

# NICT NEWS

国立研究開発法人  
情報通信研究機構

No.1

2022

通巻 491

FEATURE

## 量子ネットワーク ホワイトペーパー特集

QUANTUM  
NETWORK  
WHITE PAPER

Interview

量子セキュリティに関する  
国際的な中核拠点を築く



2021 — 2035



表紙写真

NICTが2021年3月に公開した量子ネットワークのホワイトペーパーです。これは、NICTの有志が研究分野や職種を超えて議論し、取りまとめたものです。このホワイトペーパーでは、2035年ごろの未来社会をイメージして物語形式で示しつつ、そこからバックキャストさせることにより今後研究開発が必要な技術課題を洗い出しています。表紙右上の写真は、NICTと電気通信大学を結ぶ光空間テストベッド（全長約8 km）のNICTターミナルです。右下の写真は、量子暗号装置の受信部を示したものです。

左上写真

この写真は、光空間テストベッド（表紙右上の写真）のNICTターミナル内の光学回路を示したものです。

### 1 2022年 年頭のご挨拶 理事長 徳田 英幸

#### FEATURE

## 量子ネットワーク ホワイトペーパー特集

#### Interview

- 2 量子セキュリティに関する国際的な中核拠点を築く  
佐々木 雅英/藤原 幹生
- 4 量子ネットワークホワイトペーパーの目的・期待  
井出 真司
- 5 光空間通信による量子暗号  
安全・安心なネットワークの可能性を広げる技術  
遠藤 寛之/斉藤 嘉彦/豊嶋 守生
- 6 量子暗号と量子鍵配送ネットワーク  
いかなる計算機でも解読不可能な暗号技術の社会展開を目指して  
武岡 正裕
- 8 量子インターフェース  
通信波長光子を用いた物質量子系の相互接続  
達本 吉朗/早坂 和弘/吉原文樹
- 9 量子センシング  
光時計の量子ネットワーク  
早坂 和弘/井戸 哲也
- 10 量子ネットワークの実現に向けて  
地上系・衛星系統合のグローバルな量子ネットワークの構築・制御管理  
宮澤 高也/武岡 正裕/豊嶋 守生

#### TOPICS

- 12 「情報通信研究機構 新技術説明会」を開催  
イノベーション推進部門 知財活用推進室
- 13 NICTのチャレンジャー File 19 達本 吉朗  
未来の量子ネットワーク実現に向けた光量子制御技術の高度化

#### INFORMATION

- 14 nano tech 2022 開催のお知らせ
- 14 第26回「震災対策技術展」開催のお知らせ



国立研究開発法人情報通信研究機構  
理事長 徳田 英幸

## 明けましておめでとうございます

新型コロナウイルスの感染拡大によりお亡くなりになられた方々のご冥福を謹んでお祈りしますとともに、病院・保健所等におきまして感染者、重傷者の治療・状況把握に尽力されている医療関係者の方々に深く敬意を表します。  
また、台風9号、14号などによる風水害や土砂災害に遭われた皆様へのお見舞いと一日も早い復興を心からお祈りします。

昨年は2020年から続くコロナ禍にあって感染拡大を防ぐために、人々の働き方は大きく変化し、アナログ・対面からデジタル・リモートへと大きくシフトしました。在宅勤務で使うWeb会議システムをはじめ、ワクチン接種予約システム、新型コロナウイルス接触確認アプリや感染者数予測シミュレーションなど、これまで以上にICTが身近でかつ多くの人に利用されるようになりました。同時に、既存の就業規則や業務フローの課題や導入されたシステムの使い勝手や相互運用性の悪さといった課題も広く認識されました。

NICTは、情報通信分野を専門とする、我が国唯一の国立研究機関として、情報通信技術の研究開発を基礎から応用まで統合的な視点で推進し、同時に、大学、産業界、自治体、国内外の研究機関などと連携して、研究開発成果を広く社会に還元し、イノベーションを創出することを目指しています。さらに、地球規模の社会的課題に柔軟に対応し、サイバー空間とフィジカル空間を融合させたシステムにより、人間中心で、持続可能性や包摂性のある社会、すなわち安全・安心なSociety 5.0の実現を進めてまいります。

昨年4月から開始した第5期中長期計画においては、その早期実現に向けて、新たなICT技術戦略に基づいた重点5分野（電磁波先進技術、革新的ネットワーク、サイバーセキュリティ、ユニバーサルコミュニケーション、フロンティアサイエンス）の研究開発とオープンイノベーションの推進という主なミッションに加えて、Beyond 5G (B5G)、AI、量子情報通信、サイバーセキュリティといった戦略4領域の研究開発を積極的に進めてまいります。

B5Gの研究開発では、ゲームチェンジを意識し、B5G研究開発促進事業によって採択された委託研究プロジェクトとの連携の下、我が国の研究開発Hubを目指します。AIでは、多言語音声翻訳技術を更に進化させ、2025年頃までに同時

通訳レベルの機能を提供します。量子情報通信では、本部新棟での量子セキュリティ技術の国際的研究拠点を目指し、量子ICT協創センターの活動を推進します。セキュリティ分野では、産学官の結節点を目指し、サイバーセキュリティ統合的・人材育成基盤を構築するためのサイバーセキュリティネクサスの活動を進めます。B5G、量子情報通信の2つの分野では、2つのホワイトペーパーを発行しました。今後はこれらのホワイトペーパーの内容を継続的にアップデートし、自らの研究開発と共に、情報発信力を強化し、国内外の研究機関や企業との連携を深めてまいります。

また、NICTが開発した先端技術を企業等に活用いただく活動や研究成果データのオープンな利用に向けたテストベッド環境整備を進め、研究開発成果の社会展開を加速してまいります。さらに、次世代のICT人材の育成に関しても、NICT Quantum Camp (NQC) やSecHack365などの取組を充実させていきます。

運営方針としては、従来からのCollaboration、Open Mind、Open Innovation、Challenger's Spiritの「COC」に、新たに2つのキーコンセプト、NICT自体のDXすなわち、業務だけでなく研究開発プロセスのDXとComputing & Communication for Carbon Neutralを加え、「COC2.0」として更に発展させます。

NICTでは、幅広く国民の皆様からのご意見も頂き、関係者の皆様と協力・切磋琢磨させていただきながら産学官連携活動を推進し、引き続きICT分野の更なる発展のために邁進してまいります。今後とも変わらぬご支援、ご協力を頂きますようお願い申し上げます。

最後になりましたが、本年が皆様にとって素晴らしい年となりますように祈念して、年頭のご挨拶とさせていただきます。



**佐々木 雅英 (ささき まさひで) (右)**  
量子ICT協創センター  
研究センター長  
1992年東北大学大学院理学研究科修了、博士(理学)。同年、NKK (JFEホールディングス) 入社、半導体の研究開発に従事。1996年、通信総合研究所 (現、NICT) 入所。量子ICT研究室長、未来ICT研究所主管研究員を経て、2021年量子ICT協創センター・研究センター長。2016年NICTフェロー。

**藤原 幹生 (ふじわら みきお) (左)**  
未来ICT研究所小金井フロンティア研究センター  
量子ICT研究室 室長/  
量子ICT協創センター  
量子ICTデザインイニシアティブ  
イニシアティブ長  
大学院修士課程修了後、1992年郵政省通信総合研究所 (現NICT) 入所。衛星搭載用遠赤外線検出器、光子数識別器、極低温エレクトロニクス、量子鍵配送の研究に従事。博士 (理学)。

Interview  
**量子セキュリティに関する  
国際的な中核拠点を築く**

0, 1 というビットで成り立つ現在のコンピュータを超え、0 と 1 の重ね合わせ状態を持つ量子ビットで情報を扱う量子コンピュータ。量子コンピュータが脅かす現代暗号への脅威を解消する量子暗号や、それに基づく量子ネットワーク。量子力学が切り拓く新しい情報通信技術は、まさに分野の最先端のひとつと言える。

こうした量子技術のプラットフォーム構築を先導するため、2021年4月に発足したのが量子ICT協創センターである。設立の経緯や役割などにつき、佐々木雅英センター長と同センター量子ICTデザインイニシアティブ長兼未来ICT研究所量子ICT研究室長 藤原幹生の二人に話を聞いた。

■量子セキュリティ拠点としての  
NICTの活動を主導

—量子ICT協創センター設立の経緯について、佐々木センター長にお伺いしたいと思います。

**佐々木** 直接の契機としては、国の統合イノベーション戦略推進会議が2020年1月に策定した、「量子技術イノベーション戦略」があります。同戦略では、国内外に分散する優れた研究者・技術者やその他のリソースを集約するとともに、産学間の有機的な連携体制を構築、基礎研究から社会実装、人材育成等まで一貫通貫に取り組むための、「量子技術イノベーションの拠点」を国内に整備することがうたわれています。

拠点には中心分野ごとに8つありますが、NICTは「量子セキュリティ拠点」に指定され、量子セキュリティに関する進化発展を担う中核の役割を担うことになりました。その役割をNICTとしてきちんと果たしていくための組織として設立されたのが、量子ICT協創センターという位置付けです。

—具体的な量子ICT協創センターの活動と組織概要について教えてください。

**佐々木** 量子ICT協創センターが取り組む内容には、大きく4つの柱があります(図1)。

最初の柱は「研究開発」で、この中にはさらに量子基礎技術、量子セキュリ

ティ、衛星量子通信、量子ネットワークの4テーマがあります。

柱の2つ目は「実装・試験」です。これは開発した研究成果につき、信頼性等をきちんと評価すること。これに関しては従来の量子ネットワークのテストベッドを更に多くの方々が使えるよう、オープンテストベッドとして拡充していきます。

3つ目の「社会展開」では、目下、標準化に非常に力を入れており、併せて、評価・検定・認証業務の整備にも取り組んでいます。

4つ目は「人材育成」です。長期的には、研究開発を支えるものは何をおいても人材です。若い人達をトレーニングするプログラムである「NICT Quantum Camp」を、協創センター発足に先立ち昨年開始しています。

組織としての量子ICT協創センターは、センター長とそれを支える支援スタッフ、その下に様々な連携を取り仕切る「総合企画室」があります。研究開発は「量子ICTデザインイニシアティブ」が担っており、本日同席している藤原イニシアティブ長は量子ICT研究室長も兼任しています。先に上げた4テーマ中3つの研究グループがスタート、さらにオープンテストベッドの拡充チームの立ち上げも行っています。

—傘下の量子ICTデザインイニシアティブの役割について、従来の組織である量子ICT研究室との違いも含め、両方の長を兼ねる藤原イニシアティブ長にお聞きしたいと思います。

**藤原** NICTにおける量子技術の研究開発は「量子ICT研究室」が長年にわたって取り組んできており、今年で21年目に入ります。同研究室は「未来ICT研究所」傘下として、今後も引き続き研究開発を行っていきますが、研究室は将来を見据えた基礎的研究が中心的ミッションです。一方、量子ICT協創センターは、企業の方々とも一緒に新しいアプリケーションやサービスを創造するなど、もう少し社会に近い活動を進めていくことになります。

とはいえ、一連の流れを「ここまではあちら、ここからはこちら」と完全に切り分けてしまうのも非生産的です。そこで、組織間の強い連携も図りながら、一

貫通の流れを作っていくことが、量子ICT研究室と量子ICTデザインイニシアティブの任務です。

■ホワイトペーパーと今後の展望

—量子ICT協創センターの活動にも大きく関わってくるのが、今年春に公表したホワイトペーパーだと思います。その意義について教えてください。

**佐々木** 量子技術は、一部は実用化が始まっているものの、多くは今後20年、30年のスケールで研究開発を進めていくべきものです。そうした息の長い研究開発のロードマップや推定される社会選元の将来像などを、現在、我々が予測できる限りでまとめたのがホワイトペーパーです。当然、量子技術の発展は我々だけでできるものではなく、多くの人たちの力を結集する必要があります。つまり、「どのように皆さんに知ってもらい、加わってもらうか」が、このホワイトペーパーの役割だと言えます。

経緯としては、2020年秋ごろ、理事長直下の機構内シンクタンク Innovation Design Initiative (IDI) において、量子分野とBeyond 5G分野について戦略的なホワイトペーパーを作ろうという計画が具体化し、チーム作りが始まりました。量子技術に携わる主要メンバーや、関連の部署に声を掛け、総勢で20名近くが関わりました。未来のこととなると研究者同士で認識の違いもあり、ぶつ

り合うこともありましたが、「なるほど、そんな未来も有り得るのか」など気付かされることも多く、大変ながら充実した制作過程だったと思います。

**藤原** 将来を考えるにあたっては、量子技術でできること一方で、できないことも明らかにする必要があります。単純に夢物語を語るのではダメで、「いかにそれを現実化していくか」というロードマップ(図2)を真面目に作成し、語ることが我々研究者の役割だと思のです。ホワイトペーパーは、そんな青写真の一つと言えます。

もちろん予測ですから、「必ずこうなる」というものではないのですが、少なくとも、よりよい社会を実現していくには、どのように最先端の技術を融合し、どのような体制を構築していくか、それを多くの人に想起してもらう役に立てばと思っています。

—今後に向け、広く研究者の皆さんへのメッセージを伺えますか。

**佐々木** 量子技術の研究も20年が過ぎ、これまで日本チームが産学連携で培ってきた土台の上で、いよいよ次のフェーズへの転換点を迎えています。今は大変ではあれ、研究者人生の中でもそうそう体験できない、恵まれた時期でもあります。是非、我々と一緒に挑戦してほしいですね。

—本日はありがとうございました。

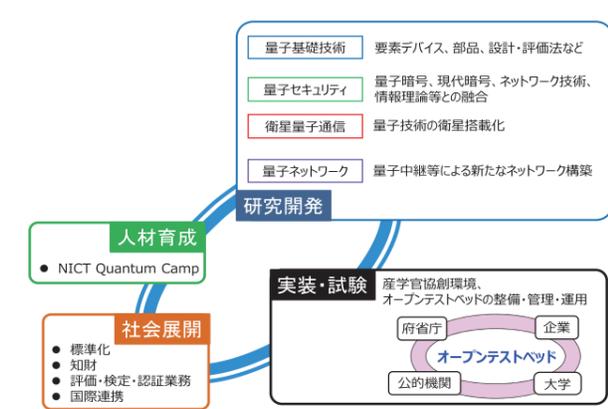


図1 量子ICT協創センターが取り組む4つの柱

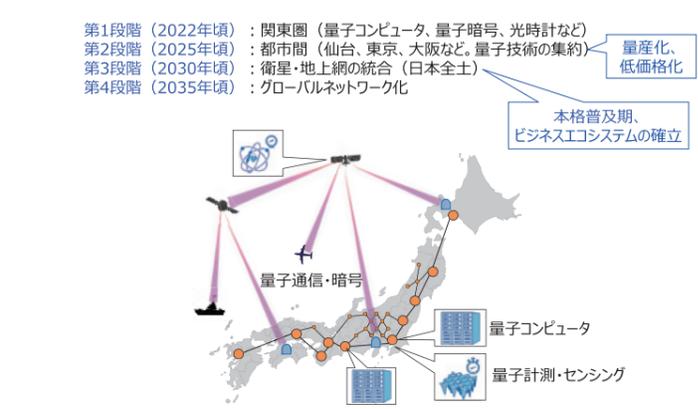


図2 量子技術プラットフォームロードマップ

## 量子ネットワークホワイトペーパーの目的・期待



井出 真司  
(いでしんじ)

総務省総合通信基盤局電波部移動通信課新世代移動通信システム推進室長  
元NICT総務部・経営企画部統括、理事長秘書

大学院修了後、2001年総務省に入省。情報通信分野における研究開発・国際標準化などに関する政策の企画・立案に従事。2019年にNICT出向し2021年まで総務部・経営企画部統括、理事長秘書。

**主** 要国において量子暗号や更にその先の量子ネットワークに向けた取組が進んでいます。ゲート型量子コンピュータの開発競争が加速する一方、現在の通信ネットワークで使われる現代暗号の解読が危惧されており、通信の安全・信頼性確保の観点から量子ネットワークの研究開発や展開を戦略的に進めていく必要があります。こうした中で、NICTでは2021年3月に量子ネットワークのホワイトペーパーを公表しました。

### ■ホワイトペーパーの目的・位置づけ

ホワイトペーパーでは、究極の目標として“量子インターネット”を見据え、量子ネットワークが実現する社会像、要素技術、展開戦略がとりまとめられています。グローバルな規模で量子ネットワークを展開していくためには、ホワイトペーパーを通じて、国内外の研究者を惹きつけ、国内外の様々なステークホルダーとの連携を進めていくことが必要不可欠になります。

### ■海外の動向

海外に目を向けると、米国、欧州、中国等は、戦略的な基盤技術として、量子ネットワークを含む量子技術に関する研究開発戦略を策定し、大規模な研究開発投資・人材育成を進めています。

米国では「国家イニシアティブ法」に基づいて、5年間で12億ドルを投じ、長期的な視点で量子情報科学の研究開発を進めています。その中で量子インターネットの実現に向けた要素技術の研究開発・実証や人材育成を進めています。

欧州では、欧州委員会の「量子フラッ

グシップ」において、5年間で10億ユーロを投じて量子技術の研究開発を進めています。2020年3月には、量子インターネットを究極の目標とする「量子技術の研究戦略アジェンダ」を公表し、研究開発・産業化・標準化・人材育成を加速しています。さらに、欧州25か国が、将来の量子インターネット網の構築に向けた量子テストベッド網「EuroQCI」の構築に合意しているほか、「OpenQKD」のプロジェクトにより量子暗号技術とその応用の開発・実証を進めています。

中国では、2016年に人工衛星“墨子号”を打ち上げ、衛星-地上間の量子暗号等の実証に成功しているほか、北京-上海を結ぶ量子暗号の基幹回線や主要都市に都市圏網を構築し、量子暗号ネットワークの総延長は2018年時点で7,000 kmを超える規模になっています。また、通信機器・デバイス・プラットフォームを提供する多数の企業が設立されており、量子暗号の分野で世界をリードしています。

### ■今後への期待

日本では2020年1月に「量子技術イノベーション戦略」が公表されました。NICTは、同戦略における「量子セキュリティ拠点」として、量子ネットワーク技術の研究開発や人材育成を進めています。また、内閣府、総務省の研究開発プロジェクトでは、グローバルな量子暗号ネットワークの構築に向けた研究開発が進められています。今後、更なる技術開発、国際標準化を含むルール作りが必要です。NICTがこれらの取組をリードし、産学官の連携の下でグローバルな量子ネットワークの展開が加速することを期待しています。

## 光空間通信による量子暗号 安全・安心なネットワークの可能性を広げる技術



図2 衛星からの量子信号を安定して受信し、かつ様々な場所で展開可能な可搬型光地上局



遠藤 寛之 (えんどうひろゆき)  
量子ICT協創センター  
研究マネージャー

大学院博士後期課程修了後、2017年に情報通信研究機構入所。光空間通信による物理レイヤ暗号や量子暗号の研究開発に従事。博士(理学)。

斉藤 嘉彦 (さいとうよしひこ)  
宇宙通信システム研究室  
主任研究員

国立天文台ハワイ観測所や東京工業大学での勤務などを経て、2017年に情報通信研究機構入所。光空間通信や補償光学系の研究開発に従事。博士(工学)。

豊嶋 守生 (とよしまもりお)  
ワイヤレスネットワーク研究センター  
研究センター長

1994年郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。ETS-VIによる光衛星通信実験に従事し、その後NASDA(現JAXA)出向、ウイーン工科大学在外研究を経て、OICETS、SOTA、ETS-IX等の衛星搭載通信機器の研究開発に従事。博士(工学)。

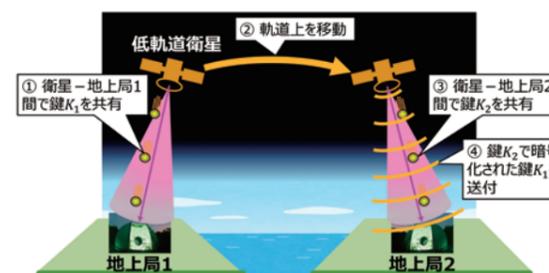


図1 衛星をリレーとして用いる大陸間量子暗号の概念図

**N** ICTでは10年以上前から光空間通信による量子暗号に着目し、その研究開発を推進してきました。「量子ネットワークホワイトペーパー」では、この技術の研究開発に携わってきた著者らが互いにアイデアを出し合うことで、機密情報を安全にやりとりするための基幹ネットワークや、誰もが安心して利用可能なセキュリティ基盤など、この技術によって拓かれる未来のネットワーク像を提示しました。本稿では、光空間通信による量子暗号について解説します

光空間通信は、衛星と地上との間の光通信のように、レーザー光による無線通信を指します。量子暗号を光空間通信で実施することで、これまでの量子暗号の課題が克服され、安全・安心なネットワークの可能性が大いに広がることが知られています。

まず、衛星と地上との間で量子暗号を実施することにより、量子暗号の長距離化が実現されます。光ファイバによる量子暗号では、光ファイバによる光子の吸収が減衰の主な要因となり、伝送距離に対して指数関数的に減衰します。一方、大気のない宇宙空間では、レーザー光の回折現象によるビーム径の広がりが減衰の主な要因となります。この場合、光は光ファイバでの減衰よりも緩やかである、伝送距離の2乗で減衰します。そのため、宇宙空間ではより遠くまで光子を送ることができます。特に、衛星をリレーすることにより、大陸間スケールでの量子暗号も可能となります(図1)。

また、光空間通信そのもの特徴を活用することで、従来の量子暗号よりも高速な秘匿伝送も可能となります。従来の量子暗号は、様々な位置から様々な攻撃を行うことのできる、無制限の能力を持った盗聴者に対しても安全性が示されていません。しかし、光空間通信は、送受信者の互いの見通しを確保した上で、指向性の高いレーザービームにより行われます。そのため、盗聴者が行える攻撃モデルは受動的な盗聴に制限されると仮定できます。このような盗聴者の能力への仮定の下で、従来の量子暗号よりも高速な秘匿伝送を可能にする技術を物理レイヤ暗号と呼びます。物理レイヤ暗号は、複数者間でのグループ鍵の共有など、量子暗号のみでは実現が困難である用途も拡張できます。

NICTでは、平成31年度から「衛星通信における量子暗号技術の研究開発(令和4年度まで)」という国家プロジェクトに参画し、衛星と地上との間の量子暗号に用いることのできる送受信装置の研究開発を推進しています。すでにいくつかの装置ができあがりつつあり(図2)、NICT構内や東京スカイツリーでの実証試験も行ってあります。令和3年度からは、これらの研究から得られた知見に基づいて、地上から低軌道、中軌道、静止軌道まで含めたグローバルなスケールで量子暗号通信網の実現に向けた研究開発を行う新しい国家プロジェクト「グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発(令和7年度まで)」に参画しました。これらのプロジェクトで得られた成果や今後の研究活動を通して、量子ネットワークホワイトペーパーで示した未来像を実際にお目にかけることができよう、日々の研究に励んでおります。



量子ネットワークホワイトペーパーの表紙

# 量子暗号と量子鍵配送ネットワーク

いかなる計算機でも解読不可能な暗号技術の社会展開を目指して



武岡 正裕

(たけおか まさひろ)

未来ICT研究所 研究統括

大学院博士課程修了後、2001年に独立行政法人通信総合研究所（現、NICT）に入所。以来、量子光学、量子情報理論、量子暗号に関する研究に従事。2021年4月より慶應義塾大学理工学部電気情報工学科教授 兼 NICT未来ICT研究所研究統括、博士（工学）。

**現** 在の情報社会を支える現代暗号は、近年急速に開発が進められている量子コンピュータの高性能化などにより解読されてしまう恐れがあります。これに対して、量子暗号は、将来の大規模量子コンピュータを含むあらゆる計算機を使っても解読不可能なことが数学的に証明されている現状唯一の暗号方式です。ここでは、量子暗号の核となる技術である量子鍵配送ネットワークの研究開発や実用化に向けた取組と将来展望について紹介します。

## ■現代のネット社会を支える暗号技術とその課題

現在社会に普及している暗号は、解読に膨大な計算量を必要とする「計算量的安全性」により秘匿性が担保されており、そのおかげで我々は日々安全にデータをやり取りすることができています。しかし現代暗号は、将来の大規模な量子コンピュータや全く新規の計算技術・数理アルゴリズムの出現により、解読が容易になってしまうという潜在的脅威も指摘されています。特に数十年以上の長期秘匿性が要求される重要情報は、今は解読できなくてもひとまず暗号化データを盗聴・入手し、将来新しい計算技術を確認してから解読する、いわゆる「harvest now, decrypt later」攻撃を仕掛けることが可能性であり、今すぐにも対策が必要な状況です。

これに対し2種類の新技术の開発が進んでいます。一つは耐量子計算機暗号と呼ばれるもので、計算量的安全性には変わりありませんが、現在知られている量子計算アルゴリズムでは解読が困難と考

えられている数理構造を利用した暗号で、その実用化や標準化が進みつつあります。もう一つが、ここで紹介する量子暗号です。量子暗号は、将来どのような計算技術が出現しようとも、いかなる計算機でも原理的に解読が不可能な安全性（情報理論的安全性）を証明できる現状唯一の暗号方式です。

## ■量子暗号と量子鍵配送（QKD）ネットワーク

量子暗号は、図1に示すように、量子鍵配送（Quantum Key Distribution: QKD）とワンタイムパッド（One Time Pad: OTP）暗号化という2つのステップから構成されます。QKDは、光の量子である光子を使って、第三者には秘密の暗号鍵を送受信者間で共有する技術です。OTP暗号化はデータと同じサイズの暗号鍵を使って暗号化し、一度使った鍵は二度と使いまわさないという暗号化で、ここにQKDから供給された暗号鍵を使うことで、情報理論的安全性を達成します。なお、OTP暗号化と暗号化データの送受信は全て普通のコンピュータや通信回線で行われ、QKDの部分のみ、量子的な技術が必要になります。

このQKD送受信機をネットワーク接続し、安全かつ効率的に鍵を管理・配送する技術が量子鍵配送ネットワーク（QKDネットワーク）です（図2）。QKDネットワークでネットワーク上の任意の地点での暗号鍵の共有を行い、これを従来のネットワークに提供することで、情報理論的に安全な暗号鍵を使った新たなセキュリティサービスが可能になります。光ファイバーで接続されたQKDネットワークのほか、衛星通信によるQKD

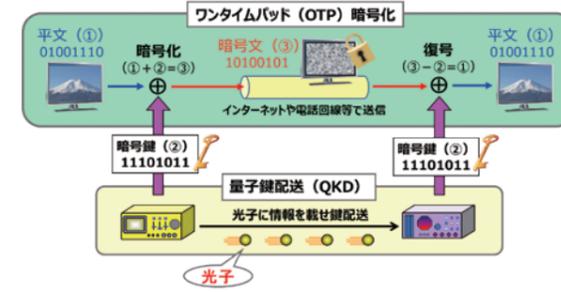


図1 量子暗号のしくみ

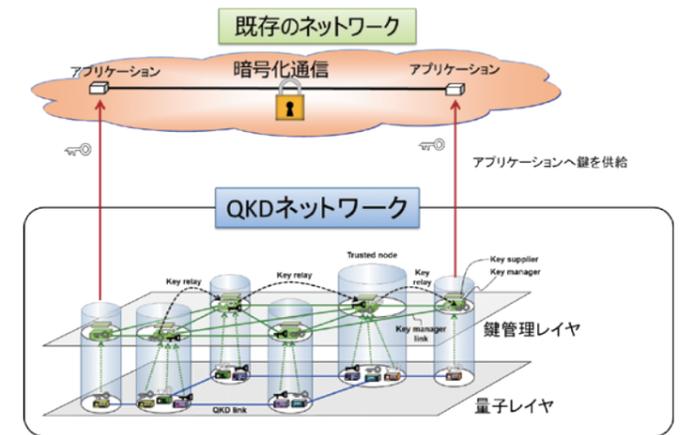


図2 量子鍵配送（QKD）ネットワークからの鍵供給

も開発が進んでおり、将来的にはこれらが統合されたグローバルなQKDネットワークに発展するものと期待されます。

## ■研究開発や実用化に向けた取組

NICTでは大学・企業と連携し、2000年代からQKD装置の技術開発やQKDネットワークの制御・管理技術の開発、そしてこれらの実証実験を進めてきました。2010年に産学官連携で構築したテストベッド「東京QKDネットワーク」は、世界最長期間の運用実績を有しており、今も様々な原理実証・社会実証実験が行われています。実用化についても、QKD装置自体は日欧中などの企業において既に製品化されており、またQKDネットワークによるサービスも、世界各国の通信事業者やスタートアップ企業などが事業化に向けて次々と動き出しています。

また、QKDネットワーク技術のグローバルな普及には、国際標準化も重要です。NICTでは、政府や企業・大学と連携し、国際電気通信連合電気通信標準化部門（ITU-T）や国際標準化機構・国際電気標準会議第一合同技術委員会（ISO/IEC SC1）、欧州電気通信標準化機構（ETSI）などにおいて国際標準化を積極的に推進しています。特にITU-Tでは、QKDネットワーク概要に関する国際標準勧告を始め、多数の勧告の開発・発刊に、日本が主導的に関わっています。

## ■QKDネットワークの活用と今後の展望：量子セキュアクラウド技術

量子暗号の高い秘匿性を社会で最大限

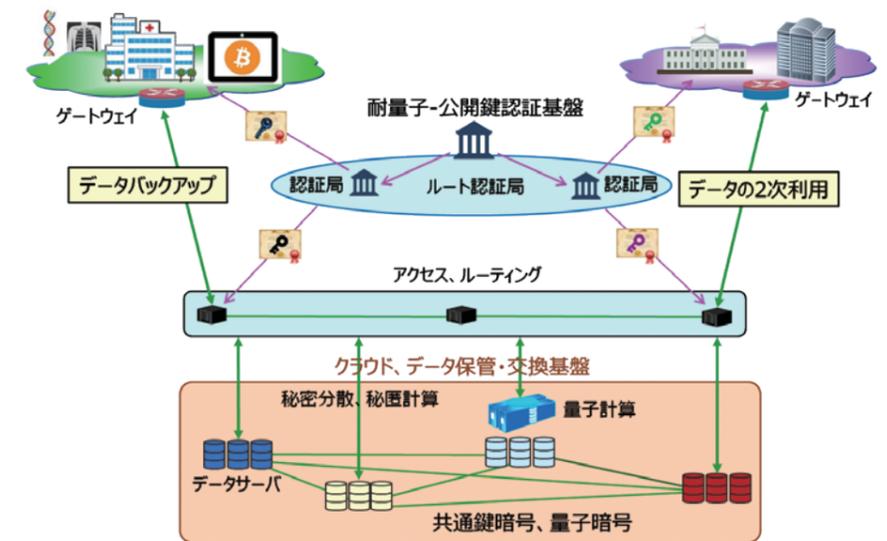


図3 量子セキュアクラウド技術

生かすためには、通信システムやセキュリティ技術全体を俯瞰し、応用技術を開発する必要があります。そのような技術の一つが、NICTが産学連携し開発を進めている量子セキュアクラウド技術です。これは、量子暗号、秘密分散、耐量子公開鍵暗号による認証基盤、秘匿計算等を融合することにより、どんな計算機でも解読や改ざんのできないデータバックアップ保管と計算処理を実現する技術です（図3）。データを複数のサーバに分割・暗号化して保管することにより、一部のサーバの情報が漏えいしても元データの復元が不可能な情報理論的な秘匿性と、一部のサーバの情報が消失しても残りの情報から元データが復元できる可用性を同時に実現できます。これは日本独自の技術であり、NICTと企業等により、医療を始め様々な分野で重要デー

タの保管に活用するための実証実験を進めています。このように、QKDネットワークを各種の現代セキュリティ技術と適切に融合することで、ネットワーク社会の新しいセキュリティ基盤が切り拓かれていくものと期待されます。NICT量子ネットワークホワイトペーパーでは、技術の仕組みや要求条件から社会展開の展望まで、より詳細な説明がなされています。

## 量子インターフェース

通信波長光子を用いた物質量子系の相互接続

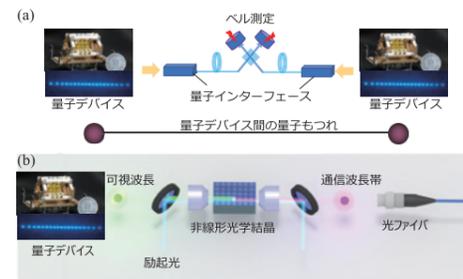


図1 a) 量子デバイスの量子的接続。量子デバイスともつれた光子に対してベル測定を行うことで、離れたノードにある量子デバイス間に量子もつれを形成する。  
b) 量子波長変換の概念図

**量**子コンピュータに代表される量子デバイスを相互接続することで、物理原理が許す最大限の機能を実現できる究極のネットワークを量子ネットワークと呼びます。離れた物質量子系同士を量子的に接続するには、それぞれの量子系と量子的にもつれた通信波長帯の光子を準備し、それらの量子干渉を観測することが必要となります。ここでは、物質量子系と量子的にもつれた通信波長帯光子を生成する量子インターフェースの概要について解説します。

量子コンピュータや量子メモリ、量子センサなどの量子デバイスは、超伝導体や単一原子、イオントラップといった様々な物質量子系で構成され、直接これらを量子的に接続することは困難です。そこで、これらの量子デバイス間での通信を媒介させるために、それぞれの量子デバイスと量子的にもつれた光子を生成します。例えば、イオントラップの場合、イオンのエネルギー準位と光子の偏光の間にもつれた状態を生成することができます。このように生成された光子に対して、ベル測定と呼ばれる特殊な干渉測定を行うことで、量子デバイス間に量子もつれを生成することができます(図1(a))。

物質量子系から出力された光子は、それぞれの物質に固有の波長を持ち、原子やイオンなら可視～近赤外、超伝導体であればマイクロ波といった波長域になります。しかし、これらの波長は光ファイバやストリップライン等の導波路内での減衰が大きく、そのままでは遠隔地に伝搬させることができません。そこで、光子の量子状態を保ったまま、波長のみを長距離通信に適した波長へ変換する

インターフェースが必要となります。このような変換技術は一般に量子インターフェースと呼ばれており、近年その研究開発が国内外において急速に進められています。

可視域から通信波長帯への波長変換手法として現在主流となっているのは、二次的非線形光学効果を用いる手法で、2011年に大阪大学のグループによって実証実験が行われました。この方式では、被変換光子と強い励起光を同時に非線形光学結晶へ入力させることで、理論的には100%の効率で光子の波長を通信波長帯へ変換することができます(図1(b))。さらに、NICTでは大阪大学やSussex大学と共同でCa<sup>+</sup>イオンからの蛍光光子(波長: 866 nm)の波長変換を実施し、通信波長帯の1,530 nmへ波長変換した後、10 kmの光ファイバ伝送に成功しています。

超伝導量子ビットの場合、相互作用する光子の波長はマイクロ波領域にあるため、マイクロ波領域から通信波長帯への変換を可能とする量子インターフェースが必要となります。NICTでは、表面弾性波を用いてマイクロ波光子を通信波長帯光子へコヒーレントに変換する量子インターフェースの研究開発を行っています。

今後は、これら量子インターフェースの更なる高効率化や、装置のチップ化による小型化の実現が期待されます。

## 量子センシング

光時計の量子ネットワーク

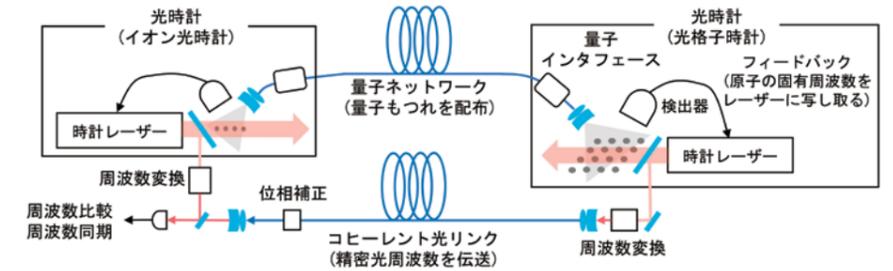


図1 光時計の量子ネットワーク基本構成

**量**子効果を利用した物理量計測は量子センシングと呼ばれており、ネットワーク化することで様々なユースケースが期待されます。原子時計は時空間を計測する量子センサの一つですが、ここでは光領域の原子時計(光時計)のネットワークについて紹介します。

量子効果の一つである量子もつれを巧妙に利用すると物理量計測に要する時間が短縮できることが知られています。一般的に物理量を粒子 $N$ 個で測定すると、一個での測定に比べて $1/\sqrt{N}$ の時間短縮が期待されますが、量子もつれを利用すると $1/N$ までの短縮が可能です。 $N=100$ の場合を考えると、量子もつれの有無で10倍の差が出ます。光時計では中性原子や原子イオンの固有周波数や、その時空間変動に起因する変動を計測します。 $M$ 個の拠点に配置した $N$ 個の原子から成る光時計を接続すると、固有周波数の測定時間を $1/\sqrt{NM}$ に短縮できると考えられます。さらに量子もつれをすべての原子に配布できれば $1/NM$ までの短縮が可能になると期待されます。また、ある拠点での時空間の変動は他の拠点との周波数差として計測されますが、その測定時間も量子もつれ利用で短縮が可能です。このように量子もつれを利用して時空間同期や時空変動観測の高速化を行う原子時計のネットワークが「光時計の量子ネットワーク」として提案されています。

光時計の量子ネットワークを実現するためには、光時計の持つ周波数精度を忠実に伝送する「コヒーレント光リンク」が前提とされます。全欧州では光時計をつなぐ全長2,000 km以上のコヒーレント光リンクが構築中で、国内でも首都圏

において理研、東大、NTT、NICTなどをつなぐコヒーレント光リンクの研究開発が進められており、全長240 kmのリンクが報告されています。2011年にNICTと東大が行った光ファイバ長60 kmの実験では、多数個の中性原子を用いた光時計である光格子時計を接続して、NICT本部と東大本郷キャンパスの標高差56 mによる一般相対論的重力シフトをリアルタイムで検出することに成功しています。

しかし、物理法則が許す限界まで時間短縮した時空間計測を行おうとすると、コヒーレント光リンクで接続された光時計に別途量子ネットワークで量子もつれを配布する必要があります(図1)。そのためには光時計を構成する原子と、量子もつれを配送する光子との間で量子もつれを保持する必要があります。イオン光時計については、2004年にマックスプランク量子光学研究所とNICTの協力によりカルシウムイオン(Ca<sup>+</sup>)の量子状態と相関を持つ光子の生成に成功しています。光子の波長866 nmはCa<sup>+</sup>固有の波長で光ファイバ伝送に適さないものでしたが、2018年には阪大、サセックス大学の協力により、伝送に適した波長1,530 nmの光子に変換し、10 kmの伝送後も量子状態が保持されていることを実証することに成功しています。

NICTが実証してきたこれらの技術と、原子間量子もつれ生成や光子による量子もつれ配布などの技術を統合すると、光時計の量子ネットワークが現実的なものとなってきます。NICTではその実証に貢献するため、量子効果を用いた光時計の高精度化や量子ネットワークの実証に向けた研究開発に取り組んでいます。



## 遠本 吉朗

(つじもと よしあき)

未来ICT研究所  
量子ICT研究室  
テニュアトラック研究員

大学院修了後、2017年にNICT入所。量子もつれ光子対源の開発やそれを用いた量子プロトコルの実証実験に関する研究に従事。博士(理学)。

## 早坂 和弘

(はやさか かずひろ)

未来ICT研究所  
量子ICT研究室  
副室長

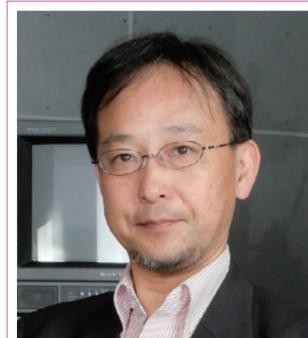
大学院修了後、1990年通信総合研究所(現NICT)入所。2021年4月より現職。イオントラップを用いた量子光学の研究に従事。大阪大学大学院基礎工学研究科特任准教授。博士(理学)。

## 吉原 文樹

(よしはら ふみき)

未来ICT研究所  
量子ICT研究室  
主任研究員

大学院終了後、理化学研究所を経て2014年にNICTに入所。超伝導量子回路を用いた量子情報処理に関する研究に従事。博士(工学)。



## 早坂 和弘

(はやさか かずひろ)

未来ICT研究所  
小金井フロンティア研究センター  
量子ICT研究室  
副室長

大学院修了後、1990年通信総合研究所(現NICT)入所。2021年4月より現職。イオントラップを用いた量子光学の研究に従事。大阪大学大学院基礎工学研究科特任准教授。博士(理学)。



## 井戸 哲也

(いど てつや)

電磁波研究所  
電磁波標準研究センター  
時空標準研究室  
室長

大学院修了後、ERATO五神プロジェクト、JILA(米国)を経て2006年NICT入所。2017年4月より現職。光格子時計やその時系への応用等広く時刻周波数標準分野の研究に従事。博士(工学)。

# 量子ネットワークの実現に向けて

## 地上系・衛星系統合のグローバルな量子ネットワークの構築・制御管理



**宮澤 高也**

(みやざわ たかや)

ネットワーク研究所  
ネットワークアーキテクチャ研究室  
研究マネージャー

大学院博士課程修了後、カリフォルニア大学デービス校訪問研究員を経て、2007年、NICTに入所。以来、主にネットワーク制御管理技術に関する研究に従事。2021年4月より現職。博士（工学）。

**武岡 正裕**

(たけおか まさひろ)

未来ICT研究所 研究統括

大学院博士課程修了後、2001年に独立行政法人通信総合研究所（現、NICT）に入所。以来、量子光学、量子情報理論、量子暗号に関する研究に従事。2021年4月より慶應義塾大学理工学部電気情報工学科教授 兼 NICT未来ICT研究所研究統括。博士（工学）。

**豊嶋 守生**

(とよしま もりお)

ネットワーク研究所  
ワイヤレスネットワーク研究センター  
研究センター長

1994年郵政省通信総合研究所（現NICT）入所。ETS-VIによる光衛星通信実験に従事し、その後NASDA（現JAXA）出向、ウイーン工科大学在外研究を経て、OICETS、SOTA、ETS-IX等の衛星搭載通信機器の研究開発に従事。博士（工学）。

2040年頃には、量子コンピュータや量子センサ等が相互接続されたグローバルな量子ネットワーク（量子インターネット）の構築及び超長距離量子暗号や分散量子コンピューティング、光時計量子ネットワークの時空間同期、量子センサーネットワークといった未来の量子アプリケーション・サービスの実現が期待されています。本稿では、地上系及び衛星系を統合したグローバルな量子ネットワークの実現に向けて今後取り組むべき制御管理技術について紹介します。

### ■未来の長距離・超安全な通信サービス及びアプリケーションを支えてくれる量子ネットワーク技術

現在、量子鍵配送（QKD）技術及び関連装置の進展により、量子暗号通信の社会展開が期待されています。しかし、電気処理による鍵リレーを行うトラステッドノードで長距離化及びネットワーク化を実現する方法は、早期実用化が見込め

る一方で、中継点が絶対安全とは言えず量子暗号通信の長距離化に限界が生じてしまうことに加え、量子情報を送受信の末端間で直接配信できないので、大規模分散量子コンピューティングや秘匿量子計算、光時計量子ネットワークによる時空間同期、量子センサーネットワークといった未来のアプリケーションを実現できません。そこで、量子メモリや量子インターフェース技術等を使って、量子情報を遠距離間で直接やり取りすることで、量子コンピュータや量子センサ等が量子的に相互接続され、かつ地上系と衛星系が統合したグローバルな量子ネットワーク（量子インターネット）の実現に向けた研究開発や国際標準化議論が、世界的に進められています。将来、大規模な量子ネットワークが構築されることで、先述のような未来のアプリケーションが実現し、人々の安心・安全・便利な生活や高度な社会経済活動の実現が期待されます（図1）（「NICT量子ネットワークホワイトペーパー\*」 p.14 図8参照）。

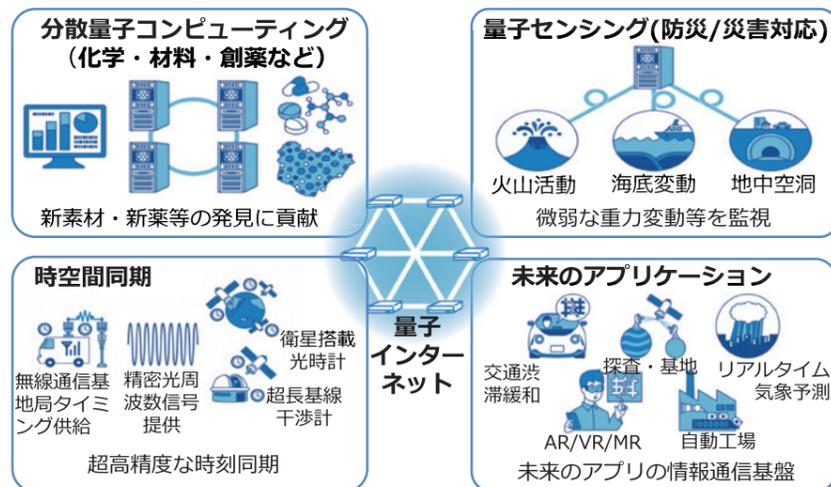


図1 量子ネットワークにより実現するアプリケーション例

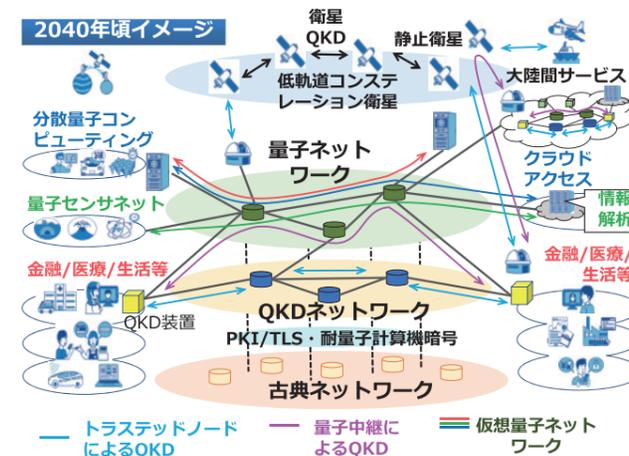


図2 2040年頃の量子ネットワークの進展イメージ

### ■多種類の量子ネットワークを収容する仮想量子ネットワーク技術

今後、技術の進展により、QKDネットワークのサービス運用開始、量子中継を使ったネットワークの実用化、古典ネットワークと量子ネットワークの共存、さらには地上系及び衛星系を相互接続したQKDネットワークのサービス拡大など、2020年代後半から2030年代にかけて、段階的に普及・進展していくことが想定されています。そして、2040年頃には、地上系及び衛星系を統合したグローバルな量子ネットワークが構築され、QKDのみならず、様々な量子アプリケーションを提供する多種類の量子ネットワーク及びプロトコルを共通の物理ネットワーク基盤に収容するための、仮想量子ネットワーク技術がサービス展開されることが期待されます（図2）（「NICT量子ネットワークホワイトペーパー\*」 p.18 図13参照）。仮想量子ネットワーク技術により、ネットワーク事業者が管理する物理機器を節約して低コスト化を図りつつ、多様なアプリケーション要件/要求（暗号鍵サイズや、通信性能、量子アプリケーションの安定性等）を満たすことが可能になると考えられます。将

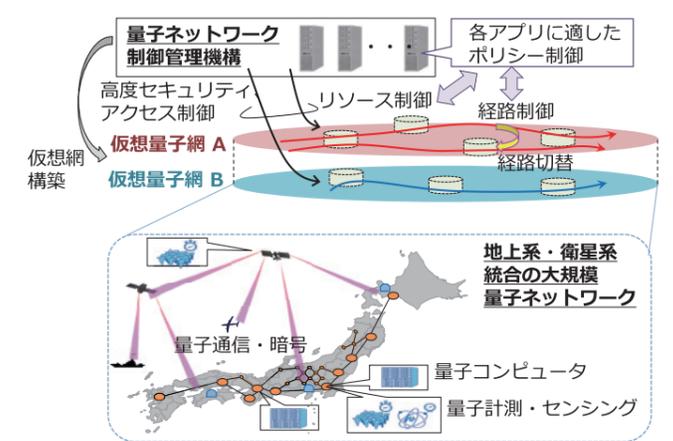


図3 地上系・衛星系統合の大規模量子ネットワークにおける統合制御管理イメージ

来、量子アプリケーション事業者やコンテンツ事業者の要求に応じて、インフラ事業者や量子仮想ネットワークオペレータ（Virtual Network Operator: VNO）が、様々な仮想量子ネットワークを構築し、量子アプリケーション・サービスを安定的かつ安価に提供することが想定されます。

### ■量子ネットワークのための制御管理技術

仮想量子ネットワーク技術のリソース効率利用や多様なサービス提供といった利点を最大限に活かすには、ネットワーク全体の効率的な制御管理技術が必要です（図3）（「NICT量子ネットワークホワイトペーパー\*」 p.29 図23参照）。様々なアプリケーションの要件/要求を満たす仮想量子ネットワークを構築し、さらにネットワークのトラフィック変動や障害検知などの状況変化に対応するため、経路動的選択・切替え、リソース動的割当などを高速かつ効率的に行う仕組みが、アプリケーションの安定性向上の点で重要です。また、古典ネットワークにおいて盛んに研究開発されているポリシー制御（例えば Software Defined Network: SDN）やネットワーク内処理技術（例えば情報指向型通信やネットワークコー

ディング）などを応用することが有効と考えられます。さらに、制御管理機構の安全・安心を保証するための高度セキュリティ技術や、グローバルな仮想量子ネットワークを実現するための地上系・衛星系統合技術も将来的に求められます。

### ■今後の展望

今後ますます普及・進展する量子技術により、量子暗号通信を始め、様々な量子アプリケーション・サービスの実用化及び社会展開が加速されるものと期待されます。また、グローバルな量子ネットワーク構築、未来の多様な量子アプリケーション・サービスを提供するための仮想化、及びそれを実現するための量子ネットワーク制御管理技術を開発していく必要があります。NICTは引き続き、量子デバイス技術の進展を踏まえつつ、仮想化技術や経路制御技術、セキュリティ高度化技術などの要素技術の研究開発を進め、量子ネットワークの実現を目指し取り組んでいきます。

\* [https://www2.nict.go.jp/idi/common/pdf/NICT\\_QN\\_WhitePaperJP\\_v1\\_0.pdf](https://www2.nict.go.jp/idi/common/pdf/NICT_QN_WhitePaperJP_v1_0.pdf)

## 「情報通信研究機構 新技術説明会」を開催

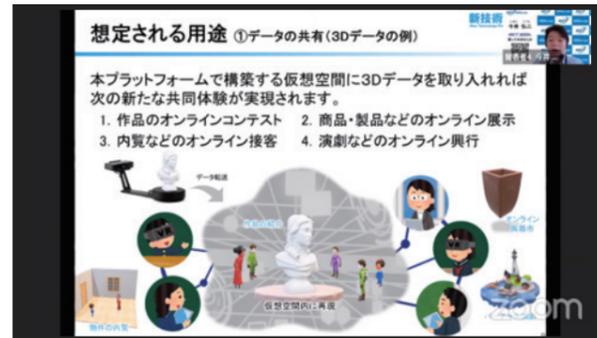
イノベーション推進部門 知財活用推進室

2021年10月14日、「情報通信研究機構 新技術説明会」をNICTと国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の共催で開催しました。今回は新型コロナウイルス感染拡大対策としてオンラインで開催しました。新技術説明会は、公的研究機関から生まれた研究成果の実用化を目的に、研究者自らが企業関係者に向けて、直接プレゼンテーションする特許の説明会です。本説明会では、蛍光顕微鏡の3次元画像に対する深部分解能改善技術、テラヘルツ波吸収損失が小さい有機電気光学ポリマーデバイス作製技術、安全・高速・遠距離通信が可能な物理レイヤ暗号、バーチャル空間で複数人が共同体験できるプラットフォームの計4件の新技術（表）について、発明者である研究者自らが発表しました。プレゼンテーションは学会発表とは異なり従来技術・競合技術との比較、新技術の特徴、想定される用途などを説明し、プレゼンテーションの最後には企業への期待を示すことで、連携パートナー募集をアピールするスタイルとしました。

本説明会には、大企業や中小企業の方々を中心に438名の申込みがあり、当日も多くの方に聴講いただきました。各発表終了後には、併設された技術相談・質問ルームにて、個別質問や相談を多数いただき、NICTの技術への関心の高さがうかがえました。

講演後も企業から発表に関する問合せや面談希望が寄せられており、個別に回答や打合せを設定して対応しています。今後、この説明会での講演が共同研究や技術移転等に結び付き、

研究成果の社会展開につながるよう、技術ニーズを踏まえつつ、産業界との連携を促進していきます。



講演配信時の様子（今井弘二イノベーションプロデューサー）

### 連携・ライセンスについてのお問い合わせ先

イノベーション推進部門 知財活用推進室  
Mail : ippo@ml.nict.go.jp

JSTによるアーカイブページ  
[https://shingi.jst.go.jp/list/list\\_2021/2021\\_nict.html](https://shingi.jst.go.jp/list/list_2021/2021_nict.html)

情報通信研究機構 新技術説明会で発表した4件の新技術

技術	発表タイトル	概要
(1)	生体深部のリアルタイム観察に適した蛍光顕微鏡	脳などの生体深部を観察するための蛍光顕微鏡では、生物試料が厚みを持つため光学収差により分解能が低下します。今回の技術は、通常の蛍光顕微鏡に特別な装置を付加することなく、3次元画像に対する演算処理のみで深部分解能を改善します。生体毒性となる過度の光照射を不要とし、安価・高速・簡単に分解能が向上できます。
(2)	Beyond 5G 無線通信に向けた有機電気光学ポリマーデバイス技術	有機電気光学ポリマーは、高効率かつ数百 GHz 以上の超高速光変調を可能にすることから、Beyond 5G 時代の光ファイバー無線における無線から光信号への変換や電界センシング、広帯域テラヘルツ波 (0.1 ~ 10 THz) 発生・検出等への応用が期待できます。開発技術により、テラヘルツ波の損失を大幅に抑制したデバイス開発が可能になりました。
(3)	安全・安心なグローバルネットワークに向けた物理レイヤ暗号	物理レイヤ暗号は指向性が高いという光通信の性質を活用し、さらに盗聴者の能力を予測することにより、量子暗号に次ぐ安全性を担保しつつ、高速・遠距離な暗号通信が実現できます。今回の技術はドローンや航空機への搭載が容易な、大気ゆらぎなどの擾乱に強い物理レイヤ暗号を実現します。
(4)	ニューノーマル社会における共同体験プラットフォーム技術	バーチャル空間内の様々なシーンを複数人で一緒に体験することができます。360度の実映像や3Dスキャンデータを共有したり、シーンが変わってもユーザの途切れない繋がりを実現したりすることができるため、これまでになかった臨場感ある実映像空間内でユーザ同士の新たな体験が期待されます。

## 未来の量子ネットワーク実現に向けた 光量子制御技術の高度化



### 達本 吉朗

(つじもと よしあき)

未来ICT研究所  
量子ICT研究室  
テニユアトラック研究員  
博士 (理学)

●経歴  
1989年 奈良県にて誕生  
2012年 大阪大学基礎工学部電子物理科学科卒業  
2017年 大阪大学基礎工学研究科博士課程修了後、NICT入所。現職に至る

●受賞歴等  
2014年 得居奨励賞 (大阪大学大学院)

### 一問一答

- Q 研究者になってよかったことは？  
A よく分からないことを考えることが好きなので、それをそのまま仕事にできるのは幸運だと思います。
- Q 最近ハマっていること  
A 高山や公園で採ってきた植物を適当に調理することで、季節ごとに色々ありますが、秋はムカゴや銀杏などがおすすめです。
- Q 研究者志望の学生さんにひとこと  
A 楽観的であることがなにより重要だと思います。私は、迷ったときは「まあなんとかなるやろ」と思うようにしています。



量子情報科学は情報理論と量子力学の出会いによって誕生した分野です。量子力学には、不確定性関係や量子もつれといった、私たちの直感に反する奇妙な物理現象が数多く存在します。量子情報科学の面白いところは、それらの性質を巧く活用し、通常の情報処理技術を超える機能を実現するところです。

現在、量子情報科学分野での大きな目標となっているのが、お互いに離れた量子デバイス同士を量子もつれによって接続・ネットワーク化した「量子ネットワーク」の構築です。量子もつれは古典物理学では説明できない量子的相関のことで、それを離れた通信ノード間で共有することにより、分散・秘匿量子コンピューティングや超高精度時刻同期などの量子プロトコルが実行可能になります。量子情報を担うのは原子や電子、光といった様々な量子系ですが、量子通信に利用できるのは光の量子である光子だけです。つまり、量子ネットワークの構築には光

の生成・制御技術が必要不可欠であるといえます。

私は、これまで自発的パラメトリック下方変換と呼ばれる非線形光学効果を用いた量子もつれ光子対源の開発を行ってきました。この様な光子対源に求められるのは、量子もつれ光子対の質を落とさずに高度化することです。私たちは、フォトニクス実験で使用される高速変調技術を高効率な導波路型非線形光学結晶と組み合わせることにより、超高速量子もつ

れ光源を新規開発することに成功しました。これにより量子もつれ光子対生成のクロックレートをGHzレベルまで高速化できるようになりました。

量子ネットワークの実現には、このような光量子制御技術の高度化に加えて、量子メモリや量子インターフェースといった様々な要素技術の開発も重要です。私たちは今後もこれら量子技術の研究開発を推進していきます。

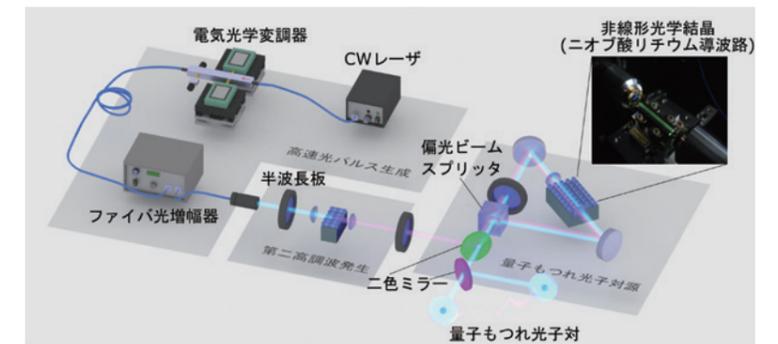


図 開発した高速量子もつれ光子対源

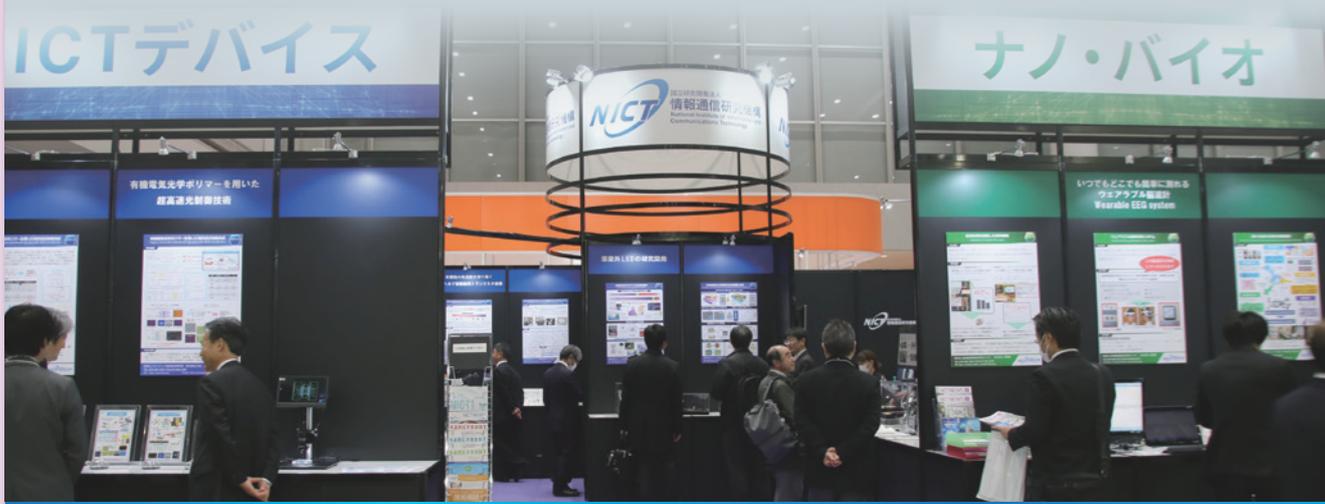
NICTブース 東2ホール

会場 **東京ビッグサイト 東ホール**

開催日 **2022年1月26日(水)～28日(金)**



International Nanotechnology Exhibition & Conference  
**nano tech 2022**  
 国際ナノテクノロジー 総合展・技術会議



公式 web site

未来ICT研究所では、未来の情報通信の基盤技術についてデバイス、バイオ、超  
 高周波、量子通信、脳科学など幅広い分野で研究開発を進めています。その最新  
 の研究内容を展示します。

<https://www.nanotechexpo.jp/main/>

第26回

# 震災対策技術展

自然災害対策技術展

**2022年2月3日(木)・4日(金)**  
**会場：パシフィコ横浜 Dホール**

入場時間：各日 10:00～17:00

入場方法：当日登録制 受付にて、アンケートに記入後、  
 入場証と交換。2日間有効

公式Webサイト

<https://www.shinsaiexpo.com/yokohama/about/>

気象予測の精度向上に向けて地上デジタル放送  
 波を利用した観測システムの展開状況、技術試  
 験衛星9号機を用いた災害時通信の研究開発の  
 状況、災害時に機能する分散型ネットワーク基  
 盤や被災対応支援システムについての研究成果  
 を紹介します。

(写真) 第25回「震災対策技術展」横浜でのNICTブースの様子

