箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率 ~観測・解析手法と2018年6月までの放出率の推移~

安部祐希^{*1}·原田昌武^{*1}·板寺一洋^{*1}·森健彦^{*2}·高木朗充^{*3}

Emission rate of sulfur dioxide at Owakudani, Hakone volcano, Japan -Observation, analysis, and temporal transition of emission rate to June 2018 -

by

Yuki Abe^{*1}, Masatake Harada^{*1}, Kazuhiro Itadera^{*1}, Takehiko Mori^{*2} and Akimichi Takagi^{*3}

Abstract

We have conducted repeat measurement of sulfur dioxide emission rate at Owakudani, Hakone volcano, Japan, since 29 March 2017. Based on the measurements, we desire to detect time variation of emission rate caused by change of volcanic activity and to interpret its activity quantitatively. To achieve such a purpose, the measurement should be accurate and independent of observation condition. Our measurements were conducted by using Differential Optical Absorption Spectroscopy. To make the measurement possible independently of moving direction of plume, our measurements were conducted either by horizontal panning method or by traverse method. For accurate measurements, we estimated sulfur dioxide column density from obtained wavelength distribution of ultraviolet intensity, and did not use column density calculated by the observation system. Based on data obtained through setting different elevation angle for each scan of horizontal panning method, we showed sulfur dioxide was reduced on its ascending way, and estimated emission rate with taking the reduction into account. We estimated moving direction and velocity of plume, which were necessary for emission rate estimation, by numerical analysis of movies, without tracing plume on movies by eyes. On the results obtained from 29 March 2017 to 19 June 2018, emission rate is estimated to be 9 – 13 ton/day with panning method or 12 – 28 ton/day with traverse method.

1. はじめに

箱根火山(図1)では、2001年以降数年に一度の頻 度で群発地震が発生しており、2015年4月に始まっ た群発地震活動の期間中には大涌谷(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; Mannen *et al.*,2018)。

近年噴火を引き起こしたいくつかの火山では、気象庁 によって二酸化硫黄(SO₂)放出率の繰り返し測定が行わ れているものがある。その測定によると、浅間山、三宅 島、阿蘇火山では、噴火前後は静穏期に比べ SO₂放出 率が一桁程度大きくなることがある(気象庁地震火山部 火山監視・警報センター, 2018a; 2018b; 福岡管区気象 台地域火山監視・警報センター,2018)。このことから、 噴火を引き起こすような活発な火山では、SO₂放出率の 繰り返し測定を行うことにより火山活動に伴う変化が捉 えられる可能性があり、その測定結果は火山活動の評価 や定量的なモデル化に重要であると考えられる。

箱根火山においては、2015年6月以降、気象庁(2016) や気象研究所(2016)によって SO₂ の放出率の測定が数 回行われている。その後、2017年3月29日には温泉 地学研究所(当所)によりその繰り返し観測が開始され (安部ほか,2017)、現在まで継続されている。

繰り返し観測から火山活動に伴う変化を捉え、定量的 なモデル化を行うためには、観測条件の違いに影響を受

*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 気象研究所火山研究部 〒 305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1
論文,神奈川県温泉地学研究所報告,第 50 巻,1-18, 2018



- 図1 (a) 箱根火山の位置。(b) 箱根カルデラの地形図。三角形で神奈川県が設置したライブカメラの位置を示す。(c) 大涌谷とその周辺の航空写真(Google Earth による)。火口、噴気孔、蒸気井の位置を赤、黄、青の丸印で示す (Mannen et al., 2018)。パンニング法による観測点を赤の星印で示す。トラバース法による観測データの解析に 用いた風向風速値は、気象庁メソ解析(気象庁予報部, 2009)に基づき、緑の四角の位置の標高 1000 m の値を 内挿して算出した。(d) 2018 年 9 月 5 日に(c)の緑の星印の位置で撮影した写真。
- Fig. 1 (a) Location of Hakone volcano. (b) Map around Hakone caldera. Red triangle indicates location of live camera established by Kanagawa Prefectural Government. (c) Air photo of Google Earth. Distributions of craters, fumarole, and steam wells (Mannen *et al.*, 2018) are indicated by red, yellow, blue circles, respectively. The point where we observed with the panning method is indicated by red star. Wind direction and velocity at an altitude of 1000 m at the point indicated by green square were estimated by interpolation based on mesoscale analysis

けず正確に放出率を推定しなければならない。それを念 頭に置き、安部ほか(2017)による研究の中で、正確な 放出率の推定のために解決が必要と考えられる問題点を 以下の4項目に整理した。

安部ほか(2017)は観測機器のシステムによって算出 されたSO₂カラム濃度を用いて放出率を推定している が、このカラム濃度はある程度大きなノイズを含み、特 にSO₂が低濃度の時にその検出が難しくなる可能性があ る。これを防ぐには、観測システムの算出したカラム濃 度をそのまま用いるのではなく、観測した波長分布に対 しノイズを低減させるための処理を行う必要がある。

安部ほか(2017)は、2017年5月22日のSO₂放出 率が他の観測日に比べて一桁程度少量に見積もられたこ とに関し、放出率は大涌谷上空のある平面を超えて上昇 するSO₂の総量から推定しているが、この日は放出さ れたSO₂の大部分がその面まで上昇せず途中で落下し ていた可能性を指摘している。放出率の変化以外の要 因で一桁程度の変化が生じるのであれば、SO₂放出率の 推定結果を火山活動の指標として用いることは困難であ る。極端に小さな放出率が推定された原因を究明しその 対策を施す必要がある。

安部ほか(2017)では、噴気が鉛直に上昇することを 仮定した解析を行っている。しかし実際に大涌谷で噴気 を観察するとその動きは複雑である。鉛直上昇の仮定と 実際とのずれが、推定される放出率に与える影響につい て理解することが正確な放出率を推定する上で重要であ る。また安部ほか(2017)では、噴気の上昇速度を、動 画上の噴気の移動を目視で読み取ることによって推定し ているが、この手法は正確さや客観性に乏しく改善が必 要であると考えられる。

安部ほか(2017)が適用した観測手法は噴気が上昇し ているときにのみ有効であり、噴気が谷筋を流下してい るときには SO₂ を検出することができない。噴気が谷 筋を流下しているときには、それに対応した観測を行う 必要がある。

本研究では、上に挙げた4項目の問題点を解決するために、観測・解析手法にいくつかの改良を施した。そして、改良した手法によって SO₂ の放出率を推定し、その推移を明らかにした。

2. 方法

本章では、前章に挙げた問題点を解決するための工夫 を中心に、観測手法と解析手法について述べる。2017 年8月9日までの大涌谷における SO₂ 放出率は安部ほ か(2017)により報告されているが、本章で説明する手 法は、2017年8月9日以前に得られたデータにも適用 し、新たに SO₂ 放出率を算出した。

2.1. 観測

我々は、安部ほか(2017)と同様にアイリックス社製 の二酸化硫黄濃度遠隔観測 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy)システムを用いて、噴気を通 過する自然光の波長分布を観測し、それにより推定した 光の到来方向に存在する SO₂のカラム濃度に基づいて、 SO₂放出率を推定した。測定原理は Mori *et al.*(2007) および安部ほか(2017)に記述されている。

2017年10月5日以前は、すべての観測を箱根ロー プウェイ大涌谷駅駅舎前においてパンニング法を用いて 行った。この観測の詳細は安部ほか(2017)に記述され ている。この観測手法は噴気が上昇しているときにのみ SO₂放出率を測定できる手法である。本研究では、噴気 が谷筋を流下している場合にも放出率を測定することが できるよう、噴気の移動経路を横切るトラバース法によ る観測も行った。2017年11月6日以降の観測では、 まず大涌谷に赴き放出されている噴気が上昇しているの か谷筋を流下しているのかを目視により判断し、上昇し ていると判断した場合はパンニング法による観測を 行った。2017年10月5日以前はパンニング法による 観測のみ行っているが、観測と併行して撮影した動画か らは、噴気が上昇しているのが見てとれる。

パンニング法、トラバース法の2つの走査法のいずれ を採用した場合においても、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、そ の後噴気の存在しない空から到来する自然光を観測し て、SO₂の影響を受けていない自然光の波長分布を取得 した。そして、機器の校正のために 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自 然光を観測し、それぞれの濃度の SO₂ により影響を受 けた自然光の波長分布を測定した。セルは SO₂ カラム 濃度が、88、173、261、442 ppmm の4 種類である。

by Japan Meteorological Agency (JMA) (Forecasting Section of JMA, 2009) in order to estimate SO_2 emission rate from the data obtained with the traverse method. (d) Photo taken on 5 Sep. 2018 at the point indicated by green star in (c).

- 表1 パンニング法による観測の詳細。左から観測日、走査回数、走査範囲、走査の中心方向の仰角、ライブカメラによる動画の有無(■:あり、□:なし)。
- Table 1 Details of observations with panning method. From left, we show observational day, number of scans, azimuthal range of scan, elevation angle of the central direction of scan, whether movie taken by the live camera is available or not (■ : Available, □ : Unavailable).

Date	Number of Scans	Scan Azimuth (°)	Elevation Angle (°)	Live Camera
29 Mar. 2017	14	124 - 184	17.0	
24 Apr. 2017	13	86 - 206	45.8	
22 May 2017	14	60 - 180	35.0	
29 Jun. 2017	12	82 - 202	33.8	
9 Aug. 2017	16	90 - 210	37.3	
5 Oct. 2017	30	112 - 232	25.1 - 44.6	•
16 Feb. 2018	18	65 - 185	25.0 - 35.0	•
13 Apr. 2018	19	93 - 213	25.3 - 34.6	•
19 Jun. 2018	18	103 - 223	24.8 - 35.3	



- 図2 トラバース法による観測の様子。自動車の天井に 分光器と GPS 電波受信器を設置している。
- Fig.2 Observation with the traverse method. Spectroscope and GPS receiver are put on the roof of a car.

本研究で観測されたカラム濃度の最大値は 316 ppmm であり、ガスセルのカラム濃度は本研究にふさわしい範 囲である。

2.1.1. パンニング法による観測

2017年3月29日から2018年6月19日までに、箱根 ロープウェイ大涌谷駅駅舎前において行ったパンニング 法による観測の詳細を表1に示す。観測手法は安部ほか (2017)と同様である。集光方位は集光範囲を0.5度/秒の

- 表2 トラバース法による観測の詳細。左から観測日、 走査回数、大涌谷(図1c)における風向・風速(気 象庁予報部,2009)。
- Table 2 Details of observations with traverse method. From left, we show observation day, number of scans, wind direction and wind velocity (Forecast Section of JMA, 2009) at Owakudani (Fig. 1c).

Dete	Number of Scans	Wind		
Date		Direction (°)	Velocity (m/s)	
6 Nov. 2017	12	231	12.4	
12 Dec. 2017	20	255	9.8	
15 Jan. 2018	13	234	17.4	
26 Mar. 2018	18	234	7.8	
15 May 2018	19	237	9.7	

速度で往復し、2秒ごとに自然光の波長分布を得た。そ の片道1回分の観測を1回の走査とし、一度の観測で複 数回の走査を行った。2017年10月5日以降は、走査の 中心方向の仰角を一定とせず、表1に記述した範囲内で 走査ごとに仰角を変化させた。これは1章で問題点の第 2項目として挙げた、放出されたSO₂の全てが実際に走 査面(それぞれの走査において集光方向が張る面)の高 度まで達しているかを確認する目的で行った。仰角を変 化させることにより、ある高度に達したSO₂のうちどれ



図3 2018年1月15日の観測で得た光量の波長分布。黒、緑、赤の線で、光を遮断して得た波長分布、SO₂が存在 しない方向から到来する光を観測して得た波長分布、走査で得た波長分布の一例をそれぞれ示す。(a)と(b) は縦軸の大きさが異なる。

Fig. 3 Intensity of light as a function of its wavelength obtained on 15 Jan. 2018. Black, green, and red lines indicate intensity obtained when we block the light, intensity of light that did not pass through SO₂, and one of the intensity distributions obtained when we were scanning volcanic plume, respectively. Graphs shown in (a) and (b) have a different vertical scale.

だけがさらにそれよりも高い場所まで移動するのかを把 握できる。

2.1.2. トラバース法による観測

2017年11月6日から2018年5月15日までに行ったトラバース法による観測の詳細を表2に示す。この観測では、自動車の天井に取り付けた分光器で、真上から到来する自然光の波長分布を移動しながら測定した(図2)。観測は神奈川県道734号線の上湯バス停から箱根ロープウェイ早雲山駅までの区間で行っており、その片道1回分の観測を1回の走査とする。自動車の速度は40 km/h 程度であり、2秒に一度の間隔で自然光の波長分布を得た。波長分布を測定した時刻と場所を対応付けるために、GPSによる測位を同時に行った。GPS 測位データの記録にはカシミール 3D (http://www.kashmir3d.com/)を用いた。

トラバース観測によって得られたデータからSO₂放出 率を推定するためには、SO₂の移動方位と移動速度を仮 定する必要がある。そのため、SO₂の移動方位と移動速 度として、気象庁メソ解析(気象庁予報部, 2009)に おける、北緯35.243度、東経139.022度、標高1000 m (図1)の風向風速の客観解析値(表2)を仮定した。

2.2. 解析

本研究では2種類の走査法を用いた。走査法の違いに より SO₂ 放出率推定のためのデータ解析法は異なるが、 得られた波長分布に基づくカラム濃度の推定手法はほぼ 共通である。2.2.1 節は、どちらの走査法にも当てはま るデータ処理であり、走査法ごとに異なるその後の処理 について、パンニング法に関しては 2.2.2 節、トラバー ス法に関しては 2.2.3 節に述べる。

2.2.1. カラム濃度

SO₂には特定の波長の紫外線を吸収する性質があるため、光の経路上に存在する SO₂のカラム濃度とその波 長の紫外線が減衰する割合(吸光度)には相関がある。 そのため、カラム濃度が既知のガスセルを設置して得た 波長分布に基づいて吸光度とカラム濃度との相関関係を 明らかにし、噴気を通過する光を観測して得た吸光度と を対比することで、光の到来方向に存在する SO₂のカ ラム濃度を把握することができる。本研究では正確なカ ラム濃度の推定のために、安部ほか(2017)が取り入れ ていなかった以下に示す処理を新たに導入した。

2.2.1.1. 迷光補正

2018 年 1 月 15 日に観測した紫外線の波長分布と、 光を遮断して観測したノイズレベルを図3に示す。図3 には、噴気を通過しない自然光の波長分布(緑)と、噴 気を通過する自然光の波長分布(赤)を示した。図3を 見ると、光を遮断しても観測される光量は0にならない。 また、300 nmより短い波長の紫外線は自然には存在し ないにもかかわらず、自然光を観測したデータからは 300 nmよりも短波長で、光を遮断した時よりも大きな 光量が得られている。



図4 吸光度の波長分布。黒の線は SO₂ が存在しない方向から到来する自然光の吸光度を示す。赤、緑、青、紫の線は、88、173、261、442 ppmmのガスセルを分光器の手前に設置して測定した自然光の吸光度を示す。(a) 迷光補正後、バンドパス処理を施していない吸光度。0~6の数字は SO₂ の吸収波長に短波長側からつけられた番号を示す。(b) 迷光補正とバンドパス処理を施して得られた吸光度。

Fig. 4 Absorbance as a function of its wavelength. Black line indicates absorbance estimated from intensity of light that did not pass through SO₂. Red, green, blue, and purple lines indicate absorbances estimated from intensity of light observed with using gas cells containing SO₂ whose column densities are 88, 173, 261, and 442 ppmm, respectively. (a) Absorbance estimated with a method of removing the influence of stray light. 0-6 indicates the order of absorption wavelengths of SO₂. (b) Absorbance estimated with a method of removing the influence of stray light and passed through a bandpass filter.

観測機器に歪みや光漏れがあると、実際とは異なる波 長のディテクターに光が迷い込むことがある(迷光と呼 ばれる)。また観測機器の状態が時間変化し、得られる 光量にドリフトが現れることもある。つまり、観測され る波長分布には、逆光やドリフトの影響が含まれている。 そこで、その迷光やドリフトによる悪影響を軽減するた めの補正を行った。

本研究では、走査で得られた波長分布を $P(\lambda)$ 、噴気 を通過しない自然光の波長分布を $R(\lambda)$ 、光を遮断して 得た波長分布を $D(\lambda)$ として、波長 λ の吸光度 $A(\lambda)$ を

$$A(\lambda) = -\ln \frac{P(\lambda) - D(\lambda) \times P_{\text{RMS}} / D_{\text{RMS}}}{R(\lambda) - D(\lambda) \times R_{\text{RMS}} / D_{\text{RMS}}}$$
(₹1)

とした。ここで、下付きの RMS は、それぞれの波長分 布の 285 – 295 nm の二乗平均平方根(RMS)を意味す る。このように、対数の引数中で、*P*(*A*)、*R*(*A*) のそれ ぞれから、*D*(*A*) をそれぞれの迷光及びドリフトのレベ ルまでかさ上げして引いたものどうしを比較することに より、迷光とドリフトの影響を受けない吸光度*A*(*A*) を 推定した。

2.2.1.2. バンドパス処理

図 4 a にそれぞれのガスセルを設置して得られた吸光 度の分布を示している。図 4 a に示したように、SO₂ に



- 図 5 検量線。プラス印はそれぞれ SO₂ が存在しない 方向から到来する自然光の吸光度の伸縮率、88、 173、261、442 ppmmのガスセルを分光器の手 前に設置して測定した自然光の吸光度の伸縮率と SO₂ カラム濃度との関係を表す。緑の線は、その 関係を近似した 2 次曲線(検量線)。
- Fig. 5 A standard curve. Crosses indicate ratio of expansion of absorbance obtained from light without passing through SO₂, and ratios of expansion obtained when we put gas cells containing SO₂ whose column densities are 88, 173, 261, and 442 ppmm, respectively. Green line indicates a quadratic curve approximating the relationship between ratio of expansion and SO₂ column density (standard curve).



図6 吸光度の波長分布 (a、d) と、(a) および (d) の吸光度からカラム濃度を推定するためのグリッドサーチの結果 (b、c および e、f)。(a) (d) の紫のグラフはカラム濃度が 442 ppmm のガスセルを設置して得た吸光度を、(a) (d) の黒のグラフは 2018 年 2 月 16 日の走査で得た吸光度の一例を示す。ただし、紫のグラフはグリッドサーチによ り得られた最適な伸縮率が掛けられている。(b) (c) (e) (f) はグリッドサーチの結果を示しており、(c) (f) は それぞれ (b) (e) の最適値付近を拡大したもの。

Fig. 6 Wavelength distribution of absorbances (a, d), and results of grid-search for estimating column density from absorbances shown in (a) and (d) (b, c and e,f). Purple lines in (a) and (d) indicate absorbances obtained with a gas cell containing SO₂ of 442 ppmm, and black lines in (a) and (d) indicate absorbances obtained during scanning on 16 Feb. 2018. Graphs indicated by purple lines are multiplied by the best ratio of expansion detected by grid-search. The results of grid-search are shown in (b) (c) (e), and (f). (c) and (f) zoom in the area near the best fit value in (b) and (e), respectively.

よる紫外線の吸収波長は複数存在し、隣り合う波長の間隔 は2 nm程度である。つまり、SO₂による紫外線の吸収を 評価する際に、2 nmよりも短周期・長周期の揺らぎはノ イズとなる。そこで、それぞれの吸光度の関数に周期 1.0 nm から4.0 nmのバンドパスフィルタをかけて、解析の妨げと なる成分を除去した。バンドパス処理後の吸光度を図 4 b に示す。

2.2.1.3. 検量線

図4bを見ると、異なるカラム濃度に対応する吸光度の 分布は、絶対値は異なるがよく似ており、ある分布を縦軸 方向に伸縮させることでその他の分布を表現することがで きる。つまり、あるガスセルを用いて得た吸光度分布をリ ファレンスとし、その他の分布をそのリファレンスの縦軸 方向の伸縮で表現すると、伸縮率とカラム濃度とを対応付 けることができる。

そこで、ガスセルを用いて得た吸光度分布のうち、最も

カラム濃度が高くノイズレベルが低いと考えられる442 ppmm のガスセルで得た吸光度分布をリファレンスとした。 308.6 nm付近の吸収帯域(図4aの2)は0-800 ppmm のカラム濃度に、313.1 nm付近の吸収帯域(図4aの4) は200-1500 ppmmのカラム濃度にそれぞれ感度が良 い。本研究では307-313 nmの帯域の吸光度分布を用い て、伸縮率とカラム濃度とを対応付ける検量線を作成し た。この検量線は伸縮率とガスセルのカラム濃度との関係 を2次曲線で近似することにより取得した(図5)。そし て、走査で得た吸光度分布の伸縮率を検量線に照らし合わ せてカラム濃度を推定した。ただし、走査で得た伸縮率も リファレンス以外のガスセルの伸縮率も、リファレンスと の残差二乗和を最小化する伸縮率を、グリッドサーチを用 いて推定した(図6)。

2.2.1.4. 光量の飽和と不足

走査の途中で分光器に入射する光量が観測の上限を超え

る場合があり、そのデータからは正しい吸光度を推定で きない。また、気象条件や植生によって光が遮られるこ とにより、分光器に入射する光量が小さくなる場合もあ り、そのデータから推定される吸光度は巨大なノイズを 含み得る。そのようなデータは、カラム濃度の推定から 除外される必要がある。

本研究では、カラム濃度の評価に用いる307-313 nm の波長帯域において、光量が観測の最大値を超えている と判断できるデータを放出率推定に用いなかった。また、 得られた光の強度の 307-313 nm の積分値が、噴気を 通過しない自然光の 307-313 nm の積分値の 10% 未 満となるデータを光量が小さすぎると判断して、放出率 推定に用いなかった。

放出率推定に用いなかったデータのカラム濃度は、光 量の飽和と不足がない観測データのうち、その時刻を挟 み最もその時刻に近いペアから内挿した値に差し替え た。

2.2.2. パンニング法で得られたデータの解析

大涌谷で放出される噴気は実際には複雑な挙動をする が、安部ほか(2017)は噴気が常に鉛直に上昇している ことを仮定している。本研究においても、噴気は直線上 を一定の速度で上昇していることを仮定するが、安部ほ か(2017)とは異なりその直線に3次元的な傾きを仮定 した。また、安部ほか(2017)は動画で撮影した噴気の 上昇速度を目視により推定していたが、本研究では数値 的な解析に基づく客観的な評価手法を適用して推定し た。

2.2.2.1. ベースラインのオフセット除去

我々は、それぞれの観測日に得られた全データを用いて、 集光方位ごとにカラム濃度の平均と標準偏差を求めた。 そして、最も標準偏差の小さい方位にはSO₂は存在しない ことを仮定した。そして、その方位の平均が0 ppmmと ならない場合は、ベースラインが0 ppmmからずれてい ると考えて、その方位の平均値を全ての走査データから 差し引いた。

2.2.2.2. 走査データの採用可否

それぞれの走査で得られるカラム濃度の方位分布の例 として、2018年2月16日の観測で得られたものを図7 に示した。走査範囲に走査面を通過するSO₂の全てあ るいは大部分を捉えていなければ、放出率の過小評価に つながる。それを避けるために、カラム濃度の方位分布 が次の三つの条件を満たす走査のみをSO₂の放出率の 推定のために採用した。

条件1:SO₂カラム濃度の全走査範囲の積算が正であること。これが正にならない走査ではSO₂を捉えることができていないと判断した。

条件2:カラム濃度の方位分布を正規分布で近似した とき、その方位の平均±標準偏差の範囲が走査範囲内に 収まること。この平均と標準偏差は、カラム濃度の方 位分布を $D(\theta)$ 、正規分布を $C(\theta)$ として、全走査範囲 における残差二乗和 $\int (D(\theta) - G(\theta))^2 d\theta$ の値を最小に するグリッドサーチにより決定した(ただし、 $G(\theta)$ は $\int G(\theta)d\theta = \int D(\theta)d\theta$ を満たす)。それが走査範囲に収 まらないときは、SO₂の一部しか走査範囲に捉えること ができていないと判断した。

条件3: $\frac{2\int (D(\theta)-G(\theta))^2 d\theta}{\int D(\theta)^2 d\theta + \int G(\theta)^2 d\theta}$ の値が1.0より小さいこと。

カラム濃度を最もよく説明する正規分布の標準偏差1つ 分の範囲が、走査範囲に含まれていても、その正規分布 がカラム濃度の分布とある程度似ていなければ、走査範 囲に SO₂ の大部分を捉えたとはいえないと判断した。

2.2.2.3. 各走査における SO₂ 放出率

我々は、n 番目の走査から SO₂ 放出率 E_n(トン / 日)を、

$$E_n = \int c_n(\theta) r_n(\theta) d\theta \times v^{pl} \times (\overrightarrow{p} \cdot \overrightarrow{s_n})$$

$$\times \rho^{SO2} \times 86400 \times 10^{-6}$$
 (£2)

として推定した。ここで、 $c_n(\theta)$ は、n 番目の走査におけ る方位 θ のカラム濃度 (ppmm)を示す。 $r_n(\theta)$ は、観測 点から集光方向に延ばした直線上の、噴気の上昇経路と の距離が最短となる位置までの、観測点からの距離(m) を示す。2017年10月8日以降のパンニング法による 観測では、走査の中心方向の仰角を走査ごとに異なる値 に設定しているため、 $r_n(\theta)$ の値はnによって異なる。 $v^{\prime\prime}$ は噴気の移動速度 (m/s)を、 \vec{r} は噴気の移動方向 を示す3次元の単位ベクトルを、 \vec{s}_n はn 番目の走査に おける走査面の単位法線ベクトルを、 ρ^{SO2} は SO₂ の密 度 (2.76 × 10⁻³ トン/m³)をそれぞれ示す。内積 $\vec{p} \cdot \vec{s}_n$ は、噴気の移動方向と走査面の法線とのなす角の 余弦である。

 $c_n(\theta)$ は 2.2.1 節の手法により推定することができ、 ρ^{SO2} は既知である。さらに $\vec{s_n}$ は観測時の設定により明 らかである。よって、上述のように放出率を推定するた めには、 $r_n(\theta)$ 、 v^{ρ} 、 \vec{p} を推定することが必要である。 以降、それらの値を推定する手法について説明する。



- 図7 2018年2月16日のパンニング法による観測で得られた、それぞれの走査の方位とカラム濃度との関係。黒線は 走査で得られたカラム濃度を、赤線はグリッドサーチにより決定した、それぞれの方位とカラム濃度との関係を 最も良く説明する正規分布を示す。左上の数字は走査の番号を示す。"NG"はその走査で得たカラム濃度の分布 が SO₂ 放出率推定に用いるための条件に適合していないことを示す。
- Fig. 7 Relationship between scan azimuth and obtained SO₂ column density obtained with panning method on 16 Feb. 2018. Black line indicates column density obtained each scan, red line indicates a Gaussian distribution determined by a grid-search that represents the obtained column density distribution the best. "NG" indicates that the scan is not interpreted to detect emitted SO₂ successfully.

2.2.2.4. 噴気の移動 (アの推定)

我々は、観測時の噴気の様子を、観測地点からデジタ ルカメラにより撮影した。また、箱根カルデラ北部には 神奈川県により大涌谷監視用のライブカメラが設置され ており(図1)、それらのカメラにより撮影された観測 時の動画を用いて、噴気の移動方向を推定した。

噴気の移動は単純ではないが、噴気が噴気孔から一直 線に上昇することを仮定した。撮影方向に対して奥行き 方向の噴気の移動を評価することはできないので、まず それぞれの動画から上昇する噴気の右への(あるいは左 への)傾きを評価した。そして、2方向から見た噴気の 傾きから、噴気の3次元的な移動方向を推定した(図8)。

撮影した動画から、動画解析ソフト ffmpeg を用いて 1 秒間隔で静止画を切り出し、さらに画像解析ソフト ImageJ を用いてその静止画をグレースケールの輝度分 布に変換した(図9)。これらの解析ソフトは、大涌谷 における画像解析の先行研究(萬年,2017)でも用い られている。左から右方向に*I* 番目、下から上方向に*J* 番目の画素の時刻*t* 秒の輝度を*B*_t(*I*,*J*) としたときに、



- 図8 2方向から撮影した動画から、噴気の傾きを推定 することにより、噴気の3次元の移動方向が推定 できることを示す模式図。
- Fig. 8 Cartoon indicating how we estimated 3-dimensional moving direction of plume, based on leanings of moving direction of plume estimated from movies taken from two sites.

Photo Extracted from Movie Taken by the Live Camera



Brightness Distribution



- Fig. 9 (a) Photo extracted from movie of the live camera (Fig. 1) taken on 16 Feb. 2018, by "ffmpeg", a movie analysis software. Red box indicates the area used for estimating moving direction of plume. (b, c, d) Brightness distribution converted from the extracted photos by "ImageJ", an image analysis software. Brightness distributions shown in (b), (c), and (d) are taken every one second. (e, f) Distribution of brightness change from the shooting time of (b) to (c), and from (c) to (d), respectively. When we assume the distribution shown in (c) as B_t (I,J) of (equation 3), (b) (d) (e), and (f) are represented by B_{t-1} (I,J), B_{t+1} (I,J), B_t (I,J), -B_{t-1} (I,J), -B_t (I,J), respectively.

$$\begin{aligned} \text{Misfit}\,(i,j\,) \\ &= \sum_{t} \sum_{I} \sum_{J} \left((B_{t+1}\,(I,J\,) - B_{t}(I,J\,)) \\ &- (B_{t}(I+i,J+j\,) - B_{t-1}(I+i,J+j\,)) \right)^{2} \end{aligned} (\ensuremath{\texttt{I}}\xspace{-1.5ex} \end{aligned}$$

と定義した Misfit を最小にする i, j の値をグリッドサー チにより決定し、噴気が1秒間に右にiピクセル、上に jピクセル移動したと判断した。グリッドサーチに用い た動画は撮影した全範囲ではなく、噴気の移動を調べる ために必要な範囲に限定した。さらに、I、Jの総和の範 囲は (I+i, J+j) がその限定した範囲に収まるように i、jの 値に応じて設定した。そうすると、iとjの値によって Misfit を計算するための画素数が異なり得るので、その 画素数で Misfit の値を割ってノーマライズした。式3で は輝度変化の分布を1秒間隔で比較している。この時間 間隔が大きいほど噴気の移動方向の推定精度は良い。し かし、噴気の形状は時間変化するので、間隔が大きけれ ばその時間の前後で比較すべき噴気の形状がより大きく 異なることになり、移動方向の推定が不正確になるとい う弊害がある。そこで、比較する時間間隔が1秒と2秒 のそれぞれでグリッドサーチを行い、得られた解の平均 値を移動方向とした(図10)。

現在までの観測では、走査と同時に撮影したライブカ メラの動画データが入手できない場合もあった(表1)。 この場合は上述のように、噴気の移動方向を決定するこ とができないため、噴気は鉛直に上昇している(アが 鉛直上向きの単位ベクトルである)ことを仮定した。

2.2.2.5. 走査と噴気のジオメトリ (r_n(*θ*)の推定)

r_n(θ) を推定するためには、SO₂ を放出している噴気 孔の位置を仮定し、噴気の上昇経路を固定する必要があ る。噴気孔の位置が決まれば、そこから pの方向に延び る半直線を噴気の上昇経路と考えることができる。そこ で、2015 年の活動活発化時に形成された火口、噴気孔 群 (Mannen, 2018)の中ほどに位置し、SO₂の主たる 放出源と考えられる 39 号蒸気井と 52 号蒸気井(図1) の中点を、その噴気孔の位置と仮定した。観測点からそ の位置までの水平距離は 181.2 m である。上昇経路が 決まると集光方向を仮定することにより r_n(θ)が決まる。

2.2.2.6. 噴気の移動速度 (v^{pl}の推定)

噴気の移動速度の推定には、観測点から撮影した動画 を用いた。予め観測点から大涌谷を挟んで対岸の山肌に 複数の目標を設定し、その仰角を測定した。2.2.2.4 節 で説明したグリッドサーチのうち、観測点から撮影した 動画を解析する場合に、動画の上限下限を2つの異なる



図 10 2018 年 2 月 16 日のライブカメラ映像のグリッドサーチによる Misfit (*i, j*)の分布。(a) 輝度変化の分布を1 秒間隔で比較した Misfit の分布。(b) 輝度変化の分布を2 秒間隔で比較した Misfit の分布

Fig. 10 Distribution of Misfit (*i*, *j*) obtained by a grid-search based on movie of the live camera taken on 16 Feb. 2018. (a) The result of a grid-search where distribution of brightness change is compared every one second. (b) The result of a grid-search where distribution of brightness change is compared every two seconds.

仰角の目標の位置に設定しており、その仰角の差に基づ き噴煙の移動速度(ピクセル/秒)を仰角の増加率(度/秒) に変換した。我々はすでに、噴気の上昇経路を固定して いるため、仰角の増加率が分かれば、噴気の移動速度 v^{pt} を推定することができる。

2017 年 3 月 29 日の観測点での動画撮影には、三脚 を用いておらず 2.2.2.4 節で示した解析を適用できない。 そのため、安部ほか (2017) が目視により推定した噴気 の上昇率を用いた。ただし、安部ほか (2017) は観測点



- 図 11 それぞれの走査で推定された SO₂ 放出率。SO₂ 放出率は、赤の十字により、52号井と39号井の中点から、 噴気の上昇経路と走査面との交点までの距離の位置に示されている。黒の点線で、赤の十字で示した各走査の放 出率と距離の関係を近似した直線を示す。星印はその近似直線上の距離0mの位置にあり、その日の放出率を示 す。緑の両矢印でその日の放出率の誤差範囲を示す。(a) (b) (c) (d) は、それぞれ観測日が異なる。
- Fig. 11 SO₂ emission rate obtained from each scan. SO₂ emission rate is shown by red cross at a distance between midpoint of two steam wells (No.52, No.39) and intersection of corresponding scan surface and plume path. Black dashed line approximates the relationship between emission rate and distance shown by red crosses. Star located on the approximated line at a distance of 0 m shows the estimated emission rate on the observational day. Green arrow indicates the error range of emission rate on the observational day. (a) (b) (c) (d) indicate the relationships obtained at a different observational day.

から噴気孔までの距離を 250 m と仮定して噴気の上昇 速度を 7.2 m/s と推定していたが、本研究では距離を 181.2 m と仮定したため上昇速度は 5.2 m/s と見積もっ た。

2.2.2.7. SO2放出率

上述のようにして推定した各走査における SO₂ 放出率 と、噴気孔から走査面までの噴気の上昇経路上の距離の 関係を調べた(図 11)。この図からは、いずれの観測日 においても、噴気孔から走査面までの距離が遠いほど、 SO₂ の放出率が少なく推定される傾向があることが分か る。その原因を断定することはできないが、1 章の最初 で述べたように、噴気が上昇する途中で SO₂ の一部が 脱落していると考えることができる。いずれにせよ、噴 気孔から走査面が遠いほど SO₂ の放出率は少なく見積 もられるので、各観測日における放出率とその誤差範囲 はそれを考慮して決定されるべきである。

そこで、SO₂ 放出率と噴気孔から走査面までの距離と の関係を直線で近似し、その直線上で距離 0 m に対応 する SO₂ 放出率をその観測日の放出率とした(図 11)。 つまり、放出された SO₂ が上昇経路を進むにつれ、進 んだ距離に応じて一定量の SO₂ が脱落することを仮定 した上で、噴気孔における放出率を見積もっている。そ して、グラフ上で各走査の距離と放出率の位置を通り、 近似直線と同じ傾きを持つ直線上の、距離 0 での放出 率をそれぞれ求め、その最小値から最大値までの範囲を 誤差範囲とした(図 11)。

2.2.3. トラバース法で得られたデータの解析

本研究では、噴気が大涌谷を流下しているときでも SO₂放出率を推定できるようにトラバース法による観測 を導入したので、その観測データに適用した解析につい



- 図 12 2015 年から 2018 年 6 月までに得られた、大涌谷における SO₂ 放出率。赤の丸印でパンニング法による観測デー タを用いた推定値を、緑の丸印でトラバース法による観測データを用いた推定値をそれぞれ示す。黒の縦線は誤 差範囲を示す。2016 年以前の放出率は、気象庁 (2016) と気象研究所 (2016) により推定されており、気象庁 (2016) による推定値は誤差範囲のみを示した。
- Fig. 12 SO₂ emission rate at Owakudani from 2015 to Jun. 2018. Emission rate indicated by red (green) circles were based on data obtained by panning (traverse) method. Black bars indicate error ranges. Emission rates in 2015 and 2016 are estimated by JMA (2016) and Meteorological Research Institute (2016), and estimates by JMA (2016) are indicated only by bars indicating error ranges.

て述べる。

2.2.3.1. 各走査における SO₂ 放出率

まず、紫外線量の観測と同時に取得した GPS による 測位データをもとに、カラム濃度と座標とを対応付け た。SO₂の移動方向は気象庁のメソ解析(気象庁予報部 , 2009)による大涌谷の風向(表2)と同じで、観測の 途中で変化しないことを仮定した。走査経路が直線状で あり SO₂の移動方向と直交していれば n 回目の走査の 放出率 E_n(トン / 日)は、

$$E_n = \int c_n(r) dr \times v^{pl} \times \rho^{SO2} \times 86400 \times 10^{-6} \qquad (\mbox{\pounds}4)$$

と推定できる。ただし走査経路が積分経路である。

しかし、実際の走査経路は曲線状であり、また風向も 観測日により異なる。そこで、走査経路を風向に直交す る水平面内の直線に投影したものに置き換えた。以降、 トラバース法で用いた走査経路はこの投影した直線上の 経路を指すこととする。

2.2.3.2. ベースラインのオフセット除去

パンニング法で得られたデータの処理と同様に、ベー スラインのオフセットを 0 ppmm にするため、それぞ れの観測日で全データを用いて経路上の距離ごとにカラ ム濃度の平均と標準偏差を求めた。そして、最も標準 偏差の小さい位置には SO₂ は存在しないことを仮定し、 その位置の平均が 0 ppmm とならない場合はベースラ インにずれがあると考え、その平均値を全ての走査デー タから差し引いた。

2.2.3.3. 走査データの採用可否

各観測日における SO₂ 放出率の推定に用いるべき走査 を選別する方法は 2.2.2.2 節とほぼ同じで、経路上のカ ラム濃度の分布が次の 3 つの条件を満たすものを採用し た。

条件1:SO₂カラム濃度の全走査範囲の積算が正であ ること。

条件2:カラム濃度の距離分布を正規分布で近似した とき、その距離の平均±標準偏差の範囲が走査範囲内に



- 図 13 トラバース法による観測から得られたカラム濃度の分布。ただし、ベースラインのオフセットは除去していない。
 (A, B, C, D, E) DOAS による算出結果。(a, b, c, d, e)本研究で適用した手法により得られた分布。赤の線で大涌谷橋のおおよその位置を示す。緑の星印と線は、図1cの緑の星印の位置に対応する。
- Fig. 13 Column density distribution obtained with traverse method without removing offset of baseline. (A, B, C, D, E) Distribution obtained by DOAS. (a, b, c, d, e) Distribution obtained through processes that we applied in this study. Red lines indicate approximate location of Owakudani bridge. Green star and line correspond to approximate location indicated by green star in Fig. 1c.

収まること。

条件3: $\frac{2\int (D(r) - G(r))^2 dr}{\int D(r)^2 dr + \int G(r)^2 dr}$ の値が1.0より小さいこと。

ただし、rは経路上の位置、カラム濃度の分布をD(r)、 その分布を最もよく説明する正規分布をG(r)とする。 $G(r) は\int G(r) dr = \int D(r) dr$ を満たす。

2.2.3.4. SO2放出率

上述の条件を満たす走査から推定された SO₂ 放出率の 平均値をその観測日の放出率とし、その最小値から最大 値までを誤差範囲とした。

3. 結果

2018年6月19日までに測定した、大涌谷における SO₂ 放出率を図12に示す。図12には、参考とし

て2015年、2016年に気象庁 (2016) と気象研究所 (2016) により測定された大涌谷における SO₂ 放出率も 示した。

4. 考察

4.1. カラム濃度の推定手法について

安部ほか(2017)は、観測した紫外光の波長分布に基 づいて DOAS が算出したカラム濃度を SO₂ 放出率の推 定に用いた。本研究では、得られた波長分布に基づき 2.2.1 節で示した手法を用いてカラム濃度を推定した。 DOAS の算出結果と本研究の解析を適用して推定したカ ラム濃度との違いについて、図 13 に示した。図 13A, B, C, D, E は DOAS の算出結果であり、図 13a, b, c, d, e は本研究の解析を適用した結果である。DOAS は迷光補 正やバンドパス処理のない吸光度(安部ほか(2017)を 参照)を用い、ピークの高さ(例えば、図 4 a の水色の 両矢印の長さ)をもとに吸収帯域ごとに検量線を作成し それを参照してカラム濃度を推定している。本研究のト ラバース法による観測のように 200 ppmm 以下のカラ ム濃度が推定される場合は、常に 2 番の吸収帯域を参照 している(図 4 a)。

図 13 を見ると、本研究で適用した手法で推定した a, c, d の分布は DOAS が算出した A, C, D の分布に比べ、 値のばらつきが小さく精度の高いカラム濃度推定ができ ているように見える。また、E では星印の位置に大きな ピークがあるが、e ではそのピークはほとんど見えない。 図 1 d に 2018 年 9 月 5 日の図 13E の星印の位置に対 応するトラバース法の観測経路の様子を示した。この場 所は、植生が道路を覆っているので葉が生い茂る季節 には十分な光量が得られないことがある。図 13E のこ の位置にピークが現れるのは光量不足が原因であり、図 13e では光量不足による悪影響が適切に取り除かれてい ると考えられる。

ここまで見ると、DOAS により算出されたカラム濃度 より、本研究で適用した手法を用いて推定したカラム濃 度の方が、高精度でかつ環境に依存しないように見え る。しかし、Bとb、Eとeを見比べるとそれほど値の ばらつきに違いがなく、本研究で適用した手法がカラム 濃度推定の高精度化に寄与していない場合もあると考え られる。さらに、Eとeを見比べると、0 m付近と 800 m付近のそれぞれに、DOAS の算出結果には存在しない 巨大なピークが存在する。そのピークは、この日の他の 走査の結果からは得られておらず、実際に存在する SO₂ を捉えたものとは考え難い。このピークの原因は現時点 では明らかではなく、その解明は今後の課題としたい。

- 表3 安部ほか(2017)が推定した噴気の上昇速度(m/s)と、本研究で推定した噴気の上昇速度(m/s)。
 安部ほか(2017)は観測点から噴気孔までの距離を250mと仮定しているが、本研究では181.2mと仮定しており、比較のため本研究で推定された値には250/181.2を掛けて示す。
- Table 3 Ascending velocity of plume (m/s) estimated by Abe et al. (2017) and in this study, respectively. Abe et al. (2017) assumed 250 m as a distance from observation point to fumarole, while we assumed 181.2 m in this study. Therefore, we multiplied velocity estimated in this study by 250/181.2 for comparison.

	Ascending velocity (m/s)		
Date	Abe et al. (2017)	This Study	
24 Apr. 2017	2.5	2.3	
22 May 2017	2.4	0.6	
29 Jun. 2017	3.4	2.4	
9 Aug. 2017	4.7	3.0	

ただし、この巨大なピークが現れた走査は、2.2.3.3節の基準によりその日の放出率の推定からは除外されており結果には影響していない。

4.2. 噴気の移動速度の推定について

式(2)によると、パンニング法で得られたデータに 基づく放出率の算出には噴気の速度が因数として掛けら れるため、噴気の速度が放出率の推定に与える影響は大 きい。よって、正確に放出率を推定するためには、噴気 の速度推定の客観性と正確さが必要である。

安部ほか(2017)は、観測点から撮影した動画から、 目視により噴気の上昇速度を推定しているが、本研究で は動画を数値的に解析して噴気の移動速度を推定した。 上昇速度を目視で判断する場合、動画の中で目立ついく つかの噴気の塊だけに注目してその移動時間を測定する ことになる。本研究で行った数値的な解析では、目立つ 塊だけでなく動画の評価すべき範囲に捉えられた全ての 噴気を評価することができ、またいくつかの噴気の塊で はなく撮影時間内に捉えられた全ての噴気の動きについ て評価することができる。目視ではどの塊を選択するか によって移動速度の推定値に差異が生じることになる が、数値的な解析はその選択の必要がなく客観的である。 また、上昇速度を目視で判断する場合、背景となる対岸 の岩肌に設定した目標間を噴気の塊が移動するのにかか る時間を測定するが、移動に時間がかかる場合はその間 の噴気の形状の変化が大きく、正確に移動時間を測定す ることが難しかった。一方、本研究の数値的な解析では 1秒(または2秒)ごとの画像データを評価しており、 噴気の形状変化に左右されにくい推定が可能である。

安部ほか(2017)と本研究との推定される上昇速度の 比較を示した表3を見ると、本研究では安部ほか(2017) よりも遅い上昇速度が推定されていることがわかる。こ れは、安部ほか(2017)が目立っていて確実に上昇して いる噴気のみを対象としたことで、上昇速度を過大評価 した結果であると考えられる。

4.3. パンニング法による放出率の過小評価について

安部ほか(2017)の5回の放出率測定のうち、2017 年5月22日の観測で得られた放出率は他の4回よりも 一桁程度小さかった。安部ほか(2017)は、その日の観 測中に放出された SO₂の大部分が走査面の高さまで上 昇していない可能性を指摘した。そこで本研究では、走 査面の高度によって検出される SO₂ 放出率がどのよう に変化するのかがわかるように、2017年10月5日以 降の観測では走査ごとに仰角を変化させた。図 11 に示 したように、それぞれの走査で推定される放出率と、噴 気孔から走査面までの上昇経路の長さとの関係を直線で 近似すると、近似直線は常に負の傾きを持つ。このこと は、噴気が上昇経路を進むにつれて SO2 が脱落してい ることを示していると思われる。表3を見ると、2017 年5月22日の噴気の上昇速度を本研究で再解析した結 果、0.6 m/s と他の観測日に比べて極めて遅い速度が推 定されている。この日は、噴気の上昇が弱く放出された SO₂のうち脱落する SO₂の割合が大きかったため、多く の SO₂ がその日の走査面まで到達できなかった可能性 が高いのではないだろうか。

本研究では放出率として、それぞれの走査の噴気孔か らの距離と放出率との関係を直線で近似しその直線上の 距離0mの値を用いている(図11)。このように直線 で近似することが正当とは限らないが、現時点ではSO₂ の脱落を考慮した推定方法がこれ以外にない。機器の仰 角やその日の噴気の上昇の仕方の違いが原因で、推定さ れる放出率に大きな違いが現れることは、図11からも 明らかであり、観測条件に左右されない放出率推定を行 うにはSO₂の脱落を考慮する必要がある。繰り返し観 測を続けることで、噴気孔からの距離とSO₂放出率と の関係をより明確に理解し、SO₂の脱落の過程への理解 が深まれば、その関係のより的確な表現や、正確な放出 率推定が可能となると考えられる。

4.4. 噴気の上昇経路の傾きを考慮した影響について

我々は、2017年10月5日、2018年2月16日、同 年4月13日の観測データを、噴気の上昇経路の傾きを 仮定して解析した。それにより推定された放出率(誤差 範囲)はそれぞれ、9.7 (7.6 – 10.4)トン/日、6.2 (3.7 – 8.7)トン/日、13.9 (9.5 – 19.7)トン/日であった。 この3つの観測日のデータについて、噴気が鉛直に上昇 していることを仮定した放出率の推定も行った。その結 果はそれぞれ、10.0 (9.4 – 10.4)トン/日、5.0 (3.8 – 6.7)トン/日、12.1 (9.6 – 15.1)トン/日であった。 これを見ると、噴気の上昇経路が鉛直であることを仮定 した場合と傾斜していることを仮定した場合とで推定結 果に大きな違いがないことが分かる。

噴気の傾斜はそれぞれ、鉛直から 68°、76°、44°と ある程度大きい角度が仮定されている。また、噴気の移 動方位もそれぞれ 37°、77°、356°となっており、3つ の観測条件にはある程度のバリエーションがある。ライ ブカメラの動画データが得られない観測日(表1)には、 噴気が鉛直に上昇していることを仮定して放出率を推定 したが、現時点での解析結果を見る限り、そのことは放 出率の推移を解釈する上で問題になりそうではない。

本研究の手法では、噴気の傾斜は2方向から撮影した 動画がなければ推定できない。何らかのトラブルで動画 が得られない事態も考えられるが、それが得られない場 合は鉛直上昇を仮定せざるを得ない。今後も同様の観測・ 解析を継続し、噴気の傾斜が放出率の推定にどの程度の 影響を及ぼすかについての理解を深めることが、そのよ うな事態に陥ったときに放出率の推移を正しく解釈する 上で重要である。

4.5. 観測法の違いについて

2017年10月5日以降、トラバース法による観測デ ータを用いて推定したSO₂放出率は12-28トン/日、 パンニング法による観測データを用いて推定した放出率 は9-13トン/日と、トラバース法によるデータを用 いた方が、放出率が大きく推定される傾向がある。まだ 観測数が少なく、トラバース法により観測を行ったとき の放出率の方が実際に大きかったとことも否定できない が、この放出率の差の原因が観測手法の違いにあると考 えることもできる。

このように観測手法によって推定される放出率が異な る原因として、Mori *et al.*(2006)はパンニング法の観測 点の方がトラバース法の観測コースよりも噴気から遠い ことが一般的であると述べた上で、観測地点と噴気との 距離が大きいほど、噴気通過後の紫外線の散乱の影響が 大きく、放出率が小さく推定されることを示している。 しかし、本研究ではトラバース法の観測のコースよりも パンニング法の観測点の方が噴気に近く(図1)、放出 率に差が現れる原因が噴気からの距離による紫外線の散 乱の大きさの違いとは考えにくい。

どちらの手法にも問題がなく正しい放出率が推定され ていたのか、また、問題があるとして、どちらの手法に 問題があり、何が原因なのかについては、現在のところ 分かっておらず、その解明は今後の課題としたい。

4.6. 放出率の推移について

当所において繰り返し観測を開始した2017年3月29日 以降、放出率には変動があるように見える(図12)。 具体的には、他の観測日と比較して、2017年5月22日 の放出率が顕著に小さく、2017年11月6日、12月12 日、2018年1月15日、3月26日の放出率が大きい。し かし、2017年5月22日の放出率はSO2の上昇途中の脱落 を考慮していないことにより過小評価されていると考 えることができる。また、上述の大きな放出率が推定さ れた4観測日の全てにおいてトラバース法による観測が 行われている。4.5節に述べたように、実際にその4観 測日の放出率が大きかった可能性もあるが、トラバース 法を用いたために放出率が過大評価された(または、パ ンニング法を用いた他の観測日の放出率が過小評価され た)可能性も考えられる。よって、2017年3月29日以 降、放出率の顕著な時間変化が捉えられたとは言いきれ ない。

今後の放出率の時間変化を監視する上で、パンニング 法を用いた放出率推定では SO₂の上昇途中の脱落を考 慮しないと過小評価につながること、またどちらかの観 測手法が過大評価(あるいは過小評価)の原因になって いる可能性があることを念頭に置く必要がある。2017 年 10月8日以降に測定した SO₂ 放出率(図 12)に基 づき、パンニング法による推定で9-13トン/日、ト ラバース法による推定で12-28トン/日程度が推定さ れることが現時点での定常状態であるとみなし、今後の 測定値にその定常状態からの顕著な変化があるかどうか を注視することが、我々の観測から火山活動を監視する ための最善の方法であると考えられる。

5. 結論

我々は、2017年3月29日から2018年6月19日まで、 DOASを用いて大涌谷における SO₂ 放出率を繰り返し測 定した。

噴気の移動方向によらず測定を行えるように、2つの

観測手法 (パンニング法とトラバース法)を取り入れた。 解析には DOAS により算出されるカラム濃度を用いず、 観測で得られた紫外線の波長分布を解析して推定したカ ラム濃度を用いた。それにより、ノイズや光量不足によ ると考えられる悪影響を低減することができた。

パンニング法によって得たデータの解析のために、数 値的な動画解析に基づき噴気の移動経路および移動速度 を推定する手法を確立した。また、走査ごとに機器の仰 角を変化させて得たデータに基づいて SO₂ が上昇途中 に脱落することを示し、その脱落を考慮した放出率の推 定を行った。

その結果、この期間の SO₂ 放出率は、パンニング法に よって 9 – 13 トン / 日程度、トラバース法によって 12 – 28 トン / 日程度と推定された。

謝辞

瀧沢倫明氏、菊川城司氏、本多亮氏には、原稿を改善 する上で有益な助言をいただきました。萬年一剛氏に は、動画を用いた解析についてご指導いただきました。 2018年5月15日の観測では十河孝夫氏に、2018年 6月19日の観測では瀧沢倫明氏にご協力いただきまし た。GPS 測位データの記録にはカシミール 3D を、動画 解析には ffmpeg を、画像解析には ImageJ を、グラフ の作成には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998)を使用させていただきました。また、Google Earth の航空写真を使用させていただきました。記して 感謝いたします。

参考文献

- 安部祐希・原田昌武・板寺一洋・森健彦・高木朗充・長 岡優(2017)箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放 出率の測定、温泉地学研究所報告, 49, 21-28.
- 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター(2018)阿 蘇山の火山活動解説資料(平成30年8月)
- 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.
- 気象庁予報部(2009) 非静力学メソ4次元変分法、数 値予報課報告・別冊第56号、104.
- 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(2018a)浅 間山の火山活動解説資料(平成30年8月)
- 気象庁地震火山部火山監視・警報センター(2018b)三 宅島の火山活動解説資料(平成 30 年 8 月)

- 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.
- 萬年一剛(2017)大涌谷噴気地帯を撮影した画像の平 均輝度の日別変化と火山活動の関係(2015-2016)、 温泉地学研究所報告, 49, 39-48.
- Mannen, K., Yukutake, Y., Kikugawa, G., Harada, M., Itadera, K., Takenaka, J. (2018) Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan – geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis, Earth Planets, and Space 70:68.
- Mori, T., Mori, T., Kazahaya, K., Ohwada, M., Hirabayashi, J., Yoshikawa, S. (2006) Effect of UV scattering on SO_2 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.
- Wessel, P., Smith, W. H. F. (1998) New, improved version of generic mapping tools released. EOS Trans. AGU, 79, 579.