
【特集：安全保障関連技術】

量子技術

航空研究センター運用理論研究室
防衛技官 林 紀行

はじめに

我が国における量子技術は、「第5期科学技術基本計画（平成28年1月閣議決定）」の中で、革新的な計測技術及び情報・エネルギー伝達技術として利用できる技術と位置付けられ、「光・量子技術」というカテゴリーで研究開発がなされてきた。そして、令和2年1月23日に「量子技術イノベーション戦略最終報告」¹が、内閣府の総合科学技術・イノベーション会議から発表された。

米国では、2018年に「National Strategy Overview for Quantum Information Science」²が発表され、さらに、2020年10月に発表された国家戦略「National Strategy for Critical and Emerging Technologies」³の中では、重視すべき20の重要・新興技術の一つとして、量子情報科学が含まれている。

また、英国の「UK National Quantum Technologies Programme Strategic Intent 2020」⁴などヨーロッパや中国、ロシアでも量子技術は重要な技術分野として位置づけられている。

さらに、量子技術は今後の戦闘様相を左右する技術分野としても認識されており、安全保障分野への応用についても積極的に取り組まれている。

本稿では、今後安全保障分野に大きな影響を及ぼすと考えられる、量子技術について概説する。

1 量子力学と量子技術

(1) 概要

量子⁵力学は物理学に革命を起こし、今日の科学技術に影響をもたらし続けて

いる。量子力学による技術革新は、量子の特性（例えば、重ね合わせ（Super Position）、物質波の双極性（matter-wave duality）、もつれ（Entanglement）（細部後述））を利用している。

米国や、カナダ、オーストラリア、オランダ、英国、EU、シンガポール、ロシア、中国、北朝鮮、そして日本といった国々が、量子技術の研究に多額の投資をしている。

(2) 量子力学の3つの基本概念

量子力学で最も重要な3つの基本概念は、重ね合わせ、物質波の双極性及びもつれである

ア 重ね合わせ

原子のような最小レベルの状態においては、「量子は、様々な場所に同時に存在でき、測定されるまでそれらは確率的に重ね合わせの状態にある。」という特性を有している。

そのため、例えば従来のコンピューターでは、「0」か「1」のいずれかの状態を用いて段階的に演算を行っていたものが、この量子の特性を活用した場合、「0」と「1」を同時に存在させることができるため、演算を重ね合わせて作業することができるようになり、その結果、複数の演算を同時に行うことができる。この演算の特性は、量子コンピューターに活用され、その最小単位は「量子ビット」と呼ばれる。

イ 物質波の双極性

量子は、物質（粒子）としての特性を有しているが、同時に波（波動）としての特性（例えば干渉）も有している。この波動特性により、磁界や電界などの環境の変化に非常に敏感に反応することができる。

この特性を活用した「量子慣性センサー」は、レーザーを使用したジャイロスコープを上回る精度を持っている。

ウ もつれ

1つの量子から生成された2つの量子（参考：1つの高エネルギーの量子が2つの低エネルギーの量子になったもの）はセットになっている。セットになった2つのそれぞれの量子の状態は決まっていない。一方の量子を観測して状態が決定した場合、その情報が瞬時に他方の量子に伝わり、もう片方の量子の状態が決定する。つまり、片方の量子を観測することが、もう片方の量子の状態に影響を与えることになる。

このような情報伝達の特性により、現在使用されているシステムでは不可能

な通信のセキュリティや計算が可能になる。

2 量子力学の概念を利用した各種技術

(1) 量子コンピューター

量子コンピューターとは、量子の性質を利用して計算を実施するコンピューターである。

パソコンに代表されるような、現在使われているコンピューターは、段階的に演算する計算手法のため、因数分解や組み合わせ計算のような問題の回答を得るためには、スーパーコンピューター（スパコン）であっても、非常に長い時間がかかる。それに対し量子コンピューターでは、同時に複数の値を計算することが可能であり、このような問題の回答を短時間で得られる可能性があるとして期待されている。代表的なものとしては、1994年に米国の数学者ピーター・ショア（Peter Shor）氏が明らかにした、量子の特性を利用して非常に大きな数を効率的に因数分解するアルゴリズムがある。このアルゴリズムを量子コンピューターで利用することで、通信、電子メール、銀行送金などで使用される公開鍵暗号を短時間で解読することが可能になると言われている。

量子コンピューターが現在使われているどのようなコンピューターよりも早く問題を解決する能力を「量子超越性」（Quantum Supremacy）という。この「量子超越性」の実証に関し、2019年10月、米Google社は、量子コンピューターの計算能力がスーパーコンピューターなど従来型のコンピューターを上回ることを示す「量子超越性」を実証したとの論文を、英科学誌「Nature」（電子版）で発表した⁶。この時用いられた、Google社の量子コンピューターは、最先端のスーパーコンピューターでは解くのに約1万年かかると見積もられる問題を3分20秒で解き終えたという。

また、2020年12月には、中国科学技術大学などの研究チームが、光を使った量子コンピューターを用い、計算能力が従来のスーパーコンピューターを上回ることを示す「量子超越性」を実証し、米科学誌「Science」のオンライン版で発表した。この光量子コンピューターで200秒間かかった計算は、中国のスパコン「神威・太湖之光」で行うと25億年、理化学研究所の「富岳」で行っても6億年かかるとしている。

これは、通常のコンピューターが、「0」か「1」のどちらかの状態であるビットという単位を用い、一つ一つ逐次計算しているのに対し、量子コンピューターでは、「0」と「1」が同時に存在する量子ビット（Qbit）と呼ばれる、重

ね合わせた状態の量子を用いることで、一度に複数の計算をすることが可能となるためである。

量子ビットを用いた計算では、温度や磁場などの要因により量子の重ね合わせ状態が崩れ、正確な計算結果を得られないことがある（量子エラー）。現在の技術では、エラーに耐性のある量子ビットを多く使用することが困難なことから、大規模な量子コンピューターを作成するには時間がかかるといわれている。

現在、量子コンピューターと呼ばれているものは次のように分類される。

ア 汎用型

量子ゲートを用い、現在使用されているコンピューターのように多くの種類の計算が可能なもので、次の2つがある

- ① 量子エラーが訂正され、計算が実行でき、現在使用されるコンピューターと同様に使用できるもの
- ② NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum device) と呼ばれる、量子エラー訂正が不十分で、量子ビットが 50~100 量子ビットの、限られたアルゴリズムが実行可能なもの

汎用型量子コンピューターのうち、量子エラーを訂正し計算を実行する量子コンピューターの開発には時間がかかるとみられることから、より早い量子コンピューターの実用化のため、エラーがある程度許容される計算について有用であると考えられる NISQ の開発が進められている。

汎用型量子コンピューターの開発は、米国では、IBM 社⁷や、マイクロソフト社⁸、Google 社などで実施されている。さらに中国や欧州でも開発が進められている。

また、2021年3月23日にIBM社は、ゲート型商用量子コンピューティング・システム「IBM Quantum System One」の日本における設置場所を新川崎・創造のもり かわさき新産業創造センターに決定したことを発表した⁹。

イ 特化型

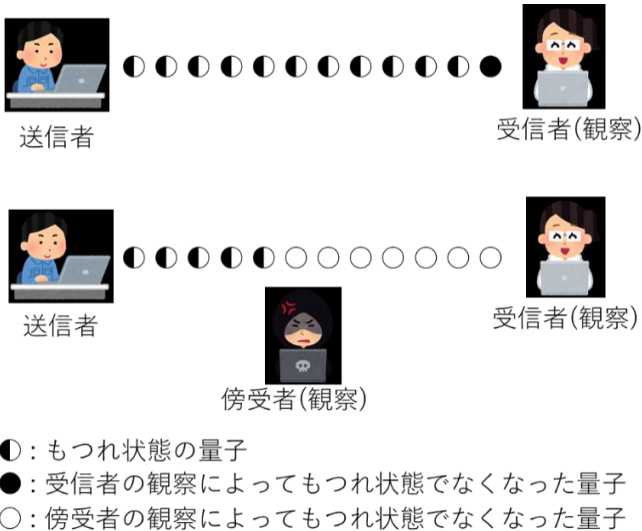
組み合わせ最適化など、特定の計算を実施するもので、代表的なものにアニーリング（焼きなまし）マシンがある。

量子アニーリングマシンでは、カナダのD-Wave Systems 社¹⁰がよく知られている。D-Wave社の製品は、すでに商用システムとして、Google社、NASA、NTTデータ社などに収められている。また、日本においては、富士通、日立、NECなどが量子アニーリングマシンの開発を行っている。

(2) 量子通信

量子通信(quantum communication)とは、量子力学に基づいた「粒子性と波動性」「量子もつれ」などを利用しておこなわれる通信のことで、大容量で、秘匿性に優れた通信を行うことができると期待されている。量子通信では量子のひとつである光子に情報を載せることで通信を行う。このとき、「量子もつれ」と「量子テレポーテーション」の性質を利用することで秘匿性の強い通信を行うことができる。

量子もつれ状態になった一対の量子に情報を載せ、送信者と受信者が持つように通信を行う。受信者が情報を確認し量子もつれ状態が崩れると、量子テレポーテーションによって、送信者のもとにある量子も、もつれ状態が崩れる。このため、もし通信の途中で第三者が通信を傍受した場合、本来の受信者には量子もつれ状態にない信号が届くことから、その信号が傍受されたことがわかる。



量子通信の概念図（筆者作成）

量子通信は、情報を光子に載せ、光ファイバーや通信衛星を用いて光子を送信している。

光ファイバーを用いた通信では、およそ 200~300km 程度で、光子が散乱や減衰によって失われてしまい、データを読み取ることが不可能になってしまう。

光子の消失を防止するために、長距離の光ファイバー通信を行う際には量子中継器が必要となる。

通信衛星を用いた量子通信では、宇宙空間が真空であるため光子の減衰がほとんど発生しないことから、大陸間などの非常に長距離の通信を行うには、通信衛星を用いるほうが光ファイバーより有利となる。

量子通信は、すでに実用化の段階に入っており、例えば、2020年10月の（株）東芝のプレスリリース¹¹によれば、量子通信の事業を世界規模で展開している。アメリカでは、2018年に Quantum Xchange という企業が、ボストン-ワシントン間の全長約 800 キロの光ケーブルを用いて、量子暗号ネットワークの事業を開始することを発表¹²している。

量子通信衛星を用いた通信は、2016年8月に中国が世界初の量子科学衛星「墨子」を打ち上げ、中国-オーストリア間での量子通信に成功した。さらに、2021年1月6日付けの「ネイチャー」電子版に、総距離 4600Km で 150 以上のユーザーと接続した、衛星・地上間量子通信ネットワークを構築したと発表している¹³。

我が国では、2017年情報通信研究機構(NICT)が、超小型衛星(SOCRATES)と東京都小金井市にある NICT 光地上局との間で、量子通信の実証実験に成功している¹⁴。

(3) 量子計測と量子センシング

量子の特性を利用した計測、センシングのシステムは、従来のシステムよりも優れている。それは、量子の持つ特性により、磁界や電界などの場に非常に敏感に反応するためである。この特性を活かし、加速度、回転、重力といった場の変化を測定する量子センサーと、原子時計¹⁵を用いた正確な同期を組み合わせることで、GPS が使用できない環境でも、精確な位置、ナビゲーション、タイミング能力を利用することができる。

ア 量子センサー

量子の磁界や電界などの場に非常に敏感に反応する特性を利用することで、高精度、高選択性の測定や検出を行うセンサーである。

量子センサーを利用することで、地下の詳細なマッピングやそれを利用した火山の噴火や地震の予兆の検出、化学物質の微細な痕跡の検出、あるいは詳細な医療診断、高精度な顕微鏡などへの利用が期待されている。

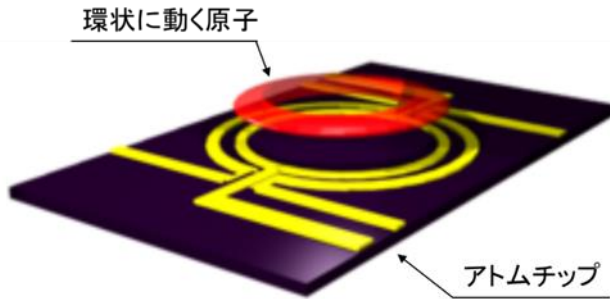
イ 量子慣性センサーを用いたナビゲーション

量子が持つ物質波の双極性の特性により、量子は環境の変化に非常に敏感に

反応する。量子慣性センサーは、この量子の双極性を利用している。

① 原子を、絶対零度（約 -273°C ）まで冷却すると、粒子としてだけではなく、波としての振る舞いもするようになる。このような過冷却原子（極度に低い温度まで冷却された原子）が移動するとき、その波動特性は、原子に働く力（例えば加減速）によって影響を受ける。影響を受けた原子の波動特性の微小な変化を測定することで、原子に働いた加速度を検知することができる。過冷却原子の波動特性による波は、可視光線に比べて波長が短く、また、速度も遅いことから、加速度による微小な変化を測定しやすくなる。量子加速度計は、この過冷却原子の特性を利用することで、現在使用されている加速度計より、より精密で正確な、加速度、速度を測定することが可能となる。

② 過冷却原子の波動特性を、リングレーザージャイロなどで利用されるサニャック効果¹⁶で利用することで、より精密で正確な角速度や角度の測定をするジャイロを作成することが可能となる。量子ジャイロは、アトムチップ¹⁷上に円形に配置された原子導波路を用い、過冷却原子の持つド・ブロイ波¹⁸の位相差を測定することで角速度や角度の測定をすることが可能となる。



アトムチップ上の量子ジャイロの概念図

出典：パリ天文台 HP¹⁹より

③ 量子加速度計による正確な加速度や速度、量子ジャイロによる正確な角速度や角度、そして原子時計による正確な時間とタイミングを組み合わせることで、精度の高い、自己完結型のナビゲーションを行うことが出来る。

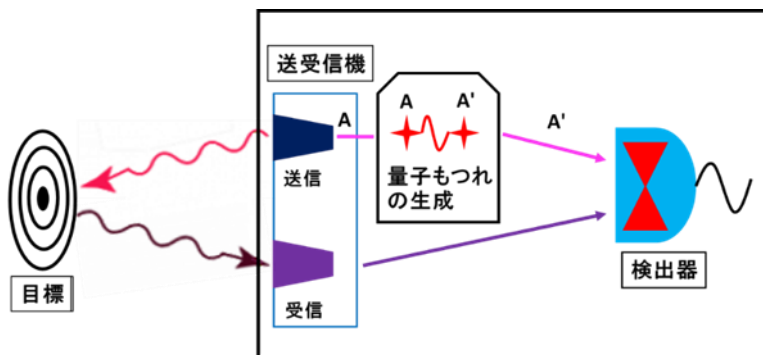
(4) 量子レーダー

量子レーダーは、目標の捕捉に量子の特性の一つである「量子もつれ」を利用している。生成された2つの量子の間には強い相関関係が発生しているため、

2つの量子の間の距離が大きく離れても一方の量子の状態の変化は、もう一方の量子の状態に影響を与えるため、遠方の量子の状況を確認することができる。この特性を利用したものが量子レーダーである。

しかしながら、量子レーダーも、目標までの距離と方位の情報を取得する必要がある。量子レーダーでは、目標までの距離と方位の情報を取得するため、現在のレーダーと同様に、マイクロ波などを使用する。その方法は、1つの量子から生成しエンタングルメント状態にある2つの量子（AとA'とする）のうちの1つの量子（A）を送信機から、マイクロ波、光あるいはレーザーを用いて目標へと送出し、もう1つの量子（A'）を量子レーダー本体付近の検出器へと送る。量子Aを含む送出されたマイクロ波などは、目標に当たり反射した場合、受信機で受信された後に検出器へと送られる。受信した量子Aを含むマイクロ波などの信号が微弱で、同時に受信される周囲の背景ノイズなどの信号に埋もれてしまっていたとしても、量子Aと量子A'の間にある強い相関関係の働きにより、検出器において量子Aを含む信号とノイズ等の信号が分離、識別される。そのため、量子レーダーでは、従来のレーダーであればノイズの中に埋もれ、発見することが出来なかった信号を用い、目標の距離と方位を取得することが出来る。

さらに、複数の量子を特定のアルゴリズムで処理することで、目標を画像（ゴーストイメージ）として表示することも可能となる。このように、量子レーダーは画像を取得することも可能となることから、「量子レーダーカメラ」あるいは、「量子カメラ」とも呼ばれる。



量子レーダーの概念図（筆者作成）

おわりに

本稿では、安全保障分野での活用が可能であると考えられる量子技術について概説した。量子技術は古典物理学の法則では不可能とされている問題の解決ができ、将来の様々なセンサーや、ネットワークなどにとって不可欠な技術になると考えられる。量子技術の活用は、比類のない精度、感度、速度によって、情報処理などの広範囲にわたる革新的技術および前例のない技術をもたらす可能性がある。そして、安全保障分野の技術にも、多くの影響を与える可能性がある。

本稿で紹介した量子技術の安全保障分野での利用は、次のようなものが考えられる。

量子コンピューターにより、膨大な量のデータを用いた組み合わせの最適解や複雑なシミュレーションを高速で処理することが可能となると考えられている。このため、量子コンピューターを利用し、各種センサーなどから得られる膨大なデータの処理、複雑なシミュレーションの実施によって、様々な条件の複数の選択肢のなかから、より有効な手段を選択する手助けになることが期待できる。

量子通信は、第三者に通信を傍受されたことを知ることができるとともに、傍受した敵対者を含む第三者がその通信内容の正確さについて確認することが困難であることから、秘匿性に優れた安全な通信を行うことができる。さらに衛星を使用した量子通信を利用することで、遠距離の部隊等との間においても秘匿性に優れた通信を行うことができる。

量子の磁場や電場といった外部のノイズに非常に敏感に反応する特性を利用する量子センサーは、現在使用されている各種センサーよりも高感度、高精度なセンサーになると考えられている。このような高感度の量子センサーを偵察システムや目標の捕捉に利用することで、水中の潜水艦や擬装された戦車等、あるいは地中の構造物などの探知、そして実物とデコイの識別などが可能になる。特にダイヤモンド NV センター²⁰と呼ばれる量子は、常温で作動可能であることから、磁場、電場、温度、圧力などの高感度センサーとしての使用が期待される。

量子慣性センサーをナビゲーションの手段の一つとして、航空機や艦船あるいは無人システムに利用することは、GNSS のような外部の信号を用いたナビゲーションへの依存を少なくすることができ、Jamming や Spoofing 等により GNSS を用いたナビゲーションが困難な環境下においても、高精度の自己位置

特定ナビゲーションを行うことが期待できる。

量子もつれの特性を利用する量子レーダーでは、ノイズに埋もれてしまうような非常に小さな信号からでも目標を分離することができるため、対 ECM や対ステルスといった能力が通常のレーダーより向上すると考えられ、今まで遠距離で探知することが困難だった目標への対処が期待できる。さらに、ゴーストイメージングを利用することで、目標の特定や識別の能力の向上も期待できる。

このように、量子技術は通信やセンシングあるいは問題解決といった分野において、安全保障関連の技術革新の中心になっていくものと考えられる。

（2021年4月2日受付）

¹ 統合イノベーション戦略推進会議「量子技術イノベーション戦略（最終報告）」2020年1月21日、<https://www8.cao.go.jp/cstp/siry0/haihui048/siry04-2.pdf>.

² Subcommittee on Quantum Information Science under the Committee on Science of the National Science & Technology, “National Strategic Overview for Quantum Information Science,” September 2018, https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2020/10/2018_NSTC_National_Strategic_Overview_QIS.pdf.

³ The White House, “National Strategy for Critical and Emerging Technologies,” October 2020, <https://nps.edu/documents/115559645/121916825/2020+Dist+A+EOPOTUS+Natioal+Strategy+for+Critical+%26+Emerging+Tech+Oct+2020.pdf/1543be15-a2ae-3629-7a45-aabdecaedb84?t=1602805142602>.

⁴ UK National Quantum Technologies Programme, “Strategic Intent,” <https://uknqt.ukri.org/files/strategicintent2020/> (last visited April 2, 2021).

⁵ 「量子」とは、粒子と波の性質をあわせ持ったとても小さな物質やエネルギー単位のこと。代表的なものとして原子や電子・中性子・陽子・光子といったものがある。また、量子の世界は、極めて小さな世界であるため、通常使用している物理法則（ニュートン力学や電磁気学）は通用せず、量子力学という法則に従う。「量子ビーム」文部科学省、https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1316005.htm（2021年4月2日アクセス）。

⁶ Frank Arute et al., “Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor,” *Nature*, Vol. 574, Issue 7779, October 23, 2019, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5>.

⁷ “Quantum,” *IBM*, <https://www.ibm.com/quantum-computing/> (last visited April 2, 2021).

⁸ “Quantum Computing,” Microsoft, https://www.microsoft.com/en-us/research/research-area/quantum-computing/?facet%5Btax%5D%5Bmsr-research-area%5D%5B0%5D=243138&sort_by=most-recent (last visited April 2, 2021).

⁹ 「量子コンピューター『IBM Quantum System One』の設置を『新川崎・創造のりかわさき新産業創造センター』に決定」IBM News Room、2021年3月23日、<https://jp.newsroom.ibm.com/2021-03-23-Shinkawasaki-Creation-Forest-Kawasaki-New-Industry-Creation-Center>.

¹⁰ 「量子コンピューターが今や現実」D-WAVE, <https://dwavejapan.com/>（2021年4

月 2 日アクセス)。

¹¹ 「量子暗号通信システム事業を開始」 TOSHIBA、2020 年 10 月 19 日、https://www.toshiba.co.jp/about/press/2020_10/pr_j1901.htm。

¹² “Quantum Xchange Selects Zayo Group for Dark Fiber to Deploy First Quantum Network in the United States,” Quantum Xchange, October 24, 2018, <https://quantumxc.com/zayo-group-first-quantum-network-in-us/>。

¹³ Yu-Ao Chen et al., “An Integrated Space-to-Ground Quantum Communication Network over 4,600 Kilometres,” *Nature*, Vol. 589, Issue 7841, January 14, 2021, <https://www.nature.com/articles/s41586-020-03093-8/>

¹⁴ 「超小型衛星による量子通信の実証実験に世界で初めて成功」国立研究開発法人情報通信研究機構、2017 年 7 月 11 日、<https://www.nict.go.jp/press/2017/07/11-1.html>。

¹⁵ 原子時計：例えばルビジウムやセシウムのような元素では遷移周波数（各元素の電子のエネルギー状態が変化するときに吸収したり放出したりする光や電波の周波数をいう。）が正確で再現性があり同一であることを利用した時計。遷移周波数が明確に定義されるため、腕時計に使用されているような水晶発振器よりもはるかに優れた時間の標準となる。

¹⁶ サニャック効果：相対論による光速度一定の原理により、回転する円形光路では入射した光が出口に到達するまでの時間は回転方向に進む光の場合は長くなり、逆方向に進む光では短くなる。同一の周回状光路に逆方向に 2 つの光を入射した場合、光路が回転することで 2 つの光の到達時間に差が生じる。この到達時間の差から光路長差が求められ光路の回転速度を求めることができる。

¹⁷ アトムチップ：基板上に微細な電極を作成し、電場や磁場を作成することで、極低温原子を用いた原子回路を実現するもの

¹⁸ ド・ブロイ波：フランスの物理学者ルイ・ド・ブロイが発見した、物質粒子が持つ波としての性質。物質波とも呼ばれる。

¹⁹ “Gyroscope on Atom Chip,” SYRTE-Observatoire de Paris, April 30, 2018, <https://syрте.obspm.fr/spip/science/iaci/projets-en-cours/gyrachip/article/gyrometre-sur-puce-a-atomes>。

²⁰ ダイヤモンド NV センター：ダイヤモンドの結晶中で本来は炭素があるべき場所が窒素(N)で置換され、隣接する位置に空孔(V)ができる格子欠陥。室温大気圧下においても量子状態を保つことができる。