

CO<sub>2</sub> DIAL 用 1.6 $\mu$ m レーザの高出力化Development of 1.6 $\mu$ m high power laser for CO<sub>2</sub> DIAL

柴田泰邦、長澤親生、阿保 真

Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa and Makoto Abo

首都大学東京システムデザイン研究科

Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

**Abstract**

We developed the OPO laser system with the 10mJ at 200Hz (2.0W) output for 1.6 $\mu$ m CO<sub>2</sub> DIAL in 2007. The development of the higher power laser system for the next generation 1.6 $\mu$ m CO<sub>2</sub> DIAL has been conducted. The new laser system consists of the OPO with the QPM crystal and the high repetition LD excited Nd:YAG laser oscillator and amplifier. The state of the art of the high power laser development is reported.

**1. はじめに**

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の空間分布を測定するため、1.6 $\mu$ m 帯の波長を利用した差分吸収ライダー (DIAL) の送信レーザの高出力化を進めている。高高度まで気体濃度を測定する DIAL では、高感度の光検出器と1パルス当たりのエネルギーの大きなレーザを用いることが効果的である。我々は、擬似位相整合 (QPM: Quasi Phase Matching) デバイスを用いた光パラメトリック発振器 (OPO: Optical Parametric Oscillator) により、1.6 $\mu$ m 帯 CO<sub>2</sub> 吸収線に波長同調可能なレーザ光を実現し、10mJ@200Hz (2W) を得た<sup>1</sup>。現在、CO<sub>2</sub> 測定精度向上のために OPO の高出力化を行っており、講演では、本レーザの開発状況について報告する。

**2. 高出力・高繰り返しNd:YAG励起OPOシステム**

光パラメトリック発振は、自発分極を持つ光学結晶に波長 $\lambda_p$ の励起光が入射した場合に、 $\lambda_p$ より長波長を発生させる技術であり、シグナル光とアイドラ光が発生する。 $\lambda_p$ にNd:YAGレーザの基本波長 1064nmを用い、 $\lambda_s$ が 1572nm の場合、アイドラ光の波長 $\lambda_i$ は、3292nmとなる。

励起光からシグナル光への変換効率 $\eta_s$ は、位相不整合がない理想条件での値として、以下の式で与えられる。

$$\eta_s = \frac{\lambda_i}{\lambda_s + \lambda_i} \tanh^2(gL) \quad (2)$$

ここで、 $L$ は結晶長[mm]、 $g$ はパラメトリック効果の微小信号利得で $g = \sqrt{\kappa I_p}$ で表せる。ここで、 $\kappa$ は結合係数、 $I_p$ は励起光密度[MW/cm<sup>2</sup>]である。 $\kappa=2.6 \times 10^{-5}$ 、 $L=35$ mm、励起光ビーム径 2.5mm とした場合の励起出力に対するシグナル光変換効率 $\eta_s$ とシグナル光出力を Fig.1 に示す。この結果から、シグナル光出力 20mJを得るためには、励起出力 36mJ ( $\eta_s=56\%$ )が必要となる。しかしながら、先行研究では励起出力 40mJでシグナル光 10mJ ( $\eta_s=25\%$ )しか得られていない。理由として、結晶が位相不整合であることと、励起用 Nd:YAG レーザが高次モードを含む状態で、ビームクオリティ(M2)が約 1.3 であったため、理想的な波長変換が行われなかった。

そこで、Nd:YAG レーザの M2 を改善することで $\eta_s$ を向上させ、励起出力の高出力化によって、シグナル光出力の高出力化を図る。また、気温・気圧の同時測定を行うため、500Hz の高繰り返しを目指す。最終的な 1.57 $\mu$ m の出力は 20mJ@500Hz (10W) を目標とする。

Fig.2 に開発中の高出力・高品質 Nd:YAG レーザ励起 OPO システムのブロック図を示す。TEM00 モードの高繰り返し LD 励起 Nd:YAG レーザ (OSC) を LD 励起 Nd:YAG のアンプで増幅し、OPO を励起する。

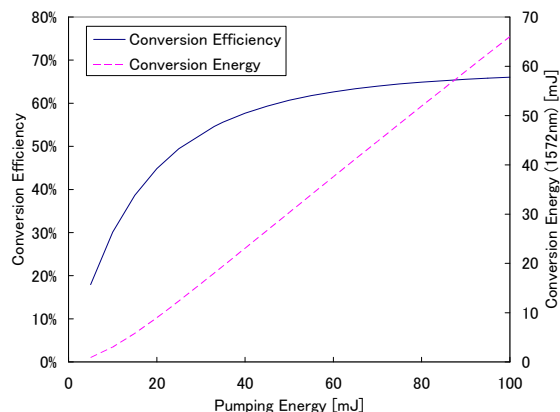


Fig.1 Theoretical calculation of the wavelength conversion efficiency and conversion energy.

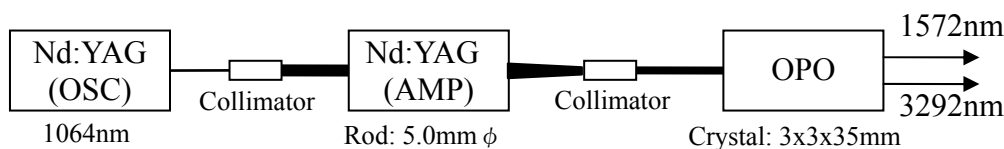


Fig.2 Schematic of Nd:YAG laser pumped OPO system.

Nd:YAG レーザ (OSC) の出力は 12mJ@400Hz (4.8W)、パルス幅 10ns、ビーム径 1.2mm、TEM00 モードで M2 は約 1.2 である。先行研究で用いた Nd:YAG レーザと比較して、ビーム品質が改善された。次に、コリメータでビーム径を 5.0mm に広げ、ロッド径 5.0mm の LD 励起 Nd:YAG (AMP) で増幅したところ、1064nm 出力は約 3 倍の 35mJ@400Hz (14W) を得た。Fig.3 に示すように横モードは TEM00 を維持しているが、熱レンズ効果によりビーム径が絞れていることが確認された。AMP 段の出力をコリメータでビーム径 2.5mm に整形し、OPO (結晶サイズ 3×3×35mm) を励起した。Fig.4 に OPO 入出力特性を示す。35mJ 励起で 1572nm において 12mJ@400Hz (4.8W) を得た。 $\eta_s$  は先行研究の 25% から 34% に、スロープ効率は先行研究の 31.3% から 43.7% とそれぞれ改善し、横モードの改善効果が出ている。

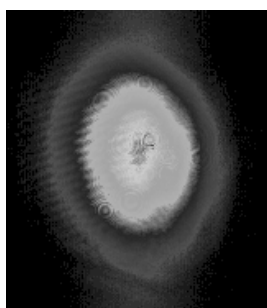


Fig.3 Beam profile of Nd:YAG laser (AMP).

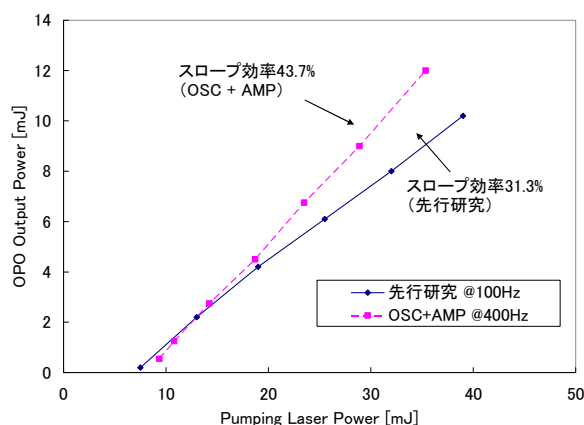


Fig.4 OPO output energy as a function of pumping laser energy.

### 3. まとめ

本研究では DIAL により CO<sub>2</sub> の鉛直分布の観測を行うために、1.6 $\mu$ m 高出力 OPO レーザの開発を行っている。先行研究では励起用 Nd:YAG レーザの高次横モードが問題となっていたが、今回開発中の LD 励起 Nd:YAG レーザによって、30mJ@400Hz (12W) において TEM00 を維持していることを確認した。この励起光源を用いて OPO を発振させたところ、12mJ@400Hz (4.8W) を得た。先行研究にくらべ、出力で 2.5 倍、 $\eta_s$  は 34% と先行研究の 25% から改善し、スロープ効率も 43.7% と先行研究から 12.4% 改善し、横モードの改善効果が出ている。

最終目標である 1.57 $\mu$ m で 20mJ@500Hz (10W) を実現するには、1064nm で 70mJ 必要であると推測できる。今後、Nd:YAG レーザを 2 段アンプにすることで最終目標の実現を目指す。

### <謝辞>

本研究は科学技術振興機構「先端計測分析技術・機器開発事業」により行われている。

### 参考文献

1. D. Sakaizawa, C. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato, T. Sakai, Development of a 1.6 $\mu$ m differential absorption lidar with a quasi phase matching OPO and photon-counting detector for the vertical CO<sub>2</sub> profile, Applied Optics, 48(4), 748, 2009.