

【特別寄稿】

## 量子技術に関する調査報告

先進技術推進センター  
特別研究官(Fellow)  
大田 啓

### I. はじめに

本調査は、2019 年 12 月に世界の著名な量子技術研究者を集めて日本政府が同時主催した ISQT<sup>1</sup>他 4 件の国際会議[参考文献：1~5]聴講を契機に着手したものである。その後、2020 年 1 月に開催された Q-LEAP 第 2 回シンポジウム[6]の聴講や海上自衛隊幹部学校未来戦研究室主催の第 2 回未来戦勉強会での意見交換の結果も踏まえ、約 2 か月間でまとめた内容である。量子技術（量子コンピュータ・量子シミュレータ・量子デバイス・センサまたは計量センサ・量子暗号通信または通信・セキュリティ）全般の解説と、それぞれの関連性について、オープン情報を使い、極力平易な表現でまとめることを目論んだものである。

近年、AI 分野では学会だけでなく、オープン参加のコンテスト(Kaggle<sup>2</sup>等)で活発に研究成果の共有が図られている。GitHub<sup>3</sup>等にも最新ソフトウェア情報があふれ、国内でも多くの都市でハッカソンやアイデアソン等イベントが開催されている。今回の調査報告で、オープン情報を引用した理由は、読者が直接最先端の情報にアクセスしやすくするためである。量子技術関連の学術文献もオープンソース化が進み、論文発刊前の段階からプレプリントの形で arXiv (コーネル大学の管理する学術論文等の世界的オープンソース・アーカイブ) 等を中心に公開され、研究者は常に世界の最新情報を追いながら切磋琢磨している。また、本稿が平易な表現となった理由は、単純に私自身がこの分野に対して門外漢であり、私の理解の範囲でしかまとめられなかったからである。逆に、軽い読み物的な報告として受け止めていただけると幸いである。

---

<sup>1</sup> ISQT: EU-USA-JAPAN International Symposium on Quantum Technology.

<sup>2</sup> Kaggle: データサイエンスと機械学習のエンジニアコミュニティ向けインターネットサイトで、企業や政府が賞金付きのコンペなども提供している。

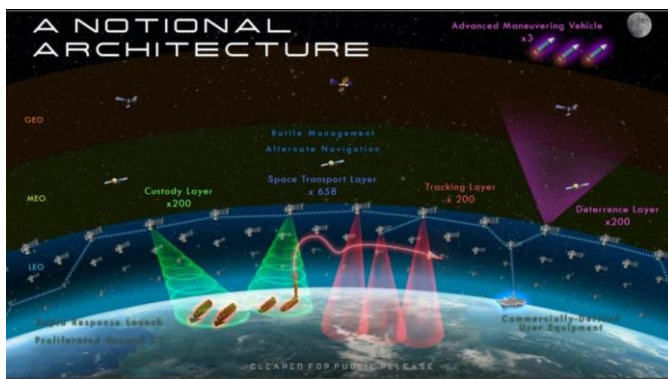
<sup>3</sup> GitHub: ソフトウェア開発者向けのインターネット上のオープンソース・サイト。

## II. 調査の背景

### 1. 防衛的観点

「量子技術」は、ビッグデータ活用のための高速大規模演算性能の獲得や、高速大容量の秘匿性通信実現、高感度センサの実現等に深くかかわり、これから 50 年間の世界の技術動向に極めて大きな影響を与えるのみでなく、安全保障上も現在の技術の延長線上にないキーテクノロジーである。私の前職で関わった弾道ミサイル防衛等の世界規模のシステムにおいても、世界の情報を C4ISR ネットワークで常時観測しながら即応体制を維持するには[7, 8]、高速大規模演算性能、高速大容量の秘匿性通信、高感度センサ技術の全てが必要となる。米国では Space Development Agency(SDA)の創設[9]とともに1,000機を超えるコンスタレーション衛星を展開して GPS Denied 環境下でもネットワーク化可能な C4ISR 環境を確立する構想[10]を示しているが(図 1)、この実現にも、AI や機械学習技術を活用する必要がある[11~13]。センサプラットフォームと無数の IoT がネットワークでつながった将来の世界では、量子技術を利用した高速大規模演算性能の獲得や、高速大容量の秘匿性通信実現、高感度センサの必要性はさらに高まるであろう。

図 1. 米国 SDA によるシステム構想 (案) [10]



DARPA STO<sup>4</sup> の Mosaic Warfare プログラムなども、このような世界の実現までを視野に研究を進めている。ただし、2018 年 12 月に公開された STO Systems Panel では、8 名の担当プロジェクトマネージャー

<sup>4</sup> DARPA STO: Defense Advanced Research Projects Agency, Strategic Systems Office.

(PM)の発表とパネルディスカッションの中で、ほとんどの PM は、俊敏で適応性の高い指揮統制をいかに迅速に進めるかといった問題意識は持つものの、フィジカル空間での運用構想実現という従来のな立ち位置での議論が多かった。その中で、ペンシルバニア州立大学応用物理研究所 ACO(Adaptive Capabilities Office)の J. Galambos 博士だけがフィジカル空間からではなくサイバー空間側から全体をとらえようとしているように感じた。彼は、分散型信号処理系の性能に応じてシミュレーション忠実度を可変型にしたサイバー指揮通信系を構築し、運用者が常に訓練等でこれを使用すること等を通じて、より実戦型のシステムを構築することの重要性を主張していた ([12] Part2 の 4 人目) (図 2)。

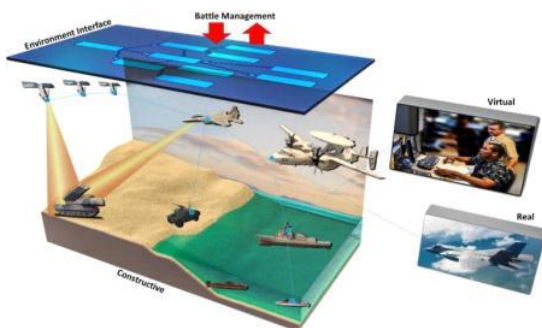
別の会議で講演した Director の T. Grayson 博士 [13]も、比較的従来型のとらえ方をしていたのは、フィジカル空間の最前線から指揮系統に至る Sensor-to-Shooter 環境全域で混乱を生じさ

せない、外乱を極力排除した運用環境を前提にシステム構築を進めているからかもしれない。しかし、一方では近年の情報インフラや IoT 等の目覚ましい進化を的確に取り込み、サイバーフィジカル空間の状況変化に的確に対応できる、より柔軟なシステムを構築することの必要性も感じる。

我が国においても、Society 5.0 の中でサイバー空間とフィジカル空間の高度な融合[14]の実現に向けて研究開発から法整備に至る総合的施策を進めているが、そのような社会の実現に必要な技術は、上記 SDA の構想や Mosaic Warfare 構想の実現に必要な技術と類似性が高い。世界中に分散されたノード毎に自律して莫大な情報収集と信号処理を行いつつ、全体システムを連動させ得る運用を開発するには、サイバー空間に的確に分散された形でフィジカル空間を摸擬するシステムが必要となるからである。

現在、私の所属する先進技術推進センターでは、ロボティクス技術や CBRN 関連技術等のこれまでの研究開発を通じて培った技術的な強みを生かしつつ、サイバー空間とフィジカル空間が高度に融合した将来の運用環

図 2. DARPA STO Mosaic Warfare 構想 [11,12]



境下での陸上自衛隊の個人戦闘や災害派遣等任務を具体例として、必要とされる要素技術を探りつつ、研究開発を進めている。これらは、様々なセンシング技術、群制御技術、認識拡張技術、Real Haptics 技術<sup>5</sup>、BMI (Brain Machine Interface) 技術等により情報ネットワーク化と分散処理化を進めるために必要な将来技術である。最前線で常に外部環境の変化を把握しつつ指揮系統と連動する必要がある運用者用の個人装備へのこのようなアプローチは、外環境との接点が多く複雑な系とはなるが、巨大なプラットフォームを用いずにシステム検証が可能で、かつ陸上自衛隊はもとより、海上自衛隊や航空自衛隊にも応用可能なものであると思われる。

一般的に議論されていないように思うが、運用者の判断能力と緊張状態下での理解力も正しく把握して現場の情報を的確に取り込みつつ、指揮系統との意思疎通を迅速かつ正確に展開するためのインターフェースの仕組みは極めて重要である。これに必要なものはサイバー空間上で前線の運用者の立場をとるアバターと指揮系統システム側の立場をとるエージェントとが迅速かつ適切に意思疎通できるインターフェース・モジュール技術であろう。このような分散型信号処理系に対しても演算負荷の増大が予想される。高感度センサ、秘匿性通信、大容量信号処理のいずれにも大きく影響を与える可能性の高い量子技術は、将来装備コンセプトを構築する観点からもキーテクノロジーである。

また、様々な種類の技術をそれぞれの進展の度合いに応じて複合的に利用しながらシステム構築を進める必要性が今後ますます高まるであろう。よって既存のインフラに、どのように付加機能を与えながら全体システムを進化させていくのかを常に考える必要がある。それぞれの要素技術の根幹を理解するとともに、拡張性を確保しながら、それらを段階的に組み合わせ利用していく、バランスの取れたシステム構築能力が求められるであろう。そのような観点からも量子技術の特徴と現状を把握しておくことは、量子技術が一般化した将来に向けて極めて重要である。

## 2. ムーアの法則

Google 社が「量子優位性(Quantum Supremacy)」を実証したとの報道が世界を駆け巡った[15]ことは記憶に新しいが、特定の計算では古典のコンピュータよりも高速に解に到達することを明らかにするべく量子コンピュータの研究に拍車がかかった一面がある。その動きは、ムーアの法則

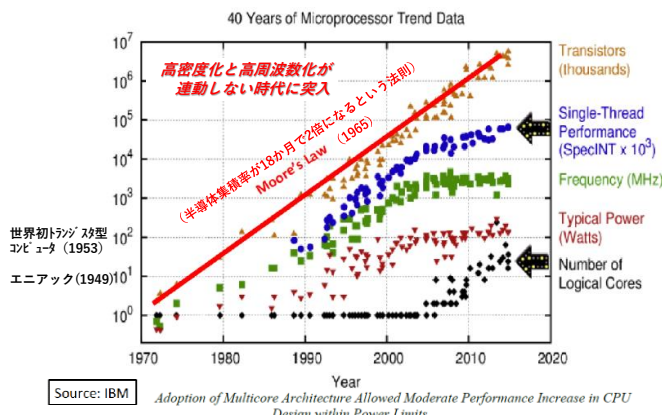
---

<sup>5</sup> Real Haptics 技術：現実の物体や周辺環境との接触情報を双方向で伝達し、力触覚を再現する技術(<http://haptics-c.keio.ac.jp/>)。

に沿った古典的コンピュータの性能向上が、マルチコア技術等を駆使した総合力で改善せざるを得ない時代へ突入した 2005 年前後から加速されている[16](図3:IRDS<sup>6</sup> 2018年度版 Executive Summary の1. Introduction Figure ES2 参照)。2016年度 IEEE Computer Society 会長に、マルチコア技術の第一人者である早稲田大学副学長の笠原教授が、会の発足から70年間で初めての北米以外の国の出身者として就任したことも、世界の計算機性能向上のニーズに半導体微細化では対応できなくなったことを端的に表している。IRDSに CRYOGENIC ELECTRONICS AND QUANTUM INFORMATION PROCESSING が加わったことも同様の理由であろう。

我が国においても、古典的コンピュータが不得意な領域をカバーするための有力候補として量子コンピュータの研究が国を挙げて進められている。民間企業では、より実用化に近い技術としてデジタルアニーラ等を含む広義の量子コンピュータの開発が盛んである[17]。これらの動きも、ビッグデータを活用する AI や機械学習等の演算手法とともに量子コンピュータが、次世代の社会を支える基盤技術として、その必要性が高まったことを端的に表している。

図3. ムアの法則とマルチコア化による CPU 性能の向上[16]



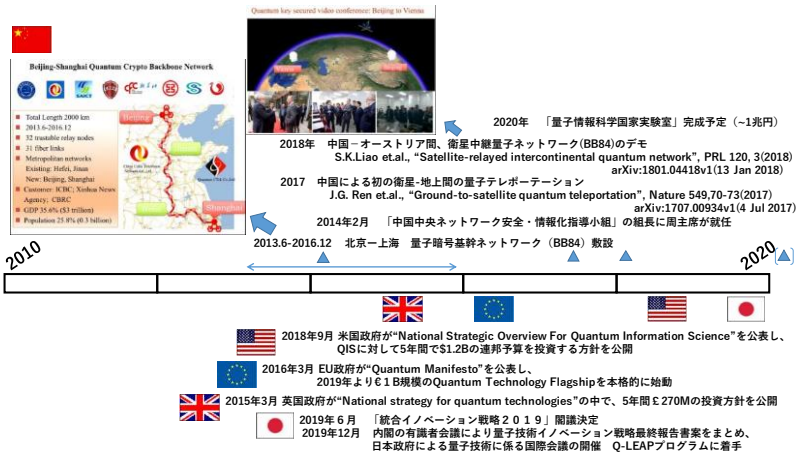
### 3. 中国の情報技術戦略の進展と日米欧の対応

世界の先端技術動向は、中国の動きを抜きには語れない時代である。量子技術に関しても同様で、中国の情報技術戦略の進展とともに、それに対

<sup>6</sup> IRDS: INTERNATIONAL ROADMAP FOR DEVICES AND SYSTEMS.

応する日米欧の動きがここ数年で特に活発化している(図4)。以下、中国、欧州、米国、日本の順にその状況をたどる。

図4. 中国の情報技術戦略の進展と日米欧の対応

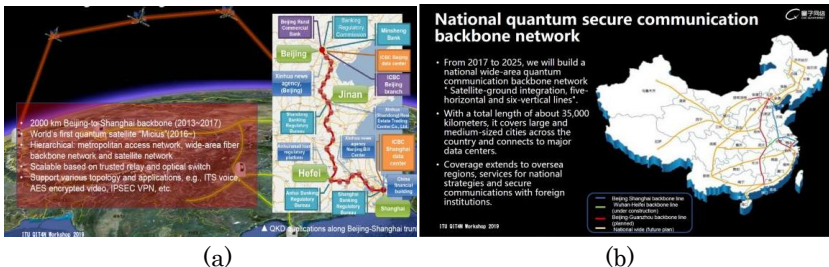


(出所) 筆者作成。

i. 中国

中国は10年以上前から莫大な経費と人材を投じて国策として情報技術戦略を進めており、図4の上段に示されるように、近年は量子通信技術に関する進展も目覚ましい。図5(a)右に示す2013~2016年：北京-上海間の量子暗号基幹ネットワーク敷設[18]の他、2014年2月「中国中央ネットワーク安全・情報化指導小組」の組長への周主席の就任[19]、2017年：中国による初の衛星-地上間の量子テレポーテーション(量子通信の基礎となる実験)の検証[20]、2018年：中国-オーストリア間、衛星中継量子ネットワーク(BB84という方式を用いた暗号鍵配信を利用したテレビ会議の生

図5. 中国企業による量子通信網整備の(a)成果と(b)将来構想の発表[18]



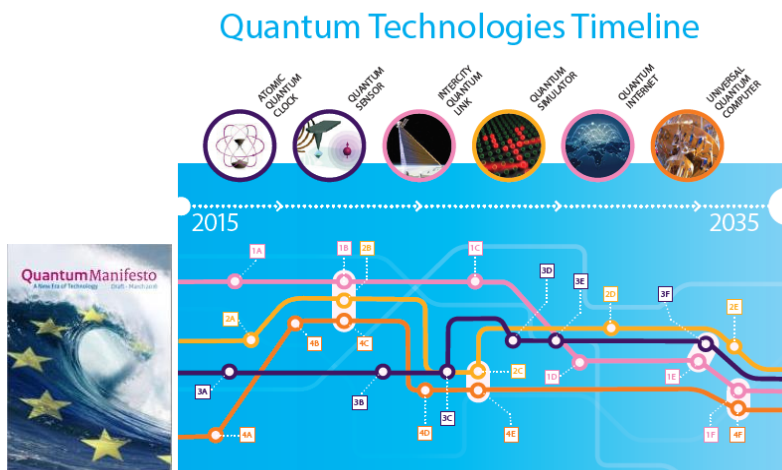
中継)のデモンストレーション[21] (図 5(a)左)、2020 年: 1 兆円強の予算で構築した「量子情報科学国家実験室」完成予定[22]などの動きが見て取れる。このように驚くべき速さで、次々と成果を世界に示しつつ情報インフラの刷新を続けている。

さらに、インフラ整備と実運用とを通じた様々なノウハウ蓄積を進める中で、国際標準化の会議でも中国の産官学が国際社会に対して強い影響力を見せている[23]。中国全土にさらなる量子通信情報基幹網を張り巡らせる計画を標準化の会議で中国企業が公表した例を図 5(b) に示す[18]。

## ii. 欧州

欧州では、英国において 2015 年 3 月に”National strategy for quantum technologies”の中で 5 年間で £ 270M の投資を公表した[22]。その直後の 2016 年 3 月には EU 政府が”Quantum Manifesto”を公表し[24]、2019 年より €1B 規模の Quantum Technology Flagship を本格的に始動した[22]。

図 6. EU の Quantum Technologies Timeline [24]



Quantum Manifesto では、2016 年から 2035 年までの期間で段階的に量子技術全般に研究開発投資を進め、原子量子時計、量子センサ、都市間量子ネットワーク・リンク、量子シミュレータ、量子インターネット、汎用量子コンピュータと段階的に様々な関連技術を実用化に導く方針を明確にしている (図 6)。この執筆者である T. Calarco 博士が ISQT の招待講演の中でもこのことを述べていた。

EU は彼らの科学技術政策報告書 (2016 年の JRC Science for Policy Report) の中で、中国はもとより日米よりも量子技術の研究開発に対する遅れが大きく、早急にこの事態を改善する必要があると、その冒頭に記載している[25]。彼らは欧州の量子技術に関する最先端の科学技術者を集めて Quantum Technology Roadmap を策定し[26]、その成果を要約して論文にも投稿し、EU や世界の科学技術者に対してこの技術分野を高める努力を進めることを宣言している[27]。これらの執筆にかかわった科学者の中には ISQT で招待講演を行った量子シミュレータの権威 I. Bloch 博士も含まれている。また、量子コンピュータの成立に必要な 5 つの必要条件[28]を定めたことで広く知られている D. P. DiVincenzo 博士や、分子中の核スピン 7 Qubit による計算で 15 の素因数分解を初めて行った M. K. Vandersypen 博士[29,30]等の世界のそうそうたる頭脳がこの活動のために集結している。

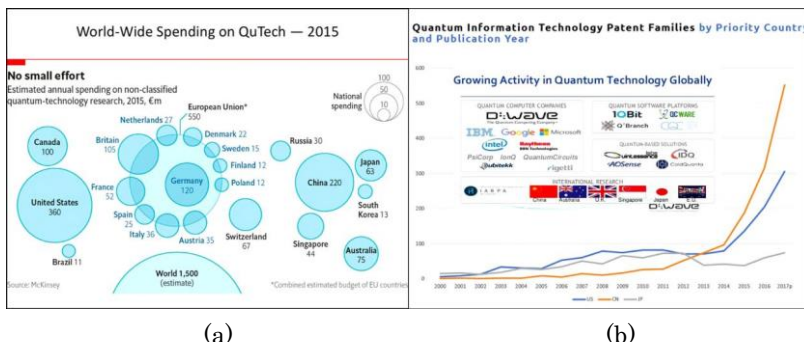
### iii. 米国

政府の予算で量子技術の研究全般に総ざらいために投資をするという欧州とは若干トーンの異なる戦略を米国が取っていることは、2018 年 9 月に公表された National Strategic Overview for Quantum Information Science を見るとわかる[31]。この執筆者である J. Taylor 博士も ISQT の招待講演の中で米国の技術戦略について説明したが、同戦略公表直後に全米アカデミーの主催した「量子センシングと量子通信」というテーマのコロキウムを見ると、情報技術戦略の一環という位置づけで量子技術をとらえていることがより一層理解できる[32]。このコロキウムはリアルタイムで世界に WEB 配信され、現在でもインターネット動画を閲覧可能である[32]。科学者の知見を安全保障に役立たせる目的で南北戦争後にリンカーン大統領により発足されたという、全米科学アカデミーの招へいた講演者による 5 件の発表は、安全保障的観点から興味深いものであった。中でも G. Gilbert 博士 (MITRE)、M. Lanzagorta 博士(NRL)、J. Dowling 博士 (ルイジアナ州立大学)の 3名の講演とパネルディスカッションは非常に興味深いものである。

J. Dowling 博士は、量子技術研究機関 QuTech の集計による 2015 年時点での各国の量子技術への投資額の推定値を示したが (図 7(a))、「2018 年現在では中国の丸の大きさはこのスライド中の全ての国の総和を超え、この図の総額よりもさらに一桁から二桁多い(約 30B€)」とのコメントが印象に残った。あわせて、日米欧中を中心に民間主導での技術競争も激化していることを量子技術の特許獲得数の図で説明した (図 7(b))。



図 7. 各国の量子技術への(a)推定投資額と(b)特許獲得数[32]

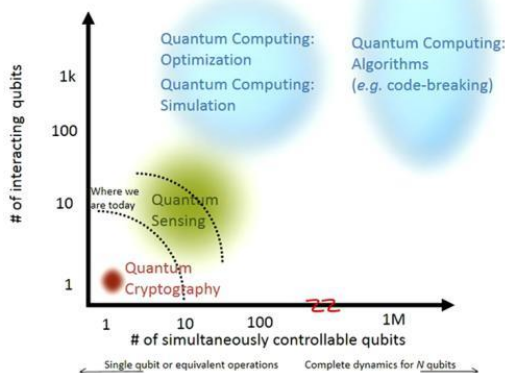


また G. Gilbert 博士は、量子コンピュータの研究は 100 Qubit 程度の比較的誤り率の高い NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) コンピュータを中心に進み、量子通信と量子センシング技術は既存の技術を凌駕しつつあると説明した。あわせて、各用途に必要な相互作用する総 Qubit 数と制御可能な総 Qubit 数との関係や、古典的コンピュータを活用して Qubit をエミュレートする量子演算から、CMOS アニューラ<sup>7</sup>や Qubit を利用する量子シミュレータ等、幾多の手法が研究されているが、どの研究も究極的な目標である万能型量子コンピュータの実現に有益であると説明した [32] (図 8)。

図 8. 応用毎の必要 Qubit 数と同時制御可能 Qubit 数[32]

米国の基本戦略は、① 中国の急激な技術の進展に早急に追いつくとともに、②基礎的な分野のすそ野を広げつつ、③情報セキュリティや高感度センシ

### What resources are needed for quantum technologies to be useful?



<sup>7</sup> CMOS アニューラ：広義の量子コンピュータに含まれるイジングマシン方式の一種。半導体の CMOS 回路を利用する。概要は III 章 2 項にて解説している。

ング等の観点で量子技術が応用されて安全保障上の問題が生じないように、基盤技術を押さえる(例:コンパクトで実用的な原子時計技術等)というものである。量子コンピュータに関しては、Google や IBM、Microsoft 他、量子通信については Quantum Xchange 社がニューヨーク・ワシントン DC 間を結ぶ光ファイバーケーブルへのアクセスを可能とする許可を取得した旨が報道されている[33,34]。このような米国を中心とした民間活力を推進力とした技術動向をウォッチしつつ、基礎研究のすそ野を広げる継続投資を米国は計画している。

パネルディスカッションの中では衛星通信技術に関して、NASA の研究者が質問時のコメントとして、当時の 5 年前から量子(暗号)鍵配送デモ用の試作品を用いて量子もつれ状態を用いた衛星-地上間セキュア・ネットワークと、より高密度なテレポーテーション通信の研究<sup>8</sup>を、レーザー通信と組み合わせる形で進めていると説明した。2019 年打ち上げの衛星を使用して実証した 4 年後には宇宙ステーションを活用した、より大規模な宇宙通信ネットワークの研究へと進めていく計画があるとのことであった。その後の動向を調べる必要があるが、通信速度は中国が論文で報告したものよりも 3 から 6 桁向上させる計画とも発言していた。

#### iv. 日本

日本は以前から量子技術の基礎研究分野で多くの著名な科学者や技術者を輩出し、成果を上げてきた。そして今年度、中国や米国、欧州の国を挙げた研究開発投資に対抗できる技術力を維持するために第 5 期科学技術基本計画[35]のもとで、量子技術イノベーション戦略[36]を作成した。また、統合イノベーション戦略[37]では省庁の垣根をまたぐ横断的な研究開発の実施に向けてムーンショット型研究開発制度[38]に設置された分科会の中で「量子現象等の活用による未踏領域の創出」という活動にも着手している。ISQT では量子技術イノベーション戦略を取りまとめた文科省科学技術・学術政策局の奥量子研究推進室長が世界の技術動向と我が国の量子科学技術政策について講演した。

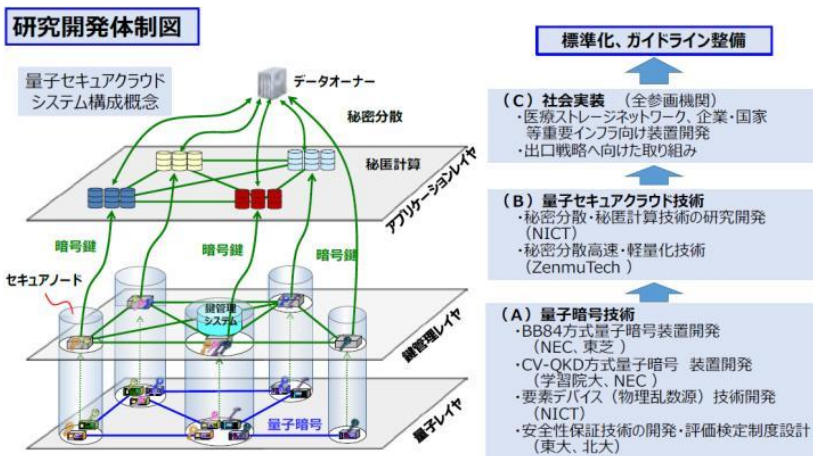
量子技術イノベーション戦略の柱として「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」が立ち上がり、その中で量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)、量子計測・センシング、次世代レーザーの 3 つの柱を立てて研究開発を進めつつある[39-42]。量子通信ではなく次世代レーザーがテーマとして採択されている点に当初疑問を持ったが、Q-LEAP 第 2 回シンポジウム[6]での講演を聞き、私なりに理解することがで

<sup>8</sup> この種のネットワーク方式等の概要は、III 章 4 節にて解説。

きた。Society5.0 の中で先端的な科学技術の社会実装化を進めるという流れの中で新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」[43]では最先端レーザー加工技術と通信ネットワーク技術とを組み合わせた研究開発が進捗中であり、さらに戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)、光・量子を活用した Society5.0 実現化技術[44]の中ではそれをさらに発展させた構想の中でそれぞれ 100 億円規模の研究開発が進捗中である。特に SIP の中では量子鍵配送技術を活用した秘匿通信ネットワーク技術の構築と最先端遠隔レーザー加工や医療情報管理等への応用が含まれており、より社会実装化という目的意識を強く持ち、予算をかけて通信インフラの社会実装までを視野に研究を進めるという発想で研究投資を行っているのであろう (図 9)。Q-LEAP としては TACMI というレーザー関連の民間企業等を中心に作られたコンソーシアム[45]も含めた 4 者 (Q-LEAP, NEDO, SIP, コンソーシアム) が連携して技術の進展を進めていくとのことであった。

基礎研究に対する強みを維持しながら、実用化という視点も意識した研究開発投資を行うという方針は日本らしいアプローチである。一方で、唯一、欧州の計画等と比較して不足していると感じたのは、後述する量子リピータ等を中心とした将来の量子インターネットにつながる、量子もつれ状態を利用した量子暗号通信の研究への投資である。量子リピータの研究は安全保障的な観点からも、重要な要素技術であると考えられる[32]。

図 9. SIP での光・量子通信の研究開発体制図[44]

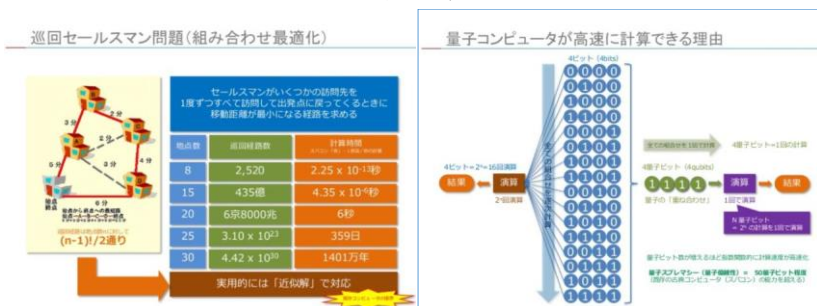


### Ⅲ. 量子技術とは

#### 1. 量子コンピュータの意義と進展の背景

量子コンピュータの解説をインターネット上で探すと、例えばこれまでの古典コンピュータでは解けない巡回セールスマン問題（組み合わせ最適化）などの計算では地点数が 20、30 と増加するにつれて指数関数的に計算時間が必要となる等の説明が見られる。そして、その種の計算に対して量子の重ね合わせ状態を利用することで全条件の重ね合わせ状態を 1 回の計算で再現できることなどを述べることが多い (図 10)。量子コンピュータを用いることで、古典的な逐次計算と比較すると信じられない速さで、正解として最も確率の高い条件が導き出される[46]。そして、この種の計算を実現させるために必要となるものが量子ビット(Qubit)である。

図 10. 量子コンピュータの特徴を解説するネット情報の 1 例[46]



JETRO のニューヨークだよりでは、「量子コンピュータを用いることで重ね合わせの特徴を用いて  $N$  個の量子ビットで一度に  $2$  の  $N$  乗回の並列計算が可能になり、1 量子ビット付加するたびに量子コンピュータの演算能力が飛躍的に高まることから、交通／物流、ヘルスケア、金融サービス、メディアテクノロジー、サイバーセキュリティ、AI 等の産業分野での実用化が期待されている」と表現してその有用性を説明している[47]。

量子ビット生成にも多くの手法があるが、現在最も多くの Qubit 数を用いて量子コンピュータ研究を進めているのは超電導型であり、この技術実現の最大の理由は図 11 に示すようなメゾスコピック系物理の進展にある。

図 11 は、1993 年に Science の表紙を飾った、銅結晶表面の冠状鉄原子による電子干渉パターンである[48]。Ar イオンを用いた表面加工で作りに出

した凹凸のない美しい銅の 111 結晶面上に 4K の低温環境下で走査型トンネル顕微鏡を用いて鉄原子 48 個を直径 71.3Å のリング状に配列した際の電子顕微鏡写真である。

鉄原子の輪によって閉じ込められた領域に電子による美しい干渉パターンが観察できる。この例に示されるような量子効果<sup>9</sup>を比較的自由に作り出せる微細加工技術や計測技術、低温制御技術、真空技術等が総合的に高まり、基盤技術が成熟したことで量子コンピュータ技術が進展したといえる。

図 12 のように量子ビットは a) 光の偏光や b) 原子やイオン、量子ドット等々の電子スピン、c) ループ電流等の様々な形態で成立しうる[49]。そして、それらの状態は、いずれも d) Qubit Bloch 球内のベクトルで表現できる。その状態を制御し、最終的には、e) 偏光成分の計測等の各 Qubit 毎に適した計測法で Qubit の状態計測を行い演算を完了させる。

図 11. 鉄原子による電子干渉パターン[48]

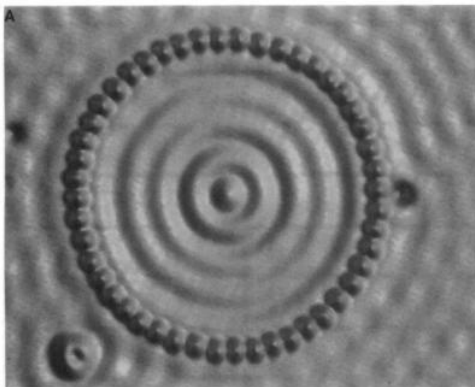
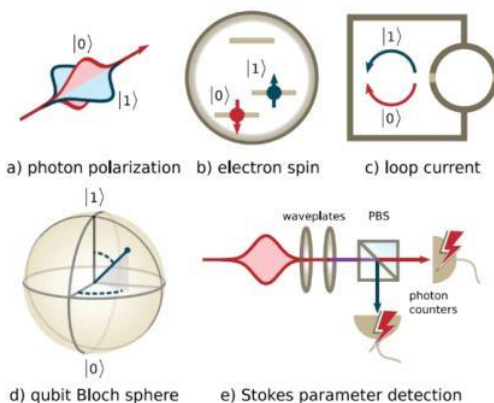


Fig. 2. Spatial image of the eigenstates of a quantum corral. (A) 48-atom Fe

図 12. 各種 Qubit、ブロッホ球、計測技術 [49]



<sup>9</sup> 通常は粒子の特徴を示す電子が、波の性質である干渉パターンを示す現象は、粒子性と波動性を持つ素粒子の量子効果を実験環境下で観測した実例である。

## 2. 量子コンピュータ

図 13. 量子コンピュータの研究動向(1990~2020 年)

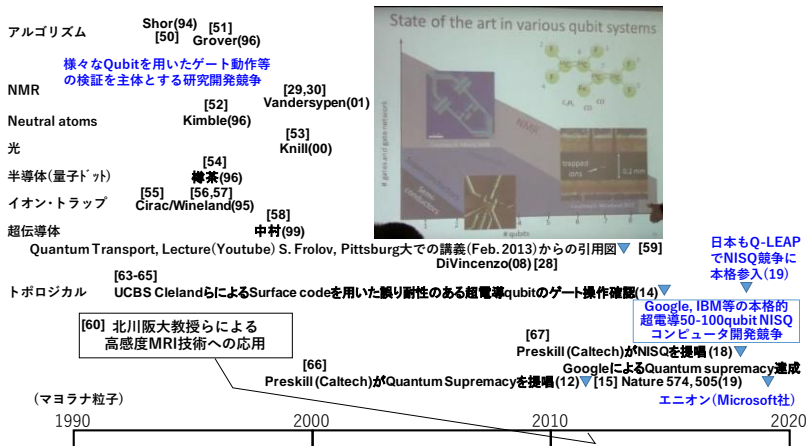


図 13 に、量子コンピュータアルゴリズムの研究や各種方式のゲート動作等検証に向けた 1990 年代から 2020 年までの研究動向 (カッコ内は年、[カギカッコ]内は参考文献番号) を示す。量子コンピュータの発展に大きく寄与したものとして頻繁にあげられるのは、古典コンピュータでは実施不可能で絶対的に優位な量子アルゴリズムの提案、有名なものは Shor のアルゴリズム [50] や Grover のアルゴリズム [51] がある。そして、これらが公表された 1990~2010 年前後までのハードウェア側の研究開発は、様々な方式の Qubit の実現と、量子コンピュータ実現の第一歩となるゲート動作の検証という形で費やされてきた。NMR<sup>10</sup> [26,27]、中性原子 [52]、光 [53]、量子ドット [54]、イオン・トラップ [55~57]、超伝導体 [58] 等、それぞれに特徴のある物理現象を、それぞれに適した制御方法、読み取り方法を活用して原理実証がなされてきた (図 13 の上段)。

1990 年~2001 年の実験的研究の世界的推移をコンパクトに示しているのが、Vandersypen の博士論文 [30] だと思う。2000~2013 年時点までの実験的研究の推移はピッツバーグ大 Frolov 教授が行った 21 回の講義 (Youtube 公開) に極めて分かりやすくまとめられている [59]。特に Lecture11、Quantum Bits の後半と、Lecture12 の Spin Qubits の講義では量子エンタングル状態をどのように発生させ、制御し、読み取るのかと

<sup>10</sup> NMR: Nuclear Magnetic Resonance(核磁気共鳴)現象を利用して、磁場雰囲気中の原子の核スピンの共鳴を制御・観測する手法。

いう点を解説している。また、Lecture15 では超電導型の進化について、1999 年に中村東京大学教授が初めて実験的に動作を確認した Charge 型 Qubit(クーパー対電子 2 個のあるなしを  $|0\rangle, |1\rangle$  に対応)を含め、Flux 型 (単位磁束の向きによる  $|0\rangle, |1\rangle$ )、Phase 型等の複数の超伝導 Qubit の動作原理についてわかりやすく解説し、さらに Transmon 型 Qubit (Charge 型の雑音耐性を向上させるために微小コンデンサと結合させる方式)に至る実験的研究の推移を示している。

ただし、図 13 に示した 2013 年時点で実現された Qubit 数は Vandersypen らの実証した NMR 方式による 7Qubit が最大で最も安定していた模様である。この方式は溶液中の分子中の幾つかの特定原子の原子核スピンの向きで  $|0\rangle, |1\rangle$  を定義し、磁場の制御により原子核スピンを制御し、それらと相互作用する電子スピンの状態をマイクロ波で計測することで、複数個の分子の平均状態から演算結果を読み取るものである。この方式での総 Qubit 数は分子固有の配列により制限され、一定以上に増やすことは困難である。しかし、磁場と電子スピン読み取りのためのマイクロ波計測技術および低温技術のみで実現可能な、この時点においては安定性や制御性が高い方式であったため、有用な研究対象だった旨記述されている。基礎的な量子コンピュータ用のゲート動作の検証までしか実現できないが、Shor のアルゴリズムを用いた 15 の素因数分解を実施した結果が示された画期的な論文であったというのは前述のとおりである [29,30]。

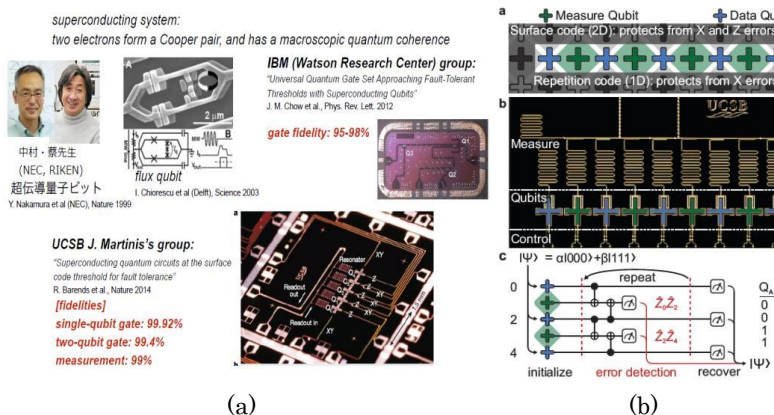
それ以降の NMR を用いた Qubit 数を増やす方向での量子コンピュータの研究が出たかは不明だが、核スピンと電子スピンの相互作用を利用した読み取りメカニズム (電子スピンを制御することで核スピンを制御するという手法) を医療応用高感度センサとして利用する、画期的研究がなされている。これは、大阪大学の北川教授らのグループによる生体物質の NMR 分光や MRI の高感度化に有望なトレーサーとしての応用である [60]。量子コンピュータの研究から高感度な制御や読み取り機構の研究が進み、バイプロダクトとして高感度センサへの応用が開けたという良い例だと思う。

2010~2020 年の動向としては、超電導型量子コンピュータの研究の進展と、DiVincenzo[28]らの量子コンピュータが機能するための必要条件の明確化をはじめ、多くの誤り耐性アルゴリズムに関する研究の進展が極めて大きい (図 13 の下段)。Google による Quantum Supremacy 達成に関して Nature 誌に投稿された論文[15]の Pier Review メンバー 3 名の一人であった藤井大阪大学教授も誤り耐性ソフトウェアの研究の第一人者であり、Moonshot 分科会において素晴らしいご講演[61]をされていたが、講義

資料も極めて明快地組み立てられたものが多く、学会発表とともにインターネット上に公開されている [62]。

古典的コンピュータでは、誤り発生率が  $10^{-5}$  以下程度が基準となるのではないと思うが、量子コンピュータを構成する各種の Qubit ゲートの制御や読み取りには誤差が大きく、1%を下回るようになったのは 2014 年頃からである [62]。しかし、1%といった大きな誤り率であっても世界の研究への熱意が衰えなかった理由は、トポロジカルな数学的理論を応用した誤り訂正の研究の成果があったからである。特に、カリフォルニア大学サンタバーバラ校 UCSB のグループが Surface code を考案し、Qubit を制御・読み取り誤り訂正用と実際の演算用とに平面上で分類して誤り訂正を行うことによりゲート誤り率 99.5%まで許容できるアルゴリズムが確立され [63~65]、Google、IBM らの量子コンピュータ開発競争が本格化したのではないと思われる。また、これらの量子コンピュータ研究に対する Caltech の J. Preskill 教授による Quantum Supremacy (古典的コンピュータを特定の領域において凌駕する量子コンピュータの実現) と NISQ コンピュータ (誤り率は比較的大きいが量子コンピュータとして機能し、Quantum Supremacy を実現しうる 50-100 Qubit のデバイスによる限定的な実用化) を提唱した 2 本の論文 [66,67] のインパクトは大きかったようである (図 13 下段)。図 14(a) は藤井阪大教授の講義資料 [62]、(b) は UCSB のデバイスで使用された Surface Code による誤り訂正方法を示す [65]。

図 14. (a). 藤井阪大教授の講義資料 [62] と (b). 誤り訂正の例 [65]





我が国においても Q-LEAP の中で中村教授のグループが **Flagship** プログラムとして 100Qubit の NISQ コンピュータ実現に向けて研究を進めており [40, 68]、16 Qubit 単位ユニットでの動作確認を順調に進めていると ISQT や Moonshot 分科会において発表していた。

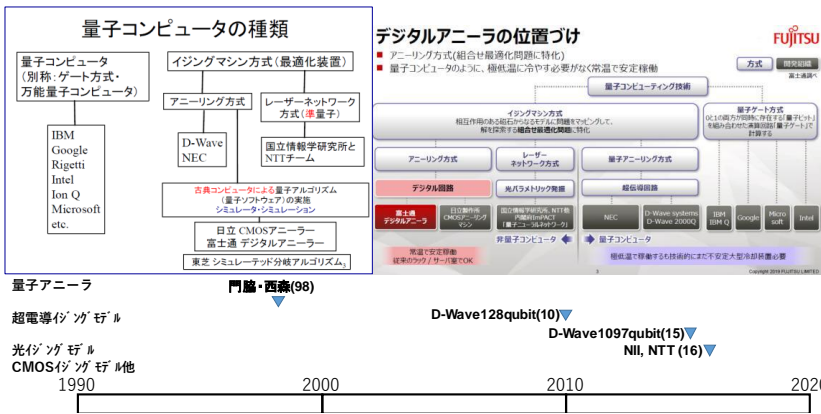
一方で、これらの研究開発の流れと一線を画し、誤り耐性を高める根本的な解決策を求めて、マヨラナ粒子を用いた量子コンピュータの開発を続けている Microsoft 社の動向は把握できていない。この方式は Bloch 球内での移動が離散的になり、古典コンピュータの場合のアナログ回路からデジタル回路への移行と同様の誤り発生率減少にインパクトのある技術であるが、完全な量子コンピュータを構成するために必要となる  $\pi/4$  ゲート等の実現性が確認されていないと 2013 年時点で Frolov 教授は語っていた [59]。ただし、最新の状況は追えていない (図 13 最下段)。ちなみに同講義の中でも、Lecture17 では Hybrid 型の各種量子回路についての解説を通じて複数の原理を組み合わせるに Qubit を制御し、読み出しを行うのかということを解説し、Lecture18, 19 では DiVincenzo Criteria で定義される量子コンピュータを実現させるための方策について 2Qubit 等のレベルから、現在の NISQ コンピュータの競争が始まるきっかけとなった Surface Code や D-wave computer のイジングモデル、さらにはトポロジカル量子コンピュータの可能性について触れ、2013 年までの量子コンピュータの研究動向を極めて上手にレビューしている。

ただし、万量子コンピュータを実現させるためには 1 万単位の Qubit を低い誤り率で相互作用、制御、読み取りさせる必要があり、その最終目標に対しては、現状の達成度はまだまだ極めて低い。そのような観点から考えると、光型の量子コンピュータは「ダークホース」的な候補であると Dowling 博士は説明していた [32]。誤り率を低く押さえやすく、ゲート動作の増大化に対しても自由度が高い傾向にあるなどの点からだろうと思われるが、マヨラナ粒子を用いた量子コンピュータも「ダークホース」的な候補の一つなのかもしれない。

量子コンピュータの定義を DiVincenzo Criteria で行くと、ゲート制御を行わず超電導 Qubit を単に使用するのみの D-Wave 社や NEC のアニーリングマシンは範疇から外れる。伊藤慶應義塾大学教授が文科省の委員会で使用した資料でも、広義の量子コンピュータを狭義の「量子コンピュータ (別名: ゲート方式・万量子コンピュータ)」と「イジングマシン方式 (最適化装置)」に大別している [69] (図 15 左)。イジングマシン方式は、さらに細分化され、Qubit を活用するアニーリング方式、古典コンピュー

タによる量子アルゴリズムを利用する方式、レーザーネットワーク方式の 3 方式に大別して分類している。これらは限定的な用途に対しては有用であり、かつハードウェアは、ある程度実用レベルにあることから、具体的な利用方法の幅を広げるために各民間企業が様々な応用を模索しつつビジネス化につなげようとしている。1 例として富士通の資料で示されたイジングマシン方式を中心に据えた量子コンピューティング技術の分類図を合わせて示す[17] (図 15 右)。彼らは高度医療、自動運転、新素材開発等の新たな領域への適用と、既存の組み合わせ最適化問題への適用(精度向上、時間短縮)を目指して研究開発を進めている。

図 15. 量子アニーラの進展と量子コンピュータの分類 2 例[69,17]

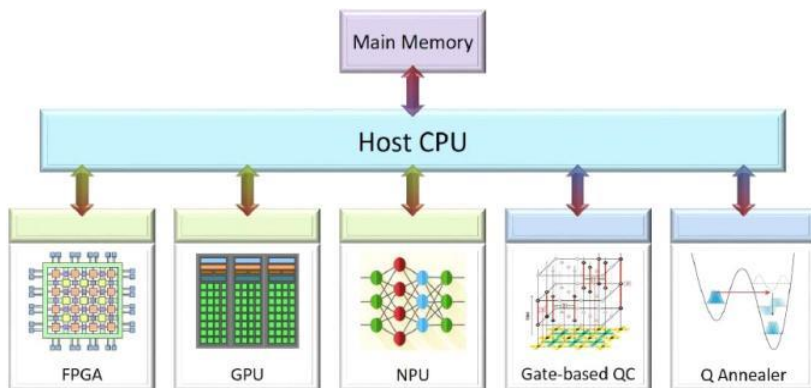


様々な議論はあろうが、応用を考える側から見ると、量子技術を応用してビッグデータ解析等の計算に利用できる可能性のあるデバイス全てを対象として、イジングマシンを含めた全ての量子コンピュータの活用方法を模索することが重要と考える。その中で、日本国内で民間を中心にアニーリングマシンを活用した多くの実証試験が進む背景には、2000 年前後にイジングモデル方式の理論を提案をした 2 グループのうちの 1 グループが西森東京工業大学教授(当時)らであり[70]、また、カナダの D-Wave 社による急速なビジネス展開があったからだと思われる[71~73]。NII, NTT らが Impact の中で進めてきた光イジングマシンも、異なるアプローチで光量子コンピューティングの世界をイジングマシン側から開拓し続けており[74~77]、注目に値する。

最新の状況としては、図 16 に示すように、これら多くの量子コンピュータ方式(Gate-based QC、Q Annealer)に加え、FPGA(Field Programmable

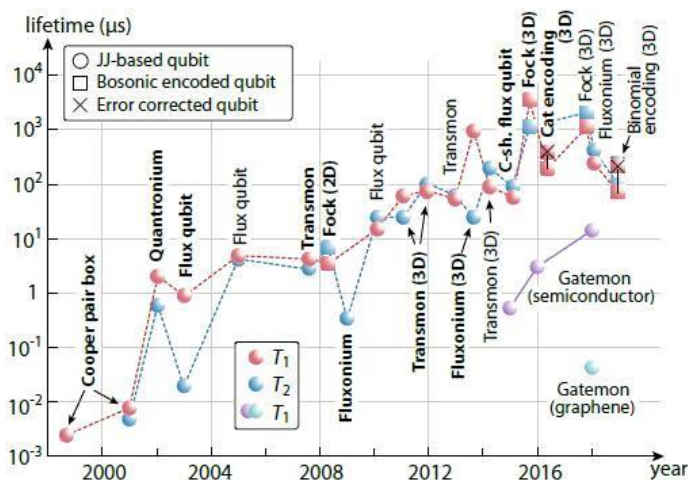
Gate Array)や GPU (Graphics Processing Unit)、NPU (Neural network Processing Unit) 等の異なる特徴を持つビッグデータ解析用アクセラレータを組み合わせた量子コンピュータ構想など、より実用的なシステムの段階的実現に向けた提案も出ている [78]。

図 16. 量子コンピュータのアーキテクチャ提案例 [78]



超電導方式の量子コンピュータ自体の研究開発も、NISQ コンピュータ開発をするエンジニア向けの総合的解説論文[79]や、長寿命 (ディフェージング時間が長い) で、より誤り耐性の高いゲート実現に有利な Qubit 素子の研究に関する解説論文[80] が出されるなど、より成熟度の高い技術の確立

図 17. 長寿命素子実現に向けた研究 [80]



に向けた研究が活発化している。図 17 は超電導型の Transmon 以降も Binominal encoding や半導体やグラフェンを用いた Gatemon 等の研究が進められている状況を示している[80]。

参考までに、超電導型 20Qubit のうち 18Qubit をマイクロ波共振器のバスで接合した、より完全性の高いデバイス研究 (中国) [81] (図 18) や、光量子コンピュータの小型チップ化に向けた[82]の最近の研究報告例 (図 19) も示す。

図 18. バス結合型の超電導型 20qubit デバイスの研究例[81]

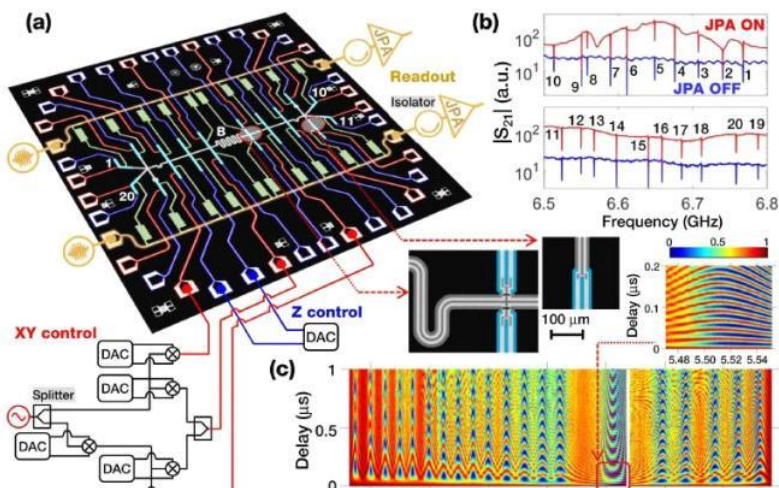
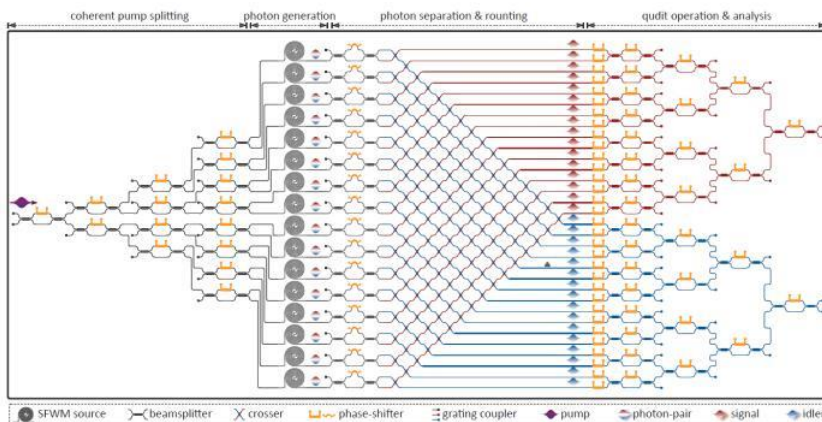


図 19. 16Qubit の光量子コンピュータ用チップの一例[82]



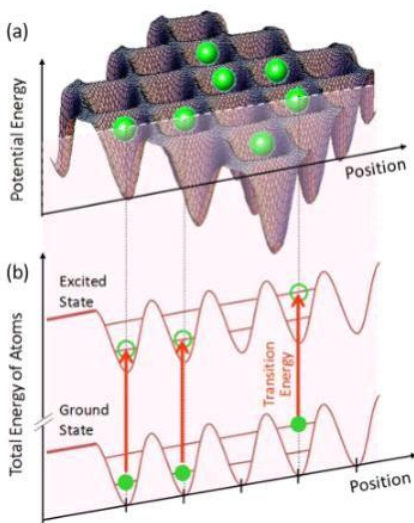
### 3. 量子シミュレータと光格子時計

量子現象を利用した物理シミュレータの分野では、超電導 Qubit を利用する量子アニーリング以外にも、多くの方式を用いて広範囲の応用に向けた研究が進められている[83]。利用する物理現象等は超電導回路のほか、冷却原子、励起子ポラリトン等様々で、それらを古典的コンピュータでは計算できない、複雑な多体相互作用問題等を解くことも目的に、多くの研究が進められている[84]。

ISQT の招待講演で来日した Max Planck 研究所の Bloch 博士もその分野の世界的権威の一人であり[85~88]、2012 年にはヒッグス粒子の存在が確認される数か月前にレーザー光トラップ原子を利用した量子シミュレータにより二次元の超流動体-Mott 絶縁体の相転移の観測結果からヒッグス粒子生成メカニズムをシミュレートして世界的なセンセーションを巻き起こした[89]。彼らのグループはレーザーを干渉させて原子 1,000 個以上を 2 次元上に拘束状態にして冷却し、それらの状態を制御しつつ顕微鏡観察することで様々な多体相互作用問題のシミュレーションを行っている。

レーザー光トラップ原子を利用した量子シミュレーションの技術は、香取東京大学教授により「光格子時計」という形での応用へも利用されている[90,91]。香取教授は ISQT や、第 2 回 Q-LEAP シンポジウムの招待講演の中でも、その研究を解説している。この技術の本質は、図 20 に概念的に示すように、レーザー光トラップされたセシウムやストロンチウム原子の特定遷移に対応するマイクロ波の共鳴線幅を極限まで狭めて時間精度を限界まで高めるために、捕捉用レーザー電磁場で生じる遷移の上準位と下準位のシュタルクシフトが同一になるような「マジック周波数」のレーザー光周波数を利用し、原子を捕捉するが原子とレーザーとの電磁相互作用は最小化する点にある。そして、独立する多数の原子を同時計測すること

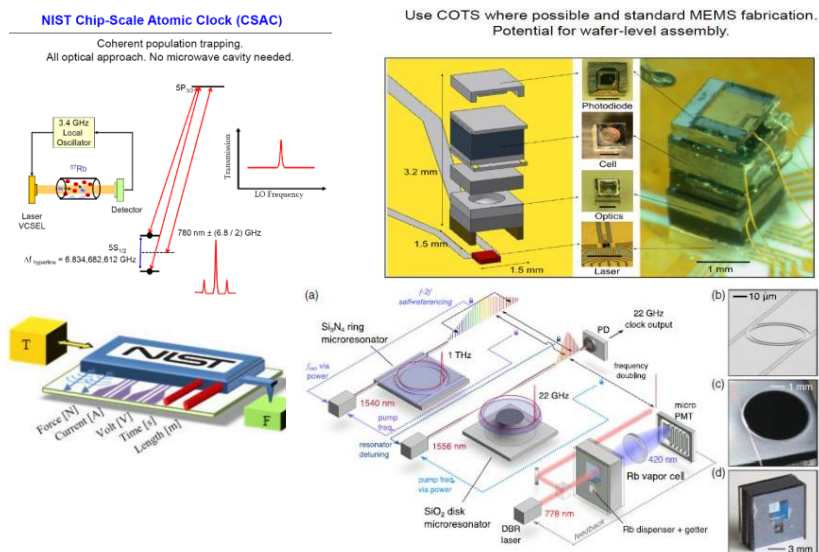
図 20. 光格子時計の原理 [85-88]



で原子数分の原子時計の統計平均をとることで時間計測精度を高めるところにある。現在では電子双極子のみでなく磁気 4 重極子等までマイクロ波共鳴線幅に影響を与えない特定の周波数を利用することで  $1 \times 10^{-19}$  秒までの安定化を目標に研究を続けている。また、実用性を高める研究として、19 インチラック 7 本に 2 セット分の光格子時計システムをコンパクトにまとめた可搬型装置に作りこみ、東京スカイツリーの地上と高さ 450m 地点との間での高度差による重力場で生じる時間遅れから高精度な高度計測なども行い、1m 以下の高度差すら計測できる状態まで来ているとのことであった。5G や 6G を用いた国際的な大容量高速通信化や IoT 社会の進化とともに、より高い時間同期精度が求められ、時間標準もさらに広範囲な用途で重要な技術として注目されていくであろう。

原子時計関連技術に関しては ISQT の招待講演で米国 NIST の J. Kitching 氏が、時間精度は低くなるが、よりコンパクトな原子時計の研究開発状況等に関する講演を行った。その内容は図 21 に示すような、2000 年代初頭の実現された数 cm 角で  $1 \times 10^{-12}$  の精度で時間計測が可能な原子時計モジュール CSAC(Chip Scale Atomic Clock)[92]や、同じコンセプトで作成した磁気センサ(CSAM: Chip-scale atomic magnetometer)等の複数の超小型高感度センサを組み合わせる NIST-on-a-Chip コンセプトの下で

図 21. NIST による小型原子時計の研究成果[92,93]



研究開発を進めている現状や、CSAC から 3 桁の時間精度向上を目的とした研究事業[93]の紹介などであった。図 21 の内訳はそれぞれ、CSAC の原理図 (左上)、CSAC 外観図 (右上)、NIST-on-a-Chip の概念図 (左下) [92]、および最新のより高性能なチップ開発に向けた研究成果(右下) [93]を示す。これらの小型原子時計の目的の一つは、高い耐環境性を維持しながら GPS Denied な環境下に 1 日放置されても m 単位以下の位置誤差しか生じない程度の精度の実現、あるいはそれ以上の精度や安定性の実現であると思われる。イオントラップ型の量子コンピュータの研究で 2012 年にノーベル物理学賞を受賞した D. Wineland 博士をはじめとする著名な研究者の集まる NIST は、量子技術研究の拠点の一つであり、基礎研究で用いた制御・計測等技術が小型高精度なセンサチップの形でも応用されている点は注目に値する。また、NIST のホームページでは様々な成果論文がオープンソース化されている点も調査をする上では極めてありがたい。

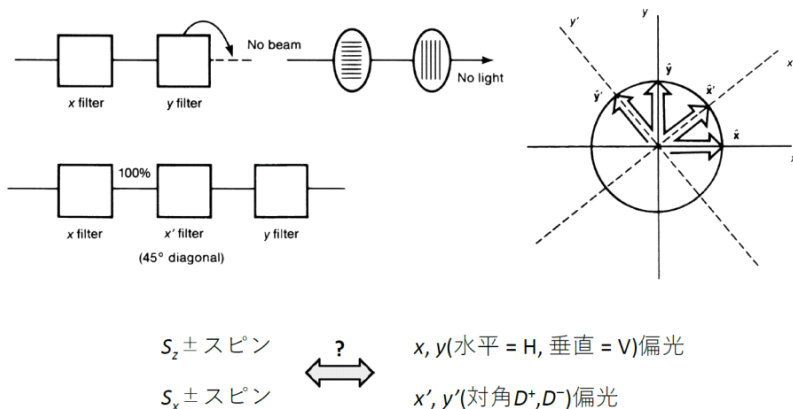
#### 4. 量子暗号通信または通信・セキュリティ

量子技術の大きな柱の一つに量子通信がある。狭義の量子通信は量子エンタングル (量子もつれ) 状態を利用する通信となる。量子エンタングル状態とは通常 2 準位が量子的に重なり合った状態のことであり、量子通信では偏光 (光の位相成分として取り扱う場合もある) の量子エンタングル状態が利用されることが多い。光子の偏光成分のエンタングル状態をイメージするための、比較的わかりやすいアナロジーとして、偏光子を組み合わせた系を通過する光子の例[94]があげられる。図 22 に偏光を用いた量子計測の概念を示す。水平(x)方向と垂直(y)方向の偏光フィルタを並べて配置すると透過する光子は無くなる (図 22 左上図)。しかし、その間に 45 度方向の偏光フィルタを挿入すると x フィルタを透過した光は約半分の確率で透過する (図 22 左下図)。最初の入力光が水平偏光成分を持つ 1 光子であった場合を想定すると、最初の偏光板通過後から 45 度偏光板を通過する直前までの状態は、軸を 45 度回転させた系での $\pm 45^\circ$ 成分が合成された、2 準位の量子エンタングル状態とみれば良いのであろう。私の理解が正しければ、最後の偏光板を通過する瞬間にその状態が計測され、同時に量子エンタングル状態が破られ、ある場合には透過し、ある場合には透過しないという状態が発生する。

現在、我が国で量子エンタングル状態を直接的に使用する量子暗号通信等は研究段階にあり、実用化に向けた研究開発が進められているのは、上記偏光特性と光子計測とを組み合わせた暗号鍵配送方式や、量子雑音に信

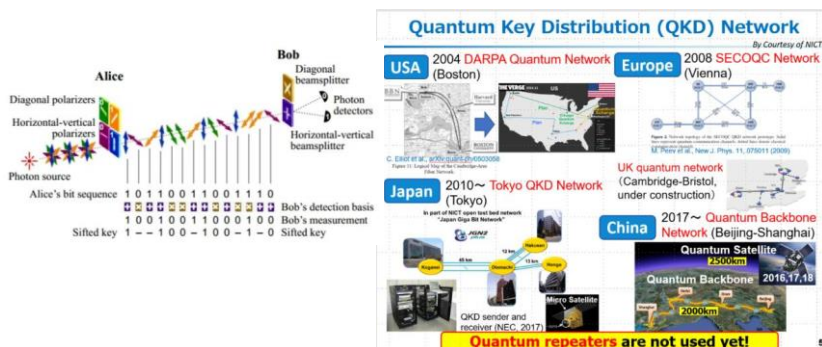
号を埋め込む形態のストリーム暗号などである。以下、暗号鍵配送方式、ストリーム暗号、量子テレポーテーションの順にそれらを解説する。

図 22. 偏光を用いた量子計測の概念 [94]



前述した現象を応用して、さらに偏光板の軸方向が水平・垂直か、45 度回転させたものかという情報と組み合わせた暗号鍵配送方式のうち、離散量 QKD<sup>11</sup>の一つである BB84 とよばれる方式[95,96]が、現在世界中で実用化に向けて研究開発されている[44,97] (図 23)。

図 23. (a).BB84 方式[96]と(b).QKD ネットワーク実装例[97]



第 3 者に傍受されずに適切に送受信されたか否かについては別回線を通じて相互に確認し、真に確からしい情報のみから暗号鍵作成し (鍵蒸留とよぶ)、さらに一組の暗号鍵は一度のみしか使用しない (One time pad) と

<sup>11</sup> QKD: Quantum Key Distribution (暗号鍵配送) の略語。



ということで安全性を担保するこの手法は、国内においては連続量 QKD 方式 (Continuous Valuable(CV)-QKD 方式) の研究とともに SIP の研究プログラムの中で社会実装型のインフラを整備し、医療情報やレーザー加工関連情報の秘匿通信を目的に研究されている[44] (図 9)。

量子エンタングル状態は使用しないが、量子雑音に信号を埋め込む形態のストリーム暗号である、Y-00 を研究しているグループもある。こちらは BB84 よりも技術的な実用化のハードルは低く、既存ネットワークへの適用性、親和性も高いが安全性証明に関して議論のある方式でもある [98,99]。図 24. の左図は Y-00 方式の説明図を、右図 a は信号レベルを相互に知っている送受信者(Alice、Bob)同士で観測できる信号波形を、右図 b は盗聴者(Eve)から観測した波形を示している [98,99]。

図 24. Y-00 方式の説明[98,99]

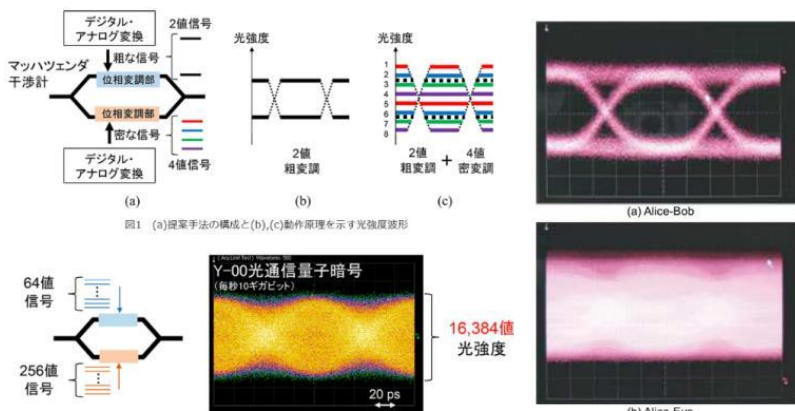
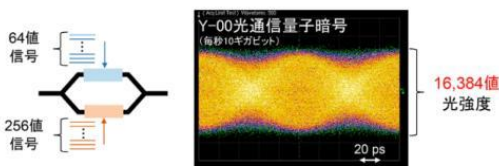


図1 (a)伝送手法の構成と(b),(c)動作原理を示す光強度波形



安全性証明という観点では BB84 方式でも無線で衛星-地上間の無線光方式を実現させる場合などには、1 光子での通信のスループットが極端に下がる可能性があり、現実的なスループットを保つために光子数を増やす等の方策をとる場合、受光側の装置周辺に傍受者が入れないような方策を講じる必要性がでてくるなど、理想形からのずれが生じうる。そのため、実際のシステムを構築することを考える場合にはより広範囲なトレードオフを行う必要が出てくるものと考え。 (そのような観点も含めた、現実的な量子通信の社会実装化に関して NICT の佐々木博士が IQST で講演を行った。)

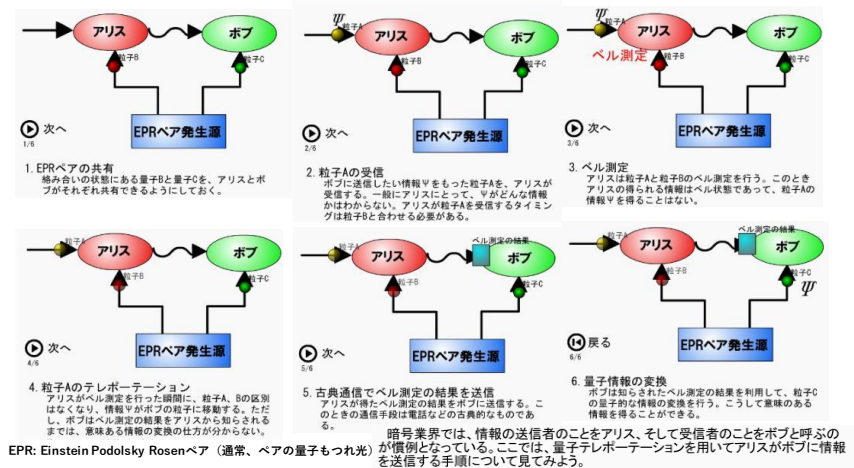
量子エンタングル状態を直接的に使用する量子通信には、量子テレポーテーションを用いた 2 点間の量子暗号通信や、それに量子リピータを加え

て複数個所をつなぐ究極の量子インターネットまでが含まれるが、現在我が国では小坂横浜国立大学教授等が研究を進めているものの、その種の方法については大規模な研究計画が無い状況にある[97]。

一方、EU では Quantum Manifesto の中にも「量子インターネット」が 2035 年までの目標として明確に記され、Delft 工科大等のオランダのグループにおいて研究が進捗中である[24,97]。

図 25 の例のように、量子エンタングル状態を直接的に使用する、量子テレポーテーションを用いた量子暗号通信の流れがインターネット等でも説明されている[100]。量子エンタングルペアを生成し、2 点に送った際に、一方でベル測定(2Qubit のエンタングル状態に対応する 4 状態のうちの特定の 1 状態であることを計測する場合に、これをベル測定と呼ぶ。)により送信したい情報と相互作用させる。これにより他方のエンタングル状態の量子の情報と、最初のベル測定の結果とを利用してこちら側の情報も算出することが可能となる。そして、これらは一連の量子的情報交換であることから完全な秘匿性通信となる。基本的にこの手法は 2 点間での量子テレポーテーションを用いた量子通信であるが、量子リピーター (2 ビットの誤り率が秘めて低い量子ゲートデバイス等) が実現すれば、2 点間にとどまらずに量子インターネットにまで拡張性が高まる。

図 25. 量子テレポーテーションを用いた量子通信の流れ [100]



基礎研究に対する強みを維持しながら、実用化という視点も、より強く持った研究開発投資を行うという方針は日本らしいアプローチであると感

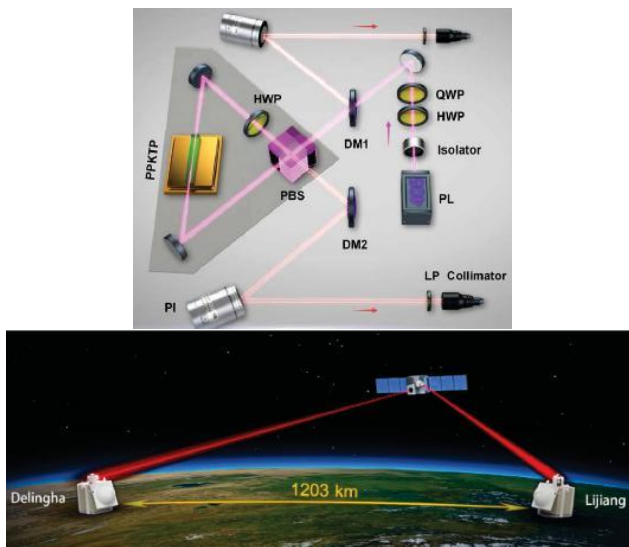
じる。一方で、唯一、欧州の計画等と比較して不足していると感じるのは、量子リピータ等を中心とした将来の量子インターネットにつながる、量子もつれ状態を利用した量子暗号通信の研究への投資である。量子リピータの研究は直ちに着手するべき重要要素技術であるという個人的感想は、第 II 章、第 3 節、第 iv 項「日本」でも述べたとおりである。

我が国として最も重要であると思われることは、技術の進展に応じて、既存の通信ネットワークを適切に拡張していく方策を考える事である。情報の通信容量を秘匿区分や保存期間分類毎にトラフィック分析し、それぞれに対してどのような通信系を対応させていくのかを考える必要がある。保存期間毎の分析が必要な場合は、保存期間の長い秘匿性情報については量子技術の進展により既存の暗号が解読される時代が訪れた段階で、それまでの間に何らかの形で収集保存されていた場合に情報が解読されるリスクを生むからである。さらにこのような分析に際しては、5G、6G 等の民間の情報インフラの進化を予測、把握しつつ、拡大する情報トラフィックに対応でき、かつアーキテクチャのカスタマイズ化に対応できる能力の構築が重要と考える。我が国の研究職技官は、このような知識と能力が必要な時代にいることを認識し、知恵を持った **Honest Broker** としてユーザーと技術の間に立ち、効率的に研究開発に臨んでいく必要があると考える。

本節の最後に、中国が衛星を使用して量子通信を成功させたという報道が世界中を駆け回った[101]ことを踏まえ、それについて解説する。ニュースの発端は、2017 年の **Science** 誌への衛星を用いて 1,200km 離れた地点間で量子エンタングル現象を観測した結果の発表[102]である (図 26)。これは、衛星上で非線形結晶を用いて波長約 405nm の 1 光子を約 810nm の、偏光が量子エンタングル状態となった 2 光子対に変換し、この量子エンタングル状態の光子対を 1,200km はなれた青海省と雲南省にそれぞれ送信し、超電導単一光子検出器で受光して、それらの相関を確認するという、量子テレポーテーションの実環境下での実証実験である。レーザー送信角度精度を 10 マイクロラジアン以下にして、原子時計を用いて時刻同期をとり、2 光子のペアを識別できる状態に保ちながら平均約 1.1Hz の頻度で SNR 約 8:1 の条件で量子エンタングル光を 1,059 秒にわたって観測することに成功したというものである[102、32 のパネルディスカッションの中でも、この件について若干議論されている]。

量子エンタングル光から得られる Qubit の情報を第三者が受信すると光子対の両方の状態が変化することから、正規の受信者以外とは情報を共有できない仕組みとなる。この方式が将来の安全な暗号鍵配信を実現する

図 26. 中国の衛星量子通信実験 [101,102]

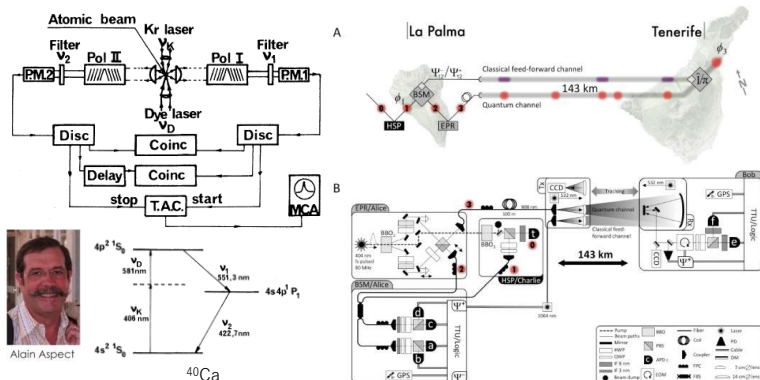


キーテクノロジーとされていることはこれまでの記述のとおりである。このような研究自体が直ちに脅威となるわけではなく、このような研究を継続することで蓄積される真に役立つ多くの知見が最も脅威となるという全米アカデミーズのコロキウムで示された見解[32]に同感である。

この実証実験自体は、A. Aspect 氏をはじめとする多くの研究者が 1980 年代から行ってきた EPR (Einstein-Podolski-Rosen) パラドックスで「量子論の波動関数による実在の記述は完全でない」という形で問題提起された量子物理の完全性に対する疑義[103]を、ベルの不等式を利用して実験的に解消させた一連の研究[104,105]と基本的に全く変わらない。ベルの不等式とはブリタニカ国際大百科事典によるところでは、「離れている複数の粒子の性質は個別に決定できる (局所実在性が成り立つ) と仮定すると成立するが、量子力学の量子エンタングルメント (量子もつれ) と呼ばれる性質が正しいとすれば成立しない」不等式である。今回のケースでは 1 カ所で発生した光子対の偏光状態が離れた場所でも量子エンタングル状態で存在しているか否かということを検証する形で利用されている。(純粋な数学論から導出された当初のベルの不等式から、現在では 2Qubit の量子エンタングル状態の存在を表現する CHSH(John Clauser, Michael Home, Abner Shimony, and R.A. Holt)-Bell 不等式が多く使用されている。) 図 27 左は Aspect による最初の論文で 6.5m 離れた 2 点間で長時間かけて光子の相関

を計測し、ベルの不等式が破られている（量子エンタングル状態が離れた 2 点間においても成立しうる）ことを実証した実験である。図 27 右は、その後の量子エンタングル光子対の発生技術や検知技術等の向上により、量子エンタングル状態をより遠距離間で観測できるようになった後の、カナリヤ諸島での 143km の実験例[106]を示す。ただし、この時には量子もつれ光発生地点にもう一方の受信者がいる状態での実験であった。

図 27. 量子テレポーテーション実証実験例[104,106]



ちなみに、A. Aspect 氏が博士論文の構想を J Bell 博士に相談に行き、著名な研究に着手したいきさつや、実験技術の進歩していった様子なども含めて記載しているレビューペーパー[105]は読み物としても面白く、また、Couessea の提供している A. Aspect 氏による”Quantum Optics –Single Photons”, “Quantum Optics –Two Photons”という講義コース[107]では、2017 年時点での量子光学を中心とした（量子コンピュータ等も含む）一連の技術に関する考えをご自身から聞くことができる。（まだ 20Qubit 程度までしか量子コンピュータデバイスができていなかった 2017 年当時の Aspect 教授による講義[107]では、量子コンピュータの実用化はまだまだ先であるかのようなトーンで説明されていたが、約 3 年経過した今現在は、どのように述べているのか興味深いところである。）

また、中国のグループが、BB84 等の通信方式から量子通信までを総合的にとらえて研究を進めていることは、中国の投稿した関連分野での解説論文を見るとよくわかる[108]。これらの論文からは、世界の研究動向をしつかりと抑えつつ、独自の研究を総合的かつ段階的に進めている感じが感じられる。最近の量子ドットを用いた量子コンピュータの研究なども将来の量子通信の量子リピータとしての 2Qubit 動作を念頭に研究をしている

ように見受けられた[109]。ただし、中国の資料をそのままのみにしてよいのか疑問を感じるころは依然としてある。例えば、同論文が発表された **National Science Review** という中国の論文雑誌(おそらくオンライン・ジャーナル)のタイトルページにある雑誌紹介によると **Impact Factor** は 13.222 だが、クラリベイト・アナリティクス社の公表する対象雑誌には含まれておらず独自算出値のようである。国際的に認知された情報と中国独自の判断に基づく情報とは、切り分けて理解する必要がありそうである。

## 5. 量子デバイス・センサまたは計量センサ

量子力学の進展とともに、量子エンタングル状態を利用することで従来では考えられなかった感度や精度の計測を実現できることが明らかになり、注目されている。あわせて、量子コンピュータの実験的研究を中心とした量子技術の研究が進むにつれて、多くの計測技術が成熟化している。ここでは、これらを「量子エンタングル状態(N00N State)を応用した計測技術」と「量子技術の研究を通じて発展してきた高感度計測技術」とに分けて順に解説する。

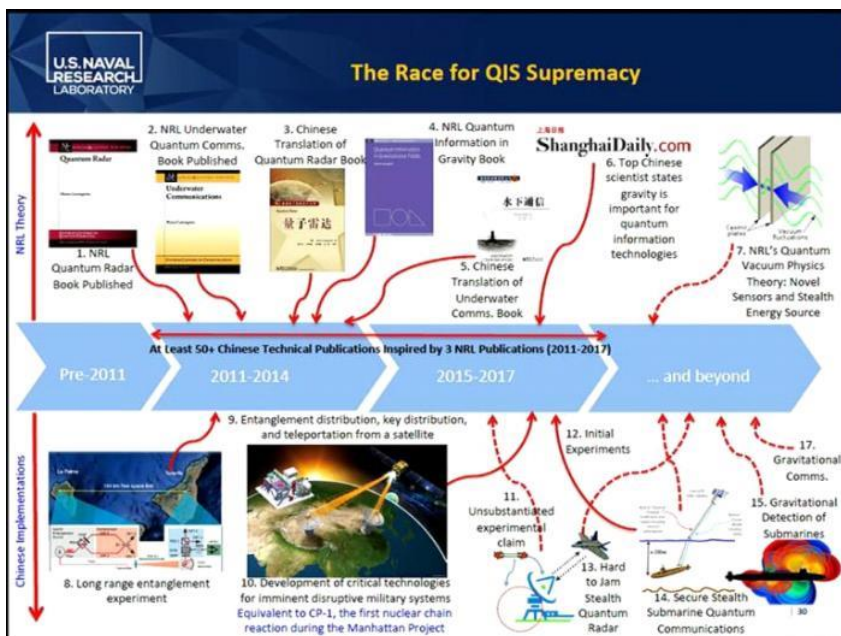
### i. 量子エンタングル状態(量子もつれ状態、N00N State 等)を応用した高感度計測技術

量子エンタングル状態を利用したセンシングの有用性を N00N State という表現で最初に示したのは全米アカデミーズのコロキウム[32]でも講演した Dowling 教授である[110]。これは、多体量子エンタングル状態  $|\Psi_{N00N}\rangle$  の光子を干渉させた際にその位相情報の測定誤差が通常の量子限界を超えたハイゼンベルグ限界にまで達するという理論である。(コロキウムでは、もともとは数字のゼロを使った N00N State と書いていたが、いつの間にかアルファベットの N00N State に代わっていたエピソードも披露した。)

同じコロキウム[32]で講演した Gilbert 博士は、結像光学系の空間分解能改善へのこの原理の応用として、波長を開口径で割った値でおおよそ表現される古典的レイリー限界に相当する回折限界が、量子限界では光子数  $N$  の  $\cdot 1/2$  乗に、ハイゼンベルグ限界にまで至ると  $N^{-1}$  まで改善されると説明した。同時に、顕微鏡画像の SN 比改善にこの技術を応用した例として竹内京都大学教授らのグループの成果を紹介した[111] (竹内教授は ISQT でも講演している)。

また、同じコロキウム[32]で講演した NRL の Lanzagorta 博士は、従来 SN 比 10dB 前後以上の領域でしか利用できなかったレーダーにこの技術を応用すると、-5~10dB 程度の感度領域でも利用可能となり、ステルス機等の探知に有益であるのみでなく、レーザーレーダーを高感度な潜水艦のナビゲーションシステムや通信システムに利用する構想や、重力場検知を利用したジャイロセンサに応用する構想などを紹介した。さらに、この講演では、Lanzagorta 博士の著作「Quantum Radar」、「Underwater Quantum Comms.」、「Quantum Information in Gravity」等が出版後比較的早い時期に中国語に翻訳され、多くの中国人技術者たちに読まれているということも紹介した（図 28）。

図 28. Lanzagorta 氏著作の中国語版が活用されている例[32]



我が国の Q-LEAP【基礎基盤研究】「量子計測・センシング」の採択課題の中には、竹内京大教授のグループによる「量子エンタングル光子対を利用した量子計測デバイスの研究」が含まれる[41]。その中で、1光子を2波長の量子エンタングル光子対に変換し、従来高感度な検知器が無い赤外波長領域での吸収分光計測結果を、高感度センサのある可視領域側のエンタングル光子対の計測を用いて高感度検知しようとしている。

## ii. 量子技術の研究を通じて発展してきた高感度計測技術

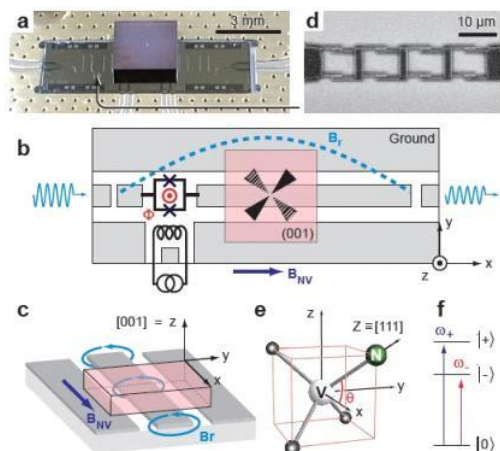
第 III 章第 2 節「量子コンピュータ」の冒頭でふれた NMR 型量子コンピュータの読み取り技術の研究を通じて確立されつつある、医療用 MRI 計測での高感度なトレーサーとしての応用などはこの典型である。同様に注目されているのはダイヤモンド中の格子欠陥センサの応用である。今回の Q-LEAP【基礎基盤研究】「量子計測・センシング」の採択課題の中では Flagship プロジェクトとして東工大波多野教授のグループが脳磁計測や電池等の電流・温度計測用センサへの応用を目標とした研究に着手する[41]。また、物質材料研究機構の寺地主席研究員のグループによる磁気センサ等への応用に向けた基礎研究なども採択されている[41]。

ダイヤモンド欠陥の特徴はダイヤモンドの完全性の高い結晶構造の中に一部に意図的に欠陥構造を作ること、その部分のみが適度に外界から遮断された安定状態となる点と、細胞の中まで入り込める微粒子状態にもできる点などがあげられる。高感度なセンシングに利用した場合に雑音の影響を受けにくく、外乱の影響を受けるまでの時間が比較的長く保てるという点が特徴となり、量子コンピュータの読み取り機構やメモリとしての応用を想定した研究等が広く知られている。図 29 に量子コンピュータの読み取り機構やメモリとしての応用にダイヤモンド NV センタが利用された例[112]を示す。現在では量子通信用の量子リピータ[97]としての応用や光量子コンピュータのキーデバイスとして NV センター、SiV センター、SnV センターダイヤモンドや、半導体プロセスの実現性が容易な SiC 系での格子欠陥を利用したデバイス等が有望視されている[113,114]。

NV センターダイヤモンドでは、従来発振の困難であったマイクロ波領域のレーザー発振等も[115]注目されている。

また、この分野の研究での我が国の強みはイオンビームを用いた高度なダイヤモンド欠陥生成技術を

図 29. NV センターダイヤモンドの量子メモリ応用 [112]

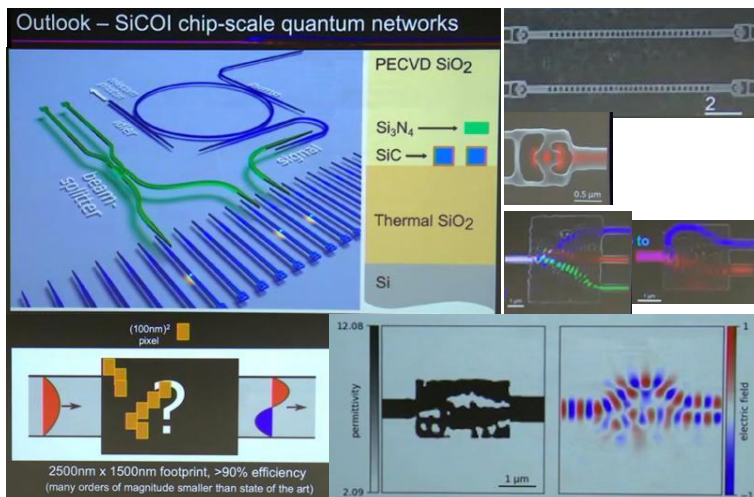




有する国立研究機関である QST<sup>12</sup>を有する点にもあることを付け加える。

光を活用する種類の量子技術との関連性において記載したい点は、ISQT の招待講演で来日したスタンフォード大の J. Vuckovic 教授の研究成果に関してである。同教授のグループは光型量子コンピュータの研究とともに、**nano-optics** の分野でも革新的な光学素子開発を行っており、量子コンピュータ技術の発展にも重要な役割を果たす可能性があるという点である。図 30 は、Vuckovic 教授による、光量子コンピューティングに関する要素技術の研究や、機械学習を活用してデジタルに材料を配置していき所望の光学特性を得る、斬新な **nano-optics** 技術に関する発表資料からの抜粋である [113,114]。光学特性の異なる材質を光学波長の 1/10 以下のサイズで分割し、その組成分布を機械学習等の手法を活用して穴のあいた小さなチェダーチーズのような複雑な構造物として製作し、光学的には極めて単純かつ高性能な素子に仕上げる技術である。例えば、光ファイバーを伝搬する 2 波長や 3 波長のレーザー光を 2 本や 3 本の異なるファイバーに分割したり、レーザー光の横モードを変換したり、リング型共振器と位相結合させる小型素子を作成するなど、従来のようなレンズや鏡や回折格子等の光学系を組み合わせた光学系よりも小型で高性能な光学素子を数多く作り出しており、その応用ソフトウェアを GitHub(冒頭でふれたソフトウェア開発者向けのインターネット上のオープンソース・サイト)でも公開している。

図 30. Vuckovic 教授による発表資料からの抜粋 [113,114]



<sup>12</sup> QST: National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology(国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構)

#### IV. まとめ

量子技術 (量子コンピュータ・量子シミュレータ・量子デバイス・センサまたは計量センサ・量子暗号通信または通信・セキュリティ) 全般の解説と、それぞれの関連性について、極力平易な表現で、インターネット情報から参考文献を引用してアクセス可能な情報を元にまとめた。幅広い量子技術がどのような関係性をもって発展しているのかということや、安全保障上の観点からの重要性なども併せて解説した。

NISQ コンピュータやイジングマシンが、どこまで実用的なものとなるのかを見極めること、異なる段階にある幾つかの量子通信技術の活用方法を Dual Use 技術としてアーキテクチャのカスタマイズ化と段階的な拡張を念頭に分析すること、量子レーダー等の量子センサ技術を Dual Use な高感度センサ技術として注視すること等が、今後極めて重要になると考える。

本原稿の校正の段階で Honeywell 社が Quantum CCD 型で誤り耐性の高い 64Qubit 級のイオン・トラップ型量子コンピュータを実現させたとの報道があったことを見ても、この分野の進展の急速さがわかる [116~118]。あわせて、Moonshot 国際シンポジウム分科会の中で日本を代表する中村教授、藤井教授、小坂教授という 3 名の研究者が量子技術全般の最新動向を見事に解説されている発表動画と発表資料が最近公開されたことも、ここに追記させていただく [119]。

この分野の専門家ではない著者が約 2 か月の調査期間で、ある程度全体像を理解できた理由の一つには、聴講した国際会議の特別講演が日米欧の第一線級の研究者による、それぞれの専門分野のレビュートークであったため、最新の技術動向が平易な形で説明されたことによる。そして、この分野での情報のオープンソース化が極めて進んでいることから、インターネット回線さえあれば、最新の情報にアクセスできる環境が存在することも要因となった。

本報告を読まれた方々が、それぞれの興味に応じて独自に、参考文献等を手始めに調査をされ、実用化に向けて進みつつある量子技術についての理解を深める際の一助としていただければ幸いである。

最後に、『海幹校戦略研究』への執筆の機会を頂いた海上自衛隊幹部学校長、そして副校長に心より御礼を申し上げ、本調査報告のまとめとさせていただきます。

## 参考文献

1. EU-USA-JAPAN International Symposium on Quantum Technology:  
<https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/isqt2019/index.html>
2. Topical Conference on Quantum Computing 2019:  
[https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/joho/pdf/flyer\\_tcqc2019.pdf](https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/joho/pdf/flyer_tcqc2019.pdf)
3. The 2nd International Forum on Quantum Metrology and Sensing:  
[http://dia.pe.titech.ac.jp/IFQMS\\_Flyer\\_191217-8.pdf](http://dia.pe.titech.ac.jp/IFQMS_Flyer_191217-8.pdf)
4. Topical Conference on Quantum Communication and Security 2019:  
<http://www.uqcc.org/tcqs2019/>
5. Moonshot 分科会 6 : <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/mspaper8.pdf>、  
<https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/sympo2019/wg6.html>
6. Q-LEAP 第 2 回シンポジウム :  
<https://www.jst.go.jp/stpp/sympo/2019/pdf/leaflet.pdf>
7. Missile Defense 2020, Center for Strategic and International Studies:  
CSIS、<https://www.csis.org/analysis/missile-defense-2020>
8. Missile Defense Advocacy Alliance: MDAA, Congressional Roundtable  
Discussion Series/  
<https://missiledefenseadvocacy.org/advocacy/events/congressional-roundtable-events/> (MDA 長官や DoD Under Secretary for Research and Engineering 等の出演しているものが良い)
9. Final Report on Organizational and Management Structure for the  
National Security Space Components of Department of Defense Aug. 9,  
2018、<https://media.defense.gov/2018/Aug/09/2001952764/-1/-1/1/ORGANIZATIONAL-MANAGEMENT-STRUCTURE-DOD-NATIONAL-SECURITY-SPACE-COMPONENTS.PDF>
10. Space Development Agency Next-Generation Space Architecture RFI  
(SDA-SN-19-0001)、  
[https://www.airforcemag.com/PDF/DocumentFile/Documents/2019/SDA\\_Next\\_Generation\\_Space\\_Architecture\\_RFI%20\(1\).pdf](https://www.airforcemag.com/PDF/DocumentFile/Documents/2019/SDA_Next_Generation_Space_Architecture_RFI%20(1).pdf)
11. 田中上席特別研究官、「AI:最近の潮流」、先進技術推進センター第 2 回 AI セミナー、令和元年 10 月 21 日
12. “TOOLS FOR THE MOSAIC”, STO Systems Office Panel: Part 1 & Part 2/  
<https://www.youtube.com/watch?v=2qXOxfDWMdo>,  
<https://www.youtube.com/watch?v=46xFYcSsHdU>
13. T. P. Grayson, “Mosaic Warfare”, Defense + Commercial Sensing 2019, 23  
Apr 2019/ <https://spie.org/news/dcs-plenary---mosaic-warfare?SSO=1>
14. 「Society 5.0 とは」 : [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/society5\\_0.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/society5_0.pdf)
15. F. Arute, Nature 574, 505 (2019)(Open)
16. “INTERNATIONAL ROADMAP FOR DEVICES AND SYSTEMS (IRDS) 2018 EDITION, EXECUTIVE SUMMARY, [https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2018/2018IRDS\\_ES.pdf](https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2018/2018IRDS_ES.pdf)(登録後、無料がダウンロード可能)
17. デジタルアニーラご紹介資料 : <https://www.fujitsu.com/jp/documents/digitalannealer/services/da-shoukai.pdf>
18. [https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019060507/Documents/Hao\\_Qin\\_Presentation.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/2019060507/Documents/Hao_Qin_Presentation.pdf)

19. 日本経済新聞「中国共産党、ネット政策の司令組織を設立 (2014/2/27)」、[https://www.nikkei.com/article/DGXNASGM2703U\\_X20C14A2FF1000/](https://www.nikkei.com/article/DGXNASGM2703U_X20C14A2FF1000/)
20. J-G Ren., Nature volume 549, pages70–73(2017)/ arXiv:1707.00934v1
21. S-K Liao, Phys. Rev. Lett. 120, 030501 (2018)/ arXiv:1801.04418v1
22. 曾根純一、「量子技術分野の研究動向について」量子イノベーション戦略第 1 回有識者会議資料 3、[https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu\\_innovation/day1/siryou3.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/day1/siryou3.pdf)
23. <http://www.quantum-info.com/English/News/2017/2017/1007/389.html>
24. Quantum Manifesto:[https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056\\_Quantum-Manifesto\\_WEB.pdf](https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf)
25. THE IMPACT OF QUANTUM TECHNOLOGIES ON EU'S FUTURE POLICIES PART 2 Quantum Communications: from science to policies, [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107386/jrc\\_report\\_quantumcommunications.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107386/jrc_report_quantumcommunications.pdf)
26. Quantum Technologies Roadmap: <https://qt.eu/app/uploads/2018/04/QT-Roadmap-2016.pdf>
27. A. Acín, New Journal of Physics, Volume20, August2018, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/aad1ea/pdf>
28. D. P. DiVincenzo, Wiley Online Library, Progress in Physics 25 October 2000/ arXiv:quantum-ph/0002077v3
29. L. M. K. Vandersypen, Nature 414, 883-887 (20/27 Dec 2001)/ arXiv:quant-ph/0112176v1
30. L. M.K. Vandersypen, PhD Thesis, Stanford University, July 2001, 238 pages/ arXiv:quant-ph/0205193v1
31. “NATIONAL STRATEGIC OVERVIEW FOR QUANTUM INFORMATION SCIENCE”, <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/09/National-Strategic-Overview-for-Quantum-Information-Science.pdf>
32. National Academies, “Quantum Sensing and Communications”, Aug 23, 2018: [https://sites.nationalacademies.org/DEPS/icsb/DEPS\\_187931](https://sites.nationalacademies.org/DEPS/icsb/DEPS_187931)
33. M. Giles:「量子インターネットとは何か? 中国が牽引する新技術の基礎知識」MIT Technology Review 2019.2.26、<https://www.technologyreview.jp/s/126806/explainer-what-is-quantum-communication/>
34. Quantum Xchange 社ホームページ: <https://quantumxc.com>
35. 第 5 期科学技術基本計画: <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>
36. 量子技術イノベーション戦略 (最終報告案): [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu\\_innovation/dai6/siryou1-1.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dai6/siryou1-1.pdf)
37. 統合イノベーション戦略 2019: [https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2019_honbun.pdf)
38. ムーンショット型研究開発制度の創設: <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/gaiyo.pdf>
39. 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) について、平成 30 年 1 月文部科学省科学技術・学術政策局: [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/025/gijiroku/\\_icsFiles/afiedfile/2018/02/28/1401097](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/025/gijiroku/_icsFiles/afiedfile/2018/02/28/1401097)

- \_13.pdf/令和 2 年度概算要求補足資料 : [https://www.mext.go.jp/content/20200114-mxt\\_kouhou1-000004025\\_10-2.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20200114-mxt_kouhou1-000004025_10-2.pdf)
40. Q-LEAP 量子情報処理概要説明資料: <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/joho/pdf/information.pdf>
  41. Q-LEAP 量子計測・センシング概要説明資料: <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/sensing/pdf/measurement.pdf>
  42. Q-LEAP 次世代レーザー量子情報処理概要説明資料: <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/laser/pdf/zisedailaser.pdf>
  43. 「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016~2020 年度 5 年間) プロジェクトの概要 (公開)、2018 年 6 月 8 日中間評価分科会 : <https://www.nedo.go.jp/content/100880237.pdf>
  44. 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)、光・量子を活用した Society5.0 実現化技術、研究開発計画、令和元年 8 月 8 日 : [https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/6\\_hikari.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku2/6_hikari.pdf)
  45. TACMI CONSORTIUM: <http://www.utripl.u-tokyo.ac.jp/tacmi/>
  46. 例えば IT ソリューション塾【図解】コレ 1 枚でわかる量子コンピュータ : [https://blogs.itmedia.co.jp/itsolutionjuku/2017/12/1\\_15.html](https://blogs.itmedia.co.jp/itsolutionjuku/2017/12/1_15.html)
  47. 驚見拓哉他「米国における量子コンピュータの現状」JETRO ニューヨークだより 2019 年 3 月、[https://www.jetro.go.jp/ext\\_images/\\_Reports/02/2019/d6b7b154bf6af3b9/201903rpn.pdf](https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/02/2019/d6b7b154bf6af3b9/201903rpn.pdf)
  48. M. F. Crommie, *Science* 262, 218(1993)
  49. U. L. Anderse, *Nature Physics* 11, 713-719 (2015)/ [arXiv:1409.3719v1](https://arxiv.org/abs/1409.3719v1)
  50. P. W. Shor, *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 20-22 Nov. 1994., 今井浩「量子アルゴリズム Shor の素因数分解アルゴリズム計算アルゴリズム論」東京大学講義資料(<http://www-imai.is.s.u-tokyo.ac.jp/~imai/lecture/Shor.pdf>)、高橋康博「Shor のアルゴリズムのための効率的な量子回路」*IPSJ Magazine* 47,1323(2006),<http://www.kecl.ntt.co.jp/openhouse/2008/quantum/doc/shor.pdf>
  51. L. K. Grover, *Proc. Annual Symposium on the Theory of Computing (STOC)*, May 1996, pp.212-219/ [arXiv:quant-ph/9605043v3](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9605043v3)
  52. H. Mabuchi, *Opt. Lett.*, 21, 1393-1395, 1996./<https://core.ac.uk/download/pdf/4871509.pdf>
  53. E. Knill, [arXiv:quant-ph/0006088v1](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0006088v1), Tue, 20 Jun 2000 20:40:25 UTC(理論的プロポーザル)
  54. S. Tarucha, *Phys. Rev. Lett.* 77, 3613 -Published 21 October 1996/ (ただし、複数個の量子ドットの制御まで)
  55. J. I. Cirac, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 4091, 1995/ [arXiv. quant-ph/9702053](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9702053)
  56. D. Kielpinski, *NATURE | VOL 417 | 13 JUNE 2002*
  57. C. Monroe, *Phys. Rev. Lett.*, 75, 4714, 1995.
  58. Y. Nakamura, *Nature*, 398, 786-788, 1999./ [arXiv:cond-mat/9904003](https://arxiv.org/abs/cond-mat/9904003)
  59. Quantum Transport, Lecture 1-21: (Instructor: Sergey Frolov, University of Pittsburgh, Spring 2013), [https://www.youtube.com/watch?v=ATpC2Plbi8g&list=PLtTPtV8SRcxjdfIXwNPSL\\_fxvxwUCjzd](https://www.youtube.com/watch?v=ATpC2Plbi8g&list=PLtTPtV8SRcxjdfIXwNPSL_fxvxwUCjzd)
  60. 大阪大学最新研究成果リリース「極低温を用いずに NMR 信号強度を飛躍的に増大させる手法開発」<http://www.osaka-u.ac.jp/ja/news/>

- ResearchRelease/ 2013/11/20131120\_1、Kenichiro Tateish, Proc Natl Acad Sci U S A. 2014 May 27; 111(21): 7527–7530. :  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4040576/>
61. K. Fujii: [https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/sympo2019/material/day2\\_wg6\\_fujii\\_20191218.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/sympo2019/material/day2_wg6_fujii_20191218.pdf),  
<https://www.youtube.com/watch?v=hxym0wh4vJU&list=PLPMYruqT8NVPPgvqxKSQ2Osy8m5dSUT7&index=3&t=0s>
  62. K. Fujii: Threshold theorem for quantum supremacy, 2017.1 QIP2017 Seattle, USA/ <https://www.youtube.com/watch?v=wBa0wdtkSZk>,  
「量子コンピュータ概論」藤井啓祐, <http://quantphys.org/keisukefujii/lecture.html>, <http://quantphys.org/keisukefujii/tokyotopological.pdf>
  63. A. G. Fowler, Phys. Rev. A 86, 032324 (2012)/ arXiv:1208.0928v2
  64. R. Barends, Nature 508, 500-503 (2014)/ arXiv:1402.4848v1
  65. J. Kelly, Nature 519, 6 (2015)/ arXiv:1411.7403v1
  66. J. Preskill, Quantum 2, 79 (2018)/ arXiv:1801.00862v3
  67. J. Preskill, CALT 68-2867/ arXiv:1203.5813v3
  68. Y. Nakamura, Applied Superconductivity Conference 2018/  
<http://ieeetv.ieee.org/conference-highlights/superconducting-quantum-computing-research-japan?>
  69. 伊藤公平「量子コンピュータの動向」文部科学省 HPCI 計画推進委員会発表資料、資料 2-1, 2019 年 9 月 11 日/[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/shinkou/020/shiryo/\\_icsFiles/afieldfile/2019/09/24/1421321s21.pdf](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/020/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2019/09/24/1421321s21.pdf)
  70. T. Kadowaki, Phys. Rev. E 58, 5355–5363 (1998)/  
arXiv:cond-mat/9804280v1
  71. M. W. Johnson, Nature Vol473, 194(2011)
  72. James King, arXiv:1508.05087
  73. D-Wave 社ホームページ: Announcing the D-Wave 2X Quantum Computer, AUG 20, 2015, <HTTPS://WWW.DWAVESYS.COM/BLOG/2015/08/ANNOUNCING-D-WAVE-2X-QUANTUM-COMPUTER>
  74. Y. Haribara, arXiv:1501.07030v5
  75. S. Utsunomiya, Optics Express, Vol. 23, pp. 6029-6040 (2015)
  76. K. Takata, Phys. Rev. A 92, 043821, 2015/ arXiv:1506.00135v3
  77. <https://qistokyo.wordpress.com/research/coherent-ising-machine/>
  78. K. Bertels, arXiv:1903.09575v3
  79. P. Krantz, arXiv:1904.06560v3
  80. M. Kjaergaard, arXiv:1905.13641v2
  81. C. Song, arXiv:1905.00320v1
  82. S. Slussarenko, arXiv:1907.06331v2
  83. 永長直人「量子シミュレーター」(ImPACT), [https://www.jst.go.jp/impact/hp\\_yamamoto/symposium/pdf/project2\\_material\\_4.pdf](https://www.jst.go.jp/impact/hp_yamamoto/symposium/pdf/project2_material_4.pdf)
  84. 大森賢治「量子シミュレーターの概念と研究動向」科学技術・学術審議会先端研究基盤部会量子科学技術委員会(第4回)平成28年6月20日/  
[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/010/shiryo/\\_icsFiles/afieldfile/2016/08/19/1375692\\_1\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/010/shiryo/_icsFiles/afieldfile/2016/08/19/1375692_1_1.pdf)
  85. I. Bloch -Probing and controlling quantum matter with ultracold atoms/  
<https://www.youtube.com/watch?v=jPRxLrDHxog>

86. I. Bloch: Realizing Feynman's Dream of a Quantum Simulator, <https://www.youtube.com/watch?v=31krEOT6hBE>
87. I. Bloch, <https://www.youtube.com/watch?v=VK4ukRHQs3Y>
88. I. Bloch -Lecture I, March 11, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=T5s36WEPFWs>
89. M. Endres, Nature 487, 454 (2012) / arXiv:1204.5183v
90. ERATO 香取創造時空間プロジェクト  
<https://www.jst.go.jp/erato/katori/feature/>
91. 長高精度の「光格子時計」で標高差の測定に成功: <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20160816/index.html>
92. NIST の CSAC に関する説明資料、<https://www.nist.gov/system/files/documents/2017/05/09/VCAT-NIST-CSADemo.pdf>、NIST-on-a-Chip に関する説明資料、<https://www.nist.gov/programs-projects/nist-chip-adi>
93. Z. L. Newman, Optica 6, 680(2019) / arXiv 1811.00616
94. 阿部英介「量子情報基礎」、[https://www.appi.keio.ac.jp/Itoh\\_group/abe/pdf/ap2016\\_4.pdf](https://www.appi.keio.ac.jp/Itoh_group/abe/pdf/ap2016_4.pdf)
95. C. H. Bennett, Theoretical Computer Science 560(2014)7-11 (Original: Proceedings of IEEE International Conference on Computers Systems and Signal Processing, Bangalore India, pp.175-179, December 1984)
96. S. B. Sadkhan Al Maliky, "Multidisciplinary Perspectives in Cryptology and Information Security" AISPE Book Series," CH.7 "Information Security-Based Nano-and Bio-Cryptography(W.K.Hamoudi and N.M.G.Al-Saidi)/(ResearchGate (要登録) 経由で入手可能)
97. H. Kosaka, "Research Trend in Quantum Network", [https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/sympo2019/material/day2\\_wg6\\_kosaka\\_20191218.pdf](https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/sympo2019/material/day2_wg6_kosaka_20191218.pdf)、電子情報通信学会 S2 群第 5 編「量子通信と量子計算」(2010 年 1 月) [http://www.ieice-hbkb.org/portal/doc\\_s2\\_05.html](http://www.ieice-hbkb.org/portal/doc_s2_05.html)
98. Y-00 光通信量子暗号の雑音による秘匿効果を高める光偏重方法を実証 /[https://www.tamagawa.jp/research/quantum/news/detail\\_14386.html](https://www.tamagawa.jp/research/quantum/news/detail_14386.html)
99. O. Hirota, Proceedings of Quantum Informatics 2004(Moscow, Oct 2004) / arXiv:quantum-ph/0410006v1
100. <http://www.s-graphics.co.jp/nanoelectronics/kaitai/qteleportation/4.htm>
101. 「中国の量子通信衛星チームが米科学賞受賞」NewsWeek 日本版 2019 年 2 月 18 日 (月) 12 時 40 分、<https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2019/02/post-11710.php>
102. J. Yin, Science 356, 1140-1144 (2017) / arXiv:1707.01339v1
103. 清水明「EPR パラドックスからベルの不等式へ」東京大学大学院総合文化研究科 / [http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/lecture\\_note/kstex04\\_ohp.pdf](http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/lecture_note/kstex04_ohp.pdf)
104. A. Aspect, Phys. Rev. Lett. 47, 460 (1981)/<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.47.460>
105. A. Aspect, arXiv:quant-ph/0402001v1
106. X-S Ma, Nature 489, 269 (2012) / arXiv:1205.3909v1
107. "Quantum Optics -Single Photons", "Quantum Optics -Two Photons", <https://ja.coursera/learn/quantum-optics-single-photon> 及び <https://ja.coursera/learn/quantum-optics-two-photons>
108. Q. Zhang, Optics Express 26, 24260 (2018) / arXiv:1809.02291v1

109. X. Zhang, NATIONAL SCIENCE REVIEW,6(1),32-54 (2019)/ arXiv:1905.01592v1
110. K. Pieter, Physical Review A 65, 052104(2002)/ arXiv:quantum-ph/0111002v2
111. T. Ono, Nat. Commun. 4, 2426 (2013)/ arXiv:1401.8075v1
112. Y. Kubo, Phys. Rev. Lett. 105, 140502 (2010)/ arXiv:1006.0251v3
113. J. Vuckovic: From inverse design to implementation of practical (quantum) photonics, A plenary talk from SPIE Optics + Photonics 2019/  
[https://spie.org/news/op19\\_vuckovic\\_practical-quantum-photonics?SSO=1](https://spie.org/news/op19_vuckovic_practical-quantum-photonics?SSO=1)
114. Lecture by J. Vuckovic, Electronics Materials Symposium at Stanford Univ., May 10, 2019/<https://www.youtube.com/watch?v=rjAyRQ4mNUY>
115. R-B Liu, "A diamond age of masers", Nature 555,447(2018) (Open access)
116. J.M.Pino, arXiv:2003.01293v2(2020)
117. The Wall Street Journal March 3, 2020、<https://www.esj.com/articles/honeywell-to-roll-out-quantum-computer-11583229600>
118. engadget 日本版 (2020 年 3 月 5 日) <https://japanese.engadget.com/jp-2020-03-04-2-qv64-2020.html>
119. ムーンショット国際シンポジウム分科会 6、<https://www.jst.go.jp/moonshot/sympo/sympo2019/wg6.html>