

4-5 ETS-9における光通信実証に向けた補償光学システム

4-5 Adaptive Optics for the Demonstration of Laser Communication with ETS-9

齊藤 嘉彦 六川 慶美 坂部 健太 高見 英樹

SAITO Yoshihiko, ROKUGAWA Yoshimi, SAKABE Kenta, and TAKAMI Hideki

NICT 宇宙通信システム研究室では ETS-9 の光通信実証に向けて、衛星からの通信光が大気を通過する際に通信品質の劣化を引き起こす大気ゆらぎの影響を低減するための補償光学技術の研究開発を行っている。本稿ではその補償光学技術の概要と、当研究室が取り組む補償光学システムの紹介、さらに通信に用いる補償光学技術の研究要素とその研究開発についての現状を解説する。

In Space Communication Systems Laboratory, NICT, we are conducting research and development on adaptive optics technology to mitigate the effects of atmospheric turbulence, which degrades communication quality during atmospheric transmission, for the optical communication demonstration of Engineering Test Satellite 9 (ETS-9). This paper outlines the adaptive optics technology, introduces the adaptive optics system we are developing, and explains the current status of research elements and our efforts regarding the adaptive optics technology used for communications.

1 まえがき

近年、地上と宇宙間の高速・大容量通信を実現する手段として、宇宙と地上を結ぶ空間光通信が世界的に注目を浴びている。その一方で、遮蔽物に弱いという光の欠点を克服することが重要な課題となっている。特に、大気ゆらぎによる光の波面に生じる歪みは、光衛星通信における最も深刻な問題の一つである。通信に用いるレーザー光が最終的にシングルモードファイバーに結合する際、光の進行面（波面）が揺らいでいると光ファイバーへの結合効率が落ち、通信が不安定になる。そのため、大気ゆらぎによる影響を低減することが、衛星地上間での高速・大容量光通信を実現するための鍵となる。

NICT では、衛星地上間で 10 Gbps 以上の光衛星通信を実現するための取り組みを行っている。その1つが大気ゆらぎを補正する補償光学である。当研究室では、NICT 本部（東京都小金井市 以下、小金井）1 m 光地上局を想定して 2017 年に補償光学システムの設計を開始し、2022 年に実装を完了させた。人工光源を用いた大気のゆらぎを補正する補償光学システムによる補正効果の検証を行い、光衛星通信において十分な効果が得られることを確認した。これらの結果を踏まえ、2023 年より小金井 1 m 望遠鏡大気のゆらぎを補正する補償光学システムにおける実際の大気を通過した

光波面に対する性能を、宇宙から到来する光源である恒星の光を用いて評価した。

一方、送信補償光学系については、受信と異なり地上から送信する場合においては地上で補正を行い、かつ光行差角を考慮する必要があるため、直接補償光学を応用することは難しい。2024 年度より受信時の大気ゆらぎのデータに基づいて、送信補償光学系のための大気ゆらぎの推定方法の検討を開始し、その研究を推進している。

2 補償光学技術の概要

大気は密度むらを持っており、宇宙から到来する光は波面の各点で位相差を生じることで方向ずれを生じる。その結果、その光を集光した場合に焦点位置での光が空間的に散らばってしまう。そのため焦点位置に結んだ像を時間的に積分した場合、ピンボケを起こした状態になり、本来光学望遠鏡が持つ性能を発揮することができなくなる。通信の世界では、この影響は光ファイバーへの結合の安定性が不安定になるという形で現れる（図 1）。この影響を補正しない限り、たとえ大口径の光地上局で宇宙から地上に届くレーザー光を受信して光量を確保しても、安定した通信環境は構築できないということになる。

大気ゆらぎは 1 kHz 程度の変動を含んでおり、大気

ゆらぎの影響を静的な光学系で補正することは困難である。その影響をどのように動的に補正するかということが課題となる。これを解決する技術の一つが、集光した光の波面を動的に補正する「補償光学技術」である[1]。補償光学システムは天文学において、大口径光学望遠鏡の性能を引き出すために開発・実装されて成功を収めた装置であり[2]、現在も大口径光学望遠鏡には必須の装置として実装されている。

図2は補償光学システムの概念を示している。本システムでは大気ゆらぎの影響を計測する波面センサとその計測に基づいて波面を整える可変形鏡が重要な役割を果たす。まず、乱れた光の波面を評価するための波面センサによって波面の各点でのずれを計測する。その計測結果から可変形鏡と呼ばれる表面形状を変えられる鏡を変形させて乱れた波面の位相を合わせることで波面を整える。波面が変動する速度に合わせてこの制御を行うことでリアルタイムに理想的な波面に近づけることが可能となる。

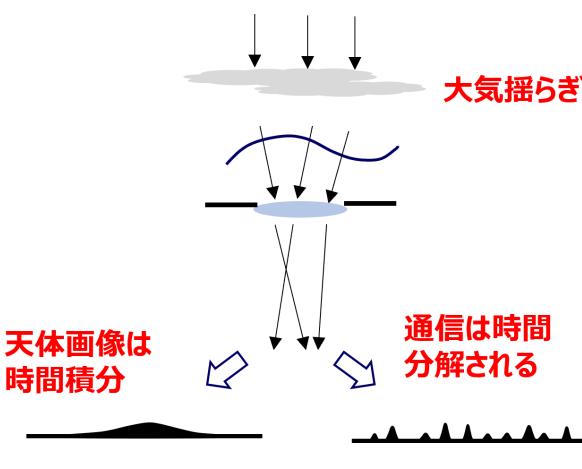


図1 通信光学系における大気ゆらぎの影響

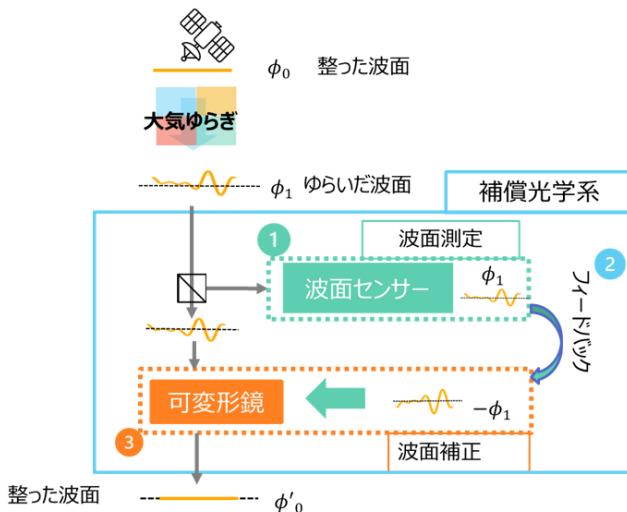


図2 補償光学システムの概念

3 小金井1m望遠鏡の補償光学システム

上記の概念に基づき、宇宙通信システム研究室では、技術試験衛星9号機(ETS-9)の光通信実証実験に向け、小金井にある口径1mの光学望遠鏡を活用して、衛星との光通信における補償光学システムの開発を進めている。衛星との光通信では、通信相手が天体(恒星など)ではなく、天球上を高速で移動する衛星であるため、まずは望遠鏡が衛星を正確に追尾できる必要がある。そこで、2019年度には精追尾光学系を開発し、衛星の動きに合わせて高精度で光を捉える技術を整えた。

次に、追尾された光に対して大気のゆらぎを補正する補償光学システムの開発を2020年度から開始し、2021年度には望遠鏡の精追尾光学系内に搭載を行った(図3)。この光学系には、参照光源の波面にゆらぎを与えることができるキャリブレーションユニットも搭載されており、宇宙からの光がない場合でも、地上での実験・検証が可能となっている。2023年度には、このキャリブレーションユニットの人工光源を用いて補償光学システムの補正精度を検証し、十分な効果が得られることを確認した[3]。

さらに次のステップとして、アーフトゥルスやペテルギウスなどの恒星からの光を使って、実際の波面の歪みを測定し、補償光学システムの性能を評価した。また、補正の有無によって光をファイバーに結合させた際の結合効率の比較も行った(図4)。図の横軸は時間、縦軸は通信用のシングルモードファイバーに結合した光の強度を示しており、青の矢印で示す「W/AO」の時間帯で補償光学系の機能をONにしている。この結果より、W/AOの時間帯でファイバーに結合する光の強度が約3倍に改善していることがわかる。この光



図3 小金井1m望遠鏡と補償光学系が搭載されている光学系(望遠鏡の右)

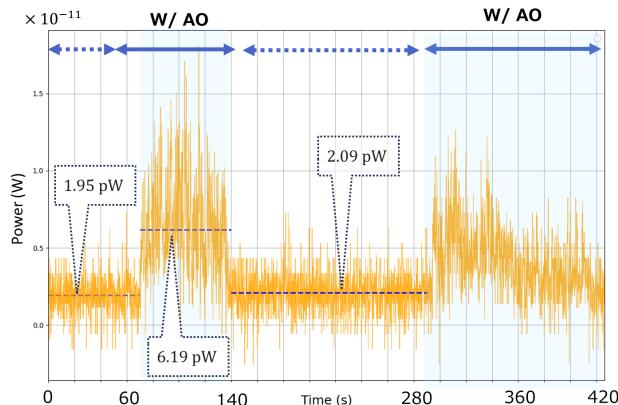


図4 ファイバーに結合した光の強度と補償光学系の動作の有無の関係

学系は、1,500 nm 帯の赤外レーザー光を使った通信を想定して設計されているため、この赤外域の狭い波長域に透過率が最適化されている。そのため、恒星の光では非常に微弱な光でしか測定できず、測定器の検出限界程度の光量であったが、改善の効果が示された[4][5]。

4 送信補償光学の技術検討

4.1 送信補償光学の概要

衛星地上間の通信では受信用の補償光学系に加えて、受信光の情報に基づいて衛星への送信光の波面を事前に補正する送信補償光学系が必要になる。送信補償光学系では受信側となる衛星ではなく送信側の地上で大気ゆらぎを推定し、送信光が大気を通過した後に整った波面になって衛星に届くよう補正を行う必要がある。地上から出射した送信光のビーム径は拡大しながら自由空間を伝播し、衛星に到達する高度では衛星の受信口径に対して十分に大きくなる。そのため衛星で受信する際には、大気ゆらぎの影響を受けた通信光の波面のゆらぎスケールも十分に広がり、ほぼ平面波に近い状態になる。しかし、大気ゆらぎの変化に伴い時々刻々と波面のゆらぎパターンは変化するため、衛星の高度では明るさの明滅の変化や、方向ずれの影響によりビーム自体が衛星に当たらなくなるという形で大気ゆらぎの影響が現れる。このため、事前補正無しには通信を安定させることができないという課題がある。

加えて、衛星に送信する場合には衛星自体の動きを考慮し、図5に示すように受信光と異なる方向に送信光を打ち出す必要がある。これを光行差と呼ぶ。そのため、送信補償光学系の場合には、送信光は受信光と異なる経路で大気を通過することになり、受信で得た大気ゆらぎの情報をそのまま推定に用いることができないという課題がある。

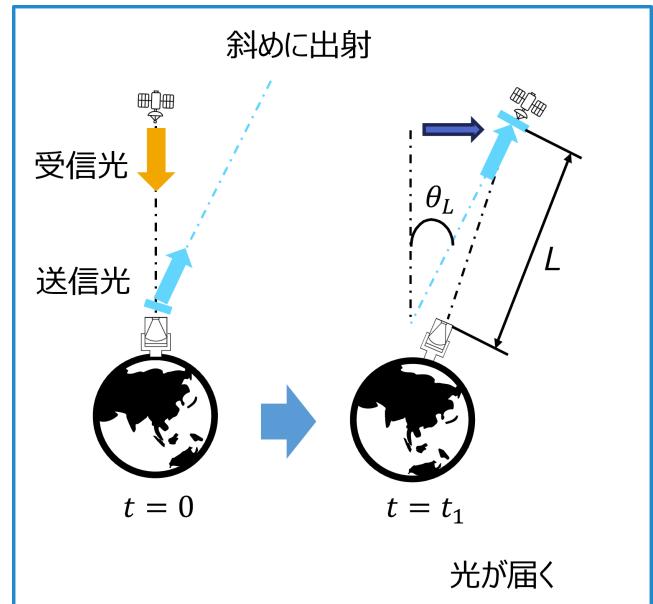


図5 光行差の概念図

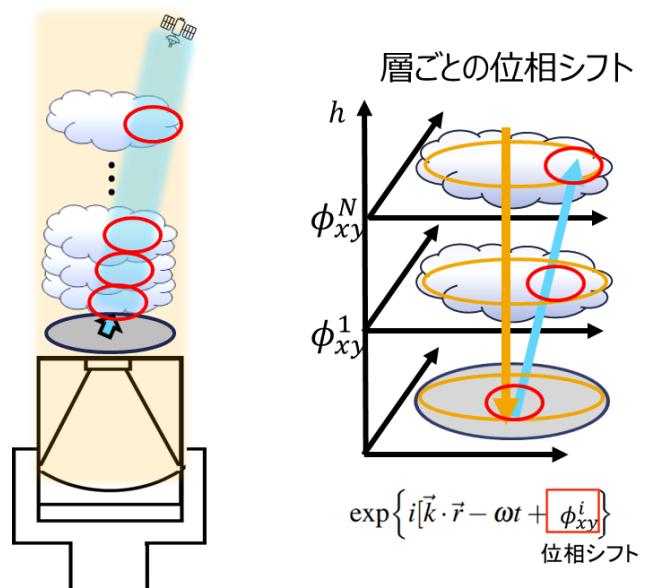


図6 送信補償光学系の概念図

4.2 小金井 1 m 望遠鏡の送信補償光学システムの検討

これらの送信系補償光学の課題を克服するため、NICTでは、図6に示すように受信口径に対して細く斜めに送信光を出射させる方式を提案した。小金井1 m光地上局では、口径1 mの受信光に対して送信光を口径約0.26 mで出射する設計となっている。これにより大気ゆらぎの影響を受ける高度20 km以下の領域では、送信光のビームの円柱を受信光の円柱内に収めることができる。これにより、受信時に得た大気ゆらぎの情報を用いた推定が可能になる。この情報を用いた推定の方法については現在検討を進めており、

4 ETS-9 地上系設備の研究開発

ETS-9 の実験に向けて方法の確立と光学系の実装を行う予定である。

5 まとめ

宇宙通信システム研究室では、ETS-9 と光地上局の光通信の実証に向けて、大気のゆらぎによる通信品質の劣化を補正する「補償光学技術」の研究を進めている。小金井 1 m 望遠鏡に補償光学システムを搭載し、人工光源や恒星光を用いた検証を通じて波面補正の効果を確認してきた。また、通信用の補償光学システムは送信光波面の事前補正を行う必要があることから、その研究も現在進めている。今後はその手法の構築と検証を行い、光学系に実装することで実証を行っていく計画である。

【参考文献】

- 1 J.W. Hardy, J.E. Lefebvre, and C.L. Koliopoulos, "Real-time atmospheric compensation," *Journal of the Optical Society of America*, 67-3, 360/369, 1977.
- 2 R. Davies and M. Kasper, "Adaptive Optics for Astronomy," *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 305/351, 2012.
- 3 六川 慶美, 斎藤 嘉彦, コレフ ディミタル, 中園 純一, 阿部 侑真, 宇佐美 敬之, 白玉 公一, 小野 文枝, 辻 宏之, 豊嶋 守生, "ETS-9 実験に向けた光基地局補償光学系準備状況," 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 4M10, 2023.
- 4 六川 慶美, 斎藤 嘉彦 (NICT), 高見 英樹, 小野 文枝, 辻 宏之, 豊嶋 守生, "NICT 小金井 1 m 光地上局補償光学系による天体光源を用いたファイバー結合評価試験," 第 68 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 10C9, 2024.
- 5 Y. Rokugawa Yoshihiko Saito, Dimitar Kolev, Hideki Takami, Fumie Ono, Hiroyuki Tsuji, and Morio Toyoshima, "Performance test of adaptive optics system for laser communications on the Koganei 1-m telescope with stellar objects," *International Conference on Space Optics—ICSO2024*. vol.13699. SPIE, 2025.



坂部 健太 (さかべ けんた)

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

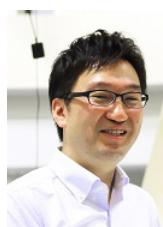
研究員
補償光学、大気ゆらぎ、空間光通信、天文学
【受賞歴】
2022年 第11回 可視赤外線観測装置技術ワーキングショップ 2022 若手発表賞銅賞



高見 英樹 (たかみ ひでき)

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
主任研究員
理学博士
補償光学、空間光通信、天文学
【受賞歴】

2010 年 文部科学大臣表彰「望遠鏡の視力を高めるレーザガイド星補償光学系の研究」
2006 年 日本光学会光設計特別賞「すばるレーザーガイド補償光学系の設計・製作」



斎藤 嘉彦 (さいとう よしひこ)

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)
補償光学、大気ゆらぎ、空間光通信、天文学
【受賞歴】
2006 年 日本光学会光設計特別賞「すばるレーザーガイド補償光学系の設計・製作」



六川 慶美 (ろくがわ よしみ)

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
研究技術員
補償光学、大気ゆらぎ、空間光通信
【受賞歴】
2025 年 Student Poster Award, Wide-field Adaptive Optics for Astronomy and Astrophysics