

4-6 光リモートセンシングのためのアイセーフ赤外パルスレーザ開発

4-6 Development of Eye-safe Infrared Pulse Laser for Remote Sensing

青木 誠 佐藤 篤 石井昌憲

Makoto AOKI, Atsushi SATO, and Shoken ISHII

本稿では、NICTのリモートセンシング研究室において取り組んでいる、ゲリラ豪雨や竜巻等に代表される極端気象の早期捕捉や発達メカニズムの解明に貢献する「風」を高時間空間分解能で観測する光リモートセンシング技術であるドップラー風ライダー及びその光送信機として開発しているアイセーフ赤外パルスレーザについて述べる。

NICT is conducting studies of remote sensing technologies that can measure atmospheric wind, water vapor, and precipitation with high temporal and spatial resolutions for early detection of extreme weathers. Doppler lidars are suited for accurate measurements of wind profiles in clear-sky conditions using various beam scanning and processing techniques. In this paper, we introduce an eye-safe infrared pulse laser which is used as transmitter of coherent Doppler lidar system.

1 まえがき

ライダー(LIDAR: Light Detection And Ranging「光検出と測距」)は、光を用いたリモートセンシング技術の一種である [1] [2]。ライダーは、大気中にパルス状の光を照射し、測定対象からの散乱光を測定し、遠距離にある対象までの距離とその性質を計測するものである。近年では、自動運転のセンサ技術としてのライダーに注目が集まっているが、その一方で、ライダーは古くから大気と気象の研究に用いられてきた。ライダーは、レーザを使ったレーダーという意味で、レーザレーダーとも呼ばれる。電波を用いるリモートセンシング技術であるレーダーとの最も基本的な相違は、周波数が高い(=波長が短い)電磁波を用いることである。波長の長い電波と比べて波長の短い光は、大気中の様々な微粒子と強い相互作用を起こす。そのため、気象レーダーの主な観測対象は、雨や雪などの比較的大きな降水粒子であるのに対し、ライダーは大気より小さな構成要素である大気分子や大気微粒子(以下、エアロゾル)の観測を得意としている。利用する光の散乱機構(ミー散乱、レイリー散乱、ラマン散乱など)や観測対象の違いによって様々なライダーが存在し、特に風を測定対象とするライダーは、ドップラー風ライダーと呼ばれる。

リモートセンシング研究室では、ゲリラ豪雨や竜巻等に代表される極端気象の早期捕捉や発達メカニズムの解明に貢献する、風、水蒸気、降水等を高時間空間

分解能で観測するリモートセンシング技術の研究開発を行っている。ドップラー風ライダーは、晴天時でも風に関する情報を三次元で取得可能な光リモートセンシング技術である。多くの極端気象及びその発生・発達メカニズムと風には密接な関係があるため、極端気象の早期捕捉や発達メカニズムの解明や予測技術の向上に有効な手段である。また、将来的にドップラー風ライダーの衛星搭載化が実現した際には、天気予報や台風進路予測の飛躍的な精度向上をもたらすと期待されている。

本稿では、風を測定する光リモートセンシング技術であるドップラー風ライダーとそのドップラー風ライダー用の光送信機として開発を行っている高出力アイセーフ赤外パルスレーザについて紹介する。

2 ドップラー風ライダー

風に乗って運ばれている大気分子、エアロゾルや雲にレーザ光を当てると、ドップラー効果によって散乱信号の周波数が送信時と比べて僅かにシフトする。ドップラー風ライダーは、このドップラーシフトした散乱信号の周波数を測定することで、風を高時間・高空間分解能で測定するライダーである。ドップラー風ライダーによる測定方法は、検出方式によってコヒーレント方式と直接検波方式の2つに分けられる。本稿では、NICTで開発を実施している光ヘテロダイン検波を用いるコヒーレント方式のドップラー風ライダー

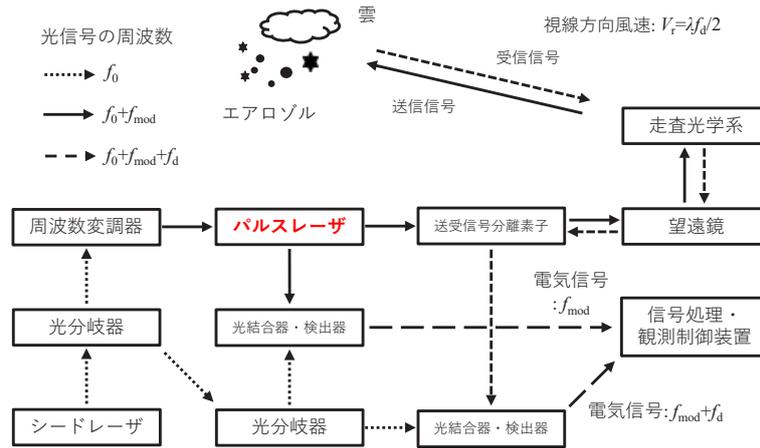


図1 コヒーレント方式ドップラー風ライダーの概略図

[3] について述べる。

コヒーレント方式の散乱体はエアロゾルや雲であることから、その主な測定範囲はエアロゾル濃度が高い、大気境界層内(地上から1、2 km 程度)から対流圏中部である。光ヘテロダイン検波は、非常に狭帯域で外乱による信号光の強度変動に影響されにくいことから、昼夜を問わず観測が行えることが大きな特徴のひとつである。また、直接検波方式と比べて比較的小さな口径の望遠鏡を使用しての観測が可能なることから、ビーム走査光学系を使用しての三次元観測や小型化・軽量化による航空機や衛星などの飛翔体への搭載も容易である。ドップラー風ライダーの光送信機には、単一波長のパルスレーザが用いられ、この技術がドップラー風ライダーの最もコアな技術とされている。NICTでは、この主要技術である光送信機とその関連技術の研究開発を進めている [4]-[7]。

図1にドップラー風ライダーの概略図を示す。ドップラー風ライダーは主に、単一波長で発振するシードレーザ、高出力なパルスレーザ、送受信の望遠鏡とレーザビームをスキャンするための光学系、受信した散乱信号をヘテロダイン検波する光検出器、信号処理及び観測制御を行う計算機から構成される。連続波(CW: continuous wave)で発振するシードレーザから得られたレーザ光(周波数: f_0 Hz)は、光分岐器で2分割されて、一方はヘテロダイン検波のための局発光として用いられる。もう一方は、ヘテロダイン検波及びドップラー成分の正負の判断のために、周波数変調器で周波数オフセットが加えられ(周波数: $f_0 + f_{mod}$ Hz)パルスレーザの周波数制御に用いられる。パルスレーザによって生成されたパルス光は、望遠鏡及び走査光学系を通り大気へと射出される。散乱体によって後方散乱されたパルス光(周波数: $f_0 + f_{mod} + f_d$ Hz)は、送信と同じ望遠鏡によって集められた後、光結合器で局発光と混ぜられて光検出器によってヘテロダイン検



図2 NICTで開発された2台のドップラー風ライダー

波されてビート信号(周波数: $f_{mod} + f_d$ Hz)として検出される。パルスレーザとシードレーザの周波数オフセット量(周波数: f_{mod} Hz)も同様の手法で検出を行う。ヘテロダイン検波された信号は、ADボードでサンプリングされた後に信号処理されて、レンジごとの視線方向ドップラー速度を含むプロダクトデータが生成される [8]。現在、NICT本部(東京都小金井市)には、モジュール化された2台のドップラー風ライダーがあり(図2)、6号館研究棟の屋上に設置して試験運用を行っている。

3 アイセーフ赤外パルスレーザ開発

ライダーにとって、光送信機であるパルスレーザは最も重要な基盤技術のひとつである。特に、レーザ光を水平走査(plan position indicator)することで風の水平分布、仰角方向に走査(range height indicator)することで垂直断面の観測を実施するドップラー風ライダーの場合は、人の目に対する安全を考慮して、波長が1.4から2.6 μm の人の目に対して損傷閾値が高いアイセーフレーザが用いられる。90年代から固体レーザ技術の躍進により2 μm 帯の固体レーザ [9]が、

最近では光部品の入手性などから 1.5 μm 帯の光ファイバー型のレーザ [10] が用いられるようになっており、現在ではこれらの波長帯がドップラー風ライダーの光送信機として主流になっている。

開発を進めているドップラー風ライダーの光送信機は、イットリウムリチウムフルオライド (LiYF_4 または YLF) 結晶に、ツリウム (Tm) とホルミウム (Ho) を共添加した Tm,Ho:YLF 媒質を用いた 2 μm 帯の固体レーザ (Tm,Ho:YLF レーザ) である。このレーザは、アイセーフかつ高出力・高パルスエネルギー動作が期待できる点、二酸化炭素及び水蒸気の吸収線が発振波長付近に位置している点から、ドップラー風ライダーや二酸化炭素及び水蒸気の差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) の光送信機として用いられてきた。これまでに、 -80°C のレーザ動作温度において、平均出力 2.4 W (パルスエネルギー 80 mJ、パルス繰り返し周波数 30 Hz) の伝導冷却側面レーザダイオード (LD) 励起型の Tm,Ho:YLF レーザの開発に成功している [6]。

現在、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) で開発された超低高度衛星技術試験機「SLATS」が打ち上げられ実証試験が行われている。衛星搭載ドップラー風ライダーの光送信機として SLATS 後継機への搭載した際に、要求される風の観測精度を満たすことが可能な出力 [11] である平均出力 3.75 W (パルスエネルギー 125 mJ、パルス繰り返し周波数 30 Hz) のパルスレーザの技術実証をひとつの開発目標として、従来のレーザをベースとして更なる高機能化のための研究開発を進めている。レーザ開発における課題は、システム全体の消費電力の低減、高出力・高パルスエネルギー化及び小型化である。この問題を解決するためには、従来のレーザと比べてより高温で高効率に動作可能なレーザが必要になる。開発のターゲットとした温度帯は、レーザの発振効率と排熱、消費電力の観点から $-40 \sim -30^\circ\text{C}$ とした。この温度帯では冷却手段が豊富に存在し、アンモニアやエタンのループヒートパイプやヒートパイプを用いて、レーザロッドから効率的な排熱が期待できる。その温度帯で、効率的な動作を実現するために、高密度励起レーザモジュール及び Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) 構成の Tm,Ho:YLF レーザの研究開発を実施した。

3.1 高密度励起レーザモジュール開発

従来の Tm,Ho:YLF レーザは、レーザロッドに、直径 4 mm、長さ 44 mm の Tm (4%), Ho (0.4%):YLF 結晶を用いて、3 個の励起モジュールによりレーザロッドを 3 方向から側面励起する構造になっている。各励起モジュールは、レーザロッドの長さ方向に並べ

て配置された 4 個の半導体レーザ (LD) と石英の導光板から構成されている。励起光が通る部分以外のレーザロッド側面の大部分は、インジウム薄膜をバッファとして、銅製のヒートシンクに接触しており、それによって伝導冷却で高い排熱効率を実現している。ヒートシンク温度は、冷凍機を用いて -80°C に冷却されている。

Tm,Ho:YLF レーザは、準四準位レーザである [12]。そのため、レーザ下準位は、ボルツマン分布にしたがって熱的に占有されている。温度上昇に伴い、下準位を占有するイオンは増加し、再吸収は大きくなり発振効率は低下する。従来のレーザモジュールは、高い排熱能力を有する一方で、励起密度が低すぎるために再吸収の影響が大きく発振閾値が高いという問題があった。再吸収に打ち勝つためには、レーザロッド長さを短くして高密度励起することにより、反転分布密度を増やすことが有効である。ただし、過度の高密度励起は、Ho 基底準位イオンの枯渇 (Ground state depletion: GSD) による発振効率の低下を引き起こす。そのため、基礎実験並びに動作解析に基づいて、高密度励起レーザモジュールの開発を実施した。開発した高密度励起レーザモジュールには、直径 4 mm、長さ 33 mm の Tm (4%), Ho (0.4%):YLF または直径 4 mm、長さ 22 mm の Tm (4%), Ho (0.7%):YLF の結晶をレーザ媒質として用いている。それぞれ、従来のレーザモジュールよりも高温での高パルスエネルギー動作に秀でており、特に前者は 22 mm のモジュールと比べて排熱面積を多く取ることができるため高繰り返し動作に適している。図 3 にレーザロッド長 33 mm の高密度励起レーザモジュールを示す。

高密度励起レーザモジュールを用いて Q スイッチ発振実験を行った。レーザロッドの冷却温度は従来通

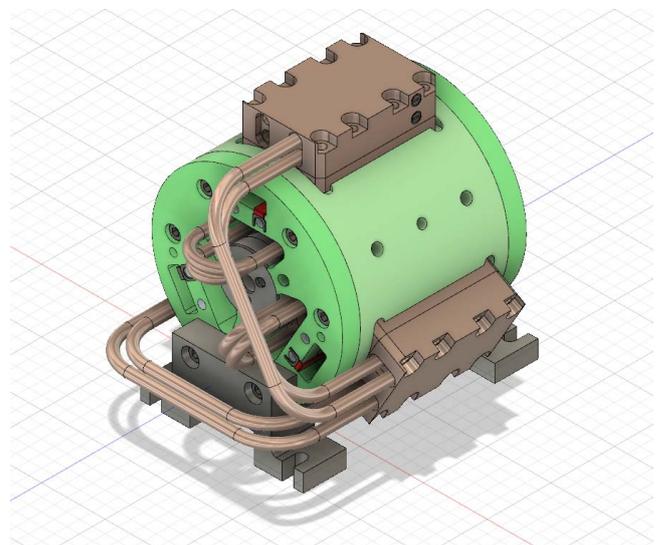


図 3 高密度励起型 Tm,Ho:YLF レーザモジュール

4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

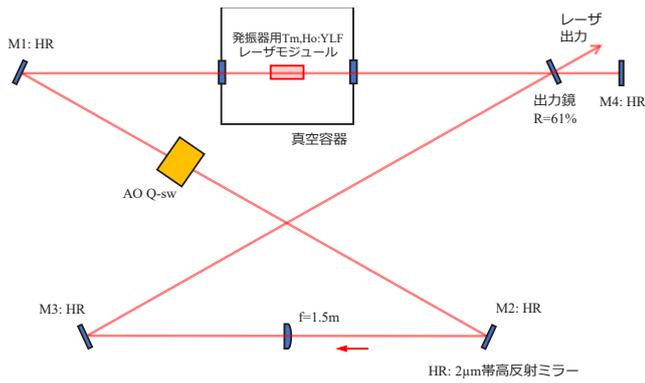


図4 Tm,Ho:YLF リングレーザ発振器の実験系

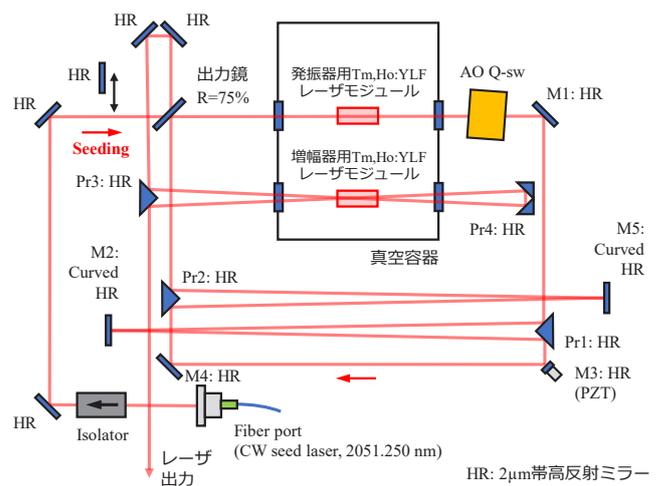


図6 Tm,Ho:YLF MOPA の光学系

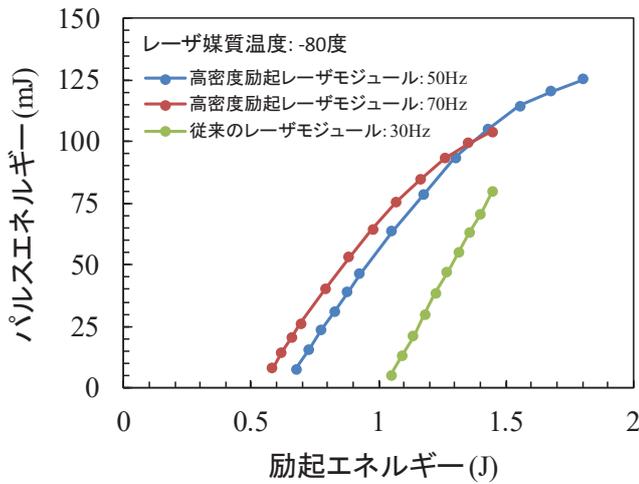


図5 高密度励起型 Tm,Ho:YLF レーザモジュールの発振特性

りの $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ として、従来の 44 mm のレーザロッドを用いたレーザモジュールとの比較を行った。図4に実験に用いた Tm,Ho:YLF リングレーザ共振器の構成を示す。光共振器は、3枚の全反射鏡及び出力鏡(反射率: $R=61\%$)により構成し、単一方向発振を行うために、出力鏡の外側に逆方向発振のレーザ光を反射させる全反射鏡を設置した。共振器内には、熱レンズ効果の焦点距離 1.5 m の補償用レンズ及び Acoustic-optics (AO) Q スイッチを挿入した。図5に実験結果を示す。励起エネルギー 1.45 J のときに、繰り返し周波数 70 Hz で出力エネルギー 104 mJ が得られた。これは、平均出力 7.28 W に相当し、これまでに報告されている 100 mJ 級の伝導冷却型 $2\text{ }\mu\text{m}$ レーザとしては最高出力となる [13]。また、このときのビーム品質は、ナイフエッジ法によるビーム径測定の結果、 $M^2 \leq 1.5$ であることが確かめられた。50 Hz での動作では、励起エネルギーが 1.8 J のとき、パルスエネルギーは 125 mJ に達した。強励起時には、スロープ効率の低下が見られたが、これは GSD の影響であると考えられる。長さ 44 mm のレーザロッドを用いた従来モジュールの結果と比較すると、大幅な低閾値化が達成

されたことがわかる。

3.2 Tm,Ho:YLF MOPA 開発

$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 付近までレーザ動作温度を上げる場合、従来と同様のレーザ発振器単体構成で 100 mJ 級のパルスエネルギーを実現することは、開発した高密度励起レーザモジュールを用いたとしても、レーザロッドからの排熱やレーザ共振器へのダメージなどの観点から非常に困難である。高温動作と高出力動作を両立させるために、レーザ発振器と増幅器を組み合わせた Tm,Ho:YLF MOPA レーザの研究開発を行った。

図6に、開発を行っている改良型の小型リング共振器と X ダブルパス型の増幅器から構成される Tm,Ho:YLF MOPA の光学系を示す。発振器と増幅器用の高密度励起レーザモジュールは、同じ真空容器の中に収められている。共振器は、単一波長発振による空間的ホールバーニングの抑制と 100 ns 以上の長いパルス幅を実現するために、共振器長 3.86 m のリング共振器を採用している。従来の共振器は、3枚の全反射鏡及び出力鏡により構成されていたが、取り扱いやすさ及び安定性の向上の観点から小型共振器への改良を実施した。長方形のリング共振器をベースとして、プリズムと全反射鏡のペアを用いた折返し機構を二か所に用いることで、従来の 3.86 m の共振器長を保持したまま小型化を行った。プリズム正面の全反射鏡には曲率を持たせており、これにより YLF 結晶の熱レンズ効果を補償している。出力鏡の反射率は、レーザ発振の閾値及びスロープ効率、共振器内の素子へのダメージ閾値の観点から最適化を行い 75% とした。インジェクションシーディングによる発振波長制御並びに単一方向発振を行うために、リング共振器の双方向発振光軸の片側からシード光を注入した。共振器長は、共振器内に配置されたピエゾ駆動ミラーを走

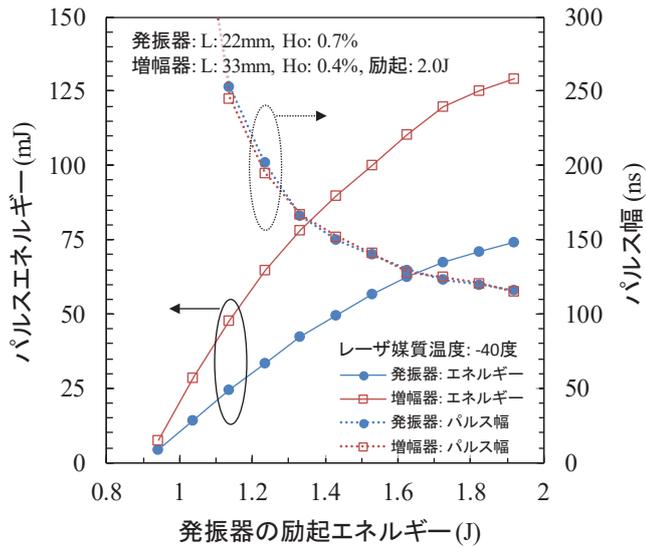


図7 Tm,Ho:YLF MOPAの発振特性

査することで、注入されたシード光と同調される。シード光源には、風観測に適した大気吸収が小さい2051.250 nmで発振するCW単一縦モードTm,Ho:YLFレーザを用いた。共振器内にはAO Qスイッチを挿入した。

図7に、Tm,Ho:YLF MOPAの発振特性を示す。レーザーロッドの冷却温度は -40°C として、増幅器はシングルパス構成とした。発振器と増幅器には、それぞれレーザーロッド長22 mmとレーザーロッド長33 mmのレーザーロッドを使用した高密度励起型レーザーモジュールを用いた。発振器の波長は、光注入同期によって2051.250 nmに安定化した。発振器及び増幅器の励起エネルギーが、それぞれ1.92及び2.0 Jに対して、3.87 W (パルスエネルギー129 mJ、繰り返し周波数30 Hz、パルス幅127 ns)の平均出力が得られた。この時、レーザの電気-光変換効率(Wall-plug 効率)は1.2%であった。 -80°C のレーザーロッドの冷却温度で、発振器単体で100 mJ級のパルスエネルギーを達成したときは、Qスイッチ発振のショートパルス化(< 100 ns)が問題となっていたが、MOPAを採用したことにより、Qスイッチ発振のロングパルス化にも成功している。

4 おわりに

本稿では、リモートセンシング研究室で研究開発を実施している光リモートセンシングのためのアイセーフ赤外パルスレーザについて述べた。ドップラー風ライダーの光送信機として開発を実施した高密度励起レーザーモジュールは、これまでに報告されている100 mJ級の伝導冷却型 $2\ \mu\text{m}$ レーザとしては、世界最高出力を達成した。高出力動作と高温動作化の両立を目

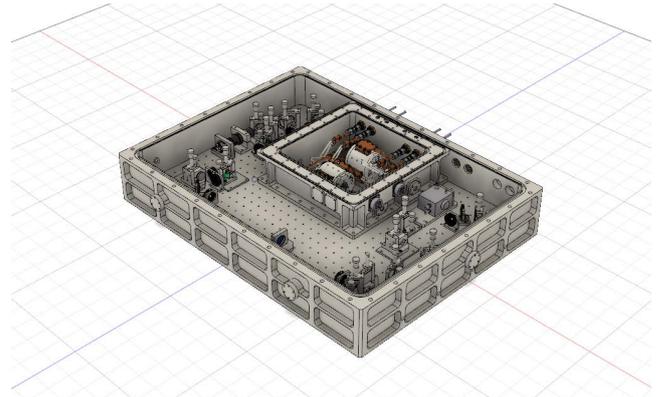


図8 高安定筐体内に収められたTm,Ho:YLF MOPA

指したTm,Ho:YLF MOPAの研究開発では、超低高度衛星にドップラー風ライダーを搭載した際に、要求される出力を満たすレーザの開発に成功した。現在のTm,Ho:YLF MOPAの電力変換効率(Wall-plug 効率)は1.2%である。更なる高効率動作についても、増幅器を2回通すダブルパス方式のMOPAを採用し、現在のシングルパルス発振よりも効率的な発振が期待できるマルチパルス発振に切り替えることで、達成可能であると見通しを得ている。また、開発を進めているTm,Ho:YLF MOPAを、衛星搭載を想定して試作した筐体に組み込み(図8)、長期動作・耐振動衝撃・耐環境性能評価などの試験を進める予定である。

【参考文献】

- 1 R. M. Measures, "Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications," Wiley-Interscience, 1984.
- 2 T. Fujii and T. Fukuchi, "Laser Remote Sensing," CRC Press, 2005.
- 3 V. Banakh and I. Smalikhov, "Coherent Doppler Wind Lidars in a Turbulent Atmosphere," Artech House, 2013.
- 4 S. Ishii, K. Mizutani, H. Fukuoka, T. Ishikawa, B. Philippe, H. Iwai, T. Aoki, T. Itabe, A. Sato, and K. Asai, "Coherent $2\ \mu\text{m}$ differential absorption and wind lidar with conductively cooled laser and two-axis scanning device," Appl. Opt., vol.49, no.10, pp.1809-1817, April 2010.
- 5 S. Ishii, K. Mizutani, P. Baron, H. Iwai, R. Oda, T. Itabe, H. Fukuoka, T. Ishikawa, M. Koyama, T. Tanaka, I. Morino, O. Ushio, A. Sato, and K. Asai, "Partial CO_2 Column-Averaged Dry-Air Mixing Ratio from Measurements by Coherent $2\text{-}\mu\text{m}$ Differential Absorption and Wind Lidar with Laser Frequency Offset Locking," J. Atmos. Ocean. Technol., vol.29, no.9, pp.1169-1181, Sept. 2012.
- 6 K. Mizutani, T. Itabe, S. Ishii, M. Aoki, K. Asai, A. Sato, H. Fukuoka, T. Isikawa, and K. Noda, "Diode-pumped $2\text{-}\mu\text{m}$ pulse laser with non-composite Tm,Ho:YLF rod conduction-cooled down to -80°C ," App. Opt., vol.54, no.26, pp.7865-7869, Sept. 2015.
- 7 K. Mizutani, S. Ishii, M. Aoki, H. Iwai, R. Otsuka, H. Fukuoka, T. Isikawa, and A. Sato, " $2\ \mu\text{m}$ Doppler wind lidar with a Tm: fiber-laser-pumped Ho:YLF laser," Opt. Lett., vol.1.43, no.2, pp.202-205, Jan. 2018.
- 8 H. Iwai, S. Ishii, R. Oda, K. Mizutani, S. Sekizawa, and Y. Murayama, "Performance and Technique of Coherent $2\text{-}\mu\text{m}$ Differential Absorption and Wind Lidar for Wind Measurement," J. Atmos. Ocean. Technol., vol.30, no.3, pp.429-449, March 2013.
- 9 S. W. Henderson, C. P. Hale, J. R. Magee, M. J. Kavaya, and A. V. Huffaker, "Eye-safe coherent laser radar system at $2.1\ \mu\text{m}$ using Tm,Ho:YAG lasers," Opt. Lett., vol.16, no.10, pp.773-775, May 1991.
- 10 S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka, Y. Hirano, and S. Wadaka, "Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing," Appl.

4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

- Opt., vol.46, no.11, pp.1953–1962, April 2007.
- 11 S. Ishii, P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y. Satoh, T. Kubota, D. Sakaizawa, R. Oki, K. Okamoto, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, T. Maki, K. Yamashita, T. Nishizawa, M. Satoh, and T. Iwasaki, "Feasibility Study for Future Space-Borne Coherent Doppler Wind Lidar, Part 1: Instrumental Overview for Global Wind Profile Observation," J. Meteorol. Soc. Jpn., vol.95, no.5, pp.301–317, Oct. 2017.
 - 12 B. M. Walsh, "Review of Tm and Ho materials; spectroscopy and lasers," Laser Phys., vol.19, no.4, pp.855–866, April 2009.
 - 13 A. Sato, M. Aoki, S. Ishii, R. Otsuka, K. Mizutani, and S. Ochiai, "7.28-W, High-Energy, Conductively Cooled, Q-switched Tm,Ho:YLF Laser," : IEEE Photo. Techno. Lett., vol.29, no.1, pp.134–137, Jan. 2017.



青木 誠 (あおき まこと)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究員
博士(工学)
ライダー



佐藤 篤 (さとう あつし)

東北工業大学
工学部情報通信工学科
准教授
博士(工学)
固体レーザー



石井昌憲 (いしい しょうけん)

ソーシャルイノベーションユニット
戦略的プログラムオフィス
主任研究員
博士(理学)
光リモートセンシング、光基盤技術