

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15471

研究課題名（和文）地球環境計測に適した高出力中赤外マルチパルスレーザーの研究

研究課題名（英文）Development of two-micron multi-pulse laser for remote sensing

研究代表者

青木 誠（Aoki, Makoto）

国立研究開発法人情報通信研究機構・電磁波研究所リモートセンシング研究室・研究員

研究者番号：40744652

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：マルチ気象データ（風、水蒸気、温度、大気微量成分等）を広範囲に遠隔計測するために、目に優しく高出力な2ミクロン帯中赤外マルチパルスレーザーとその発振波長を高精度かつ長期的に制御する技術の開発を進めた。その結果、従来の出力を凌駕する平均出力10 W以上の100 mJ級Tm,Ho:YLFレーザーの研究開発に成功した。また、高精度な水蒸気観測を行うために、パルスレーザーのシードレーザーの発振波長を波長制御の基準としている二酸化炭素のR30吸収線（2050.967 nm）から数10 GHz以上オフセットさせた波長（2050.550 及び 2051.103 nm）に制御する手法の開発にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の実施により、パルスレーザー開発において従来の世界最高出力（7.28 W）の100 mJ級Tm,Ho共添加固体レーザーの出力を凌駕するレーザー（10.54 W）の開発に成功した。本研究で開発を進めた装置をさらに発展させれば、マルチ気象データ（風、水蒸気、温度、大気微量成分等）を広範囲かつ同時に観測できる。そのため、同装置を実用化できれば、現代社会の様々な課題（豪雨災害、地球環境問題、カーボンニュートラル等）の解決に貢献することが可能である。

研究成果の概要（英文）：An eye-safe two-micron multi-pulse laser and its wavelength locking technique have been developed for simultaneously measuring various meteorological parameters. The diode-side-pumped Tm,Ho:YLF master oscillator power amplifier (MOPA) was developed. A Q-switched pulse energy of 105.4 mJ was achieved at a pulse repetition frequency of 100 Hz, corresponding to an average output power of 10.54 W. The wavelength locking technique for the pulse laser was realized by using a combination of the Pound-Drever-Hall (PDH) and optical phase-locked loop (OPLL) techniques. In terms of the spectral absorption characteristics, the optimal wavelengths for water vapor measurement were selected to be 2050.550 and 2051.103 nm. The long-term wavelength stability of the locked laser of < 0.2 pm, which corresponds to 14 MHz, was achieved.

研究分野：光計測

キーワード：差分吸収ライダー ライダー リモートセンシング パルスレーザー Tm,Ho:YLF

### 1. 研究開始当初の背景

気象情報は、我々の日常生活・経済活動の様々な場面で幅広く利用されている。様々なモノ・人がインターネットでリアルタイムに繋がるIoTの時代において、今後、我々が必要とする気象情報は、ますます高度化が進んでいく。今後、気象情報が社会の様々な場面で有効活用され、安全安心かつ豊かで強靱な社会を実現していくためには、最新の観測技術を駆使して、常に高精度・高品質な気象データを社会に提供していくことが重要である。ライダー技術は、レーザを用いたリモートセンシング技術の総称である。レーダーで用いられる電波と比べて、波長が短いレーザ光は、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、レーザが大気伝搬する際の散乱や特定の波長の光を用いた際の吸収により生じた受信信号の変化から、様々な気象データ(エアロゾル、大気中の気体成分、風、水蒸気、温度など)を取得することが可能である。

研究代表者が所属する情報通信研究機構(NICT)では、散乱信号のドップラー周波数遷移を利用して風を測定するライダー技術の一つである、コヒーレントドップラー風ライダー(CDWL: Coherent Doppler Wind Lidar)の研究開発を進めている。CDWLの光として開発が進められている波長2μm帯の中赤外Tm, Ho共添加固体レーザは、目に優しく高出力が期待できる点、発振波長付近に二酸化炭素および水蒸気の吸収線が位置している点から、衛星搭載以外のプラットフォームでの長距離観測用のCDWLおよびコヒーレント方式の差分吸収ライダー(DIAL: Differential Absorption Lidar)の光送信機としても非常に魅力的である。研究代表者が所属する研究グループは、-80℃の冷却温度で効率的に連続動作するTm, Ho共添加固体レーザの研究開発を進めており、最近では、世界最高出力の100 mJ級Tm, Ho共添加固体レーザ発振器の開発[A. Sato, et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 29, 134-137 (2017).]に成功している。

### 2. 研究の目的

本研究では、目に優しく高出力な2μm帯中赤外マルチパルスレーザと、複数波長を高精度に制御する技術を組み合わせ、マルチ気象データ(風、水蒸気、温度、大気微量成分等)を広範囲かつ高精度に観測可能な、次世代の光リモートセンシング技術の確立を目指す。

広範囲にわたり、都市域のマルチ気象パラメータを同時に観測し、高精度・高品質な気象データを安定して社会に提供することが出来れば、気象分野への学術的な応用以外にも、防災や日常生活・経済活動の様々な場面で幅広く利用され様々な波及効果が期待できる。例えば、風と水蒸気の同時計測結果から大気収束、急速に発達する雨雲の動きをいち早くとらえることで局地豪雨による都市部での被害軽減化に繋がる。また、取得されたマルチ気象データは、IoTやAIといった最新技術との親和性も高く、これらの技術との相乗効果で新しい知見の創生が期待される(図1)。

**ライダー技術を、多種多様なユーザのニーズの変化や状況に応じて柔軟に対応できるパワフルでインテリジェンスな適応型センサーとして発展させる。**

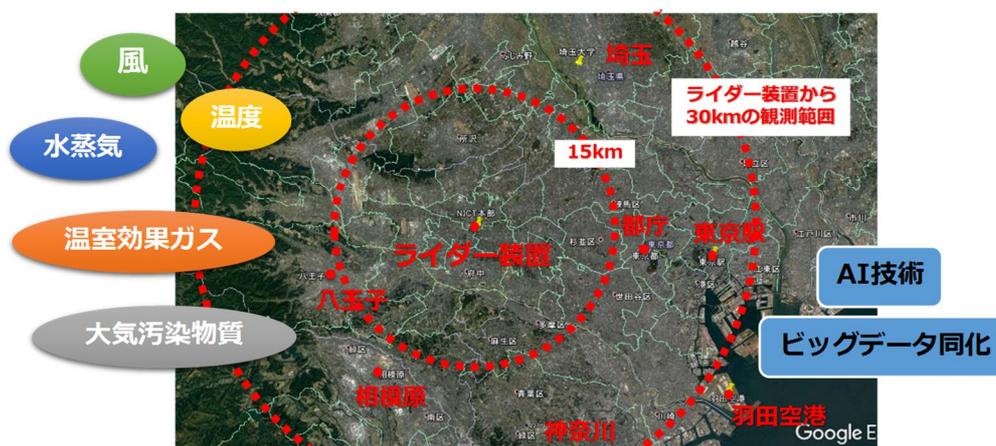


図1 地球環境計測に適した高出力中赤外マルチパルスレーザによる都市モニタリング例

### 3. 研究の方法

本研究では、目に優しく高出力な2μm帯中赤外マルチパルスレーザの発振波長を、高精度かつ長期的に制御する技術を提案し、マルチ気象データ(風、水蒸気、温度、大気微量成分等)を広範囲で観測可能な、高出力・高機能ライダーの実証を行う。

研究代表者が所属する研究グループは、世界最高出力の100 mJ級Tm, Hoレーザ発振器の開発

に成功している。本提案では、世界最高出力を誇る発振器と、衛星搭載 CDWL のために実施してきた高温高出力動作のための技術を組み合わせて、平均出力 10 W 越の 100 mJ 級 Tm,Ho 共添加固体レーザを開発する。そのために、Tm,Ho 共添加固体レーザ発振器と増幅器を組み合わせて MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) システムを構築、レーザレート方程式を用いて最適なマルチパルス発振動作を検討・実験的に証明する。

これに加えて、パルスレーザを地球環境計測に利用するために、パルスレーザの波長を計測に適切な波長に制御する技術を開発する。二酸化炭素の吸収線 R30 の中心波長として、その吸収線から数 10 GHz 離れた波長へのオフセットロック技術を開発する。その技術と光ファイバー技術を組み合わせて、高精度かつ長期的にパルスレーザの波長を制御する技術を開発する。最終的にはパルスレーザと波長制御技術を組み合わせて、マルチ気象データ(風、水蒸気、温度、大気微量成分等)を取得する。

#### 4. 研究成果

図 2 に、本研究課題で開発した Tm,Ho 共添加固体レーザ発振器と増幅器を組み合わせた Tm,Ho:YLF MOPA の発振器入力エネルギーと増幅器出力の関係を示す。レーザ媒質冷却温度は -40 と -80 とし、発振モードに関しては 1 回の励起に対して 1 回発振させるシングルパルス動作と 2 回発振させるダブルパルス動作で実験を行った。準四準位レーザである Tm,Ho 共添加固体レーザは、レーザ下準位イオンによるレーザ光の再吸収が抑えられるために冷却して用いると発振効率上がる。そのため、-80 のレーザ媒質冷却温度の方が低閾値化してより効率的に発振することがわかる。また、ダブルパルス動作にすることによって、1 回目の Q スイッチ発振後に Tm の  $^3F_4$  準位に残存したエネルギーが Ho のレーザ上準位に再移譲されるので、より効率的な発振が実現していることがわかる。-80 のレーザ媒質冷却温度において、シングルパルス動作では平均出力 9.04 W、パルスエネルギー 180.8 mJ、パルス繰り返し周波数 50 Hz の出力が、ダブルパルス動作では平均出力 10.54 W、パルスエネルギー 105.4 mJ、パルス繰り返し周波数 100 Hz の出力が得られ、研究開始当初予定していた平均出力 10 W 越の 100 mJ 級 Tm,Ho 共添加固体レーザが実現できた。この出力は、研究代表者が所属する研究グループが開発に成功した世界最高出力 (7.28 W) の 100 mJ 級 Tm,Ho 共添加固体レーザ発振器の出力を凌駕している。

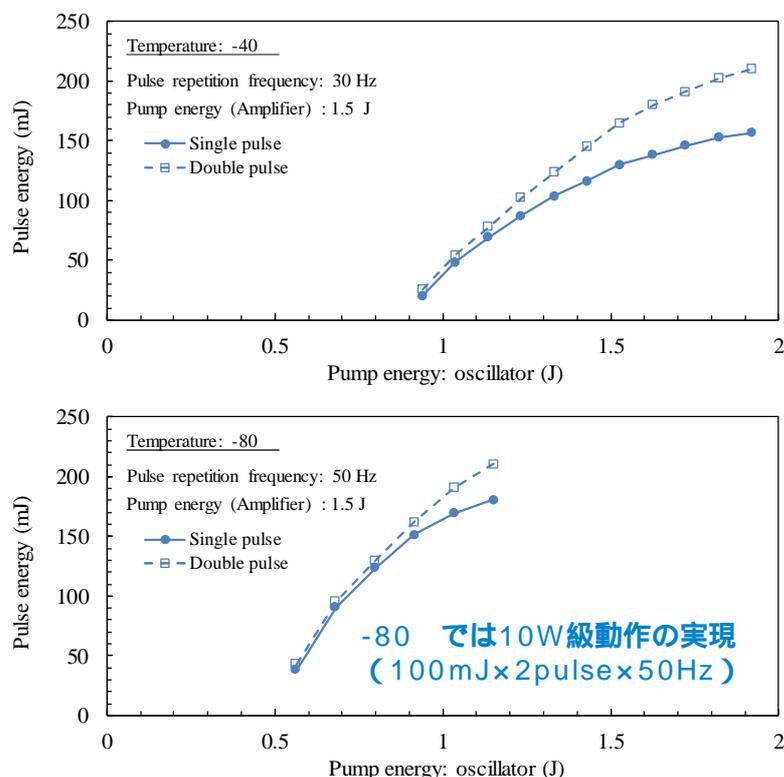


図 2 Tm,Ho:YLF MOPA の発振特性

開発した Tm,Ho:YLF MOPA をマルチ気象データ観測に利用するために、Tm,Ho:YLF MOPA シードレーザの発振波長を制御する方法を開発した。シードレーザの発振波長 (吸収波長:  $\lambda_{on}$ , 非吸収波長:  $\lambda_{off}$ ) は、HITRAN データベースと U.S. Standard Atmosphere (1976) を用いて検討され、今回は水蒸気を観測した際に高度毎の測定バイアスが最小になる  $\lambda_{on}$  (2050.550 nm) と  $\lambda_{off}$  (2051.103 nm) に波長制御を行った。図 3 に、開発した波長制御技術を用いて制御した Tm,Ho:YLF MOPA 用のシードレーザの波長安定度を示す。従来方式の波長制御範囲は、CO<sub>2</sub> ガスセルロックした基準周波数 (2050.967 nm) を中心に最大で  $\pm 6.5$  GHz ( $\pm 0.09$  nm) 程度だったので、29.725

GHz 離れた  $\lambda_{on}$  (2050.550 nm) の波長安定化を行うことができなかったが、新しく開発したシステムでは、波長制御範囲を  $\pm 30$  GHz ( $\pm 0.42$  nm) 以上まで拡張することに成功した。また、これまで実施できていなかった 2 波長同時制御も成功している。研究の主な成果としては、特許出願 (特願 2021-025706) および論文 (M. Aoki and H. Iwai, Appl. Opt. **60**, 4259-4265 (2021).) が挙げられる。

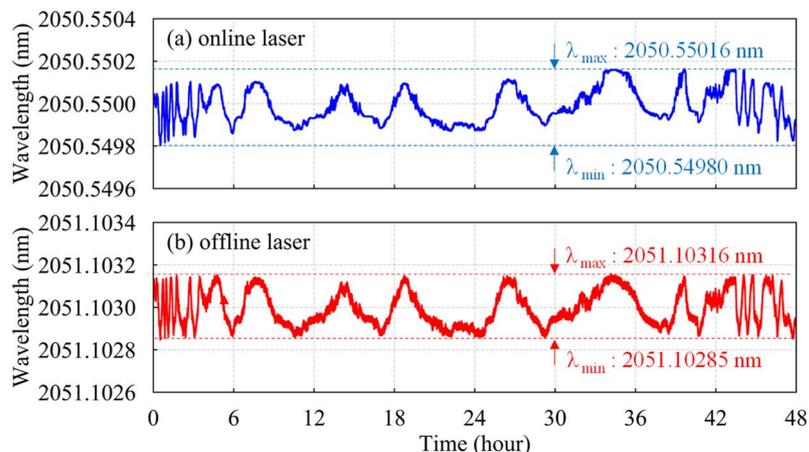


図 3 水蒸気観測に適した波長に制御されたシードレーザの波長安定度 (M. Aoki and H. Iwai, Appl. Opt. **60**, 4259-4265 (2021).)

近年の社会課題である局地的豪雨の高精度予測を実現するために、開発した波長制御手法と高出力パルスレーザ技術を組み合わせた差分吸収ライダーを構築、豪雨の素となる積乱雲発生の重要な指標である風と水蒸気の同時計測を実施した。開発した水蒸気差分吸収ライダーの計測性能を検証するため、2020 年 6 月下旬から 7 月下旬にかけて、NICT 本部(東京都小金井市)においてラジオゾンデの放球を行った。図 4 に、水蒸気差分吸収ライダーの観測結果とラジオゾンデの比較結果を示す。開発した水蒸気差分吸収ライダーは目標観測精度である湿度  $\pm 10\%$  以下を達成した。また、風速に関しては  $\pm 0.2$  m/s 以下の測定精度を実現している。今後は、更に多波長化を進めて、マルチ気象データ(風、水蒸気、温度、大気微量成分等)を広範囲で観測可能なライダーの技術実証を行う。

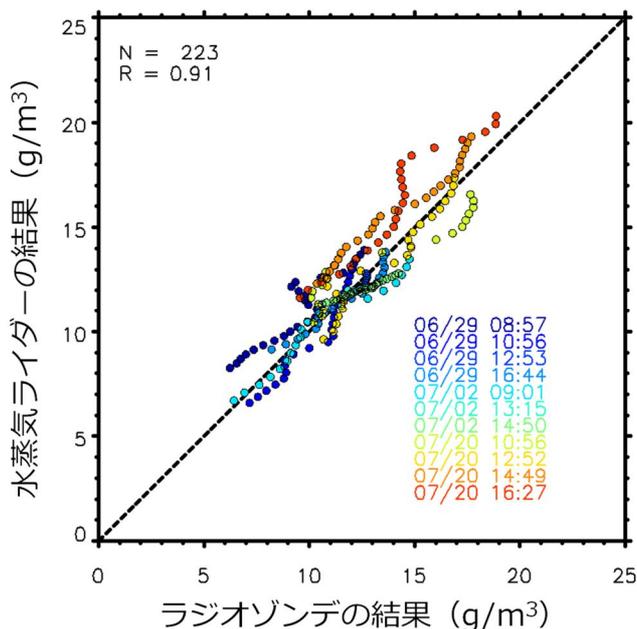


図 4 水蒸気差分吸収ライダーとラジオゾンデの比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aoki Makoto, Iwai Hironori	4. 巻 60
2. 論文標題 Dual-wavelength locking technique for coherent 2- $\mu\text{m}$ differential absorption lidar applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 4259 ~ 4265
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.423234	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 青木誠、佐藤篤、水谷耕平、石井昌憲	4. 巻 29
2. 論文標題 衛星搭載ドップラー風ライダーのための $T_m, Ho:YLF$ レーザーの研究開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本赤外線学会誌	6. 最初と最後の頁 66 ~ 72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青木誠、佐藤篤、石井昌憲
2. 発表標題 衛星搭載ドップラー風ライダーのための $2\mu\text{m}$ 高出力パルスレーザーの研究開発
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第40回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木誠、佐藤篤、石井昌憲
2. 発表標題 衛星搭載ドップラー風ライダーのための 6W 級伝導冷却型 $T_m, Ho:YLF$ MOPA の研究開発
3. 学会等名 第37回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木誠、岩井宏徳
2. 発表標題 2 $\mu$ m帯水蒸気差分吸収ライダーの研究開発
3. 学会等名 第29回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木誠、岩井宏徳、中川勝広
2. 発表標題 2 $\mu$ m帯ドップラーライダーの水蒸気差分吸収ライダー化
3. 学会等名 第38回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木誠、岩井宏徳
2. 発表標題 2 $\mu$ m帯コヒーレントライダーのための波長制御技術の開発
3. 学会等名 第28回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 波長制御装置、波長制御方法、差分吸収ライダー装置	発明者 青木 誠、岩井 宏 徳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-025706	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------