

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	標題紙、はしがき、要約、目次、奥付
他言語論題 Title in other language	Preface / Summary / Contents
著者 / 所属 Author(s)	山本 俊 (YAMAMOTO Takashi) / 大阪大学大学院基礎工学研究科 / 量子情報・量子生命研究センター (QIQB) 教授
書名 Title of Book	量子情報技術 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Quantum Information Technologies)
シリーズ Series	調査資料 2021-6 (Research Materials 2021-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-03-30
ページ Pages	—
ISBN	978-4-87582-888-4
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	—

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

科学技術に関する調査プロジェクト2021報告書

量子情報技術

2022年3月



国立国会図書館
調査及び立法考査局

科学技術に関する調査プロジェクト 2021 報告書

量子情報技術



2022 年 3 月

国立国会図書館
調査及び立法考査局

* 本報告書『量子情報技術』は、国立国会図書館調査及び立法考査局による科学技術に関する調査プロジェクトの一環として、外部に委託し実施した調査研究の成果報告書です。掲載されている記事等は全て外部調査機関及び外部有識者によるものであり、国立国会図書館の見解を示すものではありません。

* 本報告書の記事を全文又は長文にわたり抜粋して転載する場合には、事前に当局調査企画課 (bureau@ndl.go.jp) に御連絡ください。

はしがき

本報告書は着想から約 50 年を迎えた量子情報科学、その実現に向けて目覚ましく発展してきた技術とそれらを支える様々なコミュニティを俯瞰的に調査したものである。情報科学もしくは情報技術は、既に社会に必要不可欠なものになっていることは説明するまでもなく、国力を表すといっても過言ではない。その情報技術は、約 100 年前に確立した量子力学から生み出された半導体やレーザーが創り出しており、量子 1.0 とも呼ばれる。しかし、量子 1.0 では未利用な量子力学の根本的な性質として、「重ね合わせ」や「量子もつれ (エンタングルメント)」がある。これらの性質を完全に取り込んだ究極の情報科学が、量子情報科学であり、量子 2.0 と呼ばれる量子情報技術の根幹をなす。量子力学を超える物理法則が見つかりそうもないことを考えると、今後、数百年にわたって人類が手にする物理、化学、生物、医学、創薬、情報などの科学技術の根幹を量子情報技術が担い、様々な社会課題の解決に貢献していくことは疑いの余地がない。この長期トレンドにおいて、今のところ何がどこまで実現され、どのような課題が存在し、今後どのように推移していくかを各国の政策を踏まえて俯瞰的に議論した。量子情報技術の中でも、核である量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子センシング、量子通信・ネットワークを取り上げた。これらの応用分野である量子機械学習、量子化学、物質設計、創薬、金融、MRI の高感度化、高精度時計、セキュリティ等はそれぞれの項目で議論されている。量子情報科学はごく一部の大学、国立研究機関や企業の研究所において、長年研究されてきた。一方、社会実装可能な程度にまで一部の量子情報技術が進展したこともあり、過去 10 年間に大企業の参入やスタートアップの創業が相次いだ。世界的には特許の出願件数も一気に増加している。このような状況にあるため、世界的に極度な人材不足であり、技術より先に人材供給がボトルネックとなっている。これは AI や機械学習と同じ状況にあり、喫緊の課題である。大学はこの局面において、人材育成の中核として重要な役割を果たす。そのため、世界各国では量子情報技術を専門とする教育課程を大学院や学科に充実させる動きが始まっている。当然、それに伴って、教育研究設備の拡充が相次いでいる。そこには、国研や企業も大きくコミットしている。日本においても、これらの短期と長期の両方のトレンドに対応した動きが求められる。

本報告書を作成した 2021 年から 2022 年は、コロナ禍の真っ只中の年であった。量子情報技術もこの一年で、量子コンピュータ開発だけでも、NISQ と呼ばれる中間的な量子コンピュータの話題から最終的な汎用量子コンピュータの話題へと大きく転換し、今後の研究開発動向も激変していく兆しを見せている。本報告書にもできるだけ、最新の状況を反映させるように努めたが、遥かに速く状況が変化しており、漏れたものも多い。各国の政策も次々と新規策定やリニューアルが行われ、大規模になる一方である。明らかに、これまでとは異なるフェーズに入っている。このように激変する状況であるからこそ、長年議論されてきた本質的で普遍的な部分を本報告書で補っていただけるとありがたい。その上で、多くのハイプに惑わされないためにも、変化する最新の状況に関しては、信頼のおける情報を基に定期的な再調査を実施することを提案したい。

要 約

本報告書では、量子2.0とも呼ばれる量子情報技術のこれまで、現状、これからを様々な視点で議論した。量子情報技術のインパクトは果てしなく、あらゆる情報技術に革新をもたらす可能性がある。その源泉は「重ね合わせ」や「量子もつれ（エンタングルメント）」の性質である。

第1章では、この量子情報科学の誕生から現在までの変遷をまとめた。

第2章では、量子コンピュータ、量子シミュレータ、量子センシング、量子通信・ネットワークに関する研究開発動向をまとめた。量子コンピュータは特定の問題においてではあるが、現在のスーパーコンピュータを超える計算能力を実証しており、現在はNISQと呼ばれる小・中規模の量子コンピュータの時代になりつつある。ハードウェアの方式としては、超伝導が先行し、イオンや光がそれに続き、原子や半導体がさらに追いかけているように見えるが、どのような問題でも扱うことができる誤り耐性量子コンピュータに、どの方式のハードウェアが先にたどり着くかは、誰にもわからない。これらのハードウェアを制御するための、ミドルウェアやソフトウェアの開発も活況である。幅広い量子アルゴリズムが開発され、その応用分野も量子機械学習、データベース探索や量子化学計算をはじめとして、分子シミュレーション、化学反応探索、触媒開発、創薬など多岐にわたる。エネルギー問題やカーボンニュートラルの実現にも貢献すると期待されている。量子シミュレーションもアナログの特徴を利用して、量子コンピュータと同様の応用領域での利用が考えられている。量子計測・センシングは、最も実用に近いと考えられている。光格子時計はフィールドテストも実現しており、実用に近い。続く、慣性センサ、NV固体量子センサや室温超偏極技術も着実に実用に近づいており、応用先を広げている。量子通信・ネットワークの領域では、最も重要なアプリケーションである量子暗号の商用化が進み、数社が量子暗号装置を製造している。万全なセキュリティではないが、ボトルネックとなる長距離化を信頼ノードにより補うことで、衛星を利用した数千km規模の量子暗号通信も実現した。あらゆる量子デバイスをネットワーク接続する量子インターネットの研究も、万全なセキュリティや量子コンピュータの大規模化に向けたインフラとして研究開発が進んでいる。

第3章では、社会実装に関する話題を取り上げた。量子情報技術に対する様々な企業の活動が2010年以降に非常に活発化している。海外主導ではあるが、国内も徐々に追いついてきている。量子コンピュータはクラウドサービスによって、多くのユーザ企業が参入し、特に活況である。その背景にあるのは、AI技術等の浸透によって計算能力への需要が大きく拡大し、自社のもつ計算能力が競争力に直結するようになってきているという事情である。人材育成も充実させ、市場も含めて研究開発環境を整えつつ、技術を進歩させることが重要である。主要な先進国では、既に量子情報技術を専門とした大学院組織が立ち上がりつつある。資格制度も始まった。また、日本では減少傾向にすらある特許出願件数も米中では倍増し続けている状況が分かる。

第4章では、世界各国の政策動向をまとめた。2012年に英国から始まった大型予算はEUや米国に波及し、米国の予算は今や年間10億ドルに迫りつつある。これには急速に研究開発を進める中国の存在が影響している。歩調を合わせるように、EU各国も予算を増加し、日本も追従している。カナダ、オーストラリア、インドなどの状況も見逃ごせない。最近では、安全保障や経済安全保障でもAIと並び量子情報技術が話題に上がるようになってきている。

Summary

This report presents a variety of perspectives on the past, present, and future of quantum information technology, also known as Quantum 2.0. The impact of quantum information technology is endless and has the potential to bring innovation to all kinds of information technology. The driving force of this innovation springs from the nature of superposition and entanglement.

Chapter 1 summarizes the history of quantum information science.

Chapter 2 takes a look at trends in the R&D of quantum computers, quantum simulators, quantum sensing, and quantum communications and networks. Quantum computers have demonstrated a computational power transcending that of current supercomputers, albeit regarding specific problems, and we have entered an era of small- and medium-sized quantum computers called NISQ devices. The hardware for these devices was pioneered by superconductivity, followed by ions and light, then by atoms and semiconductors. At present, however, no one knows what kind of hardware will lead to a fault-tolerant quantum computer that can handle any problem. The development of middleware and software to control this hardware is also booming. A wide range of quantum algorithms have been developed, and their applications include quantum machine learning, database search, quantum chemistry calculation to molecular simulation, chemical reaction search, catalyst development, and drug discovery. It is also expected to contribute to solving energy issues and achieving carbon neutrality. Quantum simulations are also expected to use analog features in the same applications as quantum computers. Quantum measurement and sensing are thought to be most practical. Field tests of optical lattice clocks have been conducted and practical applications are near. Following this, inertial sensors, NV solid-state quantum sensors, and room temperature hyperpolarization technologies are steadily approaching practical use and expanding application. In quantum communication and networks, the commercialization of quantum cryptography has advanced to the point that several companies are now manufacturing quantum cryptographic devices. Although security is less than perfect, quantum cryptographic communication across thousands of kilometers using satellites has been achieved by using trusted nodes to compensate for the long distances that would otherwise create bottlenecks. Research and development of a quantum internet connecting a variety of quantum devices is also progressing as a means for creating a perfectly secure infrastructure for large-scale quantum computers.

Chapter 3 address the subject of social implementation. Since 2010, a number of organizations have actively worked to develop quantum information technology. Although the leading organizations are overseas, Japanese researchers are gradually catching up. Quantum computing has been particularly useful in providing cloud services to corporate customers. One factor for this is that the demand for computing power has expanded significantly as the wide-spread use of AI and other technologies means a company's ability to compete is linked directly to its computing power. It is now essential that companies enhance the development of human resources and create an R&D environment that encompasses their market while promoting advances in technology. Graduate programs specializing in quantum information technology have been established in major developed countries, and systems for qualification are also in place. Additionally, although the number of patent applications is on the decline

in Japan, they have doubled in the United States and China.

Chapter 4 summarizes policy trends in countries around the world. The significant investment that started in the UK in 2012 has spread to the EU and the US. The budget in the US is approaching 1 billion dollars a year. This is due to the presence of China, which is rapidly advancing R&D. Along this line, EU countries have increased their investments, and Japan has followed suit. Neither can Canada, Australia, and India be overlooked. In terms of national and economic security, quantum information technology is now as important as AI.

量子情報技術

目 次

はしがき

要 約

Summary

第1章 量子情報技術の概要	山本 俊	1
第2章 研究開発の動向		
I 量子コンピュータ	藤井 啓祐	9
(コラム) 論文データベースから見る量子コンピュータ研究開発の動向	市川 翼	27
II 量子シミュレータ	山下 眞	36
III 量子センシング	根来 誠	48
IV 量子通信・ネットワーク	山本 俊	57
第3章 社会実装（実用化）と社会への影響及び課題		
I 量子情報技術の今後の展開と期待される社会像	山本 俊	69
II 量子情報技術に取り組む企業の動向	野口 裕信	71
III ユーザ企業の取組	松岡 智代	86
IV 人材育成・大学教育システム	松岡 智代	91
V 資格制度と人材育成	松岡 智代	94
VI 特許出願傾向	町田 尚子	95
第4章 世界各国の政策	藤田 維明・山下 眞	103
第5章 総括	山本 俊	141

Quantum Information Technologies

CONTENTS

Preface

Summary

Chapter1 Brief Overview of Quantum Information Technologies

..... YAMAMOTO Takashi 1

Chapter2 Trends of Research and Development in Quantum Information Technologies

I Quantum Computer FUJII Keisuke 9

Column: Bibliometric Analyses of Research and Development Trends in Quantum
Computer Science ICHIKAWA Tsubasa 27

II Quantum Simulator YAMASHITA Makoto 36

III Quantum Sensing NEGORO Makoto 48

IV Quantum Communication and Network YAMAMOTO Takashi 57

Chapter3 Social Implementation/Practical Applications and Impact on Society and Issues

I Prospect and Expected Social Image of Quantum Information Technologies
..... YAMAMOTO Takashi 69

II Trends of Business Activities in Quantum Information Technologies
..... NOGUCHI Hironobu 71

III Efforts by User Companies MATSUOKA Tomoyo 86

IV Human Resource Development and University Education System
..... MATSUOKA Tomoyo 91

V Qualification System and Human Resource Development
..... MATSUOKA Tomoyo 94

VI Trends of Patent Applications MACHIDA Naoko 95

Chapter4 Examples of Related Policies of Several Countries

..... FUJITA Koreaki • YAMASHITA Makoto 103

Chapter5 Conclusion YAMAMOTO Takashi 141

調査資料 2021-6
科学技術に関する調査プロジェクト 2021 報告書
量子情報技術

令和 4 年 3 月 30 日発行
ISBN 978-4-87582-888-4

編集 国立国会図書館調査及び立法考査局
発行 国立国会図書館

〒 100-8924 東京都千代田区永田町 1 丁目 10 番 1 号
電話 03 (3581) 2331
E-mail bureau@ndl.go.jp

ISBN 978-4-87582-888-4
Research Materials 2021-6

Science and Technology Research Project 2021

Quantum Information Technologies

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library
Tokyo 100-8924, Japan E-mail : bureau@ndl.go.jp

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。