

# 宇宙光通信の動向

## —国際ワークショップ「GOLCE2010」開催報告—

豊嶋守生

情報通信研究機構

あらまし 宇宙空間における通信は、空間的に離れた場所へ情報を伝送するために、通常電波が用いられている。しかし、近年、光ファイバ通信をはじめとする光学技術やレーザー技術の発達に伴い、レーザー光線つまり光波を用いて離れた宇宙機器間で通信を実現できる時代に突入した。電波も光波も同じ電磁波であるが、とりわけ宇宙における光波の利用は、使用レーザーの周波数が非常に高いことに起因して、小型・軽量化、高速・大容量化などの特徴を有し、周波数資源の有効活用や法的規制が無いこともあり、電波よりも将来に向けて有望な手段である。欧州では、低高度軌道(LEO)の観測衛星と静止軌道(GEO)の衛星間において、既に2003年から50Mbpsの光通信回線が定常的に運用されている。日本においては、光通信機器を搭載した光衛星間通信衛星(OICETS)が2005年8月に打ち上げられ、欧州の衛星との間で光衛星間通信実験が成功裏に実施された。その後、世界の4局の光地上局(OGS)との間でOICETSを用いた衛星—光地上局間レーザー通信実験が実施され、各サイトにおけるレーザー伝搬データの取得に成功している。情報通信研究機構(NICT)では、これらの伝搬データを持ち寄り、伝搬モデルの構築に資するため、光地上局—OICETS間レーザー通信実験に関する国際ワークショップ2010 (GOLCE2010)を主催し、スペインのテネリフェ島で2010年5月に開催した。GOLCE2010では、世界各国での宇宙光通信に関する活動状況も報告された。本稿では、GOLCE2010を通して、宇宙光通信に関する研究開発動向を紹介する。

### 1. はじめに

**宇**宙における空間光通信は、小型・軽量化、高速・大容量化し易いなどの特徴を有し、法的規制を受けずに周波数資源を開拓できることから、有望な通信手段として注目されている<sup>[1]</sup>。とりわけ低軌道衛星(LEO)から地上への光による超高速データ伝送系の開発は、年々増加する地球観測衛星などの膨大なデータを伝送する上で、将来の有力な通信手段を確立するための第一歩となる<sup>[2]</sup>。このような高速ダイレクトリンクを用いるシステムでは、大気ゆらぎ存在下でも安定させてアップリンク送信を行う必要がある。その光伝送方式の技術実証は重要である。

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「きらり」(OICETS)は、2005年8月に打ち上げられ、欧州宇宙機関(ESA)の静止衛星ARTEMISとの間で、世界初の双方向光衛星間通信実験が成功裏に実施された<sup>[3]</sup>。2006年には、東京都小金井市にある情報通信研究機構(NICT)の宇宙光通信地上局(以下、NICT光地上局)の上空において、世界初の地上—低軌道衛星間でレーザー通信実験が行われた<sup>[4]</sup>。さらに2008年から、NICTのみのレーザー通信実験ではなく、NASAジェット推進研究所(JPL)、ESA、ドイツ航空宇宙センタ(DLR)を巻き込み世界各国の光地上局(OGS)とOICETS間との国際共同レーザー通信実験を実現し、地球上の違うサイト条件で貴重なレーザー伝搬特性の取得に成功した<sup>[5]</sup>。これらの成果を持ち寄るため、2010年5月に地上局群—OICETS間レーザー通信実験の国際ワークショップ(GOLCE2010)として成果報告会をスペインのテネリフェ島において、NICT主催で開催した<sup>[6]</sup>。GOLCE2010は、2010年5月13日～15日にかけて全日程で3日間行われ、そのうち口頭発表は2日間で全22件の発表が行われた。会議の参加者は、6カ

国(スイス、ドイツ、オランダ、米国、スペイン、日本)から33名(2日間でのべ66名)が参加し、機関としてはESA、NASA、JPL、DLRなど多くの光関係者が参加した。現在では、この成果を、伝搬モデルの構築や最適な符号化など標準化に繋げようという動きがNICTを中心に進んでおり、宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)でも議論が開始されている。本稿では、国際ワークショップGOLCE2010での内容を中心に、宇宙光通信の動向を報告する。

### 2. 米国における光通信の動向

#### 2.1. NASA

NASAでは、宇宙において光通信ミッションを用いる際に、深宇宙探査に重きを置いている。それは、光通信を用いると、質量において約50%、電力において約65%、データ伝送速度において約20倍の性能となる点でRFより優れているからである。しかしながら、将来の通信アーキテクチャとして光とRFを両方ミックスして使用する計画である。その中には、大きく分けて地球近傍用搭載光ターミナル、深宇宙用搭載光ターミナル、地上光地上局インフラがある。地球近傍用では、まず近いうちに月との光通信を行うLLCD(Lunar Laser Communications Demonstration)により、月大気ダスト環境探査機LADEE(Lunar Atmosphere Dust Environment Explorer)から光通信を行う計画である。地上にはフォトンカウンティングアレイ受信機を置き、40cmのアレイ受信望遠鏡と、15cmのアレイ送信望遠鏡でビーコンを送信する。LADEE搭載光ターミナルは、10cmの望遠鏡を搭載し、ダウンリンク600Mbps、アップリンク16Mbpsであり、cmオーダのレンジングを行う予定である。深宇宙用光ターミナルでは、DOT(Deep Space Optical Terminal)を2018年に打ち上げることを目指してキー技術を同定するた

めの検討が行われており、2010年の夏にはフェーズA検討を終える予定である。この検討の中では、高効率のフォトンカウンティング受光素子、ジッター抑圧システム、軽量光学系、軽量化の最新技術などが検討されている。

しかしながら、光通信は雲の影響を受けるため、国際間における光地上局群の相互運用性(インタオペラビリティ)が最重要である。その際にキーパラメータとなるのは、波長、変調方式、符号化であり、CCSDS等で早めに標準化するべきであると考えている。

## 2.2. JPL

NASAジェット推進研究所(JPL)では、深宇宙探査へのレーザ通信を考えている。これまで開発されてきた惑星との光通信用に開発された要素技術の主なものを上げると、 $4 \times 4$ の超電導ナノワイヤ光受光素子アレイ、振動アイソレーションプラットフォーム、出力2Wの1550nmの搭載EDFA送信機、1Gbps達成可能なパルス位置変調(PPM)用電子回路、シャノンの量子限界の通信容量に1dBに近づくOOK/PPM方式の開発、低コストな大開口望遠鏡、大気ゆらぎ観察システムなどがある。また、火星への通信では、探査機と0.4AUの距離でのトランクリンクを、ダウンリンク0.25Gbps、アップリンク0.2Mbpsで質量30kg、消費電力110W以下で実現する。ただし、地上側では直径12mの望遠鏡を仮定している。

他にも、月面レーザ通信、月-火星アクセスリンクをコンセプトとして計画している。最近では、航空機を用いた光通信実験を20~30kmの距離で実施し成功させている。低軌道衛星では、10Gbpsを送信可能な5cm直径の小型光ターミナルを検討しており、精追尾機構を有し $20 \mu$  radの指向精度を達成するものである。地上側では60cm直径の望遠鏡を仮定している。さらに、火星-地球間におけるレーザ測距を1mmの精度で行えるシステムを検討しており、航空機とのレンジング実験では、5kmの距離で1mの精度を差動GPSと比較で実現しており、ポスト処理後の残留誤差は10cm程度ということである。また、衛星バスシステム内をファイバ光学系で通信するシステムを検討しており、ハーネスの軽量化、電磁ノイズの低減を実現し、伝送速度を現在の100Mbpsから10Gbpsに高速化して通信するシステムの評価を行う予定である。

## 2.3. Aerospace Corporation

米国Aerospace Corporationでは、ドイツのTesatが開発した光ターミナル(LCT)を搭載した衛星NFIREを運用している。この国際共同プロジェクトは、2005年に米国とドイツとの間で調整が開始され、2007年に衛星が打ち上げられた後、ドイツTerraSAR-X衛星との衛星間レーザ通信実験等を実施してきている。波長1.064  $\mu$  mで、コヒーレントホモダインBPSK方式によりデータ伝送速度は世界最速の5.6Gbpsを実現した。後述するが、ドイツ側はTerraSAR-XへLCTを搭載すると共に、ドイツ製のLCTを米国のNFIREへ搭載させた。実験では、衛星間の追尾誤差は $6.8 \mu$  rad程度であり、これまで300回を超える実験を実施している。また、ESAのOGSやハワ

イの地上局でもOGSとの実験を実施しており、DVD1800枚に及ぶ8.1TBytesのデータの伝送に成功している。さらに、2011年にも、衛星間と地上間のレーザ通信実験を計画している。

## 3. 欧州における光通信の動向

### 3.1. ESA

欧州宇宙機関(ESA)では、SILEX計画でLEO衛星のSPOT4と静止衛星のARTEMIS間で衛星間レーザ通信を実現して以来、OICETSとの衛星間レーザ通信、ARTEMISと航空機とのレーザ通信(LOLA)、ARTEMISとスペインテネリフェにあるOGSを用いたの衛星-地上間のレーザ通信実験を行ってきた。これらは、波長 $0.8 \mu$  m帯のレーザを用いたもので、50Mbpsの伝送速度であり、SPOT4からのレーザ通信は、2003年から定期的に観測データのデータ伝送に週2回定期的に使用されている。最近では、ドイツのTerraSAR-XとESA OGSのそばに設置したドイツの光ターミナル(LCT)のエンジニアリングモデルとの間で、波長 $1.06 \mu$  mでのレーザ通信実験を実施している。

ESAは、LCTをこれからの衛星計画へ盛り込んでいくことを考えている。まず、静止衛星のAlphaSatと低軌道衛星Tandem-XIにLCTを搭載し、1.2Gbpsでデータ中継を行うことを考えている。欧州連合(EU)ではGMES計画(Global Monitoring of Environment and Security: 全地球的環境・安全モニタリング)により、環境の管理や人の安全に有用な情報の提供を目的として地球環境を計測する宇宙政策を実施しており、Sentinelというシリーズの観測衛星が用いられる。ESAでは、それらの観測衛星からのデータ中継にEDRS(European Data Relay Satellite System)というコンセプトを提案している。地震や火事などの災害時にタイムリーに合成開口レーダ(SAR)やマルチスペクトル光学観測データを提供するためには、1日に6テラバイト以上のデータダウンリンクが要求されており、LCTを用いることを考えている。また、欧州データ中継システムのEDRSでは、静止軌道衛星にレーザ通信機器を搭載し、EDRSのピギーバック衛星とともにデータ中継を行うことを計画している。

また、ESAではラグランジュポイントに科学衛星を打ち上げ、そのデータリンクをレーザ通信を用いるDOLCEプロジェクトを計画している。例えば、ジェームスウェーブ宇宙望遠鏡(JWST)では、10cm直径の光ターミナルで10Mbpsのレーザ通信を実現する。また、月とのレーザ通信では、1mの地上望遠鏡を仮定すると170Mbpsを1Wのレーザで可能である。さらに火星とのレーザ通信では、ROSAプロジェクトにより1日に300Mbytesのデータ伝送が必要と試算しており、距離2.6AUで地上で10mクラスの望遠鏡を用いると、320kbpsのダウンリンクが可能である。また、ESAでは量子鍵配信を国際宇宙ステーション(ISS)から行うSpace-QUESTを計画しており、現在量子光源などの開発が進んでおり2015年打ち上げを目指している。

ESA OGSでは、これまでに衛星とのレーザ通信、島間での144kmのレーザ伝搬回線、ライダなどへの試験

施設、スペースデブリのカタログ化への貢献、ディープインパクト(comet 9P/Temple-1)、Corot、Rosettaなどの科学ミッションへのバックアップ観測、XMM NewtonやHerschel/Planck等の探査機の高精度軌道決定の援助、ESAによる天文観測などを行ってきた。今年度は、光通信のための補償光学(AO)システムを導入しようとしており、現在インストール作業中である。しかしながら、これからドームがLEO衛星を追尾できるように望遠鏡システムのアップグレード等も考えており、1年に170kユーロの保守費用が必要である。ESAはこれまでいろいろ遣り繰りしてOGSにおいて各種実験を行ってきたが、2010年までしか予算が確保できていない。そのためこれからの対策として、ESAの各種将来ミッションのユーザが想定されている現状や、シーイングなど非常に気象条件が良い点や、アクセスしやすくESA以外の機関とも良い関係を築いてきていることなどを考慮し、これからはOGSの利用に関して、OGSの施設を有料で貸し出す新たなスキームを検討している。

### 3.2. DLR光通信研究グループ

DLR光通信研究グループでは、これまで、気球を用いたレーザ通信実験や、OICETSを用いたレーザ通信実験を行ってきた。その経験から、LEOから地上への直接レーザ通信が重要であると考えている。レーザ通信は雲があると遮断されるが、その確率分布を検討し、世界中に光地上局を設置することで、サイトダイバーシティ効果を狙っている。世界でチリ、スペイン、オーストラリア、ギリシャの光地上局を4局選べば、99%以上のアクセス率となる。現在、ミュンヘンのDLR施設の屋上に設置された40cm開口の光地上局に加えて、60cm開口の可搬局を開発しており、2011年までに整備可能である。また、さらに2012年までにクーデ方式での新設備を準備している。その他にも、OSIRISという小型衛星に搭載するレーザ通信機器を開発しており、大気ゆらぎの計測を行う予定である。

また、DLRでは本格的に、光通信にAOを適用していくことを考えている。波面のセンシングに、リファレンスビームを用いた干渉型で位相シフトを行い波面センサの代わりにすることを考えている。これは、干渉計は必要になるが、受信センサにCCDなどのイメージセンサのみでよいという特徴を持つ。2010年に1550nmでXenicsのカメラを用いてクローズドループ試験、1km以上でのAOを用いた長距離実証実験を考えている。

### 3.3. DLR本部

DLRでは、ドイツのTesat社が開発したLCTを各種欧州の衛星システムへ搭載する計画を持っている。まず、ESA AlphaBusでは、TDP-1というプログラムによりレーザ通信機器とKaバンドのダウンリンク300-600Mbpsのペイロードが搭載されるが、東経25度のGEOにあるAlphaSatから1.8Gbpsのレーザ通信を行う計画で、2012年に打ち上げ予定である。GMESセンチネル計画では、Sentinel 1Aはレーダ衛星、Sentinel 1Bは光学衛星で、それぞれ2012、2013年に打ち上げられる予定であるが、50%のデータをレーザ通信経由で伝送する計画で

ある。これらの観測衛星からのデータ中継を行うESA EDRSシステムへは、ヨーロッパから230Mユーロ、ドイツから114Mユーロが投じられており、1.8Gbpsのレーザ通信をすることを考えており、2012年に打ち上げ予定である。ドイツOHBが開発しているSmall GEOプラットフォームへもLCTが主ペイロードとして入っており、2014年に打ち上げが予定されており、EDRSとして稼働する。EDRSシステムの運用業者の選定は、2010年第3四半期か第4四半期に計画されている。

### 3.4. Tesat-Spacecom GmbH

ドイツTesat社は、LCTを開発しているメーカーであり、各種欧州の衛星システムへすでにLCTを納入することが決まっている。LCTはドイツのTerraSAR-Xと米国のNFIRE衛星へ搭載され、2007年から5.6Gbpsの衛星間レーザ通信実験を行っている。5月6日現在では、78回の通信実験を実現して、途中で途切れることなく650秒の通信時間を達成し、累積して17800秒の通信を実証しており、これは2770枚分のDVDを送ったことになる。現在では、平均バイアス衛星指向誤差は141  $\mu$  radであり、以前18.7秒要していた捕捉時間は2秒に縮まり、コヒーレント光通信の光周波数位相同期に要する捕捉時間においては、30秒から8秒に短縮されている。現在では、LCTの衛星運用については、衛星運用センターへ移管されている。

また、ハワイのマウイ島へ地上用光ターミナルを設置し地上-衛星間のレーザ通信実験も実施しており、最初の実験では43秒の通信に成功している。テネリフェのESA OGSに設置した光ターミナルとも最初の実験では87秒の通信に成功し、ビット誤り率(BER)については、アップリンク $10^{-5}$ 、ダウンリンク $10^{-12}$ を計測している。現在までに、光周波数の追尾には最大65秒を要しているが、レーザ通信時間は130秒を達成している。

Tesat社LCTは、すでに将来ミッションとしてAlphaSatのGEOターミナル、Sentinel 1AとSentinel 2AのLEOターミナル、EDRSのGEOターミナル等に採用されており、EDRSプログラムではバックボーン回線として使われる予定である。上記に示した宇宙実証からも分かるように、技術の成熟度レベル(TRL)は9を達成している。

### 3.5. RUAG Space Ltd.

RUAG社は、以前はContraves社であったが、後にOerlikonへ変わり、2008年~2009年にSaab Space、Austrian AerospaceとOerlikon Spaceが吸収されRUAGとなった。スイス、スウェーデンとオーストリアの8都市にまたがり、本部はスイスチューリヒにある。RUAGでは、深宇宙探査のESAプロジェクトにおける数々の光通信ミッションの検討やRFとのハイブリッド回線の検討を行っている。例えば、ラグランジュポイントL1/L2、火星からの光通信回線をO-DSL、DOLCE、ROSA、IPComm等で検討している。DOLCEでは、搭載光ターミナルの光アンテナ直径135mmで、MOPALレーザを送信し、1.5Mkmの距離で地上1mの望遠鏡で10Mbpsを実現する。ROSAプロジェクトでは、同様の光ターミナルで400Mkmの距離で地上4mの望遠鏡で160kbpsを実現する。何れ

も変調方式はPPMで、繰り返し周波数(PRF)6kHzで2048スロット、PRF30kHzで128スロット、PRF10MHzで32スロットが用いられる。そのシステム実証として、スペインテネリフェ島とラパルマ島間の144kmのPPM伝送実験を行っており、ラグランジュL2とのリンク距離では-68.9dBmの受信感度で10Mbpsを実証し、火星との距離では-84.2dBmの受信感度で161kbpsを実証した。シンチレーションの影響が2~3dBほどあったが技術的にはPPMでのレーザ通信が達成されている。この応用として、火星のサンプルリターンミッションにおけるレーザ通信を検討しており、390Mkmにおいて地上17mの望遠鏡を用いて1Mbps程度の通信回線が検討されている。2010年には惑星間通信の検討を実施し、2011年にはさらに改良した通信機器で、島間での地上実証実験を予定している。

## 4. 日本における光通信の動向

### 4.1. JAXA

JAXAでは、OICETSプログラムにおいて、2005年から100回以上の衛星間レーザ通信実験が行われた。捕捉追尾は90%以上の確率で確立することができ、BERは誤り訂正なしで $10^{-6}$ 以下のレーザ通信実験が成功裏に達成された。

その後、JAXAではALOS-3衛星に搭載する光ターミナルの検討を行っている。ALOS-3では、光学イメージャによる観測ミッションが搭載されるが、1観測で130Gbytesのデータが生成されるため、高速データ伝送手段が必要とされる。地上へのデータ伝送には、データ中継衛星を介して地上へ伝送することを考えている。現在開発されている光ターミナルは、波長1.064  $\mu$ mのコヒーレントホモダインBPSK方式を採用し、LEO側のアンテナ直径10cm、GEO側のアンテナ直径20cmの光通信システムで1.0~2.5Gbpsを達成する。現在レーザ光源の開発を行っており、2.3WのCW出力を達成しており、光位同期期を行い7Gbpsまでの受信機動作を確認している。2014年までにLEO、GEO用の光ターミナルを開発し、2015年以降の軌道上サービスに供していく予定である。

### 4.2. NICT

NICTでは、1994年に技術試験衛星VI型(ETS-VI)で世界初の静止軌道—地上間レーザ通信を実証してから、2006年にはOICETSを用いた世界初のLEO—OICETS間のレーザ通信実験を成功させてきた。2006年の実験の後、2007年4月から2007年9月にかけてNICTがOICETSの地上衛星運用システムの再構築を行い、2008年から再度OICETSとのレーザ通信実験を再開し、世界の光地上局4局を行なった国際レーザ通信実験キャンペーンを実現した。NICTでは、27回の実験を計画し15回実験に成功し、NASA JPLでは7回中4回、DLRでは10回中5回、ESAでは9回中8回の光リンク確立にそれぞれ成功した。

各国の光地上局との実験で取得されたデータを解析した速報によると、アップリンクに関しては、衛星における測定システムは各地上局実験で共通であるので、

比較には好都合である。大気ゆらぎによるシンチレーションインデックスは0.05~0.35くらいに分布しており、周波数変動は数百Hzの変動成分が認められた。信号変動の時間相関は、2ms~5msの相関長を持っており、これは符号化の際に符号長における目安を与えるものである。

一方、ダウンリンクでは、衛星側のレーザ光源として、同一のレーザを用いるため比較するには好都合である。JPLでは、シンチレーションインデックスは0.1~0.3程度が測定され、BERがほぼ理論通りに得られている。DLRでは、シンチレーションインデックスは0.05~0.4程度が測定され、変動周波数は500~700Hz程度であった。また、大気ゆらぎの測定において、波面誤差をシャックハルトマンセンサで測定しており解析を行っている。ESAでは、シンチレーションインデックスは0.05~0.5程度が測定され、変動周波数は200Hz程度となっている。NICTの光地上局では、5cmと32cmの異なる望遠鏡の開口径でダウンリンクのデータが取得されているので、その周波数解析による比較を行い、開口平均効果の解析を実施した。また、NICTからは、シンチレーションインデックス、パワースペクトル密度、確率密度関数、時間共分散などを解析するMatlabプログラムを開発した。今後、伝搬データを解析するにあたって周波数解析や確率分布解析等を含む共通解析ツールとして提供し、各サイトでの伝搬データを同一解析条件で比較検討していきたいと考えている。この共通解析ツールが、伝搬モデルの構築へ貢献していくことを期待している。

また、NICTでは、50kg級の超小型衛星にレーザ通信を用いる宇宙光通信技術実証衛星(SOCRATES: Space Optical Communications Research Advanced TEchnology Satellite)プロジェクトを立ち上げた<sup>[7]</sup>。超小型衛星に搭載可能なように5kg程度の光ターミナルを開発し、ネットワーク化した複数の光地上局との間で10Mbps程度の通信速度を実現することを目指している<sup>[8]</sup>。超小型衛星は、ロケットのピギーバックとして打ち上げ可能であり、タイムリーな宇宙実証が期待できる。現在、2012年打ち上げを目標にエンジニアリングモデルの開発を行っている。

## 5. まとめ

本稿では、スペインのテネリフェ島で2010年5月に開催された、光地上局—OICETS間レーザ通信実験に関する国際ワークショップ2010(GOLCE2010)を中心に、宇宙光通信に関する研究開発動向を紹介した。OICETSを用いた国際共同実験のレーザ通信実験キャンペーンでは、世界各国で取得された衛星—地上間のレーザ伝搬データが持ち寄られ、伝搬モデルの構築等に役立てられる予定である。また、このような活動により、CCSDS、ITU等における標準化への貢献が期待される。研究開発の動向については、米国では、主に深宇宙探査にレーザ通信を用いる計画を進めている。欧州では、宇宙におけるデータ中継にレーザ通信を用いる計画を精力的に推進しており、これにはドイツ製のレーザ通信機器が用いられる予定である。大気を介し

たレーザー通信には、今後、補償光学がいよいよ適用されようとしており、各機関がシステム実証を始めている。LEOとの光通信実験が宇宙実証されたことで、超小型衛星へもレーザー通信を利用する動きも出てきており、今後、世界各国の研究開発動向から目が離せない状況となるであろう。

## 文 献

- [1] V. W. S. Chan, "Optical satellite networks," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, pp. 2811–2827, 2003.
- [2] M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications [Invited]," *Journal of Optical Networking*, Vol. 4, pp. 300-311, 2005.
- [3] T. Jono, Y. Takayama, N. Kura, K. Ohinata, Y. Koyama, K. Shiratama, Z. Sodnik, B. Demelenne, A. Bird, K. Arai, "OICETS on-orbit laser communication experiments (Invited Paper)," *Proc. SPIE*, Vol. 6105, pp. 13-23, 2006.
- [4] M. Toyoshima, T. Takahashi, K. Suzuki, S. Kimura, K. Takizawa, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, H. Kunimori, T. Jono, Y. Takayama, and K. Arai, "Results from Phase-1, Phase-2 and Phase-3 Kirari Optical Communication Demonstration Experiments with the NICT optical ground station (KODEN)," *24th International Communications Satellite Systems Conference of AIAA*, AIAA-2007-3228, Korea, April 13 (2007).
- [5] M. Toyoshima, H. Takenaka, C. Schaefer, N. Miyashita, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, H. Kunimori, S. Yamakawa, E. Okamoto, "Results from phase-4 Kirari optical communication demonstration experiments with the NICT optical ground station (KODEN)," *26th International Communications Satellite Systems Conference of AIAA*, AIAA-2009-3.4.2, Edinburg, June (2009).
- [6] Proceedings of International Workshop on Ground-to-OICETS Laser Communications Experiments 2010 (GOLCE2010), ISSN 2185-1484, Tenerife, Spain, May 2010.
- [7] 豊嶋守生他, 「超小型衛光ターミナルの開発 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, BI-1-5, 仙台(2010).
- [8] 高山佳久他, 「超小型衛光ターミナルの開発 II – 光地上局ネットワークへの展開 –」, 電子情報通信学会総合大会, BI-1-6, 仙台(2010).