

火山ガス拡散分布予想ツールの開発

Development of a Tool to Predict Volcanic Gas Diffusion Distribution

河波俊和¹, 田町勇氣², 森健彦³

Toshikazu KAWANAMI¹, Yuki TAMACHI², and Takehiko MORI³

(Received August 2, 2022: Accepted March 29, 2023)

ABSTRACT: As the SO₂ emission rate in volcanic gas is an important indicator in evaluating magmatic activity, mobile observations are conducted at active volcanoes. In such work, it is important to choose appropriate observation routes depending on the gas flow direction, judge whether gas concentration is detectable, and create an appropriate calibration curve for monitoring instruments. As prediction of gas diffusion distribution supports these tasks, the authors developed a tool for such prediction using a quasi-steady-state approximation model for diffusion. Validation showed that the tool's accuracy was sufficient to capture abrupt changes in volcanic activity, such as a doubling or more of the SO₂ emission rate.

1 はじめに

火山ガス中に含まれる二酸化硫黄の放出率は、活動的火山におけるマグマ活動の盛衰を把握する上で重要な指標であり、1970年代以降に国内外の火山で観測が続けられている(例えば、鎌田他, 1977; 太田他, 1978)。気象庁では、2005年に小型紫外線スペクトロメータを用いたCOMPUSS (Mori et al., 2007)と呼ばれる計測器を機動観測用機材に採用し、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を始めている。

現在、気象庁が実施している二酸化硫黄放出率観測では、トラバース法と呼ばれる手法を主に用いている。トラバース法は、COMPUSSを取り付けた車や船舶等で流下する噴煙の下を横切り、直上の噴煙に含まれる二酸化硫黄カラム濃度(ppm・m)を計測する測定手法であり、計測された二酸化硫黄カラム濃度を観測経路で積分することで、噴煙の流向に対して垂直な断面積内に含まれる二酸化硫黄断面積濃度(ppm・m²)を計算することができる。この二酸化硫黄断面積濃度に、密度と噴煙の流速を乗じることで二酸化硫黄放出率が算出される。気象庁では、測定ルート上における、噴

煙が流下する高度に合った毎時大気解析GPVの平均風速の値を噴煙の流速として用いている。

機動観測において、トラバース法を利用した二酸化硫黄放出率の算出は、

- ① 噴煙の流下方向及び範囲について、目視や遠望カメラと風の予報値を参考にして予想して、風下となる観測ルートを決める。
- ② 上空に噴煙が無い地点へ移動し、当日の計測の基準となる、紫外光吸収が生じていないスペクトラムを取得する。
- ③ 二酸化硫黄カラム濃度が既知である標準濃度セルを用いて各濃度の吸収スペクトルから吸光度を求め、カラム濃度換算のための検量線を作成する。
- ④ 車で移動しながら上空のスペクトラムを測定する。測定ソフト上で変換された吸光度から、③で作成した検量線を元に二酸化硫黄カラム濃度へ換算される。
- ⑤ 噴煙下を横切る作業を繰り返し、何回かの二酸化硫黄断面積濃度を取得する。
- ⑥ 官署へ戻った後、毎時大気解析GPVの風速値を

¹ 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters

² 鹿児島地方気象台, Kagoshima Meteorological Office

³ 気象研究所火山研究部(東京分室), Department of Volcanology Research (Tokyo Office), Meteorological Research Institute

用いて、二酸化硫黄放出率に換算する。
 という手順で行われる。これらの計測手順を行うにあたり、これまでの観測の積み重ねから、解決することが望ましい幾つかの課題が浮かび上がってきた。

現状の観測における課題として、まず①の観測ルートを選定では、噴煙の流向はある程度わかっているが、観測ルート上でどの程度の濃度が期待できるかまでは知ることができない。噴煙柱に含まれる二酸化硫黄が計測器で検出可能な量であるのかわからず、二酸化硫黄のシグナルを求めて山麓を延々と車で走り続けていたという事例もある。③の検量線の作成作業では、測定時の最大カラム濃度がどの程度になるかわからないため、経験的に標準濃度セルを選んで検量線を作成している。しかしながら、測定値の精度を向上させるためには、最大カラム濃度の値に応じて適切な標準濃度セルを選択しなければならない。そのためには、最大カラム濃度がどの程度になるか、予め目星をつけておく必要がある。さらに、現状では、⑥の官署でのデータ解析を行うまで、二酸化硫黄放出率がどの程度の多さであるのかを知ることができず、仮に火山活動の急激な変化を示唆する二酸化硫黄放出率が観測中に起こっていたとしても、カラム濃度の値からその異

常性を即時に判断することは難しい。観測前に、二酸化硫黄放出率を仮定した火山ガスの拡散シミュレーションを即時的に実施することができれば、観測ルート上でどの程度のカラム濃度の値が期待できるのか予測することができ、上記の課題の解決に繋がることが期待される。

これまでに火山ガスの拡散シミュレーションを行った研究はいくつかあり（例えば、Seino et al., 2004; 森他, 2018）、それらの研究で用いられている手法は大きく分けて 2 通りある。一つは、森他（2018）のように、プルームモデル（Sutton, 1932）と呼ばれる拡散モデルを用いた手法である。プルームモデルは、十分に広い空間において、ガスが連続的に煙突（点源）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. 1a）。濃度計算にはプルーム式（式 8）と呼ばれる拡散方程式の解析解を用いるため、計算コストが低く、表計算ソフトでも短時間で計算を実施することが可能である。しかし、風系が一様という仮定を置くので、風向が途中で変化してガスの主軸（Fig. 1の x 軸）がくねくねと折れ曲がるような気象場では、モデルと観測の乖離が大きくなってしまふ。また、風系の時間変化にも対応できず、何時間にも及ぶガスの

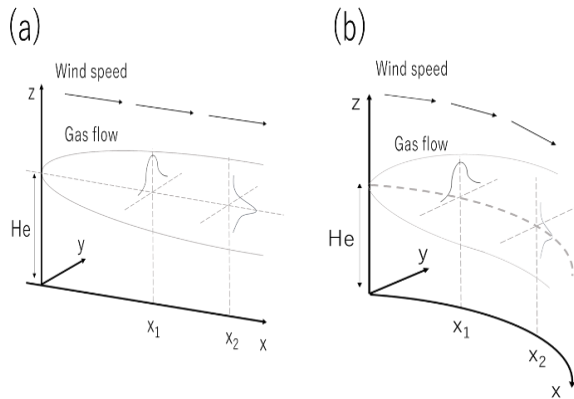


Fig. 1 (a) Plume model; (b) quasi-steady state approximation model for diffusion. These represent simulations of fumes moving from a plume into the atmosphere.

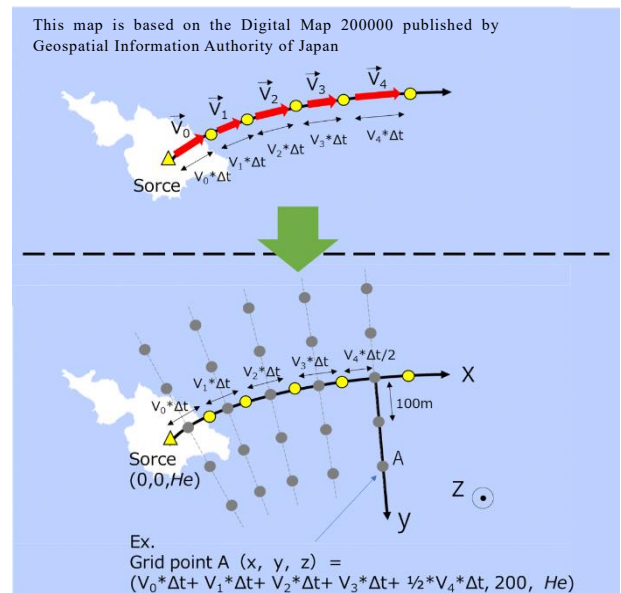


Fig. 2 Calculation of main gas plume axis and grid point distribution. Yellow triangle: outgassing source; yellow circles: gas trajectory; grey circles: grid points. He: height of main plume axis.

長距離輸送を再現することは難しい。これに対して、より実際の気象場を反映させることのできるモデルとして、数値解モデルを用いた手法がある（例えば Seino et al., 2004）。数値解モデルでは、気象モデルにより再現された気象データを用いて、火山ガスとみなした多数の質点をパッシブトレーサーとして移流拡散させることで、時空間的に緻密な火山ガス分布を再現しうる。しかし、十分な精度の計算値を得るためには多くの計算量が必要であり、現業での即時的な利用を考えた場合に最適な手法とは言い難い。

火山分野で適用された例は無いが、大気汚染の研究分野で知られているガス拡散モデルの一つとして、準定常ガス拡散モデルがある（Shiozawa et al., 1975；岡本・塩沢, 1977）。準定常ガス拡散モデルでは、流下するガスの軌跡（主軸）を、時間ステップに依存して変化する風の格子点データ（GPV）を用いて予め計算し、その主軸を座標軸 x （風下距離と呼ばれている）として規定する（Fig. 1b）。規定された座標系 (x, y, z) でプルーム式を用いて濃度計算を行うことにより、計算コストを抑えつつ風向風速の時空間変化にも対応できるモデルとなっている。

以上のことから、「即時的」かつ「ある程度実際の気象場を反映した」拡散シミュレーションを実施することを考えた場合に、準定常ガス拡散モデルは有効な手法であると考えられる。そこで、高頻度で二酸化硫黄放出率の観測が行われている口永良部島を対象として、準定常ガス拡散モデルと実測値との比較を行い、このモデルが実用可能かどうかの検討を行った。その上で、準定常ガス拡散モデルを用いた火山ガス拡散分布予想ツールの開発を進め、いくつかの業務への展開を試みた。

2 計算手法

本研究における、準定常ガス拡散モデルを用いた火山ガス濃度分布の計算手法について概略を説明する。計算手順として、風データ（GPV）を用いてガスの主軸を計算し、その主軸を基にモデルの座標軸を規定する。次に、規定したモデル座標において格子点を配置し、各格子点において濃度を式 (8) のプルーム式により計算する。

ただし本研究では計算の複雑化を防ぐため、

- ① 気象場は1時間ごとに更新し、次の更新までの1時間は定常状態を仮定する（準定常）。

- ② 火山ガスの重力降下は考慮せず、ガスの存在する範囲において風の場合は高度変化しない（高度変化は考慮しない）。

- ③ 地形の影響は考慮しない。

の3つを前提条件としている。

2.1 ガスの主軸の計算およびモデル座標の規定

ガスの主軸は、風データ（GPV）と内挿法を用いて、点列として計算する（Fig. 2 上段）。直交座標系 (X^d, Y^d, Z^d) において時刻 t の時に位置 (X_t^d, Y_t^d, Z_t^d) にあるガスは、この時刻と場所における風速成分 u, v, w によって流され、時刻 $t + \Delta t$ には、

$$X_{t+\Delta t}^d = X_t^d + u \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$Y_{t+\Delta t}^d = Y_t^d + v \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$Z_{t+\Delta t}^d = Z_t^d + w \cdot \Delta t \quad (3)$$

に移動する。ただし高度変化は考えないため $w = 0$ であり、ガスの高度は移動しても変化しない。計算時の Δt の値については、ガスの放出源での水平風速

$$V_0 = \sqrt{u_0^2 + v_0^2} \quad (4)$$

をもとに

$$V_0 \cdot \Delta t = 100\text{m} \quad (5)$$

となるように決めている。主軸上での風速変化がわずかな状況であれば、ガスの点列の間隔は概ね 100m 程度となる。式 (1) ~ (3) の計算を、ガスの放出源から主軸の長さが規定値に達するまで繰り返す。任意の地点 (X^d, Y^d) における風速成分 u, v については、中井 (1982) の手法を参考に、風データ（GPV）と次の内挿式を用いて求める。

$$U(X^d, Y^d) = \frac{\sum_k W_k \cdot U_k}{\sum_k W_k} \quad (6)$$

U_k は風データ（GPV）の格子点 k における u あるいは v 成分である。内挿には地点 (X^d, Y^d) を中心とする半径 10km 以内にある格子点値すべてを用いている。重み係数 W_k は格子点と地点 (X^d, Y^d) との間の距離 R_k の関数で、式 (7) で計算する。

$$W_k = \frac{1}{R_k^2} \quad (7)$$

以上のようにしてガスの主軸を点列として計算し、それを x 軸として、モデル座標 (x, y, z) を規定する (Fig. 2 下段). 濃度計算を行う格子点については、ガスの点列の midpoint に格子点を配置し、それらの点から、主軸に対して垂直な方向 (y 軸方向) に、100m 置きに格子点を配置する. また、高さ方向 (z 軸方向) については 1m 置きに格子点を配置する. なお、グラフ描画の際には、スムージングを行っており、格子点間隔より密に濃度分布を描画している.

2.2 濃度計算

準定常拡散モデルでは、濃度計算に式 (8) のブルーム式を用いる. 本来ブルーム式は、一つの点煙源からガスが連続的に排出され、一方向に一定の風速で風下に拡散していく場合に対してガスの濃度分布を求める式である (Sutton, 1932). 準定常拡散モデルでは、ブルームモデルを拡張させ、風の流線が湾曲してガスの主軸に多少の曲率がある場合でも、各地点に近いガスの主軸が局所的に直線であり、ある程度の時間内のみ気象条件が一定かつ一様であれば、近似的にブルーム式を利用できるとしている (Shiozawa et al., 1975, 岡本・塩沢, 1977).

各格子点における濃度 $C(x, y, z)$ は以下のように計算される.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zV} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left(e^{-\frac{(z-He)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+He)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \quad (8)$$

ここで、 Q は二酸化硫黄放出率、 V は格子点上空における風速、 He はガスの排出高度、 σ_y 、 σ_z はそれぞれ y 軸方向、 z 軸方向への拡散幅である. サットンの方法を用いる場合、拡散幅 σ_y 、 σ_z は風下距離 x を用いて、式 (9) で示される.

$$\sigma_y = \frac{c_y}{\sqrt{2}} x^{(1-n/2)}, \quad \sigma_z = \frac{c_z}{\sqrt{2}} x^{(1-n/2)} \quad (9)$$

c_y 、 c_z および n はサットンの拡散パラメータであり、

大気安定度によってきまる係数である. 本研究では、新良 (1975) を参考に、評価時間が 1 時間として $c_y = 0.467$ 、 $c_z = 0.07$ 、 $n = 0.28$ を用いている. ただし n については、 c_y の風速依存性を調査するために、式 (9) と式 (11) を比較して x の指数が等しくなるように値を決定した. また、式 (8) の濃度計算で用いる風速 V については、計算の単純化のため主軸上 $(x, 0, He)$ の風速で代用している.

COMPUSS によって計測されるのは、計測地点における二酸化硫黄カラム濃度 (濃度を高さ方向に積分したもの) である. 本研究では、少なくともガスの存在する領域内においては、高さ方向に風の場合は変化しないと仮定して、高度 1m ごとの二酸化硫黄濃度を計算し、濃度を高さ方向に足しあげることで二酸化硫黄カラム濃度 (ppm·m) を計算している (Fig. 3).

3 観測値を用いたモデルの検証

準定常ガス拡散モデルにより計算される火山ガスの濃度分布の妥当性を明らかにするため、実測値との比較検討を行った. 口永良部島では、定期航路である屋久島町営フェリーを利用したトラバース法で、高頻度な二酸化硫黄放出率観測が行われている (Mori et al., 2017). そこで、2020 年 1 月～2021 年 2 月までの口永良部島の観測データ (全 166 事例) を用いてモデル値と観測値の比較を行った.

3.1 カラム濃度のモデル値の算出

観測された二酸化硫黄放出率をモデルの放出率 Q として用いて、実際の観測経路上におけるカラム濃度のモデル値を計算した (Fig. 4). モデル計算に使用する風データ (毎時大気解析 GPV) については、ガスの流向が観測結果と最も一致する気圧面・時刻を選択した. 具体的には、気圧面 6 通り (1000, 975, 950, 925, 900, 850hPa)、時刻 2 通り (観測時刻前後の正時) の全 12 通りの計算を行い、それらの計算結果の中で最大カラム濃度の時刻が最も観測値に近いものを採用した. ただし、該当するものが複数ある場合については、拡散幅も含めて最も観測値に一致するものを採用した. なお、排出高度 He については、採用した風データの気圧面に対応する標高の概算値を用いた.

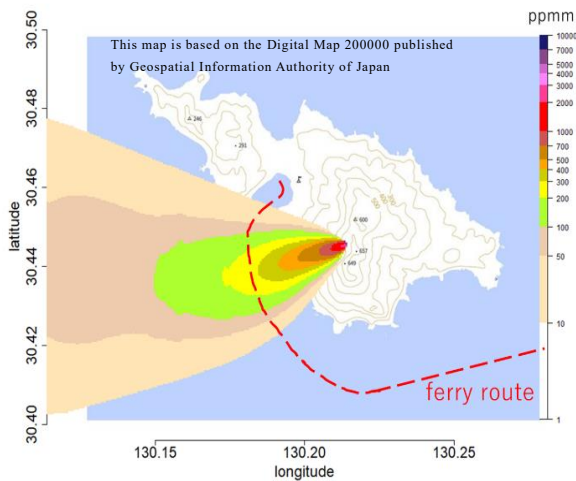


Fig. 3 Distribution of SO₂ column concentration as calculated using the quasi-steady-state approximation model with JMA hourly analysis wind data at 975 hPa for 02 UTC on June 8 2020. Assumed emission rate: 226 tons/day; red line ferry route.

3.2 観測値およびプルームモデルとの比較

最大カラム濃度について、観測値とモデル値を比較したところ、幅広い濃度範囲で、概ね一致した (Fig. 5)。また、最大カラム濃度の日平均値を時系列で比較すると、火山活動の推移に伴う変動を概ね再現できていた (Fig. 6)。

個々の最大カラム濃度の誤差を、以下の誤差率 Er で評価したところ、

$$Er = \frac{(\text{モデル値} - \text{観測値})}{\text{観測値}} \times 100 \quad (10)$$

誤差率の平均値は約 9% であり、標準偏差は約 48% となった。誤差の大きい事例としては、219% の過大評価となる事例や、-70% の過小評価となる事例があった。過大評価となる事例では、モデルの拡散幅が観測値に比べて小さく、過小評価となる事例では逆に大きくなっており、拡散幅と最大カラム濃度の間にはトレードオフの関係がみられた (Fig. 7)。

式 (8), (9), (11), (13) によれば、最大カラム濃度や拡散幅は、風下距離および観測地点上空の風速により決まる。風下方向で風向風速が変化するような気

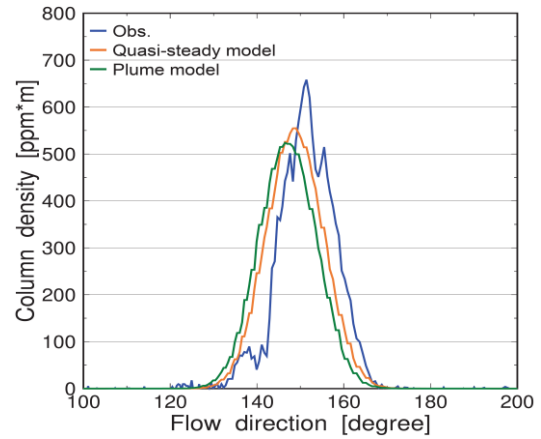


Fig. 4 Comparison of observation and simulation values for SO₂ column concentration (blue: observation, orange: quasi-steady-state approximation model; green: plume model). Simulation values were calculated using JMA hourly analysis wind data at 975 hPa for 06 UTC on February 1 2020. The emission rate Q assumed in the model is based on the observation value (1,088 tons/day). The flow direction is defined as the clockwise angle from north (0 degrees) as viewed from the crater.

象場では、準定常ガス拡散モデルとプルームモデルでガスの流下経路に差が生じ、結果として最大カラム濃度とその観測位置に違いが生まれ、準定常ガス拡散モデルのほうがより観測値に近いものになることが期待される。そこで、火口での風向風速を代表風速として、水平方向に一樣な風を仮定したプルームモデルの計算を行い、最大カラム濃度およびその観測位置 (ガスの流向) の誤差率について、準定常拡散モデルとの比較を行った。結果として、今回の検証では期待していたようなモデル間の違いはみられなかった (Fig. 4, Table 1, Table 2)。今回検証したデータでは、火口から観測経路までの距離が概ね 5km ほどと短く、通常の風向変化の範囲では、ガスの流下経路にそれほど差が生じなかったと考えられる。すなわち、プルームモデルよりも準定常拡散モデルを用いることが適しているのは、火口からの距離が一定以上離れた場合といえる。

近年、衛星により二酸化硫黄の空間分布が観測されるようになった。例えば、欧州宇宙機関 (ESA) の人工衛星 Sentinel-5 Precursor では、搭載している TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) によって、高い空間解像度 (緯度方向 5.5km, 経度方向 3.5km) で二酸化硫黄カラム濃度 (mol/m²) の全球観測が毎日

1 回スナップショット的に行われている (Theys et al., 2017). 2022 年 7 月 25 日の TROPOMI の観測データ (SO₂ Level2 プロダクト) では、桜島から放出されたガスが東方向に 25km ほど流れた後に南東方向に向きを変えて流れており、ガスの主軸が湾曲する様子がみてとれる (Fig. 8). この事例について、準定常拡散モデルによるシミュレーションを実施したところ、火口から東に 25km ほど進んだところでガスの主軸が折れ曲がる様子が再現できていた. 一方でプルームモデルでは、風向風速の時空間変化には対応できないために、ただ東の方向にガスが流れるのみであった. 以上のことから、数十 km 以上のスケールの、火山ガスの長距離輸送を考える場合、準定常拡散モデルはプルームモデルに比べて有用であると考えられる.

このように、将来的な解析手法として、衛星による二酸化硫黄の空間分布とガス拡散モデルによる二酸化硫黄のカラム濃度分布を併せて二酸化硫黄放出率を推定する際には、準定常ガス拡散モデルの有効性が活かされる. 加えて、地上観測においても、火山ガスの放出が多量の場合、二酸化硫黄カラム濃度が観測機器の測定限界に達する可能性があり、濃度が低くなるように火口から遠く離れたルートでの測定が求められる場合がある. 実際、二酸化硫黄放出率が日量 3 万トンを超えていた 2018 年 3 月 7 日の霧島のガス観測の際には、新燃岳火口から 10km 以上離れた湧水町からえびの市にかけての国道 268 号で計測を行っている. この時の観測データを見ると、ガスの検知範囲が広く低層にガスが滞留している可能性があるため放出率を単純に比較することはできないが、カラム濃度のピーク位置については準定常ガス拡散モデルのほうがプルームモデルよりも観測値に近いことがわかる (Fig. 9). このように、火口から数十 km 以上の遠距離でのトラバース観測においても準定常拡散モデルは有用な手法である. 今後、準定常拡散モデルが優位となる距離を明確にするために、衛星観測データ等を用いて火口からの距離が長い観測事例で検証を進めていく必要がある.

Table 1 Error rates of maximum column density for each diffusion model, calculated as (Model-Obs.) / Obs. × 100[%].

Diffusion model	Average	SD	Max.	Min.
Plume model	9	48	219	-70
Quasi-steady model	9	48	219	-70

Table 2 Absolute errors of flow direction for each diffusion model, with flow direction defined as the clockwise angle from north (0 degrees) as viewed from the crater and absolute errors calculated as |Model-Obs.| [degrees].

Diffusion model	Average	SD	Max.	Min.
Plume model	4	6	66	0
Quasi-steady model	4	6	65	0

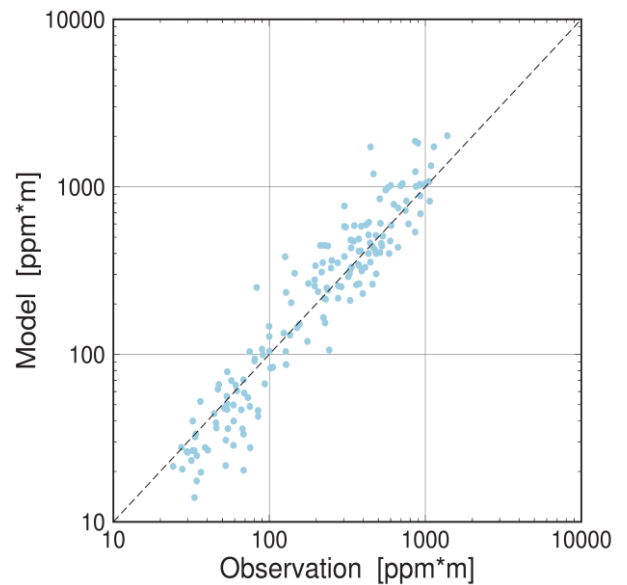


Fig. 5 Comparison of observation values of max SO₂ column density and related simulation values calculated using the quasi-steady-state approximation model for diffusion. Based on comparison of 166 observation SO₂ emission rates.

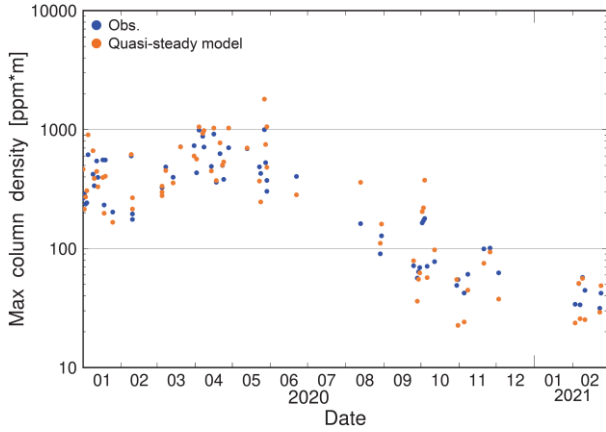


Fig. 6 Comparison of daily average observation (blue dots) and simulation (orange dots) values of SO₂ emission rates from February to September 2020

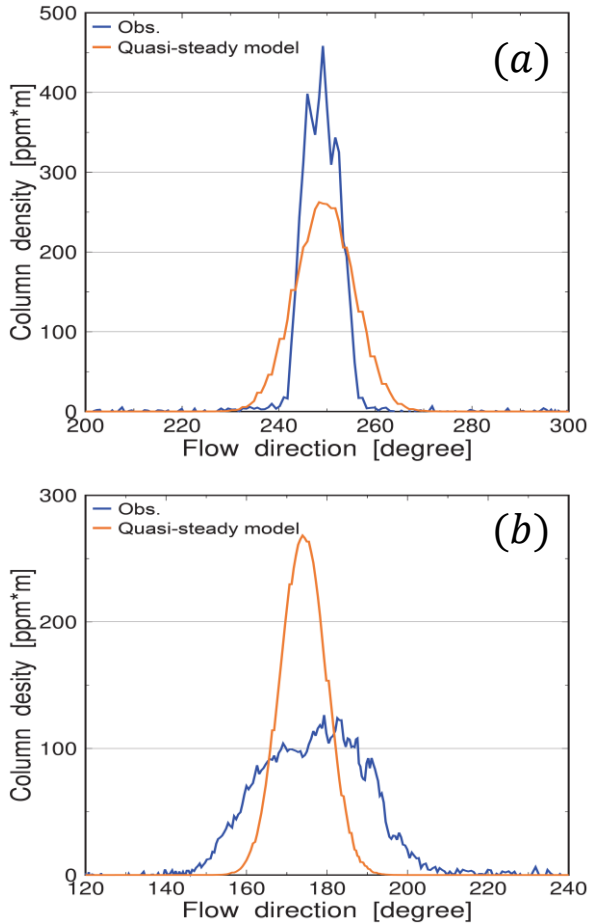


Fig. 7 Comparison of observation and simulation values of SO₂ column density in cases with large errors. (a) Model underestimation; (b) model overestimation.

4 拡散パラメータの改良による予測誤差の改善

大気中での物質の拡散を支配する要素として、風向の変動幅（風向変動の標準偏差）は最も基本的なものである（光田他, 1975）. 現実的には、拡散幅の推定の際には、風向変動の標準偏差の代わりとして、風速等の他の気象要素が用いられていることが多く、様々な方法が提案されている（栗田, 1977）. Singer et al. (1966) は、観測結果から、y 軸方向の拡散幅 σ_y を推定する経験式として以下の式を提案している.

$$\text{大気不安定} : \sigma_y = 0.045 * \left(\frac{23}{V'} + 4.75 \right) * x^{0.86} \quad (11)$$

$$\text{大気安定} : \sigma_y = 0.15 * 2 * x^{0.71} \quad (12)$$

V' は噴煙の主軸に沿った風速であり、大気不安定の場合には式 (11)、大気安定の場合には式 (12) を用いる. 大気安定の場合には、拡散幅は風速に依存せず、大気不安定の場合に比べると拡散幅は小さくなる. 一方、大気不安定の場合には、風速が大きいほど拡散幅は小さくなり、風速が小さいほど拡散幅は大きくなる. 本研究においても、最大カラム濃度の誤差率と風速に負の相関がみられることおよび最大カラム濃度と拡散幅にはトレードオフの傾向があることから、拡散幅の誤差率と風速には正の相関、すなわち、拡散幅と風速には負の相関があると考えられる (Fig. 7, 10).

そこで、拡散幅と風速との関係を調べるために、これまで定数としていた y 軸方向の拡散パラメータ c_y を変数とし、観測とモデルの最大カラム濃度の差が最小となるような c_y の値を計算した. 具体的には、サットンの拡散パラメータのうち、 c_z および n は 3 章と同じ値 ($c_z=0.07$, $n=0.28$) を使用し、 c_y は 0.1~1.5 まで 0.01 刻みで変化させている. 結果として、求められた拡散パラメータ c_y と風速（今回は計算の単純化のため、火口上空での風速で代用した）には、負の相関がみられた (Fig. 11). また、大気不安定を仮定して式 (9) と式 (11) から求めた拡散パラメータの経験式

$$c_y = \sqrt{2} * 0.045 * (23/V' + 4.75) \quad (13)$$

と比較すると、経験式は観測値を概ね再現できることがわかる (Fig. 11). この経験式を拡散パラメータ c_y として拡散モデルを再計算した結果、 c_y を定数とした場

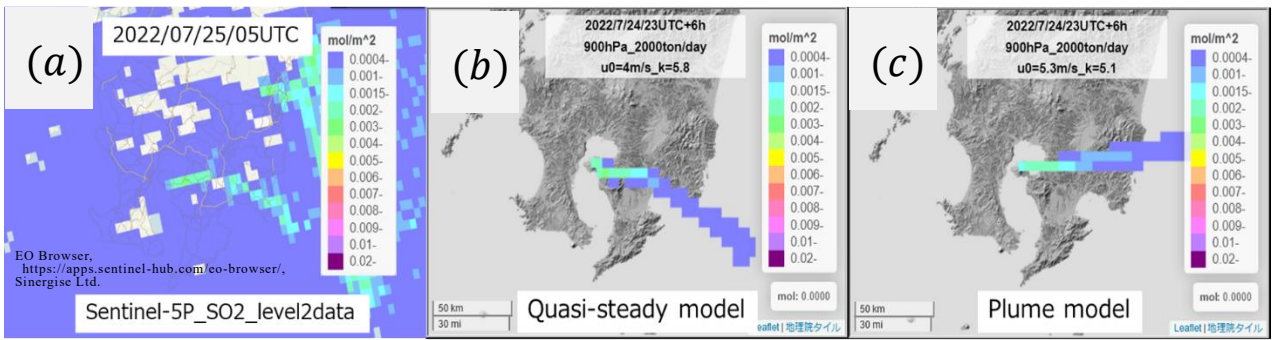


Fig. 8 Comparison of satellite observation data and model calculations of column density distribution for SO_2 [mol/m^2] emitted from Mt. Sakurajima on July 25 2022. (a) Level 2 data from TROPOMI on board the Sentinel-5 Precursor, (b) quasi-steady-state approximation model calculations, and (c) plume model calculations. Model values are calculated for a period of six hours using JMA 900 hPa hourly analytical wind data for (b) 23 UTC July 24 to 04 UTC July 25 2022 and (c) 23 UTC on July 24 2022. The column density values from each model calculation are divided by the constant (k) in the figure to fit the observation values.

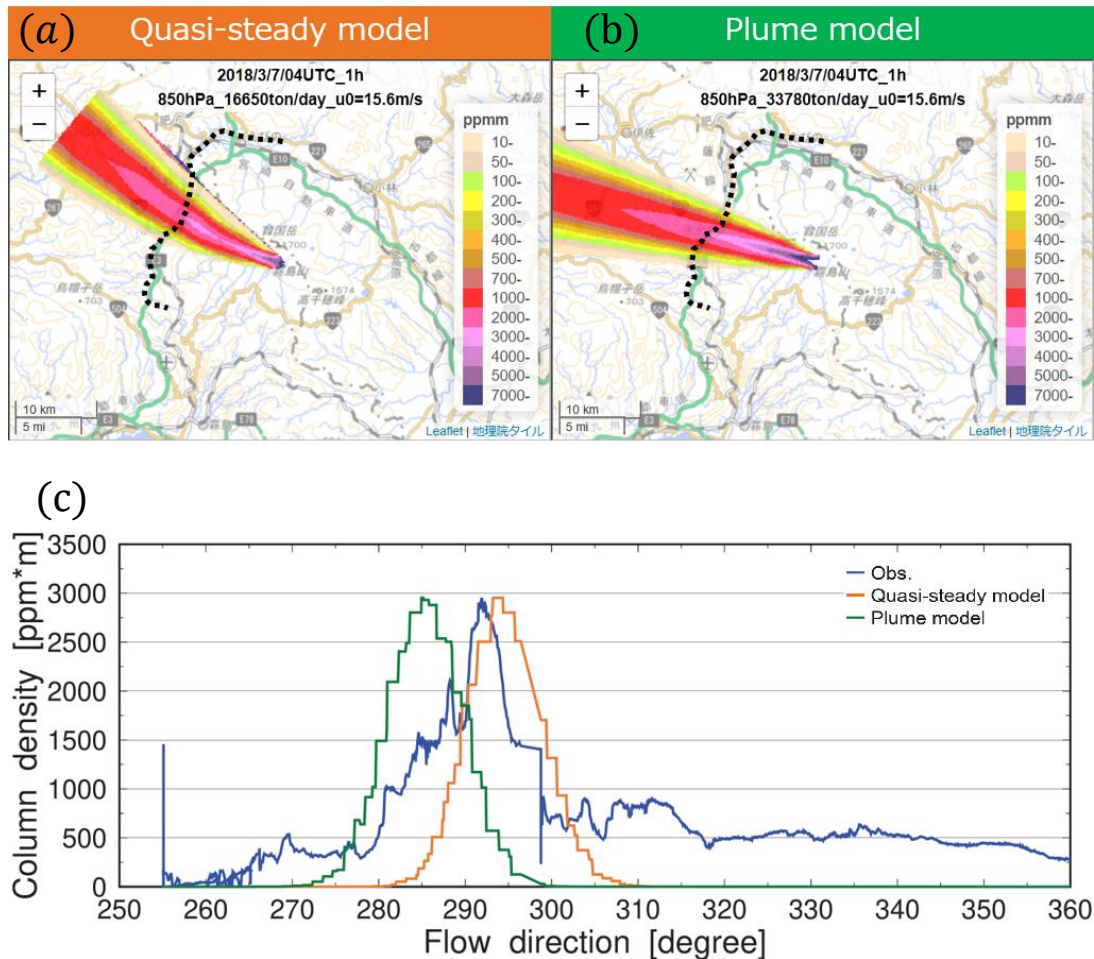


Fig. 9 Comparison of model calculations for column density distribution of SO_2 [$\text{ppm}\cdot\text{m}$] emitted from Mt. Shinmoedake on March 7 2018. (a) Quasi-steady-state approximation model calculations; (b) plume model calculations; (c) comparison with traverse observation data. The dotted black lines in (a) and (b) show the traverse route. Model values are calculated for one hour using JMA 850 hPa hourly analytical wind data for 04 UTC on March 7 2018. The assumed emission rate Q is 16,650 tons/day for the quasi-steady state approximation diffusion model and 33,780 tons/day for the plume model.

合と比べ、誤差率の平均値、標準偏差、最大値及び最小値の全てで改善がみられた (Table 3, Fig. 12). 傾向として、過大評価となっていた事例が減少しており、風速が小さいと過大評価になる傾向がみられたことから、主に風速が小さい事例の誤差が低減されたと考えられる. 特に最大値は、219%から117%と、大幅に改善している (Fig. 10). 平均値、標準偏差も十数%ほど小さくなり、約35%の誤差をもって最大カラム濃度を推定することが可能となった. この誤差であれば、放出率が2倍以上となるような火山活動の急激な変化を十分に捉えることができ、機動観測等の支援資料として十分に活用可能なレベルであると考えられる.

今回は大気不安定を仮定して式 (11) の拡散パラメータを用いたが、観測事例の中には大気安定の日も含まれると考えられる. そのような事例では式 (12) の大気安定の式を用いることでより観測値を正しく表現できる可能性がある. 今後、観測日の大気不安定度を調査し、大気安定度がもたらす拡散パラメータの揺らぎを明らかにする必要がある.

Table 3 Error rate of maximum column density for each diffusion parameter, calculated as (Model-Obs.) / Obs. × 100[%].

Diffusion parameter (c_y)	Average	SD	Max.	Min.
0.467	9	48	219	-70
$\sqrt{2} * 0.0045 * (23/V' + 4.75)$	-2	35	117	-69

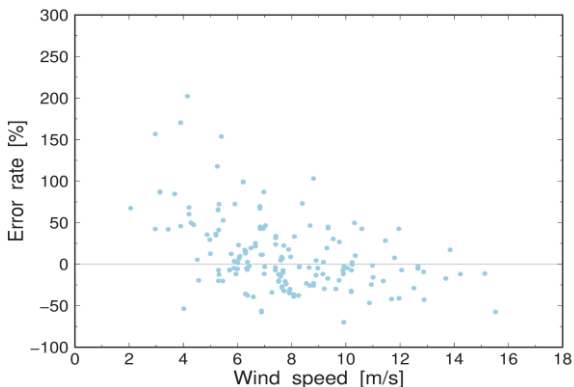


Fig. 10 Relationship between the error rate of maximum column density and wind speed. The horizontal axis is wind speed over the crater at plume altitude.

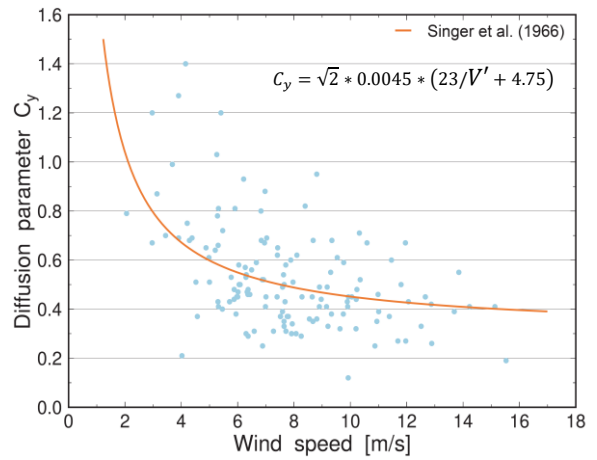


Fig. 11 Relationship between the diffusion parameter c_y and wind speed. The horizontal axis is wind speed over the crater at plume altitude.

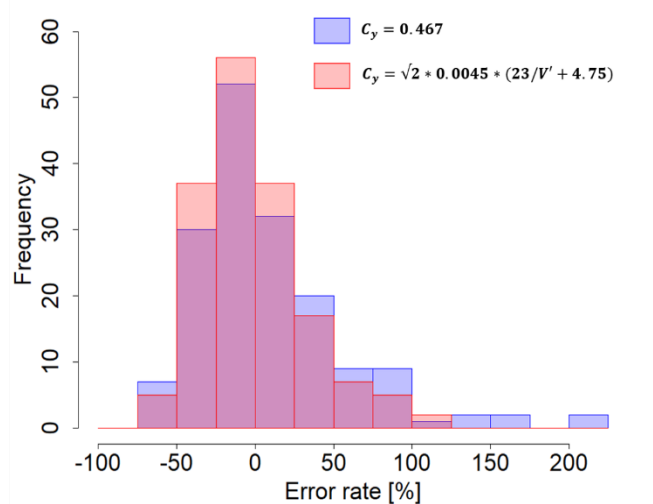


Fig. 12 Frequency distribution of the error rate of maximum column density. Blue: with $c_y = 0.467$; red: with $c_y = \sqrt{2} * 0.0045 * (\frac{23}{V'} + 4.75)$.

5 ツールの使用手順と業務への活用について

以下では、今回作成した火山ガス拡散分布予想ツールの使用手順と機動観測での活用について簡単な説明を行う。

5.1 使用手順

本ツールでは、Microsoft 社の Excel マクロを用いてパラメータの設定および風データ (GPV) の取得を行い、オープンソースの統計解析向けのプログラミング言語である R 言語を用いて、ガス拡散分布の計算・グラフ描画・画像出力を行っている。ユーザー側の操作としては、Excel 内で完結しており、誰でも簡単に使用できるようになっている。本ツールは、MSM の風の予報値 (メソ数値予報モデル GPV) を使用して拡散分布の予測を行う「forecast 版」と、毎時大気解析の風の解析値を使用して拡散分布の解析を行う「analysis 版」の 2 種類がある。ここでは「forecast 版」についての説明を行う。

「forecast 版」の Excel シートでは、風データ (GPV) の取得を行うための各種パラメータ (予想時刻、気圧

面、仮定放出率) の設定を行う (Fig. 13)。

風データを取得し、シミュレーション結果を出力する手順として、

- ① 対象とする火山をプルダウンで選択し、火山ガス放出源座標及び計算領域を設定する。
- ② 計算速度を選択する。計算速度とは、“通常”と“10 倍速”の 2 種類設定している。“通常”は、カラム濃度を高度 1m ごとに積分して計算されるが、“10 倍速”はカラム濃度を 10m ごとに積分して計算される。したがって、“10 倍速”では計算速度は早いものの、精度はやや落ちる。
- ③ 予想したい日時を設定する。最大で 3 つまで時刻を設定できる。MSM の初期値については、自動的に最新のものが設定される。
- ④ 仮定する二酸化硫黄放出率を設定する。
- ⑤ 4 つの気圧面を選択する。ここで選択された 4 気圧面分の計算結果が繋ぎ合わされて、一枚の画像となつて出力される。
- ⑥ 「GPV 取得ボタン」を押して、大気海洋部予報課

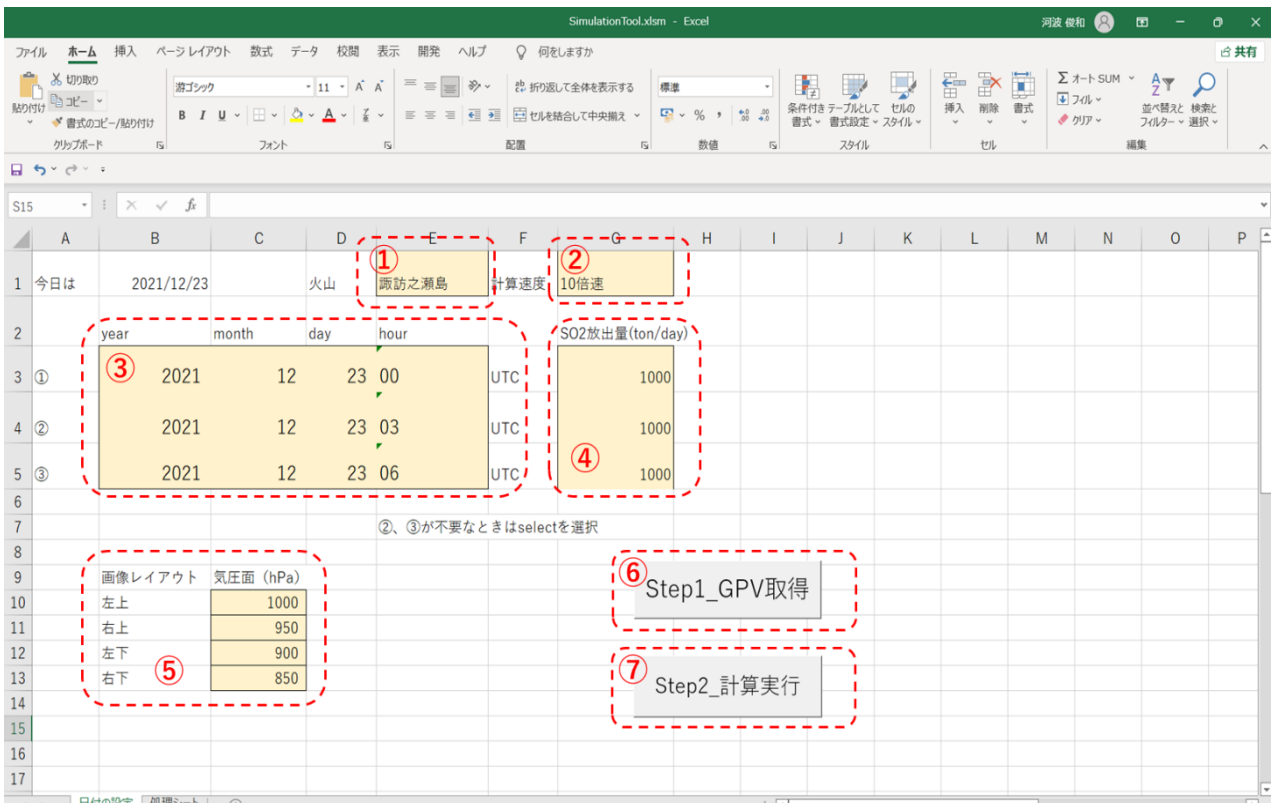


Fig. 13 Screen shot of the tool for predicting volcanic gas diffusion distribution. 1: Set the volcano. 2: Set the calculation speed. 3: Set the date. 4: Set the assumed SO₂ emission rate. 5: Set the pressure levels for calculation. 6: Click “Get GPV.” 7: Click “Calculate.”

のパンドラサーバから、各種設定に基づき、MSMの風データを取得する。

- ⑦「計算実行ボタン」を押して、取得した風データと設定したパラメータを基に R 言語により拡散分布を計算し、グラフ描画を行う。描画したグラフについては、jpg 形式でファイル出力される。

なお、「analysis 版」では、観測値とモデル値の比較を行うために、トラバース観測の位置情報（緯度・経度）および観測したカラム濃度の時系列データを別の Excel シートで読み込ませる必要があるが、それ以外の操作手順は「forecast 版」と同様である。

5.2 機動観測前の予測資料としての活用

福岡管区気象台では 2021 年 1 月から、機動観測の支援を目的に、火山ガス拡散分布予想ツールの業務への活用を開始している。具体的には、観測当日の朝に、本ツールの「forecast 版」を用いて当日 09 時、12 時、15 時のガス拡散分布予測図を作成し、機動観測前の現場に予測図を共有している (Fig. 14)。現場では、予測図を踏まえて、観測ルートを検討を行い、ルート上で予想されるカラム濃度の値を参考に、二酸化硫黄が検知可能かどうかの見極めや検量線作成を実施している。本ツールを用いてガス拡散分布予測図を作成するにあたり、

- ① 噴煙が流れる気圧面をどこに仮定するか
- ② 二酸化硫黄放出率をどの程度に仮定するか

を検討しなければならない。①②ともに実際に観測するまで未知のパラメータであるが、より現状に近いパラメータを仮定する必要がある。考え方の一例として、①については、例えば、統計的に最もガスの流れる頻度が高い気圧面をベースとして、その上下の気圧面も適当にいくつか選び、それぞれ計算しておく方法が考えられる。これにより、風向風速が気圧面によってまったくバラバラな場合を除いて、ある程度ガスの流向を絞り込むことができる。②については、直近の放出率の観測値を仮定しておけば、カラム濃度の測定値から、瞬時に直近の放出率との比較が可能であり、現場の観測者が火山の活動度の変化を把握するうえで有用な情報になりうる。

5.3 機動観測直後の速報解析ツールとしての活用

本ツールの「analysis 版」は、毎時大気解析の風データ (GPV) を用いて拡散分布のモデル計算を行っており、機動観測直後の放出率速報解析ツールとして活用することができる (Fig. 15)。式 (8) より、理論的にカラム濃度と放出率は比例関係にあることから、カラム濃度の最大値の比 (観測/モデル) にモデルで仮定した放出率を乗じることで実際の二酸化硫黄放出率を推定することができる。これにより、機動観測報告が共有される前に、現場からの最低限の情報 (最大カラム濃度の値) だけで、即時的に火山活動を評価することが可能である。実際に福岡管区気象台では、機動観測の現場から、高カラム濃度が検知されたと連絡があった場合は、観測された最大カラム濃度を用いて放出率の速報解析を行っており、即時的な火山活動評価の一助として本ツールを業務に活用し始めている。

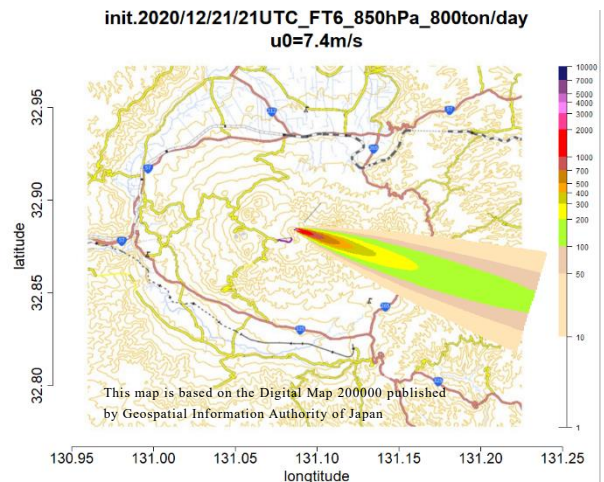


Fig. 14 Column density distribution of SO_2 [ppm*m] emitted from the crater at Mt. Aso-Nakadake calculated using the forecast version of the simulation tool. The letters in the figure title are in the order of the initial value of the MSM (Meso-Scale Model), forecast time (h), standard isobaric surface, assumed emission rate, and wind speed over the crater.

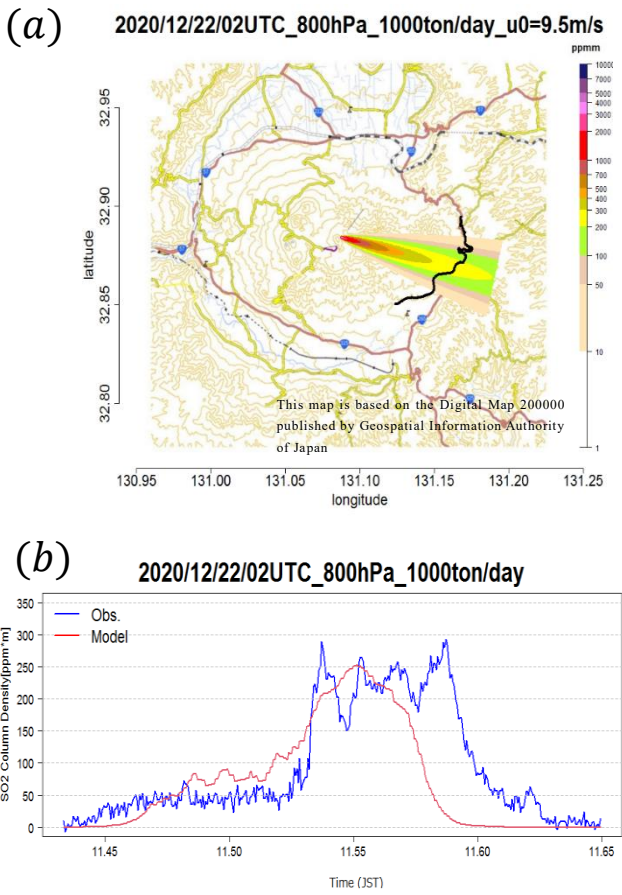


Fig. 15 (a) Column density distribution of SO_2 [$\text{ppm}\cdot\text{m}$] emitted from the crater at Mt. Aso-Nakadake calculated using the analysis version of the simulation tool. The letters in the title of the figure are in the order of the date of JMA hourly analysis wind data, standard isobaric surface, assumed emission rate, and wind speed over the crater. The black line is the traverse route. (b) Comparison of observed and simulation values of SO_2 column density (blue: observation; red: model). The model values were calculated using JMA hourly analysis wind data at 800 hPa for 02 UTC on December 22 2020. The emission rate Q assumed in the model is 1,000 tons/day, and the observation value is 1,500 tons/day.

6 まとめ

準定常ガス拡散モデルを用いた火山ガス拡散分布予想ツールを開発し、実測値との比較により実用可能かどうかの検討を行った。二酸化硫黄カラム濃度の最大値について、実測値とモデル値を比較した結果、幅広い濃度範囲で、概ね一致していることを明らかにした。また、拡散パラメータを一定として計算したとこ

ろ、実測値とモデル値の誤差率は風速に依存する傾向がみられた。拡散パラメータを可変にして計算したところ、拡散パラメータと風速との間に関係性があることがわかり、拡散パラメータの風速依存性を考慮した結果、誤差を約 35% まで改善させることができた。この程度の誤差であれば、二酸化硫黄放出率が 2 倍以上となるような火山活動の急激な変化を十分に捉えることができ、機動観測等の支援資料として十分に活用可能なレベルであると考えられる。

準定常ガス拡散モデルとブルームモデルの比較については、今回検証した口永良部島の観測データでは、火口から観測ルートまでのガスの流下距離が 5km ほどと短く、モデル間の違いがほとんどみられなかった。一方で、衛星観測や地上での遠距離トラバース観測の比較では、ガスの流下距離が 10-20km 以上となったところでモデル間に明瞭な違いが生じ、準定常ガス拡散モデルでは観測データでみられていたガスの主軸の湾曲を再現することができていた。数十 km 以上のスケールの、火山ガスの長距離輸送を考える場合、風系の時空間変化に対応できる準定常拡散モデルはブルームモデルに比べて有用であると考えられる。

本ツールの活用例としては、「機動観測前の予測資料としての活用」と「機動観測直後の速報解析ツールとしての活用」を考えており、福岡管区气象台では実際に業務への活用を開始している。これにより、現状の機動観測における課題をいくつか解決することができた。例えば、「機動観測前の予測資料としての活用」では、観測ルート上で予想されるカラム濃度を事前に知ることができるようになり、二酸化硫黄が検知可能かどうかの見極めや検量線作成作業における適切な標準濃度セルの選択が可能となった。また、これまでは、仮に観測中に火山活動の異常を示唆する二酸化硫黄放出率があったとしても、官署でのデータ解析を行うまで放出率を知ることができず、その異常性の大きさを即時に判断することは難しかったが、「機動観測直後の速報解析ツールとしての活用」により、二酸化硫黄カラム濃度の最大値から即時的に二酸化硫黄放出率を推定することが可能となった。

今後の課題として、モデル計算の誤差をより改善するために拡散パラメータと大気安定度との関係の調査が必要である。また、準定常拡散モデルがブルームモデルに比べて優位となる距離を明確にするために、衛星観測データ等を用いて火口からの距離が長い観

測事例で検証を進めていく必要がある。さらに、本ツールのさらなる活用例についても今後検討していきたいと考えており、例えば、Theys et al. (2019) などが解析している、衛星による二酸化硫黄カラム濃度観測データからの二酸化硫黄放出率の計算を、ガス拡散モデルから得られる二酸化硫黄カラム濃度と衛星データをフィッティングすることで行うことを考えている。火口から離れた位置での濃度分布に高い精度が期待できる準定常拡散モデルを使うことで、精度の高い二酸化硫黄放出率の推定が可能かどうかを明らかにしていきたい。

謝辞

東京大学の森俊哉氏及び屋久島町には、二酸化硫黄放出量観測に関してご指導・ご協力をいただきました。福岡管区気象台の入山宙研究官には、本稿作成段階で移流拡散モデルの内容に関するアドバイスをいただきました。観測データの解析を行うにあたっては、福岡管区気象台地域火山監視・警報センターの皆様のご協力をいただきました。また、匿名査読者には、査読者として本稿改善に有益なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

拡散分布の計算および作図には R 言語 (R.Ihaka and R.Gentleman, 1996) および GMT (Wessel and Smith, 1998) を使用しました。また拡散分布図を作成するにあたり、国土地理院の地理院タイルを利用しました。

文献

太田一也・松尾釦道・鎌田政明 (1978): 阿蘇火山からの二酸化イオウ放出率の遠隔測定, 第 1 回阿蘇火山の集中総合観測報告書, 51-55.

岡本眞一・塩沢清茂 (1977): 準定常拡散モデルによる大気汚染シミュレーション (1), 天気, **24**, 11, 671-681.

鎌田政明・太田一也・松尾釦道 (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.

栗田秀実 (1977): 煙の拡散巾の風速変動による推定, 大気汚染研究, **12**, 8(9), 19-25(449-455).

新良宏一郎 (1975): 拡散計算式と拡散パラメーターの選り方について, 環境技術, **4**, 9, 23-30.

中井公太 (1982): アメダス風から計算される関東地方の発散の主成分分析, 研究時報, **34**, 3, 115-126.

光田寧・塚本修・加藤晶子 (1975): 風向変動幅の測定法と

その応用, 京都大学防災研究所年報, **18**, B, 203-210.

森健彦・篠原英一郎・菅井明・満永大輔・橋本明弘・山本圭吾 (2018): 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, 京都大学防災研究所年報, **61**, B, 344-350.

Ihaka, R., and R. Gentleman (1996): R: a language for data analysis and graphics, Journal of computational and graphical statistics, **5**, 3, 299-314.

Mori, T., J. Hirabayashi, K. Kazahaya, T. Mori, M. Ohwada, M. Miyashita, H. Iino and Y. Nakahori (2007): A Compact Ultraviolet Spectrometer System (COMPUSS) for Monitoring Volcanic SO₂ Emission: Validation and Preliminary Observation, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **52**, 105-112.

Mori, T., M. Morita, M. Iguchi 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, **38**, 105-118.

Seino, N., H. Sasaki, J. Sato and M. Chiba (2004): High-resolution simulation of volcanic sulfur dioxide dispersion over the Miyake Island, Atmospheric Environment, **38**, 7073-7081.

Shinozawa, K., S. Okamoto and A. Ootaki (1975): A diffusion model for air quality simulation, 68th APCA annual meeting paper 75-04. 4.

Singer, I. A., Frizzola, J. A. and Smith, M. E. (1966): A simplified method of estimating atmospheric diffusion parameters, Journal of the Air Pollution Control Association, **16**, 11, 594-596.

Sutton, O. G. (1932): A theory of eddy diffusion in the atmosphere, Proceedings of the Royal Society of London A, **135**, 143-165.

Theys, N. et al. (2017): Sulfur dioxide retrievals from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor: algorithm theoretical basis. Atmos. Meas. Tech. **10**, 119-153.

Theys, N. et al. (2019): Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. Sci. Rep. **9**, 2643.

Wessel, P., and Smith, W.H.F. (1998): New improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans, A mer. Geophys. Union, 79, 579.

(編集担当 鳥巢啓多, 松末伸一)