



ていた。CO<sub>2</sub> の密度に加えて気温や気圧も同時に測定するには共振器制御機構が複雑になってしまう。そこで、共振器を組まない OPG を採用することで、システムを容易にすることが出来る。QPM 素子で波長変換された 1572nm は 1~2nm 程度の帯域を持っているが、DIAL 観測に用いる波長のシード光源を QPM 素子にインジェクションすることで狭帯域化されたスペクトル発振が可能となる。また、OPG の後段に OPA (Optical Parametric Amplifier) を設置することにより高出力化を図る。Fig.1 に LD 励起 Q-swNd:YAG レーザ励起 OPG レーザのブロック図を示す。Nd:YAG レーザはインジェクションにより狭帯域化され、最大出力 100mJ@500Hz, TEM00 モードである。OPG レーザは、CO<sub>2</sub> セルを使って吸収線に波長同調した 1.57μmDFB レーザを注入することにより狭帯域化させている。Fig.2 に OPG の入出力特性を示す。スロープ効率は 17.0% であった。Fig.3 に OPG/OPA レーザシステムのブロック図を示す。OPG で波長変換されなかった Nd:YAG レーザのビーム品質は良くないので OPA の励起光には用いず、Nd:YAG レーザのパルス光を 2 つに分けて OPA を励起している。Fig.4 に OPG/OPA レーザの入出力特性を示す。OPG 出力は 1.9mJ で、OPA における増幅作用の閾値は 15mJ@1064nm であった。また、スロープ効率は 35.8% であり、OPG 単体より増幅効果が高いことが示された。Fig.5 に従来の OPO と OPG/OPA 出力の横モードを示す。OPO は横モードが TEM00 から崩れていたが、OPG/OPA は TEM00 モードになっている。

### 3. ヨウ素安定化Nd:YAG励起OPG

光パラメトリック発振において、式(1)より、励起光 1064nm の波長が安定していないと、CO<sub>2</sub>-DIAL に用いる波長 1572nm も安定しない。従来から使用していたパルス Nd:YAG レーザ用シーダーの DFB ファイバーレーザ (1064.467 nm) は、8 時間で 0.5 pm (130 MHz) の波長シフトがあり、一晩のライダー観測に用いるには波長安定度が不十分であった。Nd:YAG レーザ 1064 nm の第 2 高調波 532 nm 付近には、ヨウ素分子の強い遷移があり、大きい吸収

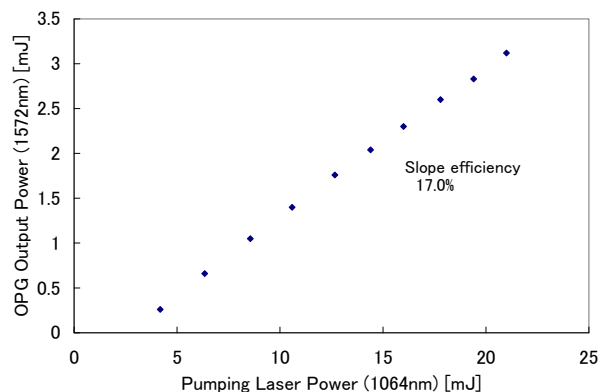


Fig.2 Input / output characteristics of the OPG lasers

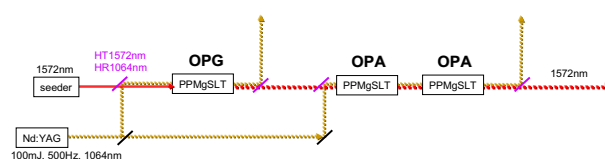


Fig. 3 Schematic diagram of the 1.6 μm OPG/OPA transmitters for CO<sub>2</sub>-DIAL.

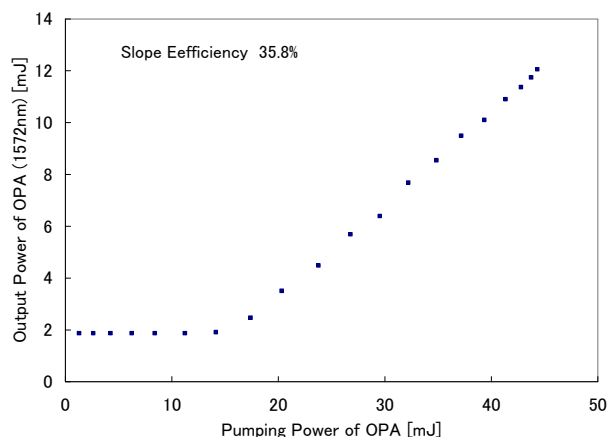


Fig.4 Input / output characteristics of the OPA laser

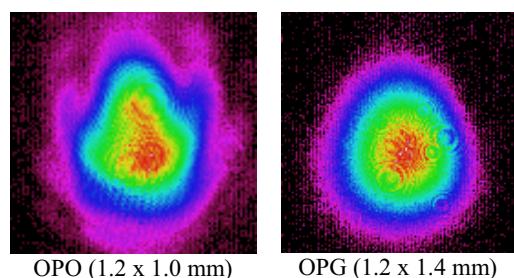


Fig. 5 Beam profiles of OPO and OPG.

信号が得られることから Nd:YAG レーザの波長安定化に良く用いられる。そこで、1.6 $\mu$ mOPG 励起用の 532nmヨウ素安定化 Nd:YAGレーザを新たに開発し、OPG レーザの波長安定化を図った。

Fig.6 に今回開発したヨウ素安定化 Nd:YAG レーザの構成図を示し、Fig.7 に波長安定化に利用したヨウ素吸収スペクトル (R86, 中心波長 532.128nm, 25°C)を示す。シードレーザであるリング共振器型 cw Nd:YAG レーザ (InnoLight Mephisto, 350mW@1064nm)の一部を PPLN 結晶に入射し、発生した 532nm をヨウ素セルに通して光検出器(フォトダイオード)で受光する。この受光信号強度が常に Fig.7 の波長 $\lambda_{set}$  相当の電圧になるよう、cw Nd:YAGレーザの結晶温度を0.005°C単位 (11.3pm/°C)で制御した。Fig.8に Free Runとヨウ素安定化での Nd:YAG シードレーザの波長安定度を示す。Free Run では時間と共に波長がずれてしまうが、ヨウ素安定化したシードレーザは波長計 (Highfinesse WS7-IR) の絶対精度 0.15pm (40 MHz)以下の安定度を示した。Fig.9に Free Runとヨウ素安定化でのパルスNd:YAG レーザの波長安定度を示す。Fig.8 同様にヨウ素安定化した場合、波長計 (Highfinesse WS7-IR) の絶対精度以下の安定度を示した。Fig.9 中に見られる周期約 11 秒の揺らぎは、パルス Nd:YAG レーザの共振器制御の周期に一致しており、シーダーが原因の揺らぎではない。Fig.10 にヨウ素安定化での Nd:YAG シードレーザの長時間波長安定度を示す。8 時間にわたり、波長計の絶対精度以下の安定度を實現した。

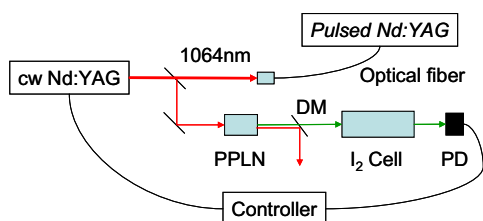


Fig. 6 Diagram of the seed injection and wavelength-locking system for the Nd:YAG laser.

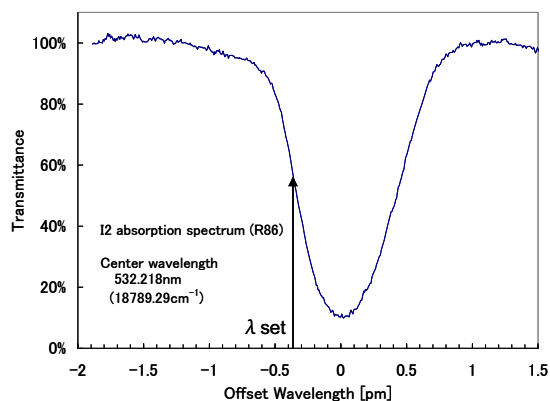


Fig. 7 Absorption spectrum of iodine molecular. (R86, 532.128nm)

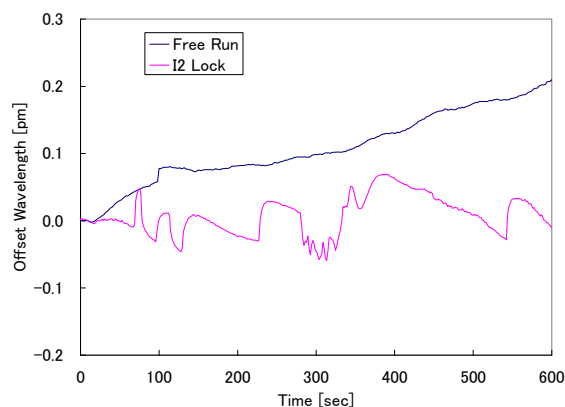


Fig. 8 Stabilities of seed laser wavelength as a function of time.

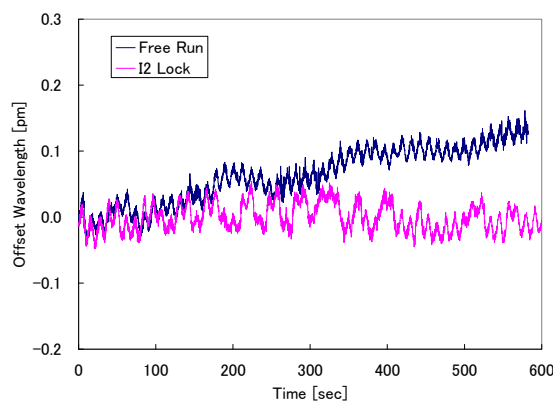


Fig. 9 Stabilities of pulsed Nd:YAG laser wavelength as a function of time.

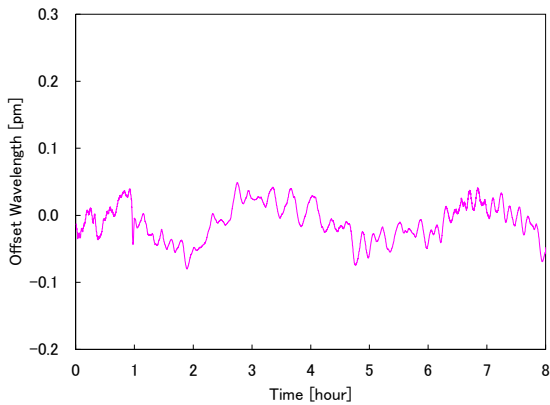


Fig. 10 Stabilities of seed laser wavelength as a function of time for 8 hours.

### 3. まとめ

DIAL による CO<sub>2</sub> 鉛直分布を行う次世代送信システムとして、より波長安定化が望める共振器不要の OPG/OPA レーザシステムの開発を行ない、500Hz, 12mJ で TEM00 モードの出力を得た。また、OPG レーザの励起光源である Nd:YAG レーザの波長安定化を行った。従来シード光源である DFB ファイバーレーザの波長安定度は 8 時間で 0.5pm と DIAL 観測には不十分であったが、ヨウ素安定化 Nd:YAG シードレーザを用いることで、8 時間以上にわたり波長計の計測精度 0.15pm を下回る安定度を実現した。今後、ヨウ素安定化 Nd:YAG レーザを用いた OPG レーザの波長安定度を評価する。

### <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.
2. Y. Shibata, C. Nagasawa and M. Abo, "QPM-OPG based high power 1.6  $\mu$ m laser transmitter for CO<sub>2</sub>-DIAL", *Proc. of ILRC25*, 243-246, 2010.