

3-2 光衛星間通信実験衛星 (OICETS) と ARTEMIS 間の光衛星間通信実験

3-2 *Optical Inter-orbit Communication Experiment between OICETS and ARTEMIS*

城野 隆

JONO Takashi

要旨

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発した光衛星間通信実験衛星 (OICETS) は、主に 2 つの目的を持って開発された実験衛星であり、1 つは欧州宇宙機関 ESA (European Space Agency) が開発する静止衛星 ARTEMIS との静止軌道-低高度周回軌道間の光衛星間通信実験であり、もう 1 つは情報通信研究機構 (NICT) 光通信地上局との地上-低高度周回軌道間の光通信実験である。本稿では、OICETS と ARTEMIS 間で実施した光衛星間通信実験について、実験システム概要及び 2005 年 12 月から 2006 年の 8 月にかけて実施した軌道上実験の結果について報告する。

Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS) is an advanced engineering test satellite developed by Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) with two purposes. One is inter-orbit communication experiment between the OICETS and European Space Agency's geostationary satellite ARTEMIS. Another is optical communication experiment with the NICT optical ground station.

Optical inter-orbit communications experiment between OICETS and ARTEMIS were performed from December, 2005 to August, 2006. This paper describes overview of the inter-orbit communication experiment system and summary of experiment results.

[キーワード]

光衛星間通信, 空間光通信

Optical Inter-orbit communication, Space optical communication

1 はじめに

光の波長帯を用いた宇宙空間における通信は、電波の波長帯による通信システムと比べてアンテナの小口径化が可能であり、光の広帯域性も併せて利用すれば小型・軽量の衛星搭載通信機器で高速大容量通信を実現することが可能である。そのため、衛星を用いた宇宙通信ネットワークの次世代の基幹技術として注目されてきた。しかしながら、レーザ光を用いた高精度な追尾・指向技術など、地上で普及している光ファイバ通信と大きく異なる技術を必要とすることから、期待されながらも実用化に至っていないのが現状である。

日本における研究活動は 1980 年代からさまざ

まな機関・大学において進められており、情報通信研究機構 (NICT)、国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) において、試作研究等が行われてきた [1][2]。1994 年には、NICT が開発した光通信機器 LCE が JAXA の技術試験衛星 VI 号に搭載され、世界初の衛星-地上間の通信実験に成功している [3][4]。

本稿で述べる、光衛星間通信実験衛星 (OICETS) は、主に 2 つの目的を持って開発された衛星であり、1 つは欧州宇宙機関 ESA (European Space Agency) が開発する静止衛星 ARTEMIS との静止軌道-低高度周回軌道間の光衛星間通信実験であり、もう 1 つは NICT 光通

信地上局との地上-低高度周回軌道間の光通信実験である。OICETSは2005年8月に高度約610 km、軌道傾斜角97.8度の太陽同期軌道に投入され、「きらり」と名付けられた。

OICETSとARTEMISとの光衛星間通信実験は、2005年12月から2006年の8月にかけて日欧共同で実施し、様々な軌道上での実験結果を得ることができた。本稿では、OICETSが軌道上で取り組んだ実験のうちARTEMISとの実験について、実験システムの概要及び主な実験結果について報告する。

2 光衛星間通信実験システム

2.1 衛星搭載光衛星間通信機器

JAXAの衛星であるOICETSとESAの衛星であるARTEMISにはそれぞれの機関が独自に開発した光衛星間通信機器が搭載されている。軌道上での通信実験を実現するために、通信インタフェース仕様を決めた文書S-ICD (Space Segment Interface Document) をJAXAとESAの共同で制作し、それぞれの機関で光衛星間通信機器の開発を進めた。S-ICDには、波長、変調方式、強度、光変調波のパルス特性、お互いのレーザー光を捕捉・追尾するシーケンスなどを規定した。表1にS-ICDにおける主要なインタフェース規定を示す。

OICETSに搭載した光衛星間通信機器をLUCE (Laser Utilizing Communication Equipment)、ARTEMISに搭載したものをOPALE

(Optical Payload Laser Experiment) と呼称している。LUCEとOPALEの大きな機能上の差はビーコン光送信装置の有無である。ビーコン光は捕捉・追尾シーケンス初期のみに使用し、通信用レーザー光の広がり角 $6\text{ }\mu\text{rad}$ に比べて広い $750\text{ }\mu\text{rad}$ のビーコンビームを相手衛星に照射しつつ、うずまき状にスキャンすることにより、重要な初期捕捉を確実に実行する役割を果たしている。OPALEに関する性能等は文献[5][6]に詳述されており参照されたい。以下、JAXA側が開発したLUCEについて述べる。

LUCEは衛星構体の外部に搭載されるLUCE光学部と衛星構体内部に搭載するLUCE電子回路部で構成されている。LUCEの外観を図1に、LUCEの内部構成を図2に示す。光学部には、口径26 cmのカセグレン型反射光学系による光アンテナ、2軸ジンバルによる粗捕捉追尾 (Coarse Pointing: CP) 機構、精捕捉追尾 (Fine Pointing: FP) 機構から構成され、電子回路部は、捕捉追尾指向演算処理回路、CP・FP制御回路等により構成されている。CP系及びFP系の2つの捕捉追尾制御系は、制御駆動範囲、帯域、精度により機能分担している。CP系は通信相手が出す光を捕足・追尾するセンサとして、インターライン型2次元CCDを使用し、受信光がCCDの中心に入射するよう光アンテナ及び光学部全体をAz-EIマウント方式の2軸ジンバルで駆動し、 ± 0.2 度の視野に入った相手衛星のレーザー光を精捕捉追尾センサの視野 $\pm 200\text{ }\mu\text{rad}$ 内に入るよう制御する。FP系は、センサとして4分

表1 光衛星間通信インタフェースの主要規定

	Forward link (OPALE to LUCE)	Return link (LUCE to OPALE)
Wavelength	819 nm (communication beam) 801 nm (beacon beam)	847 nm (communication beam)
Polarization	LHCP	LHCP
Data rate	2.048 M bps	49.3724 M bps
Modulation	IM-DD	IM-DD
Signal format	2 PPM	NRZ
Extinction Ratio	$< 2\%$ Imin/Imax	$< 2\%$ Imin/Imax
Intensity	Min. 25.2 MW/sr Max. 130 MW/sr	Min. 280 MW/sr Max. 780 MW/sr
Bit error rate	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

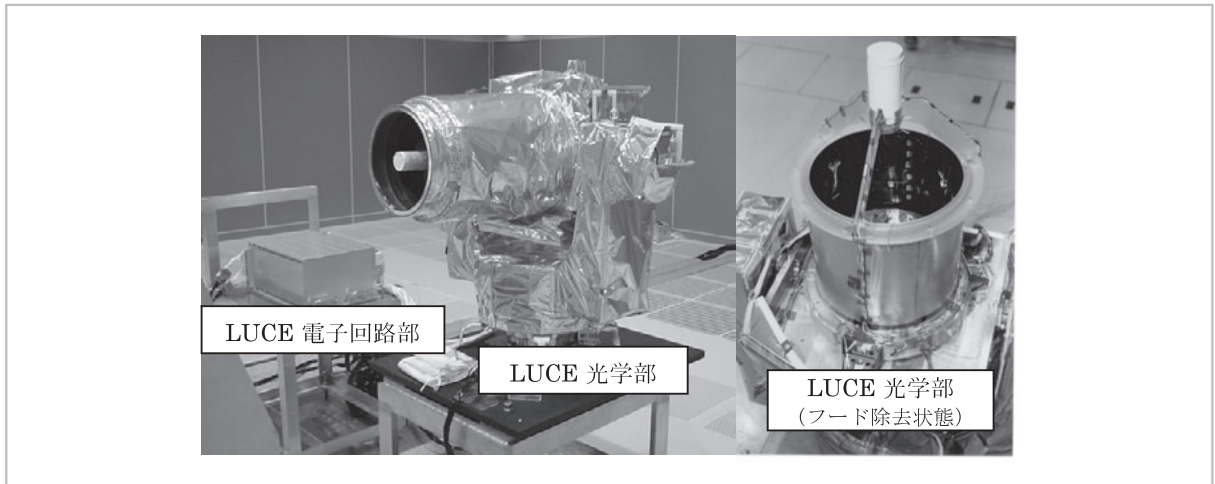


図 1 LUCE の外観図

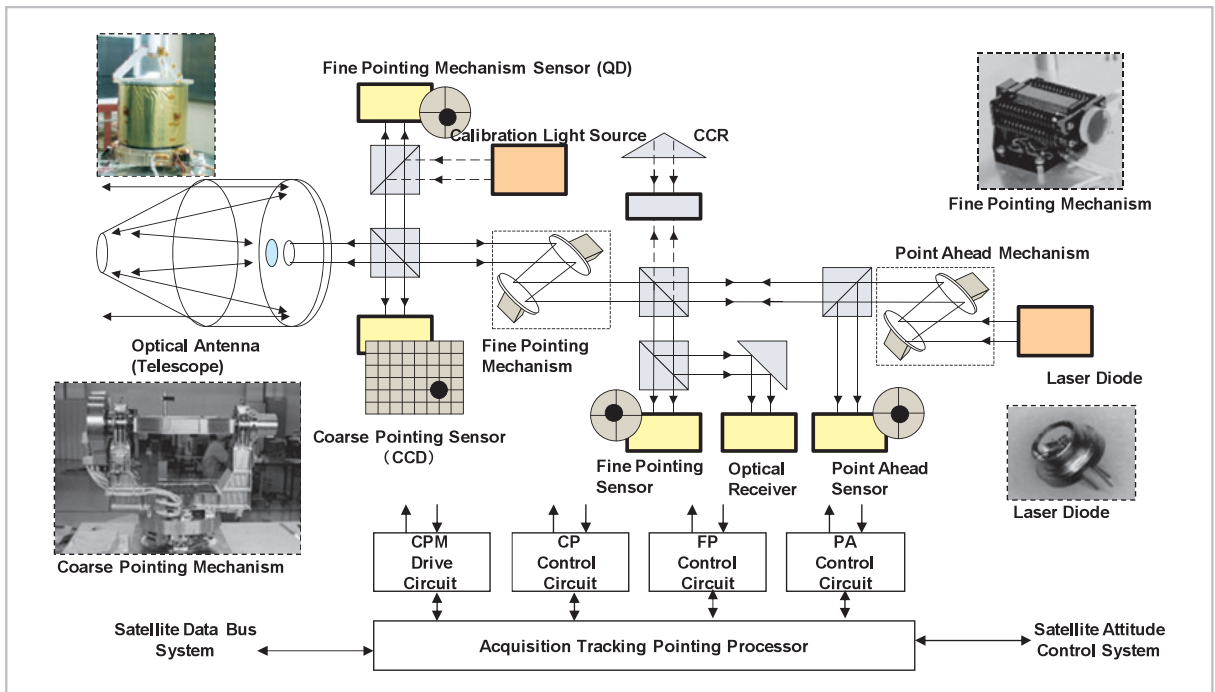


図 2 LUCE の内部構成

割フォトダイオードを使用し、2枚の小型ミラーを積層圧電素子で制御するFP機構により、相手衛星のレーザ光を通信用光受信器の視野 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 内まで導く制御を行う。光受信器は、受光素子であるアバランシェフォトダイオード（APD）による光電変換を行い、光の強度変調パルス信号を電気信号として取り出す。送信レーザの光源には最大出力 200 mW の AlGaAs レーザダイオードを使用しており、レーザダイオードの送信光は FP 機構の手前で受信光軸と結

合し、FP 機構を経由して光アンテナから相手衛星に送信レーザ光が照射される。また、衛星間の相対速度が約 7 km/秒あるために、光行差を補正する必要があり、出射レーザ光に補正角度を加える光行差補正系（Point Ahead: PA 系）を有している。PA 系は、LUCE の捕捉追尾処理演算回路で両衛星の軌道情報から補正角を時々刻々算出し、積層圧電素子により送信レーザ光の指向角度を連続的に制御する。CP 系、FP 系及び PA 系を含めた総合的な送信レーザ光の指向精度の設

計値は $\pm 2.6 \mu\text{rad}$ である。

LUCEは衛星全体に対して約20%の質量を持っているため、LUCE駆動時の衛星姿勢への影響を避けることはできない。そのため、LUCEと衛星姿勢制御系間に相互のフィードフォワード制御のためのインタフェースを持っている。衛星姿勢制御系は、LUCE CP系駆動角度情報をリアルタイムに受信し、リアクションホイールによる姿勢制御により、衛星姿勢の維持を行う。一方、LUCEは、衛星姿勢角及び姿勢誤差角情報をリアルタイムに受信し、捕捉時及び追尾時のCP系制御に使用している[7]。

2.2 実験全体システム

衛星運用、実験データの流れ等を含めた光衛星間通信の全体実験システムの構成を図3に示す。実験においては、OICETSに対してはJAXAの追跡管制局から、ARTEMISに対してはESAのARTEMIS運用管制センターから必要なコマンドを実験前に送信するシステムである。衛星へ送る多数のコマンドのうち最も重要なものは、相手衛星の軌道情報である。光衛星間通信は電波通信に比べて広がり角が狭いため、相手衛星の軌道情

報に誤差があると通信リンクの初期捕捉ができなくなってしまう。そのため、実験においては、24時間毎に衛星の軌道情報をESAとJAXA間の地上システム間で交換し、それぞれの衛星に相手衛星の軌道情報を送信し、常に最新の軌道情報を使った実験運用を行った。

LUCEからOPALEへの光衛星間通信データリンク（リターンリンク）は、OPALEがLUCEから受信した光入力信号をO/E変換し、復調したデジタルベースバンド信号はKaバンド通信リンクにより、ベルギーのESA地上局に送信される。一方、OPALEからLUCEへの光衛星間通信リンク（フォワードリンク）は、ベルギーのESA地上局からKaバンド通信リンクによりARTEMISに送られ、OPALEにおいてE/O変換され、LUCEへ光通信リンクにより送信される。通信品質評価のために、LUCEはリターンリンク評価用には疑似ランダム符号（PNコード）発生器を搭載し、フォワードリンク評価用にはビット誤り計測器を搭載している。また、ベルギーのESA地上局にもPNコード発生器とビット誤り計測器を設置している。

ARTEMISの静止位置が東経21度のアフリカ

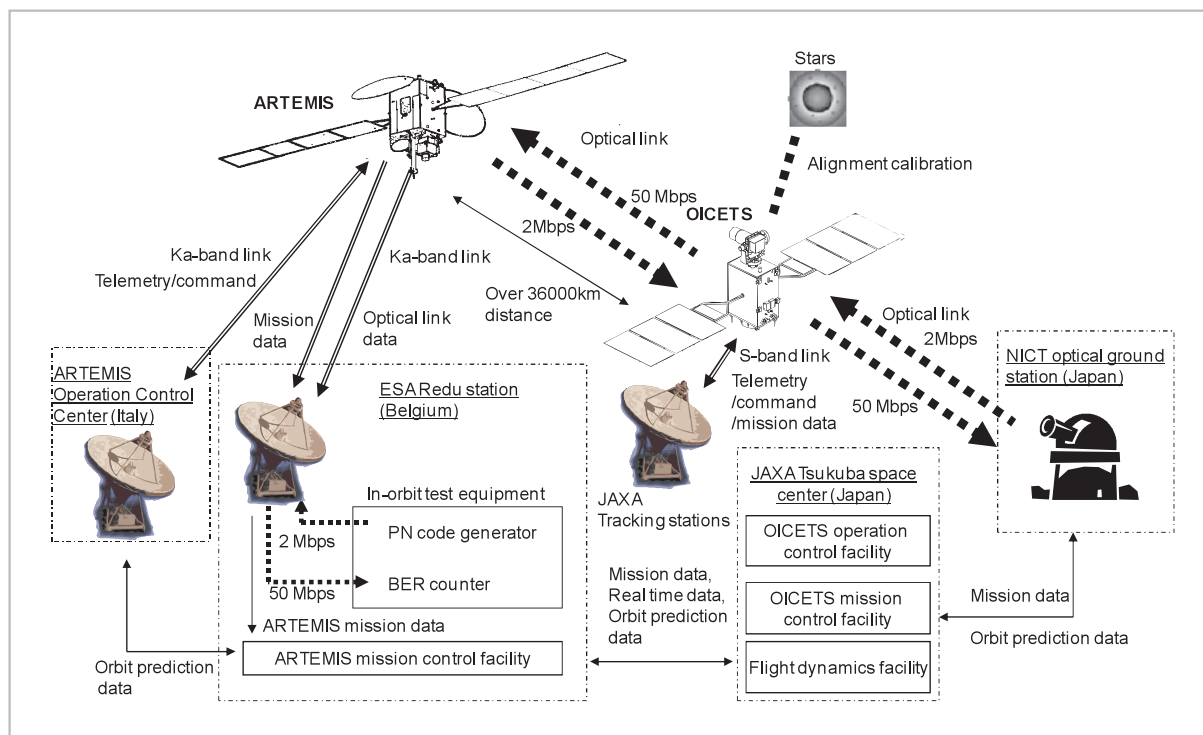


図3 実験システム構成

大陸付近であるため、光衛星間通信実験は、概ね欧州～アフリカ大陸上空で実施することになる。ARTEMISは静止衛星のため、常時テレメトリデータをモニタ可能であるが、OICETSは低軌道周回衛星のためJAXA 追跡管制局による常時モニタは不可能である。そのため、光衛星通信実験中の状況把握を日本でリアルタイムにモニタするために、JAXA 筑波宇宙センター内にARTEMISのリアルタイムテレメトリモニタ装置を設置した。

光衛星間通信実験の解析・評価に必要なLUCEの追尾誤差データ等は125 μ 秒毎にサンプリングし、衛星に搭載した半導体記録装置に一旦記録し、JAXA 追跡管制局へSバンド通信により実験後に伝送する方式を取った。また、OPALEの追尾誤差データ等はベルギーのESA地上局にARTEMISからKaバンド通信で送信され、ESA地上局からJAXA 筑波宇宙センターへ地上回線を使って伝送されることにより、実験の評価・解析を筑波宇宙センターで一元的に行えるシステムを構築した。

3 光衛星間通信実験結果

3.1 実験の経過

ARTEMISとの実験は以下の3つのフェーズに分けて実験を計画し、実行した。

(1) Commissioning フェーズ：

ARTEMISとの光衛星間通信実験において、衛星間通信リンク確立のためのパラメータを模索し、様々な試行を繰り返して双方向光衛星間通信リンクを確立させる。いわゆる準備・試運転のフェーズである。

(2) Experiment フェーズ：

Commissioningにおいて双方向の光衛星間通信リンクが確立できたことを受け、捕捉追尾シーケンスの検証、LUCEの送信レーザ光の指向バイアス誤差の評価及びその補正実験などを行い、Routineフェーズに向けたパラメータチューニングを行うフェーズである。

(3) Routine フェーズ：

相互の衛星・光衛星間通信機器の設定を変更せず、継続したデータ取得を行い、実用実証の観点から実験回数を重ねて、常時安定的な通

信ができることを検証するフェーズである。

OICETSの軌道投入後約3ヶ月間の衛星本体の初期機能確認[8]を実施した後、2005年12月6日からCommissioningフェーズを開始した。12月6日に実施した最初の実験で互いのレーザ光の捕捉追尾に成功し、その後12月9日に、フォワードリンク及びリターンリンクにおいて光通信の信号復調を確認し、世界初となる双方向の光衛星間通信実験に成功した。

実験開始前は、最初の実験で互いのレーザ光が相手を正確に照射することができず、初期捕捉に失敗する可能性が大きいと考えており、OPALEビーコン光のスキャンエリア拡大やLUCE送信光のスキャン運用などを準備していた。また、初期捕捉失敗後は、試行錯誤を積み重ねる必要があるため、実験開始前にはCommissioningフェーズに要する期間が長期化する懸念も抱いていた。結果としては最初の実験で捕捉追尾に成功したことから、日・欧の関係者一同は成功を喜ぶとともに、困難な試行錯誤を実施しなくて済むことに胸をなでおろした次第であった。

その後12月19日にExperimentフェーズを開始し、LUCE送信レーザ光の指向バイアス誤差評価及びその補正実験等を行い、2006年2月16日にExperimentフェーズを終了した。その後、Routineフェーズを開始し、継続的に実験を行った後、2006年8月10日をもってOICETSとARTEMISとの軌道上実験を終了した。OICETSとARTEMISで行った実験は106回であり、うち100回の通信実験に成功した。以下に得られた実験結果のうち、捕捉追尾シーケンスの検証等の代表的な実験結果について述べる。

3.2 捕捉追尾シーケンス検証

LUCEとOPALEの捕捉追尾は以下のシーケンスにより実行される。

- (1) OPALEからのビーコン光照射及びスキャン
- (2) LUCEがビーコン光を捕捉追尾し、通信光を照射
- (3) ARTEMISが通信光を捕捉追尾し、通信光を照射、その後、ビーコン光を停止
- (4) 以後、相互に通信光の追尾・指向を維持し、データ通信を開始する。

図4及び図5は2006年2月9日にExperimentフェーズ中に実施した実験で得られたデータからLUCEの捕捉追尾の様子を示したものである。図4においてLUCE CPセンサFOV内にOPALEのビーコン光が入射し、CPセンサからの誤差信号から粗捕捉追尾機構(2軸ジンバル)を駆動し、精捕捉追尾センサFOVまで誤差を収束させ、FPセンサ誤差信号からFP機構を駆動し、最終的には $0.5\ \mu\text{rad}$ 以下の追尾誤差まで維持していく様子を示している。図5は、LUCEの追尾誤差が収束することによりOPALEがLUCE通信光の受光に成功し、OPALE側の送信レーザ光をビーコン光から通信光に切り替え、通信光を相互に維持し、捕捉追尾シーケンスが待ち受け開始から約60秒以下で完了したことを示している。

OPALEがビーコン光を照射できる時間は、ビーコン光のレーザ光源の発熱が大きいために159秒以下の制約がある。従って一連の捕捉追尾シーケンスを制約時間内に余裕を持って終了させることが通信リンクの安定的な接続の意味でも重要な要素であった。

3.3 指向バイアス誤差評価・補正実験

本実験は、LUCE送信レーザ光の指向角度にオフセット角をスパイラル状に意図的に与え、OPALEの受信光強度を測定することにより、LUCE送信レーザ光の強度分布の評価及び送信レーザ光の指向バイアス誤差の推定・補正を目的とした実験である。図6は最初の測定実験で得られた強度分布である。この1回目の測定結果から、指向バイアス誤差により強度分布のピーク

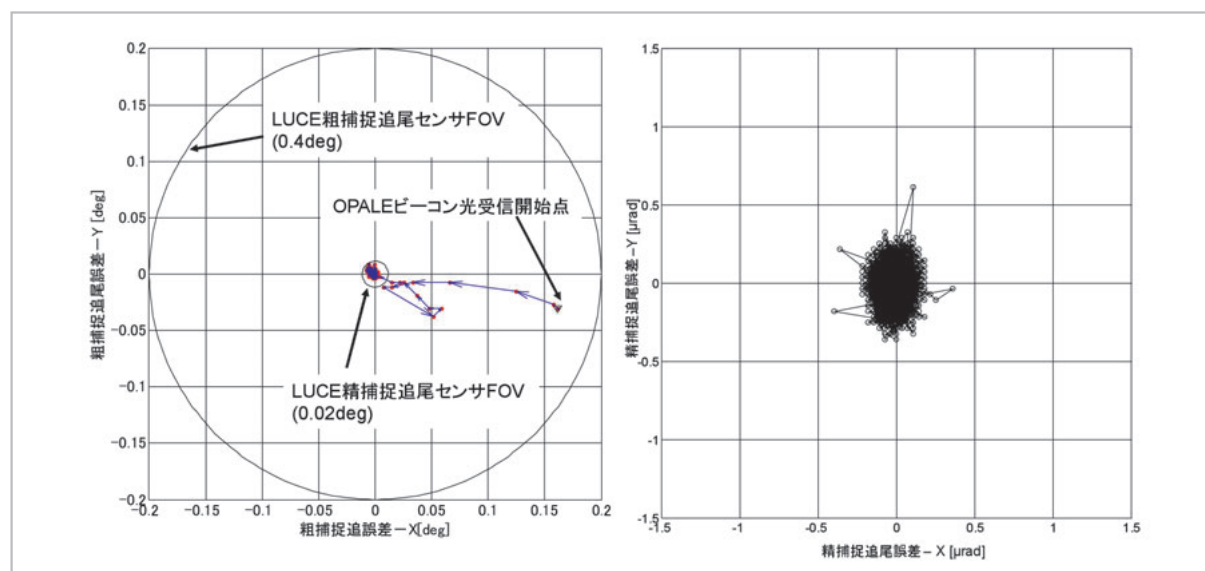


図4 初期捕捉時の粗捕捉追尾誤差及び精捕捉追尾誤差

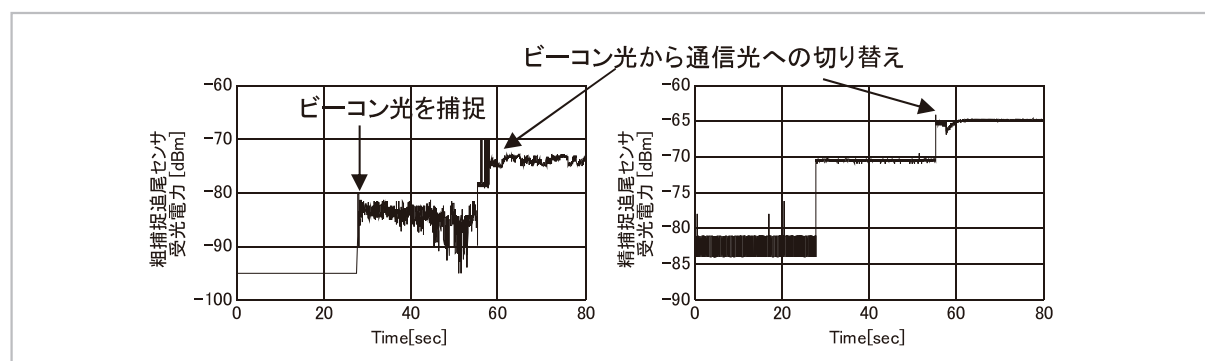


図5 初期捕捉時の粗捕捉追尾センサ及び精捕捉追尾センサの受光電力

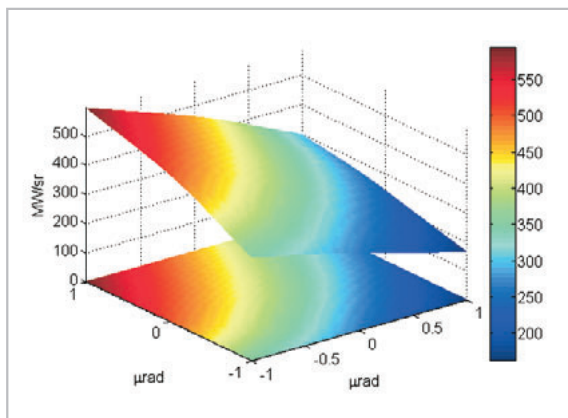


図6 指向補正前の LUCE 送信光強度分布
(測定日 2005 年 12 月 9 日)

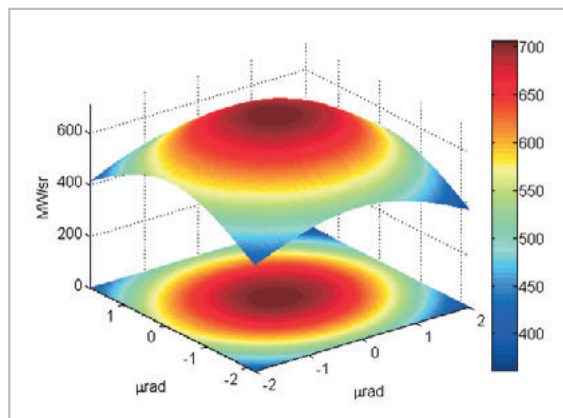


図7 指向補正後の LUCE 送信光強度分布
(測定日 2006 年 1 月 26 日)

が指向中心からずれており、さらに強度分布のピークが $\pm 1 \mu\text{rad}$ の測定範囲外であることが分かった。強度分布のピークを中心に補正するために、9回に渡って指向角度補正の試行を行った結果、図7に示すように放射強度のピークを指向中心とすることに成功した。本実験により得られた指向補正角すなわち指向バイアス誤差は $-X$ 軸方向 $2.5 \mu\text{rad}$ 、 $+Y$ 軸方向に $1.8 \mu\text{rad}$ であった。なお、指向補正後に測定した強度分布データから推測される送信ビームのFWHM (Full Width Half Maximum) は約 $6 \mu\text{rad}$ であり、これは設計及び地上試験での特性を良好に再現している結果であった。補正実験を実施したのは2006年1月であるが、その後2006年6月に再度、LUCE送信強度の測定を行った。図8がその測定結果であり約6ヶ月経過しても強度分布のピークが指向中心にあり、指向バイアス誤差が変化していないことを示している。

図9は、OPALEのLUCE送信光の受光強度を指向補正前後で比較したものである。この測定結果から、指向補正後にOPALE側の受光強度が増加したことに加え、変動幅も小さくなっていることが分かる。

ロケット打上げ時の振動・衝撃付加、軌道上での熱真空環境により指向方向のずれが発生することは予想していたことであるが、実際に $2 \mu\text{rad}$ 程度の指向バイアス誤差が発生した状況から、 μrad オーダーのレーザ光指向制御精度を要求される光衛星間通信機器において、軌道上指向補正は必須の作業であることを改めて認識することと

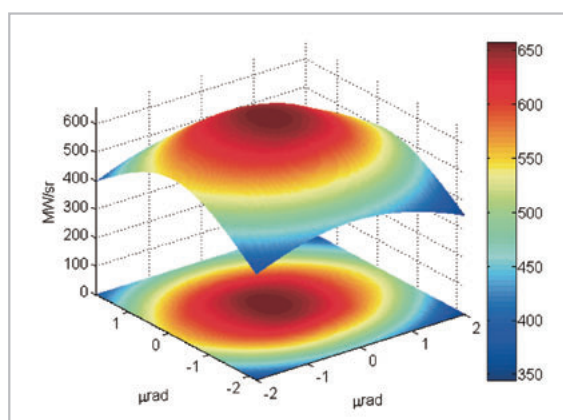


図8 指向補正後の LUCE 送信光強度分
(測定日 2006 年 6 月 11 日)

なった。

3.4 ビット誤り率評価実験

光衛星間通信の通信特性を評価するために、15段のPNコードを用いたビット誤りの測定をリターン及びフォワードリンクに対して行った。なお、正確な通信品質データを得るために、あえて誤り訂正符号を使用せず実験を行っている。

前述した指向補正前の条件においては、OPALEの受光強度が低くかつ受光強度の変動が大きいことから、リターンリンクのビット誤りは1秒間あたり約10万～3万ビット発生し、ビット誤り率BER (Bit Error Rate) では 10^{-3} 程度であり、設計指標としていた 10^{-6} を達成できない状況であった。しかし、指向補正を行うことにより受信強度及び変動が著しく改善し、補正直後のBER測定においては 10^{-9} 以下となる良好な結

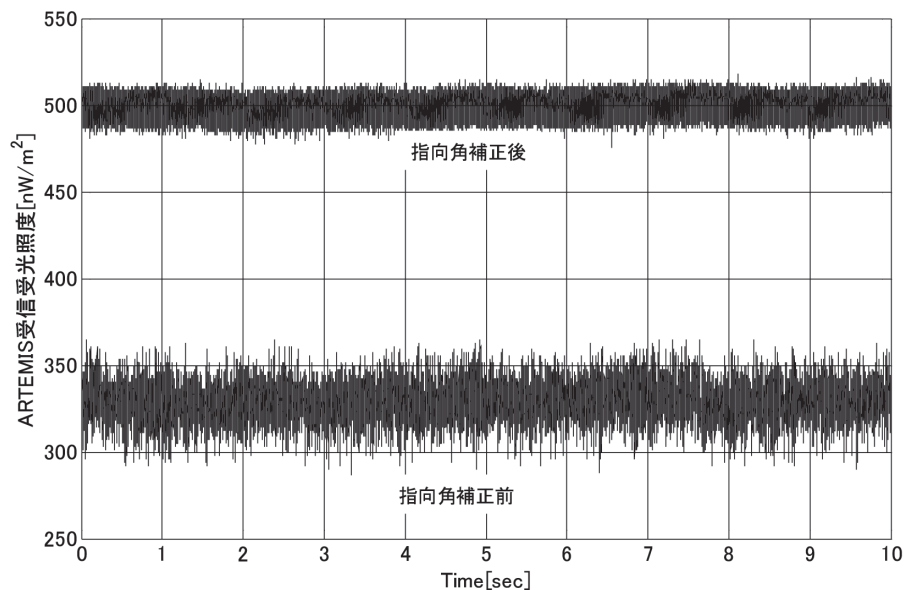


図 9 指向補正前後の LUCE 送信光強度

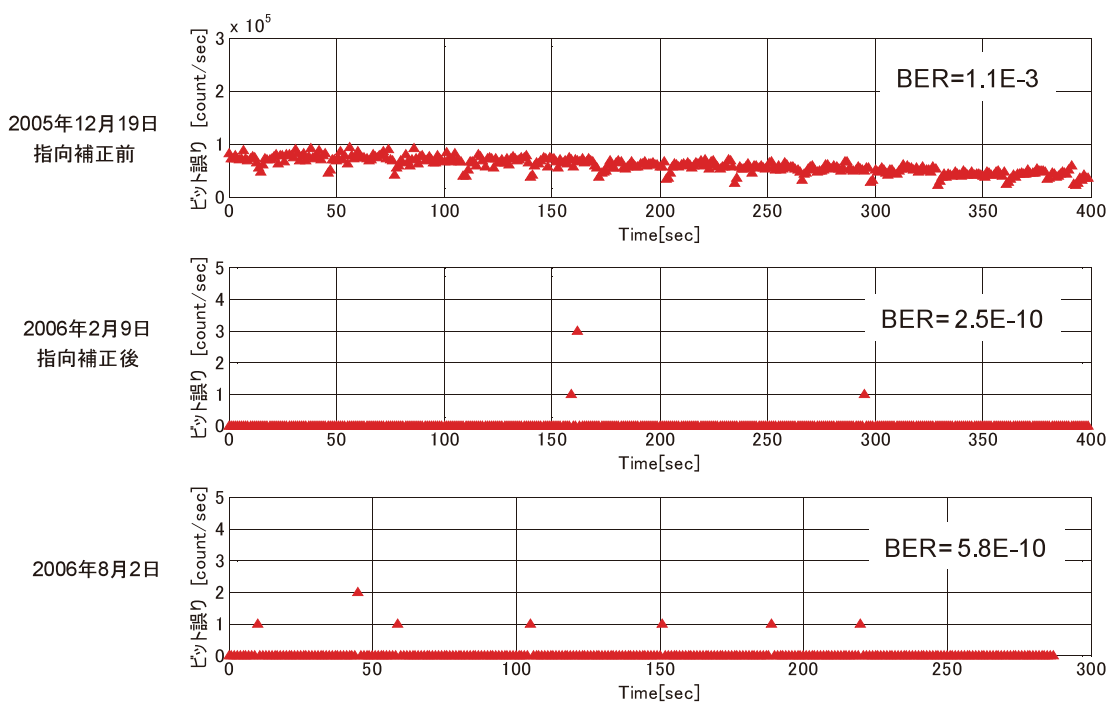


図 10 リターンリンクのビット誤り測定結果

果を得ることができた。図 10 は、補正前（2005 年 12 月）、補正直後（2006 年 2 月）及び 2006 年 8 月に実施した 1 秒毎のビット誤りの測定結果を示したものである。補正後はビット誤りが大きく改善し、バースト的なビット誤りも発生していな

いことが分かる。

2006 年 4 月から 8 月にかけて実施した Routine フェーズにおいて、80 回の BER 測定通信実験を行った。図 11 はリターン及びフォワードリンクの実験毎の BER 測定値を示している。全実

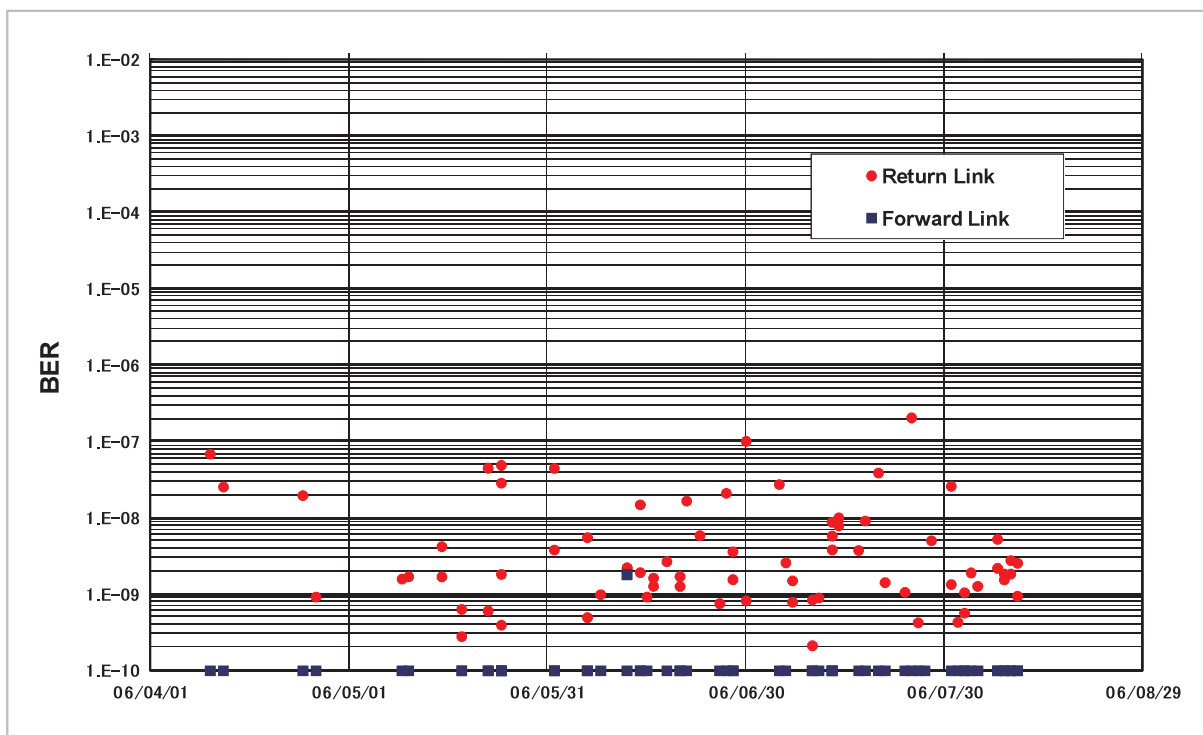


図 11 Routine フェーズにおけるフォワードリンク・リターンリンクのビット誤り測定結果

験において 10^{-6} 以下の BER を達成しており、安定的な通信品質を有していることを示している。なお、誤り訂正符号を用いず 10^{-6} 以下を達成できていることから、実用化段階においては、誤り訂正符号を付加することにより実用に耐え得る高い回線品質を光衛星間通信が有していると言える実験結果が得られた。

4 まとめ

OICETS と ARTEMIS との光衛星間通信について、実験システム概要及び軌道上で実施した実験結果について代表的な実験データを中心に述べた。

宇宙空間における光通信は、未だ黎明期であり、技術課題も多い分野であるが、将来の宇宙活動を支える有望な基盤技術である。OICETS により軌道上で実証した光衛星間通信実験の結果は、光による宇宙通信の可能性を示したと言える。特に回線品質の安定性は実用の通信回線シス

テムとなり得ることを示した。

また、今回の実験は日本と欧州がそれぞれ独自の技術でほぼ同じ仕様の光衛星間通信機器を開発するという、技術開発能力が明確に現れる特殊な面を持っていた。OICETS と ARTEMIS との実験が成功したことは、宇宙分野で欧米の後塵を拝することが多い中で、日本が欧州と肩を並べる高い技術力を持つことを世界に示すものであった。

謝辞

本稿で示した軌道上実験結果は、宇宙航空研究開発機構の衛星開発プロジェクトチーム及び衛星運用メンバをはじめ、日本電気(株)、NEC 東芝スペースシステム(株)、日本電気航空宇宙システム(株)、宇宙技術開発(株)、ソラン(株)、富士通(株)及び欧州宇宙機関 (ESA) の多数の関係各位の協力により得た成果である。ここに深く感謝する次第である。

参考文献

- 1 M. Fujise, K. Araki, H. Arikawa, and Y. Furuhashi, "Current and Future Activities in the Area of Optical Space Communications in Japan," Proceedings of SPIE, Vol. 1522, pp. 14–26, 1991.
- 2 T. Araki, S. Nakamori, Y. Hisada, and T. Fukuda, "Present and future of optical intersatellite communication research at the National Space Development Agency of Japan (NASDA)," Proceedings of SPIE Vol. 2123, pp. 2–12, 1994.
- 3 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, Nov. 1995, pp. 285–292.
- 4 K. Araki, M. Toyoshima, T. Takahashi, T. Fukazawa, M. Toyoda, M. Shikatani, and Y. Arimoto, "Experimental Operations of Laser Communication Equipment onboard ETS-VI Satellite," Proceedings of SPIE, Vol. 2990, pp. 264–275, 1997.
- 5 M. Faup, G. Planche, and T. Nielsen, "Experience Gained in the Frame of Silex Program Development and Future Trends," Proceedings of AIAA 16th International Communications Satellite Systems Conference 1996, pp. 782–783.
- 6 T. Nielsen and G. Oppenhaeuser, "In Orbit Test Result of an Operational Intersatellite Link between ARTEMIS and SPOT4," Proceedings of SPIE Vol. 4635, pp. 1–15, 2002.
- 7 T. Jono, K. Nakagawa, and Y. Yamamoto, "Acquisition, tracking and pointing system of OICETS for free space laser communications," Proceedings of the SPIE 3692, pp. 41–50, 1999.
- 8 杵野正明, 城野隆, 高山佳久, 大日向幸一, 倉伸宏, 藤原勇一, 山脇敏彦, 臼杵茂, 荒井功恵, 池辺憲一, 白玉公一, 小倉直人, 間瀬一郎, 藤原宏悦, "光衛星間通信実験衛星 (OICETS) の軌道上運用結果," 信学技報 Vol. 106, SANE2006-76, No. 107, 2006 年 6 月.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)



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