

高橋伸宏 豊嶋守生 城野隆 倉伸宏 大日向幸一 小林克人 山脇敏彦 中川敬三 山本昭男

Nobuhiro Takahashi, Morio Toyoshima, Takashi Jono, Nobuhiro Kura, Kouichi Ohinata,

Katsuhito Kobayashi, Toshihiko Yamawaki, Keizo Nakagawa, and Akio Yamamoto

宇宙開発事業団 OICETS プロジェクトチーム

OICETS Project Team, National Space Development Agency of Japan

Free-space laser communication system is one of the promising systems for the future space inter-satellite communications network. The laser communication system offers many advantages, which are high data rate, small sized equipment, low consumption electric power and others. National Space Development Agency of Japan (NASDA) has been developing OICETS in order to establish the optical inter satellite communication link in orbit. The experiments will be performed with the European geostationary satellite, ARTEMIS. This paper describes the present status of OICETS and the in-orbit experiment plan. OICETS is in the final performance test phase and will be ready for launch.

## 1. はじめに

宇宙空間における光通信は、現在利用されている電波による通信に比べて、アンテナの小型化、低消費電力化、大容量データ伝送、回線間の干渉が発生しにくく秘匿性が高い等優れた点を持っており、将来の衛星間通信の有望な手段のひとつとして注目されている。しかしながら、宇宙空間で光通信を実現するには、宇宙環境に対して安定な光学機器開発及び狭ビームによる高精度な捕捉・追尾・指向技術等の技術課題がある。

宇宙開発事業団 (NASDA) では、平成 5 年から高精度の捕捉・追尾・指向技術を中心とした要素技術の軌道上実証及び実験を主目的とする光衛星間通信実験衛星 (OICETS: Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite) の開発を進めてきた。平成 12 年 8 月に詳細設計審査を開催し、設計結果が要求性能を満足することを確認するとともに、軌道上モデル (OM) の製作、試験フェーズに移行できることを確認した。平成 12 年 9 月に衛星のインテグレーションを完了し、最終性能確認としてプロトフライト試験 (PFT) を開始した。OICETS の開発はほぼ完了し、打上げまでの準備が整いつつある。

本報告では、OICETS の開発状況として、これまでに終了した PFT について報告と軌道上で実施する予定の試験概要について説明する。

## 2. OICETS の概要

OICETS は、欧州宇宙機関 (ESA) との国際協力により光衛星間通信に必要な捕捉・追尾・指向技術を中心とした要素技術の軌道上実験を行うことを目的として、低高度地球周回軌道に打ち上げられる。この軌道上実験は、OICETS のミッション機器である光衛星間通信機器 (LUCE: Laser Utilizing Communication Equipment) を用いて、ESA の静止衛星 ARTEMIS との間で実施される。

OICETS は、打上げ時質量 570kg で、高度 610km、軌道傾斜角 35 度の円軌道を周回する。衛星バス構体の形状は約 1.1m × 0.8m × 高さ 1.5m の直方体である。衛星の外観図を、Fig.1 に示す。衛星は衛星下面を地球指向させるように三軸姿勢制御され、2 翼の太陽電池パドルを有し、衛星上部に LUCE を搭載する。

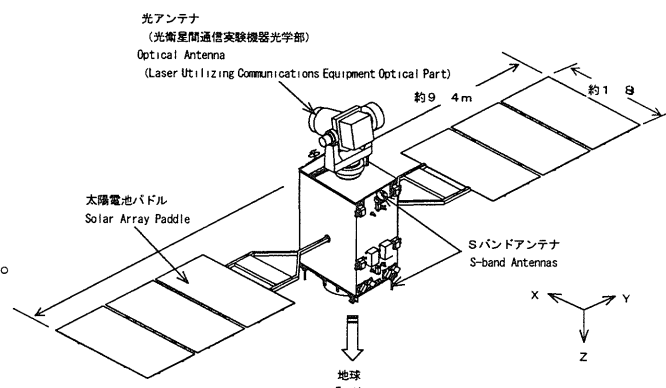


Fig.1 In orbit satellite configuration

### 3. LUCE の概要

LUCE は光学部 (LUCE-O) と電子回路部 (LUCE-E) とで構成される。LUCE-O の外観図を Fig.2 に示す。捕捉・追尾・指向には、2 軸ジンバルを用い追尾部を必要な方向に動かすことにより粗捕捉/粗追尾を行う。精捕捉/精追尾には精捕捉追尾機構を用いる。LUCE の主要諸元を Table 1 に示す。

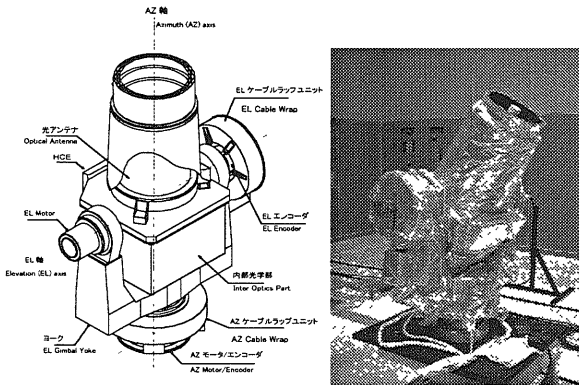


Fig.2 Overview of LUCE-O

Table 1 Characteristics of LUCE

光アンテナ	開口径 26cm φ (有効径) 波面精度 $\lambda/20\text{rms}$ 以下 (視野 1mrad 以下) 反射光学系 (カセグレン方式)
捕捉追尾系	粗捕捉追尾系 検出器 CCD マウント方式 2 軸ジンバル 精捕捉追尾系 検出器 四分割光検出器 (QD) 駆動方式 1 軸駆動ミラー方式 (2 枚) 追尾精度 捕捉時 $\pm 2 \mu\text{rad}$ 以下 追尾時 $\pm 1 \mu\text{rad}$ 以下 指向精度 捕捉時 $\pm 3.6 \mu\text{rad}$ 以下 追尾時 $\pm 2.6 \mu\text{rad}$ 以下 捕捉範囲 $0.4^\circ$ 捕捉時間 0.36sec 以下 捕捉成功確率 0.99 以上
通信送信系	データレート 49.372Mbps 波長 847nm 伝送符号 NRZ
通信受信系	データレート 2.048Mbps 波長 819nm 伝送符号 2PPM

光送信には、レーザダイオード (LD) を用い、LD から光はミラー/ビームスプリッタ/レンズ等によりつくられた光学系を通り、光アンテナより射出される。また、光送信時には、時々刻々と変化する対象衛星からの入射光と出射光との光行差を補正して光を射出する機能を有する。

光受信には、アバランシェフォトダイオード (APD) を用いて光を検出し、通信信号としての復調を行う。この復調した通信信号のビット誤り率を誤り率検出回路によって検出し、回線品質の評価を行う。

LUCE は平成 12 年 8 月に詳細設計審査を開催し、設計結果が要求性能を満足することを確認するとともに、軌道上モデル (OM) の製作、試験フェーズに移行した。初期性能確認試験、音響試験、振動試験、熱平衡・熱真空試験を経て平成 13 年 7 月に最終性能確認を終えた。所定の機能要求を満足することが確認され、OICETS システムへ組み付けが行われた。

熱真空試験中に測定した送信ビームの波面精度を Fig.3 に示す。波面精度は  $\lambda/10$  ( $\lambda = 847\text{nm}$ ) が達成されていることが確認された。同じく熱真空試験中に測定された、光アンテナから射出された送信光の FFP (Far Field Pattern) を Fig.4 に示す。送信光は  $1/e^2$  幅全角で約  $9 \mu\text{rad}$  の広がり角を示し、設計値とほぼ一致する結果が得られた。

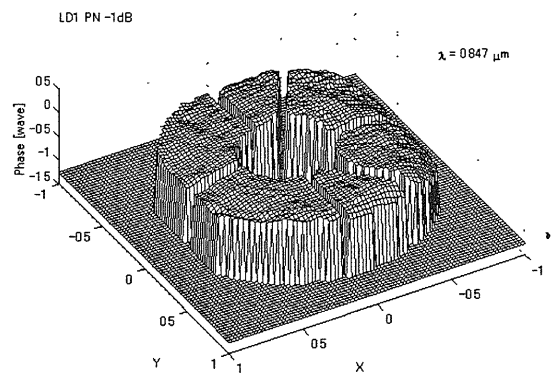


Fig.3 wave front error

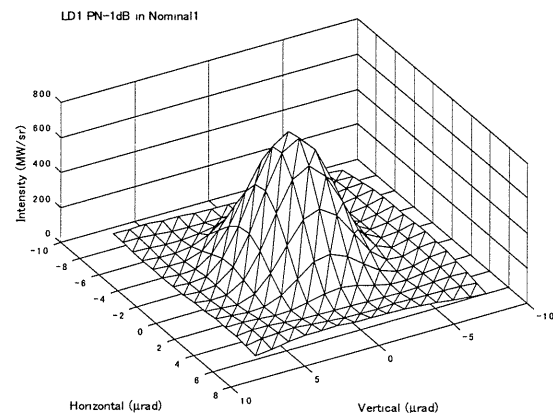


Fig.4 Far Field Pattern of LUCE

#### 4. OICETS システム PFT

システム PFT は、設計・製造内容が地上環境の他、打上げ時及び軌道上で予測される条件よりも厳しい条件（衛星の軌道上性能に影響を及ぼすようなダメージを与えない範囲）にさらすことにより、OICETS が軌道上にて所定の性能を有することを総合的に実証することを目的として行われる。

平成 12 年 9 月より開始した OICETS システム PFT 当初は、ミッション機器 LUCE OM の PFT と並行して実施していた。その間、OICETS システムには LUCE EM（エンジニアリングモデル）を組み合わせ、試験を行った。正弦波振動試験時の LUCE EM と組み合わせられた OICETS を Fig.5 に示す。

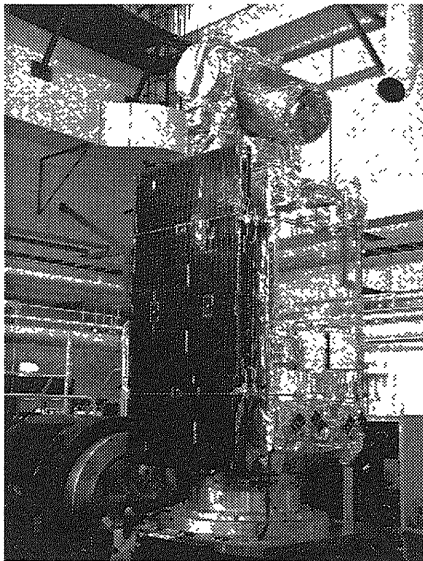


Fig.5 Vibration Test of OICETS

平成 13 年 7 月に LUCE PFT を終了後、LUCE OM を OICETS システムに組み付けを行い、機械的・電氣的インタフェースに問題ないことを確認するとともに、LUCE の電氣的、光学的性能について要求規格内であることを確認した。

LUCE の光学機器は、高い清浄度で保つ必要があるため、コンタミネーション管理を実施してきた。LUCE を使用しないときには、防塵衣と同じ材質で作成したカバーとアウトガスの発生が少ない静電防止フィルム 2 枚の計 3 枚を使用して光学機器の保護に努めた。また、試験環境のコンタミネーション環境のモニタを実施した。

平成 13 年 7 月より熱平衡・熱真空試験を実施し、軌道上と同等の熱入力を負荷することにより、熱数学モデルの妥当性と宇宙環境におかれた場合の衛星の電気性能を確認した。熱真空試験準備作業時の様子を Fig.6 に示す。

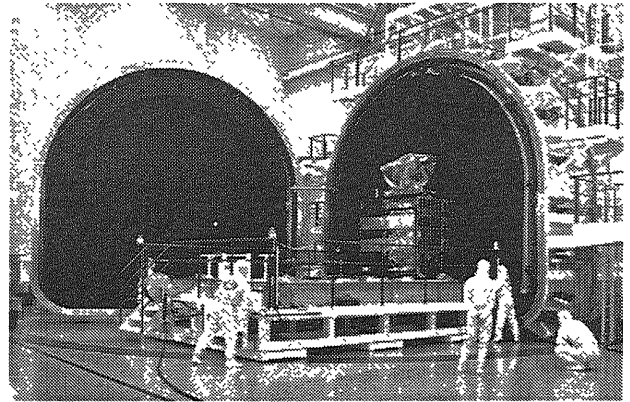


Fig.6 Thermal Vacuum Test of OICETS

平成 13 年 9 月からは、音響試験及び衝撃試験を実施し、打上げ時のロケット音響環境及び、ロケット分離時と太陽電池パドル展開時の衝撃に対して OICETS が十分な強度と剛性を有していることを確認した。音響試験時の試験コンフィギュレーションを Fig.7 に示す。

今後の試験予定としては、衛星打上げ時コンフィギュレーションの静的及び動的質量特性を測定するために質量特性試験を実施する。その後、最終電気性能試験を実施し、PFT 初期と変化がないことにより、所定の機能要求を満足することを確認し、衛星は開発完了する予定である。

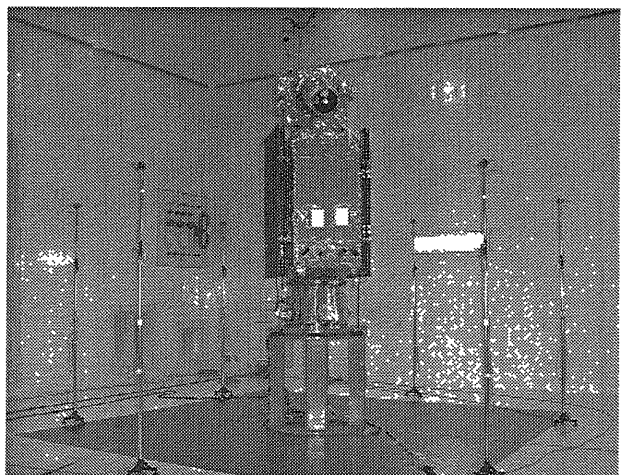


Fig.7 Acoustic Test of OICETS

## 5. 軌道上試験概要

OICETS が地球 1 周回に要する時間は約 95 分である。光衛星間実験が可能な 1 日の運用最大パターンは、実験運用 50 分を 5 周連続で行う。実験時の衛星運用においては、衛星での発生電力、LUCE のジンバル回転速度、太陽や月との干渉、地上とのコマンドとテレメトリのデータ伝送等の各制約条件を考慮して、実験の計画が立案される。主な実験項目を以下に示す。

### (1) 搭載機器の宇宙に於ける性能確認実験

- ・宇宙環境において、長時間の放射線照射及び熱サイクル環境下において、重要なデバイスである CCD、LD、QD、APD 等の特性変化を測定する。

### (2) 捕捉追尾実験

- ・軌道上に於けるアライメント特性、粗捕捉追尾系特性、精捕捉追尾系特性、光行差補正系に関わるデータを取得し、特性の変動を評価する。
- ・恒星あるいは惑星を用いて、オープンポインティング精度並びに粗及び精捕捉追尾系の閉ループ制御特性に関わるデータを取得し、追尾特性を確認する。
- ・ARTEMIS との一連の捕捉追尾シーケンスに関わるデータを取得し評価を行う。

### (3) 衛星間通信実験

- ・OICETS と ARTEMIS の光フォワード回線品質と光リターン回線品質を評価する。取得したデータから誤りビット数を算出し、平均 BER、エラー発生確率を算出する。また、リンク品質と BER の相関関係を解析する。
- ・ARTEMIS から送信し、OICETS を経由して再度 ARTEMIS にて受信する光リピート回線の実験を実施する。

### (4) 光学特性評価

- ・軌道上に於ける OICETS リターンリンクのビームポインティング特性の測定を行い、その特性を確認する。
- ・OICETS 自身の送信光による迷光量の確認と、捕捉追尾系への影響を測定、評価する。
- ・OICETS - ARTEMIS 光リンク間に大気が存在

する条件において、光リンクの追尾特性を取得し、評価する。

- ・太陽光、月光による、各センサ、及び捕捉追尾系への影響を評価する。

### (5) その他

- ・軌道上に於いて、光アンテナや太陽電池パドルなどを駆動した際の、衛星構体の微小振動を測定する。
- ・OICETS - 光地球局間の双方向光通信実験を行う。実験では、地球局上空の天頂付近で、LUCE が光地球局を向くよう、あらかじめ姿勢を慣性ロックにする。光地球局からの可視範囲に入ると同時に LUCE が光地球局を追尾するように 2 軸ジンバルを駆動させ、光通信実験を行う。可視中の受信レベルの変化から、大気ゆらぎによる影響等を評価する。

## 6. まとめ

本報告では、高精度の捕捉・追尾・指向技術を中心とした要素技術の軌道上での実証及び実験を主目的とする光衛星間通信実験衛星 OICETS の開発状況として、これまでに終了した PFT 結果を報告した。また、軌道上で実施する予定の試験概要について説明した。

LUCE は軌道上において、光学機器及び狭ビームによる高精度な捕捉・追尾・指向技術が要求されることから、その開発の過程では多くの困難に遭遇してきた。だが、9 年の年月の間に問題を着実に克服させ、OICETS の開発は完了間近となった。OICETS の開発及び軌道上での実証実験の成果は、将来の地球規模のグローバルな衛星間通信ネットワークの発展に寄与するものと考えられる。

おわりに、本稿の執筆に当たり、NEC 東芝スペースシステム株式会社関係者並びに関係各位に謝意を表する次第である。