

# 箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率 ~2021年6月までの推移~

安部祐希<sup>\*1</sup>・原田昌武<sup>\*1</sup>・板寺一洋<sup>\*1</sup>・高木朗充<sup>\*2</sup>・藤松淳<sup>\*1</sup>

## Sulfur dioxide emission rate at Owakudani, Hakone volcano, Japan - Its temporal transition through June 2021 -

by

Yuki ABE<sup>\*1</sup>, Masatake HARADA<sup>\*1</sup>, Kazuhiro ITADERA<sup>\*1</sup>, Akimichi TAKAGI<sup>\*2</sup> and Jun FUJIMATSU<sup>\*1</sup>

### 1. はじめに

火山活動が活発な箱根火山(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)。温泉地学研究所(以降、当所)では、箱根火山の活動への理解を深めるために、2017年3月29日より大涌谷において二酸化硫黄放出率を繰り返し測定してきた(安部ほか, 2017)。放出率の変化を捉え、火山活動の推移を考察するには、放出率を正確に推定する必要がある。安部ほか(2018)では、それまで当所で行ってきた観測・解析の手法について紹介したが、本報告ではさらに正確な測定を行うための改良を提案し、新たな手順で二酸化硫黄の放出率を推定してその時間推移を示した。

### 2. 手法の改善について

本研究も安部ほか(2017, 2018)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、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二酸化硫黄のカラム濃度に基づいてその放出率を推定した。この章では、本研究の観測・解析手順について、安部ほか(2018)からの改善点について説明する。

#### 2.1. パンニング法による観測の廃止について

安部ほか(2018)は、大涌谷で放出される噴気が上昇している場合に限り、箱根ロープウェイ大涌谷駅舎(図1)前の不動の観測点において、上昇する噴気を水平方向に走査するパンニング観測を行った。安部ほか(2018)ではいくつかのパンニング観測で、走査ごとに走査の中

心方向の仰角を変更して観測を試みた。それにより、大きい仰角で走査すると二酸化硫黄放出率が少なく推定されるという相関が明らかになった。おそらく、上昇する二酸化硫黄の中には、途中で降下に転じるかあるいは噴気中の水に溶解して除去されるものがある程度含まれると考えられる。安部ほか(2018)は、直線近似の正当性を疑いつつも、その放出率と仰角の相関を直線で近似することで噴気地帯から放出された二酸化硫黄の量を推測した。しかしこの手法を用いると、もし近似がふさわしくなければ放出率の推定に大きな誤差が含まれかねない。そこで、2020年4月以降はパンニング観測を中止しトラバース観測のみを行うこととし、トラバース観測の結果から推定した二酸化硫黄放出率のみを用いてその推移を観察した。

#### 2.2. ドリフトの補正について

図2に2020年8月7日に得られた二酸化硫黄カラム濃度の時系列を示した。図2を見るとベースラインの値(二酸化硫黄を捉えていないと考えられる時刻の値)が徐々に変化しているのがわかる。

その原因として、分光器の状態変化が考えられる。具体的には、観測中に機器の温度などが変化することで、検量線を得た時の機器の状態から歪が生じ、それにより分光がその波長に対応するディテクターからずれた位置に届くことでドリフトが発生すると考えられる。また、太陽の位置が変化することでバックグラウンドの紫外線の波長分布が変化することも、一因となる可能性がある。そこで本研究では、観測期間中に数回、噴気の影響のない場所において集光口に校正用セルを取り付けてカラム濃度を測定し、それをもとにドリフトを補正した。具体的には、ドリフト除去前のカラム濃度を  $a(t)$ 、校正用セ

\*1 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0032 神奈川県小田原市入生田 586

\*2 気象研究所火山研究部 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

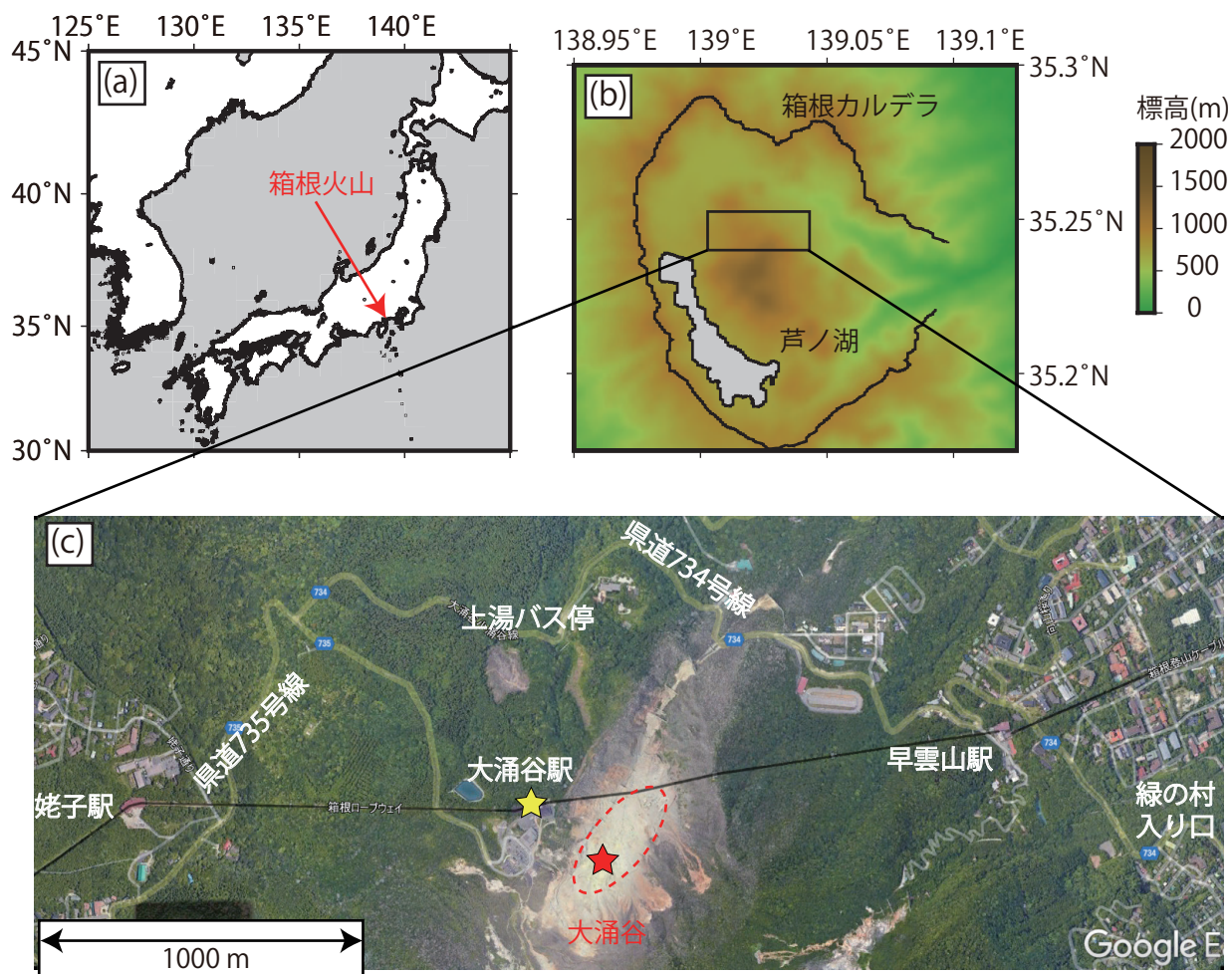


図1 (a) 箱根火山の位置。(b) 箱根カルデラの地形図。四角形で囲まれた領域の詳細を c に示す。(c) 大涌谷とその周辺の航空写真 (Google Earth により 2017 年 6 月 17 日に取得)。赤の点線で囲んだ領域に 2015 年に発生した噴火で形成された火口、噴気孔、蒸気井が存在する (Mannen *et al.*, 2018)。赤の星印の位置の標高 1000 m の風向風速値を気象庁メソ解析 (気象庁予報部, 2009) から内挿して算出し、二酸化硫黄放出率の推定に用いた。黄色の星印は箱根ロープウェイ株式会社が設置した風向風速の観測点を示す。

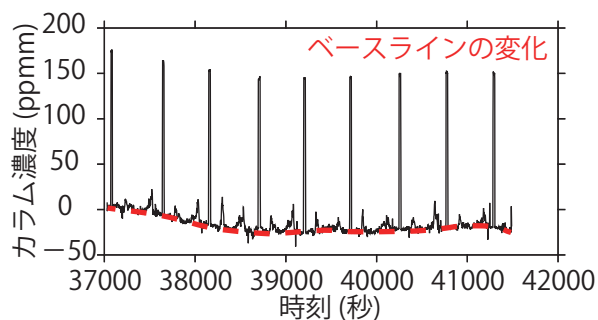


図2 2020 年 8 月 7 日の観測期間中に得られた二酸化硫黄の柱濃度の時系列。柱濃度は安部ほか (2018) と同様の手法により推定した。赤の破線でベースと思われる柱濃度値を示す。

ルの柱濃度の測定値を  $n(t)$ 、噴気の影響のない状況

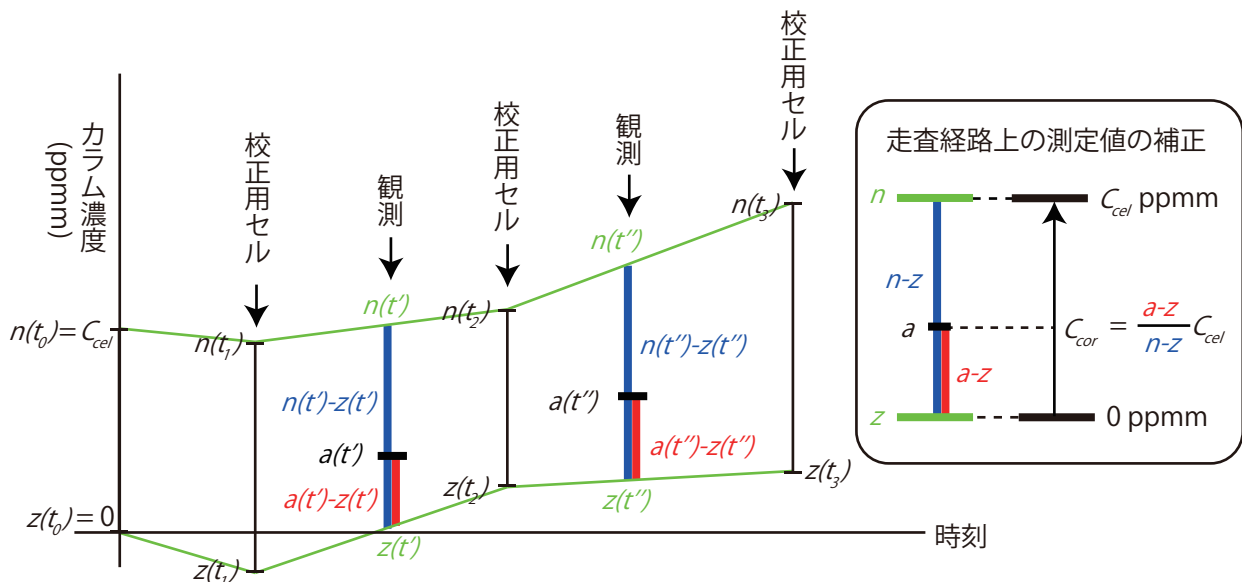
での柱濃度の測定値を  $z(t)$  とし、新たに柱濃度を

$$c_{cor}(t) = \frac{a(t) - z(t)}{n(t) - z(t)} c_{cel}$$

としてドリフトを除去した。ここで、 $t$  は時刻、 $c_{cel}$  は用いた校正用セルの柱濃度を示す。校正用セルの柱濃度や噴気の影響のない状況での柱濃度は観測途中で離散的に得られるので、それらを時間的に線形内挿して上述の式に当てはめた。ドリフト補正の概念図を図 3 に示す。

### 2.3. 誤差の見積もり方法について

安部ほか (2018) は、走査ごとに放出率を測定しその平均をその観測日における放出率、その最小値から最大値までを放出率推定の誤差範囲とした。しかし、この範



$t_0$  : 初期校正時刻       $t_1, t_2, t_3$  : 校正用セル観測時刻       $t', t''$  : 走査経路上の観測時刻  
 $n$  : 校正用セル ( $C_{cel}$  ppmm) のカラム濃度 (黒: 測定値、緑: 内挿値)  
 $z$  : 噴気のない空のカラム濃度 (黒: 測定値、緑: 内挿値)  
 $a$  : 走査経路上のカラム濃度測定値

図3 ドリフト補正の概念図。

囲は実際の放出率が一定の確率でその範囲内に収まることを示すものではなく、それを誤差の指標として二酸化硫黄放出率の推移を解釈するのは困難である。そこで、観測日ごとに誤差を定量するために、各走査における測定値をもとに区間推定を行った。区間推定のために、まずその観測期間中に無限回の走査を行ったとしたら、放出率の揺らぎおよび観測誤差によって測定値の分布が正規分布になり、その平均は真の放出率の平均値に一致することを仮定した。もちろん実際に得られるのは、そのうちのわずかな有限個の測定値であり、それらの平均は必ずしも真の平均に一致しない。そこで、本研究では上述の仮定と有限個の測定値に基づき、99%の確率で真の平均を含む区間を推定し、その区間を誤差範囲と定義した。ただし、この区間推定はあくまで無限回の測定値の分布が真の平均放出率を中心とした正規分布になることを仮定した結果であり、例えば後述するように、観測中の風速が常に過小評価されているなど系統的な誤差が含まれる場合には、区間内に真の平均が含まれる確率は99%にはならない。

### 3. 二酸化硫黄放出率推定の手順

以上では、本研究の二酸化硫黄放出率の推定手法について、安部ほか(2018)からの改善点について説明したが、ここでデータの取得から放出率が推定されるまでの手順について簡単にまとめる。

#### 3.1. 観測

本研究で実施した観測では、従来の観測(安部ほか, 2017; 2018)で用いていたものと同じ観測機器を用い、自動車の天井に分光器を取り付け、移動しながら真上から到来する紫外線の波長分布を測定した。観測は主に神奈川県道734号線の箱根ロープウェイ早雲山駅から上湯バス停までの区間(図1)で行ったが、噴気の状態によっては734号線の緑の村入り口付近から735号線の箱根ロープウェイ姥子駅付近(図1)まで観測区間を延ばすことがあった。この片道1回分の観測を1回の走査とし、2秒ごとに波長分布を得た。波長分布を測定した時刻と場所とを対応付けるために、観測中は常にカシミール3D (<http://www.kashmir3d.com/>)を用いGlobal Positioning System (GPS)による測位を行って1秒ごとに時刻と座標を記録した。

なお安部ほか(2018)と同様に、検量線取得のためにカラム濃度88、173、261、442 ppmmの4種類の校正用セルを用いた。

#### 3.2. 解析

まず、安部ほか(2018)と同様の手順で、走査中に2秒ごとに得られた波長分布から、その時刻における分光器直上の二酸化硫黄カラム濃度を推定した。安部ほか(2018)は、推定したカラム濃度からベースラインのオフセットを除去したが、本研究では上述のドリフト補

正を行ったのでベースラインのオフセット除去は行わなかった。そして、安部ほか (2018) と同様に、一つの走査 ( $n$  回目の走査) で得られるデータから、二酸化硫黄の放出率  $E_n$  (トン/日) を

$$E_n = \int c_n(r) dr \times v \times \rho \times 86400 \times 10^{-6} \quad (\text{式 1})$$

と算出した。ここで、 $c_n(r)$  は走査経路上の位置  $r$  における二酸化硫黄のカラム濃度であり、走査経路が積分経路である。この積分経路は二酸化硫黄の移動方向に直交する直線に実際の走査経路を投影したものである。二酸化硫黄の移動方向と移動速度は、気象庁のメソ解析データ (気象庁予報部, 2009) をもとに推定した大涌谷 (35.243°N, 139.022°E, 標高 1000 m、図 1) の風向、風速に等しいことを仮定した。 $v$  は二酸化硫黄の移動速度 (m/s)、 $\rho$  は二酸化硫黄の密度  $2.76 \times 10^{-3}$  (トン/m<sup>3</sup>) を示す。

さらに、安部ほか (2018) と同様にカラム濃度の走査経路に対する分布が正規分布に似ており、その分布を正規分布で近似したときの標準偏差一つ分の範囲が走査経路内に収まる走査を選び、選ばれた走査で得られた放出率に基づいてその観測日における平均放出率および誤差範囲を推定した。

#### 4. 二酸化硫黄放出率の推移

本研究で推定した、二酸化硫黄の平均放出率とその誤

差範囲の推移を図 4 に示す。当所が繰り返し観測を開始した 2017 年以降、数〜数十トン/日の放出率が続いている。2019 年に山体膨張や群発地震が発生した期間 (Mannen *et al.*, 2021) は、その中でも放出率が比較的大きかったが、2015 年の噴火直後に気象庁が観測した 100 トン/日を超えるような放出率の顕著な増加は見られなかった。

#### 5. 風向風速について

式 1 の通り放出率は火山ガスの移動速度の倍数として推定されるため、放出率推定の正確さは火山ガスの移動速度の推定の正確さに大きく依存する。そのため、定量は困難ではあるが、火山ガスの移動の方位と速度の推定の正確さを明らかにすることが望まれる。そこで、箱根ロープウェイ株式会社が箱根ロープウェイ大涌谷駅舎 (図 1) において 2019 年から 2020 年までに観測した風向風速値 (以降、実測値) を参考に、火山ガスの移動の推定の正確さについて考察した。

まず、気象庁メソ解析データから得られた風向風速値 (以降、解析値) と実測値とを比較することにより、風向風速の推定手法に依存する誤差が現れるかどうかを調べた。図 5 は両者の風向風速を観測日ごとに比較したものである。気象庁メソ解析は 3 時間ごとに行われており、解析値は DOAS 観測の開始時刻と終了時刻の中間の時刻における値を、その時刻の前後の値から直線的に内挿

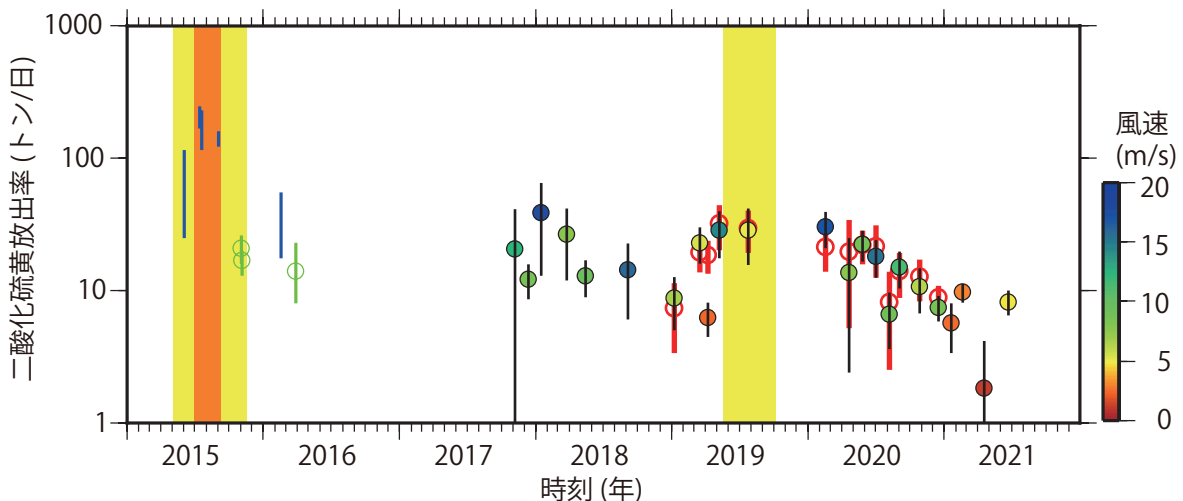


図 4 2015 年以降に測定された大涌谷における二酸化硫黄放出率の時間推移。丸印で各観測日における放出率の平均値、バーで誤差範囲を示している。青のバーで気象庁 (2016) による測定結果を、緑の丸印とバーで気象研究所 (2016) による測定結果を示す。黒と赤の丸印とバーで当所が測定した結果を示す。このうち黒は気象庁メソ解析により推定した風向風速を参照した値であること、赤は箱根ロープウェイ株式会社が実測した風向風速を参照した値であることを示す。丸印を塗りつぶした色で、その値を算出するのに参照した風速値を示す。背景の黄色は箱根火山の噴火警戒レベルが 2 であった期間、オレンジ色は噴火警戒レベルが 3 であった期間を示す。

して得た。また、大涌谷駅舎では箱根ロープウェイ株式会社が風向および風速を観測し10分ごとの10分間平均値が記録されており、そのデータをもとにDOAS観測の開始時刻から終了時刻までの値を平均してその観測日における実測値とした。解析値と実測値の比較について図5に示した。解析値と実測値を比較すると、風向については両者の差は小さくその平均は $9.2^\circ$ である。風向についても大きな差は見られず、両者の差の平均は $1.8\text{ m/s}$ であり、またどちらかの手法で推定される風速が常に大きいというような系統的な差は見られない。

気象庁メソ解析の時間間隔は3時間であるが、著者らによる一日の観測時間が1時間30分程度であることを考慮するとその間隔は粗く、またメソ解析の水平格子間隔も $5\text{ km}$ と大涌谷の地形に比べると粗い。一方、実測値は時間・空間分解能が高いが局所的な値しか得られないため、地形が複雑な大涌谷における火山ガスの移動を反映していない可能性がある。しかし、解析値と実測値との差が小さいのであれば、大気の移動は空間的にも時間的にも安定している場合が多く、それぞれが火山ガスの移動をある程度正確に表していると考えられる。

次に、風向風速の実測値が火山ガスの移動を表すと仮定し、2019年から2020年の実測値に基づいて二酸化硫黄放出率とその誤差を推定した。その結果を図4に示す。放出率や推移の傾向は解析値を用いた結果と非常によく似ている。ただし、2019年4月9日の放出率は解析値に基づく $6.3\text{ トン/日}$ なのに対し実測値に基づく $18.7\text{ トン/日}$ と3倍近い差がある。この日はメソ解析による風速推定値が $2.4\text{ m/s}$ であるのに対し、実測値が $6.2\text{ m/s}$ と解析値の2.5倍を超える値となった。お

そらく、解析値あるいは実測値が上述したそれぞれの弱点により火山ガスの移動をうまく表現できていないと考えられる。よって、解析値と実測値に乖離がある時には二酸化硫黄放出率の推定値に大きな系統誤差が含まれる可能性がある。ただし、それ以外の観測では、一方の風速および放出率推定値が他方の1.5倍を超えることはなく、大気の移動が時間的・空間的に安定していたことがわかる。

また、風速が小さい場合にも、二酸化硫黄放出率の推定においてガスの移動の推定誤差に依存する系統誤差が大きくなるので注意が必要である。例えば、もし風速の推定誤差が $1\text{ m/s}$ であれば、風速が $10\text{ m/s}$ と推定されている場合は放出率の誤差が10%となるのに対し、風速が $2\text{ m/s}$ と推定されている場合には放出率は50%の誤差を含むことになる。また、風速が小さいほど風向を正確に推定することが難しい。さらに、風速が小さいほど、火山ガスの水平方向の移動の要因として拡散の影響が大きくなり、風向の方向へと移動しない火山ガスの割合が増加する。

図4の二酸化硫黄放出率の推移のグラフには、放出率を表す丸印を気象庁メソ解析データから推定した観測時の風速値に対応した色で塗りつぶした。例えば、風速が $1.2\text{ m/s}$ と最も小さかった2021年4月19日は放出率が $1.8\text{ トン/日}$ と推定された。その値は、現時点の推定値の中で最も小さく、その前後の観測とは誤差範囲が重ならないほど大きな違いがある。それをもってこの日の観測値が不正確であるとは断定できないが、大きな系統誤差を含む可能性がある。

以上のことから、推定されている風速が小さい場合と、

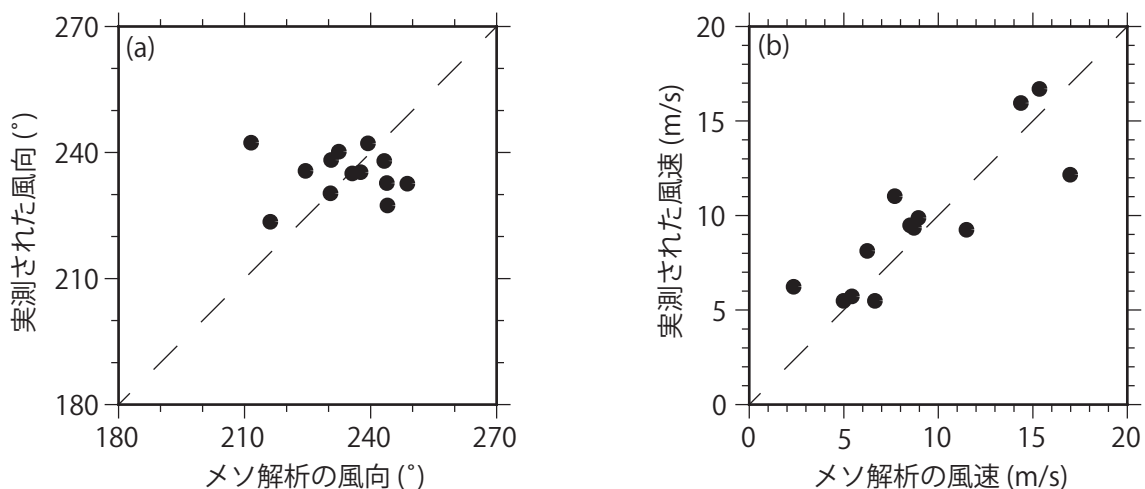


図5 2020年と2021年のそれぞれの観測時において、気象庁メソ解析から推定された大涌谷の風向風速と、箱根ロープウェイ株式会社が大涌谷駅舎で観測した風向風速の関係 (a) 風向について (b) 風速について

実測値と解析値のそれぞれに基づいて推定される二酸化硫黄放出率に大きな差がある場合は、推定された放出率が大きな系統誤差を含んでいる可能性がある。ただし、その誤差の大きさを定量することは困難であり、系統誤差が大きくなりやすい条件で得られた値を含む時系列から放出率の時間推移を解釈する際には、その値があってもなくてもその解釈が変わらないかどうかを確認しておくことが重要である。

## 6. まとめ

本研究では、DOAS 観測による大涌谷からの二酸化硫黄放出率の推定にあたり、推定の信頼性の向上を目的として、安部ほか (2018) の観測・解析手順に、パンニング観測の廃止、ドリフトの補正、および区間推定に基づく誤差範囲の決定という変更を加えた。その上で、2017 年 11 月から 2021 年 6 月までに 23 回実施した観測によるデータを解析した。その結果、この期間は数～数十トン/日の放出率が続いており、2015 年の噴火直後に測定された 100 トン/日を超えるほどの放出率の顕著な増加は見られなかった。また、解析に用いる風向風速値の信頼性を考察するために、メソ解析で得られる風向風速と実測された風向風速とを比較したところ、両者の差は小さく両者とも火山ガスの移動をおおよそ正確に表していることが多いと判断した。ただし、風速が小さいときや、メソ解析から得られる風向風速と実測された風向風速とが大きく異なる時は、放出率の推定値に大きな誤差が含まれる可能性が高いため、放出率の時間推移を解釈する際には注意が必要である。

## 謝辞

菊川城司氏と小田原啓氏には、原稿を改善する上で有益なご意見をいただきました。箱根ロープウェイ株式会社には、大涌谷駅舎における風向風速の観測データをご提供いただきました。産業技術総合研究所招聘研究員・篠原宏志氏からは本研究の観測手法について有益なご助言をいただきました。GPS 測位データの記録にはカシミール 3D を、作図には Generic Mapping Tools (Wessel

and Smith, 2019) 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 (2018) 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 -, 温泉地学研究所報告, 50, 1-18.
- 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.
- 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., Abe, Y., Daita, Y., Doke, R., Harada, M., Kikugawa, G., Honma, N., Miyashita, Y., Yukutake, Y. (2021) Volcanic unrest at Hakone volcano after the 2015 phreatic eruption: reactivation of a ruptured hydrothermal system? *Earth Planets, and Space*, 73, 80.
- 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.
- Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., Tian, D. (2019) The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564.