

TODAY



完全接合を追い求めて
 大阪大学 接合科学研究所
 副所長・教授
 藤井 英俊

素材開発をする上で、素材そのものの特性は優れているが、溶接・接合性が悪く、実用化に適さないという課題に直面することが良くある。例えば、炭素量の多い鋼は、接合時の変態によって脆いマルテンサイトが生成し、接合が困難とされ、その使用が制限されている。鋼中に含有するPやSについても、凝固時の偏析によって割れが発生するため、鋼の製造時に極力その量を減らす努力が払われている。加えて、接合は可能であっても、Al合金や高強度鋼板のように、接合によって軟化部が発生し、本来の特性を発揮できない材料も数多く存在する。

そこで、我々のグループでは、接合しても、その特性が全く低下せず、特性上、そこに接合界面が存在することを感じさせない接合法の開発、すなわち、「**完全接合**」を達成できる接合法の開発に長年努めてきた。

我々が開発してきたいくつかの技術の中で、代表格が、低温で接合可能な線形摩擦接合法（Linear Friction Welding: LFW）である。線形摩擦接合は、図1に示すように、材料同士を押し付け、線形運動で擦りあわせた際に生じる摩擦熱を熱源とした固相接合法である。この接合法では、FSWのように回

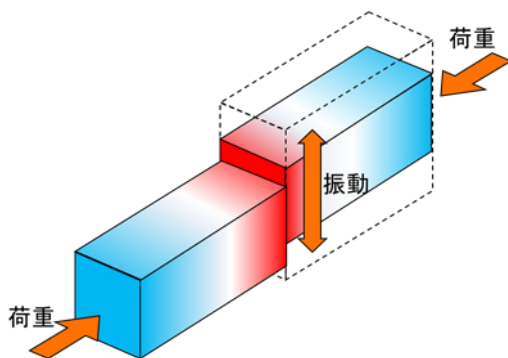


図1 線形摩擦接合 (LFW)

転ツールを用いることがないため、鉄鋼材料のような比較的融点が高く、高強度の材料の接合に対しても有効である。特に、エネルギー効率が高く、1秒から数秒程度の極めて短時間の接合が可能であることが特徴である。

本手法は、FSWとは異なり、従来は精細な温度制御が困難であると考えられていたが、我々のグループによって、印加圧力によって温度を制御できることが示され、大きな注目を浴びている¹⁻⁴⁾。図2は、S45Cを対象に15Hzの一定の振動周波数における、ピーク温度に及ぼす印加圧力（両サイドからの押し付け圧力）の影響を示す。予想に反して、加えられた圧力の増加と共に温度は低下する。

FSWの場合、ツールへの印加圧力の増加とともに温度は上昇するが、LFWは全く反対の関係を有するのが面白い¹⁻⁴⁾。これは、接合メカニズムの違いによる。LFWでは、摩擦によって温度が上昇することにより、鋼が軟化し、界面での鋼の強度が印加圧力を下回ると、バリとして放出される。したがって、印加圧力を大きくすると、鋼の強度が高い状態、すなわち、低温でバリとして排出可能となるため、結果的に接合温度が低下するというメカニズムである。

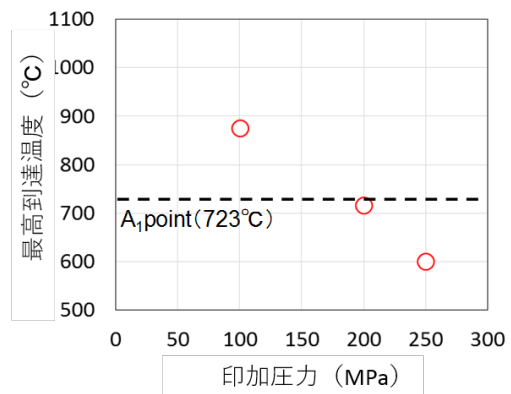


図2 LFWにおける印加圧力と接合温度の関係

例えば、図3は0.45%の炭素を含有するS45C材の強度の温度依存性を示すが、印加圧力が250MPaの場合には、界面温度が700°Cを超えるとバリとし

て排出されるため、継手の温度が700℃を超えることはなく、A₁点以下の接合が可能となる。一方で、印加圧力が100MPaの時には、接合温度は、およそ900℃となる。

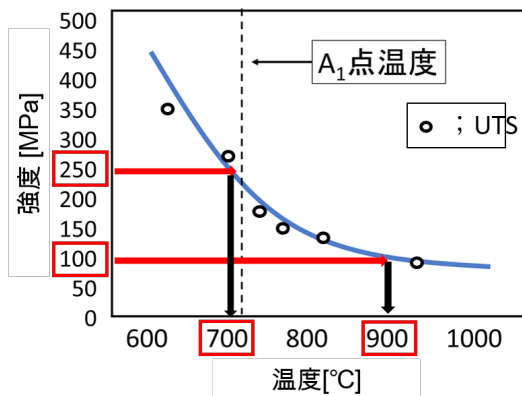


図3 中炭素鋼 S45C の強度の温度依存性

このようにして得られた、S45C 継手の硬さ分布は、図4に示すとおりである。界面を跨いで硬度分布をとっても、250MPaで接合した場合には、母材と比べて全く変化がなく、機械的特性において特異点の無いフラットな継手を得られることがわかる。一方で、100MPaの印加圧力の場合には、接合温度がA₃点を超え、接合界面近傍でマルテンサイトが生成したため、600HV程度の硬化領域が形成されている。250MPaでは、機械的特性において特異点の無いフラットな特性が得られており、構造物の設計において極めて大きなメリットがあると考えられる。

LFWにおいて、印加圧力が高くなるにつれ接合温度が低下する理由については、過去の解説⁵⁾に詳細を記しているため、参照されたい。

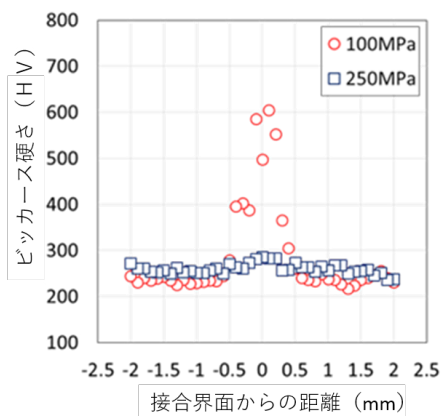


図4 LFWしたS45C鋼の界面近傍の硬度分布

図5は、アルミニウム合金の中でも幅広く使用されているA6061-T6合金をLFWした継手の硬度分布を示している。併せてFSW継手の硬度分布も示

しているが、固相接合法として最も幅広く使用されているFSWであっても、析出強化型のA6061合金では、30mm以上の幅広い範囲に渡って軟化部が生じていることが分かる。これに対して、LFWは加熱部が極めて狭く、軟化部が狭く抑えられている。

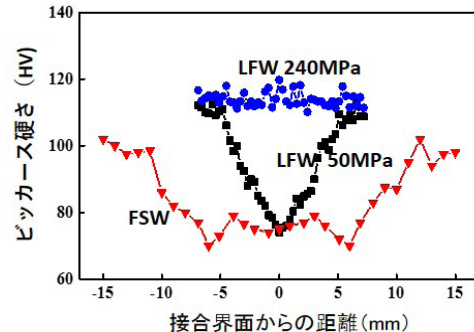


図5 LFWしたA6061-T6合金の界面近傍の硬度分布

印加圧力を増加させると低温で接合可能であることは、鋼の場合と同様であり、240MPaの印加圧力で接合した際には、継手において全く軟化部のない継手を得られることがわかる。この時、接合温度はおよそ200℃程度であったと考えられる。

このように、印加圧力（両サイドからの押し付け圧力）を制御することで接合温度を任意に制御できることから、本手法は、鉄鋼材料やAl合金以外にも、これまでにTi合金、Cu合金、Mg合金などでも、その特性を落とすことなく、接合できることが実証されている。もちろん、低温での接合が望ましい、異種材料の接合にも有効であることも言うまでもない。

最近では、熱源を通電加熱（ジュール熱）として、同様な接合が行えることを実証しており、棒材だけでなく、平板の重ね接合においても、A₁点以下の接合が可能であることを明らかとなっている。いずれの接合法においても、1秒程度で接合可能であり、「完全接合継手」が得られるため、今後、幅広い分野で使用されることを期待している。

- 1) 青木祥宏, 黒岩良祐, 藤井英俊, 村山元, 泰山正則, 鉄と鋼, 103, 7 (2017) 422-428.
- 2) Ryosuke Kuroiwa, Huihong Liu, Yasuhiro Aoki, Sungook Yoon, Hidetoshi Fujii, Gen Maruyama and Masanori Yasuyama, Sci. Tech. Weld. Join., 25, 1 (2020) 1-9.
- 3) Yasuhiro Aoki, Ryosuke Kuroiwa, Hidetoshi Fujii, Gen Maruyama and Masanori Yasuyama, ISIJ Int., 59, 10 (2019) 1853-1859.
- 4) Jeong-Won Choi, Yasuhiro Aoki, Kohsaku Ushioda and Hidetoshi Fujii, Scripta Mater. 191 (2021) 12-16.
- 5) 青木 祥宏, 藤井 英俊, “中高炭素鋼の線形摩擦攪拌接合”, 溶接学会誌, 88, 3 (2019) 188-192.

量子コンピュータ技術の最前線と未来

国立研究開発法人産業技術総合研究所
新原理コンピューティング研究センター 総括研究主幹 川畑 史郎

1. はじめに

ノーベル賞物理学者のリチャード・ファインマン教授は、1982年に「Simulating Physics with Computers」と題する大変奇抜な論文を発表しました。ファインマン教授は、この論文の中で「自然は量子力学に従っている。複雑な量子現象を高速にシミュレートするためには、量子力学原理に基づいて動作するコンピュータが必要だ。」と指摘をしました。これが、量子コンピュータの原点となっています。この独創的な指摘から約半世紀を経て、今では世界中の人々がクラウドを介して量子コンピュータにアクセスし、計算を行うことが可能となっています。しかしながら、量子コンピュータが真に社会実装され、様々なビジネスで本格利用されるまでには、少なくとも20～30年の長い時間が必要であると考えられています。本ニュースにおいては、量子コンピュータの研究開発の最先端や技術課題について紹介します。

2. 量子コンピュータ

量子コンピュータとは、量子チューリング機械と呼ばれる数学モデルに等価なコンピュータのことです。この量子チューリング機械は、ファインマン教授の指摘に刺激を受けたオックスフォード大学の理論物理学者デビット・ドイチェ教授が1985年に定式化しました。その後、量子コンピュータ上で高速に動作するいくつかのアルゴリズム「量子アルゴリズム」が提唱されてきました。しかしながら、実用上役に立つ量子アルゴリズムは見つかりませんでした。そのような状況の中、1994年にAT&T社の計算機科学者ピーター・ショア博士が見出した素因数分解アルゴリズムは、社会に大きな衝撃を与えました。何故ならば、素因数分解の計算困難性が、社会に普及しているRSA公開鍵暗号システムにおける安全性の根拠になっていたからです。ショア博士の研究以降、アメリカを中心に量子コンピュータに関する基礎研究が急激に進展するようになります。第一次量子コンピュータブームの幕開けです。世界中の物理学者、数学者、計算機科学者が量子コンピュータの基礎理論や基盤技術を確認してきました。その中でも、現在の量子コンピュータブームの源泉となる重要な技術が、1999年に日本で生まれました。日本電気株式会社の中村泰信博士（現東大教授）と蔡兆申博士（現東京理科大教授）が、シリコン基板上に微細加工した金属アルミニウムの回路

を用いて、超伝導量子ビットを実現したのです。その後、超伝導量子ビットの高性能化と集積化に関する基礎研究が世界中で進められました。しかしながら2005年あたりを境に、急激に量子コンピュータに対する興味が世の中から失われてしまいます。何故ならば、量子コンピュータの集積度が期待に反してほとんど伸びず、さらに、実用上有用な量子アルゴリズムが全く見つからなかったからです。残念なことに、日本においては超伝導量子ビットを生み出した日本電気をはじめとする多くの企業が量子コンピュータの研究開発から撤退してしまいました。

ところがそのような状況が2011年に一変します。カナダのベンチャー企業D-Wave Systems社が、組合せ最適化問題専用コンピュータである量子アニーリングマシンの商用化に成功しました。また、2014年にカリフォルニア大学サンタバーバラ校のジョン・マルティニス教授（現オーストラリアSilicon Quantum Computing社）らが、非常に高性能な小規模超伝導量子コンピュータの実現に成功しました。とくに、マルティニス教授によって、超伝導量子コンピュータの大規模集積化への道筋が示されたため、その後、多くの企業が量子コンピュータの研究開発に乗り出します。これによって、第二次量子コンピュータブームが始まります。現在では、IBM、Google、Intel、Microsoft、Amazon、Alibabaといった世界的大企業だけでなく、IonQ、Psi Quantum、Rigetti Computing、本源量子などのスタートアップが続々と量子コンピュータハードウェア開発に参入しています。現在開発が進められている量子コンピュータプラットフォームを表1に示します。また最近になって、機械学習、量子化学計算、量子シミュレーション、金融などの実用上重要な量子アルゴリズムが見つかるようになりました。それによって、化学、金融、創薬、人工知能などの様々な産業分野に対して量子コンピュータは大きな影響を与えることが明らかとなってきました（図1）。これにより、多くの企業が、量子コンピュータのアプリケーション探索に乗り出すようになってきました。

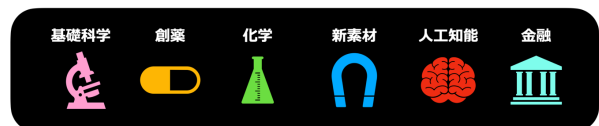


図1. 量子コンピュータの想定される応用分野

表 1. 量子コンピュータハードウェアの研究開発状況 (2021 年 4 月)

プラットフォーム	超伝導	イオントラップ	シリコン・ゲルマニウム	光
量子ビット	超伝導量子回路	イオン	CMOSトランジスタ、量子ドット、不純物核スピン	光子
集積度 (量子ビット数)	65	40	4	12
開発企業	Google, IBM, Intel, Rigetti Computing, Microsoft, Quantum Circuits, Northrop Gramman, Raytheon BBN Technology	IonQ, Alpine Quantum Technology, Honeywell, Universal Quantum, Oxford Ionics	Intel, Silicon Quantum Computing, HRL, TSMC	XANADU, Psi Quantum
国内研究開発機関	理研、東大、東京理科大、産総研、NTT、NICT、NEC	阪大、東大、OIST	産総研、理研、東工大、慶應大、日立	東大、NTT

3. 超伝導量子コンピュータ

現段階で最も技術開発が進んでいる量子コンピュータは、超伝導量子コンピュータです。2019年に Google 社は、53 量子ビットの超伝導量子コンピュータ "Sycamore" を製造し、量子超越性(Quantum Supremacy) の実証に成功したと発表しました。その後、同社は Sycamore プロセッサを利用して、量子化学計算、量子シミュレーション、量子エラー訂正のデモンストレーションに次々に成功しています。一方、IBM 社は、2017 年から超伝導量子コンピュータのクラウドサービス IBM Q を提供しており、2020 年に 65 量子ビットの超伝導量子コンピュータ "Hummingbird" の実現に成功しています。2020 年に同社は、東京大学が創設する量子イノベーションイニシアチブ協議会へ参画し、日本における量子コンピュータ研究開発を加速することを発表しました。さらに IBM は、同社が販売する超伝導量子コンピュータ "IBM Quantum Systems One" を 2021 年に新川崎に設置すると発表しました。また同社は、2020 年に量子コンピュータ開発ロードマップを公開し、2023 年までに 1121 量子ビットの集積化と実証を目指すことを発表しました。

一方、Intel 社、Microsoft 社といった世界的 IT 大手企業や Rigetti Computing 社 (31 量子ビット) などのスタートアップも超伝導量子コンピュータハードウェアの開発を行っています。また、最近では、中国の中国科学院、浙江大学、中国科学技術大、Alibaba 社、本源量子社が、急激な勢いで超伝導量子コンピュータハードウェアの技術力を伸ばしています。実際 2020 年に、浙江大学と中国科学技術大は共同で 62 量子ビットの超伝導量子コンピュータの開発に成功しました。また Alibaba 社は 11 量子ビットの超伝導量子コンピュータを利用した量子クラウドサービス Alibaba Quantum Cloud を無償で提供しています。さらに、本源量子社は 2021 年に 25 量子ビッ

トの超伝導量子コンピュータを公開する予定です。

日本においては、ERATO「中村巨視的量子機械プロジェクト」(代表：東京大学中村泰信教授)、文科省 Q-LEAP「超伝導量子コンピュータの研究開発」(代表：理化学研究所中村泰信チームリーダー)、NEDO 高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発「超伝導体・半導体技術を融合した集積量子計算システムの開発」(代表：産業技術総合研究所川畑史郎)、内閣府ムーンショット「超伝導量子回路の集積化技術の開発」(代表：日本電気山本剛主席研究員)において、超伝導量子コンピュータ及び製造・周辺エレクトロニクス技術の開発が進められています。また、東京理科大学、NICT、NTT においても超伝導量子コンピュータの研究開発が行われています。

超伝導量子コンピュータの動作温度は 10mK という極低温です。そのため、その動作にどうしても高価な希釈冷凍機が必要となります。しかしながら市販の希釈冷凍機のサイズと冷凍能力には限界があり、せいぜい数百量子ビットしか冷却できないと考えられています。そのため、今後大型かつ高性能な希釈冷凍機の開発が必要となります。実際 IBM 社は、自社製の大型希釈冷凍機の開発に取り組んでいます。また、2021 年に希釈冷凍機最大手のフィンランド BlueFors 社は、ドイツ産業ガスメーカー Linde 社と組んで、超大型希釈冷凍機の開発に着手すると発表しました。さらに、BlueFors 社とフィンランド半導体装置メーカー Afore 社は共同で、300mm ウェハ対応極低温オートプローバの販売を開始し、その後 Intel 社とフランス CEA-LETI が購入しました。今後、量子コンピュータ向け冷凍機技術がますます発展すると考えられています。

最近の技術トレンドとしては、大口径ウェハ用最先端 CMOS プロセス技術を用いた、超伝導量子ビットの製造とそのばらつき評価があります。ベルギー

IMEC は、300mm シリコンプロセス (DC スパッタと液浸リソグラフィ) を用いて、2 万個のジョセフソン接合を製造し、その性能ばらつきが 1% 以下であることを 2020 年に発表しました。また、IBM やスウェーデン Chalmers 工科大学は、同一ウェハ上に大量に製造した超伝導トランズモン量子ビットのばらつき評価を行っています。

もう一つの技術トレンドが、超伝導量子コンピュータ制御用クライオ CMOS 集積回路の開発です。この技術を用いることで、超伝導量子コンピュータの大規模化の上で深刻な問題となっていた、マイクロ波配線による希釈冷凍機への熱流入問題が大幅軽減されると考えられています。Intel 社は、2021 年に 22nm FinFET 技術を用いて「クライオ CMOS 集積回路”Horse Ridge II”」を製造し、2 量子ビット (シリコンスピン量子ビット) の制御に成功しました。また、日本においては、NEDO 高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピューティングの技術開発「超伝導体・半導体技術を融合した集積量子計算システムの開発」(代表：産業技術総合研究所川畑史郎) において、日本初のクライオ CMOS 制御回路の開発がスタートしました。このプロジェクトにおいては、産業技術総合研究所を中心に、日本電気、東京大学、帝京大学、金沢工業大学が、量子コンピュータ用クライオ CMOS 制御回路の基盤技術開発を進めます。このように、大規模集積化に向けた製造・評価・実装・制御技術の研究開発が今後世界中でますます盛んになると期待されています。

4. イオントラップ量子コンピュータ

現在、超伝導量子コンピュータに次ぐ集積度と性能を誇る量子コンピュータが、イオントラップ量子コンピュータです。イオントラップ量子コンピュータにおいては、真空中に電磁波やレーザーを利用して捕獲したイオンを量子ビットとして用います。イオントラップ量子コンピュータの利点は、超伝導量子コンピュータに比べて桁違いに長いコヒーレンス時間です。超伝導量子ビットのコヒーレンス時間の世界最高記録はわずかに 1.4 ミリ秒です。一方、イオントラップの場合、10 分程度と非常に長いコヒーレンス時間の量子ビットが実現されています。しかしながら、量子演算を行うために必要な時間が非常に遅いため、イオントラップ量子コンピュータの性能は超伝導量子コンピュータとほぼ同等程度になっています。2020 年にアメリカ Maryland 大学とアメリカ国立標準技術研究所 NIST は、40 量子ビットのイオントラップ量子コンピュータを実現し、組合せ最適化問題のデモンストレーションに成功しました。また、アメリカ Honeywell 社と IonQ 社は数十

量子ビット程度のイオントラップ量子コンピュータの実現に成功しています。それ以外にもオーストラリア Alpine Quantum 社、イギリス Universal Quantum 社、イギリス Oxford Ionics 社が、イオントラップ量子コンピュータや周辺技術の開発を進めています。また現在、Amazon 社が提供するクラウドサービス Amazon Braket 及び Microsoft 社が提供するクラウドサービス Azure Quantum を介して、IonQ 社や Honeywell 社のイオントラップ量子コンピュータに有償でアクセスすることが可能となっています。一方日本においては、大阪大学、東京大学、沖縄科学技術大学院大学においてイオントラップ量子コンピュータの基礎研究が進められています。

5. シリコン量子コンピュータ

大規模商用量子コンピュータの本命と目されているものが、シリコン CMOS 技術を利用した量子コンピュータです。シリコン量子コンピュータにおいては、シリコントランジスタやシリコン量子ドット中に閉じ込められた電子スピンあるいは核スピンを量子ビットとして利用します。2021 年にオランダデルフト工科大学がゲルマニウム量子ビットを用いて 4 量子ビットの量子コンピュータを実現しました。また、理化学研究所は 3 量子ビットのシリコン量子コンピュータの実現に成功しています。Intel 社は、同社の 300mm 標準 CMOS 製造ラインと 300mm シリコン 28 同位体ウェハ利用して、シリコン量子コンピュータ集積化の開発を進めています。実際、Intel 社は、半導体製造用ガスメーカー Air Liquid 社及び同位体濃縮企業 URENCO 社と組んで、300mm シリコン 28 同位体ウェハのサプライチェーンを構築しています。一方、2017 年に創業したオーストラリアのベンチャー企業 Silicon Quantum Computing 社は、シリコン基板中にイオン注入を用いて埋め込んだ単一不純物原子の核スピンを利用した不純物核スピン量子コンピュータの実現を目指しています。同社は、2023 年までに 10 量子ビットの量子コンピュータの実現を目標としています。

このように、シリコン量子コンピュータの集積度は、超伝導量子コンピュータやイオントラップ量子コンピュータに比べて桁違いに少ないです。実際、量子ビット間結合などの基礎技術が未確立です。そのため、地道な長期的基礎研究が必要となります。しかしながら、今後これらの課題が解決し、最先端 CMOS 技術を駆使することができれば、大規模なシリコン量子コンピュータが実現するのではないかと期待されています。実際、ベルギー IMEC、フランス CEA-LETI、アメリカ Hewlett-Packard 社、台湾 TSMC もシリコン量子コンピュータの研究開発に参入しています。

日本においては、文科省 Q-LEAP「シリコン量子ビットによる量子計算機向け大規模集積回路の実現」(代表:産業技術総合研究所森貴洋主任研究員)、内閣府ムーンショット「大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発」(代表:日立製作所水野弘之主管研究長)においてシリコン量子コンピュータの研究開発が進められています。世界最高のシリコン量子ビット動産温度は 10K です。これは、産業技術総合研究所が開発したトンネル FET 型スピン量子ビットを用いて示されました。10K であれば小型で低価格な冷凍機で容易に達成可能です。そのため、トンネル FET 量子ビットを利用することで、将来的にデスクトップ型量子コンピュータが実現すると期待されています。

6. 光量子コンピュータ

光を用いた量子コンピュータは、室温で動作するために、冷凍機フリーの量子コンピュータとして最近大きな注目を集めています。光量子コンピュータは、光子の偏向、経路、モードなどを量子ビットとして利用します。光子は、他の光子や他の自由度との相互作用が小さいため、室温でも量子性が発現します。しなしながら、光子同士を直接相互作用させて量子論理演算を行うことが非常に困難です。そのため、様々なテクニックを駆使して、量子論理ゲートと量子コンピュータを構築する必要があります。現在主流の光量子コンピュータは、シリコンフォトニクスを用いたオンチップ型光量子コンピュータです。カナダのベンチャー企業 XANADU 社は、2021 年に 12 量子ビットの連続量光量子コンピュータを実現しました。また、アメリカのベンチャー企業 Psi Quantum 社は、300 億円という巨額の資金の調達に成功し、100 万量子ビット級の単一光子光量子コンピュータの実現を目指しています。最近同社は、アメリカ大手半導体ファウンドリ GlobalFoundries 社との協業を発表しました。一方、日本においては、オンチップ型ではありませんが、連続量光量子コンピュータの研究開発が、内閣府ムーンショット「誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発」(代表:東京大学古澤明教授)においてすすめられています。また、ループ型光量子コンピュータと呼ばれる非常にコンパクトな光回路を用いた光量子コンピュータの開発が、東京大学武田俊太郎准教授らによってすすめられています。

しかしながら、光量子コンピュータの技術課題としては、大規模化基盤技術、低損失シリコンフォトニクス量子回路製造技術、量子演算の高忠実度化などがあります。

7. 今後の展望

これまで示しましたように、量子コンピュータの研究開発はまだ本格化したばかりで、その社会実装のためには 20~30 年以上の長期的な研究開発が必要となります。マラソンで例えると、やっと競技場を出たばかりです。そのため、どの方式が最終的に生き残るのかは誰にもわかりません。昨年内閣府が策定した「量子技術イノベーション戦略」の中で、長期的な研究開発と支援の必要性が謳われています。実際、JST ERATO、文科省 Q-LEAP、NEDO 高効率・高速処理を可能とする AI チップ・次世代コンピュータの技術開発、内閣府ムーンショットにおいて、5~10 年程度の量子コンピュータに関する長期的な基盤技術開発が現在進行中です。また、アメリカトランプ政権が 2020 年に成立させた「国家量子イニシアチブ法」においても、長期的な研究開発や基礎研究の重要性が謳われています。2021 年にバイデン大統領は、量子コンピュータをアメリカの科学政策の要として、その研究開発をこれまで以上に加速することを宣言し、連邦政府の研究開発投資を引き上げる方針を示しました。

量子コンピュータの商用化と社会実装のためには、国による長期的研究開発支援に加えて、今後、産業界との連携が益々重要となります。特に、半導体製造技術、集積回路技術、材料評価技術、3 次元実装技術、高周波・マイクロ波向け材料・回路技術、シリコンフォトニクス技術、冷凍機技術などの日本が得意とする「材料技術」や「モノづくり技術」の導入が必須となります。また、量子コンピュータのキラーアプリケーションの一つが、新材料開発となっています。本ニュース読者の皆様の量子コンピュータ分野への参入を心から願っております。

参考文献

- 1) 川畑史郎、固体物理 38, 733 (2003)
- 2) 川畑史郎、電子通信情報学会誌 88, 760 (2005)
- 3) 川畑史郎、自動車技術 62, 93 (2008)
- 4) 川畑史郎、低温工学 53, 271 (2018)
- 5) 関優也、川畑史郎、数理科学 667, 40 (2019)
- 6) 齊藤志郎、川畑史郎、精密工学会誌 85, 1040 (2019)
- 7) 松崎雄一郎、川畑史郎、電子通信情報学会誌 103, 267 (2020)
- 8) 川畑史郎、研究開発リーダー 17, 12 (2020)
- 9) "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" (情報機構 2019)

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 414 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複製・複製・転載することを禁じます。

発行 2021 年 4 月 1 日

発行人 小紫 正樹

発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター

〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目 5 番 11 号 第 11 東洋海事ビル 6 階

T E L (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285

ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>

E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp