

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年4月1日現在

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2009～2012
 課題番号：21360447
 研究課題名（和文）ダイナミックな大気変動観測のための三次元リアルタイムライダーの開発
 研究課題名（英文）Real-Time 3D-LIDAR for Dynamic Fluctuation in Atmosphere
 研究代表者
 河仲 準二（KAWANAKA JUNJI）
 大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
 研究者番号：50264362

研究成果の概要（和文）：

高繰り返し・高パルスエネルギーの半導体レーザー励起全固体レーザーを開発し、これを光源とする3次元リアルタイムライダーシステムを構築しデモンストレーションを行い早い時間変化に対応できる優位性を示した。従来に無いキロヘルツの繰り返しが可能でジュール級のレーザー開発には独自のレーザー媒質と増幅手法を用いることで実現でき、次世代レーザーシステムに有力ないくつかの基盤技術を確認した。

研究成果の概要（英文）：

A diode-pumped solid-state laser with both high pulse energy and high repetition rate has been developed and used as a light source for 3-D real-time laser imaging detection and ranging. The LIDAR system demonstrated its high sampling time to show advantage for rapid changes of the atmosphere. The originally developed laser material and amplifier is attractive as one of the most promising basic laser technologies in the next generation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2012年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

ディーゼル廃棄微粒子等の浮遊粒子や窒素酸化物/硫黄酸化物等の汚染ガス、成層圏オゾン層などの大気環境計測には飛行機や気球による従来の直接計測に加え、近年、ライダーによる遠隔計測が実現され計測環境の自由度は大きく広がった。また、測定精度についても数 km 上空の汚染物質を ppb レベルの高精度でライダー

計測することに成功している。一方、オーロラや火山活動、竜巻などの自然現象や、貯蔵施設からの有毒ガス漏洩、航空機事故の主原因である晴天乱気流などの突発的な事象においては、大気環境が素早く変動するため三次元の広い空間領域にわたるリアルタイム計測が望まれる。

ライダーはレーザー光の空間スキャンにより原

理的に三次元計測が可能である。現在、主としてライダーに利用されているレーザーはフラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーであり、レーザー媒質内に発生する熱のために繰り返し周波数が 100Hz 以下(典型的には 10Hz)に制限されており、定方向計測が一般的である。上述の突発的な事象に必要な高速の空間スキャンによる三次元リアルタイム情報を得るためには高い繰り返しで動作する高出力レーザー光源と空間的に分布する対象物質からの散乱光を高速処理できる観測装置の開発が必要であった。

2. 研究の目的

大気環境の速い変化を計測可能な三次元リアルタイムレーザーライダー (ライダー) 技術を世界に先駆けて開発する。具体的には、新規のレーザー材料や増幅方法により従来にはない高い繰り返しで動作する高出力レーザー光源と、最新の受光素子と光学技術の組み合わせによって空間的に分布する対象物質からの散乱光を高速処理できる高感度観測装置を新規に開発し三次元リアルタイムライダーを試作する。空間スキャンによるデモンストレーションにより性能評価し汎用性など将来の指針を明らかにする。

3. 研究の方法

第一段階として数十 km 範囲内のレイリー・ミー・ラマン散乱計測用三次元リアルタイムライダー装置を試作する。デモンストレーションによりライダー装置の基礎データを収集、性能評価し、汎用化に至る問題点を検討する。

①高繰り返しライダー光源の開発

一般的なライダー光源の繰り返しは 100Hz 以下 (典型的には 10Hz) であるが、本研究では高速空間掃引を実現するため 1 桁以上大きな 1kHz とする。また、数十 km 遠方における大気分子、固体・液体粒子計測に必要なパルスエネルギー 1J を目指す。従って、既存の最大級の大気環境計測用ライダー光源に比べて 2 桁大きな平均出力が必要である。最も実現性の高いレーザーシステムは半導体レーザー (LD) 励起固体レーザー方式であり、開発における特に大きな障害であるレーザー媒質内で多量に発生する熱については次の 5 つの技術開発により対処する。

- 1) 新規のレーザー材料 従来のレーザー材料である Nd:YAG に替えて新規材料の Yb:YAG を用いることで熱発生量を 1/3 に低減する。
- 2) 低温冷却型レーザー材料 Yb:YAG を低温冷却することで熱伝導率を増加させ媒質内温度上昇を 1 桁程度低減する。
- 3) 高反射膜を持たないアクティブミラー型増幅方式 アクティブミラー型薄ディスク

増幅構造により温度上昇を抑える。加えて熱伝導率の低い高反射膜を無くし全反射に変更することでさらに温度上昇を抑える。

- 4) セラミクス技術によるコンポジットレーザー材料 Yb:YAG セラミクスと YAG セラミクスからなるコンポジット材料により励起部分とレーザー光との空間的なカップリング効率を高くして熱発生を抑制する。
- 5) 高輝度半導体レーザー Yb:YAG 材料の採用によりフラッシュランプから半導体レーザーへ励起源を変更しレーザー材料の吸収効率を向上させ熱発生を抑制する。

②高速受光解析システムの開発

ライダー光源の空間掃引装置と空間的に分布する散乱光の集光受光装置の高速化を行う。

- 1) ライダー光源の空間掃引 レーザー光の伝搬方向を高精度に制御し 1kHz に対応した高速制御を実現する。
- 2) 集光受光装置 空間走査されたレーザー光の散乱光を効率よく受光するため集光受光装置を開発し、高速動作を実現する。

③三次元リアルタイムライダーの試作

①と②を総合的に結合して三次元リアルタイムライダーを試作し、空間スキャンによるデモンストレーションにより性能評価し問題点を指摘するなど将来的な指針を示す。

①高繰り返しライダー光源の開発

- ・ 新規レーザー材料
- ・ 低温冷却による物性値制御
- ・ 薄膜の無いアクティブミラー増幅方式
- ・ セラミクス技術
- ・ 高輝度半導体レーザー
- ・ 均一照射光学技術
- ・ 増幅試験/熱耐力試験
- ・ ビーム品質改善

②高速受光解析システムの開発

- ・ 時間分解二次元受光装置
- ・ 信号光のノイズ低減
- ・ 高速解析プログラムの開発

③三次元リアルタイムライダーの試作 (デモンストレーション) と汎用化への検討

4. 研究成果

三次元リアルタイムライダーを実現するため、レーザー光源として①高繰り返しライダー光源を、散乱光計測装置として②高速受光解析システムの開発を行った。最終的に統合してシステム化し、③3次元リアルタイムライダーシステムを試作した。

①高繰り返しライダー光源の開発

①-1 新型レーザー増幅器(TRAM)の開発

最近新しいレーザー材料として注目されている Yb:YAG/YAG コンポジットセラミック技術を利用して従来にない高出力増幅システムとして全反射型アクティブミラー方式の増幅器 (**T**otal-**R**eflection **A**ctive-**M**irror, TRAM) を独自に設計製作した (図1)。

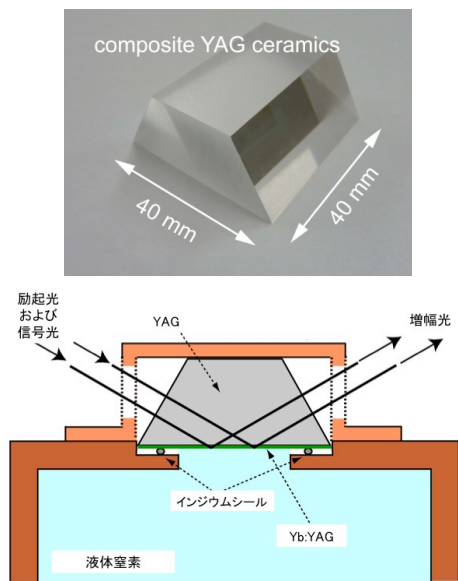


図1 低温冷却型全反射アクティブミラー増幅器(TRAM)

TRAM は高い熱耐力とパワースケーリングを有し、加えて高パルスエネルギー動作に耐える高い光誘起破壊閾値を有する増幅器として独自に設計した。加えてレーザー媒質面である Yb:YAG 面を液体窒素で低温冷却することで熱特性が格段に向上され、従来にない高熱耐力が得られる。

①-2 低温冷却型 TRAM による CW 発振器の開発

TRAM を用いて半導体レーザー (LD) 励起 CW レーザー発振器を開発した (図2)。励起強度 0.75kW/cm^2 の時に、最大出力 273W、光-光変換効率 65%、スロープ効率 72% を記録した (図3)。当時、数百 W 級として世界最高の効率であった。波長は 1030 nm である。本発振器により 1kW/cm^2 程度の CW

励起強度では、TRAM の発熱によるレーザー波面や出力への影響がないことを確認した。

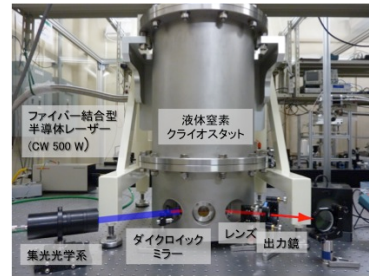


図2 TRAM を用いた LD 励起 CW 発振器

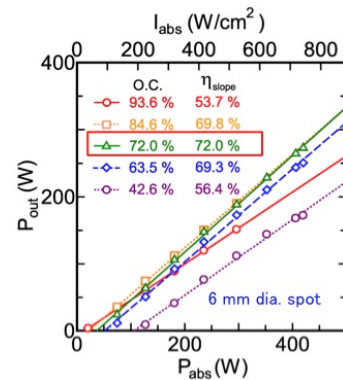


図3 CW 発振器の出力特性

①-3 多段 TRAM 型増幅器 (i-TRAMs) の開発

TRAM を増幅器として使用する場合、自然放増幅光 (ASE) を出さずに効率良いレーザー増幅を得るためには、高い 1 パス利得を得ることが重要である。このため、TRAM を 3 段有するモノリシックコンポジットセラミック増幅器 (**i**ntegrated-**T**RAMs, i-TRAMs) を初めて開発した (図4)。

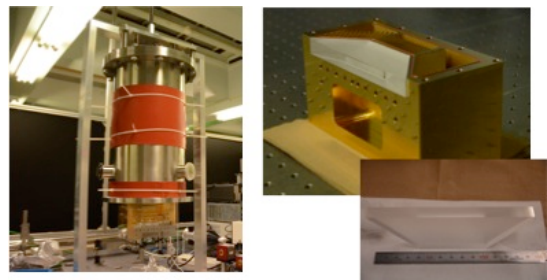
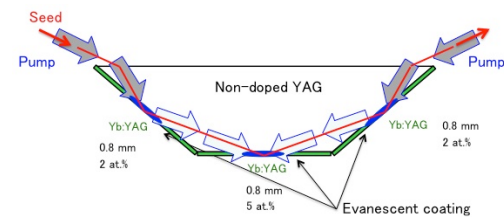


図4 低温冷却型 i-TRAMs

①-4 低温冷却型 i-TRAMs によるパルス増幅器の開発

i-TRAMs を 2 パス (往復) させたときの小信号利得を図 5 に示す。励起強度 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 、励起時間 1ms として繰り返し動作を 10Hz 、 30Hz 、 100Hz と変化させた。小信号利得はどの繰り返し周波数に置いても変化は無かった。前項の $1\text{kW}/\text{cm}^2$ の CW 動作において熱の影響が無いことを確認済みであり 1kHz で動作した場合にも問題ないと思われる。小信号利得は最大 $G=80$ が得られた。薄ディスク構造をもつレーザーとして 1 パスあたり $G\sim 9$ の世界最高の高利得が得られた。これらの値を使って増幅器への入射信号光のエネルギーを変えたときの増幅出力を計算した (図 6)。 1mJ の信号光は 4 パス後に 1J に増幅されることが分かった。実際に、レーザーシステムを開発し (図 7)、信号光は 1J に増幅され世界レベルの出力が得られた。

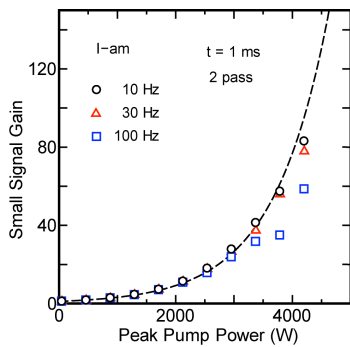


図 5 i-TRAMs の小信号利得の測定結果

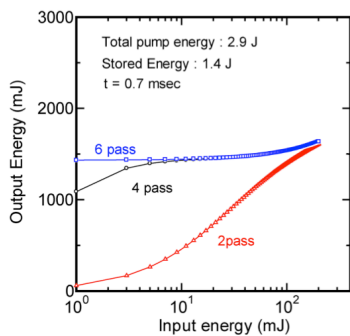


図 6 i-TRAMs による増幅パルスエネルギーの計算結果

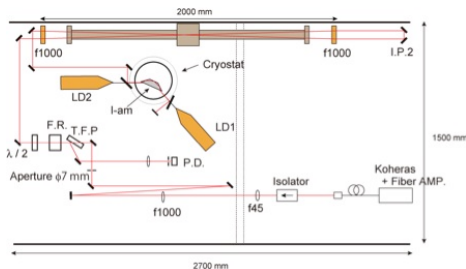


図 7 1J レーザーシステム

② 高速受光解析システムの開発

②-1 高速受光システムの設計/製作

レーザーのヘッドにはビーム径を 5 倍にするビームエキスパンダーと戻り光を防止するアイソレーターが組みこまれている。ビーム径は 8mm 程度であり、ビームの広がり角は 0.6mrad 程度であった。ライダー信号光の受光素子として浜松ホトニクス社製 Si-アバランシェフォトダイオード (APD) を用いた。素子は YAG レーザー用の $\phi 3.0\text{mm}$ の大受光面を持った S8890-30 であり、コンパクトな受光系とするために、アンプ・バイアス電源を組み込んだ特注モジュールを製作した。波長範囲は $400\sim 1100\text{nm}$ で、遮断周波数は 100MHz と非常に高速である。ライダー信号の観測には Tektronix 社のデジタルオシロスコープ TDS520D を用いた。同時に 2 ch の表示ができ、 500MHz の帯域幅を持っている。GP-IB ケーブルで PC から操作が可能であり、ソフトウェアを用いてデジタルデータを自動取得可能である

②-2 信号光の S/N 比の向上

昼間での観測を可能にするために、Si-APD の素子の前に高性能レーザーラインバンドパスフィルターを用いた。半値全幅は 4nm と非常に狭い上に使用する波長帯域で 90% と非常に高い。

③ 三次元リアルタイムライダーの試作 (デモンストレーション)

ライダーシステムにより大気中エアロゾルの観測を行った。図 8 に観測時の様子を示す。また、観測されたライダー信号の一例を図 9 に示す。500 回積算モードでの 1 分の信号であるが、オシロスコープのトリガー取得時間がレーザーの繰り返し周波数に比べてかなり遅いので、300 回程度しか積算は行えないが、十分な信号強度である。図 9 の下のグラフが外部トリガー用の信号であり、そのピークの位置付近を距離 0m としている。青線で示したものがライダー信号であり、 $1\mu\text{s}$ に見える信号がミー散乱によるエアロゾルの信号であり、 $10\mu\text{s}$ に見える信号が雲の信号である。図 10 が 10 分間連続して観測した雲・エアロゾルの高度分布図である。測定は 500 回の十分な信号積算を取っているにもかかわらず 1 分間隔で計測可能である。得られた散乱信号は距離の 2 乗で補正して、ログスケールで表示してある。800 m まで得られている信号がエアロゾルの信号であり、3.0 km 付近に見られる信号が雲からの信号である。



図8 ライダー観測の様子

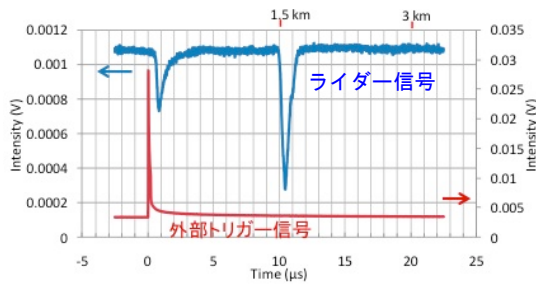


図9 大気中エアロゾルのライダー信号

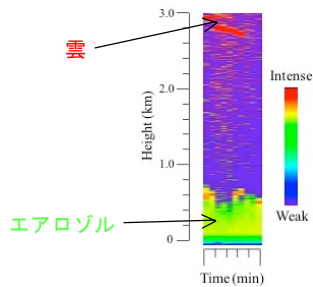


図10 大気中エアロゾルおよび雲の時間変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① J. Kawanaka, Y. Takeuchi, A. Yoshida, S. J. Pearce, R. Yasuhara, T. Kawashima, and H. Kan, “Highly Efficient Cryogenically Cooled Yb:YAG Laser”, *Laser Physics* **vol. 20**, No. 5, 1079-1084 (2010).
- ② H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, K. Takeshita, S. Ishii, and Y. Izawa, “Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb³⁺:YAG composite

ceramics,” *Optics Express* **Vol. 19**(3), pp. 2448-2455 (2011).

- ③ Y. Takeuchi, J. Kawanaka, A. Yoshida, R. Yasuhara, T. Kawashima, H. Kan and N. Miyanaga, “Sub-kHz cryogenic Yb:YAG regenerative amplifier by using a total-reflection active mirror” *Appl. Phys. B* **vol. 104**, Number 1, pp. 29-32(2011).
- ④ J. Kawanaka, Y. Takeuchi, H. Furuse, T. Nakanishi, A. Yoshida, T. Norimatsu, T. Kawashima and H. Kan, “Total-reflection active-mirror amplifier for high pulse energy and high average power by using a composite ceramic,” *Optical Materials*, **Vol. 34**(6), 977-980 (2012).
- ⑤ Hiroaki Furuse, Junji Kawanaka, Noriaki Miyanaga, Haik Chosrowjan, Masayuki Fujita, Kenji Takeshita, and Yasukazu, “Output characteristics of high power cryogenic Yb:YAG TRAM laser oscillator,” *Opt. Exp.* **Vol. 20**(19), 21739-21748 (2012).
- ⑥ Ryo Yasuhara, Hiroaki Furuse, Akifumi Iwamoto, Junji Kawanaka, and Takagimi Yanagitani, “Evaluation of thermo-optic characteristics of cryogenically cooled Yb:YAG ceramic,” *Opt. Exp.* **Vol. 20**, Iss. 28, pp. 29531-29539 (2012).
- ⑦ J. Kawanaka, D. Albach, H. Furuse, N. Miyanaga, T. Kawashima, and H. Kan, “A monolithic composite ceramic with total-reflection active-mirrors for joule-class pulse energy amplification,” *Optical Materials* **vol. 35** issue 4, pp. 770-773(2013).

[学会発表] (計7件)

- ① (Invited) J. Kawanaka, “High pulse energy and high average power laser by using a composite ceramic,” 6th Laser Ceramics Symposium, Munster, Germany, December 6-8, (2010).
- ② (Invited) J. Kawanaka, H. Furuse, D. Albach, Y. Takeuchi, A. Yoshida, T. Kawashima, H. Kan, “Cryogenic Yb:YAG Total-Reflection Active-Mirror Lasers,” Conference on Lasers and Electro-Optics - European Quantum Electronics Conference 2011 (CLEO Europe - EQEC 2011), Munich, Germany, May 22-26, 2011, CA10.1.
- ③ (Invited) J. Kawanaka, H. Furuse, D. Albach, A. Yoshida, T. Kawashima and H. Kan, “Cryogenic total-reflection active-mirror for high-power ultrafast

pulses,” 20th International Laser Physics Workshop, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 11-15, 2011, seminar 4. 6. 1.

- ④ I. Kawanaka, H. Furuse, D. Albach, Y. Takeuchi, A. Yoshida, T. Kawashima, and H. Kan, “Joule-Class Picosecond Amplifier by Using Cryogenic Yb:YAG Total-Reflection Active-Mirror,” International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim 2011, Sydney, Australia, 28 August-1 September, 2011, 4220-CT-3.
- ⑤ I. Kawanaka, H. Furuse, T. Kawashima, and H. Kan, “Joule-Class Repeatable Laser Development with a Monolithic Composite Ceramic of Multi Total-Reflection Active-Mirrors,” 7th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications, Furama Riverfront, Singapore, 14-17 Nov. 2011, 0-14.
- ⑥ I. Kawanaka, H. Furuse, T. Kawashima, and H. Kan, “Chirping Regenerative Amplifier with Dispersive Optics,” OSA Topical Meeting, Advanced Solid-State Photonics (ASSP) 2012, Rancho Bernardo Inn, San Diego, California, 29 Jan. - 3 Feb. 2012, AT4A.19.
- ⑦ I. Kawanaka, H. Furuse, R. Yasuhara, N. Miyanaga, K. Matsumoto, T. Kawashima, and H. Kan, “1J, 100Hz, Sub-ns DPSSL Development Using Cryogenic Yb:YAG/YAG Composite Ceramics for OPCPA,” The International Committee on Ultra-High Intensity Lasers (ICUIL 2012), Mamaia, Romania, 16-21 Sep. 2012, W3-8 (2012).

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：レーザー利得媒質、レーザー発振器およびレーザー増幅器

発明者：河仲進二、宮永憲明、古瀬裕章、今崎一夫、佐伯拓、竹下賢司、石井伸也、齊藤智子

権利者：同上

種類：特許

番号：特開 2010-114162

出願年月日：

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：Laser Gain Medium and Laser Oscillator using the Same

発明者：J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Furuse, K. Imasaki, T. Saiki, K. Takeshita, S. Ishii, T. Saito

権利者：同上

種類：国際特許

番号：US8068523

取得年月日：

国内外の別：国外

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河仲 進二 (KAWANAKA JUNJI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究所
ター・准教授

研究者番号：50264362

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：