3.8.2 量子ICT先端開発センター

センター長　　武岡 正裕　ほか13名

量子通信技術による新しいネットワーク社会の実現を目指して

■概要

現在の情報通信技術は19世紀に確立された物理法則に基づいており、既に光ファイバの電力密度限界や最新技術による暗号解読の危機が指摘されるなど、今後も次々と物理的限界を迎えることが予測される。このような限界を打破するため、究極の物理法則「量子力学」に基づいて、絶対安全な量子暗号技術や関連する物理レイヤセキュリティ技術、従来理論の容量限界を打破する量子情報通信の研究開発（量子ノード技術）を自ら研究と産学官連携により戦略的に進めている。平成29年度は、NICTが世界で初めて実証した量子鍵配送秘密分散ストレージネットワークに、新たな実用的機能を実装した。一方、空間通信においても、宇宙通信研究室が開発した超小型衛星（SOCRATES）に搭載された超小型光トランスポンダ（SOTA）を用いた衛星–地上間光空間通信での量子通信の受信機に適用し、超小型衛星における量子通信の基礎実験に世界で初めて成功した。また、量子計測標準技術においては、インジウムイオンの新たな冷却法（共同冷却）を開発し、電磁波研究所時空標準研究室との連携により、インジウムイオン光周波数標準の確度を従来の世界最高値の1/10に改善することに成功した。量子インターフェース技術についても、NICTが世界で初めて成功した超伝導量子回路における人工原子と光子の深強結合現象の理論解析を進め、その物理機構を明らかにした。

■平成29年度の成果

1．量子暗号・物理レイヤセキュリティ技術

第４期中長期計画では、量子暗号の基幹技術である量子鍵配送技術を現在のネットワークのセキュリティ技術や、（量子ではない）最新の現代暗号技術と融合した、総合的なセキュリティ技術の実証を目指している。また、これまで開発を進めてきたファイバーネットワーク上での量子鍵配送に加え、衛星通信等を念頭においた光空間通信網への拡張も進めている。

平成29年度は、前年度に世界で初めて実証に成功した、Tokyo QKD Network上に構築した情報理論的に安全な超長期安全性を保証する量子鍵配送秘密分散ストレージシステム（図１）に、分散データの劣化防止のための秘匿更機能（シェアリニューアル）を新たに実装し、その動作実証に成功した。秘密分散ストレージは、守りたいデータを暗号化・分割し、複数の離れたデータセンターに安全に保存・バックアップする技術である。NICTのシステムでは、データセンター間の回線を量子暗号で秘匿化することにより、超長期の安全性を可能にする。一方、保存されたデータは、長期間経つとハードディスクの破損等により、劣化する可能性がある。このためデータの情報を漏らすこと無しに、劣化したデータを修復する必要がある。これがシェアリニューアルの機能である。本機能の実現は、量子暗号秘密分散ストレージシステムの実用化を進める上で非常に重要な成果となった。今後は、秘匿性を保ったまま演算を行う秘匿計算技術の実装など、社会実装に向けた研究開発に引き続き取り組む。

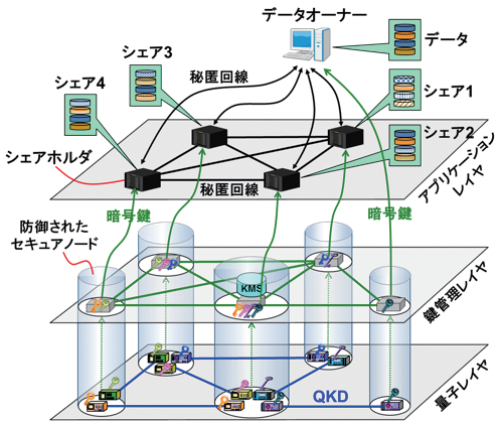


図1　東京QKDネットワークに実装された量子鍵配送秘密分散ストレージ

一方、空間伝送の量子技術として開発した光子信号識別技術を、宇宙通信研究室が開発した、重量50 kg以下の超小型衛星（SOCRATES）に搭載された超小型光トランスポンダ（SOTA）を用いた衛星–地上間光空間通信での量子通信の受信機に適用し、量子通信の基礎実験を実施した。超小型衛星から送信された平均光子数0.14個／パルス程度の微弱信号は地上局で受信され、この信号から時刻同期、偏光軸整合及び光子列のビットパターン復号を行うことに成功した（図２）。超小型衛星による量

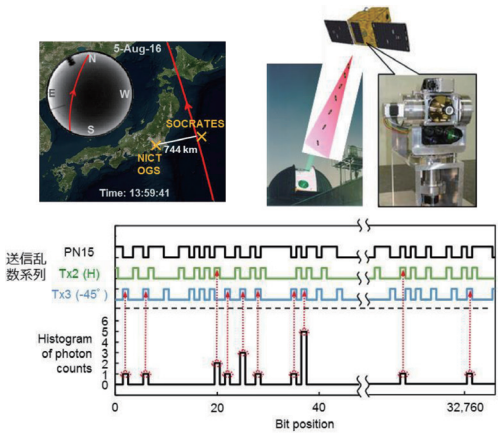


図2　左上：NICT地上局（OGS）と超小型衛星（SOCRATES）の軌道（赤線）。右上：衛星、地上局及び超小型光トランスポンダ（SOTA）の写真。下：送信した乱数系列の信号と地上局における受信信号

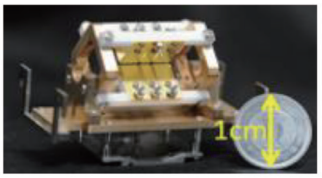
子通信基礎実験の成功は、世界初の成果である。本成果は、本格的な衛星量子通信の実現に向けた基盤技術であり、今後の更なる技術開発により、将来の衛星コンステレーション時代における超高秘匿衛星通信網の実現が期待される。

2．量子ノード技術

将来のネットワークノードにおける多機能化や、抜本的な低消費電力化、また超微弱信号の受信技術などを実現するためには、光信号の量子力学的な性質を直接自在に制御する技術が必要となる。第４期中長期計画では、その基礎技術開発及び計測技術への展開などを目指し、光量子制御技術、量子計測標準技術、量子インターフェース技術等の開発に取り組んでいる。

平成29年度は、量子計測標準技術に関してインジウムイオンの新たな冷却法（共同冷却）を開発し、電磁波研究所時空標準研究室との連携により、インジウムイオン光周波数標準の確度を従来の世界最高値の1/10に改善することに成功した（図３）。インジウムイオンによる光周波数標準は、将来の周波数標準の候補と考えられていたが、2007年のマックス・プランク研究所における成果から進展がなく、今回10年ぶりに最高確度が更新されることとなった。この成果は、国際度量衡局の長さ・周波数標準合同ワーキンググループにおいて、原子時計遷移の推奨周波数改訂に採用された。推奨周波数とは、「メートル」定義の実現に用いてよいことが認定された周波数であり、国際周波数標準に大きく貢献する成果となった。

量子インターフェース技術については、超伝導回路内のマイクロ波光子寿命改善に取り組み、単一光子レベル



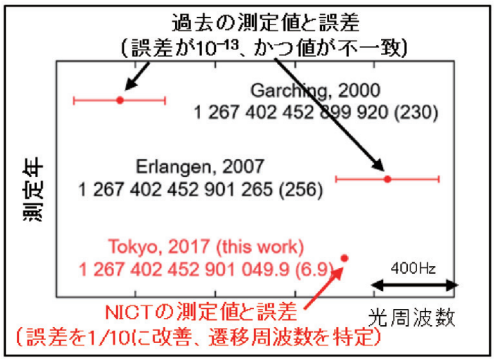


図3　上：線形イオントラップの写真。下：インジウム光周波数標準の過去の周波数測定値及び確度と今回のNICT成果の比較

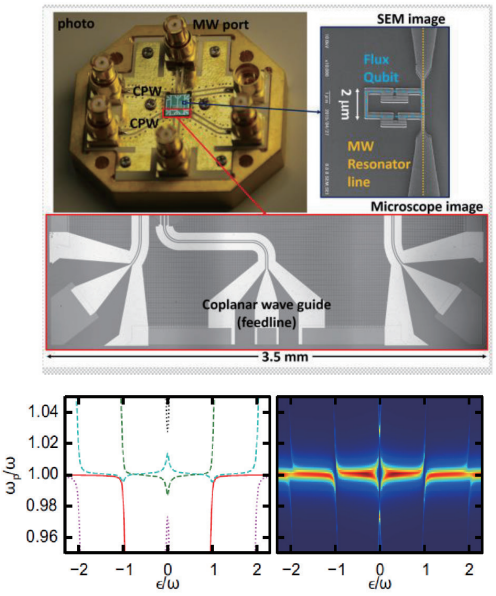


図4　上：超伝導量子回路写真。下：理論から予測された超伝導人工原子－光子 結合系の遷移スペクトル

でQ＞１×10^6を達成した。また、半導体スピンからの発光と光ファイバ単一モード間結合効率を従来法の３倍以上に改善する方法の理論提案を行った。並行して光・物質 超強結合系基底状態の超放射相転移が生じる諸条件に関する理論的考察を行った。また、光・物質結合系の遷移スペクトルから１桁以上のレンジにわたり結合強度を推定できる方法を考案した（図４）。これらの理論成果を統合することにより、光子寿命が改善された回路量子電磁力学（circuit QED）系を用いて、量子インターフェースの基盤技術となる光子・超伝導回路の融合素子を設計する準備が整った。