

人工衛星と地上局間の光通信

高山 佳久・豊嶋 守生

Satellite-Ground Laser Communications

Yoshihisa TAKAYAMA and Morio TOYOSHIMA

Successfully performed orbital demonstrations of space laser communications are shown chronologically, where the communicating party includes the satellites in the geostationary earth orbit and in the low earth orbit as well as the optical ground stations. Among them, the satellite-ground laser communication experiment carried out by JAXA and NICT in 2006 is focused as the first success in terms of the bidirectional communications between a low earth orbit satellite and an optical ground station. As the unique preparations, the control of the satellite attitude and the procedures to establish the optical links are described. Besides, current activities and future plans on the space laser communications are given in the end.

Key words: satellite, laser communications, optical ground stations, low earth orbit, OICETS

近年のわれわれの生活には、通信や放送、気象衛星による観測、GPSを代表としたナビゲーションなど、人工衛星の存在が不可欠となってきた。また、国際宇宙ステーションでの滞在や深宇宙領域の探査など、人間の活動範囲や調査範囲も次第に広がっている。これら宇宙の利用を支えるには、人工衛星と地上、および衛星と衛星を結ぶ通信回線が必須であり、宇宙で取り扱われるデータ量の増加に伴い、データ伝送の大容量化への要求が高まっている。

データ伝送の大容量化のために高い周波数帯の利用が検討され、現在はKaバンドによる高速通信を可能とする衛星が運用されている^{1,2)}。同時に、将来のより高速なデータ伝送に向けて、レーザー光を用いた通信の軌道上実験が行われている³⁻⁵⁾。電波と比べて波長が短いレーザー光は、アンテナ径が小さく空間伝搬損失やシステム間の干渉を抑えた大容量の回線を提供することができる。また光の周波数帯は、現在の国際的な周波数調整の対象に含まれていないことも魅力のひとつである。

宇宙光通信の研究は1960年代に始まり、日本においても1980年代よりさかんに検討されている。この中で日本は、1994年、2005年および2006年にそれぞれ世界初を冠

する実証実験に成功し、宇宙光通信分野の発展に大きく貢献している⁵⁻⁷⁾。本稿では、これらの実証実験の中から特に、2006年に宇宙航空研究開発機構(JAXA)の低軌道衛星である光衛星間通信実験衛星(Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite; OICETS, 和名きらり)と情報通信研究機構(NICT)の光地上局の間で行われた衛星-地上局光通信について述べる。以下においては、まず、これまでの宇宙光通信に関する軌道上実証例を整理する。次に、これらの実施例の中から、2006年に行った世界初の成功となる低軌道衛星OICETSと地上局間による光通信実験について述べる。また最後に、欧州、米国および日本の計画を挙げ、最近、宇宙機関の会合において設立された宇宙光通信に関する技術検討会について紹介する。

1. 宇宙光通信の実証例

図1に、宇宙光通信の軌道上実施例をまとめる。同図中、GEOは静止軌道(geostationary earth orbit)、LEOは低軌道(low earth orbit)、GNDは地上(ground)、およびOGSは光地上局(optical ground station)を示す。GEOおよびLEOと記された枠内には、衛星名とともにその打ち

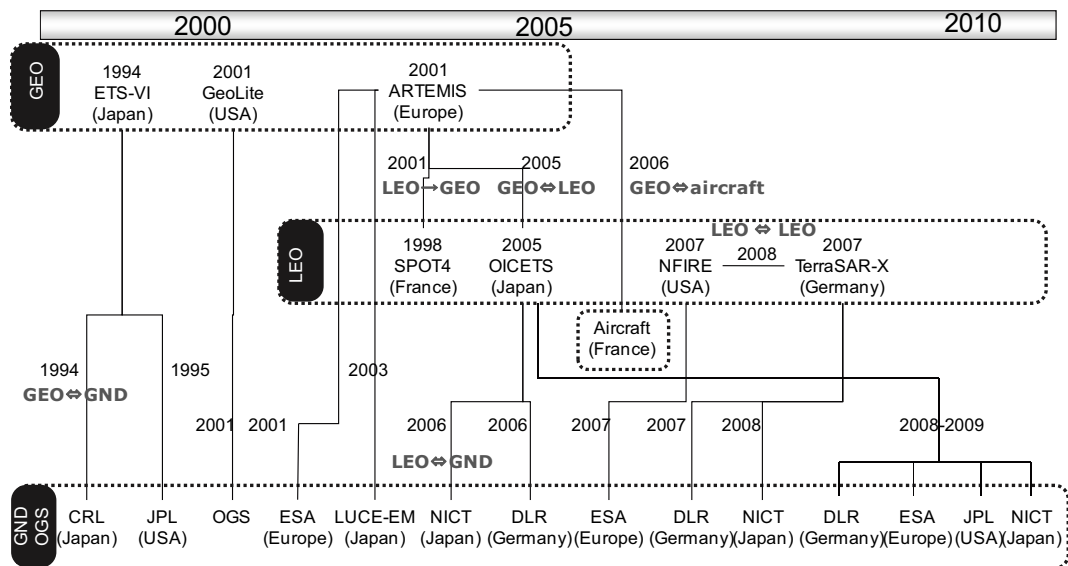


図1 宇宙光通信の実証例。

上げ年を示している。また OGS と記された枠内には、光地上局を保有する機関の略称を記している。ここで、CRL は通信総合研究所（現・独立行政法人情報通信研究機構、NICT）、JPL は米国のジェット推進研究所（Jet Propulsion Laboratory）、DLR はドイツ航空宇宙センター（German Aerospace Center）、および ESA は欧州宇宙機関（European Space Agency）である。なお、図中の実線は光通信実験の組み合わせであり、それぞれの組み合わせが初めて実験を行った年を付記している。

同図に示すように、衛星を用いた光通信の初めての成功は、日本が行った実験で示された。1994年に打ち上げられた NASDA（現・独立行政法人宇宙航空研究開発機構、JAXA）の衛星 ETS-VI（和名きく6号）には CRL が開発した光通信機器が搭載されており、CRL は東京都小金井市に保有する光地上局と ETS-VI の間での双方向光通信を行った⁶⁾。また1995年には、NASA/JPLと協力し、同衛星と JPL の地上局との間で光通信を実施した⁷⁾。この実験においては、地上から衛星へは波長 $0.515 \mu\text{m}$ 、衛星から地上へは波長 $0.83 \mu\text{m}$ のレーザー光を照射し、強度変調直接検波（IMDD）方式を採用した 1 Mbps でデータを伝送した。

2001年には米国が静止衛星 GeoLite を打ち上げ、地上との光通信実験に成功したという報告がある⁸⁾。しかし米国軍に関する情報であり、詳細は不明である。同年には、ESA の静止衛星 ARTEMIS とカナリー諸島テネリフェ島に設置された光地上局との間で光通信実験が行われた⁹⁾。また、ARTEMIS はフランスの CNES の低軌道衛星 SPOT4 から光通信によるデータ受信に成功し、これが LEO から

GEO への初の片方向光通信となった¹⁰⁾。2003年には、JAXA の低軌道衛星 OICETS（和名きらり）に搭載された光通信機器のエンジニアリングモデルをテネリフェ島に運び、ARTEMIS との間で光通信実験が行われた¹¹⁾。これらの実験では波長 $0.8 \mu\text{m}$ 帯の IMDD 方式が採用され、ARTEMIS からのダウンリンクはデータ伝送速度が 2 Mbps、ARTEMIS へのアップリンクは 50 Mbps であった。

衛星間での双方向光通信は、欧州と日本の協力により 2005年12月に実施された。OICETS と ARTEMIS との通信実験が、LEO と GEO を結ぶ双方向光通信の初めての成功例である^{5,12,13)}。また 2006年3月には、OICETS と NICT の光地上局との間で双方向光通信を行い、低軌道衛星と光地上局との組み合わせとして世界で初めての成果となった¹⁴⁾。1994年に成功した ETS-VI と地上局による光通信実験では、通信装置間の距離は大きい、地上局から見た衛星方向は大きく変化しない。しかし、低軌道を周回する衛星 OICETS の場合には、衛星と地上局ともに相手を見る方向が大きく変化するため、通信相手をとらえ光通信回線を維持し続けることが格段に難しくなる。

NICT の光地上局による衛星-地上局間光通信実験に続き、ドイツの DLR は、OICETS から地上へ送信したデータを光可搬局で受信する片方向光通信に成功した¹⁵⁾。その後、OICETS は ARTEMIS との衛星間通信を繰り返し、2006年9月に実験期間を終了した。一方、ARTEMIS は 2006年12月にフランスの航空機との双方向光通信を実施し、静止衛星と航空機との光通信としては初めての成功を示した¹⁶⁾。

2007年には、米国のミサイル防衛局（Missile Defense

Agency; MDA) の低軌道衛星 NFIRE と DLR の低軌道衛星 TerraSAR-X が相次いで打ち上げられた。両衛星には波長 $1\mu\text{m}$ 、5.6 Gbps のデータ伝送をコヒーレント二値位相変調 (BPSK) 方式で送受する通信機器が搭載されている。これらの衛星は、まず 2007 年に ESA の光地上局とそれぞれ捕捉追尾の実験を行った後、2008 年 3 月には NFIRE と TerraSAR-X との間で低軌道衛星間において初の光通信に成功した。さらにその後は、光地上局を相手とした実験にも成功している¹⁷⁾。この期間、DLR、ESA および NICT は、TerraSAR-X を相手としてそれぞれの光地上局を用いた国際的な共同実験を実施した。複数の光地上局が共通の衛星を相手として、レーザー光への大気の影響を測定することが目的であった。この共同実験の中で、NICT は 2008 年 12 月に TerraSAR-X とのレーザー光伝送実験を実施し、伝搬データ取得に成功した。

衛星 OICETS が 2006 年 9 月に実験を終了すると、衛星の定常運用終了に伴い、地上設備から一部の実験運用機能が取り除かれた。しかし、その後 NICT は、実験に必要な機能の再構築と衛星の実験運用に要する作業を担うことで、実験再開を JAXA と合意した。地上設備の再構築および衛星の機能確認が 2008 年 10 月に完了し、OICETS と NICT 光地上局とによる通信実験が JAXA との協力に基づいて再開された。

2009 年に入ると、OICETS を相手とした光通信実験への参加要請が米国の JPL、ドイツの DLR、欧州の ESA から挙がり、これらの機関と NICT がそれぞれ保有する光地上局を用いた国際共同実験に発展した。2009 年 4 月初めから同年 9 月末までの間に各機関の実験期間を割り当て、それぞれ実施したところ、すべての機関が衛星との光通信実験に成功した。共通の衛星に対して、異なる環境に設置された複数の光地上局が実験を実施することで、大気が伝搬光に

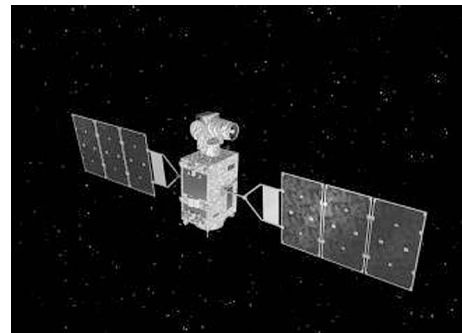


図2 宇宙を飛行する OICETS. © 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

与える影響を評価する貴重なデータを取得することができた。2010 年 5 月には、OICETS との実験にかかわった機関が会する国際ワークショップ (Ground-to-OICETS Laser Communication Experiments; GOLCE) が開催され、成果の共有が図られた¹⁸⁾。

2. OICETS を用いた衛星-地上局間光通信実験

JAXA が開発した衛星 OICETS は、2005 年 8 月 23 日 (日本時間では 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って、高度約 610 km、軌道傾斜角約 98 度の低軌道へ打ち上げられた¹²⁾。図 2 は宇宙を飛行する OICETS の様子であり、衛星の上面には光衛星間通信機器 (laser utilizing communications equipment; LUCE) が搭載されている。LUCE は開口直径約 26 cm の反射型光学望遠鏡を備え、 $0.8\mu\text{m}$ 帯のレーザー光を送受する。図 3 (a) は静止軌道の ARTEMIS と光通信を行っている様子、図 3 (b) は地上局と光通信を行っている様子である。これらの図を比べると、衛星の姿勢として、同図 (a) では地球と反対側に LUCE の搭載面が向いており、一方、同図 (b) では地球方向に LUCE の搭載面が向



(a)



(b)

図3 (a) OICETS と ARTEMIS、および (b) OICETS と地上局との光通信. © 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

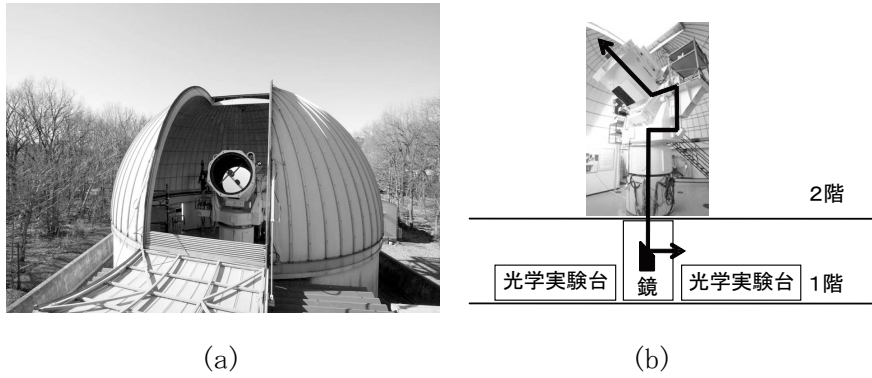


図4 NICTの光地上局. (a) 外観, (b) ドーム内の望遠鏡.

いている.

図4は、OICETSと光通信を実施したNICT保有の光地上局の外観である。ドーム内には直径1.5mの大型望遠鏡を備えている。衛星との光通信では、移動する衛星を望遠鏡が追尾する必要から、望遠鏡本体とドームはともに高速に駆動できるように設計されている。同図(b)に示すように、鏡筒部は2階に設置されており、望遠鏡で受けた光は、空洞の支柱内を矢印に沿って1階に導かれる。1階には4つの光学ベンチが配置され、支柱内の鏡の反射方向を操作することで、使用するベンチを切り替える仕組みになっている。

2.1 衛星の姿勢制御と捕捉追尾

通常、OICETSは図3(a)のようにLUCEの搭載面が地球の反対側となる姿勢で地球を周回している。したがって、OICETSと地上局とが光通信実験を行う場合、LUCEが指向できる範囲内に光地上局をとらえるには、図3(b)に示すような姿勢へ変更する必要がある。

衛星の姿勢を変更する過程を図5に示す。衛星は同図中の点 p_0 から点 p_1 の方向へ地球を周回しており、地上局が衛星の視野範囲に入ると光通信を実施する。同図中、点 p_0 においては、衛星は地球を周回する通常の姿勢状態であり、LUCEの搭載面は地球の反対側に向いている。ここで、衛星の姿勢制御装置を作動させて慣性空間に固定すると、点 p_0 から点 p_1 へ位置が移動することによって、衛星

は点 p_0 における姿勢を維持したまま点 p_1 に到着する。よって、地上局の上空においては、LUCEを搭載した面が地球側を向いた姿勢となる。

衛星が地球を周回し、地上局の視野範囲に衛星が入ると、図6に示す光通信回線を形成するための手順が始まる。まず地上局は、事前に算出した衛星の軌道情報から、衛星が存在すると予測される方向に、広がり角が大きいビーコン光を照射する。衛星はビーコン光を検出すると、その到来方向に基づき通信光の射出方向を地上局の方向へ

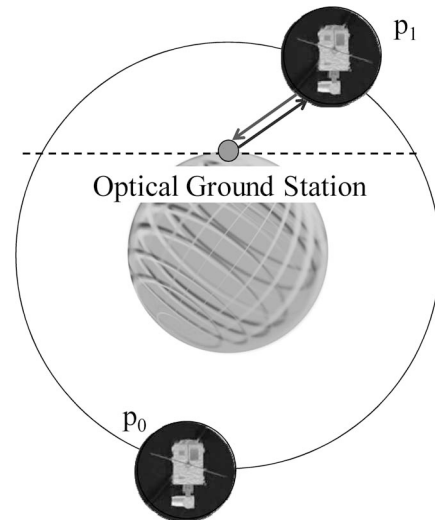


図5 衛星-地上局間光通信を行う場合の衛星の姿勢.

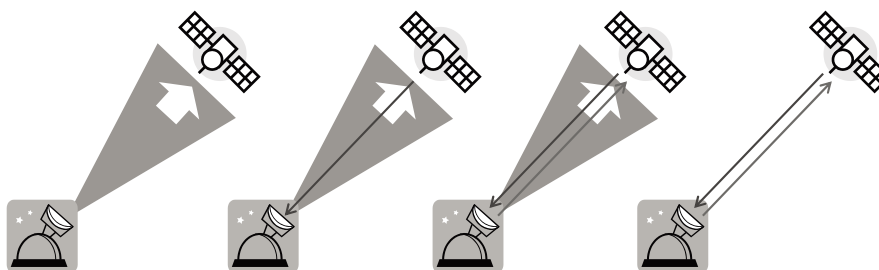


図6 光通信回線の形成 (左から右の順番).

表1 衛星と地上局が射出するレーザー光.

項目		地上→衛星	衛星→地上
波長	通信光	815 nm	847 nm
	ビーコン光	808 nm	なし
広がり角	通信光	204 μ rad	5 μ rad
	ビーコン光	9 mrad	なし
フォーマット	通信光	2 PPM	NRZ
データレート	通信光	2 Mbps	50 Mbps

調整する. 一方, 光地上局では, 衛星からの通信光を検出すると, その到来方向に基づき, 地上局から衛星へ向けて通信光を照射する. このような手順を介して互いを捕捉し, その後も継続して光を照射し合うことにより, 衛星と地上局との間での光通信回線が確立される. その後, 光通信回線が安定した状態に至ると, 地上局がビーコン光の照射を止めても, 光通信回線は維持される.

OICETS と NICT 光地上局が射出するレーザー光について表1にまとめる. 衛星側も地上側も光源の波長は0.8 μ m 帯であり, ESA の ARTEMIS と衛星間光通信を行うためのインタフェース条件と等しく, データ伝送速度は OICETS から地上へは約 50 Mbps, 地上から OICETS へは約 2 Mbps であった. 地上局においては, あらかじめ算出された軌道情報に基づいた方向へビーコン光を照射する. ここで, 衛星の軌道情報が含む誤差, 地上局望遠鏡の駆動誤差, および地上局の内部光学系に含まれる角度誤差などを考慮し, これらの誤差が生じて衛星を照射できるように, ビーコン光の広がり角を9 mrad と大きく設定している.

2.2 測定結果

図5および図6に示す手続きを行い, OICETS と地上局間で光通信回線を形成している最中の様子を図7に示す. 同図は, 2006年3月30日に光地上局の望遠鏡の鏡筒部側面に配置した広角カメラで撮像した写真である. 中央部には衛星からの通信光が円形に, 下方中央部には地上局が射出したビーコン光が線状に見える. 光の送受が始まってから終了するまでの間に, 衛星と地上局がそれぞれ測定した光の受信電力を図8(a)および8(b)に示す. 光通信回線が形成される過程では, 地上局からのビーコン光は初めの数十秒間だけ通信光と同時に射出したが, その後ビーコン光を遮断し, 通信光のみにより光回線を維持した. また, 同図(a)および(b)にはそれぞれ周期的な瞬断がみられるが, これは ARTEMIS との衛星間光通信を対象に設計された LUCE の望遠鏡の駆動特性が原因である¹⁹⁾. 地上局と光通信を行う場合, 衛星間光通信の場合と比べて, LUCE は望遠鏡を速く駆動する. その結果, LUCE の内部光学系が補正できる角度を超えた誤差が発生したために,

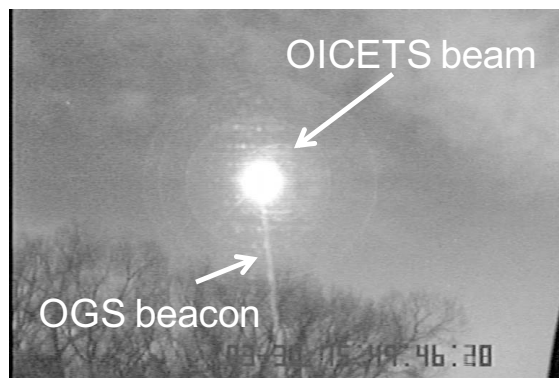


図7 衛星と地上局が射出したレーザー光 (2006年3月30日, NICT 光地上局にて撮像).

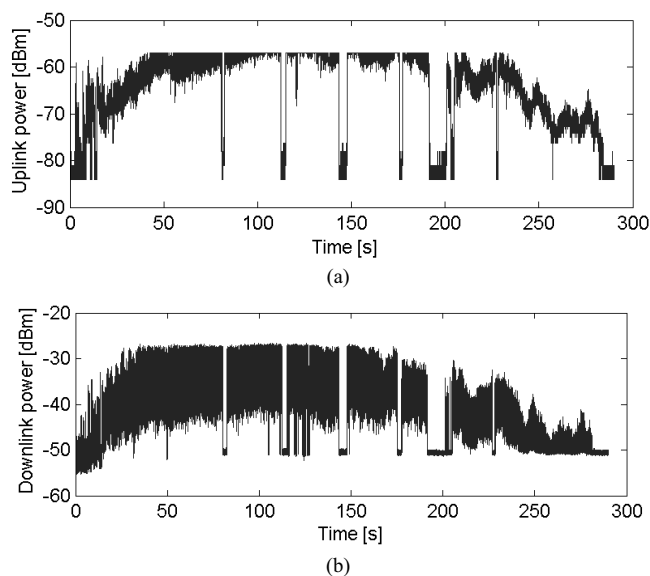


図8 アップリンク (a) とダウンリンク (b) の受信電力 (2006年3月30日測定).

光回線の瞬断が起きたものと考えられる.

衛星と地上局では, それぞれ疑似ランダム符号を用いて通信光を変調しており, 符号の誤り数の計測を行っている. 2006年の9月までに実施した実験において計測した結果から1秒間あたりの符号誤り率を算出すると, 地上から衛星へのアップリンクでは約 10^{-5} , また衛星から地上へのダウンリンクでは $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 程度を示した.

2.3 実験の再開

OICETS との光通信実験が2006年9月に終了すると, 衛星の定常運用終了に伴い, 一部の実験運用機能が地上設備から取り除かれた. その後 NICT は, JAXA の合意を得て実験再開に向けた地上設備の再構築を2008年10月までに終え, OICETS の実験を行う機能について健全性を確認した.

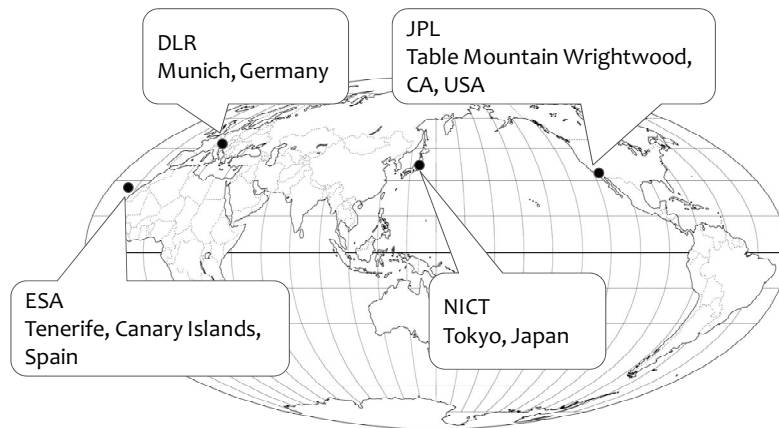


図9 OICETS と光通信を行った光地上局。

まず、図5に示したような衛星の姿勢制御を行い、その際に生じる姿勢誤差を測定した。姿勢の制御が確認されると、次に、恒星シリウスを光源として、LUCEの望遠鏡を駆動して追尾する機能や内部光学系における送受信光軸のアラインメントなど、地上局との光通信に必要な機能の健全性を確認した。測定した結果を2006年に行った実験時の測定結果と比較し、衛星-地上局実験の再開が可能であると判断した。この結果、2008年10月末、OICETSを用いた衛星-地上局間光通信実験を再開することができた。2006年の実験の場合と比べて実施時期が異なるため、レーザー光の大気伝搬特性の季節による違いを検討するためのデータを得ることができた。また、2009年4月から2009年9月末までの期間、ESA、DLR、JPLおよびNICTが、それぞれの光地上局を用いてOICETSと光通信実験を行った。図9にこれら光地上局の配置を示す。互いに周囲の環境が異なる地上局を用いて、共通の衛星とレーザー光を送受することによって、大気伝搬光に与える影響を検討する貴重なデータを測定することができた。

3. 国際的な動向と今後の計画

これまでの軌道上実証の成功により、宇宙光通信の利用計画が加速されている。ARTEMISを用いた実証に成功したESAでは、 $0.8\ \mu\text{m}$ に続き、 $1\ \mu\text{m}$ 帯の光通信機器を次期の静止軌道衛星へ搭載する検討を進めており、数Gbpsでの衛星間光通信を予定している^{20,21)}。深宇宙通信については、NASAが検討していた火星と地球を結ぶ光通信が挙げられる²²⁾。火星を周回する衛星に搭載するための光通信機器を作製した後、プログラムの進行は中断しているが、こ

の技術は月を対象とした宇宙利用における有力な技術候補として継承されている²³⁾。欧州においても深宇宙通信のために、パルス位置変調による光通信の検討が進んでいる²⁴⁾。最近では光の量子性を生かした通信が注目され、衛星から地上への量子鍵配信の実証計画が検討されている。これはSpace-QUESTとよばれるプロジェクトであり、日本からはNICTがトピカルチームメンバーとして参加している*1。

日本の活動としては、JAXAが低軌道衛星とデータ中継衛星との衛星間通信に用いる光通信装置の開発が挙げられる²⁵⁾。JAXAは使用する波長として $1\ \mu\text{m}$ 帯に着目し、欧州のデータ中継衛星に搭載される光通信機器との相互運用性を確保することを目指している。また、NICTでは、波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯による光通信および波長 $0.8\ \mu\text{m}$ を用いた量子鍵配信を行う小型衛星に搭載可能な光通信装置の開発を進めており、衛星を打ち上げ後には衛星-地上局間光通信の実施を計画している²⁶⁾。

また、宇宙光通信の相互運用を目指し、2009年10月には宇宙機関の会合のひとつであるThe Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS)において、技術検討を行う委員会としてThe Optical Channel Coding and Modulations Special Interest Group under the Space Link Services Areas (SLS-OCM)が設立された*2。この技術検討会では、衛星間、衛星-地上局間および深宇宙-地上局間をレーザー光で結ぶシナリオを想定し、そこで用いられる通信方式や符号技術などの議論を行う。1年間に2回開かれるもので、第4回目の会合が2011年5月に実施された。

*1 <http://www.quantum.at/research/quantum-teleportation-communication-entanglement/quantum-entanglement-for-space.html>

*2 <http://public.ccsds.org/default.aspx>

本稿では、将来の宇宙利用に重要な技術となる宇宙光通信についてこれまでの実証例を整理し、特に2006年に世界初の実施例となった衛星 OICETS を用いた低軌道衛星-地上局間の光通信実験について述べた。また、国際的な動向と今後の計画として、欧州、米国および日本の計画を示し、宇宙機関の会合の場で始まった技術検討会について紹介した。なお、本稿で示した測定データは、JAXA と NICT が実施した次世代の宇宙光通信技術に関する共同研究の成果である。

文 献

- 1) 門脇直人, 吉村直子, 高橋 卓, 鈴木龍太郎: “超高速インターネット衛星 (WINDS) における衛星搭載交換技術の開発”, 電子情報通信学会論文誌 B, **J93-B** (2010) 1035-1042.
- 2) 鈴木龍太郎, 高橋 卓, 近藤良久, 滝澤 修, 吉村直子, 山口真司, 秋岡真樹, 大川 貢, 浅井敏男, 赤石 明, 寺田岳大: “超高速インターネット衛星「きずな」(WINDS) によるサブイバビリティ・アプリケーション実験”, 電子情報通信学会技術研究報告, **110** (2010) 51-56.
- 3) 荒木賢一: “宇宙光通信技術”, 光学, **33** (2004) 582-587.
- 4) 有本好徳: “宇宙光通信技術”, 光学, **35** (2006) 469-474.
- 5) 城野 隆: “光衛星間通信実験衛星「きらり」と「アルテミス」による双方向光通信実験”, 光学, **35** (2006) 481-483.
- 6) M. Toyoda, M. Toyoshima, T. Takahashi, M. Shikatani, Y. Arimoto, K. Araki and T. Aruga: “Ground to ETS-VI narrow laser beam transmission,” Proc. SPIE, **2699** (1996) 71-80.
- 7) K. E. Wilson, J. R. Lesh, K. Araki and Y. Arimoto: “Overview of the ground-to-orbit lasercom demonstration,” Proc. SPIE, **2990** (1997) 23-30.
- 8) H. Hemmati (ed.): *Deep Space Optical Communications* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2006).
- 9) M. Reyesa, Z. Sodnik, P. Lopez, A. Alonso, T. Viera and G. Oppenhauser: “Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the optical ground station,” Proc. SPIE, **4635** (2002) 38-49.
- 10) T. Tolker-NieIson and G. Oppenhauser: “In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX,” Proc. SPIE, **4635** (2002) 1-15.
- 11) M. Toyoshima, S. Yamakawa, T. Yamawaki, K. Arai, M. Reyes Garcia-Talavera, A. Alonso, Z. Sodnik and B. Demelenne: “Long-term statistics of laser beam propagation in an optical ground-to-geostationary satellite communications link,” IEEE Trans. Antennas Propag., **53** (2002) 842-850.
- 12) T. Jono, Y. Takayama, N. Kura, K. Ohinata, Y. Koyama, K. Shiratama, Z. Sodnik, B. Demelenne, A. Bird and K. Arai: “OICETS on-orbit laser communication experiments,” Proc. SPIE, **6105** (2006) 610503.
- 13) T. Jono, Y. Takayama, K. Shiratama, I. Mase, B. Demelenne, Z. Sodnik, A. Bird, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knappek and K. Arai: “Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground lasercom demonstration by OICETS,” Proc. SPIE, **6457** (2007) 645702.
- 14) M. Toyoshima, K. Takizawa, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, H. Kunimori, T. Jono, Y. Takayama, N. Kura, K. Ohinata, K. Arai and K. Shiratama: “Ground-to-OICETS laser communication experiments,” Proc. SPIE, **6304** (2006) 63040B01.
- 15) N. Perlot, M. Knappek, D. Giggenbach, J. Horwath, M. Brechtelsbauer, Y. Takayama and T. Jono: “Results of the optical downlink experiment KIDO from OICETS Satellite to Optical Ground Station Oberpfaffenhofen (OGS-OP),” Proc. SPIE, **6457** (2007) 645704.
- 16) V. Cazaubiel, G. Planche, V. Chorvalli, L. L. Hors, B. Roy, E. Giraud, L. Vaillon, F. Carré and E. Decourbey: “LOLA: A 40.000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite,” Proc. 6th International Conf. on Space Optics, SP-621 (Noordwijk, The Netherlands, 2006) pp. 27-30.
- 17) B. Smutny, R. Lange, H. Kämpfner, D. Dallmann, M. Gregory and G. Mühlwinkel: “High data rate optical inter-satellite links,” IEEE International Conf. on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) (2009) ICSOS2009-2.
- 18) 豊嶋守生, 高山佳久: “宇宙光通信の動向—国際ワークショップ GOLCE2010 を中心に—”, 電子情報通信学会技術研究報告, OPE2010-26 (2010) 21-26.
- 19) Y. Takayama, T. Jono, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knappek, K. Shiratama, J. Abe and K. Arai: “Tracking and pointing characteristics of OICETS optical terminal in communication demonstrations with ground stations,” Proc. SPIE, **6457** (2007) 645707.
- 20) Z. Sodnik, B. Furch and H. Lutz: “Free-space laser communication activities in Europe: SILEX and beyond,” IEEE Laser and Electro-Optical Society (LEOS), MH1 (2006) pp. 78-79.
- 21) B. Chene, C. Michel and B. Laurent: “A proposed data relay infrastructure in Europe after Artemis in orbit validation,” 23th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), I000153 (2005) pp. 1-11.
- 22) D. M. Boroson, A. Biswas and B. L. Edwards: “MLCD: Overview of NASA’s Mars laser communications demonstration system,” Proc. SPIE, **5338** (2004) 16-28.
- 23) R. J. Cesarone, D. S. Abraham, L. J. Deutsch, G. K. Noreen and J. A. Soloff: “Architectural prospects for lunar mission support,” International Lunar Conference 2005 (2005) 1-12.
- 24) K. Kudielka: “Laser communications in space: Applications and systems,” IEEE Laser and Electro-Optical Society (LEOS), TuP2 (2007) 292-293.
- 25) 山川史郎, 花田達之, 高畑博樹, 藤原勇一: “JAXA における次世代光衛星間通信技術への取組み”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, BI-1-4 (2010) SS-80.
- 26) 豊嶋守生, 高山佳久, 荘司洋三: “超小型光トランスポンダの開発 I—開発コンセプトと超小型衛星への適用—”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, BI-1-5 (2010) SS-81-SS-82.

(2011年1月14日受理)