

# 数値シミュレーションによる降灰予測

新堀 敏基<sup>1\*</sup>

## Tephra Fall Prediction by Numerical Simulation

Toshiki SHIMBORI<sup>1\*</sup>

Received 30 March 2015

Accepted 30 July 2015

**Abstract** In various hazards caused by volcanic eruptions, tephra particles (including volcanic ash and lapilli) transported by atmosphere affect widespread areas distant from the volcano. To provide information about predicted ash fall quantity and lapilli fall area for residents, the Japan Meteorological Agency (JMA) renewed the Volcanic Ash Fall Forecast (VAFF) in March 2015. Focusing on relatively large ash and lapilli particles, the VAFFs have operationally used short-term falling simulations based on the JMA Regional Atmospheric Transport Model (JMA-RATM). In this article, grain-size distribution and settling velocity of tephra which have an especially large impact on the accuracy of the fall simulations are described. We show an example of the RATM simulation for the 2011 eruption of Shinmoe-dake volcano and discuss the future work on the modeling and predicting of tephra transport.

**Keywords** : Volcanic Ash, Tephra, Tephra Fall, Volcanic Ash Fall Forecast, Japan Meteorological Agency, Atmospheric Transport Model.

### 1. はじめに

火山灰や火山ガスなど、火山噴火に伴って大気中に放出される物質は、起源であるマグマの物性やおもに熱エネルギーが大気へ解放される量の違いによって、その到達高度や噴出の継続時間、そして噴出物量すなわち噴火の規模が大きく変化する。噴出物量は、爆発的な噴火では到達高度や継続時間と関係しており現在、桜島昭和火口で日常的に発生しているような1回あたり  $10^6 \sim 10^8$  kg の小規模噴火から、数万年に1回の確率で一度に  $10^{14} \sim 10^{15}$  kg を噴出するような巨大噴火（たとえば、Takahashi, 2012）まで多岐に渡る。噴煙が圏界面を越えて成層圏に入るような大規模以上の噴火では、特にその中に含まれる  $\text{SO}_2$  などの硫黄酸化物から二次

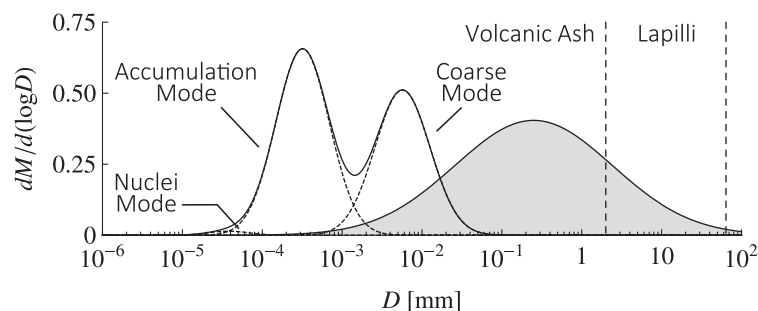
生成した硫酸系エアロゾル粒子が気候へも影響を及ぼし（たとえば、Iwasaka, 2013）、中～小規模噴火であっても上部対流圏へ輸送されたものは冷たい雨の形成に関わる氷晶核として働くこと（たとえば、Araki, 2014）が知られている。火山噴出物のうち、おおよそ  $1000^\circ\text{C}$  の高温状態で破碎された後、大気中で冷やされて固体になったマグマの破片は火砕物（テフラ）と呼ばれ、サブミクロンから数メートルオーダーまで数桁に渡る幅広い粒径分布をもつ（Koyaguchi, 2008）。このため、どのくらいの規模の噴火に伴う火山現象を対象とするかによって、現象の物理過程を支配する火砕物の粒径も異なってくる。特に火山学の分野では、粒径 64 mm 以上を火山岩塊、2～64 mm を火山礫、2 mm 以下を火山灰と分類する。これらは篩の目に対応して2の冪で分類されている。本誌で対象とされる火山性エアロゾル粒子の代表的な粒径がミクロンオーダーであることを考えると、本稿で対象とする火山灰や火山礫は“超”粗大な一次粒子である（Fig. 1 は違いのイメージ）。これらの“超”粗大粒子は、爆発的な噴火の発生後短時間で降ってきて、噴火の規模が大きくなるほど影響範囲も広がるため、気象庁では防災情報の一つとして、予

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所火山研究部  
(〒305-0052 つくば市長峰 1-1)

<sup>1</sup> Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
1-1 Nagamine, Tsukuba 305-0052, Japan

\* Corresponding Author.

E-mail: shimbori@mri-jma.go.jp (T. Shimbori)



**Fig. 1** Grain-size distributions of atmospheric aerosol and tephra particles. The horizontal axis is grain size  $D$ , and the vertical axis refers to normalized distribution of mass  $M$  of aerosol or tephra particles. Bimodal distribution of aerosol particles is an example of urban average displayed by Hinds (1999). Log-normal distribution of volcanic ash and lapilli particles (gray hatched) is the tephra fall prediction by Shimbori *et al.* (2014b). (Note that the latter log-normal distribution is a model assumption, and not observation in the atmosphere.)

想される影響範囲を示した降灰予報<sup>こうはいよほう</sup>を公表している。

以下では、大気中に噴出した火山灰や火山礫が地表面に落下するまでの予測方法について、対流圏内での短期的な運動に焦点を置き、降灰予報の技術的観点から解説する。次節で降灰予報の概要を述べた後、3節で降灰の数値モデルについて、降灰予報に用いている移流拡散モデルを中心に述べる。4節では同モデルを用いた降灰シミュレーションとして、2011年新燃岳噴火の事例を紹介する。最後に数値シミュレーションによる降灰予測の今後の展望を述べる。なお、本稿では文献は比較的新しい邦文を中心に引用した。個々の数式などの出典は、それぞれの引用文献にあたられたい。

## 2. 降灰予報の概要

落下速度が速く、噴火してから比較的短時間で地表まで降ってくる火山礫や粒径の大きい火山灰は、多様な火山災害のうち広域に影響する。火山礫（小さな噴石）は、風の影響を受けて火口から10数km離れたところまで落下して、自動車のガラスを破損するなどの物的被害を及ぼすことがあり、場合によっては怪我などの人的被害を引き起こす可能性も否定できない。また、降下する火山灰（降灰<sup>こうはい</sup>）は、厚さ数mm（軽石1000 kg/m<sup>3</sup>換算で、1 mmは1 kg/m<sup>2</sup>に相当）未満でも、より離れた地域まで健康被害や農業・漁業被害、ライフライン、通信ネットワーク、建物、交通機関などへ影響を及ぼすことがある（Sekiya and Hiroi, 2003; Suto, 2004; Wilson *et al.*, 2014）。近年では2010年にアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山噴火に伴う航空への影響（たとえば、Yasuda *et al.*, 2011; Langmann *et al.*, 2012およびこの特集号; UNISDR, 2015）や、2011年に霧島山（新燃岳）噴火に伴う農業への被害（たとえば、Nakada *et al.*, 2013; Fukuoka DMO and Kagoshima LMO, 2013およびこれらの特集号）などが発生している。

気象庁では、2007年11月の気象業務法の改正を受け、それまで行っていなかった降下火砕物の予報を、降灰予報として2008年3月から開始した。降灰予報は、国

内の広範囲に降灰の影響があると予想される噴火が発生した場合に発表される。当初は噴火発生後、約6時間先までの降灰域のみを府県単位で示した予報であったが、2012年度に開催された有識者と関係機関から構成される「降灰予報の高度化に向けた検討会」からの提言を受けて、2015年3月から噴火前の定時の情報（3時間ごと18時間先まで）、噴火直後の速報（噴火発生から1時間先まで）および噴火後の詳細な予報（1時間ごと6時間先まで）の3種類の新しい降灰予報に高度化された（Hasegawa *et al.*, 2015）。降灰予報（速報）の一例をFig. 2に示す。予想降灰量は市町村単位で、多量（厚さ1 mm以上）、やや多量（1~0.1 mm）、少量（0.1 mm未満）の3階級になり、定時と速報では小さな噴石の予想落下範囲も合わせて発表される。桜島で「ドカ灰<sup>ばい</sup>」と呼ばれる、1時間あたり厚さ1 mmを超えるような多量の降灰では、路面は完全に覆われ、視界不良となるため、外出や運転は控えた方がよい。なお海外では、2010年エイヤフィヤトラヨークトル火山噴火に対してアイスランド気象局から発表された以外に、降灰予報を運用している国は少ない。

## 3. 降灰の数値モデル

地表への降灰を対象とする数値モデルには、大気中の浮遊火山灰に焦点を置く数値モデル（たとえば、Tanaka *et al.*, 2015）と同様に、過去の地質研究を目的とするモデル（たとえば、Mannen, 2013）から未来の予報発表を目的とするものまで、国内外にいろいろなモデル（Suto and Hattori, 2011; Folch, 2012にレビュー）がある。

降灰予報は、気象庁領域移流拡散モデル（JMA-RATM, Shimbori *et al.*, 2014b）による即時的な降灰シミュレーションに基づいて作成される。計算の流れ図をFig. 3に示す。RATMは、発生した噴火の規模に応じて作成した噴煙柱モデルを初期値とし、あらかじめ気象庁数値予報ルーチンで作成されたGPVを入力して、予想される降灰の影響範囲をすみやかに計算する受動的なラ

# 火山名 桜島 降灰予報（速報）

平成27年05月21日10時34分  
気象庁地震火山部発表

21日10時20分に桜島（昭和火口）で噴火が発生し、噴煙は火口縁上4300mまで上がりました。火口から南東方向（垂水・鹿屋方向）に火山灰が流され、1時間以内に鹿児島市（桜島）では多量の降灰があり、降灰は鹿児島県肝付町まで予想されます。また、火口から南東方向およそ11kmまでの範囲では、小さな噴石が風に流されて降るおそれがあります。

1時間以内に予想される降灰量は各市町村の多いところ次のとおりです。

多量 鹿児島県：鹿児島市  
やや多量 鹿児島県：垂水市  
少量 鹿児島県：鹿屋市、大崎町、東串良町、肝付町

多量の降灰が予想される範囲内では、不要な外出を控えてください。  
やや多量の降灰が予想される範囲内では、傘やマスク等で防灰対策をして、徐行運転を心掛けてください。  
小さな噴石の落下が予想される範囲内では、屋内や頑丈な屋根の下などに移動してください。

※（参考：降灰量階級 名称・厚さ・キーワードなど）※  
【多量】 1mm以上 火山灰がまきあげられ視界不良となり地面は完全に覆われる【外出を控える】  
【やや多量】 0.1 - 1mm 火山灰が降っているのが明らかにわかり路面表示は見えにくくなる【注意】  
【少量】 0.1mm未満 火山灰が降っているのがようやくわかり地面にうっすら積もる

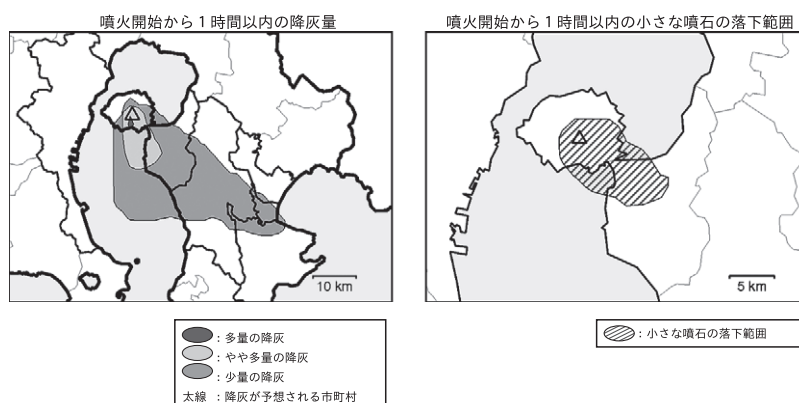


Fig. 2 Sample of the preliminary forecast of VAFF (graphical format).

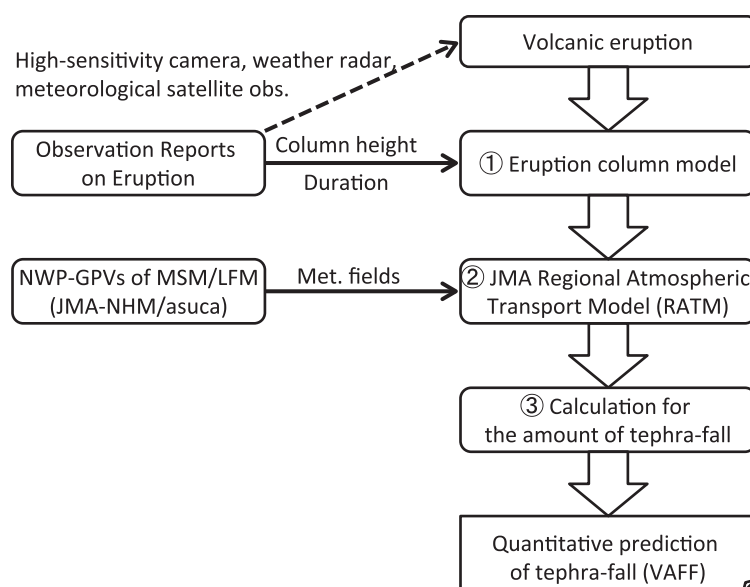


Fig. 3 Flowchart of the VAFF with the JMA-RATM. After Hasegawa *et al.* (2015).

グランジュモデルである。噴煙柱モデルは現在、Suzuki (1983) をベースとするモデルであり、降灰ハザードマップの作成にも使われている。現業で観測できる噴煙の高さや継続時間から初期値を作成できることが運用上の利点であるが、本来、強い噴煙に適用されるこの噴煙柱モデルを、風の影響を受ける弱い噴煙やサーマルにも適用していることに注意が必要であり、噴煙柱にならない火砕流などは扱えない課題がある。RATM 本体は1980年代に始まる気象庁移流拡散モデルの開発で、

2000年三宅島噴火時のSO<sub>2</sub>シミュレーション (Kawai, 2002; Seino *et al.*, 2004) や富士山ハザードマップ作成時の降灰シミュレーション (Yamamoto *et al.*, 2003) など得られた知見を活かしつつ、即時に降灰予報を発表する目的のために、噴煙柱から大気中を経て地表面へ至る火山灰の輸送過程をシンプルにモデリングしている。ここでは降灰予測する上で特に重要なポイントである、火山灰の粒径分布と落下速度を取り上げる。噴煙柱モデルの上記注意点や課題に関わる噴火・噴煙の

ダイナミクスについては Koyaguchi (2008), Koyaguchi *et al.* (2011), 噴出源パラメータ設定については Mastin *et al.* (2009), また火山ガスの輸送については Fujita *et al.* (2014), 火山現象全般の数値シミュレーションについては Ishimine (2007), Ida (2014) などを参照されたい。

### 3.1 火山灰の粒径分布

噴煙柱から大気中に放出された火山灰および火山礫の時間発展を, RATM で計算するための粒子 (トレーサー) は, 粒径と仮想的な質量をもつ。トレーサーの粒径は, 幾何学的な 3 軸平均径  $D \equiv (a_1 + a_2 + a_3)/3$ , ( $a_1$ : 長軸,  $a_2$ : 中軸,  $a_3$ : 短軸) を用いる。粒径分布は対数正規分布, すなわちトレーサーが  $\log_a D \sim \log_a D + d(\log_a D)$  にある確率が,

$$f(D)d(\log_a D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_D^2}} \exp\left[-\frac{\log_a^2(D/D_m)}{2\sigma_D^2}\right] \frac{dD}{D \ln a} \quad (D > 0) \quad (1)$$

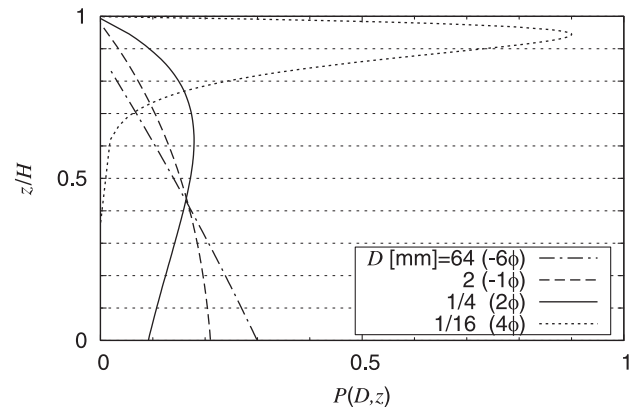
で与えられることを基本とする。ここで底  $a$  は, はじめに述べたように火山学では 2 や気象学ではネイピア数  $e$  を取ることがあるが, ここでは常用対数 ( $a=10$ ) を用い, 以下では単に  $\log$  と表記する。降灰予測を目的とする RATM では, 中央粒径  $D_m$  は 0.25 mm, ばらつき  $\sigma_D$  は 1.0 に取り, 上限  $\max\{D\} = 96$  mm と下限  $\min\{D\} = D_m^2/\max\{D\} = 0.65$   $\mu\text{m}$  にカットオフを入れている。

しかしながら, 火口上に形成される噴煙柱においては, 粒径ごとに到達できる高度が異なるため, 噴火直後は鉛直方向により強い拘束条件がある。Suzuki (1983) ではこの拘束条件を, 火口上の高さ  $z \sim z + dz$  におけるトレーサー供給率として鈴木関数:

$$P(D, z) dz = AY(D, z) e^{-Y(D, z)} dz \quad (2)$$

で表現している。ただし  $A$  は規格化定数,  $Y$  は噴煙の上昇速度  $W(z)$  と次節で述べる火山灰の火口標高での落下速度  $V_0(D)$  との差を無次元化した値  $Y(D, z) = \beta[W(z) - V_0(D)]/V_0(D)$ ,  $\beta$  は Eq. (2) の指数分布を特徴づける離脱定数であり, RATM では  $\beta = 0.017$  に取っている。この噴煙柱モデルにおける鉛直方向のトレーサー供給率の一例を Fig. 4 に示す。一般に, 粒径が大きいほど落下速度も速いので, 上昇する噴煙では高いところほど細かい火山灰が相対的に多く占めている。

最終的に, 降灰量を予測するためには, 個々のトレーサーに質量を与える必要がある。数値シミュレーションで用いるトレーサーの総数は, 現実には噴煙柱を構成している火山灰の粒子数より少ないので, もし火山灰の密度から個々の粒径に応じて質量を与えると, 総噴出量が過小になる。そこでまず爆発的噴火における総噴出量  $M$  を, 噴煙の高さ  $H$  と噴火の継続時間  $T$  の観測値を用いて, 噴煙の浮力と大気密度成層のバランスから次元解析 (Koyaguchi, 2008) によって定まる



**Fig. 4** Release probability in eruption column model.  $z$  and  $H$  are the heights of tracer particle and eruption column, respectively. ( $H = 7379$  m in this example). After Shimbori *et al.* (2014b).

関係式  $M = KH^2T$  ( $K$  は定数) により推定する。単位時間あたりの噴出量, すなわち噴火の強度を表す噴出率が, 噴煙の高さの 4 乗則によく従うことは, 噴煙をプリュームと見なせる過去の大規模噴火で確認されている (Mastin *et al.*, 2009)。そして, 高さ  $z \sim z + dz$  のところから大気中へ放出される粒径  $D$  の火山灰全体が担う質量を,

$$dM(D, z) = Mf(D)P(D, z)d(\log D)dz \quad (3)$$

で与える (Suzuki, 1983)。上式を火口から高さ  $H$  まで  $z$  で積分して, 相対的な質量の粒径分布を図示したのが, Fig. 1 の火山灰の分布である。RATM では,  $\log D \sim \log D + d(\log D)$  にあるトレーサーの個数が  $dn(D)$  のとき, この  $z$  積分した結果:

$$\tilde{m}(D) dn(D) = Mf(D) d(\log D) \quad (4)$$

でもって, 個々のトレーサーに仮想質量  $\tilde{m}(D)$  を与えている。数値シミュレーションでは, トレーサー総数の不足を, 実際の火山灰の質量より大きい仮想質量として与えることにより, 降灰量の予測を実現している。

### 3.2 火山灰の落下速度

噴煙柱から大気中に放出された火山灰のうち, 比較的粗い粒径の火山灰は, 輸送・拡散・降下過程を経て地表面へ沈着する。RATM ではこれらの過程を, 気象庁数値予報モデルで非静力学モデル (JMA-NHM, Saito, 2012) であるメソモデル (MSM) や 2015 年 1 月に次世代非静力学モデル (asuca) が導入された局地モデル (LFM) の GPV を入力して, トレーサーの時間発展を計算する。トレーサーの位置は, RATM の計算タイムステップを  $\Delta t$  とすると,

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + \bar{\mathbf{v}}(t)\Delta t + \mathbf{v}'(t)\Delta t - V_1 \hat{\mathbf{z}}\Delta t \quad (5)$$

で求める。右辺第 2 項は移流 (輸送) 項, 第 3 項は拡散項, 第 4 項は降下項 ( $\hat{\mathbf{z}}$  は鉛直方向の単位ベクトル) であり, 大気輸送の平均風速  $\bar{\mathbf{v}}$  や乱流拡散のゆらぎ  $\mathbf{v}'$  は GPV を元に計算する。乱流拡散は, 風のゆらぎに伴う水平拡散とおもに大気境界層での対流不安定に伴う



鉛直拡散を考慮している。ただし水平拡散に関しては、水平風に鉛直シアがない場合は、火山灰が遠くまであまり広がらず線状や帯状に流れていくことが日々の噴火で地上や衛星画像から観測されており (Kinoshita, 1996), 大規模噴火で扇形の降灰分布が形成されることがあるのは、むしろ噴火が長時間継続し、その間の風向の変化によるところが大きい。また鉛直拡散についても、大規模降灰になるような噴煙の高度は大気境界層より高く、自由大気中では火山灰の鉛直拡散は抑えられるため、予報上、拡散係数は安全係数の意味合いが強い。

降灰予測では特に第4項の火山灰の落下速度  $V_l$  が重要である。噴煙柱から離脱直後に大小混在していた火山灰は、大気中を輸送される過程で、雨や雪による沈着がなければ、凝集も含め粗粒で密度の大きい火山灰から順次落下して、下流になるほど篩分け (分級) が進み細かい粒径に揃ってくる。大気中 (密度:  $\rho_a(z)$ ) の火山灰 (みかけ密度:  $\rho_p(D)$ ) の落下速度は、重力と浮力、空気抵抗がつり合う終端速度に達すると、

$$V_l(D, z) = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_a)gD}{3C_a\rho_a}} \approx \sqrt{\frac{4\rho_pgD}{3C_a\rho_a}} \quad (\rho_p \gg \rho_a) \quad (6)$$

である。分母の  $C_a$  は空氣の抵抗係数であり、RATM では Suzuki (1983) の粘性項にカニングガムのスリップ補正を入れて拡張した

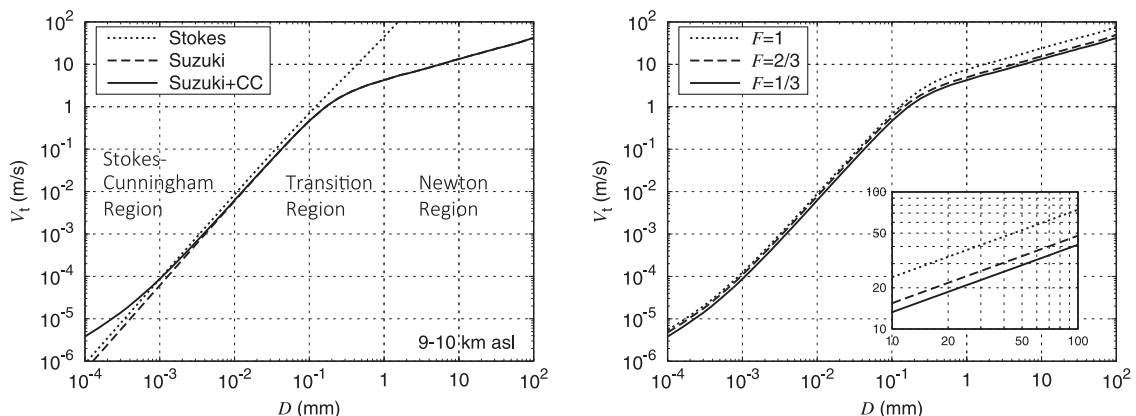
$$C_a = \frac{24 F^{-0.32}}{Re} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (7)$$

を用いている (Shimbori *et al.*, 2014b)。ただし、 $Re$  はレイノルズ数、 $C_c$  はクヌーセン数 (空気分子の平均自由行程と火山灰の大きさの比) の関数であるカニングガム補正係数であり、火山灰の形状を  $F \equiv (a_2 + a_3)/2a_1$  で考慮している。Eq. (7) の特徴は、粘性抵抗を表す第1項と慣性抵抗を表す第2項の和でもって、幅広い粒径

に応じたレイノルズ数の変化に対応していること、粒子形状をあらかじめ考慮していること、その上でカニングガム補正をそれが効いてくる粘性項のみに適用していることである。カニングガム補正は、空氣が希薄になり平均自由行程が長い環境で、火山灰にとって空氣を流体と見なせなくなる状態を空氣抵抗の減少として表現するものであり、特に成層圏での細粒火山灰の落下運動を考える上で必要とされている (Shimozuru, 1989)。Eq. (7) は、球形粒子 ( $F=1$ ) に対する低レイノルズ数の極限では、ストークスの抵抗係数に帰着する。

RATM では、Eq. (7) の値を求めるのに必要な空氣の  $\rho_a$ 、粘性率、平均自由行程は、GPV の密度、気温および気圧から算出している。また  $F$  は観測された火山礫の形状の最小値に基づき  $1/3$ 、 $\rho_p$  は火山礫のみかけ密度  $\rho_{pm}$  をパラメータとして輕石を想定した  $1000 \text{ kg/m}^3$  に固定し、火山灰の粒径が小さくなるほど密度が大きくなるように安山岩の岩石換算密度 (DRE) 相当の  $2400 \text{ kg/m}^3$  まで変化させている。

Eq. (7) を Eq. (6) に代入した火山灰の落下速度の粒径依存性を Fig. 5 に示す。左図は海拔 9~10 km 付近の一例であり、ストークスとカニングガム補正しない鈴木抵抗係数を用いた場合の比較を示した。0.2~0.3 mm 付近の遷移領域を境に、Eq. (7) の慣性項が卓越する粒径の大きい乱流領域 ( $Re \gg 1$ ) と粘性項が卓越する粒径の小さい層流領域 ( $Re \ll 1$ ) に分けられ、対流圏上層では  $1 \mu\text{m}$  より細かくなるとカニングガム補正が効いてくる。大規模噴火で噴煙がより高層に達する場合は、空氣の密度が小さくなるため、同じ粒径であっても落下速度はより速くなる。また Eq. (7) を用いた場合、遷移領域からカニングガム補正が効き始めるまでの層流領域でストークスの落下速度より遅くなるのは、形状因子  $F$  の効果が働くためである。この形状効果の違いを Fig. 5 の右図に示す。Eq. (7) の粘性項と慣性項の  $F$  依存性の違いに対応して、乱流領域では  $F$  が 1 に近づく



**Fig. 5** Settling velocities of tephra particles distributed from 9 km to 10 km a.s.l. (left) Comparison of Stokes' law (dotted line), Suzuki's law (dashed line) and Suzuki's law with Cunningham slip correction (solid line) with density  $\rho_{pm} = 1000 \text{ kg/m}^3$  for lapilli and form factor  $F = 1/3$  for Suzuki's law. (right) Comparison of the extended Suzuki's law with  $\rho_{pm} = 1000 \text{ kg/m}^3$  and  $F = 1$  (dotted line),  $F = 2/3$  (dashed line) or  $F = 1/3$  (solid line, same as left figure). After Shimbori *et al.* (2014b).

ほど落下速度の増加率が大きくなるが (Fig. 5 右の拡大図), 層流領域ではこの傾向が逆転し変化率も小さい。もう一つの重要な因子である, 火山礫の密度パラメータ  $\rho_{pm}$  に対する落下速度の変化は図示していないが, 軽石より重い岩石を想定すると, Eq. (6) より  $V_t \propto \sqrt{\rho_{pm}}$  で増加する。

噴煙柱から離脱後, 大気中を輸送・拡散され, 降下してきた火山灰のうち, 地表面に沈着したものが降灰である。RATM では, 本節で述べた重力落下による降灰は, トレーサーの高度が GPV のモデル地表面より低くなった時点で判断している。このほか, 乾性および湿性沈着による降灰も考慮している。乾性沈着は接地層内にあるトレーサーに適用しているが, 重力落下に比べて降灰への寄与は小さい。また湿性沈着は, GPV の積算降水量の 2 次元分布を考慮したウォッシュアウト (雲底下洗浄) および雲水量の 3 次元分布を考慮したレインアウト (雲内洗浄) を扱えるが, 後者は検証不十分のため, 降灰予報の運用では前者のみを 700 hPa 面以下の大気下層にあるトレーサーに対して適用している。

#### 4. 降灰シミュレーションの事例

前節で述べた RATM による降灰の数値シミュレーションの一例として, ここでは 2011 年新燃岳の噴火活動で規模がやや大きかった 1 月 26~27 日の事例を示す。鹿児島・宮崎県境に位置する標高 1421 m の新燃岳では, 2011 年 1 月 26 日, 1716~17 年享保噴火以来約 300 年ぶりの本格的マグマ噴火が始まった。翌 27 日にかけての噴出物はおもに安山岩質の軽石で, 海拔 4~5 km 付近より上層では偏西風, 下層では北西の季節風の鉛直シアがある風の場で, 宮崎県南部山沿いを始めとして, 火口の南東象限の広い地域に多量の火山灰が降った。大きさ (長軸の径) が 70~80 mm の火山岩塊は新燃岳の南東約 3 km 地点に, 40~60 mm の火山礫は同じく約

7 km 地点まで落下した (Fukuoka DMO and Kagoshima LMO, 2013)。この期間の噴煙は, 非降水時であったため, 気象庁の遠望カメラのほか, C バンドレーダー観測網や運輸多目的衛星ひまわり 7 号 (MTSAT-2) で観測された (たとえば, Shimbori *et al.*, 2013)。全国合成レーダーのエコー頂から解析された噴煙の最高高度は海拔 8.3~8.5 km であり, 対流圏中~上層までの噴火であった。

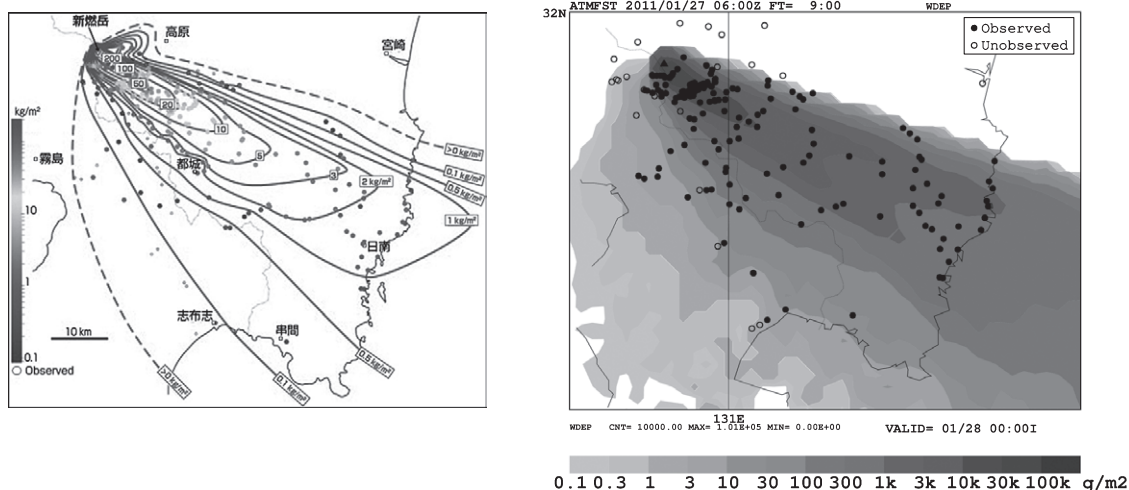
噴煙の高さとその継続時間は, 降灰予測において噴出量の推定と火山灰の流向の双方に影響する, とても重要な観測値である。そこで RATM の初期値は Hashimoto *et al.* (2012) や Suzuki and Koyaguchi (2013) を参考に, 気象レーダーによる噴煙高度の時間変化を, 入力値は LFM のモデル面予報値を使用して (Table 1), 降灰シミュレーションを実行した。26~27 日の積算降灰量の分布について, Furukawa (2011) による観測と RATM による予測の比較を Fig. 6 に示す。新燃岳の南東方向に降灰の分布主軸があり南側に膨らみをもつ降灰域の特徴はほぼ再現できている。また予想降灰量は, 火口に接近するほど予測の対象にしている粒径より大きな火山岩塊も落下し降灰量の勾配がきつくなるため過少になるが, 観測値に対する誤差はおおよそ 1 桁の範囲で予測できる結果が得られている。

#### 5. まとめと展望

本特集記事では, 火山噴火に伴い, 対流圏を比較的短時間で落下してくる火山灰や火山礫を予測するためのキープポイントである粒径分布と落下速度を, 数値モデルの一つである RATM を例に取り解説した。このモデルは, 2015 年 3 月に新しくなった気象庁の降灰予報で運用されている。火山灰や火山礫は, 噴火してから数分のうちに居住地域まで落下してくることがあるので, すみやかに高精度な予測をすることが目標である。今後の展望として, 目標を達成するために必要な研究

**Table 1** Input and output values of a numerical experiment by the JMA-RATM (for the case study of Shinmoe-dake eruptions during 26–27 January 2011)

Model type	Lagrangian description
Number of particles	250,000 × 6
Time step	1 min. (for lapilli)
Initial condition	Eruption column model (Suzuki, 1983)
Input parameter	Eruption cloud height by JMA weather radars and camera from 06 UTC 26 Jan. to 15 UTC 27 Jan. 2011 (10 min. intervals)
Input meteorological field	The GPVs of LFM based on the JMA-NHM (Saito, 2012)
Initial time	00, 06, 12, 18 UTC 26 Jan. and 00, 06 UTC 27 Jan. 2011 (9 hr forecast from each initial time)
Input interval	Hourly
Forecast domain	Western Japan (about 1600 km × 1100 km × 20.2 km, as of Jan. 2011)
Grid size	2 km at 60°N and 30°N (Lambert conformal projection)
Vertical levels	60 (terrain-following coordinate)
Model topography	GTPO30 data (smoothed up to about 3 km resolution)
Input data	Momentum, potential temperature, pressure, density, mixing ratio and accumulated precipitation
Output	Accumulated ash-fall quantity and max. grain-size area
Forecast time	33 hr (valid time: 15 UTC 27 Jan. 2011)



**Fig. 6** Comparison of tephra fall quantity for the eruption at Shinmoe-dake volcano. (left) Observation of tephra fall deposits ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) during 26–27 January 2011 (from Furukawa, 2011). (right) Prediction of accumulated tephra fall ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) from initial time 15 JST 26 until 00 JST 28 January 2011 by the JMA-RATM (from Shimbori *et al.*, 2014b). Filled circles denote the tephra fall observation points. Open circles denote the points at which tephra falls were not observed.

をいくつか挙げておく。

まず速やかな予測のためには、初期値となる噴煙状態の即時把握が必要である。地上からの観測では、従来の遠望カメラによる観測に加え、4節で示した気象レーダーを活用した噴煙高度の観測が有効であり、フェーズドアレイに代表される高速スキャンレーダーによる噴煙観測が期待される。また上空からの観測では、2014年10月に打ち上げられた次期気象衛星(Himawari-8)は静止衛星ではあるが、火山灰の検出に有効な観測バンドが追加され、空間分解能がMTSAT-2の約2倍(可視:  $0.5\sim 1\text{ km}$ , 近赤外・赤外:  $1\sim 2\text{ km}$ )に上がるとともに2.5分ごとの高頻度観測も実施されることから今後、火山監視へも利活用されるであろう。これら噴火後の観測に対して、さらに迅速化するには、桜島火山で研究されているような噴火時の地下の震動データなどを用いて噴出率を推定するというアプローチがあり(Iguchi, 2013)、降灰予報の初期値に利用するためには全国の活火山へ適用できるか考える必要がある。

また予測精度を上げるためには、入力値であるGPVの精度向上が不可欠であるとともに、初期値においては、火山灰の性質を考慮した気象レーダー・衛星などリモートセンシングの技術開発も必要である。たとえば、2014年9月27日に発生した御嶽山噴火では、全国合成レーダーで推定した噴煙エコー頂高度は過大評価となっている可能性を指摘した(Sato *et al.*, 2015c)。気象レーダーは従来、水物質が解析対象であり、この水蒸気噴火に由来する水物質の噴煙エコーへの影響が、原因の一つとして考えられる。現在、MPレーダーを用いた雨灰判別などの研究が進められており(Sato *et al.*, 2015a)、これは降水時に気象エコーと噴煙エコーを分離して観測するためにも必要な技術である。

さらに浮遊火山灰(火山灰雲)の観測には、ライ

ダーも有効である。火山灰雲は雲より保存性が高いので、浮遊火山灰を散乱体として可視化された大気の流れが、ライダーや気象衛星などで捉えられる。しかしSakai *et al.* (2014)が指摘しているように国内の火山噴火に伴う対流圏内の火山灰を対象としたライダー解析事例は少なく、ミーライダーで解析された火山灰の粒径、形状、濃度などの分布は、ゾンデ(Nagai *et al.*, 2011)や航空機(Yoshitani *et al.*, 2014)などの直接観測と合わせて、火山灰雲の輸送経路の監視や降灰シミュレーションの検証に使えられると思われる。加えて成層圏まで含めたドップラーライダーによる火山灰の速度などの観測は、拡張した空気抵抗 Eq. (7)における火山灰の形状因子やカニンガム補正係数を直接検証するのに有効と考えられる(Shimbori *et al.*, 2014a)。このほか、モデル改良の観点では噴煙と大気の相互作用、特に噴火の強度や規模によって変化する風の影響や傘型噴煙、Fig. 1の粒径分布、詳述しなかった湿性沈着、凝集や再飛散などのより適切なモデリングが課題であり、将来的には火山灰アンサンブル予測による信頼度の付加も考えられる。

最後に降灰の監視という観点から、鹿児島地方気象台における日別降灰量は、桜島南岳山頂火口からの噴火活動が始まった1955年以来、手作業で観測している(Nakamura, 2002)。またFig. 6左に引用したような降灰分布も現地調査に基づいて作成されている。さらに、単位時間あたりの降灰量(降灰強度)の観測も十分でない。これまで述べたように、これらの観測値は噴火の規模や強度を表す指標であり、それをすみやかに把握することは防災上重要である。この課題を解決するには、AMeDASのように自動降灰計(Tajima *et al.*, 2015; Furukawa and Oikawa, 2015)を全国展開することが理想であるが、まずは解析雨量のように既設の気象



レーダーを活用して降灰版 Z-R 関係 (Z-A 関係, Maki *et al.*, 2014) を導くような定量的降灰推定 (QAE, Sato *et al.*, 2015b) の研究を進めることが現実的である。そして Onizawa *et al.* (2013) が行ったような降灰強度の検証を積み重ねてゆくことが、降灰シミュレーションの精度向上にも繋がる。また連続的噴火や複数の火山噴火により降灰の影響が広域におよび長期化する場合には、給源の噴煙柱だけでなく、火山灰雲の各種観測・解析データを数値モデルの初期値に用いることも有効である。降灰シミュレーションにおいても、データ同化技術 (たとえば, Yumimoto *et al.*, 2009) を使って、即時的な防災情報に活かすための研究が始まっている (K. Ishii, 私信)。噴火現象の多様性に応じた学際的研究を平時に進め、来たる大規模噴火に伴う降灰に備えておきたい。

## References

- Araki, K.: What's Going on in the Clouds?, 343 p, Beret Publishing (2014) (in Japanese)
- Folch, A.: A Review of Tephra Transport and Dispersal Models: Evolution, Current Status, and Future Perspectives, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **235–236**, 96–115 (2012)
- Fukuoka District Meteorological Observatory and Kagoshima Local Meteorological Observatory: The 2011 Eruptive Activities of Shinmoedake Volcano, Kirishimayama, Kyushu, Japan, *Q. J. Seismol.*, **77**, 65–96 (2013) (in Japanese)
- Fujita, S., Miura, K., Okochi, H., Hayami, H., Matsuda, K. and Sakurai, T.: The Physics and Chemistry of Trans-boundary Air Pollution, 247 p, Seizando-Shoten Publishing (2014) (in Japanese)
- Furukawa, R.: Eruption of Shinmoe-dake Volcano, Kirishima Volcano Group, 2011, *AIST TODAY*, **2011–09**, 15 (2011) (in Japanese)
- Furukawa, R. and Oikawa, T.: Development of Automatic Ash Observation System, *Proc. of JpGU2015*, SVC45-P18 (2015)
- Hasegawa, Y., Sugai, A., Hayashi, Yo., Hayashi, Yu., Saito, S. and Shimbori, T.: Improvements of Volcanic Ash Fall Forecasts Issued by the Japan Meteorological Agency, *J. Appl. Volcanol.*, **4**, 2 (2015)
- Hashimoto, A., Shimbori, T. and Fukui, K.: Tephra Fall Simulation for the Eruptions at Mt. Shinmoe-dake during 26–27 January 2011 with JMANHM, *SOLA*, **8**, 37–40 (2012)
- Hinds, W. C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd ed., 504 p, Wiley (1999)
- Ida, Y.: Introduction to Simulation of Natural Disasters, 245 p, Asakura Publishing (2014) (in Japanese)
- Iguchi, M.: A Method for Monitoring of Discharge Volume of Volcanic Ash by Using Volcanic Tremor, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **56B**, 221–225 (2013) (in Japanese)
- Ishimine, Y.: Overview of Diverse Computer Simulations and Their Potential Contribution to Volcanology, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **52**, 221–239 (2007) (in Japanese)
- Iwasaka, Y.: Volcanic Eruption and Climate, *Tenki*, **60**, 803–809 (2013) (in Japanese)
- Kawai, H.: Forecast of Sulfur Dioxide Flow from Miyake Volcano with a High Resolution Regional Transport Model, *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **32**, 05.24–05.25 (2002)
- Kinoshita, K.: Rise, Flow and Dispersion of Volcanic Clouds, *J. Visualization Soc. Japan*, **16**, 230–235 (1996) (in Japanese)
- Koyaguchi, T.: Modeling of Volcanic Phenomena, 637 p, Univ. of Tokyo Press (2008) (in Japanese)
- Koyaguchi, T., Suzuki, Y. J. and Kozono, T.: Dynamics of Volcanic Eruptions, *Nagare*, **30**, 317–324 (2011) (in Japanese)
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M. and Matthias, V.: Volcanic Ash over Europe during the Eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010, *Atmos. Environ.*, **48**, 1–8 (2012)
- Maki, M., Iguchi, M., Fujita, E., Maesaka, T., Shusse, Y., Kozono, T., Momotani, T. and Yamaji, A.: Weather Radar Investigations of Sakurajima Volcanic Smoke, *Proc. of 2014 Fall Meeting of the Volcanol. Soc. Japan*, 109 (2014) (in Japanese)
- Mannen, K.: Theoretical Background and Recent Progress of the Pyroclastic Fall Simulation Code Tephra2: Essence for Application in Quaternary Research, *Daiyonki-Kenkyu*, **52**, 173–187 (2013) (in Japanese)
- Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., Ewert, J. W., Neri, A., Rose, W. I., Schneider, D., Siebert, L., Stunder, B., Swanson, G., Tupper, A., Volentik, A. and Waythomas, C. F.: A Multidisciplinary Effort to Assign Realistic Source Parameters to Models of Volcanic Ash-cloud Transport and Dispersion during Eruptions, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 10–21 (2009)
- Nagai, M., Ukawa, M., Tanada, T., Shimbori, T., Hashimoto, A. and Onizawa, S.: Balloon-borne Observation of Volcanic Plume from Shinmoe-dake Volcano, *Proc. of 2011 Fall Meeting of the Volcanol. Soc. Japan*, 17 (2011) (in Japanese)
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y. and Maeno, F.: The Outline of the 2011 Eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan, *Earth Planets Space*, **65**, 475–488 (2013)
- Nakamura, M.: The Change in Volume of Volcanic Ash-fall Deposits Erupted from Sakurajima Volcano, *Q. J. Seismol.*, **65**, 135–143 (2002) (in Japanese)
- Onizawa, S., Shimbori, T., Fukui, K., Ando, S., Hirose, F., Kimura, K., Yoshida, Y., Iwakiri, K., Yoshida, T., Yamamoto, T. and Yoshikawa, S.: Tephra Fall Observation and Prediction of the 2011 Shinmoedake Eruptions, *Q. J. Seismol.*, **77**, 215–222 (2013) (in Japanese)
- Saito, K.: The JMA Nonhydrostatic Model and Its Applications to Operation and Research: Atmospheric Model Applications, Yucel, I. editor, InTech, pp. 85–110 (2012)
- Sakai, T., Uchino, O., Morino, I., Nagai, T., Akaho, T., Kawasaki, T., Okumura, H., Arai, K., Uchiyama, A., Yamazaki, A., Matsunaga, T. and Yokota, T.: Vertical Distribution and Optical Properties of Volcanic Ash from Mt. Sakurajima Detected with Lidar and Skyradiometer over Saga, *J. Remote Sens. Soc. Japan*,



- 34, 197–204 (2014) (in Japanese)
- Sato, E., Fukui, K., Shimbori, T., Ishii, K., Takagi, A. and Yamauchi, H.: Observation Project of Volcanic Plumes using Weather Radars, *Proc. of 2015 Spring Meeting of the Met. Soc. Japan*, **107**, 296 (2015a) (in Japanese)
- Sato, E., Fukui, K., Shimbori, T., Ishii, K., Takagi, A., Yamauchi, H. and Maki, M.: MP Radar Observation of the Explosive Eruption of Sakurajima on May 10th, 2014, *Proc. of JpGU2015*, SVC46–16 (2015b)
- Sato, E., Shimbori, T., Fukui, K., Ishii, K. and Takagi, A.: The Eruption Cloud Echo from Mt. Ontake on September 27, 2014 Observed by Weather Radar Network, *Rep. Coord. Comm. Predict. Volcan. Erupt.*, **119** (2015c, in press) (in Japanese)
- Seino, N., Sasaki, H., Sato, J. and Chiba, M.: High-resolution Simulation of Volcanic Sulfur Dioxide Dispersion over the Miyake Island, *Atmos. Environ.*, **38**, 7073–7081 (2004)
- Sekiya, N. and Hiroi, O.: Social-Impact of Mt. FUJI Eruption: First Step for “Drawing Scenario about Social-Impact of Mt. FUJI Eruption focused Volcanic Ash” by Interview Research of the Agencies Concerned, *Res. Bull. Socio-Inf. Comm. Stud., Univ. of Tokyo*, **20**, 1–151 (2003) (in Japanese)
- Shimbori, T., Sakurai, T., Tahara, M. and Fukui, K.: Observation of Eruption Clouds with Weather Radars and Meteorological Satellites: A Case Study of the Eruptions at Shinmoedake Volcano in 2011, *Q. J. Seismol.*, **77**, 139–214 (2013) (in Japanese)
- Shimbori, T., Hashimoto, A., Ishii, K., Sato, E. and Fukui, K.: Settling Velocities of the Volcanic-ash Particles in the Upper Atmosphere: Cunningham Correction Factor on Suzuki’s Drag Coefficient, *Proc. of 2014 Fall Meeting of the Volcanol. Soc. Japan*, 121 (2014a) (in Japanese)
- Shimbori, T., Kai, R., Hayashi, Yo., Hayashi, Yu., Sugai, A., Hasegawa, Y., Hashimoto, A., Takagi, A., Yamamoto, T. and Fukui, K.: Tephra Fall Predictions with the JMA Regional Atmospheric Transport Model: A Case Study of the Eruptions at Shinmoe-dake Volcano in 2011, *Pap. Met. Geophys.*, **65**, 75–107 (2014b) (in Japanese)
- Shimozuru, D.: Injection of Volcanic Ash into the Stratosphere, *Chigaku Zasshi*, **98**, 782–790 (1989) (in Japanese)
- Suto, H. and Hattori, Y.: Survey of Hazard Assessment Techniques of Volcanic Ash Fall Using Computational Fluid Dynamics, *CRIEPI Res. Rep.*, **N10028**, 20 p (2011) (in Japanese)
- Suto, S.: Case Study of the Volcanic Ash Fall Disasters by Newspaper Article, *Chishitsu News*, **604**, 41–65 (2004) (in Japanese)
- Suzuki, T.: A Theoretical Model for Dispersion of Tephra: Arc Volcanism: Physics and Tectonics, Shimozuru, D. and Yokoyama, I. editors, TERRAPUB, pp. 95–113 (1983)
- Suzuki, Y. J. and Koyaguchi, T.: 3D Numerical Simulation of Volcanic Eruption Clouds during the 2011 Shinmoe-dake Eruptions, *Earth Planets Space*, **65**, 581–589 (2013)
- Tajima, Y., Ohara, D., Fukuda, K. and Shimomura, S.: Development of Automatic Tephrometer for Monitoring of Volcano, *KOEI Forum*, **23**, 39–46 (2015) (in Japanese)
- Takahashi, M.: Super Eruption and “Volcanic Winter”, *Earozoru Kenkyu*, **27**, 278–283 (2012) (in Japanese)
- Tanaka, H. L., Iguchi, M. and Yoshitani, J.: Estimation of the Airborne Ash Density for Sakurajima using PUFF Model, *Proc. of JpGU2015*, SVC48-01 (2015)
- UNISDR: Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, 311 p, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (2015)
- Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I. and Cole, J. W.: Volcanic Hazard Impacts to Critical Infrastructure: A Review, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 148–182 (2014)
- Yamamoto, A., Sasaki, H., Seino, N. and Chiba, M.: Numerical Simulation of Tephra Fall Deposition from Mt. Usu 1977 Eruption and Mt. Fuji 1707 Eruption, *Proc. of 2003 Japan Earth Planet. Sci. Joint Meeting*, V055-020 (2003) (in Japanese)
- Yasuda, N., Kajitani, Y., Tatano, H. and Onodera, S.: The Economic Influence on the Civil Aviation by the Large-scale Eruption in Iceland, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **54A**, 59–65 (2011) (in Japanese)
- Yoshitani, J., Eliasson, J., Miki, D., Yasuda, N. and Momotani, T.: Airborne Measurements of Concentration of Volcanic Plume from Mt. Sakurajima, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **57B**, 1–8 (2014) (in Japanese)
- Yumimoto, K., Takemura, T., Eguchi, K. and Uno I.: Data Assimilation with Aerosol Transport Model, *Earozoru Kenkyu*, **24**, 256–261 (2009) (in Japanese)