



Title	新燃岳の噴火における火山灰の拡散沈着シミュレーション
Author(s)	稲津, 將; INATSU, Masaru; 越石, 健太 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 82, 1-9
Issue Date	2019-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.82.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73386
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_82_p1-9.pdf



新燃岳の噴火における火山灰の拡散沈着シミュレーション

稲津 將

北海道大学大学院理学研究院

越石 健太

北海道旭川西高等学校

梶野 瑞王

気象研究所

(2018 年 11 月 19 日受理)

Diffusion-deposition simulation of volcanic ash emitted by eruption of Mt. Shinmoedake

Masaru INATSU

Faculty of Science, Hokkaido University

Kenta KOSHIISHI

Hokkaido Asahikawa-Nishi High School

Mizuo KAJINO

Meteorological Research Institute

(Received November 19, 2018)

This study performs the diffusion-deposition simulation for volcanic ash following its forecast procedure by the Japanese Meteorological Agency, for the case of the volcanic eruption at Mt. Shinmoedake on 26 January 2011 and 18 February 2011. The volcanic ash with a smaller particle size was transported farther from the crater, so that most of ash fall in the foothill consisted of the smaller particles. In contrast, the large particles were mostly deposited around the crater, but it contributed to the mass amount of ash fall even in the foothill. Compared with ash fall observation, the simulation successfully reproduced the amount of ash fall for these cases.



I. は じ め に

火山の噴火とは、マントル物質の融溶により地下深部で形成されたマグマ溜りが、火口に達し減圧することで発泡し、地表に噴出する現象のことである。世界の火山は、海溝や海嶺沿いのプレート境界、及びプレート内部のホットスポット付近に分布している。日本は、フィリピン海プレート、ユーラシアプレート、太平洋プレート、及び北米プレートの4枚のプレートにまたがって位置する。プレートの収束域では、プレートの沈み込みによって海水がマントルに取り込まれマントルの融溶が生じやすい。日本で火山が非常に多いのはこのためである。

火山の噴火によって、水蒸気、二酸化炭素、二酸化硫黄を主とする火山ガス、火山灰、及び火山弾が放出する。これら噴出物の中でも火山灰は、気象条件や噴火様式次第で極めて広い範囲に影響を及ぼす。たとえば、火山から数 km 離れた地域においても降灰が起こりえる。これにより交通障害や農業への被害、電力や水道等のライフラインの停止などといった被害をもたらす。また、降灰域に雨が降った場合は土砂災害を併発することもある。こうした自然災害に対処するため、火山噴火に伴う降灰域の予測は重要である。

降灰予測とは、火山噴火時に大気中に放出された火砕物（一般にテフラという）のうち火山灰が、そのときの気象場でどのように運動するのかを追跡し、降灰域と降灰量の時間発展を予測することである。現在気象庁で行われている降灰予測の手順を以下の通り。はじめに、追跡する多数の粒子で構成した噴煙柱モデルを仮定して初期の噴煙の形状を決定する。この計算のためには、噴煙の高度と発生時刻・放出時間を噴火に関する火山観測値として与える必要がある。噴煙柱モデルから得られるものは、噴出総質量や火山灰の粒径分布、拡散比率などである。次に、メソ数値予報モデル（MSM）のモデル面予報値（GPV）で駆動された移流拡散モデルによって、噴煙柱から放出させた火山灰の粒子の動きを追跡する。このため火山灰粒子の移流、拡散、降下、及び沈着の各過程を計算する。これらによって求めた粒子の沈着量 [個/m²] を、降灰量 [kg/m²] に換算する。以上によって降灰域や降灰量の予測が実現し、その予測に基づいた防災計画が可能となる。

本研究の目的は、気象庁で現業化されている移流拡散モデルを用いた降灰予測の手法に従い、霧島山新燃岳の噴火を事例とした降灰シミュレーションを行うことである。新燃岳は九州南部の霧島山中央部（北緯 31 度 54 分 34 秒、東経 130 度 53 分 11 秒）に位置している。なだらかな円錐台形の火山であり、山頂には直径およそ 750 m、火口標高 1421 m の円形火口がある。気象庁の記録資料によると、新燃岳は 1716 年に噴火し、その後、1822 年、1959 年、1991 年に噴火するなど、活発な活動がある。直近では、2017 年 10 月 11 日と 2018 年 3 月 1 日に噴火が発生し、2018 年 4 月 5 日の噴火では噴煙が 8000 m に達した。2018 年 10 月 16 日現在も、気象庁は噴火警戒レベル 2 として火口周辺域への入山を規制している。本研究ではデータの都合、連続的噴火が発生した 2011 年 1 月 26 日 15 時、及び爆発的噴火が発生した同年 2 月 18 日 18 時の事例を解析する。1 月 26 日の噴火継続時間は 180 分、2 月 18 日の噴火継続時間は 12 分であった。

本研究は気象庁で現業化されているシステムにならった方法でのシミュレーションを実施する。その内容仔細は新堀（2016）に記載されており，本研究はその再実験と考えることもできる。本稿は，力学的ダウンスケーリングによる火山灰降灰シミュレーションの高解像度化を見据えており，その準備として簡便な噴煙柱・移流拡散モデルでのシミュレーションの確認するものと位置づけている。

Ⅱ. モデル

本研究におけるシミュレーションには，噴煙柱モデルと移流拡散モデルの二つを組み合わせる。ともに相川（2008）にその内容仔細が記載されている。ここでは本稿必要最小限の内容のみをまとめる。

噴煙柱モデル

本研究で用いる噴煙柱モデルは，噴煙柱の形状，噴出物の総質量，火山灰の粒径分布，噴煙柱の形成時間，噴煙柱内部の上昇速度，及び噴煙柱からの拡散比率の推定を含む。まず，本研究では噴煙柱の形状を考慮せず，火口の鉛直上方を放出点とする。火山灰の噴出物総質量は，噴煙柱の火口上からの最高到達高度の4乗と噴火の継続時間に比例すると仮定する（Morton et al. 1956）。火山灰の降下過程において，落下速度は粒径に依存する。噴煙柱を構成する粒径 D の火山灰の個数は，対数正規分布

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-0.5 \log\left(\frac{D}{0.25\text{mm}}\right)^2\right\}, \quad (1)$$

に従うと仮定する（水野 2000）。本研究では噴火の時間発展について考慮しないため，噴煙柱の形成時間については考慮しない。噴煙柱内部の上昇速度は，噴煙柱の高さ H から求めた火山岩塊の放出速度

$$W_0 = \sqrt{H/2.2 \times 10^{-4}}, \quad (2)$$

を初速とし，高度とともに減衰すると仮定する。噴煙柱からの拡散比率は，粒径 D の火山灰が高度 z [km] で噴煙柱から離脱する確率であり，

$$\text{Prob}(D, z) = 0.017 \frac{W(z) - V_i(D, 0)}{V_i(D, 0)} \exp\left\{-0.017 \frac{W(z) - V_i(D, 0)}{V_i(D, 0)}\right\}, \quad (3)$$

の確率分布に従う。ただし， $V_i(D, 0)$ は火口標高における火山灰の落下速度である。

移流拡散モデル

移流拡散モデルには、移流、水平拡散、鉛直拡散、火山灰降下、乾性沈着、及び湿性沈着を含む。そのため、気象庁のメソ数値予報モデルデータ（MSM-GPV）の5 km データを使用する。移流拡散モデルに入力する気象要素は、海面気圧、地上気圧、ジオポテンシャル高度、東西風、南北風、地上気温、相対湿度、及び降水量である。本研究で用いる移流拡散モデルは、ラグランジュ型の移流拡散モデル（Kajino et al. 2016）である。

個々の火山灰粒子の位置ベクトルは、風ベクトルによって時間変化する。水平拡散は乱流成分が 50,000 秒の自己相関を持つマルコフ連鎖によって推定し、鉛直拡散は鉛直シアとフラックスリチャードソン数に比例し、地表近くで大きな値を持つように調整されている（Louis et al. 1982）。火山灰降下過程では、火山灰が大気中に放出されてから終端速度に達するまでの時間が十分に短いと仮定し、放出直後に終端速度に達するとする。終端速度は火山灰の形状に応じた抵抗力（粘性抵抗と慣性抵抗の和）と重力のつり合いによって定まる。終端速度は、1/16 mm の粒径に対し約 0.21 m/s、8 mm の粒子に対し約 8.9 m/s である。湿性沈着過程では、降水によって火山

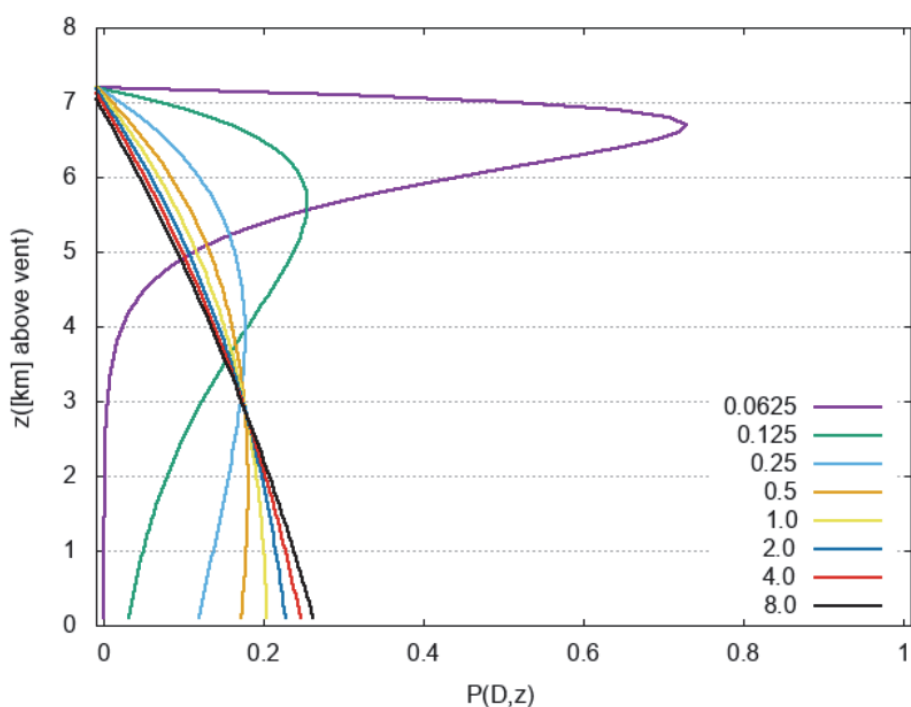


Fig. 1. The diffusion rate of particles with the size of 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, and 8 mm for the eruption case on 26 January 2011, as the colour legend in the bottom right. The vertical axis is height above the crater (m).

灰粒子が地表面へ運ばれる．火山灰粒子の空中濃度 n の時間変化は洗浄係数 Λ を用いて

$$\frac{dn}{dt} = -\Lambda n, \quad (4)$$

と表わされる．洗浄係数は捕捉係数と降水強度の積で表現される．捕捉係数は火山灰粒子と降水粒子の比率で定まり、いまこれを 100% とする．雨滴分布としてマーシャル・パルマー分布を仮定すると、洗浄係数は降水強度の 0.25 乗に比例する．乾性沈着は鉛直方向の乱流拡散と地表付近における落下によって、火山灰が地面に付着する過程である．本研究では、接地境界層の厚さ 50 m の高さに対し、乾性沈着速度 0.3 m/s (Shao 2000) で平均的に落下する過程で、一定割合で地面に付着するとする．

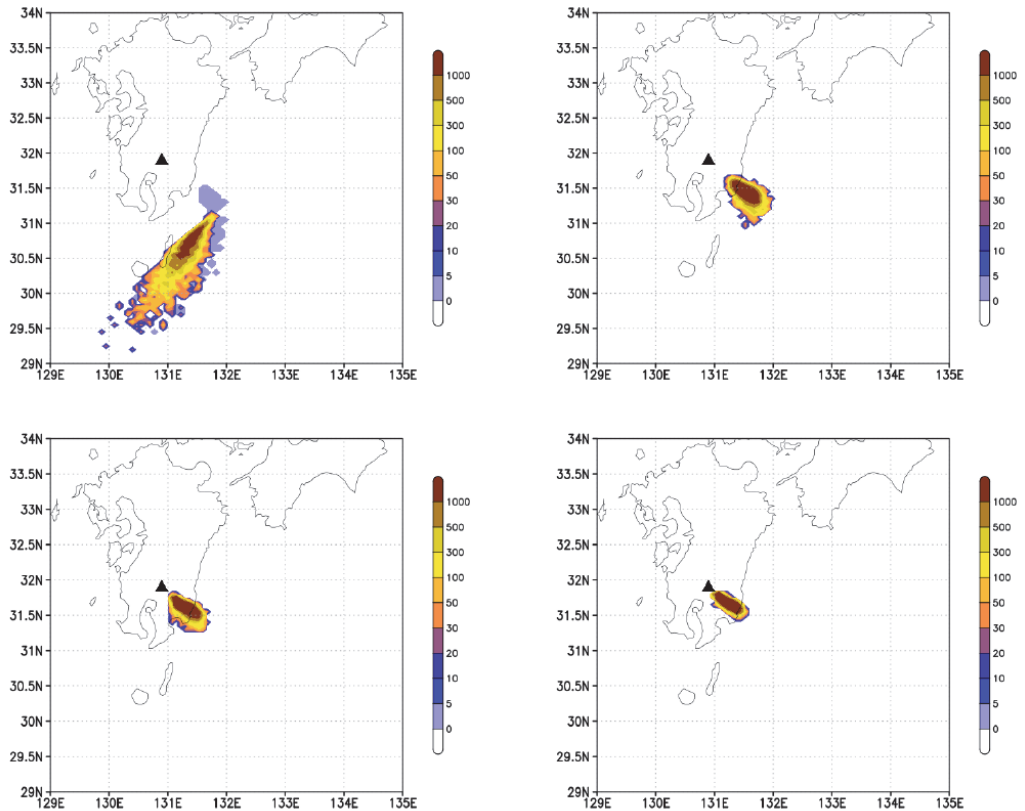


Fig. 2. Total deposition amount (g/m^2) for particles with the size of (upper left) 0.0625, (upper right) 0.125, (bottom left) 0.25, and (bottom right) 0.5 mm for the eruption case on 26 January 2011, as per the colour shading in the right.

Ⅲ. シミュレーション

本研究の移流拡散シミュレーションでは霧島山新燃岳を放出源とした。放出高度は新燃岳の火口標高である 1400 m から 500 m ごとに、それぞれ観測された噴煙の最高到達高度までである。1 月 26 日の噴火事例は 1400 m から 5900 m までの 10 点、2 月 18 日の噴火事例は 1400 m から 8900 m までの 16 点を放出高度とした。また、火山灰粒子は、1/16 mm, 1/8 mm, 1/4 mm, 1/2 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 及び 8 mm の 8 種類である。火山灰粒子の総放出量は 1 時間あたり 1.0×10^{12} 個とし、そのうち代表的に追跡するラグランジュ粒子は 720 個である。降灰量は、上記の粒径に対する火山灰粒子 1 個あたりの密度と質量および高度における拡散比率をもとに計算した。火山灰粒子 1 個あたりの質量は、回転楕円体を仮定して粒径毎の体積を求め、火山灰粒子の密度を乗じて求めた。粒子の存在比率は、本研究における粒径 8 種類に対し、すべて同じとした。1 月 26 日の事例に対しては、放出高度 16 点×粒径 8 種類の合計 128 通りの放出計算を行った。同様に、2 月 18 日の事例に対しては、放出高度 10 点×粒径 8 種類の合計 80 通りの計算を行った。

Ⅳ. 結 果

2011 年 1 月 26 日における噴火事例におけるシミュレーション結果を示す。Fig. 1 は火山灰の粒径ごとの拡散比率である。粒径の小さいものは噴煙柱の上部での拡散量が多く、粒径が大きくなるにつれて噴煙柱下部での放出率が高くなる。同日における地上風は火口付近は弱く、海上では北西風が顕著に見られた（図略）。また、700 hPa での水平風は九州地方全体に様な北西風が卓越していた。いずれも昼夜による風向・風速の変化はほとんどなく、噴火継続時間内では一定の風が吹いていた。火山灰粒子の総沈着量は粒子の大きさに応じて大きく異なる。高度 2900 m（火口上 1500 m）から放出されたそれぞれ異なる粒径の火山灰粒子は、Fig. 2 のように沈着した。粒径にかかわらず移流方向は卓越風向に従い、南東方向であった。最小粒径である 1/16 mm の火山灰粒子は、南東方向に大きく移流されたうえ、火山の南の広範囲に拡散した。粒径が 1/4 mm が超えると、降灰域は火口から数十 km に限られていた。各高度・各粒径のシミュレーションを集約した降灰量を Fig. 3 に示す。降灰量は火山の南東に向かって大きい分布となった。降灰域はおよそ 8 万 km² で、その大部分は粒径の小さい粒子による拡散に由来した。この降灰量は、1 月 26 日の噴火に対する現地調査結果（産業技術総合研究所地質調査総合センター <https://www.gsj.jp/hazards/volcano/kirishima/2011/works-field.html>）と定量的にも整合的である。とくに、降灰域は観測とほぼ同等の分布であり、火口に近づくにつれて増加していく様子は十分に再現できた。

2011 年 2 月 18 日における噴火事例におけるシミュレーション結果を示す。火山灰の粒径ごとの拡散比率は 1 月 26 日の事例と同様に、粒径の小さいものほど、噴煙柱の上部での拡散量が多

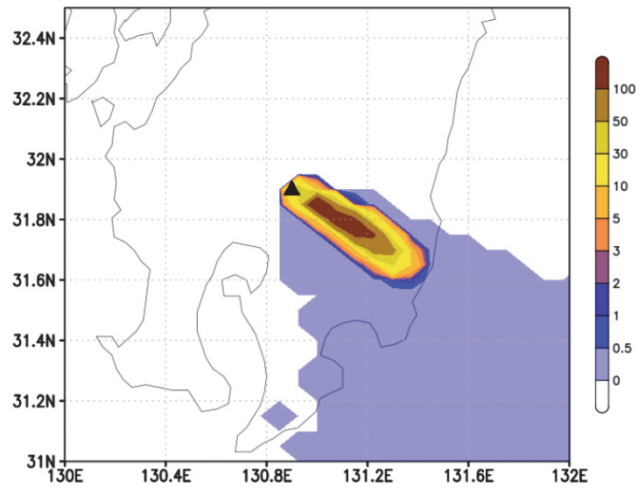


Fig. 3. The mass amount of falling ash (kg/m^2) for the eruption case on 26 January 2011.

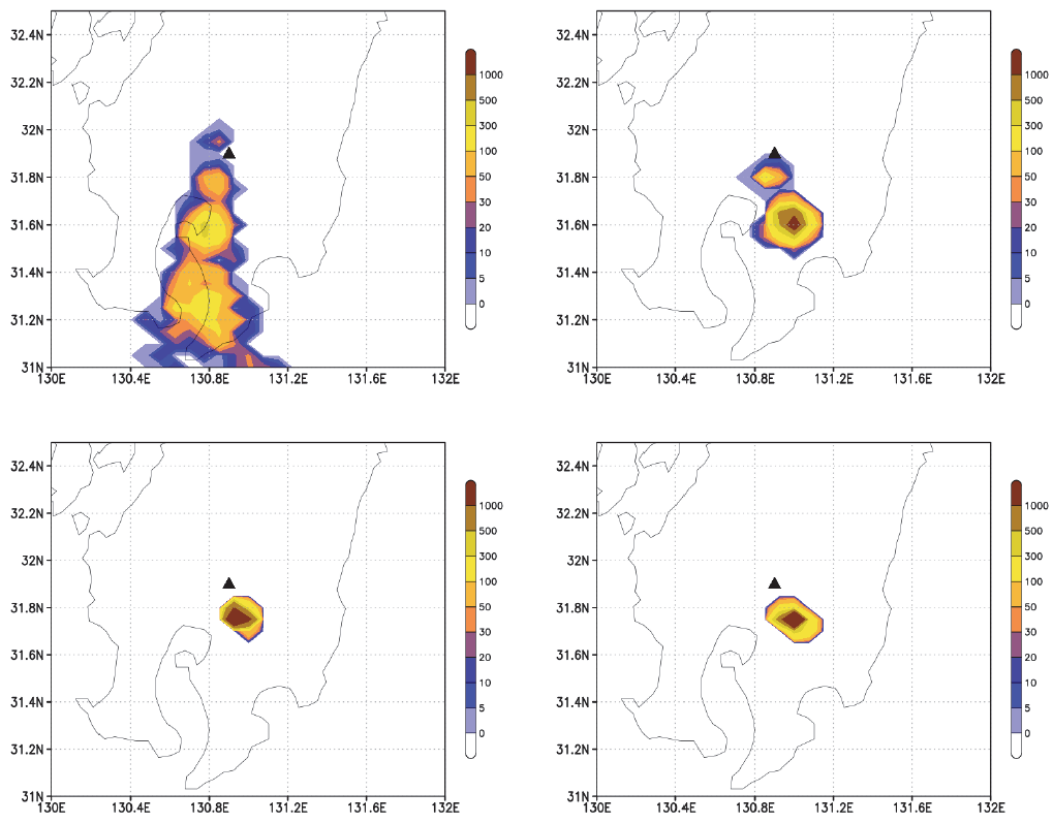


Fig. 4. Same as Fig. 2, but for the eruption case on 18 February 2011.

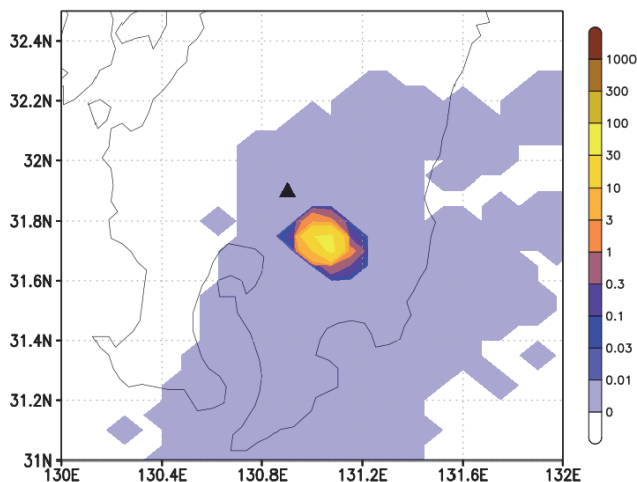


Fig. 5. Same as Fig. 3, but for the eruption case on 18 February 2011.

かった。同日における火口付近の地上風は、弱い南東風だった。九州の東海上では、同日 18 時に見られた北東風が、翌日未明には強い東風が変わった（図略）。また、上空 700 hPa では、同日 18 時から翌日 3 時まで風が弱く、6 時以降、九州南部から迂回してきた西風が火山の上空を通過した。高度 2900 m（火口上 1500 m）から放出されたそれぞれ異なる粒径の火山灰粒子は、Fig. 4 のように沈着した。粒径の小さいものほど降灰域は広く、火山の南側へ大きく流されて沈着した。粒径が大きくなるにつれて、粒子は全体的に火山の南東へわずかに流されたものの、降灰域は火口付近に等方的に小さく広がった。各高度・各粒径の拡散シミュレーションを集計し、粒径ごとの質量を乗じた降灰量を Fig. 5 に示す。降灰域がやや南寄りに分布するものの、火口の近くではおよそ円形状に広がる結果となった。この降灰量の結果は、同日における降灰観測 (<http://www.mlit.go.jp/common/000138336.pdf>) と概ね整合した。ただし、観測では降灰が見られなかった火山の北東部においても、シミュレーションでは降灰があるとされた。これは最小粒径の 1/16 mm の粒子が、風によって大きく移流されることが原因と推測される。

V. ま と め

本研究では、2011 年 1 月 26 日及び 2011 年 2 月 18 日の霧島山新燃岳の火山噴火に伴う噴出物の移流拡散シミュレーションを行った。高度 2900 m において異なる粒径の火山灰粒子を放出させた結果、沈着量は粒形によって大きな違いがあることがわかった。どちらの事例でも粒径の小さい粒子ほど広範囲に拡散し、粒径の大きい粒子ほど比較的火口付近に堆積した。ただし、粒径が大きいくほど粒子 1 つあたりの質量も大きくなるため、火口に近づけば近づくほど降灰量は著しく大きくなった。また、火山灰粒子の挙動は、拡散が起こる高度での風によって拡散の方向が第

一義的に定まり、降下の際、地上風で流されることがわかった。拡散比率と粒子ごとの密度の情報から降灰量を算出した結果は、噴火事例における調査・観測と概ね整合した。

本研究では降灰時刻は考慮しなかった。降灰時間を再現するためには、噴煙柱モデルにおいて初期形状とその時間発展を計算する必要がある。さらに、降灰の正確な予測には、噴煙柱の高さ、噴火の継続時間、火山灰の粒径分布などを、観測から適時に与える必要がある。本研究では過去の噴火について扱ったため、これらの条件は正確であった。しかし、予測においては条件を観測に基づいて与えるシステムを構築する難しさがある。現在、噴煙エコーを検知した気象レーダーのデータを取り込んだ予測研究もされている。また、本研究は5 km メッシュの気象データに基づいて行い、降灰は広域スケールで概ね再現した。しかし、火口に近づくにつれて火山灰の堆積量は著しく増加するため、火口に近い地域の降灰量は定量的に計算が難しい。火口付近については力学的ダウンスケーリングによって高解像度化した気象データに基づいた降灰シミュレーションを行うと精度が増すことが期待される。

謝辞 本研究を進めるにあたりさまざまな助言をくださいました地震火山研究観測センターの橋本武志教授に心より感謝申し上げます。

文 献

- Louis, J. F., M. Tiedtke, and J. F. Geleyn, 1982. A short history of the PBL parameterization at ECMWF. Workshop on planetary boundary layer parameterization. ECMWF, 59-80.
- Morton, B. R., G. Taylor, and J. S. Turner, 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proc. Roy. Soc. (London), A234, 1-23.
- Shao, Y., 2000. Physics and modelling of wind erosion. Kluwer Academic Pub., 393pp.
- 相川 百合, 2008. メソ版移流拡散モデルの概要. 数値予報課報告・別冊, **54**, 気象庁予報部, 223-240.
- 新堀 敏基, 2016. 火山灰輸送: モデルと予測, 火山, **61**, 399-427.
- 水野 量, 2000. 雲と雨の気象学. 朝倉書店, pp.196.