国立研究開発法人
情報通信研究機構

プレスリリース
2017年7月11日
国立研究開発法人情報通信研究機構

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

～宇宙と地上を結ぶ超長距離・高秘匿な衛星通信網の構築に向けた大きな一歩～

【ポイント】

- 光子一個一個のレベルで情報をやり取りする量子通信を衛星と地上局間で実証
- 超小型衛星を利用した「衛星コンステレーション構築」に向けた取組
- 衛星通信網の長距離・高秘匿化を低コストで実現する技術。宇宙産業の成長に貢献を期待

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT、理事長: 徳田 英幸）は、超小型衛星（SOCRATES）[*1]を使い、東京都小金井市にあるNICT光地上局との間で、光子[*2]一個一個のレベルで情報をやり取りする量子通信[*3]の実証実験に成功しました。SOCRATESは、重量50kg、サイズ50cm角で、衛星量子通信用途としては世界最軽量・最小サイズの衛星です。この衛星にはNICTで開発した小型光通信機器（SOTA）[*4]が搭載されており、毎秒1千万ビットの速度で光の信号を地上局へ送信します。地上局では光子一個一個の到来を検出しながら信号を復元することで、高度600kmを秒速7kmで高速移動する衛星との量子通信を実現しました。超長距離・高秘匿な衛星通信網の構築に向けた大きな一歩となります。

本成果により、これまで大型衛星を必要とした衛星量子通信が、より低コストの小型衛星で実現できるため、多くの研究機関や企業による開発が可能になると期待されます。今後の宇宙産業の発展に向け新たな1ページを拓く成果です。なお、この成果は英国科学誌「*Nature Photonics*」のオンライン版に日本時間7月11日（火）午前0時に掲載される予定です（誌上掲載は8月号）。

※ 本研究開発の一部は、内閣府 総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の支援を受けています。

【背景】

今世紀に入り、小型衛星を低コストで打ち上げる技術が進展し、多数の衛星を連携させ、地球全域をカバーする通信網や高解像度の観測網を形成する『衛星コンステレーション』構築への取組が活発化しています。そこでは、短時間で大量の情報を安全に地上まで送信する技術が必要になりますが、従来の電波やマイクロ波は使用できる周波数帯が既に逼迫しており、通信の大容量化には限界があります。これに対して、レーザを用いる衛星光通信は、広大な周波数帯を持ち、電力効率の高い伝送が可能なため、衛星通信網を支える重要な技術として期待されています。

また、更なる長距離・高秘匿化を実現できる衛星量子通信の研究開発も、日本、中国、欧米各国で活発に行われています。2016年8月には、中国科学技術大学を中心とするチームが600kgの大型の量子科学技術衛星を打ち上げ、2017年6月に1,200km離れた2つの地上局に向けて衛星から量子もつれ配信[*5]を行う実験に成功しました（最近の研究開発動向については補足資料参照）。

【今回の成果】

NICTでは、超小型衛星（SOCRATES）に搭載された衛星搭載用小型光通信機器（SOTA）（図1参照）から、2つの偏光状態に0,1のビット情報をランダムに符号化した信号を毎秒1千万ビットの速度（10メガビット/秒）で地上局へ送信しました（図2a, b参照）。東京都小金井市にあるNICT光地上局では、口径1mの望遠鏡でSOTAからの信号を受光し（図2c、補足資料図3参照）、量子受信機まで導波してビッ

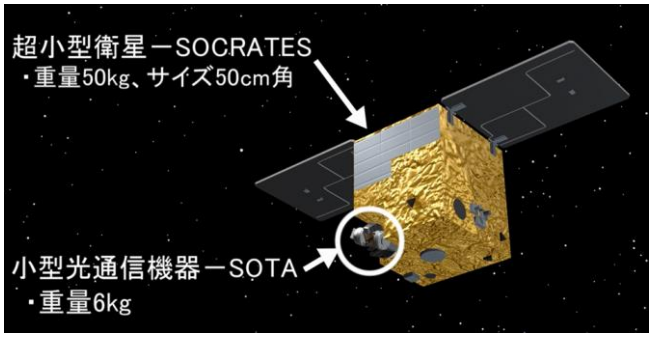


図1 SOCRATESとSOTAのイメージ図

ト情報を復号しました（図 2d 参照）。

地上局に届いた信号には、パルス当たり平均 0.1 光子という微弱なエネルギーしか含まれていません。NICT は、この微弱信号を低雑音で検出できる量子受信機と、微弱な光子検出信号から直接、衛星・地上局間での時刻同期及び偏光軸整合を確立する技術を世界で初めて開発し（補足資料図 4～図 7 参照）、重量 50kg の超小型衛星による量子通信を世界で初めて実証しました。これは、従来の衛星光通信より更に高効率な通信や、情報漏えいを完全に防ぐ量子暗号[*6] の基盤技術となります。

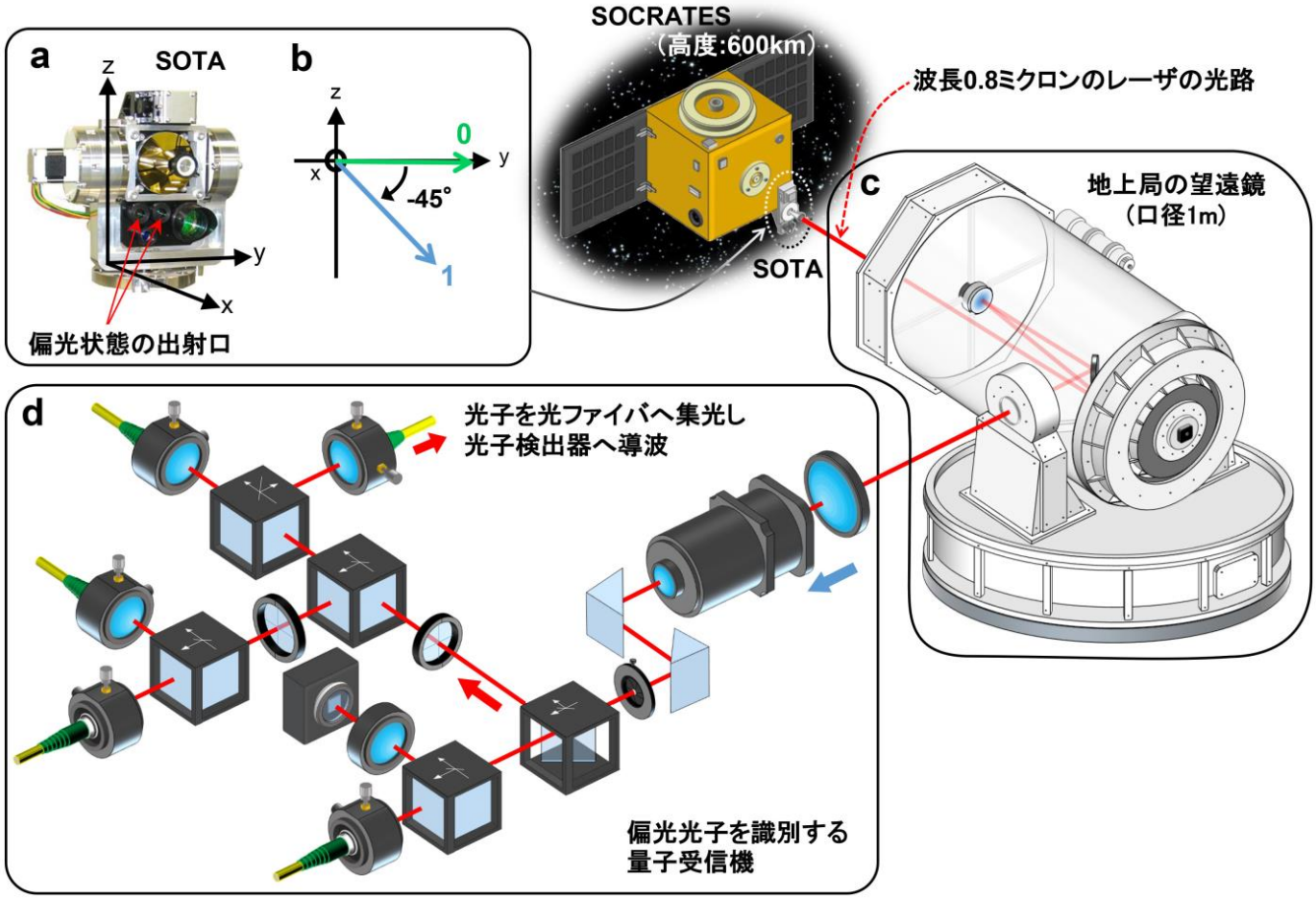


図 2　超小型衛星 SOCRATES と光地上局の概要

a. SOTA の概観写真　b. 0,1 のビット情報を符号化する偏光状態　c. 光地上局の望遠鏡　d. 量子受信機の構成図

【今後の展望】

今回開発した衛星量子通信技術は、これまで多額の予算と大型衛星が必要だった衛星量子通信を、より低コストの軽量・小型衛星で実現することを可能にします。したがって、多くの研究機関や企業でも開発が可能になると期待されます。さらに、限られた電力で超長距離の通信が可能となることから、探査衛星との深宇宙光通信の高速化にも道を切り拓くものです。

今後、更なる光子伝送の高速化と捕捉追尾技術の高精度化により、衛星・地上間での量子暗号の実現と最終的には衛星コンステレーション上での安全な鍵配送や大容量通信の実現を目指します。

衛星量子通信実験のイメージビデオ ⇒ https://youtu.be/pyLrVaubm90

＜掲載論文＞

掲載誌: *Nature Photonics* 電子版（誌上掲載は 8 月号）
DOI: 10.1038/nphoton.2017.107
URL: http://www.nature.com/nphoton/index.html

掲載論文名: Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class micro-satellite

著者: Hideki Takenaka, Alberto Carrasco-Casado, Mikio Fujiwara, Mitsuo Kitamura, Masahide Sasaki, and Morio Toyoshima

＜用語解説＞

***1 超小型衛星（SOCRATES）**

株式会社エイ・イー・エス（代表取締役社長：吉田　忠彦）が、小型衛星標準バス技術の実証と先進的なミッション／要素技術の軌道上実証機会の提供を目的として開発した 50kg 級、サイズ 50cm 角の超小型衛星。SOCRATES は Space Optical Communications Research Advanced TEchnology Satellite の略。3 軸姿勢制御や GPS 受信機による軌道位置決定機能を有する。さらに、NICT が開発した小型光通信機器（SOTA）[*4] を搭載している。
2014 年 5 月 24 日に H-ⅡA ロケット 24 号機の相乗り副衛星として打ち上げられた。打上げ後、高度 600km の太陽同期軌道に無事投入され、衛星バスの基本機能確認試験を完了し、通信ミッションへ順調に移行した。衛星の運用は 2016 年 11 月に終了した。

***2 光子**

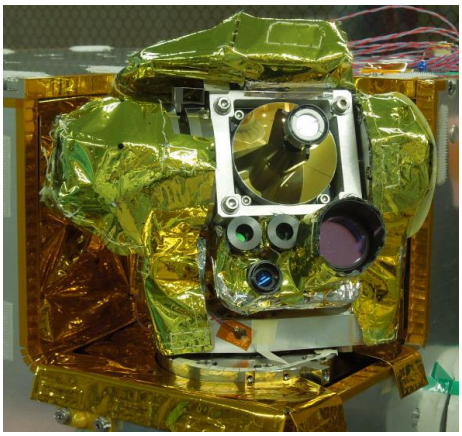
量子力学によれば、光は“波”の性質と“粒子”の性質を併せ持っている。光の粒子は「光子」と呼ばれ、これ以上分割することのできない光のエネルギーの最小単位である。例えば、光通信で通常用いられる 1.5 ミクロンの波長では、1 光子のエネルギーは約 1000 京分の 1（1 京は 1 の後に 0 が 16 個ついた単位）ジュールという極めて小さな値になる。単一光子とは、パルス内に光子が一個しかない状態のことをいう。

***3 量子通信**

電磁気学の法則に基づいて設計されている従来の電波通信や光通信に対して、量子力学まで取り入れて設計された新しい通信技術。光子一個一個のレベルで情報を制御し伝送、受信することにより、従来の光通信より桁違いに小さな送信電力で大容量通信を実現する技術。より広義には、盗聴を確実に検知し安全に鍵配送を行う量子暗号[*6] や、量子テレポーテーションなど新しい通信プロトコルなども含む。

***4 小型光通信機器（SOTA）**

NICT が開発した衛星搭載用の超小型光通信機器で、望遠鏡直径は約 5cm、質量は約 6kg、サイズは縦 17.8cm、横 11.4cm、高さ 26.8cm である（右図の写真）。SOTA は Small Optical TrAnsponder の略。超小型衛星 SOCRATES[*1] に搭載されている。地上の光ファイバ網と同じ 1.5 ミクロンの波長の光を用いた光通信実験を低軌道衛星と地上間で行い、将来の宇宙光通信技術開発に必要な基礎的な知見を得るとともに、量子通信技術について軌道上実証を行うために開発された。2014 年 8 月以降、1.5 ミクロン波長帯や 0.98 ミクロン波長帯での光通信や 0.8 ミクロン波長帯での量子通信の実証実験が行われてきた。



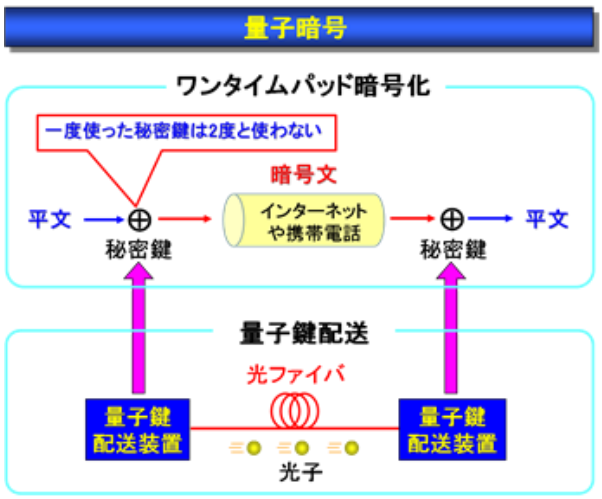
小型光通信機器（SOTA）

***5 量子もつれ配信**

2 個以上の量子（光子や電子のような粒子）が、古典力学的には考えられない特殊な相関をもって結びついている状態のことを量子もつれ状態と呼び、代表的な量子力学的現象の一つである。この量子もつれ状態を構成する量子のうち、ある 1 つについての情報が測定によって確定すると、それに伴って別の粒子についての情報も確定する。量子もつれ配信とは、遠隔 2 地点間に量子もつれ状態を送信し、2 地点間に量子もつれ状態を形成する操作を指す。

***6 量子暗号**

量子暗号は、右図に示すように、「量子鍵配送」による秘密鍵の共有と、それを用いた「ワンタイムパッド暗号化」から構成される。
量子鍵配送では、送信者が光子を変調（情報を付加）して伝送し、受信者は届いた光子一個一個の状態を検出し、盗聴の可能性のあるビットを排除（いわゆる鍵蒸留）して、絶対安全な秘密鍵（暗号化のための乱数列）を送受信者間で共有する。変調を施された光子レベルの信号は、測定操作をすると必ずその痕跡が残る（ハイゼンベルクの不確定性原理）ため、この原理を利用して盗聴を見破る。



関連する過去の報道発表

2015 年 6 月 3 日「低軌道衛星と地上との間で 1.5 ミクロン光による光衛星通信に成功」
http://nict.go.jp/press/2015/06/03-2.html

補足資料

衛星量子通信技術に関する研究開発動向

今世紀に入り、小型衛星を低コストで打ち上げる技術が進展し、高度 600km の低軌道（太陽同期軌道）を周回する多数の衛星を互いに連携させることにより、地球全域をカバーする通信網や高解像度の観測網を形成する『衛星コンステレーション』構築に向けた取組が活発化しています。衛星コンステレーション上では、多くの重要情報やビジネス価値の高い情報が流れ蓄積するため、短時間で大量の情報を安全に地上に送信する技術が必要になります。しかしながら、衛星通信で使われる電波やマイクロ波の周波数帯は既に逼迫しており、周波数の許認可取得も容易ではなく、通信の大容量化にはおのずと限界があります。これに対して、レーザを用いる衛星光通信は、広大な周波数帯を持ち、電力効率の高い伝送が可能なため、衛星通信網を支える重要な技術として期待されています。衛星光通信は、過去 10 年間で日米欧の多くの宇宙ミッションによって実証されてきました。2014 年 5 月には、NICT が開発した小型光通信機器（SOTA）が超小型衛星 SOCRATES に搭載され高度 600km の太陽同期軌道に投入されました。そして、低コスト化が可能な波長 1.5 ミクロンレーザでの光通信の実証実験に成功し（2015 年 6 月 3 日 NICT 報道発表）、2016 年から量子通信の実証実験を行ってきました。

量子通信は、光子一個一個のレベルで情報を制御できるため、衛星光通信の容量や距離を更に改善することができます。また、情報漏えいを完全に防ぐ量子暗号の実現にも必須の技術になります。特に、衛星光回線では大気圏での減衰しかなく、その減衰量は光ファイバよりも小さいため、地上光ファイバ網では不可能だった大陸間スケールでの量子通信や量子暗号が可能になります。

2016 年 8 月には、中国科学技術大学を中心とするチームが 600kg の大型の量子科学技術衛星（通称「墨子」、英語名 Mozi）を打ち上げ、2017 年 6 月に 1,200km 離れた 2 つの地上局に向けて衛星から量子もつれ配信を行う実験に成功しました（J. Yin et al., Science, vol. 356, no. 6343, p. 1140, June 2017）。中国チームは、この量子科学技術衛星を用いて、さらに大陸間スケールの量子暗号の実験にも取り組んでいます（E. Gibney, Nature vol. 535, p. 478 (2016).）。

このように衛星通信分野では、この数年、光通信や量子通信技術の開発をめぐって、日本、中国、欧米各国が熾烈な研究開発競争を繰り広げる時代に入っています。

NICT 光地上局及び実験結果の概要

図 3 に NICT 光地上局の概要を示します。

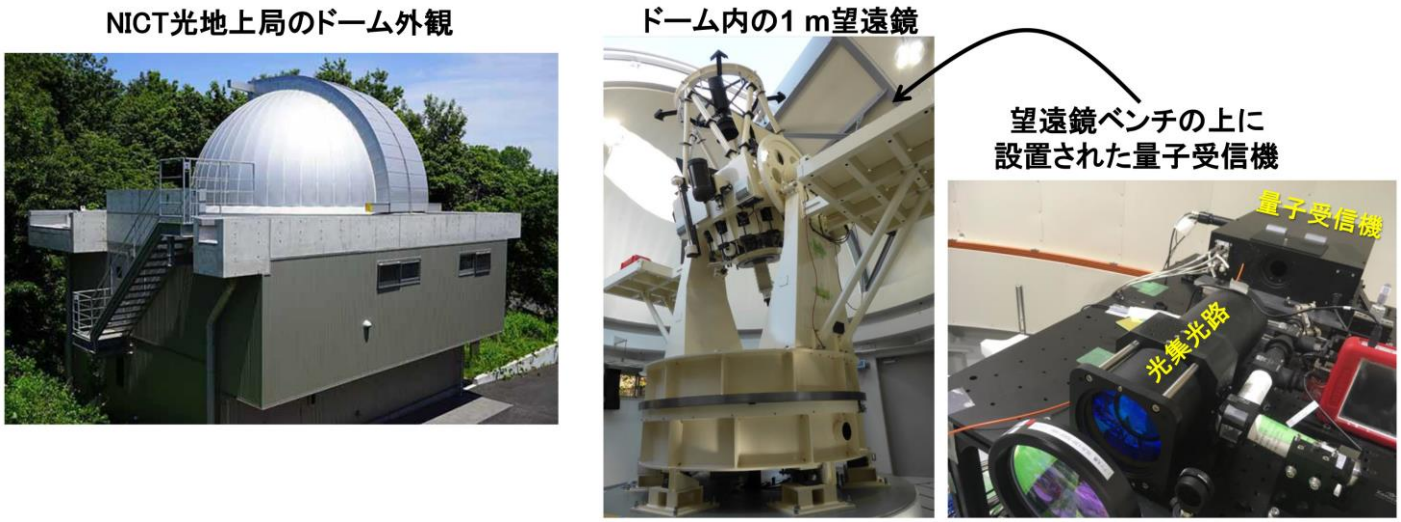


図 3　NICT 光地上局の概要写真

SOTA から送信された信号は、ビームの広がりや地上望遠鏡での集光能力の限界、さらには大気伝搬中に散乱や損失のため、かなりの部分が受信機まで到達する前に失われてしまいます。また、地上局の 1m 望遠鏡まで届いた信号も減衰しており、パルス当たり平均 0.1 光子以下という微弱なエネルギーしか含まれていません。このような微弱信号は従来の光検出器では検出が不可能なため、低雑音の光子検出器を組み込んだ量子受信機を用いて検出します。これにより、従来の衛星光通信より更に高効率の通信が可能になります。また、パルス当たり 1 光子に満たない信号を用いることで、盗聴を確実に検知し安全に鍵配送を行う量子暗号が可能になります。

このような微弱信号による量子通信や量子暗号を実現するためには、まず、量子受信機で検出した光子信号に正確な時刻を刻印し、衛星・地上局間での時刻のずれを正確に補正（時刻同期）するとともに、大気伝搬中に変化した光子の偏光軸を地上局で正確に補正（偏光軸整合）した上で、ビット情報を復号する必要があります。このような技術は、現在、中国と日本しか持っておらず、中国では 600kg の大型衛星で実現しています。

これに対して、NICT は 10 分の 1 以下となる重量 50kg の小型衛星で実現する技術を開発しました。SOCRATES は、秒速 7km で高速移動するため、信号波長も地上局に近づくときには短波長側に、遠ざかるときには長波長側に変移します（ドップラーシフト）。このため、衛星から出射される信号間隔に対比して、地上局に届く光子の到来時間の間隔は SOCRATES の飛行中に短くなったり長くなったり変化します。この時刻変化を正確に補正できないと、長いビット系列を誤りなく正確に処理することはできません。中国の衛星量子通信実験では、量子通信用のレーザとは別に同期専用の短パルスレーザを衛星に組み込んで地上局との時刻同期を実現しています。一方、NICT では、一つのレーザ光源のみを用いて、時刻同期と量子通信を実現しました。量子通信信号の中に長さ約 32,000 ビットの特殊なパターン（同期用系列）を埋め込んで送信し、地上局では受信した光子信号の系列から直接、時刻同期と偏光軸整合を行う技術を開発し、軽量の小型衛星による量子通信技術を世界で初めて実現することに成功しました。

図 4 に、2016 年 8 月 5 日深夜に行われた実験における SOCRATES の軌道、及びドップラーシフトの観測結果を示します。図 4a に示すように、SOCRATES は NICT 光地上局付近の太平洋上空を南から北へ飛行し、日本時間 22 時 59 分 41 秒に NICT 光地上局へ 744km の距離まで再接近しました。その時刻付近の 2 分 15 秒間にわたって量子通信が行われました。図 4b がこの軌道情報から予測されるドップラーシフトの理論値で、図 4c が観測値になります。理論と合うドップラーシフトの観測値が得られ、ドップラーシフトに相当する周波数変化が正確に補正できていることを示しています。この周波数補正に基づいて、SOCRATES から到来する光子の時間間隔の変化を 1 億分の 1 秒の高精度で正確に補正しながら、衛星・地上局間での時刻同期を確立します。

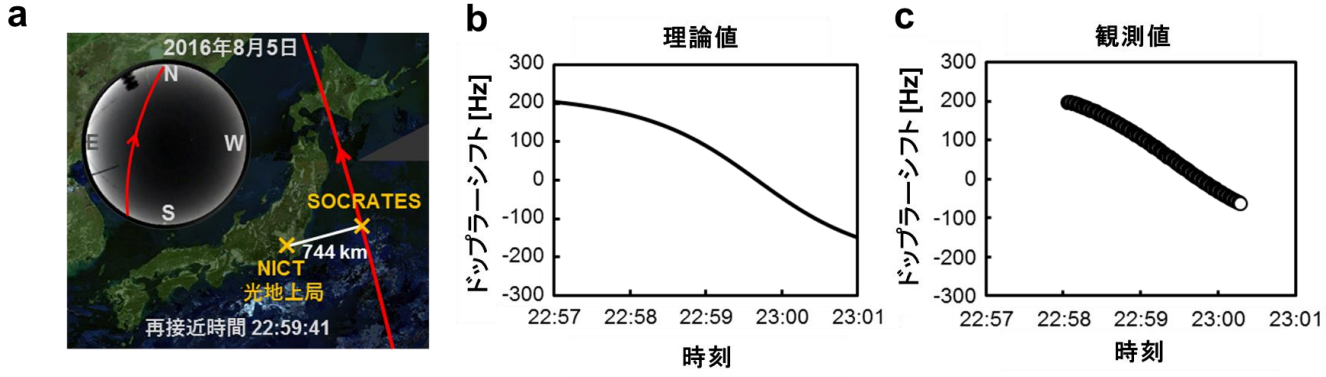


図 4　a. SOCRATES の軌道と NICT 光地上局の関係※　b. 軌道情報から予測されるドップラーシフトの理論値
c. 実際に観測されたドップラーシフトのデータ

※ 国土地理院ウェブサイトの世界衛星モザイク画像を加工して使用
http://cyberjapandata.gsi.go.jp/#5/38.754083/137.109375/&ls=std%7Cmodis&blend=0&disp=01&lcd=modis&vs=c0j0l0u0t0z0r0f0
Images on 世界衛星モザイク画像 obtained from site https://lpdaac.usgs.gov/data_access maintained by the NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, (Year). Source of image data product.

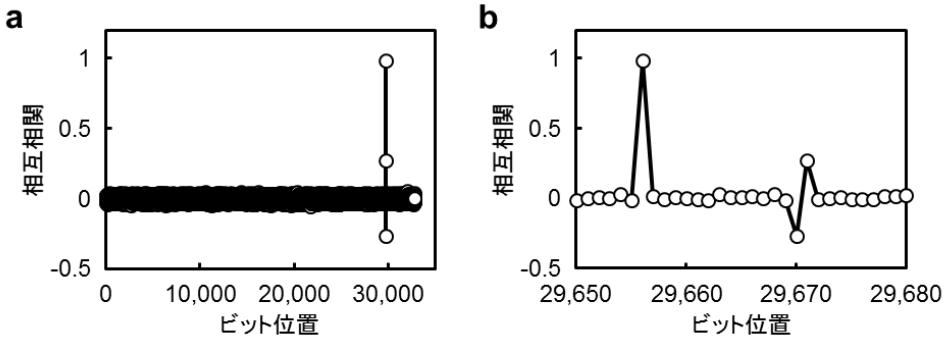


図 5　a. 同期用系列を用いた相関解析の結果　b. 29,656 番目の相関ピーク付近の拡大図

時刻同期を確立した後、光子信号は 0,1 のビット情報に復元されます。しかし、地上局で復元されたビット系列と SOTA から送信されたビット系列との間には依然としてビット位置のずれが残っているため、図 5a に示すように約

32,000 ビットの同期用系列を用いた相関解析により、このずれを補正します。図 5b に示すように、相関ピークは 29,656 番目のビット位置にあり、地上局ではこの位置を原点とみなしてビット系列の復号を行っていきます。

実際に得られた地上局での光子検出信号の系列のヒストグラムの例を図 6 に示します。地上局で光子が検出された時刻には、SOTA の送信機が必ず光パルスを出射していることが分かります。このことが、極めて損失の大きい衛星・地上局間の通信路でも、光子検出信号から正確にビット系列の同期が確立できていることを示しています。

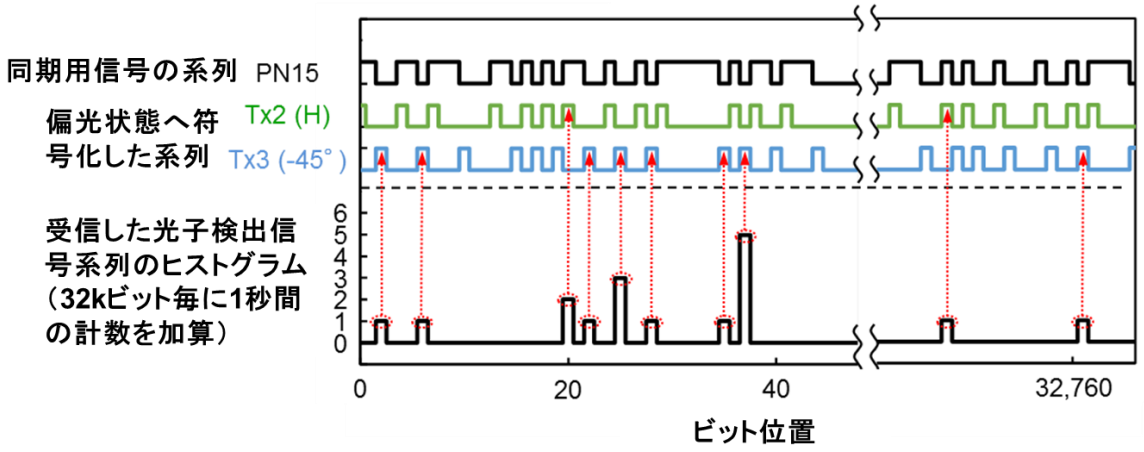


図 6 SOTA からの同期用系列と地上局で受信した光子検出信号系列のヒストグラム

最後に、衛星・地上局間で偏光軸整合を行います。地上局に対する SOCRATES の姿勢は時々刻々変わるため、SOTA から送信される信号の偏光軸も時々刻々変化します。この相対変化を補正しないと、0,1 のビット情報に対応する 2 つの偏光状態を正確に識別できません。図 7 に示すように、時々刻々、偏光軸整合を行い、2 つの偏光状態が識別されていることがわかります。この際の識別性能は、ビット誤り率において 3.7%まで下げられるという良好な結果を確認しました。これは、量子暗号でビット誤り率の標準的な条件とされる 10%をクリアするもので、50kg 級の超小型衛星を使った実験としては世界トップのデータです。

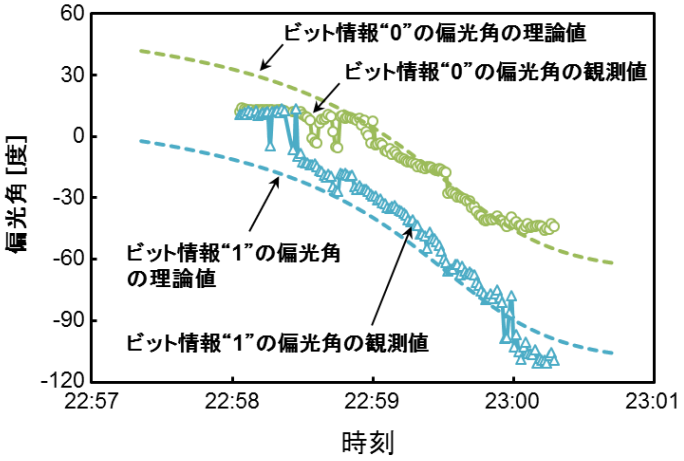


図 7 偏光軸整合の実験結果

SOCRATES の軌道情報及び姿勢制御情報から予測される偏光角の理論値と、地上局で観測された実験値がよく一致しており、偏光軸整合に成功していることが分かる。

＜ 本件に関する問い合わせ先 ＞

・量子通信関連について

未来 ICT 研究所
佐々木 雅英
Tel: 042-327-6524
E-mail: psasaki@nict.go.jp

・衛星関連について

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
豊嶋 守生
Tel: 042-327-5825
E-mail: morio@nict.go.jp

＜ 広報 ＞

広報部 報道室
廣田 幸子
Tel: 042-327-6923
Fax: 042-327-7587
E-mail: publicity@nict.go.jp