

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01667

研究課題名(和文)可搬型ライダーによる火山ガス分布の遠隔計測

研究課題名(英文)Remote measurement of volcanic gas profile by portable lidar

研究代表者

柴田 泰邦 (Shibata, Yasukuni)

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：10305419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,250,000円

研究成果の概要(和文)：本応募研究は、リモートセンシング技術の一つであるライダーを用い、火山ガス中のSO₂濃度の平面分布を計測するためのシステムを製作し、フィールド観測によりその有用性を実証することを目的とする。2台のNd:YVO₄レーザをベースとする光源を製作し、実験室内でSO₂ガスの濃度測定実験を行い、 0.35 ± 0.06 ppm ($\pm 17.1\%$)で計測可能なことを示し、人体に対して害が生じるといわれる5ppmに対して ± 1 ppm以内での計測が可能である結果を得た。レーザ製作の遅れと新型コロナウイルスによる社会的要因により、フィールド実験が2回しかできず、平面分布データを得るに至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状、直接センサを用いてガス濃度を計測する手法が主流であり、平面分布を得るには多数のセンサが必要となる。また、紫外光に感度のあるCCDカメラでSO₂の吸収帯に当たる波長(~ 310 nm)とSO₂の吸収帯からずれた波長(~ 330 nm)を撮像し、光の吸収量の差からSO₂カラム量分布イメージを遠隔計測する手法は空間分布を得ることができない。本研究の成果は、SO₂ガス分布の空間分布計測が可能であることを示すものであり、火山ガス分布の状況をリアルタイムで把握することで、防災・減災のみならず、経済活動への影響を最小限に抑えることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to manufacture a lidar system for measuring SO₂ concentration in volcanic gas and to demonstrate its usefulness by field observation. We have developed a light source based on two Nd:YVO₄ lasers.

An indoor SO₂ gas concentration measurement experiment was conducted, and it was shown that measurement was possible at 0.35 ± 0.06 ppm ($\pm 17.1\%$). The result was that it was possible to measure within ± 1 ppm, compared to 5ppm, which is said to cause harm to the human body. Due to the delay in laser development and social factors caused by the COVID-19, field experiments could only be performed twice, and valid data could not be obtained.

研究分野：リモートセンシング

キーワード：ライダー SO₂ 差分吸収 火山ガス

1. 研究開始当初の背景

火山は景勝地として、また温泉をもたらすなど、我々の生活を豊かなものとする自然の恵みである。しかしながら、大きな災害を引き起こす危険な存在でもある。2014年の御嶽山と口永良部島の噴火、2015年の箱根山の小規模噴火、2016年の阿蘇山の噴火と、最近では日本全土で火山活動が活発化している。このような火山災害の防止・減災を目的とした様々な観測が実施されている。その中でリモートセンシングによる火山監視は重要な観測の一つであり、火山表面や大気中に限定されるが、面的、周期的、定量的な観測を実施することが容易であるため、大きな役割を果たすと期待されている。火山ガスは、二酸化硫黄 (SO₂) などの人体へ有毒な成分を含み、火山の周辺に住む住民だけでなく、酸性雨の原因となるなど、周囲の環境へも悪影響を及ぼす。火山ガスが大気へ放出された後、どのように流れているのか、そしてどれくらいの量放出されているのかを把握することは、火山活動の理解に役立つだけでなく、防災面や登山者への警報発令等でも重要である。

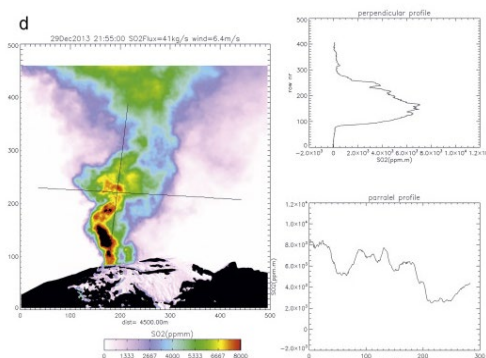


図1 噴気中の SO₂ カラム量イメージ

現状、直接センサを用いてガス濃度を計測する手法が主流であり、平面分布を得るには多数のセンサが必要となる。また、紫外光に感度のある CCD カメラで SO₂ の吸収帯に当たる波長 (～310 nm) と SO₂ の吸収帯からずれた波長 (～330 nm) を撮像し、光の吸収量の差から SO₂ カラム量分布イメージ (図1参照) を遠隔計測する手法は空間分布を得ることができない。

そこで、本研究では差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) を用いて、SO₂ 濃度分布を計測する。ライダー (LIDAR: Light Detection and Ranging) は光を使ったレーダーで、レーザレーダーとも呼ばれ、DIAL は特定気体の吸収波長と非吸収波長における散乱光強度の差分を計測し、その差分量から濃度分布を計測するライダー手法の一つで、微量気体濃度分布の観測に適している。SO₂ だけでなく、水蒸気、O₃、CO₂、CH₄ などの微量気体濃度分布の計測事例が多数ある。申請者は、挑戦的萌芽研究 (平成 28～29 年度) 「火山ガス分布計測のための飛翔体搭載ライダーの実現」(研究代表者: 柴田泰邦、研究経費: 2,100 千円) において、半導体レーザをベースとする DPSS (Diode Pumped Solid State) レーザを用いることで、SO₂ ガス濃度分布計測用の DIAL システム全体を小型軽量化・省電力化する独自手法を提案している。

2. 研究の目的

本応募研究では、リモートセンシング技術の一つである DIAL を用いる。火山ガス中の SO₂ 濃度分布を計測するための DIAL システムを製作し、フィールド観測によりその有用性を実証することを目的とする。従来の SO₂ DIAL システムは大気中の SO₂ 濃度分布を高精度で計測できる半面、大型レーザを用いていたため機動性に欠ける。今回開発する DIAL システムは半導体レーザをベースとする DPSS レーザを用いることで、DIAL システム全体を小型軽量化・省電力化し、機動性と機能性に優れたシステムを構築できる点が新しい取り組みである。

2015 年の箱根山の事例では噴火の危険が迫ったため、火山ガスの濃度分布状況を知ることが困難となり、温泉供給停止などの経済的影響が長期化した。可搬型 DIAL の実現は任意の火山への装置移動が容易になり、火山ガス分布の状況をリアルタイムで把握することは、防災・減災のみならず、経済活動への影響を最小限に抑えることを期待できる。

3. 研究の方法

・SO₂ 濃度分布計測用可搬型 DIAL の製作

先行研究で開発した半導体レーザで構成されるプロトタイプの小型 DPSS レーザをベースに、フィールド観測用の高出力 DPSS を新たに製作し、受光系と合わせて可搬性に富む SO₂ 濃度分布計測用 DIAL を完成させる。

- ・フィールド観測により火山監視の観測手段として有用であることを明らかにする。
測定範囲：～1,000m、距離分解能：50m、測定精度：5%以内を目標に、SO₂濃度分布を取得する。観測結果は他のSO₂センサと比較する。

具体的な研究方法を以下に示す。

購入する808nm半導体レーザ、光学結晶Nd:YVO₄、光学部品を組み合わせ波長1064nmと1342nmを発生させる。これらの光をPPKTP結晶に入射させて和周波である593nmを発生させ(図2参照)、さらに疑似位相整合素子(QPM)に入射することで第2高調波である297nmを得る。593nm発生機構を2系統製作し、1342nmの発振波長を制御することで、吸収波長297.4nmと非吸収波長297.2nmを得る。これらの波長は、先行研究によって最適化された値である。波長制御手法は、SO₂ガスを封入した参照セルを用い、それぞれの波長におけるセル透過率を計測し、エラーシグナルをNd:YVO₄結晶温度にフィードバックする。発振波長の温度依存性は43.5pm/Kであることが、先行研究により分かっている。

また、購入する光検出器、光学部品、望遠鏡を組み合わせ、受光系を製作する。図3にSO₂DIALシステムのブロック図を示す。

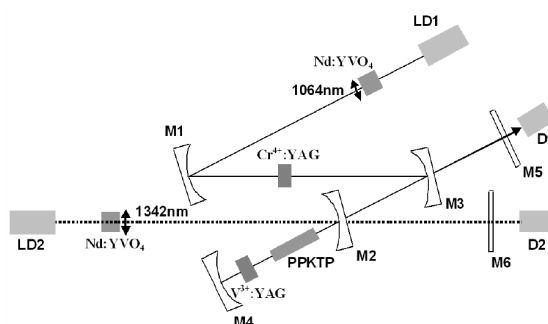


図2 高出力DPSS(593nm)ブロック図

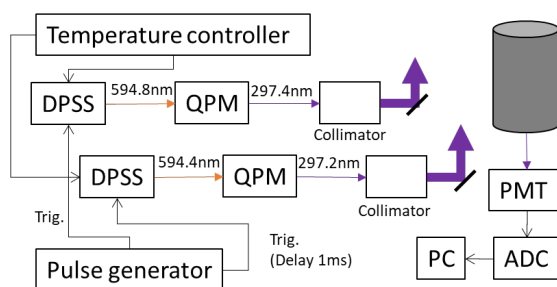


図3 SO₂DIALシステムのブロック図

製作した光源と受信系を組み合わせ、可搬型SO₂DIALを完成させる(図4)。まず、サンプルガスを用いてDIALシステムの性能評価を行う。次に、箱根山の火山ガス噴気場所において第1回目のフィールド観測を行い、移動観測時の問題点の洗い出しを行うとともに改善策を検討し、必要に応じて装置の改良を行う。その後のフィールド観測でSO₂ガス濃度分布を取得し、噴気孔位置の確認、SO₂濃度の日変化、SO₂ガスの流出方向などの情報を取得する。複数回の観測結果から、定常時、要警戒時、噴火時に対応する観測モードを複数立案し、防災・減災のためのアプローチ手法を提案する。



図4 可搬型SO₂DIALイメージ

4. 研究成果

図2で示した光源を開発した。297.4nmと297.2nm、それぞれにおいて繰り返し100Hzで0.6mJの出力を得た。当初、波長安定度および出力安定度が十分でなかったため、筐体の温調制御システムを新たに開発し、±13pmの波長安定度と±12%の出力安定度を得ることができた。次に、SO₂濃度測定評価実験を行った。光路長21cmの密閉式アクリルケース中にSO₂ガスを封入し、開発した光源を入射してSO₂ガスの濃度測定実験を行った。図5,6に測定結果を示す。図5はSO₂ガスセンサ(BW Technologies GAXT-S-DL)で測定したガス濃度とDIAL測定結果の関係を

示す。図 5 において、各測定点での DIAL 測定のエラーバーは約±0.12 ppm でほぼ一致している。図 6 は GAXT-S-DL の測定値が 3.5 ppm のときの DIAL 測定結果の時間変動を示す。平均値は 3.47 ppm、標準偏差は 0.12 ppm である。この結果から、図 5 のエラーバーは、計測信号の SN に起因するものと言える。以上の結果から、人体に対して害が生じるといわれる 5 ppm の SO₂ 濃度に対して十分な精度が見込まれる結果を得た。

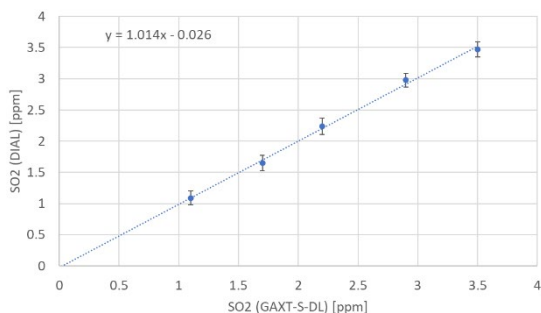


図 5 SO₂ センサ (GAXT-S-DL) との比較

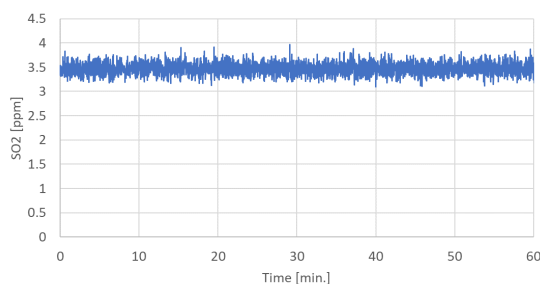


図 6 DIAL 測定時の SO₂ 濃度時間変化

次に、神奈川県箱根山の大涌谷において行ったフィールド実験結果を示す。ライダーは噴気孔からの水蒸気による減衰を避けるため、比較的水蒸気の少ない方向に向けてレーザービームを水平に照射した。図 7 に on 波長と off 波長のライダー信号を示す。積算時間は 5 分、距離分解能は 15 m、アナログモード (Picoscope DS5444D, 14 bit) でデータを取得した。距離 180 m と 200 m において信号が 100 mV となっているが、これは山肌からの反射光を意味する。距離 90 m までは 2 波長の信号強度に大きな差はないが、120 m 付近では 2 波長の信号強度の差が大きくなっており、この距離範囲で濃度の高い SO₂ ガスの存在が示されている。図 8 に山肌の手前、距離 165 m までの SO₂ 濃度分布を示す。ライダーから距離 90 m 付近までは 3 ppm 程度だったが、距離 97.5 m で 21.7±8.2 ppm、距離 112.5 m で 31.7±14.2 ppm と高濃度の SO₂ ガスを検知した。

移動による振動等によりレーザ出力が低下したこと、光源の温調制御システムがやや不安定だったこともあり、エラーバーが屋内実験で想定した値より数倍大きくなっている。新型コロナウイルス感染の影響により、屋外での活動に支障が出たこともあり、当初予定していた日変化を得るまでには至らなかったが、少なくとも本研究の目的である小型ライダーを開発すること、SO₂ 濃度分布を計測することが実現・実証された。今後、システムの改良を行い、より精度の良い観測を継続して行う予定である。

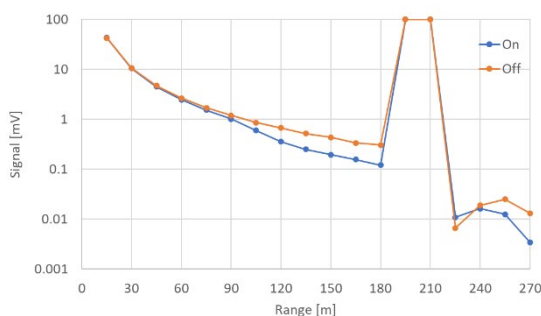


図 7 大涌谷において観測されたライダー信号例

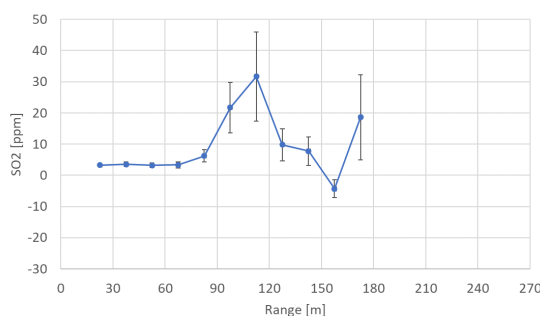


図 8 図 7 から得た SO₂ 濃度分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa, Makoto Abo |
| 2. 発表標題 Diurnal variation measurements of vertical CO2 concentration profiles in the lower atmosphere using differential absorption lidar |
| 3. 学会等名 2019Chapman Conference on Understanding Carbon Climate Feedbacks (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 柴田泰邦, 長澤親生, 阿保 真 |
| 2. 発表標題 差分吸収ライダーによるCO2 濃度と大気境界層の観測 |
| 3. 学会等名 第37回レーザーセンシングシンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 加藤美優, 柴田泰邦 |
| 2. 発表標題 DPSSレーザーを用いた可搬型SO2-DIALの開発 |
| 3. 学会等名 第36回レーザーセンシングシンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 M. Kato, Y. Shibata and Y. Okawa |
| 2. 発表標題 Development of Portable Differential Absorption Lidar for SO2 density profile measurement |
| 3. 学会等名 2018 AGU Fall Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|