

## 4-2 NICT 光地上局レーザ通信システム概要と地上-衛星間レーザ通信実験

### 4-2 Overview of the Laser Communication System for the NICT Optical Ground Station and Laser Communication Experiments in Ground-to-Satellite Links

豊嶋守生 久利敏明 クラウス ヴェルナー 豊田雅宏 竹中秀樹  
 荘司洋三 高山佳久 小山善貞 國森裕生 城野 隆 山川史郎  
 荒井功恵

TOYOSHIMA Morio, KURI Toshiaki, Werner KLAUS, TOYODA Masahiro, TAKENAKA Hideki, SHOJI Yozo, TAKAYAMA Yoshihisa, KOYAMA Yoshisada, KUNIMORI Hiroo, JONO Takashi, YAMAKAWA Shiro, and ARAI Katsuyoshi

#### 要旨

情報通信研究機構 (NICT) では、将来の宇宙光通信の実現に向けて、通信品質の改善や将来必要となる要素技術の研究開発を行っている。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月にドニエプルロケットによりカザフスタンから打ち上げられ、軌道高度 610 km、軌道傾斜角 97.8° の太陽同期軌道へ投入された。その後 2005年12月に「きらり」と欧州宇宙機関 (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。「きらり」は、慣性空間に衛星姿勢を固定することにより、静止衛星方向のみではなく光地上局の方向へも光アンテナを指向することができるため、東京都小金井市にある NICT の光地上局上空において、地上-低軌道衛星間で光通信実験を行うことが可能である。本実験の目的は、大気ゆらぎの影響下において、「きらり」の捕捉追尾性能を確認すると共に、NICT 光地上局の追尾指向性能についても確認し、地上-低軌道衛星間での光通信の可能性を実証することである。「きらり」を用いた光地上局通信実験は、フェーズ 1-3 となる 2006年3、5、9月と、フェーズ 4 となる 2008年10月から 2009年2月にかけて JAXA との共同研究の下に実施された。本稿では、NICT 光地上局のレーザ通信システムを概説し実験結果を報告する。

The National Institute of Information and Communications Technology (NICT) conducts research and development of laser communication technologies that are needed for the realization and quality improvement of optical space communications. In-orbit verification of the inter-orbit optical communication link experiment between the Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS), dubbed “Kirari”, developed by JAXA and ESA's ARTEMIS satellite was successfully conducted in December, 2005. Kirari was launched by a Dnepr Launch Vehicle from the Baikonur Cosmodrome in the Republic of Kazakhstan and injected into low earth orbit (LEO) at an altitude of 610 km and an inclination of 97.8°. The functions of the satellite systems had been checked during first three months, and the acquisition and tracking of stars and planets was successfully performed. In December 2005, the first bi-directional laser communications link between Kirari and ARTEMIS was successfully established. The Kirari optical communication demonstration experiment with the NICT optical ground station (KODEN) could be realized because the optical antenna can point toward the optical ground station with a special satellite attitude control. The objectives of KODEN are to confirm the tracking abilities of Kirari and the optical ground station under the atmospheric turbulence, and to verify the capability of the laser communications in ground-to-LEO satellite links. The Phases 1, 2, and 3 of bi-directional ground-to-satellite laser communication experiments were successfully performed in March, May, and September of 2006. The Phase-4 experiment was conducted from October,

2008 to February 2009 under the research collaboration with JAXA. In this paper, the results of the Phase 1-4 KODEN experiments are summarized.

### [キーワード]

光衛星間通信実験衛星, 光通信, 光地上局, 大気ゆらぎ, 低軌道衛星  
OICETS, Kirari, Optical communication, Optical ground station, Atmospheric turbulence, Low earth orbit

## 1 まえがき

宇宙における空間光通信は、搬送波の周波数が非常に高く、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、将来に向けて電波よりも有望な手段である [1][2]。とりわけ低軌道衛星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 [3]。この様な高速ダイレクトリンクを用いるシステムでは、通信リンクを大気伝送下でも安定させるアップリンク送信を行う必要があり、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月にドニエプルロケットによりカザフスタンから打ち上げられ、軌道高度 610 km、軌道傾斜角 97.8° の太陽同期軌道へ投入された。その後 2005年12月に「きらり」と欧州宇宙機関 (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 [4]。これらの成果については、本特集号 **3-1**、**3-2** を参照されたい。

「きらり」は、慣性空間に衛星姿勢を固定することにより、静止衛星方向のみではなく光地上局の方向へも光アンテナを指向することができる。そのため、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、地上-低軌道衛星間で光通信実験が行われた [5]。この実験において、地上-衛星間においては、大気ゆらぎが大きく、その抑制を行う技術が必要であることが明らかとなった。そこで、NICT では、新たに、シングルモードファイバにカップリングするための精追尾

機構や [6]、符号化により通信品質の向上を目指すため、フィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) ベースのリアルタイム LDPC (Low Density Parity Check) 符号のデコーダを開発し [7][8]、それらを、実際の地上-低軌道衛星間の光通信リンクで動作実証を行った (本特集号 **4-3**、**4-4** を参照)。本稿では、その中で「きらり」を用いた NICT 光地上局のレーザ通信システムの概要と、その実験結果を報告する。

## 2 宇宙光通信の歴史

### 2.1 衛星へのレーザ伝搬に関する研究

大気ゆらぎによるレーザ伝搬理論は 1970 年代から研究が盛んに行われてきた [9][10]。しかし、衛星へのレーザ伝送は、アップリンク伝送におけるシンチレーション (規格化分散値) について、弱いゆらぎの領域において平面波にしたガウスビームのモデルを用いて、1967年に Fried より初めて理論検討が行われた [11]。その後 1968年、Minott より CW アルゴンレーザが、軌道高度 1250 km を航行する GEOS-II 衛星へ照射され、シンチレーションのデータが取得された。衛星仰角 45 度以上においては、対数正規分布、パワースペクトル密度及び確率密度分布等は理論に合うが、一方で低仰角では説明がつかなかった [12]。1973年には、Titterton が Fried と似た理論検討を行い、集光したビームがシンチレーションを低減することを見出した [13][14]。Fried は、また、受信信号の確率密度分布においてビームの指向誤差があるときの影響を考慮し、対数強度が指数分布になることを見出した [15]。1977年には、Bufton より、軌道高度 1800 km ~ 2000 km を航行する GEOS-III 衛星のコーナーキューブ反射器 (CCR) へ光地上局からレーザが照射され、CCR からの反射光が測定され、理

論モデルと比較された。規格化分散値の測定データは、概して2から4倍理論値との乖離が見られた[16]。

1983年にYuraとMcKinleyは、波長1-10 $\mu\text{m}$ 帯における球面波が、地上-衛星間を伝搬する際のフェージングとサージの理論検討を発表した。この理論は、ある与えられた対数強度の分散値において、ある閾値レベルより上下する信号の時間率や平均持続時間、及びフェードとサージの平均時間長を含んでいる[17]。1990年代には、米国において、Relay Mirror Experiment (RME) というレーザ反射実験が行われた。これは、アルゴンレーザとNd:YAGレーザを合わせた3本のレーザが、ハワイのAir Force Maui Optical Station (AMOS) 光地上局より送信され、軌道高度350 kmのRME衛星で反射され、地上局において歪んだ送信レーザのビームプロファイルが測定された[18]。1994年には、Kiasalehにより大気ゆらぎと指向誤差が両方存在する際の確率密度関数 (PDF) が導出され、ガリレオ衛星へレーザ伝送を行ったGOPEXでの実験結果をもとに、追尾誤差に起因する残留指向誤差が検討された[19]。1995年には、SheltonがLACE衛星へガウスビームをアップリンク伝送し、大気ゆらぎによる対数振幅の分散やパワースペクトル密度がハワイにおいて測定され、理論予測と良い一致が示されている[20]。

1995年には、Andrewsらにより、衛星レーザ通信システムにおいて、ビームサイズ、シンチレーションインデックス、フェード時間率、平均フェード回数、平均フェード時間といった統計量が、アップリンクとダウンリンク両方の伝搬路において弱いゆらぎの条件下で導き出された[21]。2000年には、Andrewsらは、その理論をやや強いゆらぎ、及び強いゆらぎの条件下にも適用できるように拡張した。そのシンチレーションモデルは、回折のような小さいスケールの変動が、屈折のような大きいスケールの変動で変調されるようなプロセスとして導出されている。これらの結果は、衛星仰角が30～45度以上になるような、弱いゆらぎの領域でも適用可能である。やや強いゆらぎ、及び強いゆらぎの領域では、確率密度関数 (PDF) はガンマ-ガンマ分布でよく説明が付き、実験データともよく一致をみている[22]-[24]。

## 2.2 NICTにおけるレーザ伝送実験

NICTでは1970年代から、地上におけるレーザの大気伝搬の研究を行ってきた[25][26]。技術試験衛星Ⅲ型 (ETS-Ⅲ) へは、搭載ビジコンカメラを利用した地上-衛星間でのレーザ伝送実験を始め[27]、静止気象衛星 (GMS) へは波長0.5 $\mu\text{m}$ で世界初のレーザ伝送実験に成功し[28]、赤外の炭酸ガスレーザ (波長:10.6 $\mu\text{m}$ ) においても伝送実験に成功した[29]。海洋観測衛星1号b (MOS-1b) においても、レーザ伝送が地球画像の校正への応用実験として行われた[30]。1989年に宇宙光通信地上局が設置されると[31]、衛星レーザ測距システムにより測地衛星 (Ajisai、LAGEOS) や、炭酸ガスレーザレーダによるADEOS (RIS) の観測が行われ[32][33]、H-II A試験フライトレーザ測距装置 (LRE) やADEOS2の測距に成功している[34][35]。1994年から1996年にかけては、技術試験衛星Ⅵ型 (ETS-Ⅵ) に搭載した光通信基礎実験装置 (LCE) を用いて、地上-衛星間における光通信実験が世界で初めて成功裏に実施された[36][37]。また、2004年には、NICT光地上局の捕捉追尾精度が維持されていることを確認するために、マイクロラブサット1号機 ( $\mu\text{-LabSat}$ ) [38] に搭載したCMOSカメラ (CMR) へのレーザ伝送を、成功裏に実施してきた[39]。NICTでは本稿で述べる「きりり」との光通信実験の後、将来50 kgクラスの超小型衛星により軌道上における小型光通信ターミナルの宇宙実証を考えている[40]。NICT光地上局はそれらにも重要な役割を果たすため、追尾及び指向精度などを低軌道衛星で検証することは重要な課題である。

## 2.3 世界初の低軌道衛星による光通信実験

静止軌道衛星への光通信実験は、ESAにおいてARTEMISを用いた実験[41]、NICTにおいて行われたETS-Ⅵを用いた実験等がある[36]。しかし、低軌道衛星を用いた光通信実験は、移動速度が速く静止軌道衛星と比較して捕捉追尾が難しい。1994年にRMEというレーザ反射ミラーを搭載した衛星に、光地上局からレーザを送信し、衛星で反射して異なる光地上局へ伝送する実験がBall Aerospaceによって行われた例がある。しかし、本実験は大気ゆらぎの影響は測定され報告

がなされているが、通信までは行われていない[18]。米国国防総省 (DOD) による開発では、弾道弾防衛局 (BMDO) により開発された STRV2 という光通信機器が低軌道衛星の TSX-5 衛星に搭載され 2000 年 6 月に打ち上げられた。1 Gbps の通信が可能であったが、衛星のヨー軸周りの姿勢誤差が大きく光通信は実現しなかった[42]。「きらり」を用いた地上-衛星間の光通信実験は、「きらり」が低軌道衛星であるという点において、今回の実験が世界初となった。

### 3 実験概要と目的

#### 3.1 実験システムの構成

「きらり」を用いた NICT 光地上局通信実験は、JAXA と NICT との共同研究により 2006 年 3、5、9 月と、2008 年 10 月から 2009 年 2 月にかけて実施された。図 1 に実験の概要を示す。衛星は JAXA により事前に送信されたコマンドによって制御され、ストアコマンドによる自動実行により、NICT 光地上局が可視になる間レーザー通信実験が行われる。衛星搭載の光通信機器は、26 cm 直系のカセグレン型の望遠鏡を有し、光地上局実験時には姿勢を地球指向とする。NICT 光地上局は、東京都小金井市に位置し、NICT によって運用される。NICT 光地上局は、計画された実験開始時刻に衛星追尾を開始し、双方向のレーザー通信を行う。

#### 3.2 実験の目的

「きらり」を用いた光地上局通信実験の目的は、

大気ゆらぎの影響下において、「きらり」の捕捉追尾性能を確認すると共に NICT 光地上局の追尾指向性能を確認することを目的としている。光地上局側においては、

- (1) 低高度周回衛星と地上間の世界初光通信リンクを形成・維持できることを実証し、光地上局の最適構成に関する知見を獲得すること
- (2) 搭載コーナーキューブリフレクタ (CCR) による追尾性能向上を図ること
- (3) 光伝搬データの取得と大気ゆらぎなどの影響を検証すること

等の利点が挙げられる。また、衛星側においては利点として以下がある。

- (1) ARTEMIS 実験では実施不可能であった高速な光学系駆動時の搭載光ターミナル (光衛星間通信機器 LUCE) 制御系の限界性能の評価
- (2) 慣性固定姿勢制御時の衛星バス系の姿勢制御精度及び姿勢安定度の評価
- (3) CCR によるレーザー測距により、衛星の軌道改良に資すること
- (4) 「きらり」衛星の利用と有効活用
- (5) 大容量データの地上への直接伝送が可能

上記により、対静止衛星用に設計された光通信ターミナルが、低軌道衛星として光地上局と通信できる捕捉追尾性能があることを実証することで、将来の通信需要をにらみ、低軌道からの高速直接ダウンリンクの可能性を示すことが出来る。

## 4 NICT 光地上局システム

#### 4.1 NICT 光地上局の構成

光宇宙通信において大気ゆらぎを抑え、レーザー光のアップリンク信号を安定化するには、マルチビームによりレーザーを空間的に複数伝送するマルチビーム伝送方法[43]や、補償光学 (Adaptive Optics) により実時間で大気ゆらぎを補償する方法がある[44]。前者のマルチビームでの伝送を行うには、複数のインコヒーレントなレーザー光源からのビームを空間的に平行に送信するか、単一レーザー光源からのビームを空間的に複数に分けてコヒーレンス時間より長くなるように遅延を与えた後、再びビームを合成する方法がある[45]。本

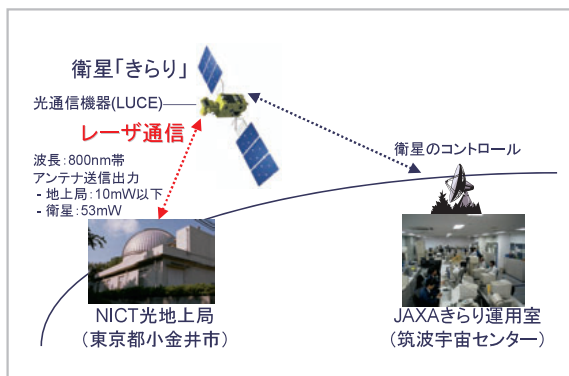


図 1 OICETS-NICT 光地上局間光通信実験の構成

表 1 レーザビームの諸元

	Uplink		Downlink
	Beacon	Communication	
Wavelength	808 nm	815 nm	847 nm
Beam divergence angle, (after 2008)	9 mrad	204 $\mu$ rad (168 $\mu$ rad)	5.5 $\mu$ rad
Beam size	17 mm $\phi$	710 mm $\phi$	120 mm $\phi$
Transmitted power (at telescope aperture)	30 W (max)	10 mW	53 mW
Signal format	CW	2 PPM	NRZ
Data rate	—	2.048 Mbps	49.3724 Mbps
Polarization	Random	LHCP, Random	LHCP
Number of beams	1	4	1
Receiving aperture diam. (March)	26 cm $\phi$	26 cm $\phi$	20 cm $\phi$
Receiving aperture diam. (after May, 2006)	26 cm $\phi$	26 cm $\phi$	31.8 cm $\phi$ (sub-aperutre in 1.5-m telescope)

Notes: 2 PPM: 2-pulse position modulation, NRZ: non-return to zero, LHCP: left-hand circular polarization

実験では、この遅延によるビーム合成を行った。アップリンクには、1.5 m 望遠鏡が用いられ、ダウンリンクの受信には、1.5 m 望遠鏡のサブ開口が用いられた。表 1 に、レーザの諸元を示す。

#### 4.2 送信系システム

図 2 に、送信系のブロック図を示す。通信用ビームは 1.5 m 望遠鏡から送信されている。光源は、広い広がり角を持つビーコン光と、狭い広がり角を持つ通信光を用いた。ビーコン光の光学系は、1.5 m 望遠鏡の下方に設置され、レーザは、波長 808 nm でビーム広がり角 9 mrad で送信された。これは、衛星の予測軌道誤差と、光地上局の指向誤差を考慮しても、十分マージンのある広がり角である。ビーコン光は半導体レーザによりコア系 400  $\mu$ m のマルチモードファイバによりフィードされ、最大 30 W の出力が可能であり、コリメート後に図 3 に示す 1.5 m 望遠鏡の下方から平行に送信される。図 4 と図 5 に、ビーコン用レーザのビームプロファイルと波面誤差を示す。ビーコン用ビームは、波面誤差 0.150  $\lambda$  (rms) 程度となっている。

通信レーザ送信光学系はクーデ室内にある光学ベンチに設置され、クーデパスを通り図 6 に示すように 1.5 m 望遠鏡から送信される。レーザ

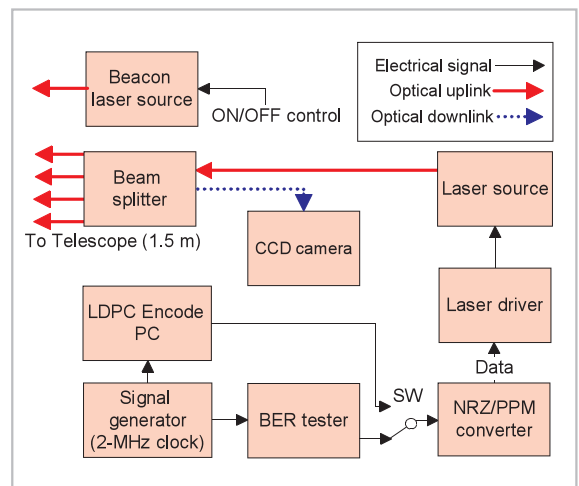


図 2 送信系のブロック図

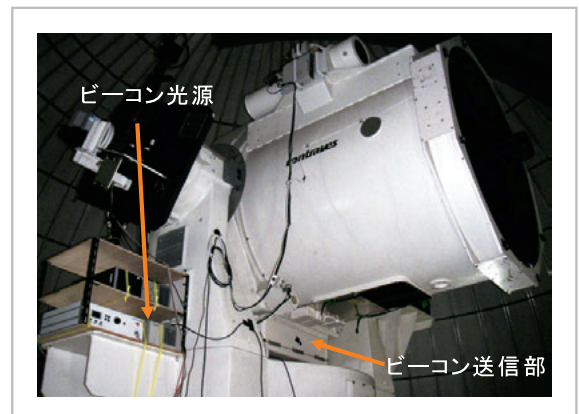


図 3 NICT 光地上局の 1.5 m 望遠鏡とビーコンビームの設置位置

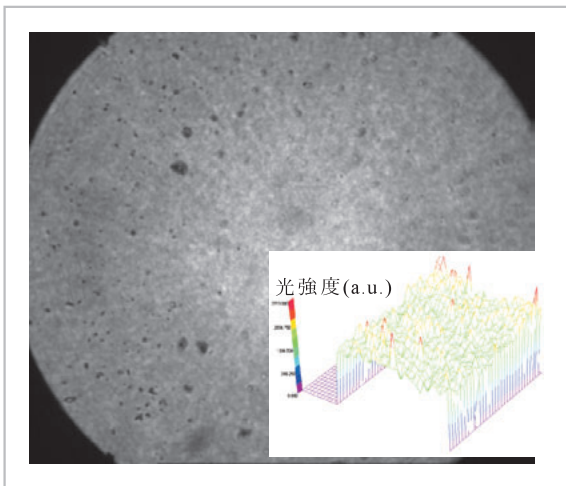


図4 ビーコンビームのビーム強度プロファイル

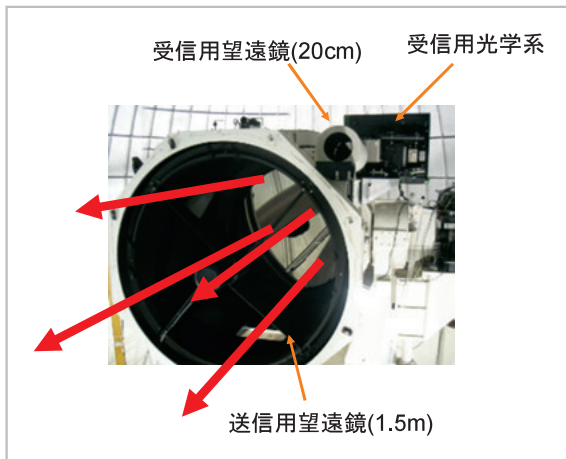


図6 NICT 光地上局の 1.5 m 望遠鏡と通信用レーザー及び受信用光学系

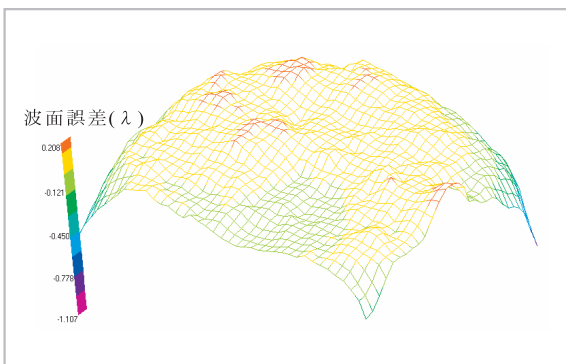


図5 ビーコンビームの波面誤差

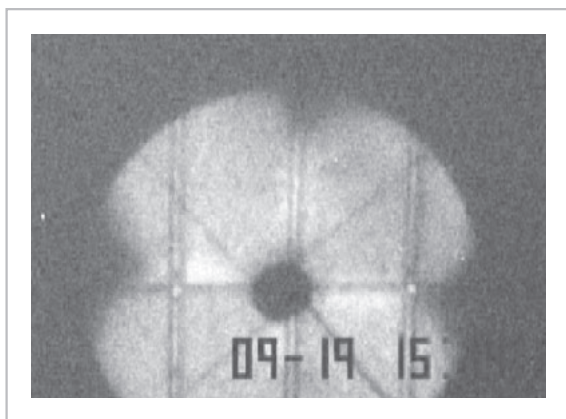


図7 望遠鏡ドームに投影された4本の通信用レーザーのビームパターン

は、波長 815 nm、500 mW (変調時) 出力をもつ、伝送速度 2.048 Mbps で強度変調可能なマルチモードファイバ出力の半導体レーザーを用いた。このとき、1.5 m 主鏡でのビームサイズは 71.2 cm で、大気ゆらぎを低減するため、4本のビームが平行に射出された (図7)。ビーム広がり角は、衛星の追尾誤差があることと、光行差補正角度を考慮し、 $168 \mu\text{rad}$  (全角) に設定した。図8に示すように、ビームの本数を多くするほど分散値は小さくなるのが分かる。4本のビームはそれぞれ平行に切ったバルク光学素子により形成されており、時間遅延を与えられ十分な精度で並行に反射され射出される。この時、遅延時間は送信データのビット周期に対しては十分無視でき、かつ、レーザーが干渉しないようにコヒーレンス時間以上に時間遅延を与え送信されている。図9と図10に、送信レーザーのビームプロファイルと波面誤差を示す。通信用ビームは、コア系

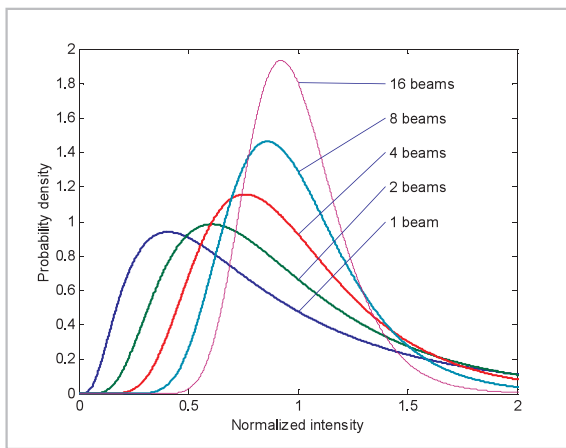


図8 ビーム本数による確率密度分布の変化

100  $\mu\text{m}$  のマルチモードファイバから射出されており、波面誤差は  $0.104 \lambda$  (rms) 程度となっている。

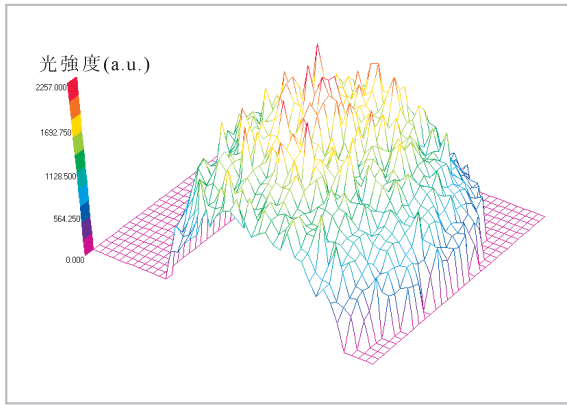


図 9 送信レーザのビームプロファイル

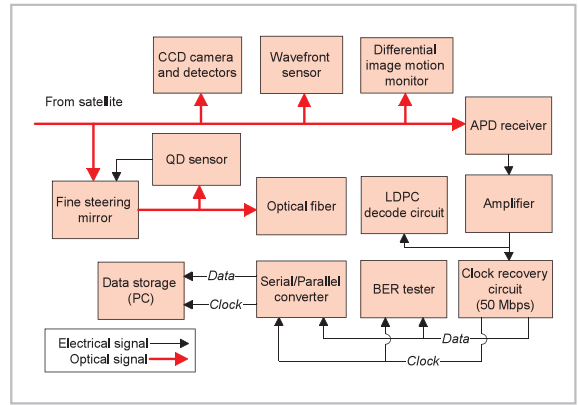


図 11 受信系のブロック図

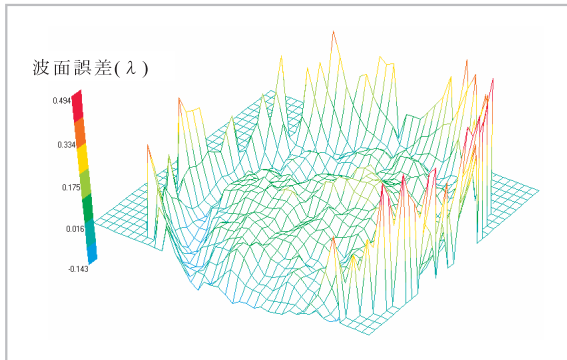


図 10 送信レーザの波面誤差

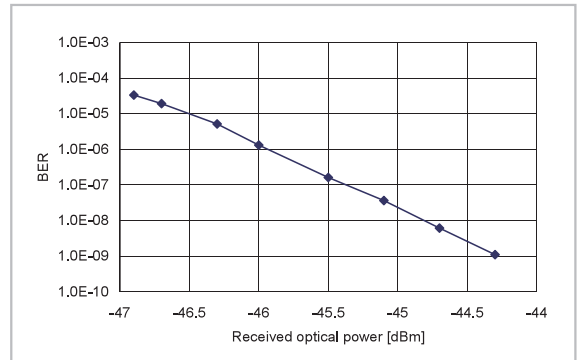


図 12 光受信器の BER 特性

### 4.3 受信システム

受信用の光学系は、2006 年の実験では、図 6 に示すように、1.5 m 望遠鏡の右肩上に設置され、20 cm 開口の望遠鏡で受信する構成とした。また、2008 年以降の実験では、受信用の光学系は、送信系と同じ 1.5 m 望遠鏡のサブ開口を用いて受信を行い、受信光学系はクーデベンチ上に設置された。図 11 に受信系のブロック図を示す。受信したレーザ光は、通信信号と追尾信号へ分けられる。OICETS からのレーザ光は、視野角の異なるいくつかの CCD カメラにより受信され、4 分割光検出機 (QD) や通信用のアバランシェ光受信器 (APD) により受信され、ビット誤り率 (BER) が測定される。49.3724 Mbps のデータストリームは、同時にデータ収集系のコンピュータによりシリアル/パラレル変換をした後保存される。今回使用した APD の理論値は  $BER = 10^{-6}$  において  $-48.4$  dBm であり、実測値としては変動のない試験環境では、図 12 に示すように、 $BER = 10^{-6}$  における受信感度は

$-46$  dBm となり 2.4 dB の差であった。

フェーズ 4 の実験では、符号化実験のため、リアルタイム LDPC デコーダが FPGA をベースに開発された。符号長は、ハードウェアの実装リソースの制限により、912 ビットが限界であったが、このほかに符号化レートの異なる 3 パターンが設計された。実際の実験では、2008 年 12 月と 2009 年 1 月に、実際の地上-衛星間の光通信リンクで設計した LDPC 符号の伝送試験が実施された。実験機会の制約により、設計した符号の内、2 パターンの符号の伝送が実施された (詳細は本特集号 **4-4** 参照)。また、シングルモードファイバへカップリングするため精追尾機構が開発された。ピエゾアクチュエータを用いた圧電素子がミラーの偏向に用いられ、プリロードをかけることでヒステリシスを低減した。周波数応答としては、2 kHz を超える特性を有しており、大気ゆらぎによるレーザの到来角度変動を補償することができる (詳細は本特集号 **4-3** 参照)。

### 4.4 DIMM 法による大気ゆらぎ測定

大気ゆらぎの測定装置として、DIMM (Differential Image Motion Monitor) 法を用いて測定を行った [46]。ウェッジを用いて、CCD 上に複数のスポットを形成し、その相対的な間隔の変化を統計処理することにより、大気のコヒーレンス長  $r_0$  の測定を行っている。この方法は、望遠鏡が追尾誤差を生じて、それぞれのスポットの相対位置は変化しないので、影響を受けにくいというメリットがある。図 13 に、大気ゆらぎ測定システム (DIMM 法) の構成と、表 2 に大気ゆらぎ測定システム (DIMM 法) の諸元を示す。

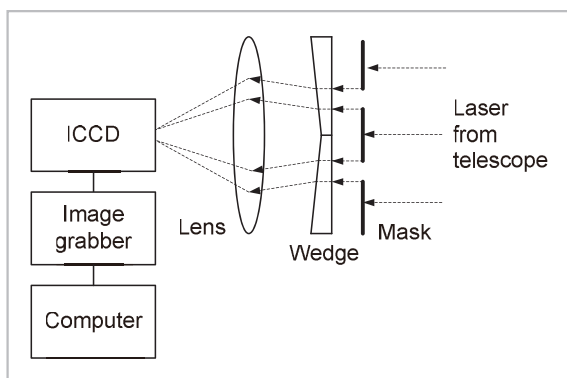


図 13 大気ゆらぎ測定システム (DIMM 法) の構成

表 2 大気ゆらぎ測定システム (DIMM 法) の諸元

Specification	Value
Telescope aperture diameter	20 cm (March, 2006) 1.5 m (after May, 2006)
Magnification	10 (March, 2006) 15.9 (after May, 2006)
Diameter of subaperture	3.0 cm (March, 2006) 4.8 cm (after May, 2006)
Distance between subapertures	9.0 cm (March, 2006) 14.3 cm (after May, 2006)
Number of the subapertures	4
Wedge angle	1 deg
ICCD sensor	Hamamatsu C5909-12
Exposure time	0.3 ms
CCD image pixel size	768 × 494
Grabbed image pixel size	640 × 480
Measured frame rate	30 fps

### 4.5 レーザの安全管理

地上から送信する通信用レーザーは、望遠鏡から出力される時 10 mW (変調時) 以下の出力であり、十分安全なレベルである。しかし、レーザーの安全を考慮し、NICT 光地上局からは、仰角 15 度以上にならないとレーザーを発射しないという運用を行った。また、近くに航空機が飛行していないかどうかを、航空機レーダや人による目視を実験中に常に行い、レーザー送信に対する安全対策を施した。さらに、レーザー伝送実験を行う日には、警察や消防など周辺地域の関係機関への周知も行った。

## 5 地上-衛星間レーザー通信の実験結果

### 5.1 実施結果サマリ

地上-衛星間のレーザー通信実験は、フェーズ 1-3 となる 2006 年 3、5、9 月と、フェーズ 4 となる 2008 年 10 月から 2009 年 2 月にかけて、夜中の 1 時から 2 時に可視となるパスで実施された。表 3 (a) と表 3 (b) に、実験実施結果を示す。図 14 に示す統計結果より、2006 年の実験から合計して、部分的に晴天があれば、56% の確率で光回線が確立されている。

図 15 と図 16 に、レーザーの受信強度から見積もった大気減衰の累積確率分布を示す。これより、NICT 光地上局のサイトからは、56% の確率で衛星にアクセス可能であり (図 15)、光回線が確立した際には平均 4.5 dB の大気損失があると読み取ることが出来る (図 16)。これらは、

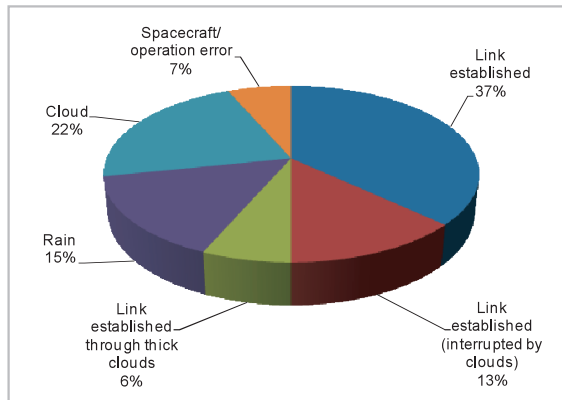


図 14 光回線確立の統計結果



表3(a) フェーズ1-3におけるOICETS-NICT光地上局間光通信実験の実施結果

Test date	Session No.	Link established	Weather
21st March, 2006	1 <sup>st</sup>	Yes	Clear
23rd March, 2006	2 <sup>nd</sup>	No	Cloudy
28th March, 2006	3 <sup>rd</sup>	Yes	Clear
30th March, 2006	4 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
9th May, 2006	5 <sup>th</sup>	No	Rainy
11st May, 2006	6 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
16th May, 2006	7 <sup>th</sup>	Yes	Cloudy
18th May, 2006	8 <sup>th</sup>	No	Rainy
23rd May, 2006	9 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
25th May, 2006	10 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
5th September, 2006	11 <sup>th</sup>	Yes	Clear
7th September, 2006	12 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
12th September, 2006	13 <sup>th</sup>	No	Rainy
14th September, 2006	14 <sup>th</sup>	No	Cloudy
19th September, 2006	15 <sup>th</sup>	Yes	Clear
21th September, 2006	16 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
26th September, 2006	17 <sup>th</sup>	No	Rainy
28th September, 2006	18 <sup>th</sup>	No	Cloudy

表3(b) フェーズ4におけるOICETS-NICT光地上局間光通信実験の実施結果

Test date	Session No.	Link established	Weather
16th October, 2008	1 <sup>st</sup>	No	Clear
21st October, 2008	2 <sup>nd</sup>	Yes	Clear
23rd October, 2008	3 <sup>rd</sup>	No	Cloudy
28th October, 2008	4 <sup>th</sup>	Yes	Cloudy
30th October, 2008	5 <sup>th</sup>	No	Cloudy
4th November, 2008	6 <sup>th</sup>	No	Clear
6th November, 2008	7 <sup>th</sup>	No	Cloudy
11th November, 2008	8 <sup>th</sup>	No	Partly cloudy
13nd November, 2008	9 <sup>th</sup>	Yes	Clear
18th November, 2008	10 <sup>th</sup>	Yes	Clear
20th November, 2008	11 <sup>th</sup>	Yes	Clear
25th November, 2008	12 <sup>th</sup>	No	Cloudy
27th November, 2008	13 <sup>th</sup>	No	Rainy
2nd December, 2008	14 <sup>th</sup>	Yes	Clear
4th December, 2008	15 <sup>th</sup>	Yes	Thin clouds
9th December, 2008	16 <sup>th</sup>	No	Rainy
11th December, 2008	17 <sup>th</sup>	Yes	Clear
16th December, 2008	18 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
18th December, 2008	19 <sup>th</sup>	Yes	Clear
23rd December, 2008	20 <sup>th</sup>	Yes	Clear
25th December, 2008	21 <sup>st</sup>	Yes	Clear
8th January, 2009	22 <sup>nd</sup>	No	Rainy
13th January, 2009	23 <sup>rd</sup>	Yes	Clear
15th January, 2009	24 <sup>th</sup>	Yes	Clear
20th January, 2009	25 <sup>th</sup>	Yes	Partly cloudy
29th January, 2009	26 <sup>th</sup>	No	Cloudy
10th February, 2009	27 <sup>th</sup>	No	Clear
24th February, 2009	28 <sup>th</sup>	No	Cloudy
26th February, 2009	29 <sup>th</sup>	No	Rainy

NICT 光地上局においての年間を通じた大気透過特性とみなすことができ、統計的にサイトの特性を示すデータとして意味がある。

### 5.2 衛星初期捕捉

図 17 は、1.5 m 望遠鏡に設置した CCD カメラで撮影された、OICETS 搭載光ターミナルからのレーザビームを撮影したものである。真ん中のスポットが衛星からのレーザ光で、下から線のように伸びているのがビーコン光の後方散乱である。様々な天候で実験を実施したが、レーザの追尾は、雲天を横切りながらも継続可能である。初期捕捉の手順は次のようになる。まず、ビーコンビームと通信ビームを光地上局から両方送信する。次に、光地上局で初期誤差角度をオフセット補正し、バイアスエラーを取り除く。望遠鏡が光学的にアライメントされると、ビーコンビームはシャッタによりオフされ、変調された通信ビームのみが伝送される。この間、約 10 ~ 20 秒程度

である。衛星からのレーザは、6  $\mu$ rad 程度の広がり角しか持たないため、1000 km の距離からのレーザは地上で 6 m 程度のビームにしかならない。図 17 でレーザ光が見えているということは、アクティブにこの精度が制御されているということであり、非常に高精度な追尾が達成されていることが分かる。

### 5.3 初期捕捉オープン指向誤差

図 18 (a) と図 18 (b) に初期捕捉時のオープン指向誤差を示す。オープン指向誤差とは、軌道要素から計算し予測した望遠鏡の指向方向と、実際に捕捉された方向との差のことである。フェーズ 1-3 では、衛星における最大の初期オープン指向誤差は、0.259° であった。JAXA により衛星における時刻誤差が改善され、最小時には 0.08° 程度、平均では 0.152° (2.65 mrad) であった。NICT 光地上局における衛星方向の初期捕捉時のオープン指向誤差は、平均で 0.028° (0.49 mrad) であった。これは衛星の軌道要素における誤差に起因するところが大きい。フェーズ 4 では、初期オープン指向誤差は、衛星側で 0.13° 以下であり、平均では 0.069° (1.2 mrad) となり、NICT 光地上局側でも平均で 0.017° (0.293 mrad) と改善された。NICT 光地上局のビーコン光は、上記オープン指向誤差の値と比較して十分大きな広がり角 0.5° (9 mrad 全角) で設置したため、それをカバーすることができた。図 19 に、リンク持続時間の累積時間確率を示す。図中の Planned の累積確率は、計画された全てのパスが晴天であ

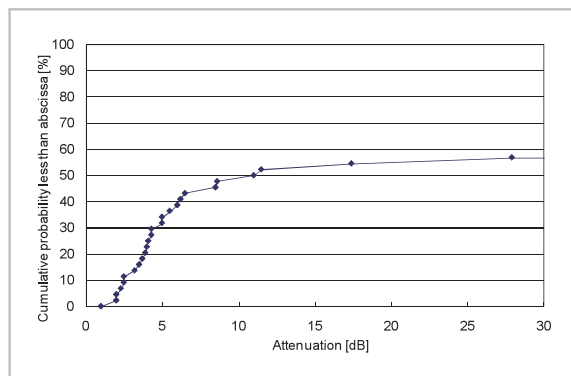


図 15 全ての天候条件を加味した大気減衰の累積確率分布

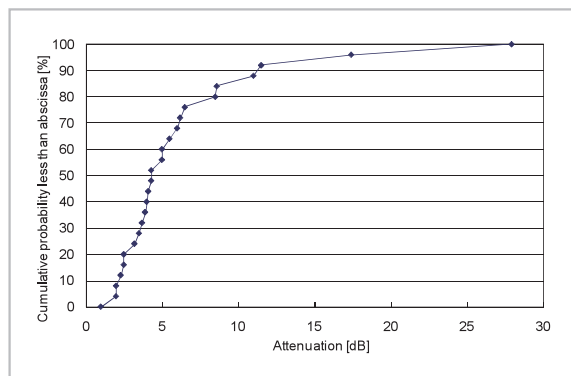


図 16 リンクが確立した時の大気減衰の累積確率分布

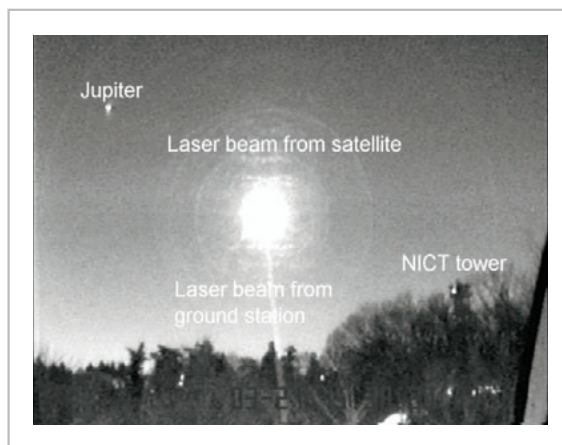


図 17 地上-低軌道衛星間の光通信実験の様子

ることを仮定し、NICT 光地上局からの衛星仰角が 15 度以上となる実験可能時間を累積することにより求めたものである。また、図中の Measured は光回線が実際に成立したパスの実験継続時間の累積を表している。これにより、最大実験持続時間は 367 秒であることが分かる。実際には雲等によって遮断されるわけであるが、50% の確率の所を見ると、1 パスの平均的持続時間は 277 秒程度となり、また計画された実験時間の方は 353 秒が 1 パスの平均的持続時間であるので、光回線が成立した日には統計的には 1 パスの中で平均 353 秒の 78% の時間率で光回線が持続したといえる。

### 5.4 精追尾誤差

図 20 に衛星搭載機器の精追尾誤差を示す。衛星側の精追尾誤差は、全追尾時間分のデータに対して誤差の自乗平均を取って時間平均すると、X 方向に  $0.67 \mu\text{rad}$  (rms)、Y 方向に  $1.47 \mu\text{rad}$  (rms) となり、合計では  $2.0 \mu\text{rad}$  (rss) となっ

た。実際には瞬断の追尾誤差のデータも含まれるので、これより小さな値となる。この時、指向方向の真値とは、受信信号を追尾している追尾センサの中心軸と、精追尾系で取りきれない残留追尾誤差を足したものが真値となる。図に示す実測値の追尾誤差は、この内残留追尾誤差を示している。実際の送信ビームも合わせた総合指向誤差は、光行差補正角度誤差も含むことになる。一方、光地上局における指向誤差を図 21 に示す。光地上局では、プログラムによる軌道計算と、マニュアルによるオープン追尾指向制御であるため、追尾指向誤差は実験期間中で方位角方向に  $23.8 \mu\text{rad}$  (rms)、仰角方向に  $32.7 \mu\text{rad}$  (rms) であり、合計では  $45.9 \mu\text{rad}$  (rss) であった。光地上局の望遠鏡の追尾指向誤差は、光行差補正機能なしでも通信ビームのビーム広がり角より小さく、継続して追尾を行うことが出来た。

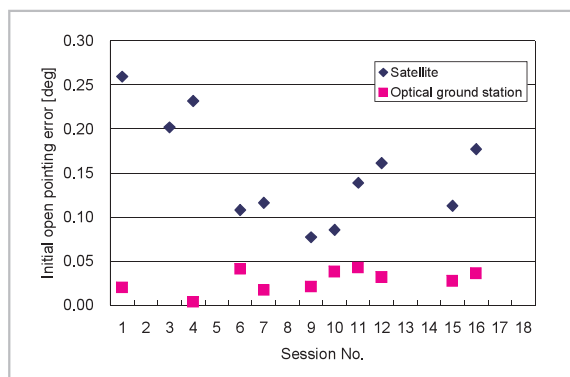


図 18(a) フェーズ 1-3 における初期捕捉時オープン指向誤差

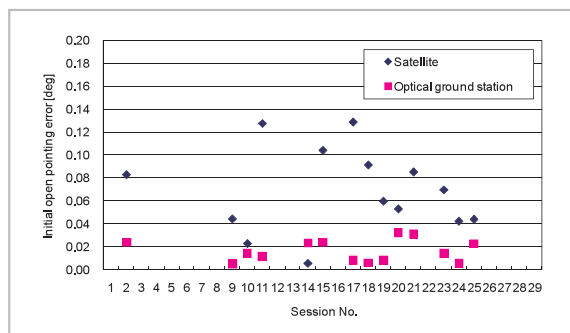


図 18(b) フェーズ 4 における初期捕捉時オープン指向誤差

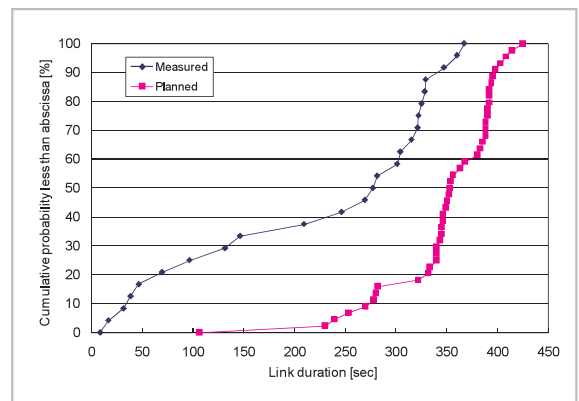


図 19 実験持続時間の累積確率

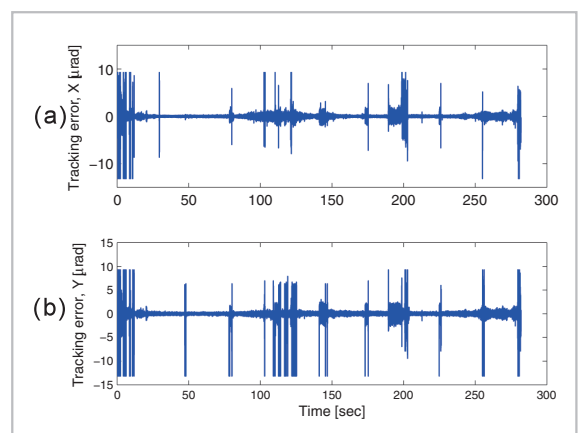


図 20 衛星搭載ターミナルの (a) X 軸方向、(b) Y 軸方向の精追尾誤差 (3 月 30 日測定)

### 5.5 アップリンクとダウンリンクのレーザ伝送結果

図22に、2006年9月19日に測定されたアップリンクとダウンリンクの受信電力の変化を示す。送信電力は一定であるので、伝送距離に応じて受信電力が変化している。このパスでは、最初の20秒間は光地上局からビーコンレーザが送信されており、その後4本のビームに切り替えて通信ビームが送信されている。200秒あたりでビーム本数を変えて、4本から1本に変え、さらに1本ずつ増加させ順番に実験を行っている。図23では、ビームの本数を変化させたときの受信信号の確率密度分布の測定結果と理論値をプ

ロットしている。これから、マルチビームの送信により大気ゆらぎの影響が低減できることが分かる。ダウンリンクでは、実験の最後に7.0 dBのアッテネータを挿入し受信器の性能を確かめている。実験は321秒間成功し、受信電力には時折不連続な点が見られるが、これは衛星側の追尾系に事前に予見されていた現象である [47]。

図24は、2006年9月19日に測定されたアップリンクとダウンリンクのシンチレーションインデックスを示している。シンチレーションインデックスとは、信号の規格化分散値で、変動がないと0となり、値が1を超えると平均値より大きな変動があることを示す指標である [48]。最初

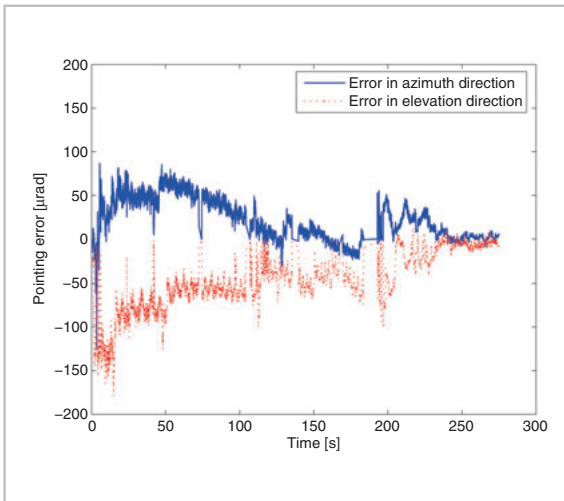


図21 光地上局の追尾指向誤差 (3月30日測定)

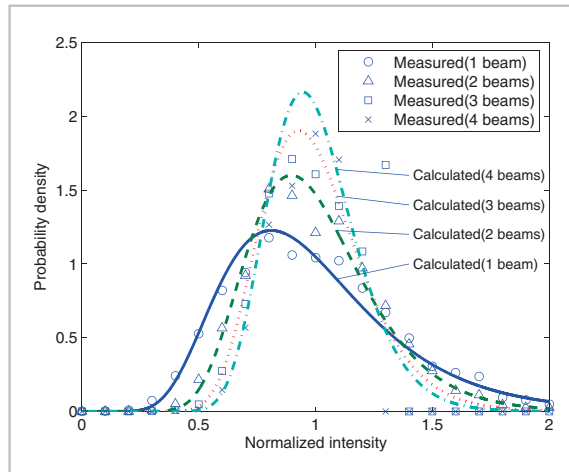


図23 ビームの本数を変化させたときの受信信号の確率密度分布の測定結果と理論値の比較

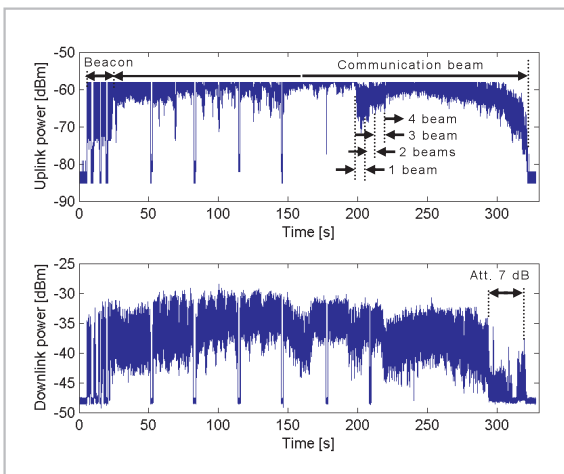


図22 アップリンクとダウンリンクの受信電力の変化 (2006年9月19日の実験パス)

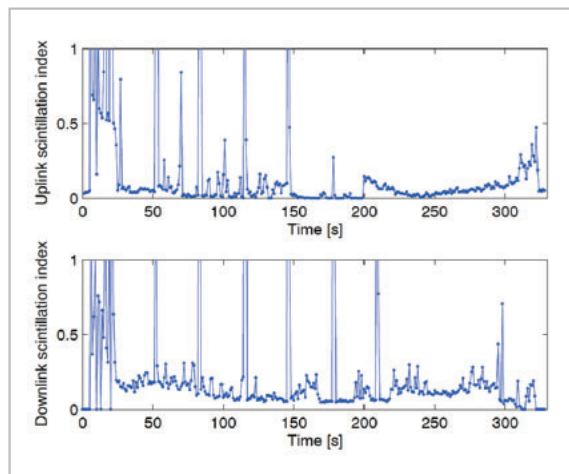


図24 アップリンクとダウンリンクのシンチレーションインデックスの変化 (2006年9月19日の実験パス)

の 20 秒間は、アップリンクのシンチレーションインデックスは 0.6 程度であるが、これはビーコンビームが地上より伝送されていた時間であり、衛星仰角は 15 度程度であった。搭載センサのダイナミックレンジの制限により、アップリンクの受信信号が一部飽和しているが、4 本の通信ビームの伝送では、実験期間中小さいシンチレーションインデックスを維持することができた。ダウンリンクでは、直径 31.8 cm の望遠鏡開口を用いているため、シンチレーションインデックスは約 0.2 ~ 0.3 以下と開口平均効果 [49][50] が確認できる。

図 25 と図 26 には、アップリンクとダウンリ

nk の受信強度と周波数パワースペクトル密度の変化 (2006 年 3 月 28 日の実験パス) をそれぞれ示す。両図とも横軸が実験経過時間を示している。アップリンクで周波数成分が 500 Hz までしかプロットされていないのは、衛星搭載機器における受信レベルのテレメトリのサンプリング周波数の制約によるものである。図中の周波数成分は、実験パスの始めと終わりで低くなっている。実験パスの中盤では、仰角が高くなると共に、衛星の角速度も増加するためである。周波数成分としては、1 kHz 程度まで変動周波数成分が存在することが分かる。一例として、図 27 にダウンリンクのパワースペクトル密度を周波数に対してプロットした。大気ゆらぎの周波数成分は 1 kHz 程度まで存在することが分かる。

### 5.6 通信特性

図 28 に、アップリンクの BER 特性を示す。それぞれのデータは、1 秒ごとの BER を示している。電力損失は、大気ゆらぎによる変動のため  $BER = 10^{-6}$  で -13 dB あることが分かる。また、図 29 に、ダウンリンクの BER 特性を示す。それぞれのデータは、1 秒ごとの BER を示している。ダウンリンクの大気ゆらぎによる電力損失は、 $BER = 10^{-5}$  で -13.5 dB あることが分かる。これらは、大気ゆらぎの変動による平均的な損失と考えられ、5.7 の回線解析に用いることができる。

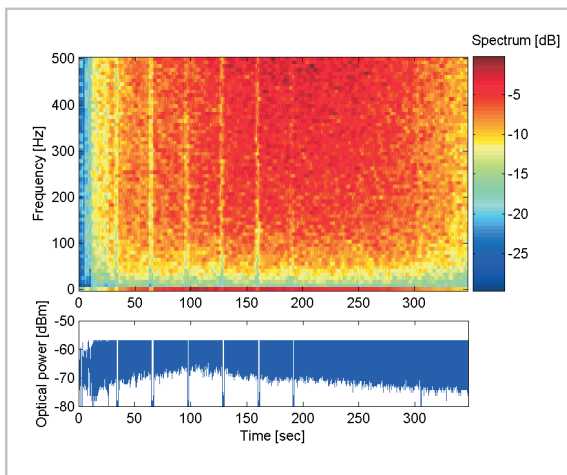


図 25 アップリンクの受信強度と周波数パワースペクトル密度の変化 (2006 年 3 月 28 日の実験パス)

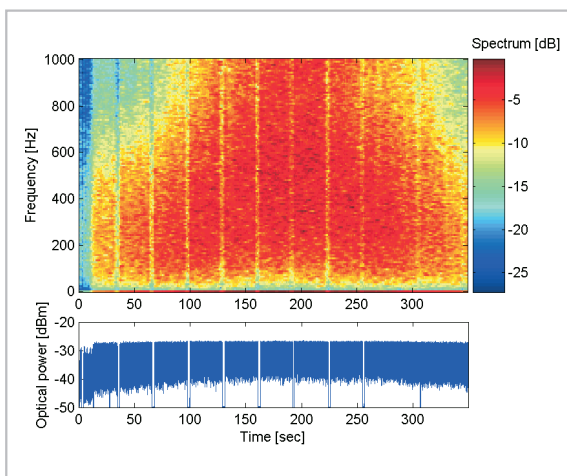


図 26 ダウンリンクの受信強度と周波数パワースペクトル密度の変化 (2006 年 3 月 28 日の実験パス)

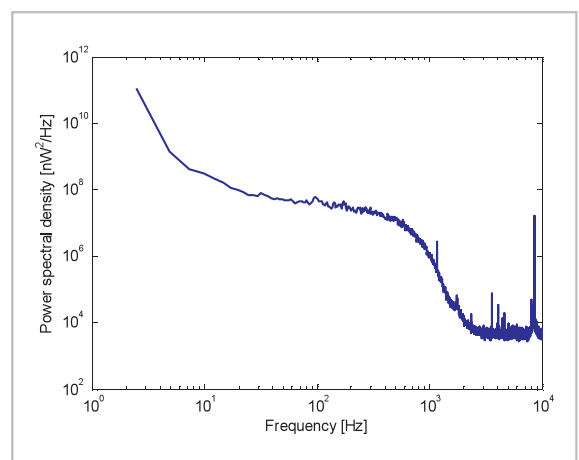


図 27 パワースペクトル密度 (2009 年 12 月 23 日測定)

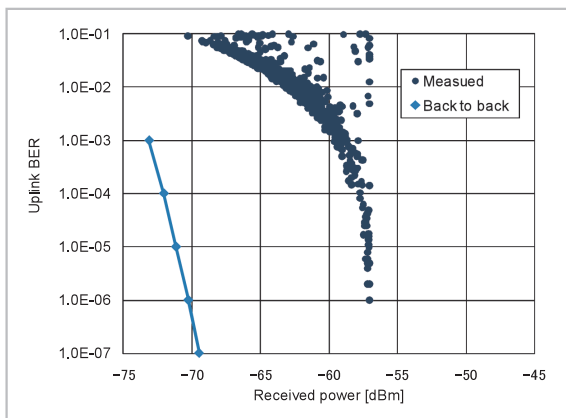


図 28 アップリンクの BER 測定値 (2008 年 11 月 13 日測定)

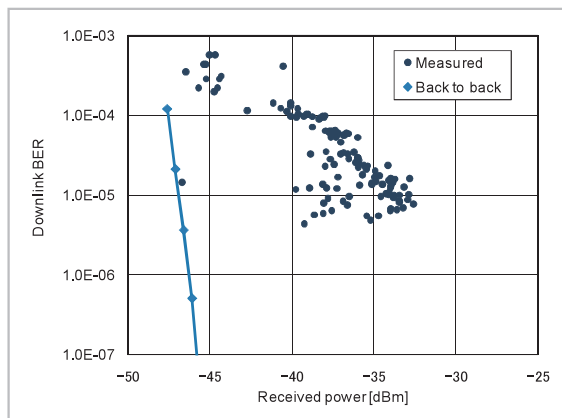


図 29 ダウンリンクの BER 測定値 (2008 年 11 月 13 日測定)

表 4 光通信実験の回線解析例 (2008 年 11 月 13 日)

	Unit	Uplink			Downlink	
		Beacon	Tracking	Comm.	Tracking	Comm.
TX power	W	3.76	0.36	0.36	0.10	0.10
	dBm	35.7	25.6	25.6	20.0	20.0
Beam diameter at telescope	cm	1.7	63.5	63.5	12.0	12.0
Pointing jitter	$\mu$ rad (rms)	23.1	23.1	23.1	0.12	0.12
TX beam divergence	$\mu$ rad	9000	167.7	167.7	9.0	9.0
TX optics loss	dB	- 0.05	- 18.5	- 18.5	- 2.7	- 2.7
Wavelength	m	8.08E-07	8.15E-07	8.15E-07	8.47E-07	8.47E-07
Average pointing loss	dB	0.0	- 0.3	- 0.3	- 2.3	- 2.3
TX gain	dB	53.0	87.5	87.5	116.0	116.0
Distance	m	7.07E + 05	7.07E + 05	7.07E + 05	7.07E + 05	7.07E + 05
Space loss	dB	- 260.8	- 260.7	- 260.7	- 260.4	- 260.4
Atmospheric transmission	dB	- 1.3	- 1.3	- 1.3	- 1.3	- 1.3
RX antenna diameter	cm	26.0	26.0	26.0	31.8	31.8
RX gain	dB	120.1	120.0	120.0	121.4	121.4
RX optics loss	dB	- 2.6	- 7.6	- 7.9	- 19.9	- 19.9
Tracking sensor power	dBm	- 56.0	- 55.3	-	- 29.1	-
Fade level ( $P_F = 10^{-2}$ )	dB	- 7.3	- 3.4	-	- 1.8	-
Surge level ( $P_S = 10^{-2}$ )	dB	5.5	3.0	-	1.6	-
Dynamic range	dB	12.8	6.4	-	3.4	-
RX power	dBm	-	-	- 55.6	-	- 29.1
Power penalty for average BER	dB	-	-	- 13.0	-	- 13.5
Data rate	bps	-	-	2.048E + 06	-	4.937E + 07
Sensitivity (@ BER of $10^{-6}$ )	photons/bit	-	-	200	-	2200
	dBm	-	-	- 70.0	-	- 45.9
Average margin for BER	dB	-	-	1.4	-	3.3

### 5.7 回線解析

表 4 に、2008 年 11 月 13 日に実施された光通信実験の回線解析の例を示す。この解析では、ダウンリンクにはガウスビームのレーザ伝搬理論を用いた [21]。アップリンクには、マルチモードファイバからの射出された強度は一様だとして、平面波を考慮した。フェードとサージレベルは、センサのダイナミックレンジより小さく、追尾を

持続することができた。また、アップリンクとダウンリンクの BER への電力損失は、図 28 と図 29 に示されたとおりであり、リンクマージンは、測定された結果とほぼ一致している。光地上局システムには、特に宇宙用の機器を用いているわけではないが、今後商用の無線通信回線として使っていくことが可能であると考えられる。これは符号化をしない値であるので、Forward Error

Coding (FEC) を用いることで、さらなる通信品質の改善が可能である。今回、FECとしてLDPC符号を適用し、実際に試験を行った。大気ゆらぎのフェード時間に対して、符号長を長くすることが重要であることが分かっている。これらの経験から、フェージング耐性を持つ通信プロトコルが開発されており [51]、今後の空間光通信への適用が期待される。

## 6 大気ゆらぎの測定結果

本地上-衛星間レーザ通信実験では、世界で初めて低軌道衛星からのレーザ伝搬特性が取得されたため、そのデータを示すために設けたものである。また、それらの実測データに基づいて大気モデルを構築し、大気ゆらぎの大きさや時間変動特性等の評価を机上で可能とし、将来の地上-衛星間のレーザ通信回線のシステム設計や標準化に資するため下記の通りまとめた。

6.1 では、実測データに基づいてこれまでの大気ゆらぎモデルに修正を加える。6.2 では開口平均効果による大気ゆらぎの低減の実測データを示す。6.3 では、シンチレーションインデックスの衛星仰角に対する測定を示し、衛星仰角が高いほどシンチレーションインデックスが小さくなることを示す。6.4 及び 6.5 では、天文分野での大気ゆらぎの指標であるシーイングと大気のコヒーレンス長を示し、衛星の角速度等の変化に対して顕著な変化は見られないことを示す。

### 6.1 NICT 光地上局における大気ゆらぎモデルの導出

図 30 に、2006 年 9 月 19 日の実験パスの DIMM 法によるシーイング角度の測定結果と、本実験により導出された大気モデルにより算出された計算値を示す [52]。衛星仰角 35 度の時に、大気のコヒーレンス長は 4.69 cm で、シーイング角度は 4.75 arcsec であった。図 30 に示すシーイングの測定結果を見ると、天頂付近で少し平坦になっていることが分かる。これは Hufnagel-Valley (HV) モデルでの第 1 項が影響していると考えられる。この為、HV モデルを改良してより良くフィッティング可能な  $M$  を新たに式 (1) に導入している。

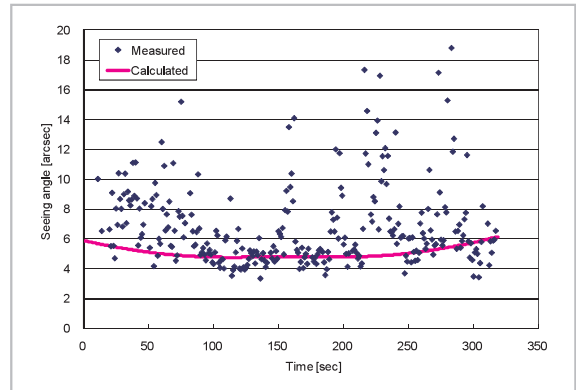


図 30 シーイングの測定結果 (2006 年 9 月 19 日の実験パス) と HV モデルによる計算値

$$C_n^2(h) = M \times 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100) \quad (1)$$

ここで、 $M$  は本稿で新たに導入された係数で、実験データにフィッティングして得られた係数である。また、 $h$  は光地上局の高度で、rms 擬似風速  $v$  は、

$$v = \left[ \frac{1}{15 \times 10^3} \int_{5 \times 10^3}^{20 \times 10^3} V^2(h) dh \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $V(h)$  はバフトン風速モデルで記述され、

$$V(h) = \omega_g h + v_g + 30 \exp\left(-\frac{h-9400}{4800}\right) \quad (3)$$

で表わされる。 $v_g$  は地上における風速、 $\omega_g$  は衛星の動きに応じたアンテナのスリユア角速度である。式 (1) における定数  $A$  と  $M$  は、DIMM 法を用いてそれぞれ  $A = 9.0 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  と  $M = 0.2$  と見積もられた [52]。NICT 光地上局の高度  $h = 122 \text{ m}$  における構造パラメータは、上記数値を用いると、 $C_n^2(122 \text{ m}) = 2.68 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  に相当する。

### 6.2 開口平均効果の比較

図 31 に、ダウンリンクを異なる開口の光検出器で受信した場合のシンチレーションインデックスの比較結果を示す。1.5 cm、5 cm、32 cm の 3 種類の開口径で受信した信号を比較した。開口径 32 cm で受信したシンチレーションインデックスは小さく、開口径 1.5 cm で受信したシンチレーションインデックスは他のものより一番大きくなった。これは、開口平均効果により [49][50]、

シンチレーションインデックスが小さくなることを示している。

### 6.3 シンチレーションインデックスの測定結果

図 32 と図 33 はアップリンクとダウンリンクのシンチレーションインデックスを衛星仰角に対してプロットしたものである。全体として、仰角が高くなるほどシンチレーションインデックスは小さくなっている。図 32 のアップリンクでは、3月21日と28日のデータは、ビーコンビームのみが受信されているため、大きな値となっている。4本ビームで送信されているその他については、9月19日の飽和していないデータから、シンチレーションインデックスは0.1程度となっている。一方、図 33 のダウンリンクでは、20 cm の受信開口径が用いられた3月21日から30日までのシンチレーションインデックスは大きいのに比べ、31.8 cm の受信開口径が用いられたそれ以降の測定では、開口平均効果により0.2より小さくなっている事が分かる。

### 6.4 シーイングの測定結果

シーイングとは、望遠鏡などで天体を観たときに発生する、星像の位置のゆらぎの分布を角度で表した尺度であり、通常近似されたガウス分布の半値幅で表される。図 34-36 に DIMM 法によるシーイングの測定結果を示す。DIMM 法では、大気のコヒーレンス長  $r_0$  の測定が行えるが、シーイングに換算することも可能である。図 34 と図 35 は、シーイングを仰角に対してプロットしたもので、図 35 の方は衛星仰角により大気マスが変化することを考慮し、天頂角0度での値に補正したものである。これらより、シーイングは、測定値で5 arcsec から30 arcsec 程度に分布している事が分かる。また、図 36 は、天頂角に換算した衛星の角速度に対するシーイングの測定結果であり、衛星の角速度の変化に対して顕著な変化は見られない。

### 6.5 コヒーレンス長の測定結果

図 34-36 と同様に、図 37-39 は、DIMM 法による大気のコヒーレンス長  $r_0$  の換算結果を示している。図 37 と図 38 は、大気のコヒーレンス長を仰角に対してプロットしたもので、図 38 の

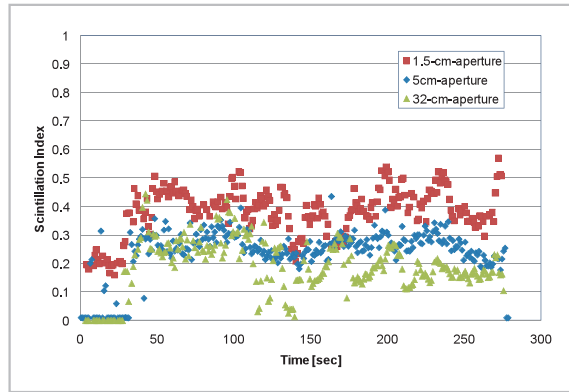


図 31 異なる開口径 (1.5-cm、5-cm および 32-cm) で受信したシンチレーションインデックス (2009年11月20日測定)

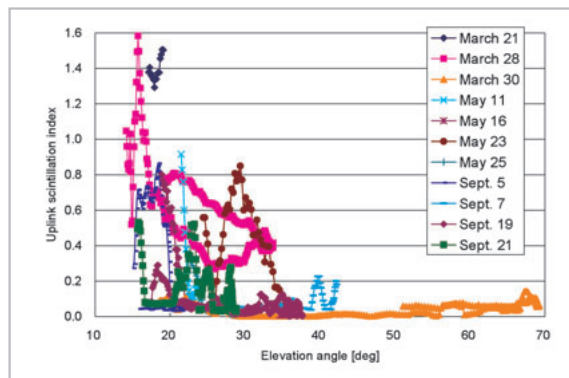


図 32 衛星仰角に対するアップリンクのシンチレーションインデックスの測定結果

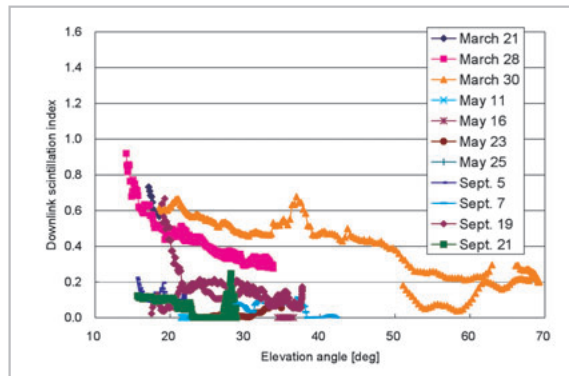


図 33 衛星仰角に対するダウンリンクのシンチレーションインデックスの測定結果

方は衛星仰角により大気マスが変化することを考慮し、天頂角0度での値に補正したものである。コヒーレンス長は、測定値で1 cm から6 cm 程度に分布している事が分かる。また、図 39 の天頂角に換算した衛星の角速度に対する大気のコヒーレンス長の測定結果より、衛星の角速度の変



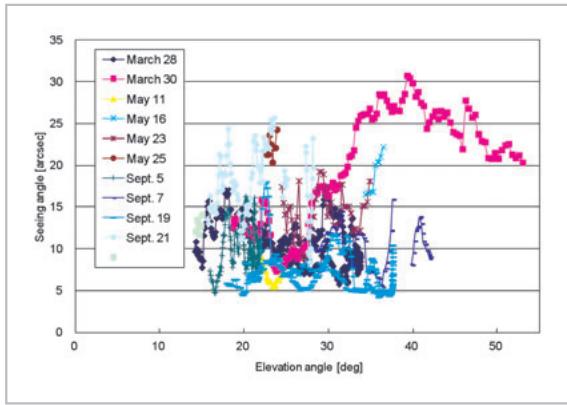


図 34 衛星仰角に対するシーイングの測定結果

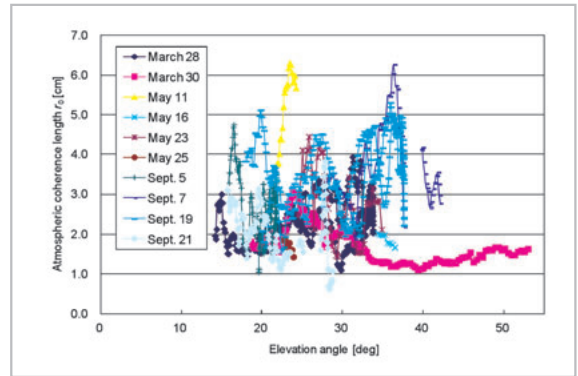


図 37 衛星仰角に対する大気のコヒーレンス長の測定結果

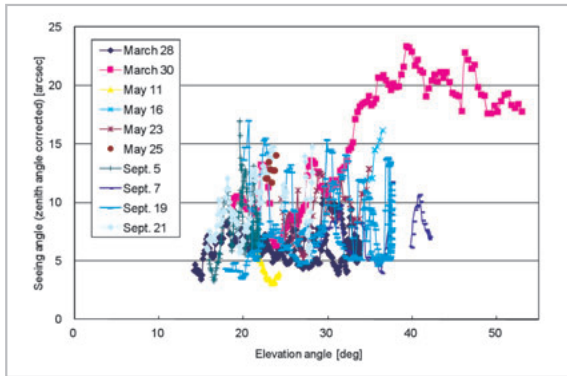


図 35 天頂角に換算した衛星仰角に対するシーイングの測定結果

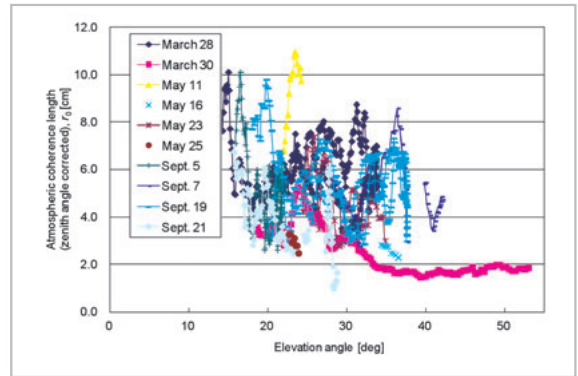


図 38 天頂角に換算した衛星仰角に対する大気のコヒーレンス長の測定結果

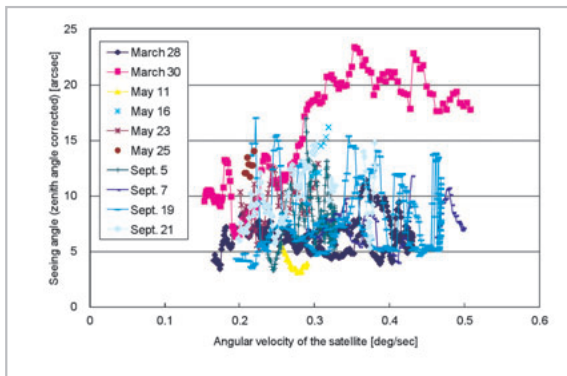


図 36 天頂角に換算した衛星の角速度に対するシーイングの測定結果

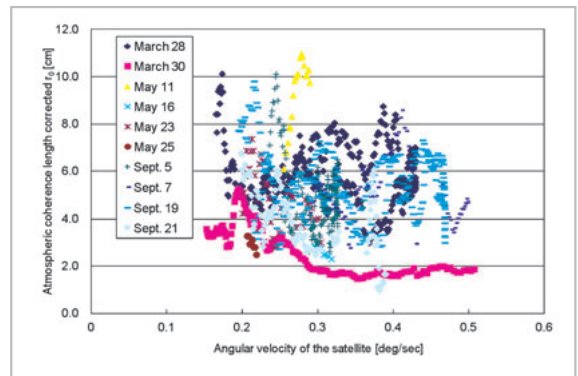


図 39 天頂角に換算した衛星の角速度に対する大気のコヒーレンス長の測定結果

化に対して顕著な変化は見られない。

## 7 まとめ

OICETS-NICT 光地上局間光通信実験を実施し、高速で移動する低高度地球周回衛星-地上局間の光通信回線を確立すると共に、大気ゆらぎの

影響も同時に実測することができた。晴天時は全て捕捉追尾に成功しており、都市近郊の大気ゆらぎ存在下でも光リンクが確立できることを実証した。アップリンクの信号変動を複数ビームで抑えることに成功し、ダウンリンクも開口平均効果により信号変動を低減できた。アップリンクとダウンリンクの BER 特性を測定し、実際の地上-衛

星間光通信回線の測定結果と解析値が、定量的に把握でき齟齬がないことを示した。将来、大気を介した地上-衛星間レーザ通信回線を確立するに当たり、有効な実証結果になったと考えられる。本成果は、学術的意義だけではなく、航空機、人工衛星等飛翔体との光空間通信等への応用が期待される。

## 謝辞

OICETS を用いた光地上局実験を遂行するに当たり、NEC 東芝スペースシステム(株)、宇宙技術開発(株)、スペースリンク(株)、(株)ユニバース、日本コントロールシステム(株)、(株)PDC、(株)リューズ、(有)ティーティーシー、イーストシャイン(株)の関係各位に多大なご協力を頂いた。ここに深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1 G. Hyde and B. Edelson, "Laser satellite communications: current status and directions," *Space Policy*, Vol. 13, pp. 47–54, 1997.
- 2 V. W. S. Chan, "Optical satellite networks," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, pp. 2811–2827, 2003.
- 3 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.
- 4 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 (Invited Paper)," *Proc. SPIE*, Vol. 6105, pp. 13–23, 2006.
- 5 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.
- 6 T. Abe, T. Kizaki, H. Kunimori, Y. Takayama, and M. Toyoshima, "The development of two-axes fast steering mirror and high efficiency driver," *International Conference on Space Optical Systems and Applications 2009 (ICSOS2009)*, ICSOS2009-30, February, 2009.
- 7 Y. Kadoike, E. Okamoto, Y. Iwanami, Y. Shoji, M. Toyoshima, Y. Takayama, and H. Kunimori, "LDPC code design for OICETS experiments in 2008," *International Conference on Space Optical Systems and Applications 2009 (ICSOS2009)*, ICSOS2009-41, Feb. 2009.
- 8 T. Tanaka, M. Abe, M. Morimoto, Y. Kadoike, E. Okamoto, Y. Shoji, and M. Toyoshima, "Development of LDPC codes by the Gallager composition method on FPGA," *International Conference on Space Optical Systems and Applications 2009 (ICSOS2009)*, ICSOS2009-29, Feb. 2009.
- 9 A. N. Kolmogorov, "The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers," *C. R. (Doki) Acad. Sci. U.S.S.R.*, Vol. 30, pp. 301–305, 1941.
- 10 V. I. Tatarskii, "The Effect of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation," *Trans. for NOAA by Israel program for scientific translations*, Jerusalem, 1971.
- 11 D. L. Fried, "Scintillation of a ground-to-space laser illuminator," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 57, No. 8, pp. 980–983, 1967.
- 12 P. O. Minott, "Scintillation in an earth-to-space propagation path," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 62, No. 7, pp. 885–888, 1972.
- 13 P. J. Titterton, "Scintillation and transmitter-aperture averaging over vertical paths," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 63, No. 4, pp. 439–444, 1973.
- 14 P. J. Titterton, "Power reduction and fluctuations caused by narrow laser beam motion in the far field," *Appl.*

- Opt., Vol. 12, No. 2, pp. 423–425, 1973.
- 15 D. L. Fried, "Statistics of laser beam fade induced by pointing jitter," Appl. Opt., Vol. 12, No. 2, pp. 422–423, 1973.
  - 16 J. L. Bufton, "Scintillation statistics measured in an earth-space-earth retroreflected link," Appl. Opt., Vol. 16, No. 10, pp. 2654–2660, 1977.
  - 17 H. T. Yura and W. G. McKinley, "Optical scintillation statistics for IR ground-to-space laser communication systems," Appl. Opt., Vol. 22, No. 21, pp. 3353–3358, 1983.
  - 18 P. A. Lightsey, "Scintillation in ground-to-space and retroreflected laser beams," Opt. Eng., Vol. 33, No. 8, pp. 2535–2543, 1994.
  - 19 K. Kiasaleh, "On the probability density function of signal intensity in free-space optical communications systems impaired by pointing jitter and turbulence," Opt. Eng., Vol. 33, No. 11, pp. 3748–3757, 1994.
  - 20 J. D. Shelton, "Turbulence-induced scintillation on Gaussian-beam waves: theoretical predictions and observations from a laser-illuminated satellite," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 12, No. 10, pp. 2172–2181, 1995.
  - 21 L. C. Andrews, R. L. Phillips, and P. T. Yu, "Optical scintillations and fade statistics for a satellite-communication system," Appl. Opt. Vol. 34, No. 33, pp. 7742–7751, 1995. Errata: Vol. 36, No. 24, p. 6068, 1997.
  - 22 R. J. Hill and R. G. Frehlich, "Probability distribution of irradiance for the onset of strong scintillation," J. Opt. Soc. Am A, Vol. 14, No. 7, pp. 1530–1540, 1997.
  - 23 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen, and M. A. Al-Habash, "Theory of optical scintillation," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 16, No. 6, pp. 1417–1429, 1999.
  - 24 L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, "Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles," Opt. Eng., Vol. 39, No. 12, pp. 3272–3280, 2000.
  - 25 古濱洋治, 増田悦久, 篠塚隆, 福島圓, "レーザ波の大気伝搬特性—累積確率分布," 電子情報通信学会論文誌, Vol. 56-B, No. 4, pp. 133–139, 1973.
  - 26 船川謙司, 森田和夫, 古濱洋治, "大気中における電波と光の伝搬," 電子通信学会誌, 第60巻4号, 4月1977年.
  - 27 T. Aruga, K. Araki, T. Igarashi, F. Imai, Y. Yamamoto, and F. Sakagami, "Earth to space laser beam transmission for spacecraft attitude measurement," Applied Optics, Vol. 23, pp. 114–147, 1984.
  - 28 T. Aruga, K. Araki, R. Hayashi, T. Iwabuchi, M. Takahashi, and S. Nakamura, "Earth-to-geosynchronous satellite laser beam transmission," Applied Optics, Vol. 24, No. 1, pp. 53–56, 1985.
  - 29 荒木賢一, 板部敏和, 高部政雄, 有賀規, 猪俣英行, "静止衛星ひまわり3号へのCO<sub>2</sub>レーザ光伝送実験," レーザセンシング・シンポジウム予稿集, C4, pp. 47–48, 5月1988年.
  - 30 高部政雄, 荒木賢一, 豊田雅宏, 板部敏和, 有賀規, "地上レーザビーコンの地球画像校正への応用," 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 53–60, 1993年.
  - 31 T. Aruga, T. Itabe, M. Ishizu, M. Takabe, N. Hiromoto and M. Shikatani, "A new optical facility for multi-purpose studies," Denshi Tokyo, Vol. 27, pp. 53–56, 1988.
  - 32 H. Kunimori, K. Imamura, F. Takahashi, T. Itabe, T. Aruga, and A. Yamamoto, "New development of satellite laser ranging system for highly precise space and time measurements," J. Comm. Res. Lab., Vol. 38, No. 2, pp. 303–317, 1991.
  - 33 N. Koga, N. Sugimoto, K. Ozawa, Y. Saito, A. Nomura, A. Minato, T. Aoki, T. Itabe, and H. Kunimori, "Laser long-path absorption experiment using the Retroreflector in Space (RIS) on the ADEOS satellite," Proc. SPIE, Vol. 3218, pp. 10–18, 1997.
  - 34 H. Kunimori, S. Oya, and Y. Nakamura, "Optical tracking and ranging to a satellite in GTO by 1.5 m telescope," Proceedings of CRL International Symposium on Light Propagation and Sensing Technologies for future applications, March 13–14, Tokyo, pp. 97–98, 2002.

- 35 H. Kunimori, et.al, "Integration of 1.5 m Telescope and Ranging System in CRL," 13th International Workshop on Laser Ranging, Washington, DC., USA, Oct. 7-11, 2002.
- 36 Y. Arimoto, H. Okazawa, M. Shikatani, T. Takahashi, M. Toyoda, M. Toyoshima and K. Araki, "Laser communication experiment using ETS-VI satellite," CRL Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 285-292, Nov. 1995.
- 37 K. E. Wilson, J. R. Lesh, K. Araki, and Y. Arimoto, "Overview of the Ground-to-Orbit Lasercom Demonstration," Space Communications, Vol. 15, pp. 89-95, 1998.
- 38 S. Kimura, H. Yamamoto, Y. Nagai, S. Nakasuka, H. Hashimoto, S. Nishida, "In-orbit Demonstration of Orbital Maintenance System Using COTS Technologies," 2004年電子情報通信学会総合大会, SB-8-4, pp. SE-11-SE-12, 3月2004年.
- 39 豊嶋守生, 國森裕生, 高山佳久, 木村真一, 永井康史, 山本宏, 橋本英一, 高橋伸宏, 加藤松明, 山元透, "マイクロラプサット1号機搭載 CMOS カメラを用いたレーザー伝送実験," SANE2004-45 (2004-8), 電子情報通信学会信学技報, Vol. 104, No. 271, pp. 17-22, 2004.
- 40 M. Toyoshima, H. Takenaka, Y. Shoji, Y. Takayama, Y. Koyama, and M. Akioka, "Small Optical Transponder for Small Satellites," International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2nd Colloquium in Optical Wireless Communications at the IEEE International Conference (CSND-SP10), OWC-10, Northumbria University, United Kingdom, July 21-23, 2010.
- 41 M. Reyes, S. Chueca, A. Alonso, T. Viera, and Z. Sodnik, "Analysis of the preliminary optical links between ARTEMIS and the Optical Ground Station," Proc. SPIE, Vol. 4821, pp. 33-43, 2003.
- 42 I. I. Kim, B. Riley, N. M. Wong, M. Mitchell, W. Brown, H. Hakakha, P. Adhikari, and E. J. Korevaar, "Lessons learned for STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment," Proc. SPIE 4272, 1-15, 2001.
- 43 I. I. Kim, H. Hakakha, P. Adhikari, E. Korevaar, and A. K. Majumdar, "Scintillation reduction using multiple transmitters," Proc. SPIE, Vol. 2990, pp. 102-113, 1997.
- 44 R. K. Tyson, "Adaptive optics and ground-to-space laser communications," Applied Optics, Vol. 35, No. 19, pp. 3640-3646, 1996.
- 45 豊嶋守生, 荒木賢一, "光分岐方法," 特許第 3069703 号, 1999 年.
- 46 M. Sarazin and F. Roddier, "The ESO differential image motion monitor," Astron. Astrophys. 277, 294-300, 1990.
- 47 Y. Takayama, T. Jono, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, K. Shiratama, J. Abe, and K. Arai, "Tracking and pointing characteristics of OICETS optical terminal in communication demonstrations with ground stations (Invited)," Proc. SPIE 6457A, 6457A-07, 2007.
- 48 L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Laser Beam Propagation through Random Media," SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Wash., Second edition, 2005.
- 49 D. L. Fried, "Aperture averaging of scintillation," J. Opt. Soc. Am. 57(2), 169-175, 1967.
- 50 J. H. Churnside, "Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere," Appl. Opt. 30(15), 1982-1994, 1991.
- 51 Y. Suzuki, Y. Koishi, Y. Hasegawa, Y. Hashimoto, S. Murata, T. Yamashita, K. Shiratama, M. Toyoshima, and Y. Takayama, "Optical Free Space Communication System for 40 Gbps Data Downlink from Satellite/Airplane," Proc. AIAA ICSSC 2011, Nara, Nov. 29, 2011.
- 52 豊嶋守生, 高山佳久, 國森裕生, 山川史郎, 城野隆, "地上-低軌道衛星間光通信回線におけるレーザービーム大気伝搬特性," 電子情報通信学会和文論文誌 B, 衛星通信実験とその応用技術論文特集号, Vol. J94-B, No. 3, pp. 409-418, Mar. 2011.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)

**とよしまもり お**  
**豊嶋守生**

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  
博士（工学）  
衛星通信、大気ゆらぎ、レーザー通信、  
量子暗号

morio@nict.go.jp

**クラウド ヴェルナー**

光ネットワーク研究所  
フォトニックネットワークシステム  
研究室主任研究員 博士（工学）  
空間光通信、微小・回折光学、電磁波  
解析、ファイバ光学

klaus@nict.go.jp

**たけ なかひで き**  
**竹中秀樹**

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有期技術員  
衛星通信、レーザー通信

take@nict.go.jp

**たか やまよし ひさ**  
**高山佳久**

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主任研究員  
博士（工学）  
非線形光学、位相共役光学、フォト  
ニック結晶、電磁波解析、宇宙光通信

takayama@nict.go.jp

**くに もり ひろ お**  
**國森裕生**

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主任研究員  
衛星レーザー測距

kuni@nict.go.jp

**やまかわ しろう**  
**山川史郎**

宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミ  
ッション本部利用推進プログラム・シ  
ステムズエンジニアリング室衛星シス  
テム技術部グループ 技術領域リーダ  
博士（工学）

人工衛星システム、衛星通信、衛星間  
光通信

yamakawa.shiro@jaxa.jp

**くり としあき**  
**久利敏明**

光ネットワーク研究所企画室室長  
博士（工学）

光通信システム、光ファイバ無線

kuri@nict.go.jp

**とよだ まきひろ**  
**豊田雅宏**

社会還元促進部門情報システム室  
専門推進員

工学博士

ランダム媒質中の波動伝搬

toyoda@nict.go.jp

**しょうじ ようぞう**  
**荘司洋三**

ネットワーク研究本部  
ネットワークシステム総合研究室  
プランニングマネージャー

博士（工学）

ミリ波通信システム、光電波融合通信  
システム、コヒーレント光通信シス  
テム、有無線仮想化

shoji@nict.go.jp

**こ やまよし さだ**  
**小山善貞**

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専攻研究員  
光通信、衛星搭載機器

koyama.yoshisada@nict.go.jp

**じょうの たかし**  
**城野 隆**

宇宙航空研究開発機構東京事務所  
人工衛星システム、衛星通信

jyono.takashi@jaxa.jp

**あらい かつよし**  
**荒井功恵**

宇宙航空研究開発機構施設設備部部長  
人工衛星の開発（ゆり、つばさ、きら  
り）、きぼうの開発