

参考資料

量子技術を取り巻く諸外国の動向

米欧中を中心に海外では、「量子技術」は経済・社会に大きな変革をもたらす重要な技術と位置づけ、政府主導で研究開発戦略を策定。近年、研究開発投資額を大幅に拡充するとともに、研究開発拠点形成や人材育成等を戦略的に展開。各国の大手IT企業も積極的な投資を進めており、ベンチャー企業設立・資金調達も進んでいる。

政府の取組



ü 2018年9月、国家科学技術会議が「量子情報科学の国家戦略

概要」を策定

- ü 2018年12月、2019年より5年間で最大13億ドル(約1,400億円)規模の投資に関する法律が成立(DOD, CIA除く)
- ü DOEやNSFを中心に、10か所程度、研究開発や人材育成を行う拠点を形成



ü 2017年6月、欧州委員会の有識者会議が研究開発戦略を策定

- ü 2018年から10年間で、10億ユーロ(約1250億円)規模のプロジェクトを開始
- ü 加えて、各国が独自予算で研究開発を実施
- ü 特に、蘭・英等は、国際的な研究拠点を形成。民間投資を呼び込んでいる



ü 「科学技術イノベーション第13次五カ年計画(2016年)」において、量子通信と量子コンピュータを重大科学技術プロジェクトとして位置づけ、積極的に投資

- ü 「量子情報科学国家実験室」を安徽省合肥市に約70億元(約1,200億円)かけて建設中(2020年完成予定)
- ü 衛星通信を用いた量子暗号など、暗号・通信分野での取組にも注力

代表的な企業の取組

<大手IT企業>

Google

量子人工知能研究所を設立(2013年~)

IBM

5年間で30億ドルの研究投資(2014年~)

Microsoft

Station Qを設立(2005年~)

Alibaba (アリババ)

中国科学院に量子計算実験室を設立(2015年~、3千万元/年)

<ベンチャー>

D-Wave

The Quantum Computing Company

世界初の商用量子アニーリングマシンを販売。2億ドルを資金調達。

rigetti

超伝導型量子コンピュータを開発。約1.2億ドルを資金調達。

注) 為替レートは、発表時の当該月の我が国財務大臣が公示する基準外国為替相場及び裁定外国為替相場をもとに算定

世界的な競争が激化する中、量子技術をどのように推進するか岐路に立たされている

我が国の量子技術の取組の現状

量子技術は、第五期科学技術基本計画において、初めて重要な基盤技術として位置づけられたが、国全体を俯瞰した量子技術戦略は未策定。各府省が、それぞれ個別に研究開発を実施
我が国は、基礎理論や基盤技術等に優位性を持つが、技術の実用化・産業化（システム化）に向けた取組に課題

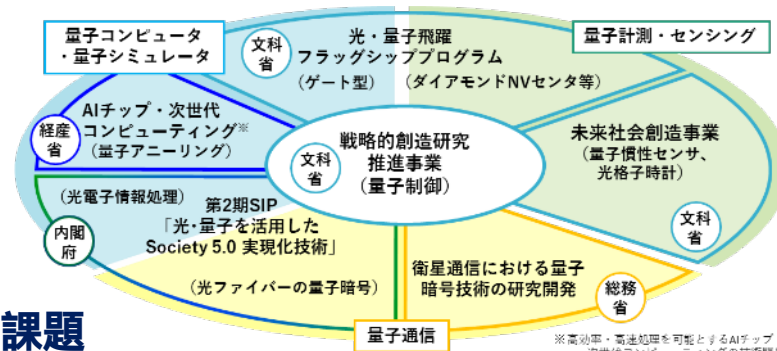
第5期科学技術基本計画(平成28年1月閣議決定)において、「光・量子技術」として初めて位置付けられる

「統合イノベーション戦略」(平成30年6月閣議決定)

光・量子基盤技術分野は、従前の技術では不可能であったことを可能とし、社会に変革をもたらす革新的な技術分野であることから、欧米や中国で積極的に研究開発が進められている。我が国としても、Society 5.0の実現のため、・・・我が国が強みを有する光・量子基盤技術の国際競争力を維持・向上させるべく取り組む。

各府省が、それぞれ個別に研究開発を実施

- 内閣府 量子暗号（光ファイバー）、光電子情報処理
- 総務省 量子暗号（衛星通信）
- 文科省 量子情報処理（ゲート型）、量子計測・センシング
- 経産省 量子情報処理（量子アニーリング）



我が国は、基礎理論等で優位性を持つが、技術のシステム化は課題

1998 西森秀稔教授（東工大）らが量子計算手法として「量子アニーリング法」を論文発表

2010 カナダのベンチャーD-Wave社が世界初となる商用機を発表



(出典：D-Wave社)

1999 中村泰信・蔡兆申氏（当時NEC）が超伝導回路による量子ビットを論文発表

2016 IBM社が世界初となるゲート型量子コンピュータのクラウド公開



(出典：IBM社)

このままでは諸外国に大きな遅れを取り、将来の国の成長の基盤が脅かされない

「量子技術イノベーション戦略」が対象とする技術の範囲(案)

セキュリティ

情報処理

ライフサイエンス

計測・センシング

環境・エネルギー

量子セキュアクラウド

量子機械学習

組合せ最適化

脳磁・心磁計測

超小型・超高感度MRI

高精度加速度計

エネルギーハーベスト

量子インターネット

量子認証

高精度・大規模量子化学計算

バイオセンサー

量子標準

革新的触媒

省電力デバイス

社会実装

量子セキュリティ

量子AI

量子生命技術

量子通信・量子暗号

量子情報処理

量子計測・センシング

量子暗号鍵配送

ハイブリッド・分散システム

超伝導量子コンピュータ

ダイヤモンドNVセンタ

超偏極NMR

量子通信

量子ソフトウェア

イオントラップ量子コンピュータ

量子シミュレーション

光格子時計

原子干渉計

量子メモリ・量子中継

光量子コンピュータ

量子アニーラ

スピン量子コンピュータ

アト秒レーザー

もつれ光センサ

エレクトロニクス
フォトンクス
スピントロニクス

耐量子コンピュータ暗号

量子inspiredアルゴリズム

イジング型コンピュータ

量子inspired

量子情報理論による情報理論の再定式化

量子状態制御

量子コヒーレント制御

量子ビット実装

量子アルゴリズム

光波制御技術

核磁気共鳴

トポロジカル物質

超伝導

量子制御・モデリング

誤り訂正技術

単一光子源・検出器

量子もつれ

微細加工技術

Siフォトンクス

ダイヤモンドNVセンタ

スピン流・スピン波

極低温エレクトロニクス

イオントラップ

レーザー冷却

ボース・アインシュタイン凝縮

マルチフェロイクス

強相関電子系

量子マテリアル

基盤技術

量子エレクトロニクス

量子情報科学・工学

コンピュータ工学

材料科学

半導体工学

量子光学

原子・分子・光科学

量子計算理論

統計力学

量子化学

物性物理学

基礎学理

量子力学

主要技術領域 量子情報処理

ゲート型量子コンピュータ、量子シミュレーションの実現には技術的課題があるものの、**新奇材料や薬剤開発を効率化**することや**セキュリティ技術の向上**などに貢献し、産業・社会のあらゆる分野で飛躍的なイノベーションをもたらす**量子アニーリング**は、**実問題の解決に向けた動きが企業を含めて活発**。得意とする組合せ最適化問題を解くことで、**交通渋滞の解消、工場生産プロセスの最適化**などを通じ、生産性向上に貢献

ゲート型量子コンピュータ（超伝導量子ビット）

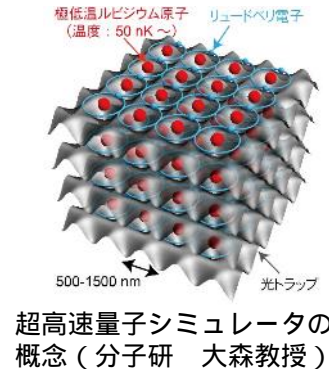
- 量子力学的な状態を情報処理の単位（量子ビット）として利用したコンピュータ
- 日本は超伝導量子ビット製作に世界に先駆けて成功。高品質の超伝導量子ビットの製作・制御に高い技術力を保持
- 高品質の超伝導量子ビットによる大規模化が課題
- 大規模超並列計算により、因数分解、検索、量子深層学習などの問題を短時間かつ超低消費電力で計算が可能となる見通し



量子ビットの冷却・制御装置（東大 中村教授）

量子シミュレーション（冷却原子）

- 量子多体系のふるまいや相互作用に特化した問題について、人工的な多数の粒子の量子状態を制御してシミュレーション実験を行う技術
- 我が国は、強相関電子系の理論的研究で世界をリード
- 複数原子間の長距離相互作用等の実装に関する課題がある
- 量子多体系物理、高温超伝導の理論的解明に期待。光や冷却装置などの周辺技術の産業への波及に期待



超高速量子シミュレータの概念（分子研 大森教授）

量子ソフトウェア

- 量子コンピュータで計算を行うために必要となるOSやシステムアーキテクチャ、アルゴリズム、アプリケーションの研究開発
- 大学・研究機関に加え、ベンチャー企業を中心にゲート型・アニーリング型の双方で、開発が激化
- 機械学習や量子化学計算などの量子計算の高速化・大規模化により、産業・社会のイノベーションに期待



量子コンピュータのハード/ソフトウェアの階層

量子アニーリング

- 量子力学的「重ね合わせ」を利用し、最適な組合せを導くことに特化したコンピュータ
- 東工大西森らが理論提唱した量子アニーリングと超伝導量子ビットの技術を基にカナダのベンチャーが商用機を開発
- 国内企業により、量子技術にinspireされたハード開発が活発化
- 交通問題などの実社会問題の解決に向けた取組みが先行

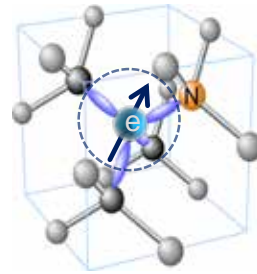


D-Wave社(カナダ)が開発した量子アニーリングマシン（出典：D-Wave社）

量子計測・センシングは、量子状態のもろさを逆手にとり、従来技術を凌駕する感度・精度を実現する技術。生命・医療技術の向上による健康長寿社会、防災等の安全安心な社会の構築に貢献

固体量子センサ

- 電子スピン状態を利用した**高感度の磁場センサ**。従来の磁場計測法（ホール素子）に比べ、**高感度（10万倍）、高空間分解能（100倍程度）**を室温下で実現
- 日本は**材料作製技術**に強みを有している。基礎からデバイス開発まで一貫通貫な研究開発が必要
- 脳磁・神経磁場**の計測の高度化によりヘルスケア、安全走行、脳疾患の**予防・治療**などへ期待



量子慣性センサ

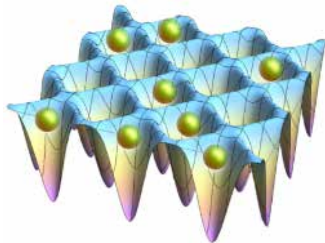
- 原子の波としての性質を利用した**加速度や回転速度を測るセンサ**。現在広く利用されているリングレーザージャイロより**2桁の精度向上**が期待
- 日本は**光技術のレベルが高い**一方で、原理実証に留まっており、**実用に向けた小型化・可搬化**が重要
- GPS信号が無くても自分の位置を確認して目的地に到達できる、例えば、**完全自動運転車、自律型無人潜水機（AUV）**が実現可能



（出典：JAMSTEC）

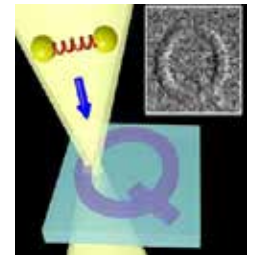
光格子時計

- レーザー光を活用し、従来の原子時計に比べて、**数桁高い精度で時間を測定**できる時計
- 日本の研究者が**原理を提案**。日本の光格子時計の**精度・連続稼働時間は世界をリード**。更なる**小型化・可搬化・耐環境性向上**が重要
- 新しい秒の定義の候補**
- 微弱な重力変化の計測による**地震・火山に関わる防災**や物理定数の恒常性の検証等に役立つことに期待



もつれ光センサ

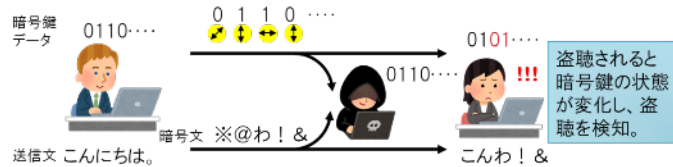
- 2つの光子が離れていても影響を与える**量子もつれ状態**を利用した**高感度センサ**
- 日本は**高品質で大強度のもつれ光子源**を実現しており、実用化に向けたアプリケーションの原理実証が行われている。
- 細胞の**非侵襲観察**や網膜などの**組織厚みの精密計測装置**、化学プラントでの**薬品製造管理**などに必要な**高感度の小型赤外分光装置**が実現可能



量子暗号により、絶対に破られない暗号サービスが実現されるため、セキュリティの危殆化の懸念なく高秘匿情報をインターネット上でやり取りすることのできる社会が実現される。

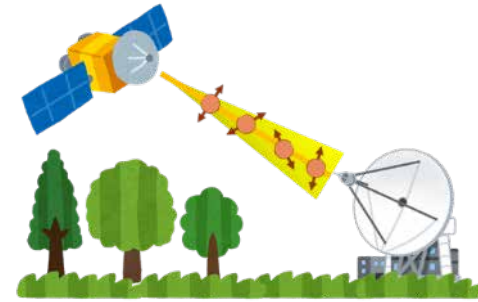
量子暗号 | 光ファイバー

- 暗号鍵データを光子に乗せ、光ファイバーで量子鍵を配送。あらゆる盗聴攻撃を検知し、情報理論的安全性が証明されている唯一の暗号方式
- 日本の強みは、高性能な量子暗号装置。一方で、低価格化やアプリケーションとの融合が課題
- データ保存や秘匿計算を組合わせた我が国独自のシステムを開発し、社会実装につなげることが重要



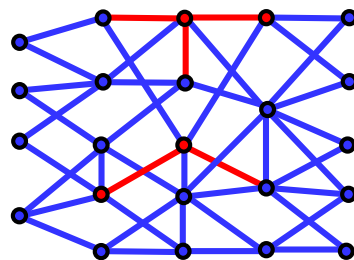
量子暗号 | 衛星通信

- 衛星間や衛星-地上局間で量子鍵配送を実施し、大陸間で高秘匿通信を可能とする技術
- 日本でも、光通信分野では世界最小となる超小型衛星を開発し、予備実験を実施
- 本技術の実現に向け、光子伝送の高速化、高精度レーザー捕捉追尾技術等の開発を行うことが重要



量子通信

- 光子の重ね合わせや量子もつれ状態などの伝送・制御により、超高効率の通信を実現する技術
- ネットワークアーキテクチャや集積化に向けた開発、超高効率通信に向けた量子受信機の研究開発が課題
- 超高効率通信以外にも、量子情報を量子コンピュータへ伝送する手段などへの応用も期待



量子中継

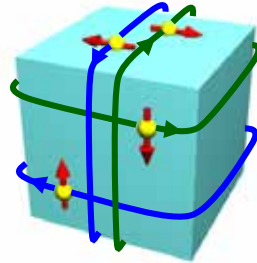
- 量子暗号は光の損失により100km程度の通信距離が限界。現在、物理的に盗聴者を侵入させない古典的手法で中継しており、理論上安全な中継技術は未確立
- 日本は、半導体技術やダイヤモンド結晶成長技術など、量子中継デバイスの集積化の強みとなり得る技術がある。
- 一方、実現には伝送速度、誤り訂正などの課題があり、長期的視点から取り組む必要がある



ナノテクノロジーの発展により、シングルナノオーダー、1原子層レベルの制御が可能になることで、従来観測不可能であった量子現象へもアクセスが可能になりつつある。これら現象の制御により、**量子情報処理等の革新のみならず、エネルギー変換やエレクトロニクスの革新など現在の技術レベルでは到達が不可能なレベルの機能の実現が期待される**

トポロジカル量子物質

- バルクでは絶縁体だが表面は金属である新規物質トポロジカル絶縁体を活用することで、**高効率なスピン-電荷変換が可能**となる
- また、トポロジカル超伝導体のマヨラナ粒子は、**ロバストな量子ビット**として期待されており、世界中で研究が実施されている
- 超低消費電力デバイスや新方式の量子コンピュータの実現に貢献**



トポロジカル絶縁体

スピントロニクス材料

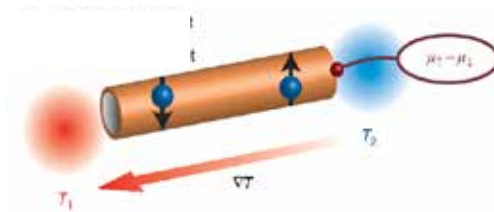
- 多数スピンからなるナノ粒子であるスキルミオンは、**少ない電流で駆動できる情報担体**となりうるとして研究が進展中
- 損失ゼロの電荷輸送**による量子回路や**低電流駆動が可能な情報担体**が可能に
- 超低消費・大容量メモリの実現に貢献**



スキルミオン

エネルギー変換材料

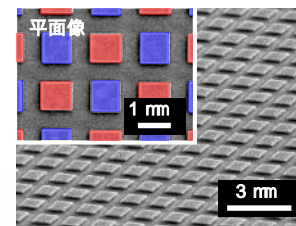
- スピン-電荷変換による熱電効果であるスピンゼーベック効果**を活用
- 安価で大量作製が可能な熱電変換や**単一デバイスで熱、振動、光等からエネルギーを獲得する多源環境発電**が可能に
- エネルギーハーベスティング技術を用いた無電源IoTセンサの実現に貢献**



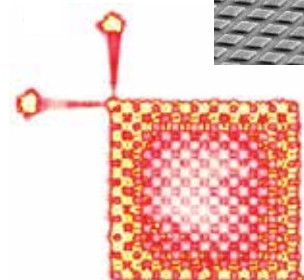
スピンゼーベック効果

フォトンクス材料

- 量子ドットからの**単一光子発光**や、**トポロジカルなフォトニック結晶**を用いるなど、**新概念を用いた高効率レーザーの開発**が進行
- また、**メタマテリアル**を利用することで、**光学限界を超える素子や電磁波遮蔽**を実現
- 省エネ光源や次世代量子通信の実現に貢献**



メタマテリアル



トポロジカルなフォトニック結晶 7

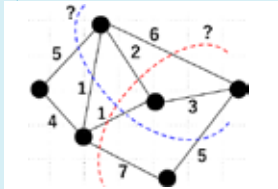
人工知能の高度化は、Society 5.0実現の重要な鍵。AIの実社会への展開が次々となされているが、今後、この発展を支えていくためには、次世代コンピューティング技術の発展も重要な要因となる。

量子コンピュータのキラーアプリ候補として、機械学習に注目が集まっている。将来、量子コンピュータの高度化が実現した際、優位性が出る可能性が指摘されている。世界に先駆けて重点的な研究開発を実施し、世界をリードする。

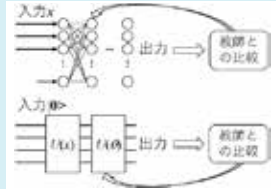
教師なし学習・教師あり学習

- QAQAや量子回路学習を計算基盤とした、教師なし学習、教師あり学習、強化学習の発展を目指し実応用に資する取り組みを展開する
- 画像診断や、材料開発・創薬などの分野に期待

大規模かつ複雑なデータを基にした人工知能の実現に貢献



MAXCUT問題（教師なし機械学習）の例



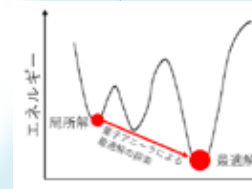
ニューラルネットと量子機械学習の対比

量子技術
量子アルゴリズム、
量子コンピュータ etc...
×
情報科学
機械学習、システムアーキテクチャ etc...

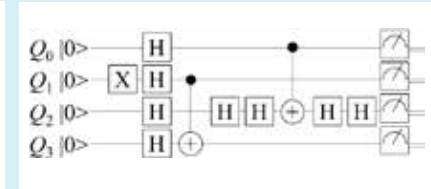
新アルゴリズム開発

- 人工知能の高度化・高精度化に繋がる新しいアルゴリズムを開発
- 量子コンピュータ等を用い、開発されたアルゴリズムの量子優位性などの性能を評価・検証を実施

量子コンピュータのAIへの適用先の拡大を実現



イジングマシンの解を導く原理

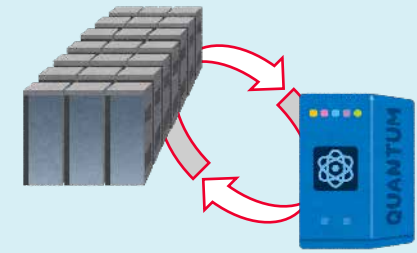


量子コンピュータのゲート操作イメージ

システムアーキテクチャ

- 人工知能の情報処理の中で、量子コンピュータが得意とする箇所を特定
- 量子コンピュータと現代コンピュータの計算資源の最適化を実施

人工知能の高度化・高精度化に貢献



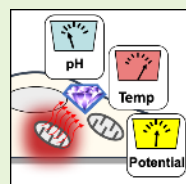
経済・社会の発展の鍵であるより高速かつ精度の高い人工知能を実現し、競争力の高い産業の創出や日本の抱える諸課題の解決に貢献

近年の量子技術の発展に伴い、量子技術を生命科学に応用するとともに、量子論により生命現象を解明し、得られた知見を医療技術や環境技術の革新につなげることを目指した研究が開始されつつある。

超早期診断・治療や抗老化など健康・長寿社会の実現、生物の持つ「量子もつれ」や「重ね合わせ」等の量子効果を模倣した高機能材料の創出など、重要な革新がもたらされる可能性があり、世界に先駆けて取り組む必要がある。

生体ナノ量子センサ

- ナノ量子センサを生体細胞に適用
- 核やミトコンドリアなど局所のpH、温度、電流等、これまで計測できなかった細胞内部および細胞組織のパラメータが取得可能に

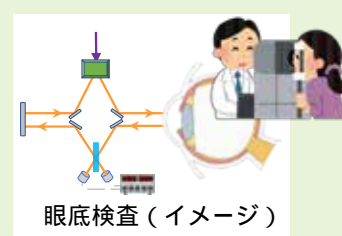


1細胞精度の診断 (イメージ)

老化状況や、がんの発症前予測など新たな診断が実現

量子もつれ光イメージング

- 量子もつれ光をイメージングに活用
- 従来光のS/N比を超える高感度・高精細な計測により毛細血管等の細部観察が可能に

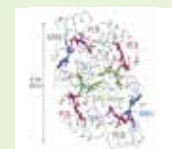


眼底検査 (イメージ)

眼科疾患や動脈硬化の超早期診断が実現

量子バイオミメティクス

- 生物の高い嗅覚や高効率の光合成・呼吸を実現する「量子効果」の仕組みを解明
- 麻薬探知犬を超える嗅覚センサや、人工光合成の開発の手掛かりに



「重ね合わせ効果」により100%のエネルギー伝達を実現する光捕集タンパク質

麻薬・爆発物の高感度検知や人工光合成の実現

量子技術

量子もつれ、重ね合わせ、トンネル効果 etc...

×

生命科学

構造生物学、細胞生物学、発生生物学 etc...

超偏極核磁気共鳴技術

- 核スピンの方向をそろえたスピン偏極化合物をMRI検査に活用
- 感度が従来法の千倍以上に向上。MRI検査時間の短縮やリアルタイム代謝イメージングが可能に



革新的MRI診断技術

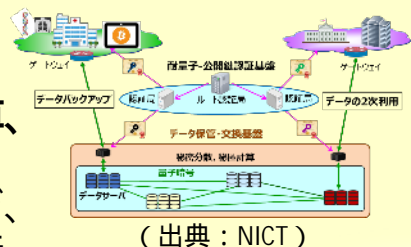
MRI検査の健診への導入や、がん治療の効果判定が実現

量子生命技術により、健康長寿社会の実現や環境技術の革新に貢献!

近年、量子コンピュータでも解読困難な耐量子-公開鍵暗号の標準化や現在の公開鍵認証基盤からの移行作業に関する検討が活発化している。また、クラウドサービス向けの秘密分散や秘密計算も実用化されつつある。これらの技術を量子暗号と融合することにより「超長期の機密性、改竄耐性、可用性、計算機能を有する量子セキュリティ技術」を実現でき、将来にわたり堅牢なセキュリティを持ったサイバー空間を構築することができる。

量子セキュアクラウド

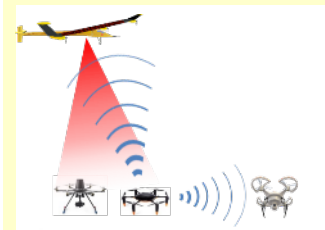
- 量子暗号、秘密分散、秘密計算、耐量子-公開鍵暗号を統合
- 将来にわたり盗聴や改竄を防ぎ、秘匿性を保ったまま計算を実行



事業継続性のあるデータバックアップや安全なデータ2次利用を実現し、社会保障費の削減や新サービスを創出

適応的物理レイヤ暗号

- 光や電波の量子的、電磁氣的性質に基づく無線暗号通信技術を開発
- 通信路の状況に応じて最適な電磁波帯域を用いて情報理論的に安全な暗号通信を実現



IoT機器やドローン等が、いつでもどこでも高速かつ安全な通信ができるサービスを提供

光・量子ネットワーク暗号化

- 量子暗号、秘密分散、ネットワーク理論を統合
- 複数のノードとリンクで分散的に符号化・暗号通信する光・量子ネットワーク暗号化技術を開発

量子暗号
不確定性原理、物理乱数

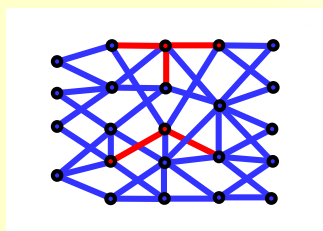
×

情報セキュリティ
現代暗号、計算機科学、ネットワーク理論

量子セキュア移動通信ネットワーク

- 衛星、ドローン、コネクテドカー等の移動体に量子セキュリティ技術を実装
- モビリティ、接続性、安全性に優れた移動通信技術を開発

サービス停止攻撃耐性や可用性に優れたスケーラブルな秘匿通信ネットワークを実現



宇宙、成層圏、高高度から地上網まで網羅する大容量かつ安全な移動通信ネットワークを実現

量子セキュリティ技術により、永続的セキュリティを持ったサイバー空間を構築！

量子技術イノベーション拠点(仮称)のイメージ

欧米では、量子技術に関する産学連携の拠点形成が急速に進展（オランダ・デルフト工科大（QuTech）、カナダ・トロント大、英国オックスフォード大等）国内外から優れた研究者を引き付ける舞台装置として機能。

我が国の国際競争力の確保・強化の観点から、強みを持つ技術領域を中心に人材・技術等を結集し、基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、知財管理等に至るまで一気通貫で行う国際的な連携拠点（国際ハブ）を形成すべき

拠点形態（案）

オープンプラットフォーム型

大学・研究機関と企業間の連携を深化・強化するオープンプラットフォーム型
（例：東北大cies）

機関独立運営型

大学・研究機関の傘下に置くものの、自由度の高い独立した運営を確保する拠点形成型
（例：WPI拠点）

機関内センター型

研究機関の傘下で、研究部門の一組織として発展・強化した機関内センター型
（例：理研・産総研等の戦略センター）

拠点要件（案）

我が国が国際的評価の高い卓越した研究者を有し、かつ国際競争力の高い技術を有する領域であること
我が国の大学・研究機関・企業等が高いポテンシャルを有し、将来の産業・イノベーションの飛躍的な発展が期待される技術領域であること
海外の企業等から大きな投資が期待される又は海外の優れた人材が集積することが期待される技術領域であること
人材・技術・予算等を集積することが有益かつ効率的な技術領域であること 等

拠点スキーム（案）

事業期間は10～15年程度（明確なマイルストーンを設定し、評価結果に応じて変更又は中止）
官民双方の出資・負担による産学連携拠点として整備（ステージゲートを設け、段階的に民間投資の割合を拡大）
国に事業全体を統括するボードを設置するとともに、ハンズオン支援等を通じたきめ細やかな進捗管理を実施
各拠点に拠点長を置き、管理・研究・知財・事業化など、必要な拠点機能を整備し、マネジメント体制を構築

拠点（例）

超伝導量子コンピュータ研究拠点
量子デバイス開発拠点
量子ソフトウェア(量子AI等)研究拠点
量子生命(バイオ)研究拠点
量子材料研究拠点
量子慣性センサ拠点
量子セキュリティ研究拠点
等



人材育成のイメージ

量子技術をめぐる国際的な競争が激化する中、我が国の量子技術の研究開発等に携わる研究者・技術者層は、諸外国と比べて極めて薄い状況であり、国際的な研究開発競争から大きな後れをとる恐れ
量子技術関連分野の人材層の質と厚みを飛躍的に高めるため、高等教育段階での教育や研究環境等の充実を戦略的に実施する必要がある

取組のイメージ

ロードマップ
を作成

- 主要技術領域毎に、どのような人材が必要になるかを明らかにし、研究者・技術者の戦略的育成・確保に向けたロードマップを作成
(特定が必要な項目例) 習得が必要な学問や技術、拠点の要件、育成・確保に必要な方策 等

拠点整備・プログラム開発

- 国は、大学・研究機関等と連携・協力し、主要技術領域に対応した人材育成拠点を整備
- 拠点が中心となって共通的な教育プログラム(教材、カリキュラム等)を開発

開発した教育プログラムを全国の希望する大学等へ提供

戦略的な取り組み

- <人材育成拠点>
- 開発した教育プログラムを用いて人材を育成
 - 開発した教育プログラムを活用する全国の大学と連携し、各地の大学のみでは対応できない部分をフォロー(集中講義、チューターなど)

連携

- <各地の大学・大学院>
- 拠点が開発した教育プログラムを、各大学における学部・大学院教育等で活用。量子技術の専門的教育を提供する環境を整備
 - 各大学等でカバーできない部分は拠点と連携して実施



優れた研究者・技術者を戦略的に育成・確保し、我が国の研究開発力の維持・向上させる 12