

# 散乱・揺らぎ場における空間光伝送 と光計測シンポジウム

2022年8月8日

主催・共催

学術変革領域研究(A) 散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学（散乱透視学）

日本光学会 フォトダイナミズム研究グループ

レーザー学会 光への大気影響の推定、計測、補償、制御技術専門委員会

## 開催

日時:2022/8/8(月)13:00~17:00

場所:東海大学高輪キャンパス 2号館 2B101室 + オンライン

<https://www.u-tokai.ac.jp/about/campus/campus-takanawa/>

ウェブサイト:

<https://sites.google.com/view/sanran20220808/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0>

## 目的

散乱透視学では3次元空間にナノメートルからキロメートルサイズのマルチスケールに遍く存在する散乱・揺らぎ現象を包括的に理解すると共に、克服することを目的としており、生命科学や天文学などの自然科学、情報通信工学などの工学の諸分野の研究の推進により、散乱・揺らぎ現象を取り扱う統一的な融合学術領域として「散乱透視学」の創成を目標としています。この活動の一環となる本シンポジウムでは、特に空間光通信、光伝送、光計測に関する研究の最前線で活躍している方々の講演を介して、自然科学や工学など様々な分野に関わる方々と散乱・揺らぎ場の知見を共有する機会の提供を目的とします。

## 講演スケジュール

- 13:00 Opening  
的場 修 (神戸大)
- 13:10 能動型光センサーによる大気観測  
石井 昌憲 (都立大)
- 13:40 光ビームの空間伝搬を利用する光無線給電  
宮本 智之 (東工大)
- 14:10 高出力レーザーの大気伝搬試験について  
早川 明良 (川崎重工)
- 14:40 休憩
- 15:00 揺らぎ場の中でのレーザー光通信 -揺らぎの影響と克服に向けた取り組み-  
山下 泰輝 (NICT)
- 15:30 光空間伝送での大気揺らぎの影響低減に向けた高速波面センサ技術  
安藤 俊行 (三菱電機)
- 16:00 NICT における衛星-地上間光通信用補償光学系の研究開発  
齊藤 嘉彦 (NICT)
- 16:30 Closing  
三浦 則明 (北見工大)

## 能動型光センサーによる大気観測

石井昌憲<sup>1</sup>、竹中秀樹<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京都立大学・システムデザイン学部

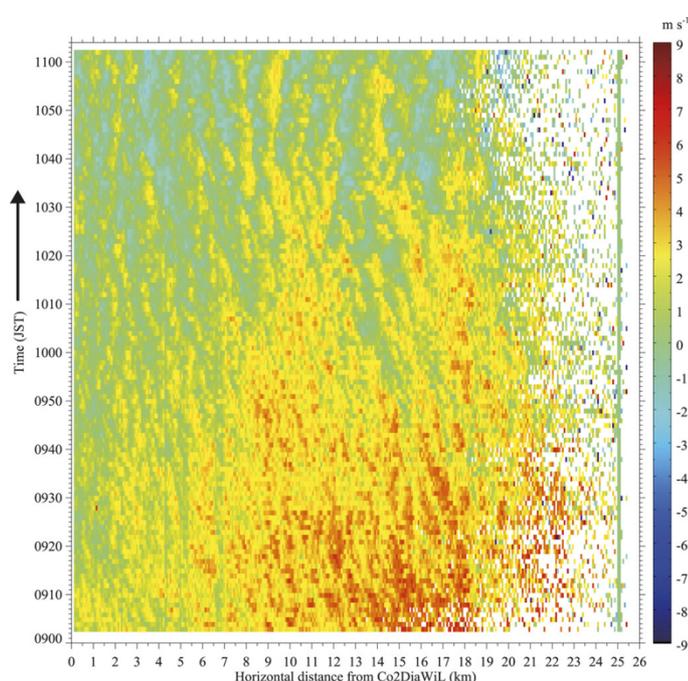
sishii@tmu.ac.jp

ライダー（LiDAR: Light Detection And Ranging）は、大気中にレーザ光を射出し、大気中の大気分子、大気中のエアロゾルや雲、大気分子等からの散乱光を望遠鏡で受光して、遠い場所にある物質の量、形状、気温、風速などを高空間・高時間分解能で測定するレーザ光を用いる能動型リモートセンシング機器である。本発表では風速を測定するドップラー風ライダー（Doppler Wind Lidar、以下 DWL）の観測事例を紹介しながら大気揺らぎ観測への有用性について展望する。

### ● ドップラー風ライダー

風とともに運ばれる大気分子、雲・エアロゾルにレーザ光があたるとその散乱光は、散乱前のレーザ光の周波数からわずかながら周波数が偏移する（ドップラー効果）。DWLは周波数偏移した周波数を測定することで視線方向の風速を得るリモートセンシング機器である。DWLの特徴としてレーザ光を用いるので、レーダと比べて送信光の拡がり角が小さい、レーダで問題となるようなサイドローブがない、電波干渉問題ない等の理由から地表面付近でも水平方向の風観測も可能である。

右図は東京都小金井市にある情報通信研究機構から東方向にレーザ光を射出して視線方向の風を観測した事例である。横軸が観測距離、縦軸が観測時間である。この観測事例からも分かるとおり、風は必ずしも一様には吹いておらず、強い場所と強い場所が存在する。DWLは風の空間的な情報を得られる有用な測定機器であり、風観測を通じて大気揺らぎ観測への応用が期待される。



Range-time display of quasi-horizontal radial wind velocity observed by Co2DiaWiL between 0902 and 1102 JST 29 Sep 2010. Negative velocities, represented in blue, indicate flow toward Co2DiaWiL. Positive velocities, in red and yellow, indicate flow away from Co2DiaWiL. (Iwail et al., 2013)

### Reference

Iwai et al., Performance and Technique of Coherent 2- $\mu$ m Differential Absorption and Wind Lidar for Wind Measurement. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 30, 3; [10.1175/JTECH-D-12-00111.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00111.1).

# 光ビームの空間伝搬を利用する光無線給電

宮本 智之

東京工業大学・科学技術創成研究院

tmiyamot@pi.titech.ac.jp

光ビームを空間伝搬させて太陽電池で受光する光無線給電 (OWPT) が注目され始めた。本方式は、他の無線給電方式に対して、回折が小さい光を利用することから長距離給電を小型に実現可能とする。また、光ビーム自身や DC 駆動の光源や太陽電池は電磁ノイズ干渉を発生しない。このため、小型 IoT 端末、家電、産業機器、さらにはロボット、ドローン、EV などのモビリティまで多様な活用が期待できる。

OWPT で用いるビームサイズは直径数～数 10 cm 程度と考えている。図 1 のように直径 1 cm のガウスビームは 1 km 伝搬後でも直径数 cm ほどと十分小さいことから、数 km 程度までが適用距離といえる。なお、光は他の電磁波と比べて水中の損失が非常に低いことから水中無線給電の唯一の実現手法となる。ただし、最低損失の青色光でも給電距離は数 10 m までと想定される。このように比較的長距離への適用を考えると、空气中応用は屋外となるために雨、雪、霧、埃などによるビーム散乱が課題といえる。また、水中も含む短距離においても温度や密度の揺らぎが、ビーム広がり、ビーム利用率に影響する。これらは、単に給電効率の低下や利用条件を制限するというだけでなく、散乱光や漏れ光の発生による光ビームの安全性の課題になる。

以上のように、空間の長距離伝搬を利用する OWPT では、散乱や揺らぎの考慮に加え、ビーム位置の高精度制御や安定化も重要となる。著者らは均一照射に利用される図 2 のフライアイレンズ系の適用を提案し、均一照射に加えてビームサイズやその強度分布、ビーム位置・方向などのビームアライメントへの耐性の活用を検討している。講演では、光無線給電の優位性や最新動向、課題なども合わせて紹介する。

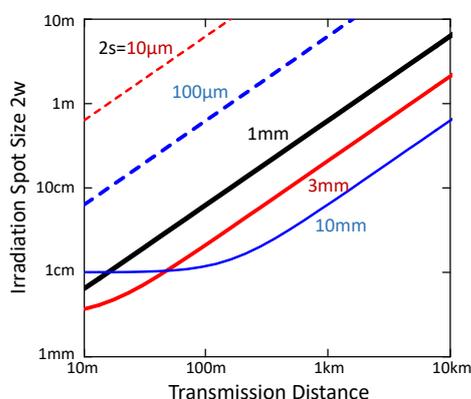


図 1 光ビームの伝搬距離とビームサイズ

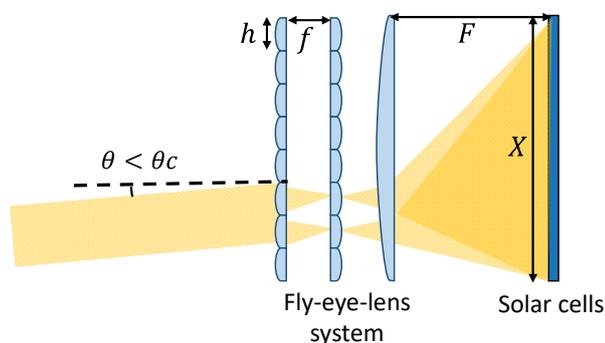


図 2 フライアイレンズによる均一照射

## Reference

宮本, 李, "光無線給電の動向—小型端末, 移動体から水中応用まで—," 光学, vol. 50, no. 11, p. 452, 2021.

## 高出力レーザーの大気伝搬試験について

早川 明良<sup>1</sup>

<sup>1</sup>川崎重工業株式会社

hayakawa\_a@khi.co.jp

レーザーを大気伝搬させる応用事例は数多くあるが、本講演では大気伝搬試験に適用したレーザーシステムの開発事例の紹介と併せて、試験結果から考察すべき対象となった大気揺らぎ影響等の諸課題について、高出力レーザーを用いた試験例を中心に報告する。

高出力レーザーを大気伝搬させるアプリケーションの一つとしては、図1に示すような防衛用途での適用がある。ここで示したような地上から高出力レーザーを出射するシステムの設計においては、大気揺らぎ影響の考慮は必須となる。また、防衛用途以外でもエネルギーの空間伝送は、今後様々な応用が検討されており、その際の大気揺らぎ影響はレーザー側の条件（出力レベルやビーム径等）や伝送空間の環境条件に依存することが試験的に明らかとなっている。ここでは、実際に影響が無視できない大気揺らぎ影響について、その特性を概説する。



図1 防衛装備庁による研究概要  
(平成29年度 政策評価書（事前の事業評価）の別紙より）

### Reference

Akiyoshi Hayakawa, Toru Nagai, Ryuji Nagaoka, Yasuhiro Ike, & Fumio Wani (2019) Laser delivery technology for the optical energy transmission, Proceedings of the 39th Annual Conference of the Laser Society of Japan.

# 揺らぎ場の中でのレーザー光通信 -揺らぎの影響と克服に向けた取り組み-

山下 泰輝<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立研究開発法人情報通信研究機構

hiroki.yamashita@nict.go.jp

レーザー光を用いた空間光通信は、データ中継衛星や成層圏通信プラットフォーム (HAPS)等のバックボーン回線における高速な無線通信技術として研究開発が進み、一部では実用化が開始されている。地上-衛星間など大気中を通る光回線の形成では、大気揺らぎの影響により通信に用いるレーザー光の伝搬角度や波面形状が変動し、受信光強度の変動の原因となる。この大気揺らぎの影響を抑圧し受信光強度を安定化するため、伝搬角度の補正には高速駆動鏡を用いる精追尾機構や、波面形状の補正には可変形鏡を用いる補償光学システム等が繁用される。

精追尾機構等の能動的な機構は通信品質の向上に寄与する一方で、原理的に応答遅延の発生が避けられない点や、多数の構成部品によりシステムが複雑化するため小型化や簡易化を阻害する点が課題である。本講演では、受動素子であるホログラフィック光学素子(HOE)の適用により、図1に示すような簡易な構成により遅延無く、大気揺らぎの影響で変動する受信光の伝搬角度を補正する研究を紹介する。HOEはホログラム技術によって感光材料に光波を記録する手法で作成され、記録する光波の設計により様々な光学機能を実現できる。また、感光材料に十分な厚みがある場合、使用時の光の入射角度によって、異なる光波を回折するように角度多重記録が可能であることが知られている[1]。本研究では、図2の通り一定の角度幅での通信光の伝搬角度変動の影響を抑圧し受信光強度を安定化するHOEを設計した。HOEの作成は図3のジオメトリにより、単一の平面波を角度多重記録して行った。評価により、設計に従った特性が得られ、原理の成立性が確認されている[2]。本研究がレーザー光通信における大気揺らぎの影響を克服し、さらなる高性能化と普及に貢献することを期待する。

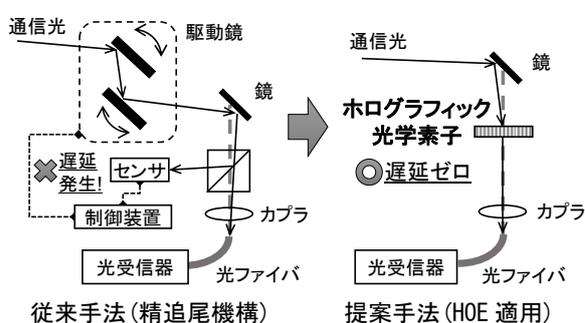


図1. 空間光通信装置へのHOEの適用。

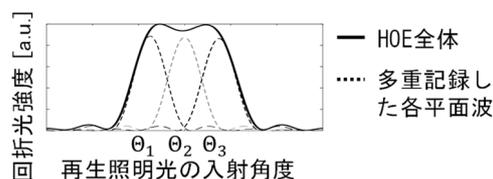


図2. HOEの回折特性の設計概念。

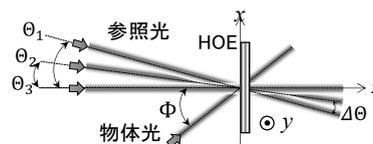


図3. 伝搬角度を安定化するHOEの記録。

## Reference

[1] Fai H. Mok, *Optics Letters* **18**, 11, pp.915-917 (1993)

[2] Hiroki Yamashita et al., *J. Appl. Phys.* **58**, SJJ A03, pp.1-6 (2019)

# 光空間伝送での大気揺らぎの影響低減に向けた高速波面センサ技術

安藤 俊行<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 三菱電機株式会社・鎌倉製作所

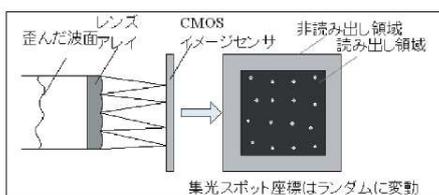
Ando.Toshiyuki@ap.MitsubishiElectric.co.jp

近年、防災減災や安全保障の観点から、衛星や航空機などの移動体を利用した地表面の高分解能で広範囲また高頻度な観測が望まれています。移動体に搭載される観測機器の高度化により大容量データを速やかに地上に伝送する技術が必要で、移動体と地上局間の通信に、レーザ光の高い指向性、広帯域性かつ周波数調整が不要な光空間通信が期待されています。一方、地表面での光空間通信を実現させるためには、大気揺らぎの影響を検出補償する技術が必要です。ここでは、大気揺らぎの影響低減にむけた高速波面センサ技術を中心とした基礎研究をご紹介します。

表 1 高速波面センサの機能性能

パラメータ	設計値
波面検出速度	4kHz (速度優先モード) 2kHz (ダイナミックレンジ優先モード)
ダイナミックレンジ	4λ (速度優先モード) 9λ (ダイナミックレンジ優先モード)
測定精度	$\leq \lambda \text{ rms}/100$
波面検出モード	4次 Zernike モード

ダイナミックレンジ優先モード



速度優先モード

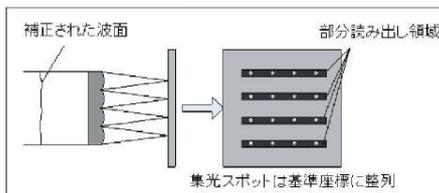


図 1 高速波面センサの概要

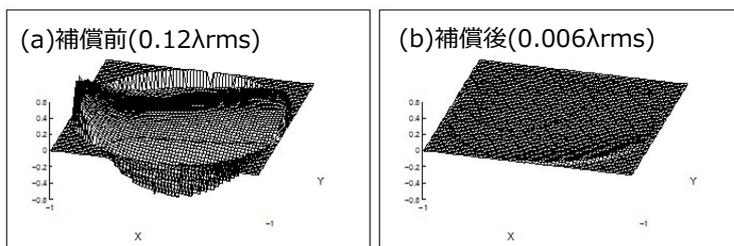


図 2 補償光学系への適用例

## Reference

Jiro Suzuki, Toshiyuki Ando and Takao Endo (2013), High -frame-rate wavefront sensor based on flexible read-out technique for C-MOS image sensor. IEEE 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), 2013, pp. 1-2

## NICT における衛星-地上間光通信用補償光学系の研究開発

斉藤 嘉彦<sup>1</sup>、Kolev Dimitar<sup>1</sup>、白玉 公一<sup>1</sup>、阿部 侑真<sup>1</sup>、豊嶋 守生<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 国立研究開発法人情報通信研究機構

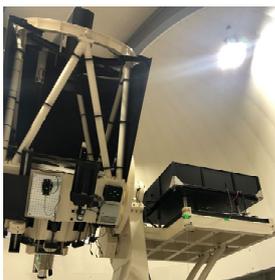
saitoys@nict.go.jp

衛星-地上局間の空間光通信技術の展開は高速大容量データ送受信だけではなく、暗号鍵配送のための通信技術としても脚光を浴びている。

衛星と地上の間には大気が存在し、その存在によって通信光は影響を受ける。大きな影響としては、まず雲が存在すれば通信光が遮蔽されてしまい通信は成立しなくなる。また晴天であっても、散乱による損失の影響を受け、さらに到達した光は大気ゆらぎの影響を受ける。

雲の存在を避けるためには例えば地上局の数を増やして天気の良い場所にある基地局を選んで通信を行うという方法が考えられ、さらには可搬型光地上局を展開し通信可能な場合を増やすということも可能である。

散乱は大気が存在する以上避けられないとしても、大気揺らぎに関しては補正する技術が存在する。天文学において大口径望遠鏡を用いた観測を行う場合、大気揺らぎの補正をしなければ本来望遠鏡が持つ空間分解能の性能が発揮できない。その補正のために実用化された「補償光学系」の技術は宇宙から到来する光を受ける通信光の受信にも応用が可能である。本講演では NICT が現在取り組んでいる通信用の補償光学系についての研究開発の概要について説明する。



小金井 1m 望遠鏡とナスミス台の補償光学系