

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月21日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340122

研究課題名（和文） 火山ガス観測におけるリモートセンシングの高度化

研究課題名（英文） Sophistication of remote sensing in volcanic gas measurements

研究代表者

橋本 武志（HASHIMOTO TAKESHI）

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：70283588

研究成果の概要（和文）：本課題は、大気科学の分野で多用される分光技術を火山研究に応用し、火山ガスのリモートセンシングに新展開を与えようとしたものである。研究期間内の主な成果は、(1) 噴気中の水蒸気分布を測定する可搬型ラマンライダーを改良し、水滴も測定可能としたこと、(2) 噴気内部の温度分布測定を可能にする高スペクトル分解能ライダーを新規開発したこと、(3) 一般用のデジタルカメラを利用して、二酸化硫黄濃度分布を可視化する簡易型の「SO₂ カメラ」を製作したこと、の3点である。

研究成果の概要（英文）：This study aimed an innovative progress in the remote sensing of volcanic gases by introducing some spectroscopic techniques which have been widely used in the research field of atmospheric science. Followings are the major achievements of this study. (1) Sophistication of the Raman LIDAR system for the water-vapor measurement. This study appended a liquid water channel to the previous instrument, which made separate detection of water vapor and mist in a volcanic plume possible. (2) Development of the high spectrum-resolution LIDAR for the measurement of a temperature profile in a volcanic plume. (3) Fabrication of a low-cost version of the “SO₂ camera” which visualizes the concentration of sulfur dioxide in a volcanic plume.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2010年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：火山ガス・リモートセンシング・ライダー・分光

1. 研究開始当初の背景

火山ガスは、噴火の準備過程や活動静穏時にも地表に放出されるため、その成分や噴出率・温度等を知ることは、地下のマグマの状態を知る上で大いに役に立つ。また、噴火中

の噴気についてこれらの測定を行うことで、火山活動の推移予測に資することができる。

課題代表者らは、噴気によるエネルギー輸送の観点から、火山ガス観測の重要性に着目してきた。とりわけ、噴気の水蒸気（H₂O）

量と温度は、火口からの放熱率を知る上で本質的である。代表者らは、本課題に先立ち、科研費萌芽研究によって、噴気水蒸気検出用の可搬型ラマンライダーを開発していた。実際の噴気中には、水蒸気だけでなく、ミストとして液相の水も存在するため、本課題では、水蒸気とミストを独立に測定できるように装置を改良することにした。また、萌芽研究の途上で、噴気内の温度分布を隔測できる別方式のライダーの開発を着想したので、本課題で取り組むこととした。

2. 研究の目的

(1) 火山噴気中の水蒸気とミストを独立に測定すべく、既存のラマンライダー装置を改良する。また、火口近傍での野外観測を容易にするため、可搬性を向上する。

(2) 噴気中の温度分布を 10K 以下の分解能で隔測する高スペクトル分解能ライダーの新規開発に取り組む。

(3) 萌芽研究で未完となっていた、噴気水蒸気を画像として観測する分光カメラの開発を継続する。

3. 研究の方法

(1) 先行研究で開発済みのラマンライダーの光学系を変更し、新たに液体水のラマン散乱光を検出するためのチャンネルを追加する。また、装置の軽量化をはかるため、集光系および分光系の変更を検討する。改良した装置を野外の噴気に適用して実地試験を行う。

(2) 火山噴気温度測定用ライダーのスペックを検討する。必要なスペックを実現するための測定方法を決定し、得られる信号から対象物の温度に変換する際の誤差要因等について机上のシミュレーションで検討する。次に、試作機を製作し、野外での動作試験を行う。最後に、室内実験を併用して、温度のキャリブレーションを行う。

(3) 近赤外域での水蒸気検出用分光カメラの基礎実験を行う。既に実用化されている二酸化硫黄用分光カメラの方式を利用することも視野に入れながら開発を進める。

4. 研究成果

(1) 我々は、先行研究で火山噴気観測用の可搬型ラマンライダー装置を開発し、これまでに、阿蘇中岳火口や登別大湯沼等で試験観測を行ってきた。これまでの成果として、噴気中の水蒸気分布測定が可能になっていた。しかし、比較的低温の火山噴気には、多くの場合水蒸気だけでなく、水蒸気が凝結した水滴

ミストも含まれている。噴気として火口から放出される H_2O の全量を知るには、この水滴成分も合わせて測定することが必要だが、液体水のラマン散乱波長は水蒸気とは異なるため、既存の装置では測定することができなかった。

この問題点を解決するため、既存のライダー装置に液体水用のチャンネルを付加して、2010年10月に群馬県草津温泉の万代鉱噴気を対象として野外試験を行った。この実験で、噴気中の液体水（ミスト）と水蒸気を独立に測定できることが確認できた。ミスト成分については、噴気密度の直接測定との比較によるキャリブレーションが未完に終わったため、ミスト成分を混合比として定量するところまでには至っていないが、本研究により、噴気中の全 H_2O 量をリモートセンシングできる道筋が開けた。

また、装置の可搬性を高めるため、集光部（望遠鏡）と分光系を変更し、システム全体の小型化・軽量化を行った。

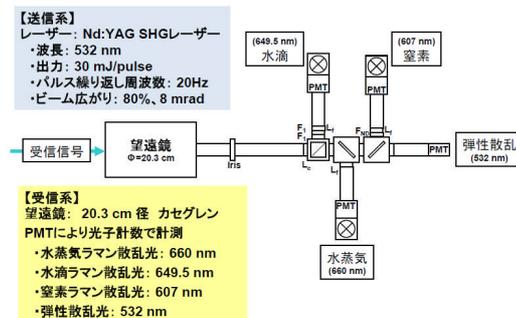


図1. 本研究で開発した噴気水蒸気/水滴測定用ラマンライダーの構成



図2. 本研究で開発したライダー装置の外観

(2) 噴気温度分布を数百 m の距離から 10K の分解能で隔測するためのスペックを検討した結果、高スペクトル分解能ライダーと呼ばれる方式を採用することとした。この方法は、対象物の温度に応じてレイリー散乱スペクトルの裾野の広がりを変化させることを利用するものである。測定対象（火山噴気）に照射するレーザーは CW（連続波）とし、送

信部と受信部を独立にするバイスタティック方式とすることで、側方から噴気内部の温度分布をスキャンする。受信された散乱光には、スペクトルの中央部に強いミー散乱のノイズが混入する。これを除去するため、波長制御精度の高い帯域除去フィルターであるカリウム原子フィルターを用いる。異なる帯域幅をもつカリウム原子フィルターを2種用意して、それぞれのチャンネルから得られる透過スペクトルを比較することによって、受信光のレイリー散乱スペクトル幅を推定し、対象物の温度に変換する（図3）。

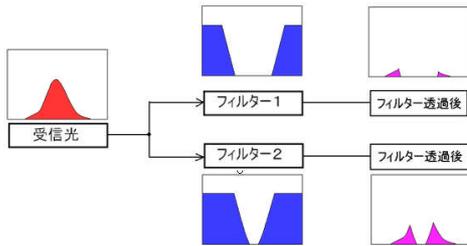


図3. 本研究で開発した高スペクトル分解能ライダーの基本原理



図4. 本研究で開発した、温度測定用高スペクトル分解能ライダーの外観（上：送信系，下：受信系）

まず、設計したシステムにおける理論上の測定誤差のシミュレーションを行った。対象物からの距離が大きくなると、受信光が減衰するので、それを補うために長い測定時間が必要となる。例えば、阿蘇中岳火口の赤熱部の噴気を対象とするケースでは、温度 600°C に対して測定距離 400m の条件で、温度推定

誤差 1%（絶対温度に対する比率）を実現するためには約 160 秒間の測定時間が必要であると試算された。

次に、上記の基本設計に基づいて実機を製作し、草津温泉の万代鉱噴気を対象として野外での動作試験を行った。野外での基本動作が確認できたことは、開発のステップとして大きな前進である。万代鉱の野外試験では、温度 80°C 前後の噴気を測定したが、キャリブレーションを行うためには、より高温域での測定が複数必要となる。そこで、室内で熱風を発生させて 150°C 程度までの温度範囲で実験を行った。ただし、現時点では、理論的に予想される受信光の強度比と、実測値に食い違いが残っており、本装置はまだ実用段階には達していない。この原因として、上記で説明した2種の帯域除去フィルター通過後の散乱光強度比の絶対値が、環境温度の影響を受けている可能性のほか、レイリー散乱のスペクトル形状が、完全なガウス分布でない可能性が指摘されている。

また、実際の火山のフィールドで用いるには、軽量性・堅牢性も向上させる必要があり、解決すべき課題はまだ多い。

(3) 水蒸気観測用分光カメラ（水蒸気カメラ）の開発については、太陽光の近赤外線が噴気水蒸気によって吸収されることを利用して、画像として水蒸気濃度分布を得る方法を検討した。水蒸気は、大気中に多量に存在するため、大気圏全体による吸収量に対して、噴気水蒸気による吸収量が検出可能なレベルにあるかどうかの本質的に重要である。

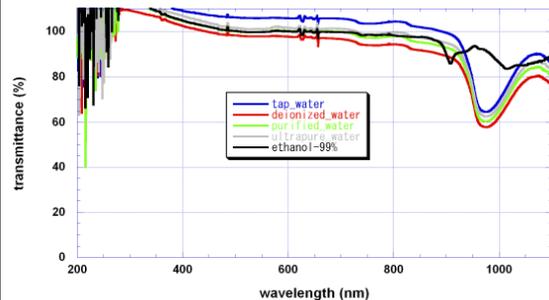


図5. 液体水の吸収特性実験の結果

過去の知見から、液体水による近赤外域の吸収特性が分かっており（図2）、720nm、820nm、970nm 付近に有意な吸収が見られる。実際に、赤外 CCD カメラとバンドパスフィルターを用いて、吸収帯とそれ以外の波長帯で液体水を撮影し差分画像を作成したところ、予想通り、水の存在する部分にのみ有意な減光が確認できた（図5）。

これらの実験結果と、標準大気モデルの水蒸気混合比の高度分布を用いて試算したところ、仰角 20 度以下の視線方向では、水蒸気量の積分値が、液体水換算で 40mm 以上の

厚みとなり、970nm 帯では入射光の 90%以上が大気で吸収されてしまうため、噴気水蒸気（多くの場合、液体水換算の厚みで 0.1mm 程度以下と考えられる）の定量は極めて困難と考えられた。一方、その他の吸収波長帯では、吸収率そのものが小さいため、検出レベルに達しない可能性が高い。このことから、可能性としては、970nm 帯を用いて、(1)比較的大規模な噴気を高い仰角で見上げるようにして観測する、(2)大気水蒸気量の少ない高地の火山に適用する、(3)人工光源を噴気の背景に配置して夜間に測定する、などの方法以外にはなさそうであることが分かった。

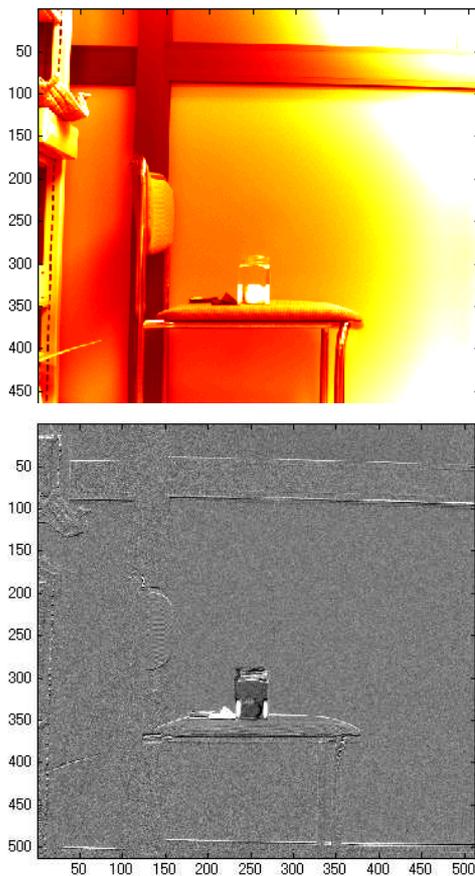


図 6. (上) 720nm 帯の画像（中央部に水を入れた容器が置かれている）(下) 720nm と 760nm 帯の差分画像

以上のように、火山噴気用の水蒸気カメラには、高い分解能が必要となり、技術的難易度が高いことが予想されたので、本研究では、既に他の研究者によって実用化されている二酸化硫黄の紫外線吸収を利用した SO₂ カメラを手がけることで、ノウハウを蓄積することから始めるよう計画を変更した。

最初に、水蒸気カメラ用の赤外 CCD を流用して実験を行ったが、カメラ内部の CCD 素子に、紫外線に対して不透明なハウジングが施されていたため、不成功に終わった。そこで次に、市販のデジタル一眼レフカメラを

用いて同様の実験を行ったところ、CCD 前面のモアレ防止用ローパスフィルターを除去することで、紫外線に感度が得られることが確認できた。そこで、簡易型の SO₂ カメラを製作し、濃度既知の二酸化硫黄ガスをを用いて校正を行った上、鹿児島県の桜島火山の噴気に適用したところ、二酸化硫黄による明瞭な吸収画像を得ることができた（図 4）。

一連の実験を通じて、適切な分光画像を得るためのノウハウと経験を蓄積することができたが、残念ながら当初の目標であった水蒸気カメラの開発までには漕ぎ着けることができなかった。

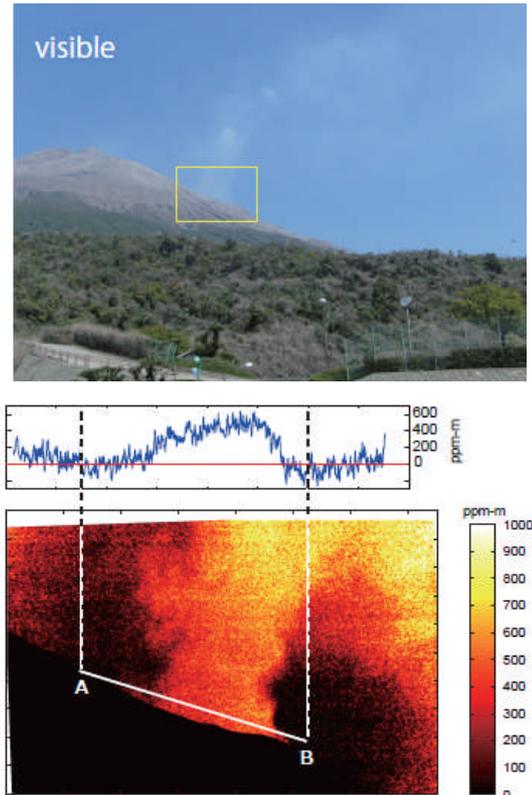


図 7. (上) 桜島火山昭和火口の噴気可視画像. (下) SO₂ カメラによる、噴気部分の SO₂ カラム濃度画像. 明るいほど SO₂ ガスの濃度が高いことを示す.



図 8. 本研究で製作した簡易型二酸化硫黄測定用分光カメラ (SO₂ カメラ)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 橋本武志・寺田暁彦・江尻省・中村卓司・阿保真, 一般用デジタルカメラを利用した簡易 SO₂ カメラの製作, 火山, 投稿中.

[学会発表] (計 10 件)

- ① 太田修史・他, 可搬型水蒸気ラマンライダーを用いたフィールド観測～阿蘇山火口内の水蒸気の 2 次元分布～, 第 27 回レーザーセンシングシンポジウム, 2009 年 9 月 3~4 日, 那須郡.
- ② 阿保真・他, 噴気温度計測用可搬型ライダーの開発, 第 35 回リモートセンシングシンポジウム, 2009 年 11 月 5~6 日, 東京.
- ③ 中村卓司・他, 小型ラマンライダーによる火山噴気中の水蒸気分布のフィールド観測, 第 35 回リモートセンシングシンポジウム, 2009 年 11 月 5~6 日, 東京.
- ④ 阿保真・他, 噴気温度計測用可搬型ライダーの開発, 第 36 回リモートセンシングシンポジウム, 2010 年 11 月 4~5 日, 横須賀市.
- ⑤ 池羽健二・他, 火山噴気温度計測用可搬型ライダーの開発, 第 28 回レーザーセンシングシンポジウム, 2010 年 9 月 9~10 日, 大津市.
- ⑥ 阿保真・他, 火山噴気温度のレーザーによる遠隔計測, 第 27 回センシングフォーラム, 2010 年 9 月 27~28 日, 桐生市.
- ⑦ 江尻省・他, ライダーによる火山噴気の水蒸気・水滴量と温度のリモートセンシング, 日本地球惑星科学連合, 2011 年 5 月, 千葉市.
- ⑧ 池羽健二・他, 火山噴気温度計測用可搬型ライダーの開発, 日本火山学会, 2011 年 10 月 2 日, 旭川市.
- ⑨ 橋本武志・他, 民生用デジタルカメラを利用した簡易 SO₂ カメラの製作, 日本火山学会, 2011 年 10 月 2 日, 旭川市.
- ⑩ 江尻省・他, ライダーによる火山噴気の水蒸気・水滴量のリモートセンシング, 日本火山学会, 2011 年 10 月 2 日, 旭川市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 武志 (HASHIMOTO TAKESHI)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号: 70283588

(2) 研究分担者

中村 卓司 (NAKAMURA TAKUJI)
国立極地研究所・教育研究系・教授
研究者番号: 80391077
江尻 省 (EJIRI MITSUMU)

国立極地研究所・教育研究系・助教

寺田 暁彦 (TERADA AKIHIKO)

東京工業大学・火山流体研究センター・
講師

研究者番号: 00374215

阿保 真 (ABO MAKOTO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・
教授

(3) 連携研究者

なし