

二酸化硫黄放出率の自動計測化へ向けた実証実験 —火山ガス拡散モデルからの二酸化硫黄放出率推定の試み—

Demonstration Experiment towards Automatic Measurement of the SO₂ Emission Rate

森 健彦⁽¹⁾・篠原英一郎⁽²⁾・菅井 明⁽²⁾・満永大輔⁽²⁾・橋本明弘⁽³⁾・山本圭吾

Takehiko MORI⁽¹⁾, Eiichirou SHINOHARA⁽²⁾, Akira SUGAI⁽²⁾, Daisuke MITUNAGA⁽²⁾, Akihiro
HASHIMOTO⁽¹⁾ and Keigo YAMAMOTO

(1) 気象庁気象研究所 火山研究部

(2) 気象庁福岡管区气象台 地域火山監視・警報センター

(3) 気象庁気象研究所 予報研究部

(1) Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

(2) Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters, Japan
Meteorological Agency

(3) Forecast Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Synopsis

Japan Meteorological Agency has repeated the observation of the SO₂ emission rate which can estimate the rise and fall of a magma activity in the active volcano in order to use for evaluation of volcanic activity. The SO₂ emission rate observation performed by a high frequency is required in order to find out change of the SO₂ emission rate which occurs in the short term. At present, we are developing the automatic-measurement system using a modelling of the volcanic gas diffusion. This manuscript indicates that it is possible to obtain a SO₂ emission rate by column concentration of some observed samples by using the model of the volcanic gas diffusion. We could judge change of SO₂ emission rate which makes the abnormalities of volcanic activity a cause in a short time because the SO₂ emission rate could be estimated from the maximum column concentration and wind velocity using this model. In future research, the model of a volcanic gas diffusion will be improved to the new model reflecting local weather condition and will improve the accuracy of SO₂ emission rate.

キーワード: 二酸化硫黄放出率, 火山活動評価, 自動計測, 拡散モデル

Keywords: SO₂ emission rate, Estimating volcanic activity, automatic measurement, diffusion model

1. はじめに

活動的火山におけるマグマ活動の盛衰を評価する指標の一つとして、二酸化硫黄放出率が1970年代以降に国内外の火山で用いられている（例えば、鎌田

他, 1977; 太田他, 1978）。2000年代に入り, Mori et al. (2007)によって, COMPUSSと呼ばれる小型の紫外線分光計を用いた二酸化硫黄放出率の測定器が開発された。COMPUSSは従来の測定器よりも軽量で可搬が可能となり, 且つ安価であったことから, 国内での

二酸化硫黄放出率の観測に広く用いられるようになった。2005年には気象庁の機動観測用機材に採用され、三宅島・浅間山・阿蘇山・桜島などで、定期的な二酸化硫黄放出率の観測が始まった。阿蘇山においては、静穏な火山活動の際には週1回程度、活動が活発化した際には週に2回以上の観測を福岡管区気象台が実施しており、COMPUSS導入以前よりも飛躍的に観測頻度は高くなった。そのような状況下で、2016年10月8日の阿蘇山における爆発的噴火の前日に、日量10,000トンを超える急激な二酸化硫黄放出率の増加が観測された。この観測結果から、短期的な活動評価及び噴火予測にも二酸化硫黄放出率は有用な情報であることが確認され（福岡管区気象台地域火山監視・警報センター，2018），2016年12月20日に更新された阿蘇山の噴火警戒レベル判定基準には、二酸化硫黄放出率の増加がレベル引き上げ基準の一つとして加わっている。しかしながら、現状の二酸化硫黄放出率観測は有人での観測を前提としており、測定手法上の問題から、火山を周回する道路が必要とされている。そのため、測定に適した道路が無い火山、離島など頻繁な観測が実施できない火山、火山活動の活発化に伴って立入規制がかかった火山など、観測を実施することが困難になっている火山が多いことが問題となっている。このような状況から、二酸化硫黄放出率の観測頻度の向上をはかるため、二酸化硫黄放出率の自動計測システムの開発が大きな課題となっている。

自動計測の一つの方法として、Mori et al (2017)は屋久島と口永良部島を結ぶ定期航路の町営フェリーの船体に測定器を取り付け、口永良部島における二酸化硫黄放出率の無人観測を実現した。これにより、航路上に火山ガスが流れる気象場で、フェリーが運航される限り、往路と復路の1日2サンプルの二酸化硫黄放出率計測が実施されている。但し、このような自動計測手法は、二酸化硫黄放出率の観測が可能な昼間の時間帯に同一ルートを定期的に運行し、且つ、運行に使用する車体もしくは船体が同一であることが条件であるため、どこの火山でも適用できる方法ではない。よって、汎用的な自動計測システムを実現するためには、火山近傍に設置された常設型の観測点での測定データを用いて、二酸化硫黄放出率を算出することができる手法を開発することが求められている。

現在の測定手法を利用する場合、火山体近傍で高密度な現地常設型の観測点を設置すれば、それらのデータから二酸化硫黄放出率を算出することが可能である。しかしながら、設置及びその後生じる観測点保守の面から考えれば、多点の観測点を将来にわたって運用し維持していくのは難しく、僅かな観

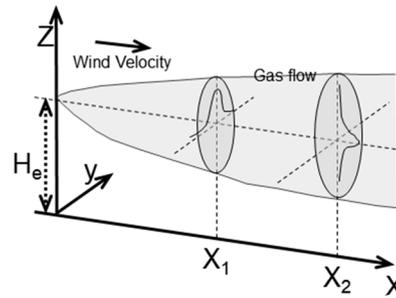


Fig. 1 The schematic drawing of the plume model. It is a diffusion simulation of the fumes ejected from a smokestack to an atmosphere.

測点の数で二酸化硫黄放出率が算出できる測定手法の開発が求められる。そこで、我々は、火山ガスの拡散をモデル化し、そこから導き出される二酸化硫黄の拡散濃度を利用して、僅かな観測点の数から二酸化硫黄放出率の算出を可能とするシステムの開発を進めることとした。

2. 火山ガス拡散のモデル化と有用性の確認

日本では、高度経済成長の時代に工場からの煙に含まれる、二酸化硫黄(SO_2)などの硫黄化合物(SO_x)による大気汚染が進み、社会問題になっていた。昭和43年に大気汚染防止法が制定され、排出量を規制する対策が進められたことから、大気汚染の予測シミュレーションも行われるようになった(横山, 1992)。この予測シミュレーションにおいて、有風時に風向がある程度安定している場合に用いられるブルームモデルは、場所ごとの濃度変化及び時間変化を取り扱うことのできる噴煙拡散の基礎的なモデルである。今回、火山ガス拡散のモデル化にブルームモデルを用いて測定点での二酸化硫黄カラム濃度(ppmm)を算

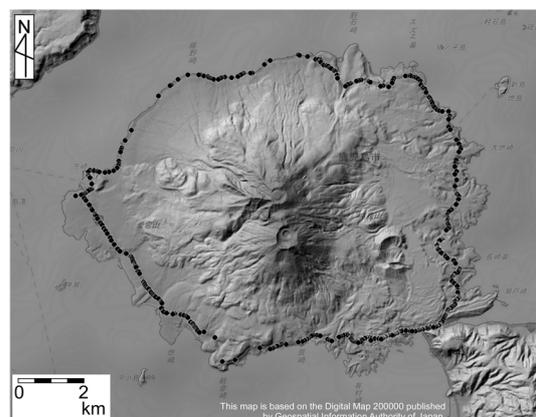


Fig. 2 Black circles are location of the highest SO_2 column concentration observed at the Sakurajima volcano from 2011 to 2015.

出し、火山ガス拡散のモデルから導き出される二酸化硫黄放出率のモデル値が観測値とどの程度一致するのかについて検証をおこなった。

2.1 二酸化硫黄カラム濃度のモデル値算出

ブルームモデルは、十分に広い空間において、ガスが連続的に煙突から排出され、一方向に一定の風速下で風下に拡散していくモデルである(Fig. 1)。ブルームモデルを用いた場合、各地点における濃度Cは式(1)で示すように、

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left(e^{-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (1)$$

排出起点となる高度Heを規定し、放出量Qと風速uを与えることで得られる。ここで、 σ_y と σ_z はそれぞれy軸及びz軸方向への拡散幅であり、風下距離xのべき乗で近似するサットンの方法を用いる場合、拡散幅 σ_y, σ_z はサットンの拡散パラメータ C_y, C_z, n を用いて、式(2)で示される。

$$\sigma_y = \frac{C_y}{\sqrt{2}} x^{(1-n/2)}, \sigma_z = \frac{C_z}{\sqrt{2}} x^{(1-n/2)} \quad (2)$$

COMPUSSによって計測される、計測地点での二酸化硫黄カラム濃度(D_(x,y))とは、式(3)で示すように、地上(測定点)から上空への高度1mごとの二酸化硫黄濃度(C_(x,y,z))の総和である。よって、二酸化硫黄カラム濃度のモデル値は、計測地点における上空高度1mごとの二酸化硫黄濃度をブルームモデルから計算することで得られる。

$$D_{(x,y)} = \sum_{z=0}^{\infty} C_{(x,y,z)} \quad (3)$$

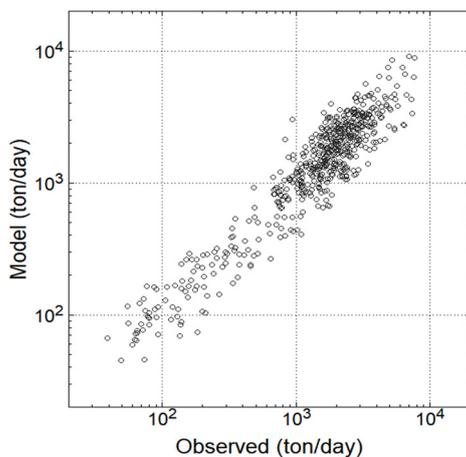


Fig. 3 Comparison with the observed and the model values calculated by the plume model. 596 observed values of SO₂ emission rates were compared.

2.2 二酸化硫黄放出率のモデル値算出

火山ガスの拡散モデルから二酸化硫黄放出率を求めることが可能かどうか、その妥当性を検証するため、実際に観測された、測定毎の二酸化硫黄カラム濃度の最高カラム濃度を利用して二酸化硫黄放出率のモデル値を算出し、観測されている二酸化硫黄放出率との比較を行った。

観測値とモデル値との比較検討のデータとして、2011年から2015年にかけて鹿児島地方気象台が桜島において実施した、二酸化硫黄放出率の観測データを用いた。式(2)に用いた拡散係数として、SO_x排出計算に用いられている標準的な値($C_y = 0.467, C_z = 0.07, n = 0.25$)を使用している。この期間の観測日数は103日で、得られた二酸化硫黄放出率数は596サンプルであった。最高濃度を記録した場所は桜島島内の全方位に及んでおり(Fig. 2)、観測された二酸化硫黄放出率も40~7,700 ton/dayと幅広く、様々な条件下の観測データで検証できた。

二酸化硫黄放出率のモデル値の算出に用いる流下距離(x)は、火山ガス排出口(桜島南岳火口)から二酸化硫黄カラム濃度の最高値が測定された地点までとし、また、最高カラム濃度が火山ガス拡散の主軸に位置すると考えられることから、拡散幅yは0とした。排出高度(He)は桜島南岳火口の標高に、気象庁がカラム濃度の最高値が記録された日時に最も近い時刻に観測した噴煙高度を加えた値としている。火山ガスを拡散させる風速(u)は、噴煙の到達高度に相当する標高での、気象庁毎時大気解析GPVの風速値を使用した。以上の係数と測定された二酸化硫黄カラム濃度の最高値から、二酸化硫黄放出率のモデル値をグリッドサーチで算出した。

2.3 桜島における観測値とモデル値の比較

596の二酸化硫黄放出率観測データから、観測値とモデル値を比較したところ、モデル値はほぼ観測値と一致していた(Fig. 3)。また、観測日ごとの平均値

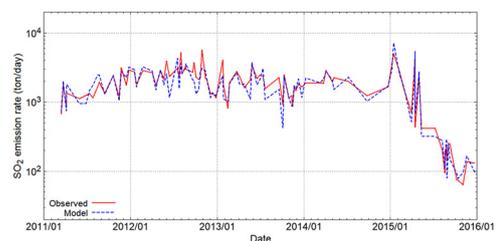


Fig. 4 Comparison with the daily average observed (red line) and model values (blue broken line) calculated by the plume model. SO₂ emission rates for a total of 101 days were compared.

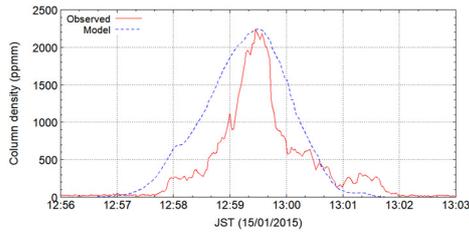


Fig. 5 Comparison with the observed (red line) and model values (blue broken line) of SO₂ column concentration. Although 5,200 ton/day SO₂ emission rate was observed, the model was overestimated with 8,500 ton/day.

においても、火山活動の推移とともに変化する二酸化硫黄放出率の変化をほぼ再現している(Fig. 4)。個々の誤差率を比較すると、平均値では1%と問題なく一致しているが、過大モデル値で222%、過小モデル値で-63%となっており、観測値とモデル値で2倍近い違いが生じている。例えば、2015年1月15日の観測データからモデル値が二酸化硫黄放出率を過大評価した際には、モデルの二酸化硫黄の拡散が実測値よりも大きく表現されていることがわかる(Fig. 5)。これは、観測された時間の気象条件下で、プルームモデルに仮定した拡散係数が大きかったことを示唆している。しかしながら、日平均では誤差率が改善することも見られており、サンプル数が増えれば、短い時間に変動する拡散度の時間変化によって生じる、観測値とモデル値の誤差も軽減されると考えられる(Table 1)。このことから、二酸化硫黄放出率を日平均で表現する現在の評価においては、1日あたりのサンプル数を増やすことによって、モデル値を真値に近づけさせことが可能である。

3. 諏訪之瀬島での実験観測

諏訪之瀬島では、活発な噴火活動が現在も継続しているが、噴火警戒レベルの切り替えを必要とするような活動の活発化は見られていない。そのため、福岡管区气象台による機動観測は、年に1回しか実施されていない。さらに、二酸化硫黄放出率の観測は、限られた日程での機動観測では他の観測項目と比べて優先度が低かったことから、これまでの機動観測では実施されていなかった。この理由の一つとして、

Table 1 The error rate of an observed value and a model value. The error rate was calculated as $(Model - Obs.) / Obs. \times 100$.

	Average	Max.	Min.
All samples	-1%	222%	-63%
Daily average	-2%	58%	-54%

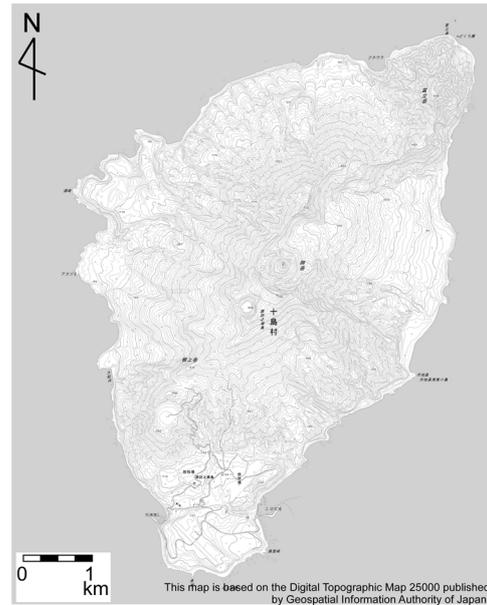


Fig. 6 The map of Suwanosejima. The inhabitable area of the island is limited to the south area, and a road exists only in the area.

南北に細長い諏訪之瀬島では、道路が島の南端地域にのみあるため(Fig. 6)、气象台が主に用いている、Traverse法と呼ばれる、噴煙下を横切って二酸化硫黄カラム濃度の断面積分濃度を計測する手法を実施することが難しいからである。このため、機動観測の期間中に、島の南端での観測によって、二酸化硫黄放出率を見積もる手法の確立が求められてきた。加えて、将来的には、年に数回以下の計測頻度ではなく、自動計測システムの導入によって、二酸化硫黄放出率の観測を高頻度化し、諏訪之瀬島における火山活動の評価能力を向上することが求められている。そこで、2017年12月に福岡管区气象台によって行われた機動観測において、島の南端地域での二酸化硫黄放出率の実験的な観測を行った。

3.1 2017年12月の二酸化硫黄放出率

これまでの諏訪之瀬島では、船を利用したTraverse法での測定、島内でのPanning法（固定点で測器を動かすことで噴煙をスキャンし、噴煙の断面積分濃度を求める手法）によって二酸化硫黄放出率が計測されてきた（例えば、Mori et al., 2004）。2017年の機動観測では、これまでに測定されている二酸化硫黄放出率との比較及び、現状の活動状況を把握するため、

Table 2 The result of the SO₂ emission rate using a panning method in Suwanosejima.

	Average (ton/day)	Max. (ton/day)	Min. (ton/day)	Wind Velocity
05/12/2017	420	600	280	11.6 m/sec
09/12/2017	1,160	1,580	730	5.0 m/sec

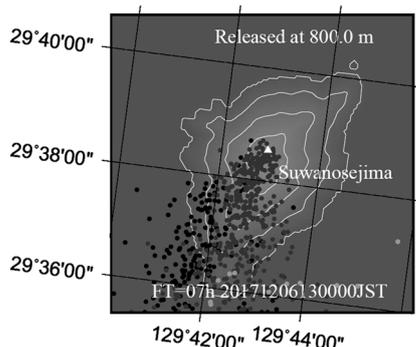


Fig. 7 The JMA Mesoscale Tracer Transport Model for volcanic plume at Suwanosejima.

12月5日と12月9日の2回にPanning法による測定を実施した。尚、二酸化硫黄放出率計算の風速には気象庁毎時大気解析GPVの風速値を使用した(Table 2)。

噴火も観測されず、比較的穏やかな噴煙活動であった12月5日は、二酸化硫黄放出率が平均で約400 ton/dayであった。測定点から噴煙の中心までの距離が3,000m程度離れていたことから、紫外光路上における紫外光散乱の影響でのカラム濃度の減衰が考えられるものの (Mori et al., 2006), 概ね過去に計測された非噴火時の放出率と同程度の値になった。一方、12月9日は極小規模な噴火を繰り返している活動状況であり、平均で約1,200 ton/dayの二酸化硫黄放出率を記録した。この日は測定点から噴煙の中心までの距離が概ね1,000m以下であり、紫外光散乱の影響は大きくないと考えられる。極小規模な噴火中における二酸化硫黄放出率としては、過去にも1,000 ton/day程度の値が観測されており、諏訪之瀬島の火山活動の状況を反映した二酸化硫黄放出率が今回の機動観測でも得られたと考えられる。

3.2 Traverse法による実験観測

2017年12月6日、諏訪之瀬島の南端地域でTraverse法による二酸化硫黄放出率の実験観測を実施した。気象庁毎時大気解析GPVによると、当日は北北東の風が吹いており、諏訪之瀬島の南部に噴煙が流れてくる状況であった。今回の観測ルートとして、直線状の道路で標高がほぼ変化しない、諏訪之瀬島飛行場付近を選択している。気象庁の降灰予報に用いられる、移流拡散を利用した噴煙拡散モデル (例えば、新堀他, 2010; 新堀, 2016) によると、当日の火山ガスは諏訪之瀬島飛行場上空を流下しているものの、噴煙幅はルート上を上回っており、噴煙断面の全てを計測することはできない状況であった(Fig. 7)。そこで、この噴煙の一部断面の測定結果を利用し、観測された二酸化硫黄カラム濃度とブルームモデルか

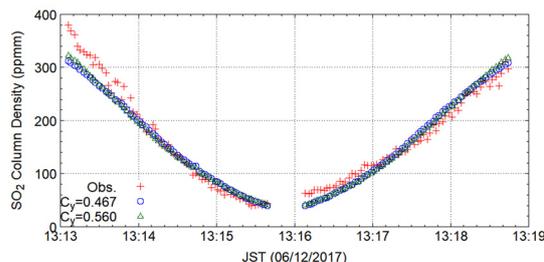


Fig. 8 Comparison of the observed SO_2 column concentration and the calculated concentration using grid search analysis. As the diffusion coefficient 0.56 (green triangle), the difference of an observed and calculated value became the minimum. However, the differences from the result calculated as the diffusion coefficient 0.467 (blue circle) were very little.

らのモデル値のフィッティングから、二酸化硫黄放出率の推定ができるかどうかの検証を行った。

モデル値を得るための拡散係数は桜島で使用した値 ($C_y = 0.467, C_z = 0.07, n = 0.25$) と同じとし、風向と二酸化硫黄放出率を未知数として、グリッドサーチを行った。風向を未知数としたのは、地形や僅かな気象場の変化によって、毎時大気解析GPVの風向と、実際の噴煙の流下方位にずれが生じることがあるためである。風速として、計測時の諏訪之瀬島における毎時大気解析GPVの3.0m/secを与えた結果、約400 ton/dayで観測されたカラム濃度とモデル値が一致した。さらに、観測値とモデル値の誤差率を最小にするように、水平方向の拡散係数も未知としてグリッドサーチを行うと、 $C_y = 0.560$ の時に誤差率が最小となり、二酸化硫黄放出率は約700 ton/dayとなった。ただし、誤差率の改善は3%、風向の違いも 3° と極僅かである(Fig. 8)。拡散係数を変化させると、二酸化硫黄放出率に2倍弱の放出率の違いが生じてはいるが、穏やかな噴煙活動を行っていた、観測当日の諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率としては妥当な値に収まっており、12月5日のパニング法による観測値との間に大きな違いはなかった。

4. 考察とまとめ

桜島における、二酸化硫黄放出率の観測値とブルームモデルで計算されたモデル値との比較によって、測定中の二酸化硫黄カラム濃度の最大値を利用すれば、二酸化硫黄放出率の大まかな推定値を得られることが示された。この結果を利用して、福岡管区気象台では風速値と二酸化硫黄カラム濃度の最高値から推定される二酸化硫黄放出率の値を示すグラフを準備し (Fig. 9), 機動観測の実施途中においても、

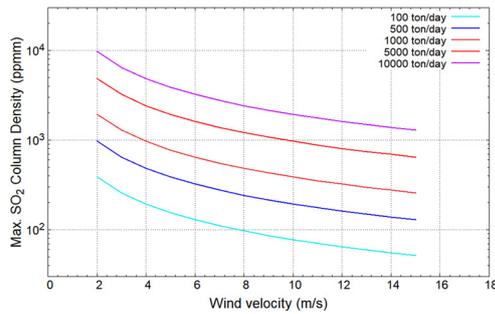


Fig. 9 The SO₂ emission rate calculated using the maximum SO₂ column concentration and wind velocity in case the distance from an active crater to the measurement point is 8,000 m. Fukuoka regional headquarters already uses this graph by the SO₂ emission rate measurement in Mt. Shimmoe.

火山活動の高まりに伴う二酸化硫黄放出率の急増があるかどうかを判断できる体制を取り始めている。例えば、2017年10月及び2018年3月に霧島新燃岳の観測で捉えられた、10,000 ton/dayをこえる二酸化硫黄放出率の急増は、このグラフを用いて、機動観測中の現場と福岡管区气象台との間で、二酸化硫黄放出率の活動異常の意識共有が即座に行われ、観測データの解析作業が終わると同時に火山情報を出せる態勢を取ることができた。一方で、二酸化硫黄放出率の検出限界がどの程度の量であるかの情報も今回の成果で見えてきた。COMPUSSを用いる二酸化硫黄放出率観測では、二酸化硫黄カラム濃度が概ね30 ppmm以下になると、ノイズレベル以下となり、二酸化硫黄放出率を検量することが難しくなる。今回、二酸化硫黄放出率が火口から測定点までの距離及び観測時の風速によって規定されることが明確となったことから、二酸化硫黄カラム濃度として概ね30 ppmmを与えた場合にプルームモデルから推定される二酸化硫黄放出率が、その計測時の検出限界量であることがわかる。

2017年12月6日の諏訪之瀬島における気象場から移流拡散を利用して計算された火山ガス拡散モデルに、プルームモデルによる二酸化硫黄カラム濃度の分布を重ね、両者を比較した(Fig. 10)。プルームモデルでは、排出口からの拡散係数が一定のため、移流拡散による、火口から東側より西側へより拡散する様子を再現することができていない。しかしながら、噴煙が流下する主軸付近においては、両者の間にそれほどの差異は見られていないことから、プルームモデルを利用した二酸化硫黄放出率の見積もりでも、火山活動の急激な変化を反映するような、例えば、桁を超えるような変化を捉えることは可能と考えられる。一方で、我々が目指している自動計測システ

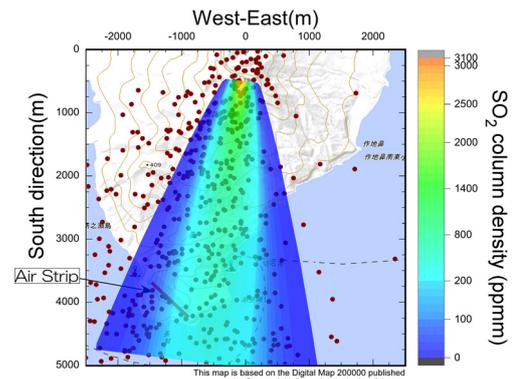


Fig. 10 The JMA Mesoscale Tracer Transport Model for volcanic plume put on SO₂ column concentration distribution calculated from the plume model. In the edge of volcanic smoke at which a SO₂ column concentration becomes low, the plume model cannot be showing sensitive diffusion.

ムでの常設型の観測点は、常に噴煙の流下する主軸に置かれているとは限らない。そのため、今後の課題としては、火山ガスの拡散をより詳細に得ることができる移流拡散を用いた手法によって、二酸化硫黄カラム濃度の分布が直接求められることができるよう、解析手法の改良を進めていくことが必要と考える。

今回、火山ガス拡散のモデルを使うことで二酸化硫黄放出率を推量できる可能性が得られた。また、諏訪之瀬島のような、噴煙全体の二酸化硫黄カラム濃度を計測することが難しい火山においても、噴煙の一部の二酸化硫黄カラム濃度が計測できれば、二酸化硫黄放出率の見積もりが可能であることを示せた。火山ガス拡散モデルを利用した、二酸化硫黄放出率のさらなる高精度な見積もりのためには、拡散モデルをより気象場を反映したものへの改良が必要であることも見えてきた。我々は、継続的な観測を維持していくために、一つの火山での僅かな常設型観測点で二酸化硫黄放出率を見積もることが可能な、自動観測システムの構築を最終的な目標としている。今後、どの程度の観測点を配置すれば、火山活動の評価に耐える二酸化硫黄放出率を得ることができるか、これまでに阿蘇山や桜島で蓄積されてきた観測データを利用して、検討作業を進めていく。

謝 辞

本研究は京都大学防災研究所共同研究（平成29年度一般共同研究 29G-08）の成果による。執筆に際しては、気象庁気象研究所火山研究部の山本哲也部長、新堀敏基主任研究官から有益なコメントを戴きました。また、桜島の観測データは気象庁鹿児島地方気

象台から提供いただき、諏訪之瀬島の観測においては、気象庁福岡管区气象台地域火山監視・警報センターの協力の下に実施されました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 太田一也・松尾釧道・鎌田政明（1978）：阿蘇火山からの二酸化イオウ放出量の遠隔測定，第1回阿蘇火山の集中総合観測，51-55.
- 鎌田政明・太田一也・松尾釧道（1977）：桜島南岳からのSO₂（二酸化イオウ）の放出量，第2回桜島火山の集中総合観測報告書，98-100.
- 新堀敏基（2016）：火山灰輸送:モデルと予測，火山，第61巻，pp. 399-427.
- 新堀敏基・相川百合・福井敬一・橋本明弘・清野直子・山里平（2010）：火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測— 2009年浅間山噴火の事例—，気象研究所研究報告，第61巻，pp. 13-29.
- 福岡管区气象台地域火山監視・警報センター（2018）：2016年10月8日の爆発的噴火前後の阿蘇山の火山活動，火山噴火予知連絡会会報，第126号，pp. 144-174.
- 横山長之（1992）：大気環境シミュレーション，白亜書房，202 pp.
- Mori, T., Hirabayashi, J., Kazahaya, K., Mori, T., Ohwada, M., Miyashita, M., Iino, H. and Nakahori, Y. (2007): A Compact Ultraviolet Spectrometer System (COMPUSS) for Monitoring Volcanic SO₂ Emission: Validation and Preliminary Observation, Bull. volcanol. Soc. Japan, Vol. 52, pp. 105-112.
- Mori, T., Morita, M., Iguchi, M., and Fukuoka Regional Headquarters (2017): Sulfur dioxide flux monitoring using a public ferry after the 2014 eruption of Kuchinoerabujima Volcano, Japan. Journal of Natural Disaster Science, Vol. 38, pp. 105-118.
- Mori, T., Ishihara, K., Hirabayashi, J., Kazahaya K. and Mori, T. (2004): SO₂ gas monitoring by DOAS at Sakurajima and Suwanosejima volcanoes, Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No.47, pp. 157-162.
- Mori, T., Mori, T., Kazahaya, K., Ohwada, M., Hirabayashi, J. and Yoshikawa, S. (2006): Effect of UV scattering on SO₂ emission rate measurements, Geophysical Research Letters, Vol. 33, L17315.

（論文受理日：2018年6月13日）