

3-4 光フィーダリンク通信サブシステム

3-4 Optical Feeder Link Communication Subsystem

3-4-1 光フィーダリンク通信サブシステムの概要

3-4-1 Overview of the ETS-9 Optical Feeder Link Communication Subsystem

久保岡 俊宏 白玉 公一 小竹 秀明 Kolev Dimitar 宗正 康

KUBO-OKA Toshihiro, SHIRATAMA Koichi, KOTAKE Hideaki, KOLEV Dimitar, and MUNEMASA Yasushi

通信の高速化への要求と電波の周波数資源逼迫^{ひっばく}を背景として、特にフィーダリンク回線において、レーザ光を用いた光衛星通信の活用が求められている。そこで技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) では上り下り共に、世界最高速クラスの 10 Gbps という伝送速度での双方向空間光通信システムの開発を目指しており、これに向けて、衛星搭載通信機器、光地上局の開発を進めている。本稿は、衛星搭載光通信機器の概要について説明する。

With the demand of high-speed communication and the shortage of radio frequency resources, the utilization of optical satellite communication using laser beam is required especially in the satellite feeder link. In the Engineering Test Satellite-9 (ETS-9) Project, we aim at the development of a bidirectional spatial optical communication system at a transmission speed of 10 Gbps for both uplink and downlink, which is the fastest level in the world. For this purpose, the onboard satellite communication equipment and optical ground stations are being developed. We explain the outline of the satellite mounted optical communication equipment.

1 まえがき

衛星通信においてやりとりされるデータ量は年々右肩上がり増大しており、電波の周波数資源が逼迫しつつあることから、特に静止衛星と基地局とを結ぶフィーダリンク回線において、電波に依存しない「光」を用いた大容量の双方向通信の実現の要求が強まっている。このような背景の下に、NICT では、2016 年度より技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) に搭載する光衛星通信機器の開発を開始した [1]。この光通信機器は、2025 年度以降に打上げを目指す ETS-9 を用いて実証実験を行うことにより、世界最高速クラスの 10 Gbps という伝送速度での地上～静止衛星間の双方向の空間光通信技術の獲得を目指している。ETS-9 に搭載する光フィーダリンク通信サブシステムを HICALI (High Speed Communication with Advanced Laser Instrument) 宇宙セグメントと呼んでいる [2]。本稿では、ETS-9 の光衛星通信システムのうち、衛星側に搭載する機器の概要について報告する。

2 開発の背景

レーザ光を用いた光衛星通信には、(1) 電波による通信に比べて高速化が容易、(2) 衛星搭載機器の小型化、軽量化、低消費電力化が可能、(3) 無線局免許や国際周波数調整が不要、(4) レーザ光の地上でのフットプリント (地上でレーザ光が受信できる領域：直径 10 ～ 100 m のオーダー) に入らなければ傍受されない、というメリットがあり、人工衛星-地上間の通信、人工衛星間の通信に広く普及することが予想されている。しかしながら、地上との光衛星通信には、(a) 天候、特に雲の存在に通信の可否が左右される、(b) レーザ光のフットプリントの狭さに伴う傍受が難しい事の裏返しで、電波を用いた通信放送衛星の様に離れた地点にいる多数のユーザーに同時に情報を伝える用途には向かない、(c) 人工衛星-地上間の間にある「大気の影響」の影響を受ける、というデメリットもあり、このうち (a) と (c) については技術開発によって克服すべき課題となっている。NICT では、前々身の郵政省電波研究所であった 1980 年代から、人工衛星と地上との間での光衛星通信の研究開発と、開発した光通信機器を搭載した衛星を用いた光通信実験を進めてきた。

1994年に打ち上げられた技術試験衛星「きく6号」(ETS-VI)は、厳密には赤道上空36,000 kmの静止軌道までは到達出来なかったが、静止トランスファー軌道にて世界で初めて高高度衛星と光地上局との間の4万 kmを超える距離で1 Mbpsの伝送速度での光通信実験に成功した[3]。次に、2005年に打ち上げられた「きらり」(OICETS)では、世界初の地上-低軌道衛星間でのレーザ光を用いた光通信実験(伝送速度50 Mbps)を実施した[4]。2014年に打ち上げられた宇宙光通信技術実証衛星SOCRATES(Space Optical Communications Research Advanced TEchnology Satellite)では、質量50 kg級の超小型衛星に、NICTが開発した総質量約6 kgの光衛星通信ターミナルSOTA(Small Optical TrAnsponder)を搭載し、主にNICT本部(東京都小金井市)の地球局との間で、衛星で撮像した地球表面の画像の伝送やLDGM符号の実証等の通信実験を実施した。さらに、SOCRATESと小金井の地上局との間で、光子レベルで情報をやり取りする量子衛星通信の基礎実証実験に成功した[5]。これらの実績に基づいて、NICTでは、静止衛星軌道に投入される予定の技術試験衛星9号機(ETS-9)に搭載する超高速の光通信機器の研究開発を進めている。ETS-9は、Ka帯の電波を用いた通信とレーザ光で実現する光通信の両方を備えたハイブリッドな次世代通信衛星である。光通信ミッションでは、地上-静止衛星間で、上り下り共に10 Gbpsという世界最高クラスの高速データ伝送を可能とし、光ファイダリンクの基礎技術を確認することを目指している。以下ではHICALIを構成する光通信機器の概要について説明する。

3 HICALI の全体構成

HICALIは、衛星に搭載される通信機器ペイロードである宇宙セグメントと光学望遠鏡を中心とする地上セグメントで構成される。本稿ではHICALIのうち、主要な機能面に絞って説明する。各コンポーネントの概要、開発状況及び地上セグメントの概要については、後続の報告を参照されたい[6]。図1に光ファイダリンク通信ミッションの概要を示す。

3.1 光ファイダリンク通信サブシステム

HICALIを用いた静止軌道-地上間の光通信実験では、軌道上における光通信デバイスの動作確認、世界最高速レベルの伝送速度10 Gbpsの双方向高速光通信機能の確認、レーザ光の大気中の伝搬データの取得、気象条件に応じて光地上局を切り替えるサイトダイバーシティ実験、大気の揺らぎによる信号劣化を補う

ための補償光学を含む光地上局における新技術の検証を計画している。これらの実験を通じて、帯域が逼迫している電波を用いたフィードリンク回線を将来的には、光を用いたフィードリンクに置き換えるための基礎を確認することを目指している。なお、HICALIの軌道上での目標寿命は、ETS-9が静止軌道に到達してから5年間を目標としている。表1に、HICALIの衛星搭載機器に対する機能要求をまとめたものを示す。表2にHICALI宇宙セグメントの仕様を示す。

HICALIでは、上り下り共に波長1.53～1.56 μm付近の近赤外線レーザを用いる。この波長は地球大気による吸収、散乱が最も少ない上に、人間の目に対する影響が少ないというメリットがある。また地上系の光ファイバ網でもC-band(Conventional-band)とも呼ばれ、広く活用されており、最新のデバイスを搭載機器及び光地上局に活用することが可能になるという長所

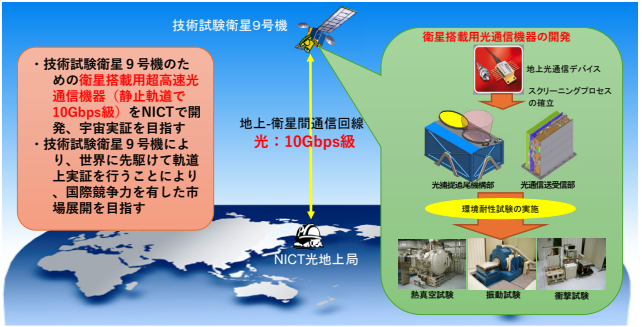


図1 ETS-9光ファイダリンク通信ミッションの概要

表1 HICALI 宇宙セグメントへの機能要求

基本機能	軌道上にて大容量光通信デバイスの基本機能動作を確認できること。
通信機能	夜間において光通信の超高速通信機能(最大10 Gbps)を確認できること。ただし、昼間における光通信は目標とする。
伝搬データ取得機能	共通部通信サブシステムとインタフェースし、レーザ光の伝搬データ(強度変動等)を取得できると共に、大気揺らぎによる通信品質の劣化を低減できる多種多様な通信方式の技術実証できるように、回線品質、符号化等の機能・性能を確認できること。
サイトダイバーシティ機能	気象条件に応じたサイトダイバーシティ機能を検証できること。
捕捉追尾機能	光地上局(小型可搬局を含む)及び航空機等の移動する目標を捕捉・追尾できる制御機能を備えること。
コマンド・テレメトリ機能	光地上通信システムで作成した通信ミッション用コマンドを、バス管制システムを介して受信でき、またテレメトリを送信できること。

表 2 HICALI 宇宙セグメントシステム仕様

項目	値	備考
通信レート	11.0957 Gbps 10.3125 Gbps	ラインレート ユーザレート
波長	1541.349 nm 1558.173 nm 1532.5 nm	送信通信光 受信通信光 受信ビーコン光
変調方式	NRZ-DPSK RZ-DPSK	ダウンリンク（衛星から地上方向） アップリンク（地上から衛星方向）
送信光電力	2.5 W	HPA 出力端、平均値
受信光電力	40 nW 以下	LNA 入力端、平均値
光アンテナ開口径	150 mm	
指向可能範囲	± 10 度	
システム総質量	約 80 kg 約 76 kg	設計値ノミナル 実測値
システム総消費電力	約 340 W 約 280 W	設計値ノミナル 実測値

もある。もちろん、宇宙空間は放射線等の影響のために地上よりもはるかに過酷な環境下であり、地上で使われているデバイスをそのまま衛星に搭載して使うことはできない。そこで HICALI では、地上の光通信ネットワーク用に開発された高速のデバイスを宇宙空間で使うため、NICT の高度通信・放送研究開発委託研究を通じ、環境耐性や信頼性を確保するためのスクリーニングプロセスを策定し [7]、それに対応したデバイスを利用して衛星搭載光通信機器を製作した。以下では、衛星構体内部機器と衛星構体外部にある光学部に分けて、その詳細を説明する。

3.2 光フィーダリンク通信サブシステムのコンポーネント構成

ETS-9 に搭載される HICALI コンポーネント概略構成を図 2 に示す。光学部(OHA: Optical Head Assembly)は、光地上局との間でレーザ光を送受信する光学系であり、通信ビームの指向、放射／集光を行い、光ファイバと結合する機能を有しており、衛星構体外の地球指向面パネルの北側に搭載され、構体内部に搭載されている OAMP と光ファイバで直接接続されている。光増幅部(OAMP: Optical AMplifier)は、受信光を増幅する低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amplifier)と送信光を増幅する高出力増幅器(HPA: High Power Amplifier)が含まれている。さらに、光送受信部(OTRX: Optical Transceiver / Receiver)は、OAMP と光ファイバで接続され、10 Gbps 光信号を変復調する高速デジタル処理機能が含まれている。データ処理部(HDU: HICALI Data Unit)は、衛星バスからのコマンド・テレメトリ信号を処理するとともに、HICALI

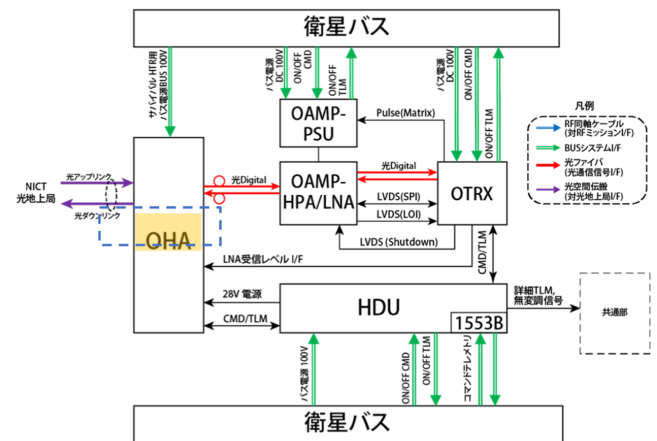


図 2 HICALI の機器の構成図

各コンポーネント (OHA, OAMP, OTRX) の制御、モニタリング処理を行う。各コンポーネントの概要については、本稿以後を参照されたい。

4 まとめ

本稿では、ETS-9 に搭載する光通信ミッション HICALI の概要について報告した。本稿執筆段階 (2025 年 9 月) 現在、HICALI は、衛星バスへの取り付け、構体内部機器と光学部を結ぶ光ファイバのサプライズ作業を完了し、AIT (Assembly, Integration and Test) からプロトフライト試験 (PFT: Proto Flight Test) へと進んでいる段階である。今後は、ETS-9 の打ち上げ～静止軌道投入後は、軌道上での搭載機器の健全性確認から地上局の光通信リンクの確立へと進み、光フィーダリンク技術の実証を目指す計画である [6]。

3 ETS-9 の衛星搭載通信システム

最後に、今回の ETS-9 では実証できないが、次の衛星計画において開発・実証を進めるべき事項について挙げておく。第1に光ファイダリンク回線と、電波によって集約したユーザー信号を送受信するシステムを接続するためには、光と電波の信号を相互に変換するシステムを衛星に搭載して実証することが不可欠である。第2に、静止衛星の軌道上での寿命は、衛星の軌道位置の保持を電気推進で行うシステムの普及等により15年程度に延びてきている。前述のとおり HICALI 搭載機器の軌道上での目標寿命は前述のとおり約5年であり、静止衛星自体の寿命に合わせるためには宇宙放射線対策等の面でのブレイクスルーが必要である。

【参考文献】

- 1 三浦 周, 久保岡 俊宏, 坂井 英一, “技術試験衛星9号機による次世代ハイスループット衛星の通信技術確立に向けた取組,” 電子情報通信学会誌, vol.102, no.12, pp.1089–1084, Dec. 2019.
- 2 久保岡 俊宏, 宗正 康, “技術試験衛星9号機における光ファイダリンクシステムの開発と今後の展望,” OPTRONICS, vol.38, no.446, pp.78–82, 2019.
- 3 荒木 賢一, 有本 好徳, “光通信実験の概要,” 通信総合研究所季報, vol.43, no.3, pp.490–520, 1997.
- 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 2007.
- 5 H. Takenaka, A. Carrasco-Casado, M. Fujiwara, M. Kitamura, M. Sasaki, and M. Toyoshima, “Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class micro-satellite”, Nature Photonics 11, pp.502–508, 2017. doi:10.1038/nphoton.2017.107
- 6 宗正 康, 小竹 秀明, 白玉 公一, コレフ・ディミタル, 久保岡 俊宏, “光ファイダリンクパイロードの開発,” 情報通信研究機構研究報告, vol.71, no.2, 本特集号, 3-4-2, 2025.
- 7 日本電気株式会社 編, “衛星搭載光通信デバイスの国産化及び信頼性確保に関する研究開発, 研究計画書及び成果概要書,” 2022. https://www.nict.go.jp/collabo/commission/k_186.html



久保岡 俊宏 (くぼおか としひろ)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
研究マネージャー
博士(理学)
光衛星通信システム、人工衛星軌道力学



白玉 公一 (しらたま こういち)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
主任研究技術員
光衛星通信システム、宇宙通信システム



小竹 秀明 (こたけ ひであき)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
主任研究技術員
博士(工学)
宇宙光通信システム、非地上系ネットワーク、
光送受信器、光増幅器、大気揺らぎ
【受賞歴】
2023年 電子情報通信学会 衛星通信研究賞



Kolev Dimitar (これふ でいみたる)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
主任研究員
博士(国際情報通信学)
宇宙通信システム、光アンテナ、光宇宙通信、
大気揺らぎ



宗正 康 (むねまさ やすし)

ネットワーク研究所
ワイヤレスネットワーク研究センター
宇宙通信システム研究室
主任研究員
博士(工学)
宇宙通信システム、光アンテナ、光宇宙通信、
MEMS
【受賞歴】
2015年 電子情報通信学会 衛星通信研究会
JC-SAT 賞
2013年 電気学会論文誌E「センサ・マイクロ
マシン英文特集号」優秀論文賞