

# DPSS レーザを用いた可搬型 SO<sub>2</sub>-DIAL の開発

加藤 美優, 大川裕司, 柴田 泰邦  
首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

## Portable SO<sub>2</sub>-DIAL using laser diode pumped solid state light source

Miyu KATO, Yuji OKAWA and Yasukuni SHIBATA  
Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Active volcanoes eject toxic gases into atmosphere. Observation with direct sensors are dangerous in active fumaroles. Also, observations with CCD cameras only know column volume. In this paper, we propose a new SO<sub>2</sub>-DIAL system using the SHG of a compact DPSS laser 593 nm. It was found that by selecting a wavelength with a small temperature dependency of the absorption cross section, it is possible to suppress the measurement error to 3 % even at an atmospheric temperature change of 60 °C. The DIAL system needs to precisely control two wavelengths (on-line and off-line) in order to obtain sufficient measurement accuracy. Therefore, we developed a wavelength control system. By controlling the crystal temperature of the DPSS within 0.01 K, wavelength stability within 1.0 pm was achieved, and the temperature dependency of the oscillation wavelength is 43.5 pm/K.

**Key Words:** SO<sub>2</sub>, DIAL, All-solid-state laser, DPSS

### 1. はじめに

この 1~2 年の間に国内で複数の火山が噴火または噴火の兆しを見せており、噴火予測、防災対策が重要課題となっている。従来の SO<sub>2</sub>-DIAL は大型かつ発がん性物質を含む色素レーザーを用いており、安全性・機動性に欠ける。バンなどの車やドローンなどの無人飛行体に小型の SO<sub>2</sub>-DIAL を搭載できれば、人体に有害な SO<sub>2</sub> を含む火山ガスに人間が近づくことなく、また、広範囲に渡る観測が期待できる。

可搬性に富む小型の SO<sub>2</sub>-DIAL システムを新たに開発するため、光源に LD 励起の DPSS レーザ 593nm の第 2 高調波 297nm 付近を用いることを想定し、最適波長の組み合わせについて前回報告した<sup>2)</sup>。しかし、火口噴気温度は 418K 前後と高温になるため、SO<sub>2</sub> の吸収断面積の温度依存性を考慮する必要がある。本研究では、SO<sub>2</sub> の吸収断面積の温度依存性を考慮した上で最適波長の再検討をした。また、実際の DIAL 観測に必要な 1mJ クラスの 2 波長 Nd:YVO<sub>4</sub> レーザの和周波を用いた 593nm 光源の検討をした。

### 2. 最適波長の再検討

298K から 358K まで 20K 刻みの SO<sub>2</sub> 吸収断面積を HITRAN データベースより取得した。Fig.1 に各温度でのスペクトルを示す。DIAL 測定では、式(1)に示す DIAL 方程式からガス濃度  $n$  を算出する。 $\Delta\sigma$  は on 波長と off 波長の差分吸収断面積、 $\Delta r$  は距離分解能、 $P(r)$  は距離  $r$  からの受信信号強度である。観測領域において、想定した温度と実際の温度が異なると  $\Delta\sigma$  の値が正しい値からずれ、誤差が生じる。SO<sub>2</sub>-DIAL の視線方向の温度分布を計測するには、別の温度ライダーを用意する必要があり、機能性に欠ける。そこで、吸収断面積の温度依存性が小さい 2 波長を選択することにより、温度分布を計測しなくても SO<sub>2</sub> 濃度の観測誤差 10% 以内が得られるか検討した。ライダーから水平方向に、距離 400~600m の区間が SO<sub>2</sub> 濃度 30.0ppm、気温 358K とし、それ以外の区間は SO<sub>2</sub> 濃度 0.07ppm、気温 298K とするモデ

ルを仮定した。

$$n = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta r} \left[ \ln \left( \frac{P_{off}(R2) P_{on}(R1)}{P_{off}(R1) P_{on}(R2)} \right) \right] \quad (1)$$

吸収断面積の温度依存性が小さい on 波長 297.84nm, off 波長 297.76nm を選択すると、上記モデル全区間の気温を 298K と設定した場合でも、30.0ppm 区間の DIAL 測定値は 29.1ppm (3% の誤差) となる。この結果から、上記 2 波長を選択することで、測定誤差の温度依存性が 0.05%/K = (3%/60K) となり、418K の噴気中では 6.0% (30.0ppm に対し 1.8ppm) の誤差と推測できる。

レーザー出力 1mJ、望遠鏡直径 10cm、積算回数 600,000 回、距離分解能 20m の条件において、SN から得られる統計誤差は 3.5% であり、吸収断面積の温度依存性による誤差 6.0% を考慮してもトータルで 9.5% の誤差となり、目標である 10% の精度に収めることが可能であることが分かった。

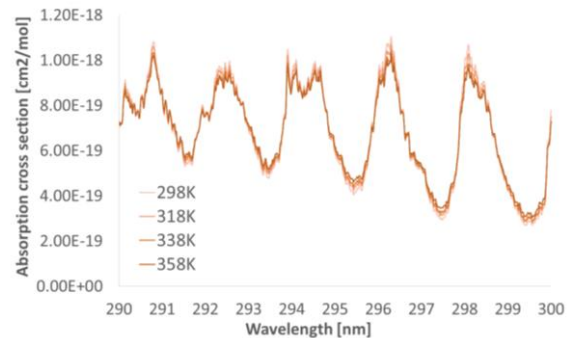


Fig.1 Absorption cross section of SO<sub>2</sub> at various temperature.

### 3. 2 波長 Nd:YVO<sub>4</sub> レーザを用いた紫外光発生

Fig.2 に 2 波長 Nd:YVO<sub>4</sub> レーザ (1064nm, 1342nm) の和周波 (593nm) の第 2 高調波 (297nm) を生成する概要図を示す。パルス光生成のため V<sup>3+</sup>:YAG 結晶のパッシブ Q スイッチを用いることで、小型化、省

電力化を図る<sup>3)</sup>。DIAL 観測に必要な和周波出力は 2W@593nm 以上である。1342nm におけるビーム径を  $R1=0.1\text{cm}$ , 1064nm におけるビーム径を  $R2=0.1\text{cm}$  とし, LD1, LD2 の平均出力  $E1$ ,  $E2$  をそれぞれ 1W~30W まで 1.5W 刻みで変化させた際の和周波平均出力  $P3$  を検討した。結果を Fig.3 に示す。

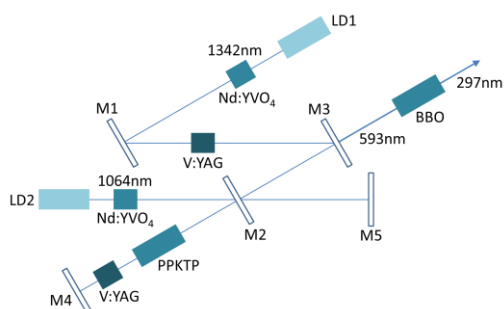


Fig.2 Outline of dual-wavelength Nd:YVO<sub>4</sub>

Fig.3 より,  $E1$  は 13W で  $P3$  の最大値を取り, また,  $E2$  の変化に対して  $P3$  は単調増加をしている。尾根線に注目すると,  $P3$  の極値は直線で近似ができ,

$$E_2^T = 1.57E_1^T + 6.86 \quad (2)$$

式(2)の条件下において, 和周波出力  $P3$  の最大値が 3W となり, DIAL 観測に十分な出力を得ることが可能であることが分かった。

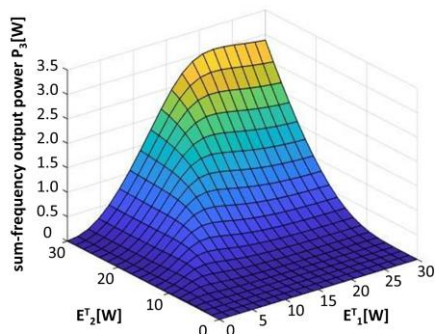


Fig.3 sum-frequency output power  $P3$  to  $E1$ ,  $E2$

#### 4. DPSS 発振波長の安定化

DIAL 測定において, 2 波長の波長安定度, すなわち, 吸収断面積の安定度が測定精度に大きく影響する。そこで, 試作機用に購入した市販の DPSS レーザ (593nm) の発振波長の温度依存性を調べた。Fig.4 に  $\pm 0.01\text{K}$  で温調した場合と温調しない場合での DPSS レーザの発振波長の揺らぎを示す。温調なしでは, 1 時間当たり  $\pm 10\text{pm}$  以上の揺らぎが生じた。この揺らぎは室温の変化に発振波長が追従したものである。 $0.01\text{K}$  で温調することにより, 1 時間以上にわたり波長計の精度以下の  $1\text{pm}$  以内での安定度が実現できた。また, 制御温度を変えることにより, DPSS の発振波長を  $43.5\text{pm/K}$  で制御できることも分

かった。1 台の DPSS で温度を変えながら 2 波長を切り替えることは困難であるため, on 波長用と off 波長用の 2 台の DPSS を用いることになるが, それぞれの DPSS を  $1\text{pm}$  以内で波長制御可能である。

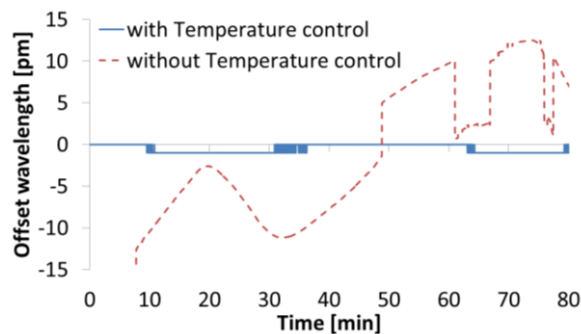


Fig.4 Frequency stabilization for the DPSS laser with temperature control and without temperature control.

#### 5. まとめ

火口付近の  $\text{SO}_2$  濃度分布を計測するため, DPSS レーザを用いた可搬型  $\text{SO}_2$ -DIAL システムを新たに提案した。今回,  $\text{SO}_2$  吸収断面積の温度依存性を考慮した上で最適波長の再検討をした。吸収断面積の温度依存性が小さい on 波長  $297.84\text{nm}$ , off 波長  $297.76\text{nm}$  を選択すると, 測定誤差の温度依存性が  $0.05\%/K$  となることが分かった。また, 開発予定のライダー仕様において, 統計誤差を含め目標である 10%の精度に収めることが可能であることが分かった。

次に, 実際の DIAL 観測に必要な  $1\text{mJ}$  クラスの 2 波長 Nd:YVO<sub>4</sub> レーザの和周波を用いた 593nm 光源の検討をした結果, 和周波出力は最大値 3W と DIAL 観測に十分な出力を得ることが可能であることが分かった。

さらに, 試作機用の DPSS 基本波の発振波長の温度依存性は  $43.5\text{pm/K}$  で  $0.01\text{K}$  の温調により  $1\text{pm/h}$  以内での安定度を実現した。この安定度は,  $\text{SO}_2$ -DIAL 測定において, 十分な波長安定である。

#### 謝辞

本研究は科研費 JP16K12850, JP18H01667 の助成を受けている。

#### 参考文献

- 1) T. Fujii, et. al., Appl., Opt., 43, 524-531, 2002.
- 2) 加藤美優, 柴田泰邦, 第 35 回レーザーセンシングシンポジウム, P-A7, 2017.
- 3) B. Abdul Ghani, et. al., Act Phys Pol A, 122, 103-108, 2012.