箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率の測定

安部祐希 *¹ • 原田昌武 *¹ • 板寺一洋 *¹ • 森 健彦 *² • 高木朗充 *³ • 長岡 優 *³

Sulfur dioxide emission rate measurements at Owakudani, Hakone volcano, Japan

by

Yuki ABE*¹, Masatake HARADA*¹, Kazuhiro ITADERA*¹, Takehiko MORI*², Akimichi TAKAGI*³ and Yutaka NAGAOKA*³

1. はじめに

箱根火山では、2001年以降現在まで数年に一度の頻 度で群発地震が発生しており、地震活動活発化と同時に 箱根火山を横切る基線長の伸びが GNSS の解析によって 捉えられている。その中でも、2015年4月に始まった 群発地震活動は最も活発であり、同年6月には大涌谷(図 1)においてごく小規模な水蒸気噴火が発生した(原田 ほか、2015)。

箱根火山では噴火前から、地震活動や地殻変動に関る 地球物理学的な観測に加え、噴気地帯から放出されるガ スの組成や濃度の変化についての調査が行われており (例えば、大場ほか、2008; 代田、2013)、それらをも とにした火山活動の評価の手法やマグマ熱水系のモデル が提案されてきた。一方、噴気地帯から放出される火山 ガスの量については、2015 年 6 月以降、気象庁(2016) や気象研究所(2016)によって二酸化硫黄(SO₂)放 出率の測定が数回行われたが、長期間にわたる繰り返し 測定は現在まで行われてこなかった。

火山ガス放出率の繰り返し測定は、火山活動の評価や 定量的なモデル化のために重要である。例えば、2002 年から2016年までの浅間山におけるSO₂放出率の測 定結果(気象庁地震火山部火山監視・警報センター、 2017a)によると、静穏時にはSO₂放出率が数100ト ン/日となる日が続くが、噴火前後では放出率が1000 から5000トン/日程度へと上昇する傾向が捉えられ ている。同様の変化は、阿蘇火山や三宅島においても 見られる(福岡管区気象台地域火山監視・警報センター、 2017;気象庁地震火山部火山監視・警報センター、 2017b)。これらの事例を考慮すると、箱根火山におい ても、長期間のモニタリングにより、その活動度に応じ たSO₂放出率の変化が捉えられる可能性が高い。そこで、 温泉地学研究所(当所)では 2017 年から大涌谷におけ る SO₂ 放出率の繰り返し測定を開始することにし、関 連機器を導入した。本報告では、立ち上げ時に行った測 定の結果について報告する。

2. 方法

2.1 観測

SO₂には特定の波長(300-320nm)の紫外光を吸 収する性質があるため、その波長の紫外光は火山活 動に伴う噴気を通過すると噴気中の SO₂ 濃度に応じ て減衰する。DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)法はこの性質を用い、噴気を通過するこ の波長の自然光の光量を調べることで減衰の大きさ(吸 光度)を測定し、その吸光度から SO₂のカラム濃度(光 の到来方向に存在する SO₂の総量(ppmm))を算出す る方法である (Mori *et al.*, 2007)。このたび当所が導入 したのは、アイリックス社製の二酸化硫黄濃度遠隔観測 DOAS システムである。この観測装置は、各波長成分の 光量を測定する分光器(Ocean Optics 社製)と、集光 口に設置されたミラーを回転し角度を変えることで光を 測定する方向を制御するスキャンユニット(リツー応用 光学社製)から構成されている。

毎回の観測では、噴気の測定に先立ち、まず分光器に 入る光を完全に遮断した状態で機器のノイズレベルを取 得し、次いで噴気の存在しない空に向けて集光口を開放 し SO₂による影響を受けていない自然光の波長ごとの 強さ(波長分布)を取得する。噴気を通過する自然光 の波長分布を観測し、波長 λ の観測光、ノイズレベル、 噴気の存在しない空からの自然光の強度をそれぞれ P_ plume (λ)、P_dark (λ)、P_reference (λ)とすると、 観測した光の吸光度 A_plume (λ) は、

 ^{*1} 神奈川県温泉地学研究所 〒 250-0031 神奈川県小田原市入生田 586、*2 気象庁気象研究所火山研究部第一研究室福岡分室 〒 810-0052 福岡県福岡市中央区大濠1丁目 2-36、*3 気象庁気象研究所 〒 305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1
報告,神奈川県温泉地学研究所報告,第 49 巻,21-28,2017



図1 (a) 箱根火山の位置を示す地図。(b) 箱根カルデラとその周囲の地形図。等高線の間隔は 50m。太い実線でカ ルデラ壁を示す。四角は(c)の範囲を示す。(c) Google Earth による観測点近傍の航空写真。星印で観測点を示す。 赤、黄、青の丸印で、2015 年 6 月 29 日の噴火以降に確認された火口、噴気孔 (Mannen et al., 2017)、および蒸 気井の位置をそれぞれ示す。



- 図2 2017年5月22日に撮影した走査中の観測機器と大涌谷の様子。
- 表1 観測の詳細。左から観測日、走査回数、集光範囲、走査の中心方向の仰角、撮影した動画から推定した噴気の平 均上昇速度とその標準偏差。

観測日	走查回数	集光範囲(。)	仰角(。)	噴気上昇速度(m/s)
2017年3月29日	14	124 – 184	17.0	7.2±2.2
2017年4月24日	13	86 – 206	45.8	2.5±0.7
2017年5月22日	14	60 – 180	35.0	2.4±1.0
2017年6月29日	12	82 – 202	33.8	3.4±1.1
2017年8月9日	15	90 – 210	37.3	4.7±1.4

$$A_{plume}(\lambda) = -\log\left(\frac{P_{plume}(\lambda) - P_{dark}(\lambda)}{P_{reference}(\lambda) - P_{dark}(\lambda)}\right)$$

と表される。

その後、機器の校正を行うため、SO₂ 濃度が既知の 気体が封入されているセルを集光口の手前に設置して その吸光度を測定する。セルは SO₂ カラム濃度が、88、 173、261、442 ppmm の4種類であり、後述の観測で 得られるカラム濃度を正確に推定する上でふさわしい範 囲である。

2017 年 3 月から 8 月までに箱根ロープウェイ大涌谷 駅駅舎前(図1c)から 5 回の観測を行った。例として 2017年5月22日の観測風景を図2に示す。観測点か ら噴気までの距離が長いと、散乱により集光方向以外か ら分光器に到来する紫外線の影響でカラム濃度が過小評 価される可能性があるが、観測点から火口群までの距離 は約250mであり(図1c)、Mori et al. (2006)を参照 するとこの距離では散乱光によるカラム濃度推定への影 響はほとんどない。いずれの観測も、観測点を固定し、 集光口のミラーが一定範囲の角度を往復することで集光 方向を変化させるパンニング観測を行った。本報告では その片道分を一回の走査と呼ぶことにする。ミラーの回 転速度を0.5°/秒に設定しており、走査する角度の範囲 が120°であれば一回の走査にかかる時間は4分である。



図3 2017 年 6 月 29 日の観測記録。観測開始からの経過時間の関数として、実線で SO₂のカラム濃度、破線で集光 方位を示す。



図 4 2017 年 6 月 29 日の観測から得られた、各方位の SO₂ カラム濃度の平均(実線)と標準偏差(点線)。方位角 190°で標準偏差が最小となる。

大涌谷を挟んで向こう側の尾根は観測点よりも標高が高 く、その尾根よりも上の空から到来する光を観測するた めに集光口を水平よりもやや上向きに構え(図2)、集 光方位を変化させながら上昇する噴気を走査した。

測定したカラム濃度から SO₂の放出率を推定するた めには、噴気の上昇速度を知る必要がある。そのために、 噴気の背景となる尾根の斜面上に複数の目標を設定して 観測点からの仰角を測定し、観測と同時に観測点から噴 気の様子を動画で撮影した。撮影した動画から、異なる 仰角の目標間を噴気が移動するのにかかる時間を計測 し、いずれの測定でも噴気までの距離を 250m と仮定 して噴気の上昇速度を推定した。本研究では尾根の稜線 のやや上側に見える空から到来する光を観測するため、 斜面上の目標は稜線の近くに設定した。そのため、推定 した速度は、観測点から稜線のやや下側に見える噴気の 上昇速度に対応する。各観測において、複数の噴気の上 昇速度を推定して平均し、その平均値を用いて SO₂ の 放出率を推定した。観測の詳細を表1にまとめた。

2.2 解析

それぞれの観測で得られたデータ(例として、2017 年6月29日の観測記録を図3に示す)をもとに、SO₂ の放出率を推定した。まず、集光方位ごとにカラム濃度 の平均と標準偏差を求めた(図4)。ここで、最も標準 偏差の小さい方位にはSO₂が存在せず、そのカラム濃 度の平均値は機器の状態変化あるいは分光器内部に入っ た迷光に起因するドリフトであると仮定して、全てのカ ラム濃度から差し引いた。また、この方位の標準偏差を 誤差レベルと仮定した。

次に、噴気が直立した円柱状に分布し一定速度で上昇 していることを仮定して SO₂ 放出率を推定するために、 仰角の補正を行った。本観測では、装置に仰角を持たせ た状態で集光方位を変化させて走査したので、模式図(図 5)の太い実線で示された面(走査面)内の SO₂ のカ ラム濃度が測定される。走査の中心方向の仰角をφ、走 査の中心を基準とする集光方位をθとすると、観測点か ら集光方向に引いた線分は、水平面に投影するとその長



図 5 観測点からの走査方向を示す模式図。星印で観測点を示し、太い実線で SO₂ を走査する面を示す。φ:走査の 中心方向の仰角、θ:走査の中心を基準とする集光方位。

さが √1 - cos² θ sin² φ 倍になる。つまり、装置に入射する光は、

噴気の移動方向と直交する水平面を走査した場合に比べて 噴気の中を $1/\sqrt{1-\cos^2\theta\sin^2\varphi}$ 倍長く透過することになる。 そこで全てのカラム濃度を $\sqrt{1-\cos^2\theta\sin^2\varphi}$ 倍することで 仰角の補正を行った。

噴気の状態は観測中にも変化しており、風の影響で噴 気が観測範囲に収まらなくなる場合がある。そこで、噴 気が観測範囲に収まっているかどうかを走査ごとに判断 し、収まっていないデータを除外した(図6)。具体的 には、以下に述べるように、観測データから SO2 が検 出される範囲(噴気柱の範囲)を走査ごとに定義し、観 測範囲の端の一方あるいは両方が噴気柱の範囲に含まれ る走査を除いた。まず、それぞれの走査で SO2 カラム 濃度が最も高い方位を噴気の中心方位と仮定した。次に、 その中心から両側に一定範囲を除外してカラム濃度を平 均した。この平均にはその範囲外の全てのデータを用い るのではなく、噴気中心に最も近く除外した方位の幅と 同じ幅に入る方位のデータだけを用いた。例えば、観測 範囲が 0°-120° で噴気中心の方位が 40° の時、データ を除く方位の幅が噴気中心から 15° ずつであるならば 平均するデータの方位は、10°-25°と55°-70°である。 もし除く幅が 30° であれば、平均するデータの方位は、 0°-10°、と70°-100°とし、観測していない方位は平均 には含めない。噴気中心からデータを除外する幅を 10° から1°ずつ増やしながらこの平均値を計算した。そし て平均値が先に求めた誤差レベルを初めて下回ったと き、除外した範囲を噴気柱の範囲と定義した。例えば、

2017年6月29日の観測では4番目と5番目の走査で、 噴気柱の範囲が走査範囲を超えている(図6)。6番目 の走査では、平均値が誤差レベルを下回ることがなく、 噴気柱の範囲が推定できない。このように噴気柱の範囲 が観測範囲を超えている走査のデータはSO₂放出率推 定から除外した。

走査ごとに SO₂ 放出率 En (トン / 日) を

$$E_n = \int_{az1}^{az2} c(\theta) \cdot \mathbf{r} \cdot \cos(\theta - \theta_c) \cdot w \cdot s \cdot 10^{-6} \cdot 86400 \cdot d\theta,$$

とした。ここで、n は走査の番号、az1、az2 は走査方 位の下限と上限、 θ は観測方位、c(θ)は方位 θ の SO₂ カラム濃度 (ppmm)の補正値、r は噴気中心までの距 離 (本解析では 250m と仮定した)、 θ c は噴気中心 の方位、w は噴気の上昇速度 (m/s)(表 1 参照)、s は SO₂の密度(2.76 × 10³ トン/m³)としている。そして、 除外していない走査から得られる放出率の平均値を推定 値とし、最小値から最大値までを誤差範囲とした。

3. 結果とまとめ

それぞれの観測における SO₂ 放出率の推定値および 誤差範囲を図7に示す。図7には、上述の結果のほか、 気象庁(2016)および気象研究所(2016)による測定 結果も示した。図7を見ると、2016年以降 SO₂ 放出率 は数10トン/日以下で推移しており、放出率の明瞭な 時間変化は見出せない。しかし、噴火が発生した 2015 年6月 29日(原田ほか、2016)付近では100トン/



図6 それぞれの走査で得られた方位と SO₂ カラム濃度の関係(2017 年 6 月 29 日の観測)。ドリフト補正、仰角補正 後の SO₂ カラム濃度の値を示す。それぞれのパネルの左上の数字は走査の番号に対応する。星印は噴気の中心(SO₂ カラム濃度が最大値となる)方位を示し、横向きの実線で噴気柱の範囲を示す。6番目の走査では噴気柱の範囲 が推定できていない。縦の実線は、走査した方位の範囲を示す。「除外」と書かれたパネルのデータは、SO₂ 放 出率の推定に用いなかった。



図7 観測日と SO₂ 放出率の関係を示す。丸印、バーはそれぞれ推定値、誤差範囲を示す。点線で大涌谷における噴 火の日時である 2015 年 6 月 29 日(原田ほか、2015)を示す。2017 年より前の測定結果は気象庁(2016)と 気象研究所(2016)によるものであり、気象庁(2016)による測定結果は誤差範囲のみを、気象研究所(2016) による測定結果は推定値と誤差範囲の両方を示した。

日前後の放出率となり、箱根火山においても噴火活動期 にはそれ以外の時期に比べて放出率が増加していたこと もわかる。

図7を見ると、2017年5月22日のSO₂放出率が他 の日の放出率に比べてかなり小さいことがわかる。この 日のSO₂放出率は、実際に小さかったという可能性も あるが、2017年の他の観測日と同程度なのに何らかの 理由で過小評価されたという可能性もある。もし過小評 価であるならば、その原因として、例えば、放出された SO₂の大部分が走査面の高さまで上昇できなかったとい う可能性が考えられる。我々は噴気が鉛直に一定速度で 上昇していることを仮定しており、このような事象には 対応できていない。

SO₂ 放出率の測定結果を火山活動の指標として用いる ためには、過小評価・過大評価につながる要因を明らか にし、その影響を低減する工夫をするか、あるいは、そ の影響によりどの程度の過小評価・過大評価が見込まれ るかを明らかにしてそれを誤差推定に反映させる必要が あり、それが今後の課題である。

謝辞

2017年3月29日の観測では道家涼介氏にご協力い ただきました。萬年一剛氏と一名の匿名査読者には原稿 を改善する上で非常に有益な助言をいただきました。記 して感謝いたします。

参考文献

- 代田寧 (2013) 箱根火山において 2013 年 1 月から発生 した群発地震活動に伴う噴気ガス組成の時間変化, 温泉地学研究所報告, 45, 29-34.
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター (2017) 阿蘇山の火山活動解説資料(平成29年8月), http://www.jma-net.go.jp/kumamoto/volcano1/ aso_kaisetu.pdf
- 原田昌武・板寺一洋・本多亮・行竹洋平・道家涼介 (2015) 2015 年箱根火山活動に伴う地震活動と地 殻変動の特徴(速報),温泉地学研究所報告,47, 1-10.
- 気象庁 (2016) 箱根山、第 135 回火山噴火予知連絡会資 料(その7), 58-66.
- 気象庁地震火山部火山監視・警報センター (2017a) 浅間 山の火山活動解説資料(平成 29 年 8 月), http:// www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/ monthly_v-act_doc/tokyo/17m08/306_17m08. pdf
- 気象庁地震火山部火山監視・警報センター (2017b) 三宅 島の火山活動解説資料(平成 29 年 8 月), http:// www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/ monthly_v-act_doc/tokyo/17m08/320_17m08. pdf
- 気象研究所 (2016) 箱根山、第 135 回火山噴火予知連絡 会資料(その7), p.67.

- Mannen, K., Yukutake Y., Kikugawa G., Harada M., Itadera K., Takenaka J. (2017) Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan – geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis, submitted to Earth Planets, and Space.
- Mori T., Mori T., Kazahaya K., Ohwada M., Hirabayashi J., Yoshikawa S. (2006) Effect of UV scattering on SO₂ emission rate measurements, Geophys. Res. Lett., 33, L17315.
- Mori T., Hirabayashi J., Kazahaya K., Mori T., Ohwada M., Miyashita M., Iino H., Nakahori Y. (2007) A Compact Ultraviolet Spectrometer System (COMPUSS) for monitoring volcanic SO₂ emission: Validation and preliminary observation, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 52, 2, 105-112.
- 大場武・代田寧・澤毅・平徳泰・攪上勇介 (2008) 箱 根カルデラ中央火口丘大涌谷地熱地帯における火 山ガス組成の時間変化,温泉地学研究所報告,40, 1-10.