

## 4-4 光地上局の概要と開発

### 4-4 Overview and Development of the Optical Ground Station

久保岡 俊宏 KOLEV Dimitar

KUBO-OKA Toshihiro and KOLEV Dimitar

通信の高速化への要求と電波の周波数資源逼迫<sup>ひっばく</sup>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、実験に向けて光通信の相手側となる光地上局の開発を進めている。本稿は、メインの光地上局として利用予定の NICT 本部 (東京都小金井市) の口径 1 m の反射望遠鏡を中心とする光地上局について概説する。

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, optical ground stations are being developed. In this paper, we explain the outline of the optical ground station with 1 m diameter reflecting telescope.

#### 1 まえがき

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]。ETS-9 を用いた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 に搭載する光通信システムと、光地上局システムを合わせて HICALI (High Speed Communication with Advanced Laser Instrument) と呼んでいる [2]。本稿では、地上の複数地点に設置する光地上局ネットワークの開発、特にその中で主力の光地上局として活用する予定の NICT 本部 1 m 反射望遠鏡を中心とする光地上局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、高速化、衛星搭載機器の小型軽量化、無線局免許や国際周波数調整なしで利用できるという利点から、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、人工衛星-地上間の通信には天候、特に雲の存在に通信の可否が左右され、さらには大気の揺らぎの影響も受けるというデメリットがある。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を進めてきた。ETS-IV (1996) [3]、OICETS (2005) [4]、SOCRATES (2014) [5] 等の衛星で光衛星通信実験を実施してきた。

ETS-VI、OICETS の光衛星通信実験では、NICT 本部に 1988 年に設置された海外製の口径 1.5 m の反射望遠鏡を用いてきた。その後の日本国内での技術進歩により、上空を移動する低軌道衛星を 10 秒角以内の精度で精密かつスムーズに追尾することが国産品でも可能となってきた。このため、SOCRATES 実験のために、口径 1 m の反射望遠鏡を中心とする光地上局を新たに NICT 本部に設置した。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) を活用し、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的高速データ伝送を可能とし、光フィーダリンクの基礎技術を確立することを目指している。10 Gbps の超高速空間光通信の達成には、衛星搭載機器だけではなく、光学望遠鏡を中心とする地上局システムの準備も必須である。本稿では、メインの地球局として使用予定の NICT 本部の口径 1 m の光地上局の概要について説明する。ETS-9 での空間光通信実験での光フィーダリンク技術の獲得に不可欠である大気揺らぎの補償技術 [6]、天候に左右されず通信を継続するために必要なサイトダイバーシティ技術 [7] については、本特集号の別の論文を参照されたい。

### 3 光通信実験用 NICT 本部 1 m 望遠鏡

ETS-9 と地上との双方向光通信の実験には、NICT 本部にある口径 1 m の反射望遠鏡を中心とした光地上局を主に使用する予定である (図 1)。この望遠鏡は、主鏡が口径 1 m の放物面鏡 (凹面鏡) と筒先に配置した双曲面の凸面鏡 (第 2 鏡) を組み合わせた合成焦点距離 12 m のクラシカル・カセグレン式の望遠鏡である。主鏡で集められた光は、第 2 鏡で折り返され、さらに主鏡の直前に斜め 45 度に置かれた第 3 鏡によって、架台の左右に置かれたナスミス台に導かれる。なお、第 3 鏡の向きを 180 度反転させることによって、左右どちらかのナスミス焦点を使うかを切り替えることができる。この第 3 鏡は、光路上から退避させられる構造になっており、主鏡に開けられた丸穴を鏡筒後部にあるカセグレン焦点も利用できる。光学系を構成する硝材は、温度変化による膨張が極めて少ない特殊なものを用いている。カセグレン焦点は、ナスミス焦点よりも構成する鏡が 1 枚少なくなるため、微かな光を検出するという目的には向いているものの、焦点に取り付けた装置が望遠鏡の鏡筒と共に動くため、あまり重たい装置は取り付けられないという弱点もある。これに対してナスミス焦点は、望遠鏡の仰角が変化しても水平を維持した台上に装置を載せることができるため、重量のある装置も設置できるというメリットがある。このため ETS-9 の光通信実験では、ナスミス焦点に光通信機を設置して実施する予定である。

架台は、口径 1 m 以上のクラスの光学望遠鏡では一般的なフォーク式の経緯台である。上空を移動する低軌道衛星をスムーズに追尾するため、水平方向及び高度方向の駆動には、小型望遠鏡で多く用いられている歯車の組み合わせではなく、金属のリングに金属のローラーを押し付け、両者の摩擦を利用して望遠鏡を回転させるフリクション・ドライブと呼ばれる方式を用いている。なお、光学望遠鏡一式はドーム内に収納されており、ドーム自体も低軌道衛星の追尾ができるよう素早く動くようになっているが、ドームの動作に伴う振動が光学望遠鏡に伝わらないように、望遠鏡本体は地中の岩盤上に固定された柱の上に固定され、ドームのある建屋とは分離した構造になっている。

### 4 送受信光学系

前節で説明した理由により望遠鏡のナスミス台に設置する送受信光学系を準備している。静止衛星である ETS-9 と地上間は片道約 37,000 km という長距離のリンクであり、大気揺らぎの影響を軽減するために補償

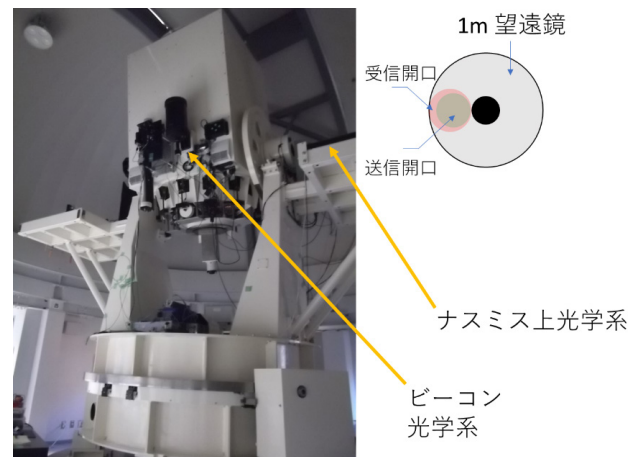


図 1 NICT 本部の口径 1 m 反射望遠鏡を中心とした光地上局

光学システムを使用する予定である。補償光学システムに関する具体的な説明は、**4-5** を参照されたい。今回の実験では、大気揺らぎの影響と補償光学システムの性能を考慮して、受信開口径は 1 m の中の 40 cm の円形部分だけを用いるものとしている。送信ビームについては同じ開口から放射するが、回線計算での広がり角度を調節するためビーム径を 30 cm とする予定である。また送信ビームは精追尾用ビーコンの機能も兼ねている。地上からの粗追尾用のビーコン光は、地上-人工衛星との空間光通信を行う場合に、指向及び捕捉によく使用される。ただ、ビーコン光の送信出力が高く、受信側との光学的分離の問題が発生する可能性があるため、ビーコン用の光送信機は通常、望遠鏡と平行に設置され、望遠鏡のナスミス台上の受信用光学ベンチには設置されない (図 2) [8][9]。HICALI 実験では、大気揺らぎの影響を軽減するため、捕捉追尾用ビーコンを 4 本使用する予定である。静止衛星の軌道予報の精度に依存する位置誤差を考慮して、粗捕捉追尾用ビーコンについては、ハイパワーかつ広いビームが必要であるが、精追尾と 10 Gbps アップリンクには、更に細いビームが必要であり、送受信の軸合わせが非常に大きな問題となる。望遠鏡と平行に設置するより、ナスミス光学系で同じ送受信光学系を使用し、図 2 にある FPM のステアリングミラーで精追尾を行った方が追尾精度が良い。

ナスミス光学系の中での最大の課題は、高出力のアップリンク信号 (30 dBm 以上) と受信機/捕捉センサ側 (-40 ~ -60 dBm) との間の光分離である。合わせて 100 dB 程度が要求されるが、光学フィルタでは必要な光分離を実現することは困難であるため、偏光分離を使用することになる。そのため、偏光ビームスプリッタ (図 2 の PBS : Polarization Beam Splitter) は、送信信号と受信信号の間の最初の分離手段として使用できる。偏光素子を追加することで、光分離の特性を

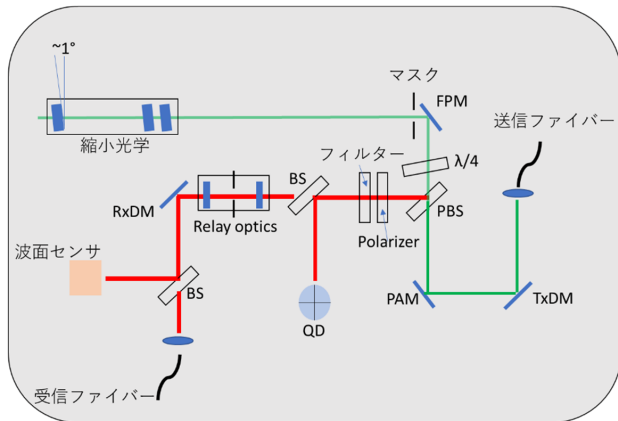


図2 ナスミス台上の光学系概要

更に高めることができる。その次の手段は波長フィルタと空間フィルタを使用する。波長フィルタリングには光学フィルタを使用する。ノッチフィルタは送信波長を遮断し、光分離を更に強化する。一方、バンドパスフィルタは望遠鏡から入ってくる背景ノイズも低減する。光リンクを24時間365日連続で運用するには、日中は太陽による背景ノイズを低減するソーラーフィルタも併用する必要がある。

送信側には2つの課題がある。第1の課題は、光といえども有限の速度であることにともなう「見込み角 (Point Ahead Angle)」の補正である。この対策のため送信光学系の中にPAM (Point Ahead Mirror) を設置している。第2の課題は、送信レーザが高出力であるため、地上局内部の光学部品の選択に加わる制限である。例えば、前述の見込み角補正の場合、PAMを操作するためにQDセンサの追加が必要になるが、今回の光通信実験では、送信光の出力がワットオーダーになるため、QD (Quadrant Detector) センサに必要な光を逸らす可能性のある光スプリッタを慎重に選択する必要がある。そこで今回開発したナスミス光学系では、ステアリングミラー内部のQDセンサを使用することとした。このソリューションは、光学システムの光倍率(～25)により十分な精度が得られる。偏光素子、すべてのフィルタ(太陽光、バンドパス、ノッチ)は、高出力レーザ送信の要件を軽減するために、PBSの後ろの受信光路に取り付けられている。図3に、キューブ型とプレート型の2種類のPBSとその後方反射を示す。図に示すように、キューブ型PBSでは、通過する高出力レーザの後方反射が発生する。典型的な偏光分離度は10,000:1で、これは送信信号と受信信号間の光学的分離が約60 dBであることを意味する。追加のフィルタを使用することでレベルを下げることは可能であるが、高出力レーザによる部品の温度上昇を考慮して、プレート型PBSを使用することとした。

受信側のノイズについても対策が必要である。背景

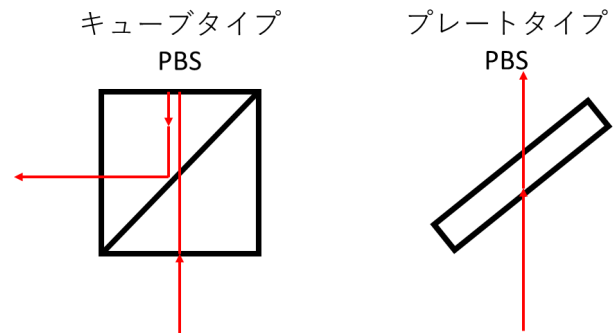


図3 送受信用偏光ビームスプリッタ (PBS) のタイプ

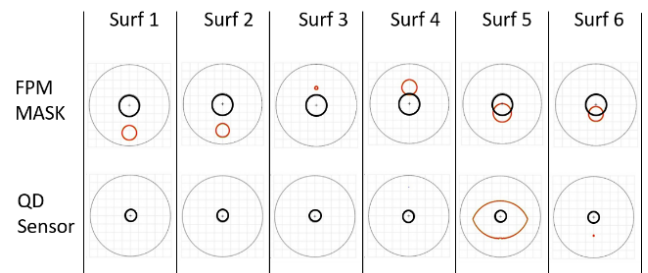


図4 反射光の解析の例

光はフィルタで十分除去できるが、むしろ背景光より送信光の反射のレベルが高くなるため、その対策が必要である。図2のシステムの中で、送受信で共用する光学系はFPM以外は縮小光学系と $\lambda/4$ コンポーネントである。そのため反射面を1°程度傾けて反射光と受信光との軸をずらし、空間フィルタを使用する対策をとっている。反射光の解析を行った例を図4に示す。図4は縮小光学系を3枚のレンズで構成した場合の、3枚レンズの計6面の反射と高感度(−60 dBm 以下)のQDセンサに与える影響を解析した例を示している。

## 5 まとめ

本稿では、ETS-9での光通信実験で主に活用するNICT本部の1 m 望遠鏡を中心とした光地上局の概要について報告した。冒頭にも述べたように、地上-衛星間の空間光通信の成否には光地上局のある地点の天候が大きな問題となる。静止衛星であるETS-9の場合、空が全体的に晴れていたとしても、静止衛星の方向に雲があるだけで光通信が成立しないことになる。NICTではこの問題に対処するために、NICT本部だけでなく、鹿島、沖縄、神戸の各拠点に光地上局を設置しているが、これらの光地上局にETS-9実験用の精追尾系、補償光学系、さらには捕捉追尾のためのビーコン光装置をどのように整備するかについては現在検討を進めている段階である。



### 【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.2, no.2, pp.1089-1084, Dec. 2019.
- 2 久保岡 俊宏, 宗正 康, “技術試験衛星 9 号機における光フィードバック  
システムの開発と今後の展望,” OPTRONICS no.2 pp.1-5, 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 齊藤 嘉彦, 六川 慶美, 坂部 健太, 高見 英樹, “ETS-9 における光通信実証  
に向けた補償光学システム,” 情報通信研究機構研究報告, vol.71, no.2,  
本特集号, 4-5, 2025.
- 7 鈴木 健治, コレフ・ディミタル, 川崎 和義, 谷内 宣仁, 高橋 卓, 三浦 周,  
“光・RF 計測データ収集システム,” 情報通信研究機構研究報告, vol.71,  
no.2, 本特集号, 4-7, 2025.
- 8 Dimitar Kolev, Koichi Shiratama, Alberto Carrasco-Casado, Yoshihiko Saito,  
Yasushi Munemasa, Junichi Nakazono, Phuc V. Trinh, Hideaki Kotake,  
Hiroo Kunimori, Toshihiro Kubo-oka, Tetsuharu Fuse, and Morio Toyoshima,  
“Preparation of high-speed optical feeder link experiments with HICALI  
payload,” Proceedings vol.11993, Free-Space Laser Communications  
XXXIV; 119930R <https://doi.org/10.1117/12.2610635>, SPIE LASE, 2022.
- 9 Dimitar R. Kolev and Morio Toyoshima, “Latest Developments in the Field of  
Optical Communications for Small Satellites and Beyond,” Proceedings of  
“European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)  
2022”, 2022.



**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



**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