

## 4 光地上局システムの開発

### 4 Development of Optical Ground Station System

#### 4-1 1.5 m 光地上局の概要

##### 4-1 Overview of Optical Ground Station with 1.5 m Diameter

國森裕生 豊嶋守生 高山佳久

KUNIMORI Hiroo, TOYOSHIMA Morio, and TAKAYAMA Yoshihisa

#### 要旨

OICETS 衛星との光通信実験を行った地上局側システムは、宇宙光通信地上センター口径 1.5 m 光学望遠鏡のクーデ焦点のベンチ上で構築された。実験に使用した宇宙光センター機能、特に 1.5 m 鏡の光学系、制御系、ガイド鏡などカメラシステム、安全系、ソフトウェアの概要と性能を述べる。また 1.5 m 鏡のサブシステムであるレーザ測距システムが、衛星予報値を含めた追尾精度確認のため使用された。これらサブシステムを用いた OICETS 実験時のオペレーション結果についても報告する。

The OICETS experiment, LEO Satellite-Ground Optical Communication experiment system was installed one of COUDE bench in Optical Space Communication Ground Center of NICT, in which a central facility of 1.5 m diameter optical telescope built in 1988. This paper overviews optics, control system, guide camera system for optical tracking, safety system including hardware and software. Especially, one of subsystem used to evaluate tracking accuracy including orbit prediction and guiding system, a satellite laser ranging and its performance before the main experiment. We describe the operation result using telescope and sub-system as well.

#### [キーワード]

光宇宙通信, 低軌道衛星, 望遠鏡, 追尾, 衛星レーザ測距

Optical space communication, LEO satellite, Telescope, Tracking, Satellite laser ranging

### 1 まえがき

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) と地上局の実験は、衛星の後期運用と位置付けられ、2006 年 3 ~ 9 月、2008 年 10 月 ~ 2009 年 2 月および 2009 年 9 月にかけて東京都小金井市にある宇宙光通信地上局 (以下、NICT 光地上局) の上空および国外の地上局において光通信実験が行われた [1]-[3]。NICT 光地上局は、1988 年度に建設され、口径 1.5 m の多焦点ポートをもつ光学望遠鏡と観測ドーム建屋、光通信装置、レーザレーダ装置やカメラ等の観測装置、サブシステムからなる多目的望遠鏡である [4][5]。

表 1 に望遠鏡の建設から今日までの装置と実験の主要イベントを示した。実験開始時までに、1994 ~ 1996 年の技術試験衛星 ETS-VI (きく 6 号) による衛星-地上間光通信実験の成功をはじめ各種衛星の光学追尾と測距実験を実施してきており、OICETS (高度 約 600 km) と同等の低軌道衛星の光学追尾・測距実績は、日本の ADEOS (800 km)、 $\mu$ -LabSat (770 km) やフランスの Starlette (800 km)、ICESAT (600 km) をはじめ諸外国のレーザ測距衛星 10 基を超えていた [6]-[9]。

本論文では 1.5 m 光学望遠鏡の設備のうち

表 1 望遠鏡装置と実験のイベント年

年	装置と実験 EVENT
1988	1.5 m 望遠鏡建設
1990-96	衛星レーザ測距サブシステムの導入と運用
1990-94	IR カメラ天文観測、CCD 静止衛星観測
1994	指向・追尾高精度化改造、主鏡再コーティング
1994-96	ETS-VI 光宇宙通信実験
1996-97	ADEOS-RIS 衛星レーザレーダ実験
1997-2000	AO 基礎実験
1999	制御系の更新
2000-03	レーザガイドスター実験
2002-03	LRE (H2A-初号機)、ADEOS-2 実験
2004-09	ETS-VIII 測距実験
2004	$\mu$ -LabSat 衛星レーザ伝送
2006	OICETS-地上実験 1
2008-09	OICETS 実験 2
2009-	準天頂衛星レーザ測距
2010	ドーム制御系更新

OICETS 実験に使用したクーデ焦点系、追尾系と実験準備に寄与したサブシステムであるレーザ測距系の構成、機能とその性能について述べる。光通信実験機器については文献 [1] を参照されたい。

## 2 望遠鏡システム

### 2.1 全体構成

図 1 に望遠鏡の構成、図 2 に写真を示した。

本望遠鏡システムは米国の Contraves 社 (現 L-3 社 (Brashear)) 製で、天体望遠鏡としては国際的に中口径 (1.5 m) の分類に入る。

主鏡は F 値 : 1.5 で鏡筒が短く、大型のダイレクトドライブ DC モータを方位角 1 機と仰角 2 機それぞれ有し、各軸の角速度 10 度/秒までの低軌道衛星 (LEO) の追尾が可能である。また、4 つの焦点を有し、副鏡の交換とポート選択ミラーの回転機構により、各焦点および焦点から分岐した計約 10 ポートを切り替え可能で、これらのポートにレーザ送受信ができる設備や各種カメラを置き多目的の実験を行うことができる。また、主望遠鏡の上部に 20 cm 級のガイド望遠鏡や送信望遠鏡、小型カメラを有し視野の異なるカメラで衛星やレーザビーム、背景にある星、天候、航空機等を監視し実験をサポートできる。光

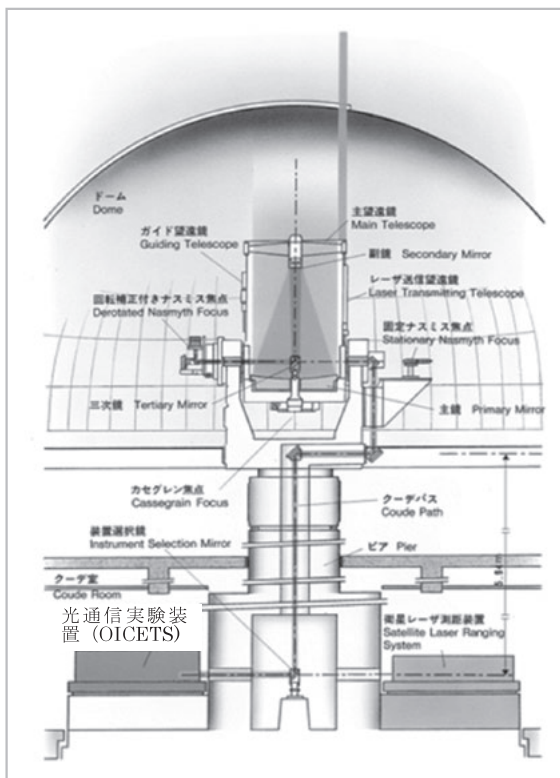


図 1 1.5 m 望遠鏡の構成



図 2 1.5 m 望遠鏡外観

通信実験では、送信系設備をクーデ焦点にて使用し、受信系を 2006 年 3 ~ 9 月実験では送信望遠鏡の焦点に、2008 年 10 月 ~ 2009 年 2 月実験ではクーデ焦点に構築した。また、808 nm ビーコン光源を望遠鏡の方位角テーブルのサービスベン

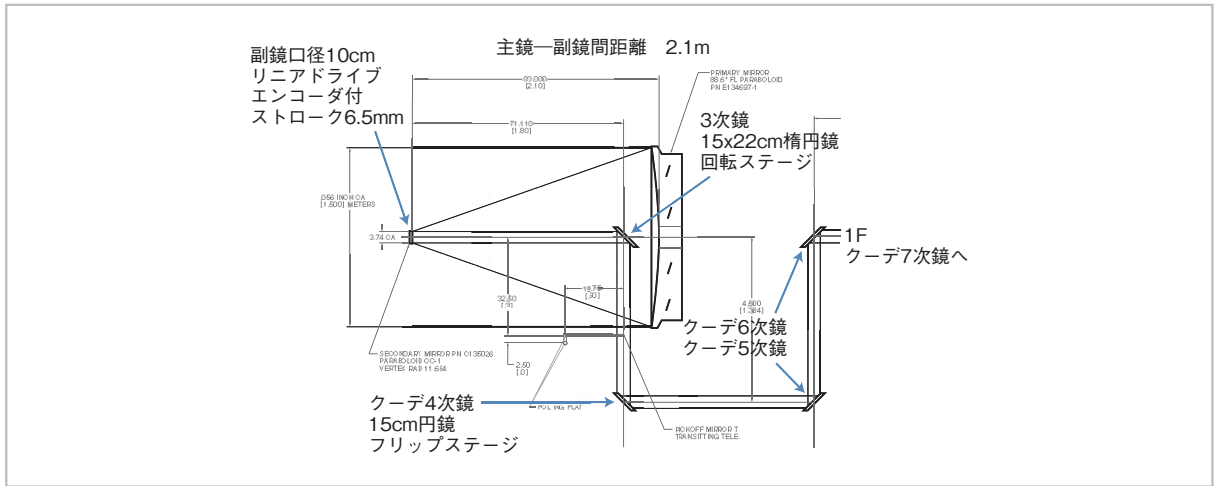


図3 クーデ光学系ミラーの構成

ちに置き、そこから光ファイバーにて鏡筒下部にあるベントカセグレンベンチ上のコリメータに送り出射した。

## 2.2 クーデ光学系

クーデ光学系は図3に示すように、主鏡、副鏡、3次鏡を主光学系とし、その後クーデ4次鏡-7次鏡で階下にある4つのクーデベンチにビームを Afocal に伝送し、ベンチ上にて各種センサー、カメラに集光している。クーデ副鏡（口径 108 mm 放物面鏡）からクーデベンチのインフェースミラーまでの距離は約 14.3 m と長く、ベンチ上のカメラ受光器の視野は約 1.5 分角に制限される。

光通信装置はクーデベンチの1つである暗室型クリーンブース内に構成されている。他のクーデベンチの1つには後述するレーザ測距装置光学系が設備され、光通信実験装置とは中央のピラー内部に設置されたインデックス付回転ステージ上のクーデ第7次鏡（C7）の回転により容易に切り替えることができる。

クーデ焦点システムを構成する各鏡のうち主鏡と副鏡間は副鏡の支持構造（スパイダー）に組み込まれたリニアドライブモータとエンコーダによって数マイクロステップの焦点調整を行うことができる。

## 2.3 クーデ鏡の仕様

主鏡のコーティングはアルミ+保護用ハード

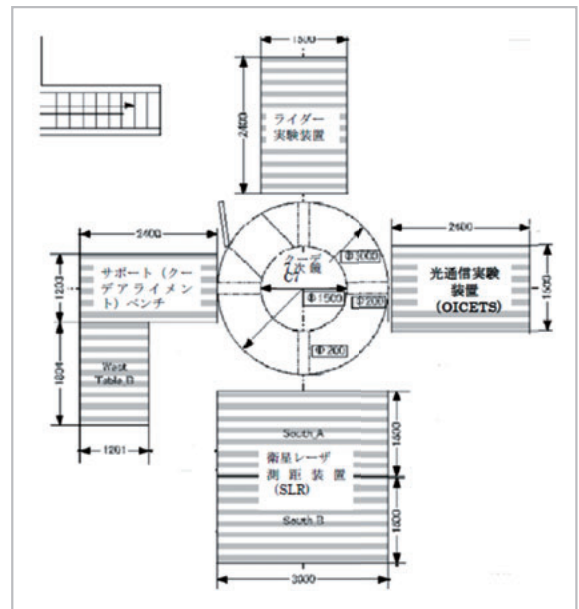


図4 1.5 m 望遠鏡クーデベンチ

コートで、主鏡の再コートは1994年以來実施していない。保護コートの効果で表面の劣化はOICETS実験当時までの14年間で通減的に進行してきていたが、定期的な洗浄を行うことにより、実験に支障のする反射率劣化はなかった。しかし主鏡以外のクーデミラーについては劣化が激しい。原因には、高湿度、結露によるコーティングへの浸透、空気中のほこりまたは化学成分との作用がある。特に上向きのミラーの劣化速度が速い。また、高出力レーザの照射によるダメージもあり、それらの複合効果で生じる劣化である。定期的な再コートが必要で、これまで1~3年に1

回実施している。

クーデミラーのコーティングには建設当初、反射率の高い銀ミラーを採用していたが1年を経ずして表面が劣化した。その後アルミコートに保護と増反射をかねる誘電体を数層かけたコートを採用した。これにより、場所によるが3年以上耐久するミラーもある。

図5 (a) はクーデミラーのOICETS実験当時のクーデ平面鏡 (45度入射) アルミコーティングの分光反射率である。図5 (b) は、その後、別設計したアルミ+増反射コーティングによるものである。

OICETSのダウンリンク波長は847 nm、アップリンクの通信送信は815 nmである。図5 (a) および (b) からわかるように、OICETS実験当時、800 nm帯の反射率は必ずしも最適化されていなかった。しかしながらリンク計算上、衛星からの光送信パワーと口径1.5 mの集光力があり、これが問題となることはなかった。

また、OICETSのアップリンク、ダウンリンクは左旋円偏光したレーザー光を使用する。このため、クーデミラーの単体の偏光特性 (45度入射角) を測定した。図6に測定結果をポアンカレ球の表現で示した。この測定では800 nm帯の直

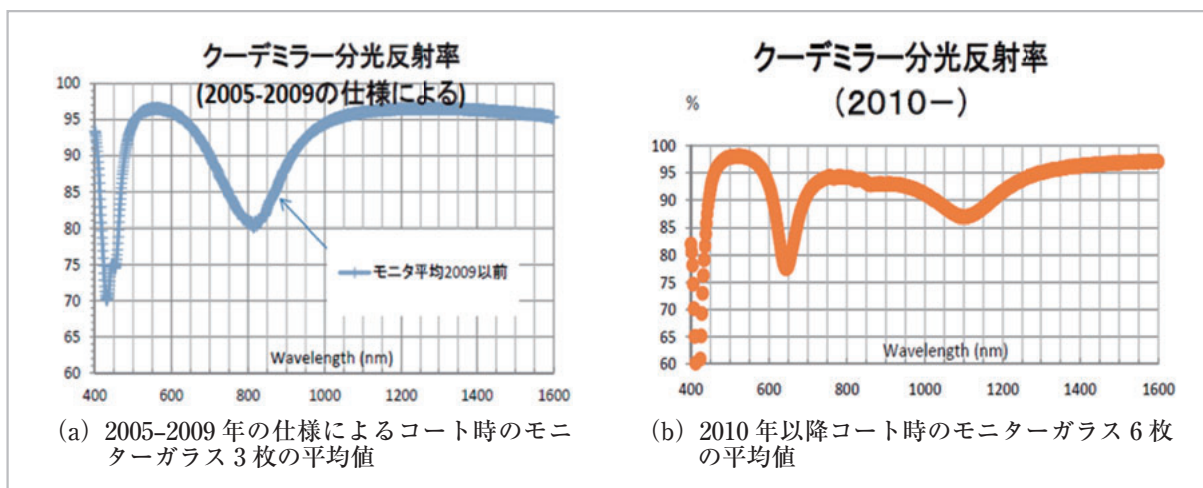


図5 クーデミラーの分光反射率

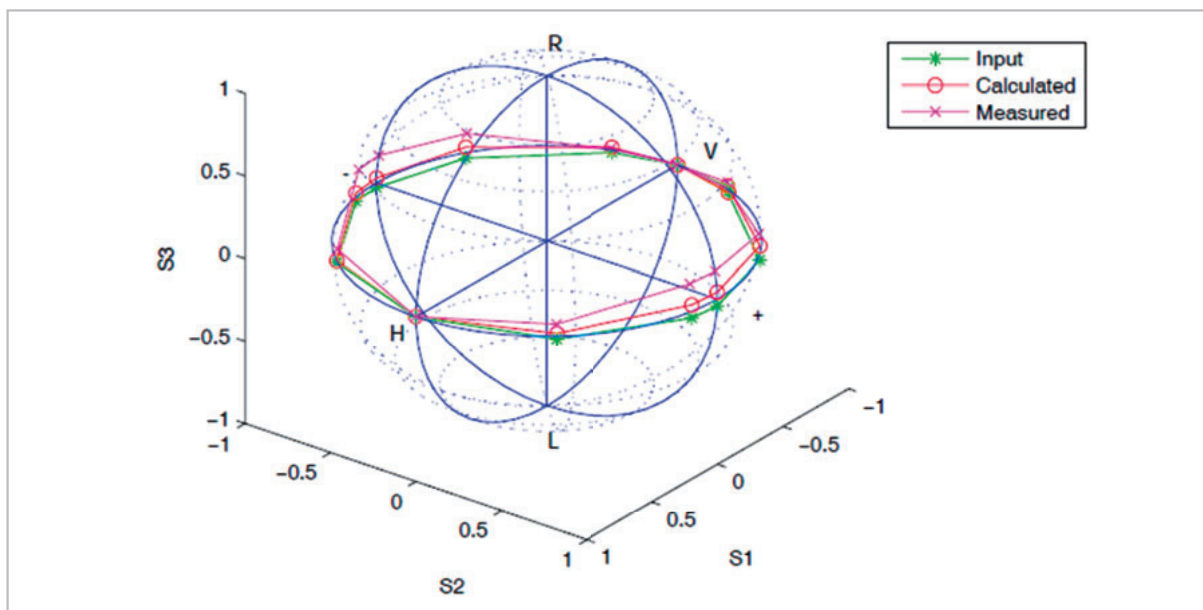


図6 クーデ鏡増反射コートの偏光特性測定例 (OICETS 実験時)

線偏光した光源を偏光方向を回転させて入射したときの反射光の偏光特性を示している。使用したアルミ増反射コートにはわずかではあるが、偏光のクロストークがみられている。主鏡を含めた総合的な偏光特性は、今後偏光を用いた量子通信実験など光通信の応用分野で重要な地上局パラメータとなる。

## 2.4 ガイド望遠鏡等カメラ

光通信実験は夜間に行われる。先述したように、一般に主鏡のクーデ焦点の視野は狭いため、実験には主鏡と同じシンバルに搭載されたガイド望遠鏡が必要である。表2にガイド望遠鏡の仕

パラメータ	値	コメント
形式	シュミットカセグレン	
口径	20 cm Φ	
焦点距離 (実効)	2000 mm	1988 年技術提案書による
反射率	0.6	アルミコート (0.9) 2 回反射に経年劣化を含んだ推定値
カメラ	電子シャッター付電流増幅型 CCD	WATEC120N +
感度	最小感度 0.00002 lx	ただし F1.4 での値 露出最大 シャッター SPEED 最低速
視野	0.4 度 (実測値) 0.33 (AZ) × 0.25 (EL) 度	

様を示す。

実験では、衛星予報6要素に基づきプログラム追尾された各軸角度指令値によって追尾を開始後、本ガイド望遠鏡により OICETS からの送信光を認識、主鏡焦点への引き込みをマニュアル操作で実施した。

主鏡焦点には光通信送信部と受信部に設置した2種類のカメラ (それぞれ TX、RX カメラ) にて受信像を確認し、さらにその中心部に追い込む。これら粗捕捉追尾のオペレーション後、精追尾機構による受光器へのビーム引き込み実験や、大気ゆらぎ用イメージングカメラ (DIMM)、光通信用受信器へ同時に光を受信した。

図7に TX カメラで受信した OICETS からのイメージを、粗捕捉による引き込み前と後で示す。オフセット量は実験日や仰角により異なるが視野中心から2分角から5分角以内にとらえることができた。これは衛星の予報値が良好であったことによるところが大きい。

## 2.5 制御系の追尾誤差

1.5m 望遠鏡の制御系は1999年に更新されたが、モータおよびエンコーダは導入当初のものを使用している。OICETS 実験当時の追尾の誤差は天頂を除き数秒角 RMS であったが、その誤差には図8 (a) および (b) のようにおよそ10秒角 P-P の周期誤差が含まれていた。

図8は高度2000kmの衛星の例で、角度指令

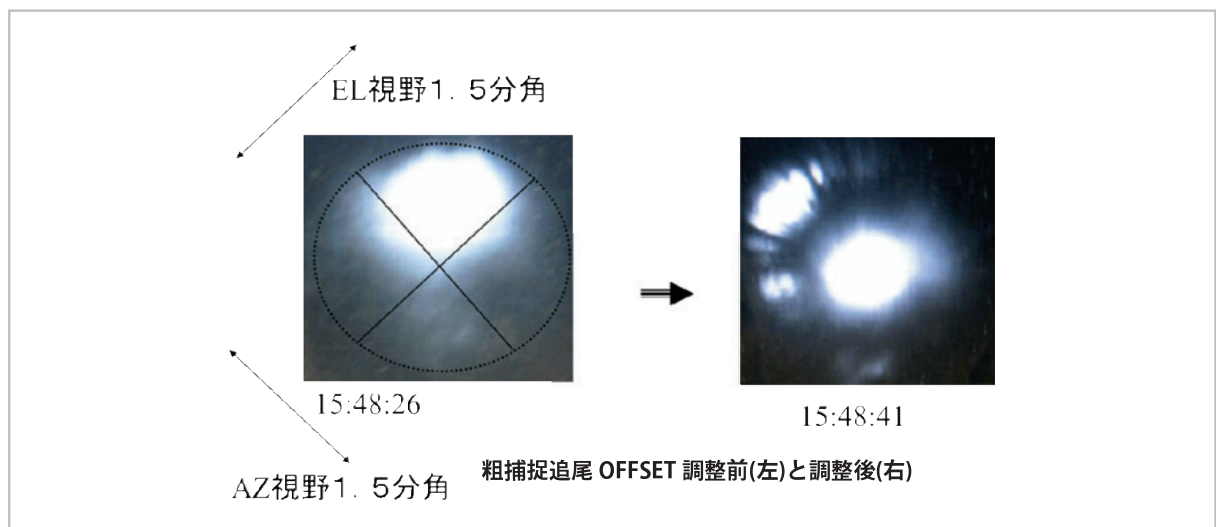


図7 OICETS TX-CCD カメラ記録例 2006年3月30日

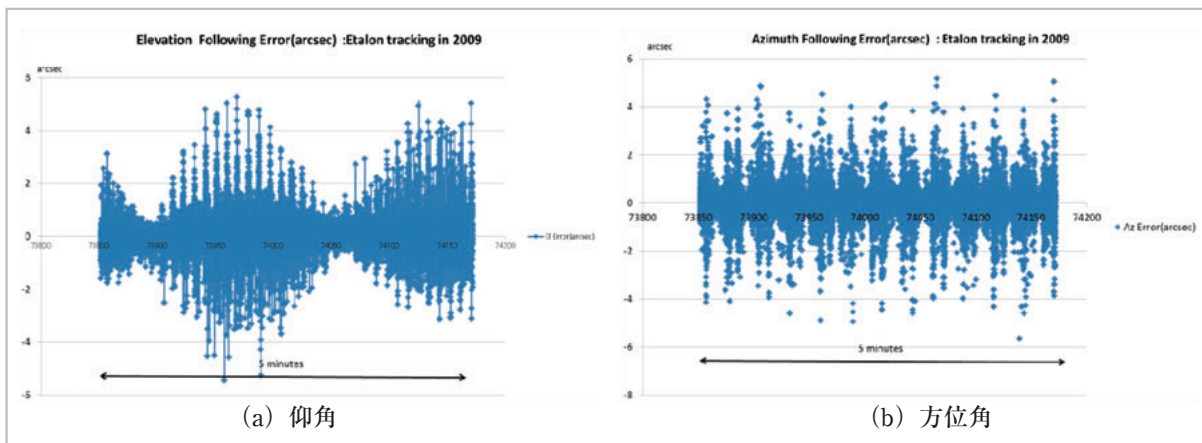


図 8 衛星のトラッキング誤差例

エタロン (高度 2000km)  
横軸時間: 約 5 分間、縦軸: 追尾誤差 秒角

値と現在角度の差を示しており、短い周期を角度に換算すると約 0.5 度であった。

誤差の原因は、実験当時はよくわからなかったが、その後 2010 年に望遠鏡の方位角精エンコーダのケーブル断線が生じた。精エンコーダは 720 極の Inductsyn で 0.5 度以内の微小角をエンコードしている。このことから、望遠鏡方位角の回転によって捻回疲労したエンコーダ関連ケーブルの接続不良によるノイズが制御系に影響を与えていたことが推定されている。望遠鏡のケーブル類はその後 2011 年に損傷したケーブルの更新、捻回部を中心とする再固定および接続試験を行っている。

### 3 レーザ測距サブシステム

OICETS 定常飛行時の地球指向面には、レーザ測距用の CCR (コーナキューブレフレクター) のアレイが搭載されている。これは、衛星の位置を地上からのレーザ測距により確認し、軌道の補正値を得る目的で設置された。

1990 年の初代システム導入から 2002 年に測距系を更新している。OICETS 実験時には、豪州メーカの Master Ranging Control System を使用した。2009 年よりレーザ繰り返し周波数 2 kHz に対応した新しい測距の制御エンジン KRE を開発している [10]-[14]。本システムの特徴は、時系を GPS 時計とは別に、構内の光ファイバーにより 10 MHz で伝送された日本標準時

表 3 既存 SLR システムの仕様

	小金井 7308 (1.5 m 鏡)* * 7308 は ILRS [15] の地上局識別番号
望遠鏡	開口径 1.5 m 焦点 クーデ マウント Alt-Azimuth 指向精度 1 秒角 (RMS) 9°/s (運用最大速度) 追尾速度 方位角 + 300 - 330 度 駆動範囲 仰角 + 110 - 5 度 ドーム Ash ドーム シャッターリモート 開閉
レーザ	波長 532 nm パルス幅 35 ps FWHM 繰返し 20 Hz エネルギー 50 mJ/Pulse (最大)
受光系	検知器 単一フォトン APD フィルター 3A 挿入切り替え 時間基準 UTC-NICT/GPS 切り替え イベント MRCS/KRE 切り替え タイマー MRCS = Master Ranging Control System KRE = Koganei (kHz) Ranging Engine

UTC (NICT) 基準信号に切り替えて運用が可能なことである。

また、OICETS 実験時には ETS-Ⅷ用に設置したナノ秒レーザ (10 Hz 200 mJ) も併設していた。図 9 に本レーザ測距で取得した OICETS の測距データ例を示す。

レーザ測距実験により、使用している軌道予報値の精度確認、望遠鏡の方位、仰角によるアライ

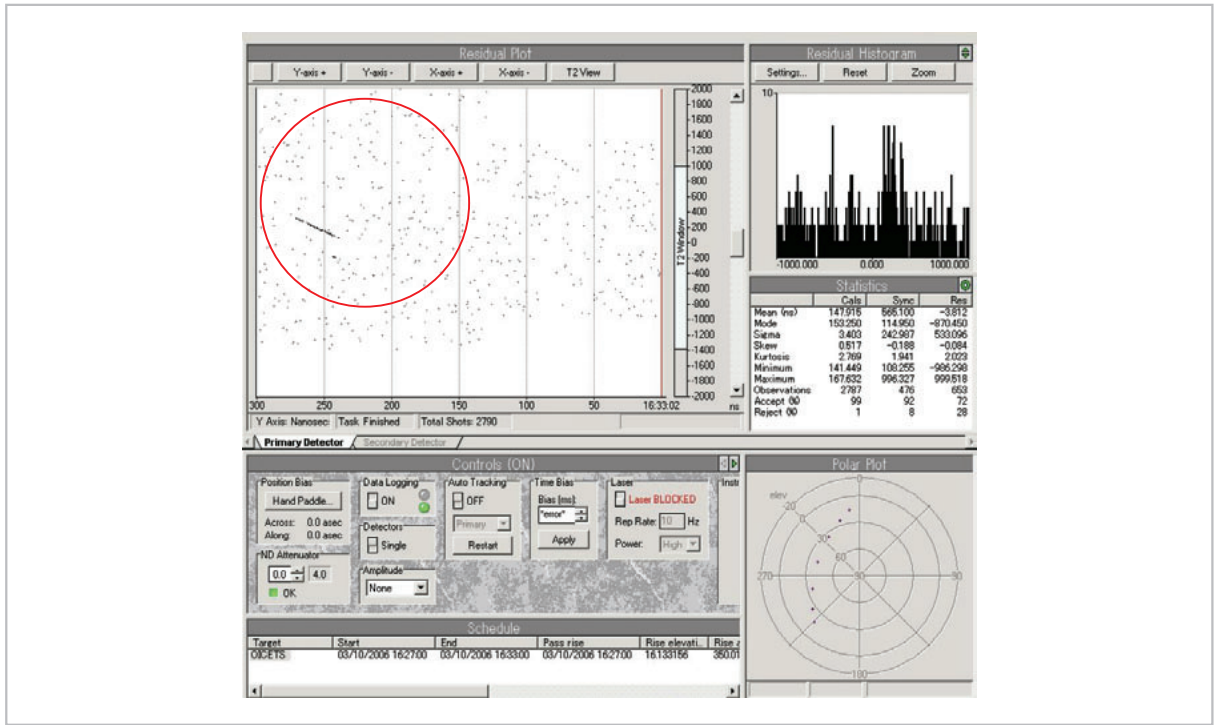


図 9 OICETS の測距例

観測ソフトウェア画面スナップショット 丸印の箇所  
 横軸：時間、縦軸：測距値（ナノ秒レーザーによる）、取得時間：約 34 秒間 68 ショット、RMS：60 cm

メントのチェックアウトができた。地上局はこの間の OICETS 以外の LEO 衛星で SLR を問題なく取得している。

また、国際レーザー測距事業 (ILRS) [15] を通じ JAXA と協力し、同地上局ネットワークに呼びかけ、計 2 回の追跡キャンペーンを実施した。表 4 は参加局の一覧と取得パス数である。

豪州西海岸の Yarragadee 局、北米の NASA-Greenbelt 局、英国の Herstmonceux 局等が積極的に対応してくれた。

今回 OICETS の通信実験は CCR 面が光アンテナと反対側にあり、同一日で近接時間条件での検証はできなかった。

衛星軌道は、光通信用ビーコン 9 mrad に対しては問題なく、約 200  $\mu$ rad (約 1 分角) の通信ビームに対してコンパラブルな精度を結果的に保っていた。いずれも SLR の狭ビーム広がりに対して十分大きなマージンがあるため、SLR が直前にできれば十分な地上局のオープン追尾の検証手段となった。

逆に通常の SLR で OICETS を初期捕捉するには、やや予測精度が不足しており、サーチ時間が

表 4 OICETS 追跡キャンペーンの参加局とパス数

Site Name	Station ID	The first Campaign 2006 Mar.-May	The second Campaign 2008 Oct.-2009 April	TOTAL
Yarragadee	7090	35	162	197
Greenbelt	7105	8	61	69
Herstmonceux	7840	13	34	47
Graz	7839	1	25	26
Wetzell	8834	3	20	23
Monument Peak	7110	15	2	17
Zimmerwald	7810	4	11	15
Mount Stromlo	7825	4	10	14
Potsdam	7841	2	12	14
Papeete	7124	2	11	13
Arequipa	7403	0	10	10
Changchun	7237	0	10	10
Hartebeesthoek	7501	5	4	9
Riga	1884	9	0	9
Shanghai	7821	0	8	8
Borowiec	7811	7	0	7
Haleakala	7119	0	5	5
Kiev	1824	0	4	4
Simeiz	1873	3	0	3
Beijing	7249	0	2	2
Katziwely	1893	0	2	2
Matera	7941	1	1	2
Simosato	7838	2	0	2
Concepcion	7405	0	1	1
McDonald	7080	1	0	1
Total Passes		115	395	510

かかる。特に昼間は太陽干渉して困難であった。今後の衛星では、搭載 GPS を用いた予報値の作成、目的に応じたビーム広がりをもつ SLR での検証や昼間でも実験ができる軌道配置などの考慮が有効であろう。衛星の CCR を光アンテナ面に配置してビーコンの補助にすることも今後の設計で考えられる。

## 4 むすび

本稿において OICETS との実験を行った光地上局の設備、機能と通信実験における軌道精度の評価と課題を述べた。低軌道衛星との光通信実験のリンク計算上は、口径 1.5 m は不要で口径 20 cm クラスの望遠鏡で十分である。実際、OICETS 実験でも受信口径は 20 cm のサブ望遠

鏡や 32 cm に相当するサブ開口を使用した。しかし、1.5 m 望遠鏡の、集光力と強力な駆動能力と装置の鏡筒やベンチへの搭載能力により、多くの測定装置を同時に運用、光を分けてデータを効率的に取得することができたこと。また、光通信実験の前に軌道精度の評価を OICETS だけでなく他の多くの LEO 衛星で SLR により実施しており、トラッキング面についての問題はすべて洗い出せていたことも実験の成功に寄与している。このような多機能な光学実験設備は、今後も宇宙通信において重要な役割を果たすと考えている。

## 謝辞

本研究について、1.5 m 望遠鏡を保守運用している、株式会社 TTC 各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1 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, “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,” 本特集号, 4-2, 2012.
- 2 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, Vo. 1, 6105, pp. 13–23, 2006.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 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, “マイクロラボサット 1 号機搭載 CMOS カメラを用いたレーザ伝送実験,” SANE2004-45 (2004-8), 電子情報通信学会信学技報, Vol. 104, No. 271, pp. 17–22, 2004.



- 10 Hiroo Kunimori, Toshimichi Otsubo, Bret Engelkemier, Taizoh Yoshino, and Ben Greene "Timing Precision of Active Q-Switched Mode-Lock Laser and Fire Control System for the Synchronous Satellite Laser Ranging," IEEE trans. Instrumentation and Measurement Vol. 44, No. 3, pp. 832–835, 1995.
- 11 H. Kunimori "KSP SLR SYSTEM 4.1 Design concept of the KSP SLR System," JOURNAL of the COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY Vol. 46, No. 1, pp. 97–102, 1999.
- 12 國森裕生, "衛星レーザ測距: 地上および宇宙セグメントの技術," 電子情報通信学会総合大会, BI-1-19. 2010年3月.
- 13 國森裕生, 石津美津雄, 荒木博志, "高高度衛星探知用送受信測距系の光地球局への導入," 電子情報通信学会信学技報, SANE2011-161 (2012-02), pp. 7–12, 2012.
- 14 [http://www2.nict.go.jp/wireless/spacelab/lasersatellitetechnology/09slr/index\\_jp.html](http://www2.nict.go.jp/wireless/spacelab/lasersatellitetechnology/09slr/index_jp.html)
- 15 <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)



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  
衛星レーザ測距  
kuni@nict.go.jp



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、レーザ通信、  
量子暗号  
morio@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