

小型半導体励起固体レーザーを利用した可搬型 SO₂-DIAL の検討

加藤 美優, 柴田 泰邦

首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Study on a mobile SO₂-DIAL using compact diode pumped solid-state laser

Miyu KATO and Yasukuni SHIBATA

Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Active volcanoes eject large amounts of air pollutants into the atmosphere. Variations in gas emissions and the changes in the gas composition could also be important in predictions of volcanic activity. In this paper, we present the combination of optimal wavelengths for a new SO₂ differential absorption lidar (DIAL) system using the second harmonic generation of a compact diode pumped solid state (DPSS) laser 593 nm. By the selection of appropriate measurement wavelengths, the effects of ozone and aerosols can be suppressed. In principle, the accuracy can be improved to below 10 % for 20 m range resolution. Moreover we founded that the wavelength fluctuation of the DPSS laser is less than 1.0 pm with 0.01K temperature control. It is enough for the SO₂ concentration measurement by the DIAL system.

Key Words: SO₂, DIAL, DPSS, mobile lidar

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、防災対策が重要な課題となっている。従来のSO₂-DIALは大型かつ発ガン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¹⁾。バンなどの車やドローンなどの無人飛行体に小型のSO₂-DIALを搭載できれば、人体に有害なSO₂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。

本研究では、可搬性に富む小型SO₂-DIALシステムを新たに開発するため、光源にLD励起のDPSSレーザー593 nmの第2高調波を用いることを想定し、最適波長の組み合わせについて検討した。さらに、試作機用のDPSSレーザーの波長安定度を測定し、SO₂-DIALへの適用について評価した。

2. 可搬型 SO₂-DIAL の波長選択

SO₂とO₃の吸収断面積をFig.1に示す²⁾。SO₂の吸収スペクトルは楕状に分布しており、各スペクトルにはA, B, C, ...と番号が振られている。

SO₂-DIALにおける2距離R1, R2間の平均気体濃度 $n[\text{m}^3]$ は

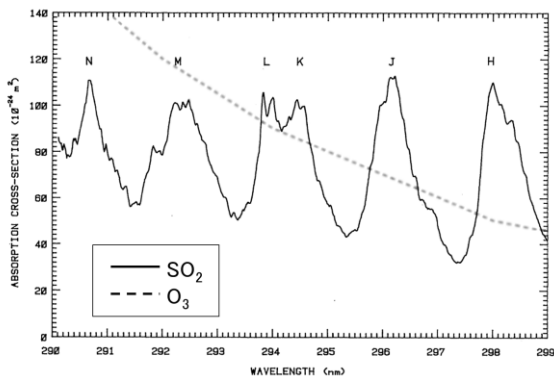


Fig.1 Absorption cross sections of SO₂ and O₃.

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

で与えられる。ここで、

$$X = \frac{\Delta\alpha_{mol}}{\Delta\sigma}, \quad Y = \frac{\Delta\alpha_{aero}}{\Delta\sigma}, \quad Z = \frac{N_{IG}\Delta\sigma_{IG}}{\Delta\sigma}$$

である。 $\Delta\alpha_{mol}, \Delta\alpha_{aero}, \Delta\sigma$ はそれぞれ on 波長と off 波長の差である。 $N_{IG}, \Delta\sigma_{IG}$ はそれぞれ干渉する測定対象外の気体の濃度 $[\text{m}^3]$ と on 波長と off 波長の差分吸収断面積 $[\text{m}^2]$ の差である。また、DIALの測定誤差要因のうち、受信信号強度に起因する統計誤差は

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2n\Delta\sigma\Delta r} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \left\{ \frac{(P_{ij} + B_j)F + D}{P_{ij}^2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

で与えられる³⁾。ここで、 B_j は背景光雑音、 F はディテクターの雑音指数、 D はダークカウント、 $i=1,2$ は距離 $R1, R2$ に、 $j=1,2$ は on 波長、off 波長に相当する。

SO₂ガスの人体への影響は、0.3 ~ 1 ppm で臭いを検知、5 ppm~で上気道を刺激、30 ~ 40 ppm で呼吸困難、50 ~ 100 ppm 濃度下では1時間以上留まると危険であり、400 ppm~では数分で生命に危険が及ぶ。そこで、Fig.2に示す条件を仮定した。

海拔1 kmの地点で計測を行うものとし、SO₂の濃度分布を水平距離400 ~ 600 mの地点で30 ppm、それ以外の地点では地表付近の平均値0.07 ppmとした。

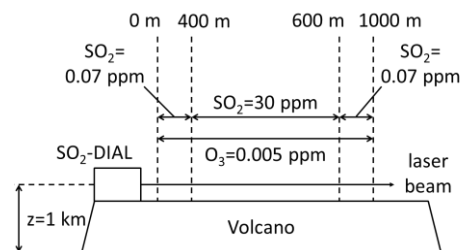


Fig.2 Schematic of simulation setup for SO₂-DIAL.

また、 O_3 の濃度は地表付近の平均値 0.005 ppm 一定とした。 SO_2 -DIAL の諸条件は、パルスエネルギー 1 mJ、積算回数 600,000、望遠鏡直径 10 cm、量子効率 30 %、距離分解能 20 m、背景光は成層圏オゾンによる吸収効果により 0 と仮定した。294 nm 以下の波長帯域では対流圏オゾンによる吸収が影響し、298 nm 以上の波長帯域ではオゾン層による太陽光吸収効果が弱い。そこで、294~298 nm の波長範囲において測定誤差が最小となる on 波長と off 波長の組み合わせを求めた。距離 500 m 地点における on 波長と off 波長に対する測定誤差を Fig.3 に示す。Fig.3 より、J-H 間の谷間で 2 波長を選択 (on: 297.6 nm, off: 297.4 nm) することにより測定誤差を 1 % (0.3 ppm) 以内に収めることが可能であることが分かった。この近接した 2 波長を用いることで O_3 による $\Delta\sigma_{IG}$ や $\Delta\alpha_{aero}$ の影響を無視できる利点がある。

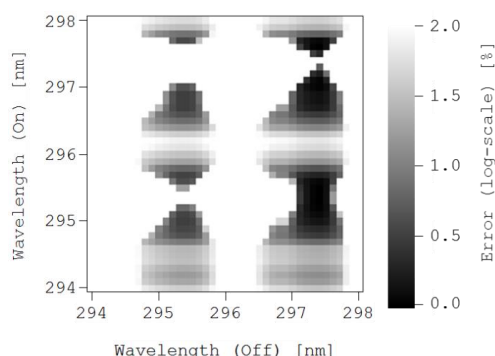


Fig.3 Measurement error for various choices of on-line and off-line for SO_2 -DIAL.

3. 水平距離に対する測定誤差

前章で得られた最適波長を用い、図 2 の条件下において水平距離に対する測定誤差をシミュレーションした。 SO_2 -DIAL の諸条件は前章と同じである。 SO_2 の濃度分布は水平距離 400~600 m の区間において 30 ppm, 5 ppm, 0.5 ppm の 3 通りを設定した。水平距離に対する測定誤差を Fig.4 に示す。設定した全ての SO_2 濃度で高濃度区間 400~600 m で測定誤差が 10 % 以内に収まることが分かった。

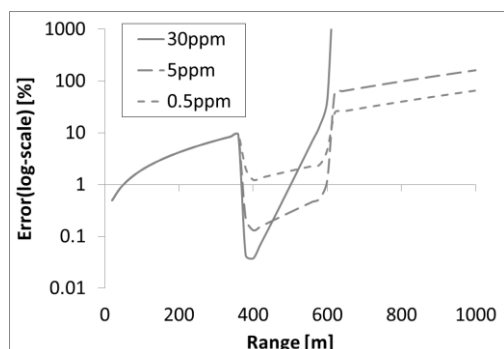


Fig.4 Random error in the SO_2 -DIAL system.

4. DPSS 発振波長の安定化

本研究では、小型で取り扱いの容易な光源として、DPSS レーザ 593 nm の第 2 高調波の利用を想定している。DIAL 観測において、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 DPSS レーザ (593.7 nm) の発振波長の温度依存性を調べた。Fig.5 に ± 0.01 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 時間あたり ± 10 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。0.01K 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 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 43.5pm/K で制御することも分かった。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 pm 以内で波長制御可能である。

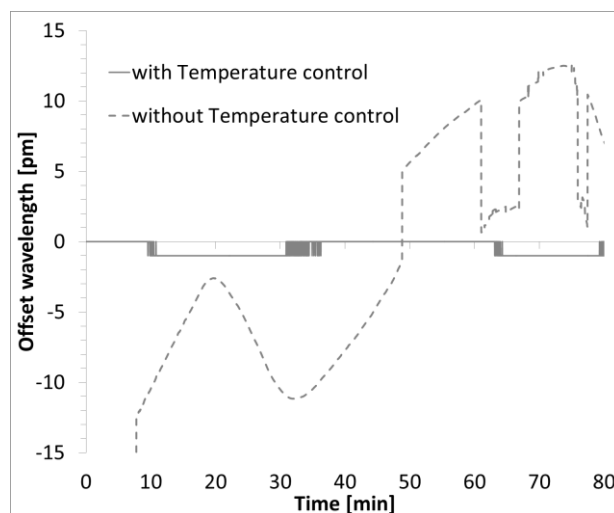


Fig.5 Frequency stabilization for the DPSS laser with temperature control and without temperature control.

5. まとめ

可搬性に富む小型の SO_2 -DIAL システムを新たに開発するため、最適波長の組み合わせについて検討した。 SO_2 吸収帯において 2 つの吸収スペクトルの谷間から on 波長 297.6 nm と off 波長 297.4 nm を選択することにより、200m の区間において 30 ppm の SO_2 濃度を誤差 10 % 以内で測定可能であることを示した。また、試作機用の DPSS 基本波の発振波長の温度依存性を測定し、43.5pm/K であることが分かった。また、0.01K の温調により 1 pm/h 以内での安定度であることが分かった。この安定度は、 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 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) D.J.Brassington, Appl., Opt., 20, 3774-3779, 1981.
- 3) S. Ismail et. al., Appl. Opt., 28, 3603-3615, 1989.