前提に議論を進めるが、超伝導以外の量子ビット素子に関しても、集積回路としての可能性追求は、平行して進めるべきと考える。

5-5. 量子コンピュータ・システム（ハードウェアの側面）

本節では量子ビット数増大に伴うハードウェアの技術課題について論ずる。現在進められているシステム技術を用いる限り 1000 量子ビット程度までは視野に入るが、それ以上の規模では新たな技術導入が必要となるだろう。

・小規模システム（1000 量子ビット以下）

量子ビットの誤り耐性を向上させる回路技術に加えて、ケーブルやパッケージなど周辺

からの微小電磁雑音が極力除去された動作環境を構築することが重要になる。電磁雑音の原因のひとつとされている量子ビット演算素子を構成する材料の欠陥を削減する高品質化、また集積回路の三次元構造化により雑音の発生源となりうる部分と量子ビット素子との距離の確保や遮蔽を実現し、量子ビットの雑音に対する耐性を向上させるような工夫が必要となろう。また、ビット数が多くなるにつれ量子ビット制御線の数が増えていく。これまでのような二次元平面の周辺から制御線を配線する方式では不十分となる可能性が高い。三次元的に上下から直接量子ビットに接続する構造などが必要になるだろう。さらに低熱伝導で広帯域のマイクロ波配線の活用、より冷凍能力の高い冷凍機技術を用いることで室温設備との相互接続数を拡張していくことになる。信号の多重化などにより、相互接続に必要な配線量を削減する技術なども必要となる。これらに合わせて、室温制御側の回路技術の高度化も必要となるであろう。

- ・大規模システム（1000 量子ビット以上）

量子ビットの制御の実装・回路部分が大規模化の大きな制約となる。したがって、量子ビット制御機能をヘリウム温度（4.2K）などの低温で行うハードウェア構成とせざるを得なくなると思われる。これを可能にする低温電子技術の進展が必要である。低温電子回路技術としては極低温 CMOS 集積回路、極低温高周波回路、超伝導 SFQ（Single Flux Quantum：単一磁束量子）回路が候補である。実装面では、大容量・低熱流入で室温と低温部の情報やり取りが可能な光相互接続技術が期待される。規模が大きくなると冷凍機で決まる設備の大きさ問題も懸念される。これに対しては古典コンピュータでも一般的である並列化が重要になる可能性がある。まずコンピュータの基本設計段階の検討が必要だが、計算機間の高度な相互接続技術が重要になってくると思われる。

また量子誤り訂正を行う技術を実用的な性能で実現するシステムを考えると、現状の量子ビットの集積度と誤り率は相反する得失関係にあり、量子ビット演算回路そのもののブレークスルーが必要である。エラーフリーの量子ビットといわれているマヨナラ粒子を用いた量子ビットなどによる冗長性を抑えた究極の誤り耐性量子コンピュータの実現も将来的には期待したい。

5-6. 量子コンピュータ研究開発ロードマップコンピュータ

図 5-3 にこれから想定される量子コンピュータの研究開発ロードマップを量子ビット数と量子ビットのエラー（誤り）率で示した。

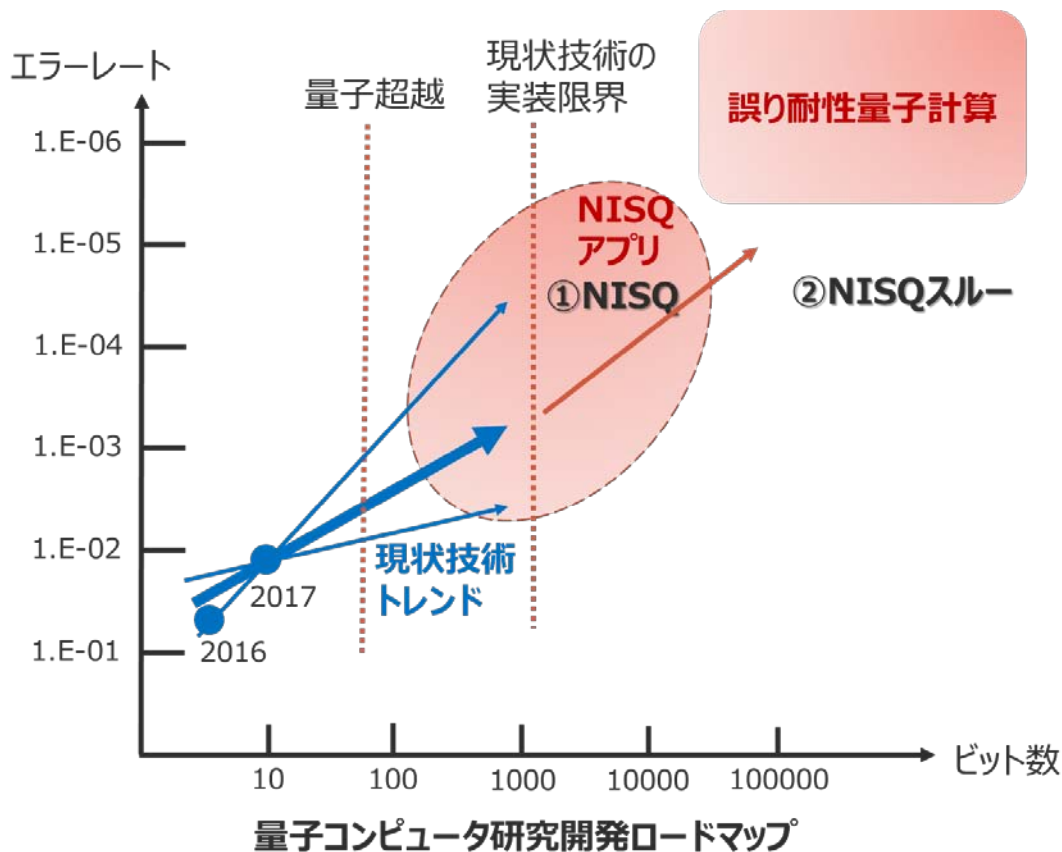


図 5-3. 量子コンピュータ研究開発ロードマップ

現在、研究開発の最初の節目と考えられているものは量子超越性⁸の実現である。何をもって量子超越性の実現とするのかという点に議論の余地が残っているが、ハードウェアとしては少なくとも 50 ビット以上で非常に低いエラー（誤り）率で動作する集積回路が必要とされている。ここ 2, 3 年の技術トレンドから、早ければ 2019 年中に量子超越性が実現される可能性がある。量子コンピュータにとっては大きな一歩であるが、あくまで途中の節目であり実用的な優位性を示すのはさらに先になる。量子超越性実現の先にある技術開発の考え方で現在主流の考え方となっているのは NISQ マシンの実現である（図中①）。システムが NISQ であることを前提としハードウェアと応用技術の開拓をセットで進める。集積度を上げつつエラー（誤り）率の低減を目指した量子ビット素子構造・低電磁雑音環境設計、量子コヒーレンス時間を伸ばすための材料研究が必須である。集積度が上がるに従い半導体量産技術で用いられる高品質の製造ラインが必要になるだろう。まずは 100～1000 ビットクラスのシステム技術構築を目標に、NISQ 応用技術、演算方式や演算手法が要求するシステムスペック実現を目指すべきである。その後、新たな技術の導入などにより集積規模とエラー（誤り）率が一定以上になった暁に誤り耐性量子演算の応用技術が現実のものとなる。これとは別に NISQ を意識せずに量子ビット数の集積を続け、誤り耐性量子コンピュータを目指すアプローチも考えられる（図中②）。そのためには、一気に誤り耐性量子演算を実現できる画期的な考えが生まれることが望まれる。

⁸ 量子超越性：量子コンピュータが従来型のコンピュータでは実現不可能な演算能力を備えていること。具体的な問題設定での実験実証が重要な節目であり、当初は、量子超越性実現の閾値はおよそ 50 量子ビットと見積もられていたが、古典演算手法の進歩やコンピュータの性能向上により、最近では 90 量子ビットとも言われている。

[参考文献]

- [5-1] R. Van Meter and C. Horsman, “A Blueprint for Building a Quantum Computer, Communications of the ACM”, Vol. 56, No. 10, 84 (2013).
- [5-2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Quantum Computing Progress and Prospects”, The National Academies Press (2018).
- [5-3] CRDS, 『研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野 (2019 年)』, CRDS-FY2018-FR-02 (2019).
- [5-4] F. T. Chong, D. Franklin and M. Martonosi, “Programming languages and compiler design for realistic quantum hardware”, Nature 549, 180 (2017).
- [5-5] Margaret Martonosi and Martin Roetteler, “Next Steps in Quantum Computing: Computer Science's Role”, arXiv:1903.10541 (2019).
- [5-6] Mingsheng Ying 著、川辺治之 訳, 『量子プログラミングの基礎』, 共立出版 (2017).
- [5-7] R. LaRose, “Overview and comparison of gate level quantum software platforms”, arXiv:1807.02500 (2018).
- [5-8] 蓮尾一郎, 星野直彦, 『量子プログラミング言語』, 情報処理 Vol. 55, No. 7, 710 (2014)
- [5-9] N. C. Jones et.al., “Layered Architecture for Quantum Computing”, Phys. Rev. X 2, 031007 (2012)
- [5-10] F. Chong, “Introduction to Grand Challenges and Research Tools for Quantum Computing”, IEEE MICRO51 Tutorials (2018).
- [5-11] 田渕豊, 杉山太香典, 中村泰信, 『超伝導技術を用いた量子コンピュータの開発動向と展望』, 電子情報通信学会誌, Vol. 101, No. 4, 400 (2018).
- [5-12] 根本香絵, Simon Devitt, W. J. Munro, 『スケーラブル量子コンピュータの最先端と量子情報技術の展望』, 情報処理, 55, 702 (2014).
- [5-13] B. Giles and P. Selinger, “Exact synthesis of multiqubit Clifford+T circuits”, Phys. Rev. A, 87, 032332 (2013).
- [5-14] S. J. Devitt et. al, “Requirements for faulttolerant factoring on an atom-optics quantum computer”, Nature Communications, 4, 2524 (2013).
- [5-15] Yongshan et. al., “Magic-State Functional Units: Mapping and Scheduling Multi-Level Distillation Circuits for Fault-Tolerant Quantum Architectures”, 51st Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO) (2018).
- [5-16] M. Veldhorst et. al., “An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control fidelity”, Nature Nanotechnology 9, 981-985 (2014)
- [5-17] S. Takeda and A. Furusawa, “Universal quantum computing with measurement-induced continuous-variable gate sequence in a loop architecture”, Phys. Rev. Lett. 119, 120504 (2017).

第6章 量子コンピュータ開発に必要な施策

この章では量子コンピュータ実現に向かって必要な施策として、(1) 国策フラッグシップとしての量子コンピュータ試作機構築、(2) 海外に対し、日本の当該分野の窓口となり得る異分野融合の研究開発拠点の構築、(3) 実用化には時間を要すると予想される量子コンピュータの研究開発を遂行可能な次代を担う若手人材の育成につき、順次提言を述べていく。

6-1. 量子コンピュータ試作機構築の重要性

図 6-1 に量子コンピュータ実現に必要な三つの技術領域を示す。

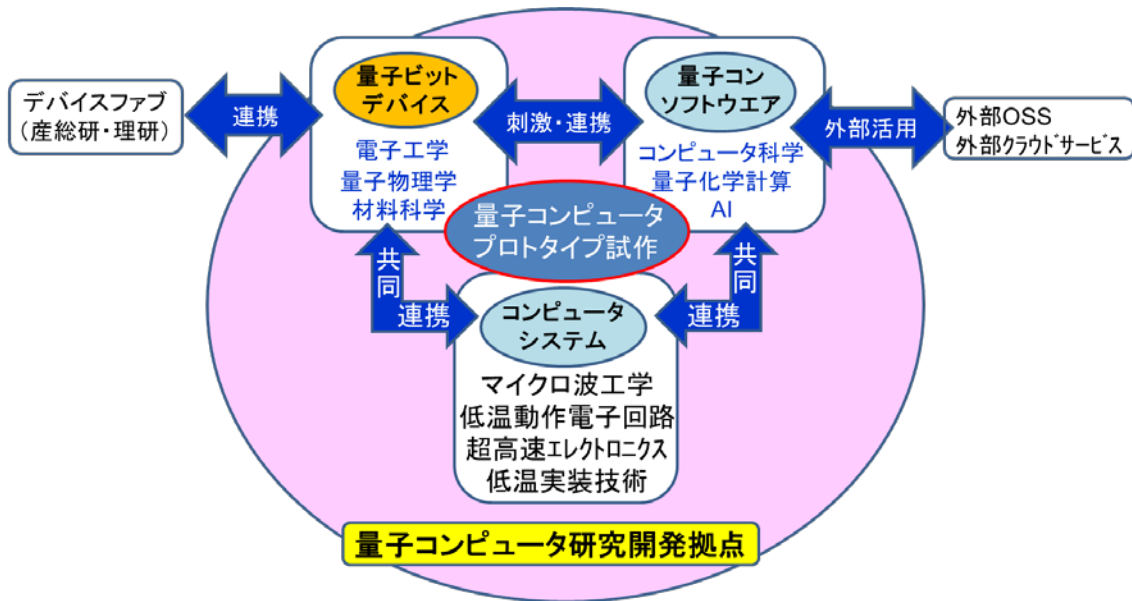


図 6-1. 量子コンピュータ実現に必要な三つの技術領域と研究開発拠点

第一の技術領域は量子ビット集積回路開発である。日本で最初に超伝導回路による量子ビット動作が実証され、世界的にも回路段階の研究が最も進んでおり、また日本で基礎段階の研究蓄積がなされてきた超伝導量子ビットを構成要素とすることが自然であろう。ただし、量子ビット演算回路としてどれが最終的に勝ち残るのかは明らかではなく、他の候補回路についても基礎研究段階での追及は重要と考える。ここでは量子ビット演算回路の集積度、量子コヒーレント時間、量子ゲート操作の忠実度といった基本特性の向上が重要となる。5-5 節で述べたように、量子コヒーレンス時間の向上には、材料科学の研究者の関与も必要となろう。また、量子誤り訂正に関する考案の創出と集積回路上への実装では、量子物理学者、電子工学者とコンピュータ科学者の連携が必要となろう。

第二の技術領域は量子コンピュータを動作させるためのソフトウェアの研究である。この技術領域ではコンピュータ科学の研究者が中心的役割を果たすことになる。量子コンピュータの有用な応用開拓に向けて、ユーザが様々な試みを自分自身で試行できるように、高速シミュレータ、各種ライブラリー、コンパイラ等々、ソフトウェア開発環境の整備が求められる。また、よりハードウェアに近いところで必要となる制御用のソフトウェア（ミドルウェア、ファームウェア）や量子ビット集積回路の基本設計に多大の影響を及ぼす量子誤り訂正に関わるソフトウェア開発は重要な課題となる。それと並行して近未来的には、誤り訂正なしの NISQ の可能性を追求することも基礎研究、応用開拓の両面で重要となろう [3-2]。ソフトウェアや応用技術の開発では、海外の量子コンピュータによるクラウドサ

ービスを使うことも必要であろう。ただし、量子コンピュータの内部構造は秘密にされ、与えられた環境でしか利用できず、そこで得られた成果の活用も契約で縛られる。やはり日本独自の量子コンピュータを持ち、ハードウェアとソフトウェアの研究者が連携して研究を進めるような体制は必須である。

第三の技術領域はコンピュータ・システムの構築である。室温下にある電子機器から高速のマイクロ波パルスを多数のケーブル配線を介して、極低温下（10～20 ミリケルビン）にある希釈冷凍機中の量子ビット集積回路へ高速に送る必要がある。また量子誤り訂正の実行では、量子ビットの読み出し結果が室温下の計測機器に送出され、誤り訂正の処理が行われ、再び極低温下の量子ビット集積回路に送り返される。このように量子ビット集積回路を想定通り動作させるためには、量子ビット集積回路外で複雑な高速信号処理を行なう必要がある。このためにはマイクロ波多重化回路の開発、電磁雑音を除去したコンパクトな集積回路の実装、集積回路に接続される多数の入出力配線の三次元実装、室温からの熱の流入を極力排除した極低温冷却システムなどの技術開発が必要である。熱の流入、入出力配線での遅延を避けるためには、ヘリウム温度（4.2K）などの極低温環境で入出力信号の制御を行う極低温動作の CMOS 集積回路、あるいは超伝導 SFQ 回路の開発も重要になると思われる。このようにこの技術領域では多くの工学的知識が必要になり、多様な部品メーカ、計測機器メーカとの連携も必要となろう。これらのモノづくり技術は本来日本が得意とする領域であり、多くの部品メーカが集積する日本に競争を優位に進めるチャンスがあると考ええる。

6-2. 求心力を有する研究開発拠点の必要性

6-1 で述べた三つの技術領域における研究開発は独立しているわけではなく、相互に大きく関連する。量子ビット機器とそれを動作させるソフトウェアの研究は相互に深く関連しており、実際、量子ビットの動作は古典コンピュータの演算動作とは全く異なるため、コンパイラの開発では、コンピュータ科学者も量子物理学に関する基礎知識が要求されるだろう。量子コンピュータの開発において大きな壁となる量子誤り訂正の開発では、考案される誤り訂正符号の方式は集積回路上に実装されて初めて機能する。ここでは、コンピュータ科学と量子物理学、電子工学の研究者の連携が必要となろう。量子ビット集積回路とそれを実装するコンピュータ・システムの研究者の密な連携も必要になる。外部から同軸ケーブルを介して投入されるマイクロ波信号を効率よく、高密度に集積回路に提供するには、三次元モジュール構造によるコンパクト実装が必要である。ここでは、電子機器研究者、マイクロ波工学研究者、モジュール実装研究者との密な共同作業が必要である。これらの開発を効率的に実行するためには図 6-1 に示すような量子コンピュータ研究開発のための拠点が必要であり、そこで国策フラッグシップとしての量子コンピュータ試作機の開発を進めるべきである。量子ビット集積回路の開発も同じ拠点で開発されるのが望ましく、量子コンピュータ・システムに開発された集積回路を提供するだけでなく、集積回路の開発においても、動作環境を提供するコンピュータ・システムの役割が重要となる。量子ソフトウェアの研究は少数ビットの動作実証ならば、高性能の古典コンピュータを用いて模擬できるため、各々の場で独立して研究が実行できるが、コンピュータの基本設計思想の進化が量子ビット集積回路やコンピュータ・システムの開発に多大の影響を与えるため、基本的な設計思想に関わる議論がいつでも拠点で連携して実行できる体制が必要である。量子ソフトウェアの研究では、現状では先行する海外企業の提供するクラウドサービスやオープンソースソフトウェアを使わざるを得ない場面も多いと思うが、新しい演算方式の考案はハードウェア面からの協力があって初めて実証できるものなので、それを可能にする上記拠点での連携は極めて重要である。また、量子ビット集積回路の開発は同じ拠点内、

あるいは拠点外にある集積回路製造施設と連携を図ることも必要である。

以下、参考までにいくつか海外における代表的な量子コンピュータの研究拠点を紹介する。

(1) Institute for Quantum Computing (カナダ)

- ・2002年にBlackberryの創始者Lazaridis氏の寄付によりウォータルー大学(カナダ)内に設立、2012年にはQuantum-Nano Centerも開設。同キャンパス内のPerimeter Institute of Theoretical Physicsとも量子理論関係で連携。
- ・教員は31名、ポスドク43名、学生140名(2018年6月時点)
- ・カナダ政府からの投資は2018年から3年間で1500万ドル
- ・研究テーマはスピントロニクス、フォトニクス、超伝導量子ビット、量子材料、量子光学、イオントラップ、量子暗号、量子ソフトウェア、量子システムなど多岐にわたる
- ・既に12の量子コンピュータ関連のスタートアップ企業を創出

(2) QuTech(オランダ)

- ・デルフト工科大学、TNO、産業界パートナーによって設立、教員30名を核に全体で180名の陣容(2017年12月時点)。
- ・主要な研究テーマは、誤り訂正量子演算、量子インターネット・ネットワーク計算、トポロジカル量子演算の三つ。
- ・Intel社が2015年に量子演算研究に5000万ドル/10年間を投資。マイクロソフト社がトポロジカル量子演算の研究を支援。

(3) 中国科学技術大学

- ・中国科学院、アリババ、中国科学技術大学、浙江大学等が連携して量子コンピュータの研究を実施。クラウドサービスを提供するアリババの量子コンピュータは中国科学技術大学(上海)に設置。
- ・量子情報国家実験室を合肥市の中国科学技術大学内に建設中(研究費含めた総投資額は一兆円を超す760億元)。

6-3. 次代を担う若手人材育成の必要性

量子コンピュータの研究開発は急激に進みつつある新分野のため、研究を中心になって遂行できる人材は限られている。しかも、量子コンピュータが従来の古典コンピュータの性能を十分上回り、市場で受け入れられるためには技術課題も山積しており、10年、20年程度の研究継続が必要である。このためには長期の研究を実行できる次代を担う若手人材の育成が重要となってくる。特に量子コンピュータ用のソフトウェアの研究開発は、量子ビット演算回路の集積化の進展とともに、急激に重要度が增大している技術領域であり、これまでの研究蓄積も少なく、実行できる研究者も限られており、若手研究者の育成は急務となっている。この分野ではコンピュータ科学を専門とする研究者だけでなく、理論物理学や数学を専門とする有能な研究者を勧誘できるような仕組みも必要である。幸い、量子ソフトウェア分野でも指導的な役割を果たせる研究者が、少数であるが育ってきており、有能な若手研究者が彼らの下で、研究を実行することで、成長していくことが望まれる。研究の中心を担っている指導的な役割の研究者に大きな教育負荷を与えないために、教育の支援を行うスタッフを充実させることも必要となろう。

若手人材の育成には6-2節で述べた研究開発拠点を有効に活用することが望まれる。量子コンピュータの研究開発には量子力学、材料科学、電子工学、コンピュータ科学などの広範な技術領域にわたる専門家が必要であり、上記の多様な専門領域の研究者が、一同に会して、自由に議論できる環境が重要となる。新しい量子誤り訂正の考案など、量子演算

に関する重要な発想の創出にはソフトウェアの研究者と量子ビット集積回路さらにはハードウェアとしてのシステム研究者との、目標を共有化した密接な議論が必要である。また日本の国策としての研究拠点が海外の研究コミュニティに対しプレゼンスを高め、海外の優秀な研究者を引き付ける存在となることで、日本の若手研究者が海外のトップクラスの研究者と交流できる刺激のかつ魅力的な環境となることが望まれる。

第7章 まとめ

半導体の微細化限界が顕在化する中、これまでコンピュータの性能向上を支えてきた半導体集積回路のムーア則に則った高性能化は期待できなくなっている。また、処理すべき情報量が増大するにつれ、ノイマン型の演算方式の限界が顕在化しつつある。一方で、高度情報化社会におけるコンピュータ高性能化への要求は増大する一方であり、演算方式の革新が今、求められている。このような中であって、量子コンピュータは従来のコンピュータ（古典コンピュータ）とは全く異なる原理で演算を実行し、与えられた問題によっては、古典コンピュータでは解くことが実質的に不可能な問題に対して解を与えることも可能であり、コンピュータにおける技術革新の候補として期待されている。このため、米中欧で競い合うように量子コンピュータの開発のため、大型の国家研究開発計画が開始されている。日本は量子コンピュータの概念形成の過程において、重要な貢献を行ってきており、基礎研究の蓄積では海外に劣るものではないが、最近の応用開発研究では遅れを取っている。このため以下の提言を行う。

- (1) 国策としての量子コンピュータ試作機の開発、そのために必要な技術開発を推進する拠点の形成が必要である。実機の試作は世界の中で、日本の存在感を高め、資金や情報、さらには優秀な人材の吸引力となる。また個々の技術の有用性を評価できる実運用検証機としても、上記試作機の存在は重要である。上記拠点での量子コンピュータの開発は、材料科学、量子物理学、電子工学、コンピュータ科学の広範な技術領域の研究者の連携によってなされるべきである。
- (2) 基本論理構造、演算手法を含む量子ソフトウェア研究の支援も重要である。技術蓄積が必要な量子ビット素子を含むハードウェアの開発と異なり、量子コンピュータのための新たな量子ソフトウェアの研究は自由な発想で行うことが可能であり、現状は急激な発展段階にある。新しい発想は、量子コンピュータの研究の方向を変える力を持つ。また、開発された量子ソフトウェアは、量子コンピュータに実装されて、初めて意味をなす。開発されたソフトウェアの価値を活かす意味でも、(1)に述べた日本独自の量子コンピュータ試作機の開発は重要となる。
- (3) 長期的には次代を担う人材の育成が重要であり、そのための体制作りが求められる。量子コンピュータ実現に向けた研究開発は今後、多くの紆余曲折が予想される。量子コンピュータの開発競争を勝ち抜くためには、長期的な視点で研究が継続できる体力が必要であり、そのための人材育成が鍵となる。また同時に、長期的視点で、新しい発想を産み出す基礎研究も重要となる。
- (4) 4.3 節で述べたように、米中欧（ドイツ、イギリス）では量子技術に対して、期間が 5～10 年間、予算額が年間で 100 億円を越す規模の国家計画が動き出している。日本がこれらの国々と互角に量子技術の研究開発で競っていくためには、同等規模の予算投入が必要である。量子コンピュータの開発が量子技術の中核的課題であることを勘案すると、年間予算 50 億円規模の量子コンピュータ研究開発に関する国家計画の構築が必要であると考ええる。

＜参考資料＞ 審議経過

1. 委員と個別討議し、提言骨子を固めるための情報収集を行った。

2018 年 4 月 11 日、6 月 7 日、8 月 6 日：東京大学にて中村泰信教授と討議

2018 年 4 月 16 日、5 月 9 日、7 月 4 日：東京理科大学で蔡兆申教授と討議

2018 年 5 月 11 日：東京大学にて石原直教授、古澤明教授、大久保達也教授と討議

2018 年 5 月 22 日：東京大学にて荒川泰信教授と討議

2018 年 6 月 4 日：慶應義塾大学にて伊藤公平教授と討議

2018 年 6 月 22 日：東京工業大学にて西森秀稔教授と討議

2018 年 8 月 9 日、8 月 21 日：京都大学にて藤井啓介教授と討議

2018 年 6 月 8 日、6 月 27 日、7 月 25 日、12 月 19 日、2019 年 2 月 18 日、3 月 14 日、3 月 19 日、4 月 11 日：プロジェクトリーダーと幹事との討議

2. 学会・研究会に参加し、情報収集を行った。

【国内】

- ・ 第 65 回応用物理学会春季学術講演会（2018.3.17-20@早稲田大学）
シンポジウム「量子コンピュータと量子シミュレーションの現状と展望」
- ・ 日本物理学会第 73 回年次大会（2018.3.22-25@東京理科大学）
シンポジウム「トポロジーがもたらす物理学の新展開」
- ・ 日本物理学会 2018 年秋季大会（2018.9.9-12@同志社大学）
シンポジウム「多様化する量子コンピュータ」
- ・ 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会（2018.9.18-21@名古屋国際会議場）
シンポジウム「量子コンピュータと量子シミュレーションの現状と展望」
- ・ 第 66 回応用物理学会春季学術講演会（2019.3.9-12@東京工業大学）
- ・ 日本物理学会第 74 回年次大会（2019.3.14-17@九州大学）
シンポジウム「超伝導位相物理に基づくデバイスの進展」

【海外】

- ・ American Physical Society (APS) March Meeting 2018（2018.3.5-9, Los Angeles, USA）
Sessions: "Scaling Superconducting Circuits", "Progress in Quantum Computing Implementations", "Scaling up Quantum Computer", "Architectures for Semiconducting Quantum Computing"
- ・ 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (2018.12.1-5, San Francisco, USA),
Focus Session: "Quantum Computing Devices" など
- ・ Quantum for Business (Q2B) 2018（2018.12.10-12, Mountain View, USA）
- ・ American Physical Society (APS) March Meeting 2019 (2019.3.4-8, Boston, USA), Sessions: "Semiconducting Quantum Computing with Donors", "Applications of Noisy Intermediate Scale Quantum Computers", "Quantum Computing with Open Quantum Systems"

3. 量子コンピュータプロジェクトの委員、オブザーバが集まり、量子コンピュータ研究開発戦略につき討議を行い、報告書骨子を固めた。

- ・ 会議：量子コンピュータ研究開発戦略検討会
- ・ 日時：2018 年 8 月 21 日 15:00-17:30
- ・ 場所：JST 2F 会議室

4. 最終報告書案の提出と審議

- 1) 2019 年 1 月 28 日 政策提言委員会にて、プロジェクトリーダーがプロジェクトの進捗と成果報告骨子について報告した。委員から出されたコメントを考慮しながらとりまとめて、最終報告書案を提出してよいとなった。
- 2) 2019 年 4 月 8 日 政策提言委員会に最終報告書案を提出し、プロジェクトリーダーが委員会にてその概要を説明した。委員からはいくつかの注文が出された。審議の結果、細部についてはさらに委員からコメントを求め、それらを受けて修正を施したものを、企画運営会議に上程することを認めた。
- 3) 2019 年 4 月 17 日 企画運営会議でプロジェクトリーダーが最終報告書の内容概要を説明し、審議の結果、最終報告書の体裁等を整えて、理事会に上程することを認めた。
- 4) 2019 年 5 月 15 日 理事会にて、事前に理事会メンバーにメール配布した最終報告書案について、プロジェクトリーダーが概要を説明し、審議の結果、公開が認められた。

本資料の内容の転載を希望される場合は、(公社) 日本工学アカデミー事務局までご相談ください。

編集発行

(公社) 日本工学アカデミー

〒101-0064

東京都千代田区神田猿樂町二丁目7番3号HKパークビルⅢ 2F

Tel: 03-6811-0586 Fax: 03-6811-0587

E-mail : academy@ej.or.jp

URL : <http://www.ej.or.jp/>