

宇宙光通信と衛星量子鍵配送

「衛星からのデータ通信容量が年々増加しており、今や衛星通信でも光通信の時代に入りました。光通信はレーザーを使うため、光を用いる量子 ICT 技術とも親和性が良く、将来、衛星量子鍵配送も期待されます。」

豊嶋 守生 (とよしま もりお)

ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室 室長

1994 年、郵政省通信総合研究所(現 NICT)に入所。ETS-VIによる光通信実験に従事し、その後 JAXA 出向、ウィーン工科大学在外研究を経て、OICETS との光通信実験を実施。博士(工学)。



● 衛星通信におけるデータ伝送速度の増加

年々高速化する地上通信回線は、やがて近い将来には光ファイバにより全てがつながるネットワークが実現されると考えられています。こうした「光」を使った情報通信技術は、宇宙通信ネットワークにも拡大応用され、宇宙と地上における通信が「光」で結ばれる光ネットワーク時代の到来が想定されます。電波も光波も同じ電磁波ですが、光は数百テラ Hz という搬送波周波数のために、アンテナや機器の小型・軽量化が可能で、周波数資源の有効活用ができて法的規制も緩やかです。2015 年には、観測衛星等からのデータ伝送速度が約 20Gbps 以上になると試算されており(図 1)、このような高速・大容量通信は光通信でなければ実現できません。近年に

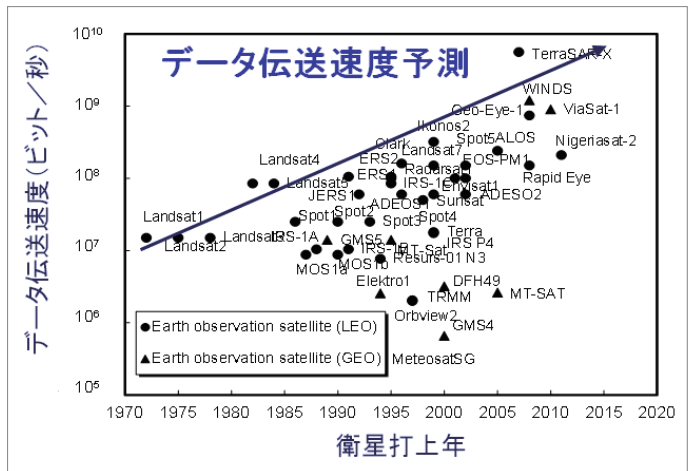


図1 衛星のデータ伝送速度の動向

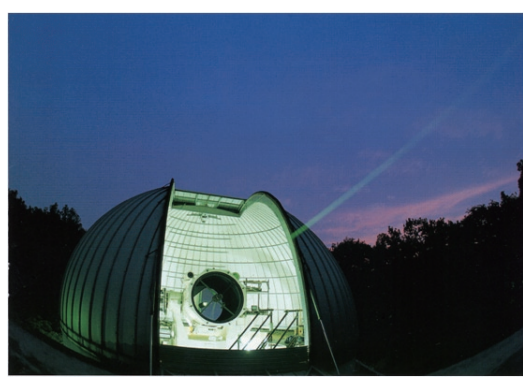


図2 NICT光地上局の望遠鏡



図3 世界初の低軌道衛星-地上局間の光通信実験

おける目覚ましい光学技術の発達に伴い、レーザーを用いた宇宙通信が実現可能な時代に突入しました。

衛星-地上間光リンクの確立

NICTでは、1994年に技術試験衛星VI型「きく6号」(ETS-VI)を用いて、世界で初めて地上-静止衛星間の光通信実験に成功しました。その後、欧州宇宙機関(ESA)では、静止衛星ARTEMISと地球観測衛星SPOT4との間で、2001年から光通信回線をデータ中継のために1日2回定常的に利用しています。宇宙航空研究開発機構(JAXA)の開発した光衛星間通信

実験衛星(OICETS*、以下「きらり」)は、2005年8月に軌道高度610kmの太陽同期軌道へ投入され、2005年12月にARTEMISとの間で双方向衛星間通信実験が国際協力として実施されました。当時、筆者もJAXAに出向し光通信機器の開発に携った後NICTに戻り、2006年~2009年、東京都小金井市にあるNICT宇宙光通信地上局(以下、NICT光地上局、図2)の上空において、世界初の地上-低軌道衛星間の光通信実験を実施しました(図3)。この実験により、低軌道衛星-地上局間光回線への大気ゆらぎの影響を初めて実測できたことは、学術的意義だけでなく、都市部に散在するビル間の光通信、航空機等の飛翔体との光通信、地上における光無線技術等へ広範に応用されることが期待されています。

空間量子鍵配送への応用

情報通信技術では、情報漏えいや不正アクセスなどを防止する情報セキュリティ技術の要請が高まっており、盗聴技術が高度化する中で暗号技術は益々重要になってきています。量子暗号システムは、量子信号の伝送媒体として光子を用いているため、光通信とは非常に親和性が



図4 UQCC国際会議でのビル間量子鍵配布のデモンストレーションの様子

よいシステムです。現状、ファイバ中での量子鍵配送では、ファイバ中の損失などの影響によりその伝送距離は150km程度が限界で海を挟むような大陸間を伝送できませんが、自由空間においては、より遠方への伝送が可能で、地球を周回する衛星を用いると、地球上のどこでも量子鍵配送が可能となります。多くの場合、量子鍵配送には光の偏光が用いられますが、前述した衛星「きらり」との光通信実験において、世界で初めて衛星-地上間での偏光特性を取得し、量子鍵配送への影響を定量的に測定することができました。NICTでは、空間伝送用の量子鍵配送システムの実現性を確認するためにプロトタイプモデルを開発し、2010年10月に開催されたUQCC国際会議において距離約1.37kmのビル間で量子鍵配送のデモンストレーションを行いました(図4)。

● 地球規模での衛星を用いた量子鍵配送

任意の2つの地上局を用いた量子鍵配送・共有実験は、地球規模で図5に示す手順で実現可能となります。

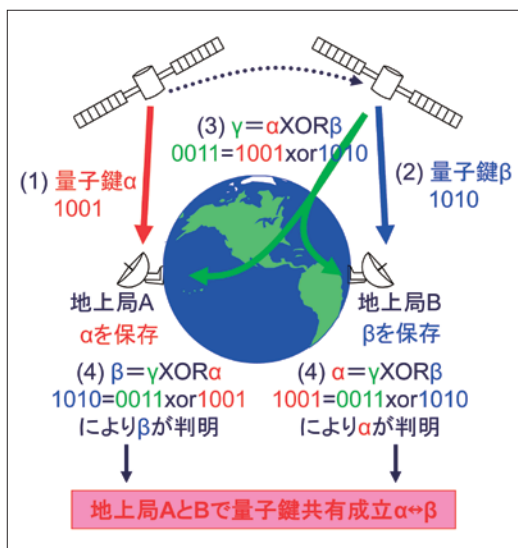


図5 任意の2つの地上局を用いた量子鍵配送

- 1) 衛星から量子鍵 α を量子鍵配送により生成・配信し、地上局Aで量子鍵 α を保存します。
- 2) 地上局Bの上空で、衛星から量子鍵 β を生成・配信し、地上局Bで量子鍵 β を保存します。
- 3) 衛星では量子鍵 $\gamma = \alpha \text{ XOR } \beta$ を算出し通常の通信回線で両ユーザに配信します。(XORは排他的論理和で、 γ は盗聴されてもよい)

4) それぞれの地上局で自分の量子鍵と γ を排他的論理和(XOR)することで相手の量子鍵を共有できます。

任意の2つの地上局を用いた量子鍵配信・共有実験は、例えば、ヨーロッパで量子鍵を衛星に送信し、地球の反対側の日本で受信することによりグローバルな量子鍵配信が可能となります。ファイバ通信では現状150km程度しか量子鍵配送できないと言われていまずので、ファイバ通信の距離では実現できない長距離伝送が可能である衛星量子鍵配送では、地球規模で量子鍵配送が可能であるということは、将来の応用へ重要な意味を持つと考えられます。

● 今後の展望

宇宙通信システム研究室では、小型衛星の打ち上げ機会を捉えて、軌道上から小型光トランスポンダ(Small Optical Transponder: SOTA)による光通信の宇宙実証を考えています。現在、SOTAのフライトモデルを開発中で、50kg級の小型衛星へ搭載する予定です。その搭載質量は6kg程度で、直径約5cmの光アンテナを備えています(図6)。SOTAには、量子鍵配送の基礎実験用の非直交な偏光を持つレーザーを2台搭載しており、地上局においてフォトンカウンティングレベルでの光子測定実験を行う予定です。これにより、量子鍵配送に必要な基礎的なデータを取得する予定です。こうした光学技術は、地球観測衛星等で取得される様々な環境・災害観測データの伝送に役立つ他、高セキュリティな回線確保のため、社会の安心・安全を支える基盤として期待されています。

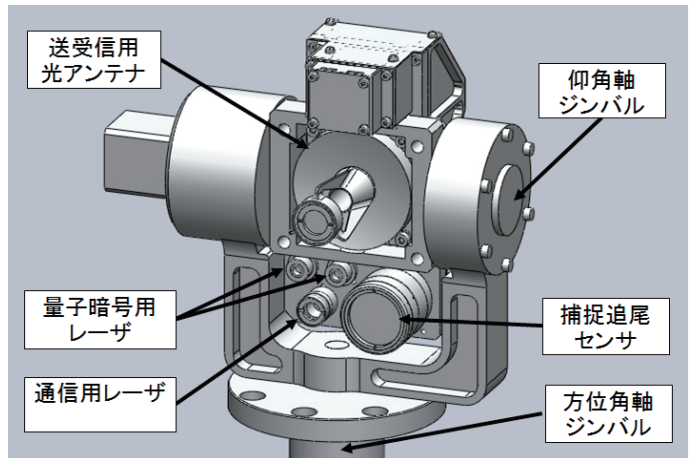


図6 開発中の超小型衛星搭載用の小型光トランスポンダ

*キーワード

【光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS)】

「きらり」(OICETS)は、欧州宇宙機関(ESA)の先端型データ中継技術衛星「ARTEMIS」との間での実証実験を主な目的に、2005年8月24日にカザフスタン共和国バイコヌール宇宙基地からドニエプルロケットにより打ち上げられた技術試験衛星です。「きらり」のような低高度地球周回衛星と地上局間の光通信においては、受信光レベルが大気による減衰やゆらぎにより大きく変動するため、高速で移動しながら地上局に正確にレーザーを送信し続けるには極めて難易度の高い技術が必要となります。本稿で紹介したように、NICTとJAXAは、同衛星と光地上局との間で光通信実験に成功しました。こうした低軌道地球周回衛星と光地上局とを結ぶ光通信実験成功は世界で初めてのことで、日本の技術力の高さを証明することができました。