

火山灰輸送：モデルと予測

新堀 敏基*

(2015年8月31日受付, 2016年2月13日受理)

Tephra Transport: Modeling and Forecasting

Toshiki SHIMBORI*

In this article, recent progresses in modeling and forecasting of tephra transport phenomena are reviewed. First, we describe elementary processes of the Tephra Transport and Dispersion Models (TTDMs) especially from the Lagrangian point of view. The processes consist of advection, diffusion, gravitational fallout, dry deposition, wet scavenging, aggregation, resuspension and so on, which are taken into the operational models of Volcanic Ash Advisories and Volcanic Ash Fall Forecasts in the world. Second, we show examples of volcanic ash cloud and tephra fall forecasts on the basis of the case studies of the eruptions at Eyjafjallajökull in 2010 and Shinmoe-dake volcano in 2011, respectively. Finally, some representative numerical weather prediction models which drive the TTDMs and verifications of the TTDMs are also described. Other important parameters of eruption source which give initial condition of the TTDMs are briefly remarked as future works.

Key words : volcanic ash, tephra, transport, dispersion, model

1. はじめに

火山噴火に伴い、大気中に放出された火砕物(テフラ)の輸送現象の研究には、自然現象の一つとしてその物理を理解するための基礎・学術的な側面と、それが人間社会に及ぼす災害を予防するための応用・防災的な側面がある。本稿では特に後者の観点から、テフラ輸送の予測と予測するためのモデリングについてレビューする。ここで対象とするテフラは、放出源である弱い噴煙や強い噴煙(噴煙柱)、傘型噴煙などから離脱した後、大気場の風や雨などの影響を受けて流され落下する火山灰から火山礫までとし、弾道を描いて飛散する火山岩塊は含めない。以下では、主に「テフラ」という用語を用い、特に対象を粒径2mm以下のテフラに限定する場合は「火山灰」も用いる。テフラの輸送現象の概念図をFig. 1に示す。

これまで10年ごとに刊行されてきた『火山』の特集号を読むと、大気中のテフラの輸送現象に関しては、20周年特集号で地球環境(鎌田, 1975)や気候(田中, 1975)への影響が取り上げられた。これらの背景には1960~70

年代の大気汚染や環境問題があったが、自然起源の火山噴出物に含まれるテフラのほか、SO₂などの火山ガスやHgなどの重金属成分が大気・地球環境へ与える影響を、人為起源の大気汚染と区別して考えることは、現在では地球温暖化の問題とも関連して継続している(二宮, 2012)。次の30周年特集号では、遠藤・他(1986)によりテフラ研究の進歩がまとめられた。1970~80年代に進展したテフラの生成・運搬・堆積過程の観測および理論的研究と、火山灰編年学(テフロクロロジー)による国内の広域テフラの発見に基づく内容であり、後者はその後、周辺地域や海洋底に分布するテフラも含めて『火山灰アトラス』(町田・新井, 2003)として出版されるとともに、降下火山灰データベースが作成され、将来1万年間の降灰確率が試算されている(須藤・他, 2007, 2010)。一方、この時代になされた前者の研究のうち、テフラの大気中での輸送・拡散を解析的に考察したSuzuki(1983)は、本稿で述べるモデルに基づく予測へと発展する基礎になっている。

Suzuki(1983)は、放出源を構成するテフラの初期分布

* 〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1
気象庁気象研究所火山研究部
Volcanology Research Department, Meteorological
Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1

Nagamine, Tsukuba 305-0052, Japan.

e-mail: shimbori@mri-jma.go.jp

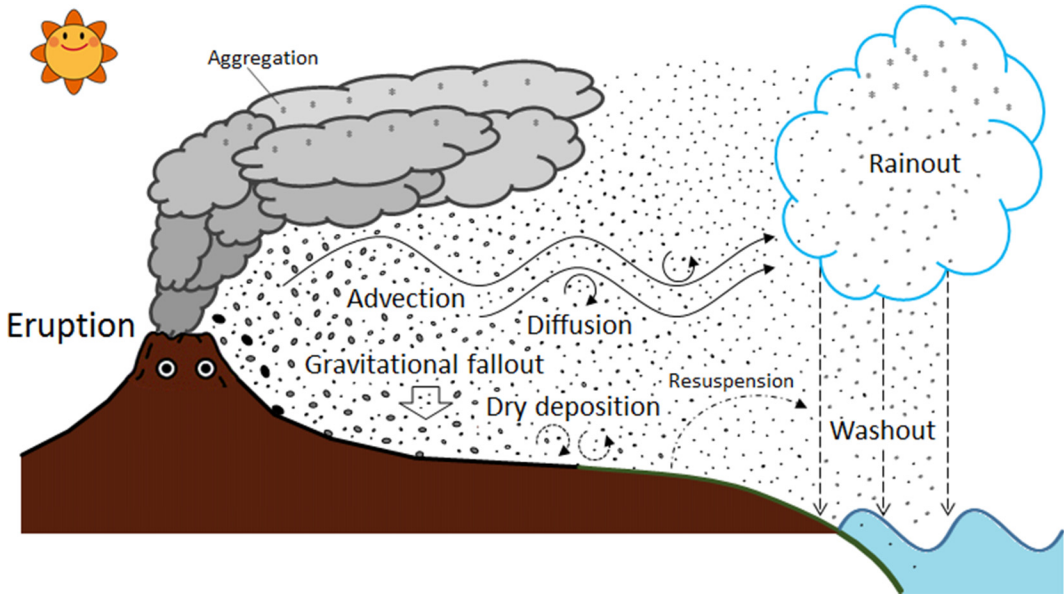


Fig. 1. A schematic illustration of transportation of tephra (weak plume case). The processes of advection, diffusion, gravitational fallout, dry deposition, wet scavenging (washout and rainout), aggregation and resuspension are explained in Sects. 2-2-1, 2-2-2, 2-2-3, 2-2-4-1, 2-2-4-2, 2-2-5-1 and 2-2-5-2, respectively.

と、背景場の大気によるテフラの運動について今日、鈴木関数 (Suzuki distribution, e.g. Folch *et al.*, 2009; Schwaiger *et al.*, 2012) と呼ばれる鉛直 1 次元の粒子供給率関数と、重力落下を考慮した水平 2 次元の移流拡散方程式の近似解を与えた。鈴木関数は、噴火の規模に応じて噴煙柱のどの高度からテフラが放出され易いかを拡散比率などのパラメータで予め設定しておけば、噴煙が到達した高さで関数が一意に決まるため、テフラの輸送予測に必要な初期値の噴煙供給源モデル (以下、供給源モデル) を簡便に作成でき、予報現業では現在でも有効である。しかしこの供給源モデルは経験的な関数に基づいており、噴煙内への外気の取り込み (エントレインメント) や風の影響、傘型噴煙では重力流の寄与など、噴煙自体の運動や大気との相互作用 (例えば, Sparks *et al.*, 1997) が陽に考慮されていない。この噴煙のダイナミクスに関わる研究は、50 周年特集号 (小屋口, 2005) および『火山現象のモデリング』 (小屋口, 2008) にまとめられ、本特集へも継続しているテーマの一つである。

もう一つの大気場におけるテフラの移流拡散モデリングが本稿のテーマである。自然現象を理解するためのモ

デルには、現象を特徴づける基本的な物理量の間に存在する関係を方程式で表現する数理モデルから、解析的には解けない方程式を差分化して計算する数値モデルまで広くある (宇川・他, 2013)。数値モデルは、計算機の進歩とともに予測可能性が向上しており、テフラの輸送予測を含む火山現象への応用も広がっている (石峯, 2007; 井田, 2014)。Suzuki (1983) の時代はテフラを主体として、単純な大気場を仮定して簡略化した解析モデルに基づく数値計算の黎明期であったが (Armienti *et al.*, 1988; Macedonio *et al.*, 1988), その後、数値予報モデルによる大気場の解析および予報の精度向上とともに、テフラを客体とする数値モデルによる予測技術が発展している。この方向性は、テフラによる災害を未然に防ぐという目的から国内では、1992 年に火山噴火災害危険区域予測図 (ハザードマップ) 作成指針の発行 (国土庁防災局, 1992)、1997 年に東京航空路火山灰情報センター (VAAC) が発足し航空路火山灰情報 (VAA)¹ の提供開始 (澤田, 1997)、1999 年から火山灰拡散予測の付加 (鉢嶺, 1999; 斎藤・他, 1999; 山里, 2005) および 2011 年の VAG 更新 (白土, 2013)、2008 年に気象庁の降灰予報²の現業化 (Shimbori

¹ 国際民間航空条約 (シカゴ条約, 1944 年締結) に基づき設立された国際民間航空機関 (ICAO, 日本は 1953 年加盟) が、世界気象機関 (WMO) の協力の下、国際航空のための気象業務に関して定めた同条約の第 3 附属書 (ICAO Annex 3) で規定された情報の一つ。図形式の VAA である火山灰拡散予測図 (VAG) についても同書で定められている。

et al., 2009) と 2015 年の高度化 (Hasegawa et al., 2015) へと繋がっている。

本章では現在、国内外の VAA や降灰予報、降灰ハザードマップの作成に用いられているテフラ輸送の数値モデルについて、特にラグランジュ記述の移流拡散モデル³の詳細とオフライン計算で必要かつ重要な大気場の数値モデルの概略を記述する。3 章では、移流拡散モデルによるテフラ輸送の予測事例として、この 10 年間にテフラが広く人間社会へ影響を及ぼした 2010 年エイヤフィヤトラヨークトル火山噴火に伴う火山灰輸送と 2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に伴う降灰の予測および検証について紹介する。最後にテフラ輸送のモデルと予測に関わる今後の課題を挙げる。なお 2010 年以降、移流拡散モデリングに関する論文は年間 100 本を超えており (Lin, 2012)、本稿ではすべてを網羅できていないことをお断りしておく。またモデルの略記は最近の文献でも、ATDM (Draxler et al., 2015)、LPDM (Lin, 2012)、TTDM (Folch, 2012)、VATDM (Bonadonna et al., 2012) など混在しているが、本稿ではテフラの移流拡散モデルを指す場合はその先行レビューである Folch (2012) に倣い、TTDM (Tephra Transport and Dispersion Model) を用いる。略語一覧は末尾に示す。

2. テフラ輸送のモデル

数値モデルは、オイラーモデルとラグランジュモデルに大別される。さらにテフラのような物質輸送を予測する場合、大気場と同時に計算するオンラインモデルと独立に計算するオフラインモデルに分類される。本章では、テフラ輸送に関するオイラーとラグランジュモデルの違いを述べた後、2-2 節で VAA や降灰予報 (VAFF) の運用に多く用いられているオフラインでラグランジュ記述の TTDM について、その基本的な力学・物理過程 (素過程と呼ぶ) を記述する。Fig. 2 に示す TTDM による予測計算の流れ図において、予測精度に大きく影響する初期値の供給源モデルのパラメータ (ESP, 例えば, Mastin et al., 2009) と入力値の大気場の数値予報 (NWP) などによる格子点値 (GPV) のうち、前者は本特集でも取り上げられるので、ここではオンラインとオフラインモデルの違いにも関わる後者について 2-3 節で触れる。

2-1 オイラーモデルとラグランジュモデル

テフラの輸送現象を記述する方法には、空間 (場) に固定した座標系によるオイラー記述と、粒子とともに移

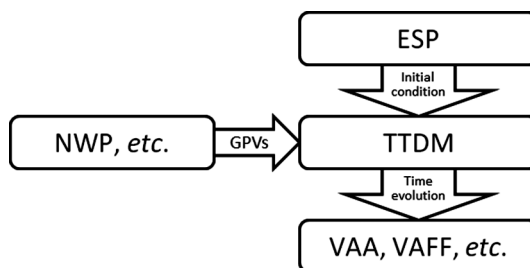


Fig. 2. Flowchart of TTDM calculations (offline model case).

動する座標系からのラグランジュ記述がある。オイラー記述では、時刻 t におけるテフラの物理量 (例えば、火山灰の濃度 c) は大気場の各位置 $\mathbf{r}=(x, y, z)$ における関数 $c(t, \mathbf{r})$ として表され、ラグランジュ記述ではテフラの運動がその位置の時間発展 $\mathbf{r}(t)$ として表される。大気場を離散化した格子 (グリッド) で表現したモデルはオイラーモデルであり、テフラを有限個の計算粒子 (トレーサー) で表現したモデルはラグランジュモデルである。なおラグランジュモデルには、空気塊の流跡線に沿って物理量を計算するモデルもあるが、幅広い粒径分布を持つテフラは自重の変化が大きい (2-2-3 節) ので、本稿では詳述しない (流跡線モデルを用いた解析については例えば、村尾 (2011) を参照)。

オイラー記述の移流拡散方程式は、質量保存を表す連続の式:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{v} + \mathbf{V})c] = S - L \quad (1)$$

から導かれる。ここで $\mathbf{v}(t, \mathbf{r})$ は大気場の風ベクトル、 $\mathbf{V}(t, \mathbf{r})$ は外力 (重力) によるテフラの落下速度、 S は放出源からの噴出率、 L は地表面 (海面も含む) 境界での沈着率を表す。この方程式を解くために、風と濃度を平均とゆらぎの和: $\mathbf{v} = \bar{\mathbf{v}} + \mathbf{v}'$, $c = \bar{c} + c'$ にレイノルズ分解して (1) 式に代入し平均を取ると、

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}} \bar{c}) - \nabla \cdot (\overline{\mathbf{v}' c'}) - \nabla \cdot (\mathbf{V} \bar{c}) + S - L \quad (2)$$

となる。右辺は第 1 項から順に、輸送項、拡散項、降下項、ソース項、シンク項と呼ぶ。非圧縮性モデルでは輸送項は移流項のみになり、その時間積分法の一つであるセミラグランジュ法については後述する (2-2-1 節)。拡

² 気象業務法 (1952 年施行, 2007 年改正) における火山現象予報の一つ。なお気象業務法において「予報」とは、観測の成果に基づく現象の予想の発表、と定義される。本文では、発表まで意味しない場合は用語として、予報ではなく予想または予測を用いる。

³ 狭義の移流拡散モデルはラグランジュモデルである (萬納寺, 1994; 眞木・岩崎, 1995)。

散項に現れる乱流フラックス $\overline{v'c}$ は、分子拡散とアナロジカルなスキームである勾配輸送（渦拡散モデル）で表されると仮定すると、2階の対称テンソルである乱流拡散係数（渦拡散係数）を K として、(2) 式は

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\bar{v} \cdot \nabla \bar{c} + \nabla \cdot (K \nabla \bar{c}) - \nabla \cdot (V \bar{c}) + S - L \quad (3)$$

と書ける。これを解析的に解く場合、線形化するためにさらに次の仮定が置かれる：

- (a) 大気場は水平風が卓越しており、鉛直流は無視する（静力学近似）。さらに水平風は、水平一様を仮定する： $\mathbf{v} = (u, v, w) = (u(z), v(z), 0)$
- (b) 乱流拡散係数は常に対角化されている。さらに xx, yy 成分は同じ定数、 zz 成分はゼロと仮定する： $K = \text{diag}(K_h, K_h, K_v) = \text{diag}(K_h, K_h, 0)$
- (c) テフラは鉛直下向き落下速度を持つ。さらに終端速度に達していると仮定する： $\mathbf{V} = -V_t \hat{z}$ (\hat{z} は鉛直方向の単位ベクトル)

これらを仮定すると、(3) 式は落下速度を考慮した2次元移流拡散方程式に帰着する (Suzuki, 1983)。この方程式に基づく解析モデルでは、初期条件が瞬間点源すなわち火口から瞬間的に噴出したバフの場合、濃度の解析解は正規分布になる（ガウス型バフモデル）。異なる高度や時刻から放出されたテフラの輸送はこの解の重ね合わせで表す。

これに対してラグランジュ記述では、個々のトレーサーがその位置 $\mathbf{r}(t)$ における大気場の風 $\mathbf{v}(t, \mathbf{r})$ で流されながら、終端速度で落下することを表す運動論的方程式を立てる：

$$\frac{D\mathbf{r}}{Dt} = \mathbf{v} - V_t \hat{z} \quad (4)$$

(2) 式と同様に風をレイノルズ分解して表すと、微小時間刻み（タイムステップ） Δt 後の位置の変化は、

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

と書ける ($O((\Delta t)^2)$ 以下は無視)。この右辺の第2~4項は、それぞれ輸送項、拡散項、降下項と対応しており、ソース項とシンク項は、放出源を構成するトレーサーの初期条件と地表面における境界条件（沈着条件）で与えられる。ラグランジュ記述からオイラー記述の平均濃度を求めるには、各格子内に含まれるトレーサーの質量を足し上げればよい。しかしラグランジュモデルで表現できる総トレーサー数 N は通常、自然現象の総粒子数より少ないので、トレーサーは実粒子のアンサンブル (D'Amours *et al.*, 2015) と見なす。そして各トレーサー

(タグ $n=1, 2, \dots, N$) には噴出物総質量 M が保存するようにテフラの実質量より重い仮想質量 \tilde{m}_n を与える ($M = \sum_{n=1}^N \tilde{m}_n$)。この仮想質量を用いると、ラグランジュ形式では (3) 式を直接解く代わりに、次式で濃度が求まる (例えば, Draxler and Hess, 1997):

$$\bar{c} = \frac{\sum_{n=1}^{\Delta N} \tilde{m}_n}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (6)$$

ただし $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は x, y, z 方向の格子間隔、 ΔN は格子内のトレーサー数を表す。(6) 式を地表面で2次元化すれば面密度（降灰量）が求まる。モデルの予測精度はタイムステップの取り方とともに、オイラーモデルでは格子間隔に依存するのに対して、ラグランジュモデルでは総トレーサー数に依存する。すなわち、トレーサー1個あたりで表現可能な最小濃度の目安は、 $O(M/N\Delta x\Delta y\Delta z)$ である（最小降灰量については新堀・他 (2010) を参照）。

ここで、東京 VAAC で運用している気象庁全球移流拡散モデル (JMA-GATM, 以下, GATM) および降灰予報で運用している領域移流拡散モデル (JMA-RATM, 以下, RATM) を含む、国内外の気象機関や VAAC, 火山観測所などで使用されている主な TTDM の諸元を Table 1 に示す。ただし、本稿執筆時点で確認できた文献に基づいていること、この種の表はモデル開発とともに古くなること、ソースコードが公開されている TTDM については表に示した以外のオプションも存在することに注意する。ここに挙げた 14 モデルのうち 6 つがオイラーモデルである（セミラグランジュ法を用いたモデルも含む）。このうち、ASHFALL, HAZMAP, Tephra2 は 2次元の解析モデルであるのに対し、Ash3d, FALL3D, MOCAGE は上記 (a) を仮定しない 3次元の数値モデルであり、性質が大きく異なる。

他方、ラグランジュモデルは 7 つある (HYSPPLIT など、濃度を算出する部分以外が基本的にラグランジュ記述のモデルはこちらに分類した)。現在、世界に 9 つある VAAC のうちツールズ VAAC 以外はこのタイプを採用している。オイラーモデルに対するラグランジュモデルの長所として、Lin (2012) は次の 7 つを挙げている：(i) 流跡線の情報が有用であること；(ii) 記述法が現実大気の輸送現象と合っていること；(iii) 放出源近傍の非拡散領域が扱えること；数値計算上の (iv) 安定性が保持、(v) 擬似拡散が回避、そして (vi) 保存性が確保されること；(vii) サブグリッドスケールの情報が取り込めること。格子間隔が噴煙の空間スケールに比べて十分細かく取れない場合、噴火直後の火口周辺のテフラ輸送を予測するには (iii), (vii) が利点である。(v) は場合によっては大気拡散より大きくなるのが回避されると

もに、(vi) と合わせて重力落下を厳密に計算するために重要である。また現業モード、すなわち火山噴火時に確実な発表が求められる VAA や降灰予報では、(iv) が最も重要な条件である。反対に短所としては、(viii) 計算コストがかかること；(ix) 空間均等性が維持できないこと；(x) オイラーモデルによる大気場との整合が完全に取りれないこと、が挙げられている。(viii) は一般にオフラインのラグランジュモデル単体では軽いが、トレーサー数を増やしたり、大気場の（オンライン）計算も含めると重くなる。(ix) はテフラの情報はトレーサーの流路上でしか得られず、空間全体の時間変化を把握するには向いていないという意味であり、(i) と表裏の関係にある。(x) については 2-3 節で触れる。

以下の節では、主にオフラインでラグランジュ記述の TTDM について述べてゆく。なお Table 1 にあるハイブリッドモデルとは、放出源はオイラーで計算し、その後の輸送はラグランジュで計算するモデルである。VOLCALPUFF では放出源は風の影響を考慮した Bursik (2001) の浮力プルーム（BENT モデル）、輸送はパフの重ね合わせて計算される（Barsotti *et al.*, 2008a）。

2-2 テフラの移流拡散モデル

本節では、特にオフラインでラグランジュ記述の TTDM における、Fig. 1 および Table 1 に示したテフラ輸送の素過程として、輸送（慣用では移流, advection）、拡散（diffusion）、降下（または落下, gravitational fallout）、沈着（deposition/scavenging）、凝集（aggregation）および再飛散（resuspension）の過程を考える。また、オイラーモデルでも参考となるスキームについては各節で触れる。複雑な自然現象を素過程の組み合わせでモデル化するボトムアップのアプローチ（堀田・原, 2012）は、モデル開発を進める上で基本となる。

2-2-1 輸送過程

輸送過程は、(5) 式の右辺第 2 項で表されているとおり、大気場の平均風によってテフラが流される最も基本的な過程である。TTDM では一般に、噴出時にテフラが持っている慣性やテフラに働く水平方向の空気抵抗力は考えない（Searcy *et al.*, 1998）ので、これらが無視できないような運動（例えば、噴火直後の噴煙内部の運動）は扱えない。Table 1 にある 7 つのラグランジュモデルは、いずれも GPV の風の要素を 3 次元の平均風として用いている。ただし元の GPV に静力学近似された 2 次元の水平風しかない場合は、その水平収束・発散から鉛直流を診断するのが一般的である。

なおオイラーモデルには、移流計算をラグランジュ記述で解く方法として、セミラグランジュ法（例えば、Williamson and Rasch, 1989; 松村, 2000）がある。セミラ

グランジュ法は空間格子とタイムステップとの間の計算不安定の条件がないため（前節の (iv)）、より長いタイムステップを用いて計算時間を短縮できる利点があり、Ash3d のオプションと MOCAGE で使用されている。

2-2-2 拡散過程

大気中の拡散現象は主に大気場の乱流に起因し、本質的に非線形で不可逆過程であるためその定式化は難しく、(2) 式から (3) 式への変形で仮定した渦拡散モデルのように、古くから対象に応じてモデル化されている（Thomson and Wilson, 2012）。また入力される GPV は、時空間方向に離散化されており元々持っていた乱流情報が失われているため、オフラインの TTDM では改めてサブグリッドスケールの乱流拡散（turbulent diffusion）を考慮する必要がある。ここでは、既に導入したレイノルズ分解に基づく (5) 式の右辺第 3 項の風速のゆらぎの表現として、分子拡散によるブラウン運動の確率過程モデルであるランダムウォークと、拡散係数を決めるのに最も基礎的な乱流モデルを述べるに留める。なお分子拡散（molecular diffusion）そのものは、大気中では卓越しないため、TTDM では通常は考慮しない。

ランダムウォークによる最も簡明な速度ゆらぎの表現は、(3) 式の拡散に関する方程式の解の標準偏差との比較から、

$$u' = v' = \sqrt{\frac{2K_h}{\Delta t}} \Gamma, \quad w' = \sqrt{\frac{2K_v}{\Delta t}} \Gamma \quad (7)$$

で与えられる（例えば、Tanaka, 1994）。ここで Γ は平均 0、標準偏差 1 の正規乱数である。しかしながら (7) 式は本来、ある程度の時間（ラグランジュの時間スケール t_{Lh} , t_{Lv} ）が経過してから適用されるべき表式であるが、この式にはテフラが放出されてからの経過時間 t に関する情報が含まれていない。特に水平拡散に関しては、水平風に鉛直シアがない場合、テフラが遠くまで線状や帯状に流れてゆくことが地上観測や気象衛星画像の流脈線から解析されており（例えば、木下, 1996）、噴出直後から (7) 式を用いると過大な広がりを与えてしまうことがある。

そこで (7) 式を用いる代わりに、以下の考えに基づいて速度ゆらぎ u' は、自己相関（ラグランジュ相関係数 $R_{u'}$ ）を持つ成分とランダムな成分 u'' の和で与えられると考える（他の方向についても同様）：

$$u'(t) = R_{u'}(\Delta t)u'(t - \Delta t) + u'' \quad (8a)$$

$$u'' = \sqrt{1 - R_{u'}(\Delta t)^2} \sigma_{u'} \Gamma \quad (8b)$$

u' のラグランジュ相関係数は、一般に

Table 1. Specifications of TTDMs (as of Aug. 2015). After Witham *et al.* (2007), Webley and Mastin (2009), Suto and Hattori (2011), Folch (2012), WMO (2012), Bowman *et al.* (2013) and Bonadonna *et al.* (2014).

Model	Asb3d	ASHFALL	FALL3D	FLEXPART	HAZMAP	HYSPLIT**	JMA-GATM††	JMA-RATM	MLDPO†	MOCAGE#	NAME	PUFF	Topher2	VOL-CALPUFF	TRC Co., Inc.	
Institution	USGS	GNS Science	INGV BSC	ZAMG NILU	INGV	NOAA/VARL	JMAMRI	JMAMRI	CMC	Météo France	UKMO	UAF AVO	USF	INGV	INGV	
Characteristics																
Operation	AVO		Buenos Aires VAAC; INGV, etc.		INGV	Washington, Anchorage, Detroit, Buenos Aires VAACs	Tokyo VAAC	JMA	Montreal VAAC	Toulouse VAAC	London VAAC; IMO	VAACs; Wellingt. VAACs; AVO, INGV, etc.	INGV	INGV	IMO	
	VAFF		VAAC; Hazard map		Hazard map	VAACs	VAAC	VAFF	VAA	VAA	VAA	VAAC; Hazard map	Hazard map	Hazard map		
Products	E	E	E	L	E	L	L	L	L	E	L	L	E	L	E	H
	GREL	L	REL	GREL	L	L	G	REL	GREL	GR	GREL	GREL	L	L	L	RL
Processes																
Advection	Horizontal	3D wind (donor cell upwind/corner transport upwind/same Lag.)	2D uniform wind	3D wind (2nd order finite difference explicit scheme)	3D wind (predictor-corrector) (horizontal divergence)	3D wind (forward difference with spherical triangle)	Random walk ($K_f=const.$)	Random walk ($K_f=const.$)	3D wind (random walk)	Hydrostatic wind (semi-Lag. cubic polynomial interpolation)	3D wind (forward Euler Mauryama)	3D wind (nearest neighbor/cubic spline interpolation)	2D uniform wind	3D wind (Lagrangian)	Inherently through a vertical diffusion	
	Vertical	Gradient transfer (Crank-Nicolson/forward Euler)	Gaussian puff ($K_f=const.$)	Same as above (similarity)	Random walk (boundary-layer/mesoscale)	Same as above (+emulus convection)	Random walk ($K_f=const.$)	Gradient transfer	Gradient transfer	Random walk	Same as below (+meander)	Random walk (0th order; $K_f=const.$)	Same as above ($K_f=const.$)	Gaussian puff, fall time threshold		
Diffusion	Horizontal	Same as above	Ar/Ga/Pf/De	Ar/Ga/Pf/De	Same as above	Ar/Ga/Pf/De	St+CC	St	St	St+CC	St+CC(A)	Const. St/Re	BP	S/AVHPF		
	Vertical	Same as above	Same as above	Same as above	Same as above	Same as above	St+CC	St	St	St+CC	St+CC(A)	Const. St/Re	BP	S/AVHPF		
Gravitational fallout	Particle density*	V	V	V	V	F	V	V	F	F	F	F	V	V	V	V
	Particle shape*	V ($\beta=0.44$)	V	V	S	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Dry deposition	Washout (below-cloud)		Deposition velocity (Aymieiri <i>et al.</i> , 1988)	Size-resolved deposition velocity (Feng, 2008)	Deposition velocity with resistance (Shim, 1982)	Deposition velocity with resistance (Hicks, 1986)	Deposition velocity with resistance (Kirada <i>et al.</i> , 1986)	Fixed deposition velocity (Shao, 2000)	Deposition velocity (Wilson <i>et al.</i> , 1989)	Fixed deposition velocity (Nhor'Kim <i>et al.</i> , 2004)	F	F	S	S	S	
	Rainout (in-cloud)	(Research mode)		Scavenging coef. ($C_f=5.00 \times 10^{-9}$, $\beta=0.73$)	Scavenging ratio with (sub-grid scale) precipitation (Hendel <i>et al.</i> , 1995)	Average scavenging ratio (Hicks, 1986)	Scavenging coef. ($C_f=3.00 \times 10^{-9}$, $\beta=0.73$)	Scavenging ratio with LWC ($C_f=0.9$; Hendel <i>et al.</i> , 1995)	Size-resolved scavenging coef. (Feng, 2007)	Scavenging rate and local cloud fraction with relative humidity (Pudkiewicz, 1988)	3D scheme for stratiform (Liu <i>et al.</i> , 2001); convective (Mari <i>et al.</i> , 2000)	Same as below (+seed-feeder)	Scavenging coef. for liquid/solid precipitation			
Aggregation			Costa <i>et al.</i> (2010)		Bonadonna <i>et al.</i> (2002)									Bonadonna <i>et al.</i> (2002)		
Resuspension			Folch <i>et al.</i> (2014a)		Drexler <i>et al.</i> (2001)						Leadbetter <i>et al.</i> (2012)					Borsotti <i>et al.</i> (2010)

$$R_{u'}(\Delta t) = e^{-\Delta t/t_{Lh}} \quad (9)$$

で表され、その標準偏差 $\sigma_{u'}$ は乱流拡散係数を用いる場合、

$$\sigma_{u'} = \sqrt{\frac{K_h}{t_{Lh}}} \quad (10)$$

で計算される (例えば, Baumann and Schlager, 2012). ここで (8b)-(10) 式を (8a) 式に代入してテイラー展開し、 $O(\Delta t)$ まで取ると、ランジュバン方程式:

$$\frac{du'}{dt} = -\frac{1}{t_{Lh}} \left(u' - \sqrt{\frac{2K_h}{\Delta t}} \Gamma \right) \quad (11)$$

が導かれる (例えば, Gifford, 1982, 1984). すなわち, (8a)-(10) 式を用いた水平拡散は 1 次のランジュバン方程式に基づいており、PUFF を除くすべてのラグランジュモデルに導入されている (Table 1). また PUFF に導入されている先の (7) 式は, (11) 式の定常解になっている. デフォルトでは t_{Lh} [s] は $O(10^4)$ 程度 (例えば, Draxler and Hess, 1997), K_h [m²/s] は最大 $O(10^4)$ の大きさと与えることが多い (Hurst, 1994; Tanaka, 1994 など). 拡散現象とランダムウォークの関係は物理学では古くから知られており (D'Amours *et al.*, 2015), ブラウン運動のランジュバン方程式による記述は例えば北原 (1997) が参考になる.

他方, 鉛直方向の拡散係数 K_v は, 一般に層流が卓越する自由大気中では K_h に比べて数桁小さく, 現業モードでの拡散係数は安全係数の意味合いが強い. それより下の大気境界層では, 地表面摩擦や放射などにより乱流混合が発達しうするため, いくつかの TTDM ではその度合に応じて K_v を調節している. この乱流のモデルとして, プラントルの混合距離 l に基づく 0-方程式モデルや乱流エネルギー TKE を用いる 1-方程式モデルがある (例えば, 原, 2008a). MOCAGE や RATM など用いられている 0-方程式モデルでは, 大気の安定度を表すリチャードソン数 Ri を用いて,

$$K_v = l^2 \left| \frac{\partial \bar{v}_h}{\partial z} \right| F_v(Ri) \quad (12)$$

で表す (例えば, Louis, 1979; Louis *et al.*, 1982). ここで $\bar{v}_h = (\bar{u}, \bar{v})$ は水平風速であり, $|\partial \bar{v}_h / \partial z|$ はその鉛直シアを表す. $F_v(Ri)$ は大気が不安定 (Ri が小) になるほど大きくなる安定度関数である. また乱流エネルギーの GPV が使用できるときは直接, 1-方程式モデル:

$$K_v = C_v l \sqrt{TKE} \quad (13)$$

で求める (例えば, Klemp and Wilhelmson, 1978; Deardorff, 1980). ただし C_v は比例定数である. 1-方程式モデルは, FLEXPART や HYSPLIT などのオプションにあり, 水平方向にも適用可能である. (12) 式あるいは (13) 式は, 分子拡散が分子の平均速度と平均自由行程の積で与えられることとのアナロジーから導かれる. さらに地表面に近い境界層 (接地層) ではモニン・オブコフ相似則から (例えば, 米原, 2012), 乱流フラックスを算出するモデル (FALL3D など) もある.

なお ASHFALL など Table 1 に示したいくつかの TTDM には鉛直拡散が入っていない. これは水平拡散ほど重要ではなく, 鉛直拡散は水平拡散係数の増加で表現できるとしているためである (Glaze and Self, 1991; Turner and Hurst, 2001 など). 反対に MOCAGE で水平拡散が入っていないのは, 水平格子間隔約 0.5° のオイラーモデルではその欠点である擬似拡散で十分足りるとしているためである (Pisso *et al.*, 2009).

2-2-3 降下過程

テフラは自重が大きいため, その予測では (5) 式の右辺第 4 項の降下項が特に重要である. 噴煙から離脱したテフラの落下速度は, 速やかに重力と浮力, 空気抵抗が釣り合う終端速度に達する (Seinfeld and Pandis, 2006) ので, 一般に輸送計算では初めから終端速度を仮定する (2-1 節の仮定 (c)). つり合いの式から終端速度は,

$$V_t(D, z) = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_a)gD}{3(C_a/C_c)\rho_a}} \approx \sqrt{\frac{4C_c\rho_p gD}{3C_a\rho_a}} \quad (14)$$

と書ける (例えば, Seinfeld and Pandis, 2006). ここで D はテフラの粒径, $\rho_p(D)$, $\rho_a(z)$ はテフラと空気のみかけ) 密度, C_a は抵抗係数, C_c はカニンガム補正係数であり, 近似式では $\rho_p \gg \rho_a$ であることを用いた. 粒径の定義は色々あるが (例えば, Riley *et al.*, 2003; Bagheri *et al.*, 2015), TTDM では Wilson and Huang (1979) や Suzuki (1983) 以来, 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 : 短軸の径) がよく用いられる. 空気の抵抗係数は, レイノルズ数 $Re \equiv \rho_a V_t D / \eta_a$ ($\eta_a(z)$ は空気の粘性率) が低い層流領域では, 球形粒子に対するストークスの抵抗係数:

$$C_a = \frac{24}{Re} \quad (15)$$

が基本的である. またカニンガム補正係数は, クヌーセン数 $Kn \equiv 2\lambda_a/D$ (λ_a は空気分子の平均自由行程) の単調増加関数で $C_c \geq 1$ を取る. C_c はテフラの表面で空気分子がスリップすることによる空気抵抗の減少を補正する係数で, テフラの粒径が空気分子の平均自由行程と同じ

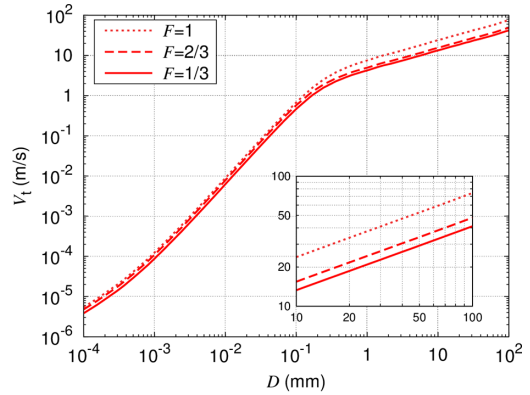
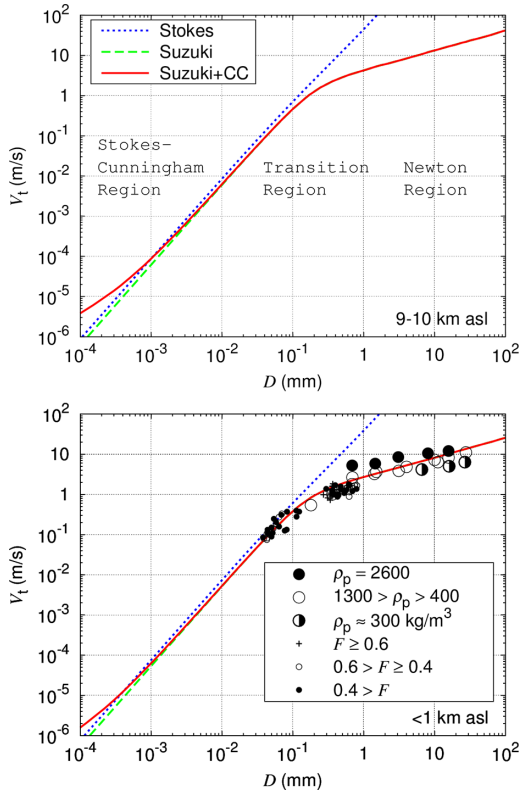


Fig. 3. Terminal fall velocities of tephra particles distributed (upper) from 9 km to 10 km a.s.l. and (lower) from surface to 1 km a.s.l. (left) Comparison of Stokes' law (dotted line), Suzuki's law (dashed line) and Suzuki's law with Cunningham correction (solid line) with density $\rho_{pm} = 1,000 \text{ kg/m}^3$ for lapilli and form factor $F = 1/3$ for Suzuki's law. (right) Comparison of the extended Suzuki's law with $\rho_{pm} = 1,000 \text{ kg/m}^3$ and $F = 1$ (dotted line), $F = 2/3$ (dashed line) or $F = 1/3$ (solid line, same as upper-left figure). In the lower-left figure, the large symbols denote the observation values by Walker *et al.* (1971) and small ones denote the pumice values by Wilson and Huang (1979). After Suzuki (1983, 1990), Sparks *et al.* (1997) and Shimbori *et al.* (2014).

程度に小さくなり、テフラにとって大気を流体と見なせなくなる環境 ($Kn \sim 1$) で有効になる。大気は密度が減少する高層ほど平均自由行程が長くなるので、カニングガム補正は特に成層圏での細粒火山灰に必要とされており (下鶴, 1989), いくつかの TTDM で考慮されている (Table 1).

球形に近い細粒火山灰に対して (15) 式は有効であるが、高レイノルズ数の乱流領域にある粗粒火山灰や火山礫に対しては拡張が必要である。テフラの形状も考慮した抵抗係数は、Wilson and Huang (1979) の形状因子 $F \equiv (a_2 + a_3)/2a_1$ を用いた実験式が代表的である。さらに F 依存性を修正した Suzuki (1983) の抵抗係数は、

$$C_a = \frac{24}{Re} F^{-0.32} + 2\sqrt{1.07 - F} \quad (16)$$

で表される。(16) 式の右辺第 1 項は粘性抵抗で (15) 式の拡張、第 2 項が慣性抵抗であり、この粘性項と慣性項の和をもって、幅広いテフラの粒径分布に応じたレイノルズ数の変化に対応している。(16) 式を (14) 式に代入して RATM (ただし、カニングガム補正は粘性項のみに適用) で求めた、テフラの終端落下速度の粒径依存性の例

を Fig. 3 に実線で示す。テフラのみかけ密度は、国土庁防災局 (1992) や内閣府・他 (2013) などと同様に火山礫の密度を $\rho_{pm} = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 相当と仮定し、鈴木 (1990) により粒径の減少とともに $\rho_p = 2,400 \text{ kg/m}^3$ まで増加させ、また形状因子は気象庁 (2014) で検討された値として東京 VAAC や降灰予測で使用している $F = 1/3$ を用いた。空気の $\rho_a, \eta_a, \lambda_a$ は、GPV の密度、気温および気圧から算出される。比較のため、Fig. 3 の上段に海拔 9~10 km, 下段に 1 km 以下、左列は (15), (16) 式でカニングガム補正しない場合 ($C_c = 1$, 点線と破線), 右列は F を 2 倍 (破線) および 1 (球形, 点線) にした場合を重ねて示した。合わせて左下図には、(16) 式の元になった地表における落下速度の実測値をプロットした。落下速度は、高層ほど速くなることや不整形になるほど遅くなることなど (詳細な説明は、Sparks *et al.*, 1997; 小屋口, 2008; Schwaiger *et al.*, 2012; Folch, 2012; 新堀・他, 2014 など参照), 空気密度や気温など大気場の状態および粒径やみかけ密度、形状さらには落下姿勢などテフラの物性の双方によって有意に変化することを、これらの図は示している。

TTDM で使用される抵抗係数のモデルは、(15), (16) 式のほかにも多数ある。 Re の大きさに応じて抵抗係数を

与える White (1974), Arastoopour *et al.* (1982), Bonadonna and Phillips (2003) や Pfeiffer *et al.* (2005), 2 次元的な円形度や 3 次元的な球形度などから形状因子を定義して抵抗係数を与える Ganser (1993) や Alfano *et al.* (2011), (14) 式の反復計算や実験式により終端落下速度を直接求める Nöslund and Thaning (1991) や Dellino *et al.* (2005) などがある。

2-2-4 沈着過程

テフラが地表面に沈着（積灰に相当, 小山, 2005）する過程には, 大気中に存在する水物質の影響を受けずに地表面に付着する乾性沈着 (Fig. 1 に示した dry deposition) と, 雲や雨, 雪などに取り込まれて強制的に大気中から除去される湿性沈着 (同図の washout および rainout) がある。

2-2-4-1 乾性沈着

ここで述べる乾性沈着は, 接地層内での地表面沈着である。乾性沈着は粒径に依存するが, テフラの場合, 単独で降灰に至るような粒径の大きい粗粒火山灰や火山礫は落下速度が大きいため, また細粒火山灰は地表付近まで落下するのに時間がかかるため, TTDM による予測において再飛散 (2-2-5-2 節) などを対象としなければ, その寄与は大きくない (Folch, 2012)。

乾性沈着の定式化は, 沈着速度と抵抗モデルによる表現が一般的である。乾性沈着による下向きフラックス (沈着率) F_d は, 接地層内のテフラの濃度に比例すると考えて

$$F_d = V_d c \quad (17)$$

と表し, 沈着速度 V_d を導入する (例えば, Seinfeld and Pandis, 2006)。沈着速度は, F_d を電流, c を電位差に見立て, 乱流拡散による空気力学的抵抗 r_a に, 地表面近傍 (粗度長より下層) の準層流層内の抵抗 r_b と地表面での抵抗 r_c を直列に繋いだ, オームの法則とアナログカルな抵抗モデルにより,

$$V_d = \frac{1 - r_c V_t}{r_a + r_b + r_c + r_a r_b V_t} + V_t \quad (18)$$

と与えられる (例えば, 福山・他, 2004)。ただし (18) 式には重力落下が並列的に考慮されている。テフラのような粒子の乾性沈着は r_a に大きく依存するが, r_b には細粒火山灰のブラウン拡散や (慣性) 衝突などの効果が含まれている。 r_c は通常, 粒子の場合は完全吸収 ($r_c = 0$) が仮定されるが, 跳ね返りや再飛散などを考慮するときはこの項が必要になる。これらの抵抗や沈着速度の具体的な表式や値については, 各 TTDM で違いがあるので, Table 1 に記した文献を参照されたい。なお (18) 式の沈

着速度を, 質量保存を満たすように修正した式が Venkatram and Pleim (1999) により示されており, Webster and Thomson (2011) では重力落下による降下過程とまとめて, これに類する式が乾性沈着に使われている。

ラグランジュモデルでは, 乾性沈着を確率的に計算することができる (例えば, 佐藤・他, 1995)。オイラー記述の (17) 式の両辺にタイムステップを乗じ, 乾性沈着の対象とする接地層の厚さ L_r を導入して無次元化すると, この層内にあるトレーサの 1 タイムステップあたりの沈着確率は

$$P_d \equiv \frac{F_d}{c L_r} \Delta t = \frac{V_d}{L_r} \Delta t \quad (19)$$

と与えられる。このような確率的な定式化を用いる場合は通常, 降下過程と乾性沈着は別々のステップで解く。

2-2-4-2 湿性沈着

雲や降水がある場所で起こる湿性沈着もまた, テフラの粒径に依存し, 特に自重では短時間で地表まで落下できない細粒火山灰に有効に働く。湿性沈着は起こり方の違いから, さらにウォッシュアウトとレインアウトに分けられる。Fig. 1 に示したように, 浮遊火山灰が降水 (雨のほか, 雪や霰なども含む) に衝突されて地表へ運ばれるのがウォッシュアウト, 雲粒子 (雲粒と氷晶) の凝結核や凍結核となり大気中から除かれるのがレインアウトであり, 起こり易い場所の違いから, 前者は雲底下洗浄, 後者は雲内洗浄とも呼ばれる (例えば, 藤田・他, 2014)。灰混じりの降水現象である泥雨 (灰雨) は, 火山灰のウォッシュアウトに対応する。

ウォッシュアウト

湿性沈着の定式化は, 洗浄係数と降水強度による表現が一般的である。(1) 式において, ウォッシュアウトに関する濃度変化を

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\Lambda_w c \quad (20)$$

と表し, 洗浄係数 Λ_w を導入する (例えば, Seinfeld and Pandis, 2006)。ウォッシュアウトの洗浄係数は, 降水強度 R [mm/h] のとき, 平均粒径 D_r の降水粒子による粒径 D のテフラの捕集効率を $\varepsilon(D_r, D)$ として,

$$\Lambda_w = \frac{3\varepsilon(D_r, D)}{2D_r} R \approx AR^B \quad (21)$$

の形で与えられる (藤田・他, 1989; 北田, 1994; Sportisse, 2007 など)。ただし最右辺の一般形では, D_r と R の間に成り立つ経験式を用いて変形し, 捕集効率に関係する A 係数とこの経験式に依存する B 係数で近似している。 A ,

B 係数は、ウォッシュアウトを導入している多くのモデルで用いられており、その代表値を Table 1 に示した。さらに NAME などでは、液体の雨と固体の雪・霰など降水粒子の相の違いや、降水が層状性か対流性かなどの違いによって、これらの係数を調節している。しかし、ブラウン拡散、さえぎり、衝突など各過程の総和で与えられる捕集効率の粒径依存性（例えば、藤田・他, 2014）が、 A 係数では一つの値で代表されていることに注意する。

湿性沈着も乾性沈着と同様に確率的に計算することができる（例えば、新堀・他, 2010）。オイラー記述の (20) 式は、両辺を地表面から雲底高度 L_b まで積分すると、(17) 式と同様に、ウォッシュアウトによる湿性沈着率：

$$F_w \equiv V_r c = \int_0^{L_b} \Lambda_w c(z) dz \quad (22)$$

の形に書ける。ここで $V_r = -dz/dt$ は降水粒子の代表的な落下速度である。(21) 式を (22) 式に代入すれば、(19) 式と同様に、1 タイムステップあたりのウォッシュアウトの確率 $P_w = AR^B \Delta t$ が与えられる。

レインアウト

レインアウトによる湿性沈着についても、NAME では (21) 式と同様に、洗浄係数 Λ_r の A, B 係数による表式が使用されている (Webster and Thomson, 2014; Leadbetter *et al.*, 2015)。また別の表現として、FLEXPART や HYSPLIT などでは、洗浄比が用いられている。洗浄比 S_r は、レインアウトによる湿性沈着率がテフラの大気中濃度と降水強度に比例すると考えて、

$$F_r \equiv S_r c R = \int_{L_b}^{L_t} \Lambda_r c(z) dz \quad (23)$$

により導入される。ただし L_t は雲頂高度であり、 $L_t - L_b \equiv Z$ は雲の厚さ、下層雲の場合は雲（気柱）の高さを表す。ここでテフラの気柱濃度が高度に依らず一様と仮定すれば、平均的な洗浄係数は $\Lambda_r = S_r R/Z$ となる（例えば、藤田・他, 2014）。洗浄比は一例として、Hertel *et al.* (1995) より

$$S_r = \frac{f_{nuc}}{LWC} \quad (24)$$

で算出される。ただし、 LWC は雲水量、 f_{nuc} はテフラが雲粒子になる割合（活性度）である。

オフラインの TTDM においてレインアウトやウォッシュアウトの計算が難しいのは、どこに雲があり、どの高度から雨や雪が降っているかを、限られた GPV の入力値から診断することである。例えば、FLEXPART や HYSPLIT は相対湿度のしきい値から雲の高さを診断、

FALL3D でウォッシュアウトを適用するときは大気境界層内を対象にしており、モデルごとに雲の考え方が異なる (Kristiansen *et al.*, 2012)。GPV に雲水量があれば雲の診断に使えると考えられるが、雲内にレインアウトされたテフラが落下してくるまでの雲内部での運動やその間の雲の移動をどのようにモデル化するかなど、次節で述べる凝集と関わる問題もあり、多くの課題がある。

2-2-5 その他の過程

以上、述べてきた TTDM の基本的な過程のほか、重要ではあるが十分にモデル化できていない凝集と、一旦地表面に沈着した後の二次的な再飛散の各過程について簡単に述べる。

2-2-5-1 凝集

凝集は、Sparks *et al.* (1997) によれば、乾いた凝集体、火山豆石、泥雨に分類され、噴煙内外で生じる現象である (Fig. 1 には噴煙内部の aggregation を図示した)。このうち、噴煙外部で大気由来の水物質（固相を含む）が関与した火山豆石や泥雨などの湿性凝集は、前節のレインアウトおよびウォッシュアウト (Fig. 1) と関わる現象であるが、テフラ間相互作用が働く点が異なる。凝集現象は国内外で噴火規模に依らず多くの観測事例があり（例えば、大野・他, 2005; Durant *et al.*, 2009）、湿性沈着と同様に、単独では地表まで到達しえない細粒火山灰の落下を促進させるため（小屋口, 2008）、この過程を TTDM に組み込むことは重要である。しかしながら Table 1 に示した TTDM で凝集を陽に考慮しているのは、オイラーモデルの FALL3D など限られており、現業モードではまだない。この理由として、ラグランジュモデルはトレーサー間の化学的な相互作用の取り扱いに適さない (Dingwell and Rutgersson, 2014) ことがある。したがって現状のラグランジュ記述の TTDM による予測は、火口から近地の降灰量が過少、大気中の火山灰濃度と遠地の降灰量が過多の傾向になる問題がある (Devenish *et al.*, 2012a, b; Brown *et al.*, 2012)。

凝集モデルには、全粒径分布をア・プリオリに変化させる簡便なもの（例えば、Cornell *et al.*, 1983; Bonadonna *et al.*, 2002）から、凝集に関わる物理過程を考慮した精緻なもの（例えば、Costa *et al.*, 2010）までいくつかある (Brown *et al.*, 2012)。Costa *et al.* (2010) は、マグマおよび大気由来の水物質によるテフラ同士の付着と、テフラのブラウン運動、大気層流場/乱流場における速度勾配、テフラ間の落下速度差による衝突（例えば、高橋, 2003）を考慮して湿性凝集をモデル化している。凝集は噴煙内部で起こると仮定してこのモデルを実装した FALL3D (Folch *et al.*, 2010) では、例えば 1980 年セント・ヘレンズ火山噴火で生じた降灰分布の飛び地（降灰量の極大値）

を再現している。他方、乾性凝集は湿性凝集より寄与が小さいと考えられており、両者を区別して考慮しているTTDMはまだない。乾性凝集のモデルには、例えば、テフラ間に働くクーロン力により生じる凝集を(14)式に現れる抵抗係数の変化で表すJames *et al.* (2003) などがある (Brown *et al.*, 2012; Folch, 2012)。

2-2-5-2 再飛散

再飛散とは、一度地表面に沈着したテフラが、強風によって舞い上がり再び大気中を浮遊する現象で、煙霧、黄砂、風塵、砂塵嵐などと同様の大気塵象である。再飛散が発生すると、視程(視距離)が低下して交通機関などへ影響を及ぼすため (Barsotti *et al.*, 2010)、非噴火時であってもVAAが発表されることがあり(カトマイ火山やブジェウエ・コルドンカウジェ火山群など、WMO, 2015)、長期的にはレスの形成に関係する(早川, 1996)。

再飛散のモデル化は、一度テフラが積もった後の現象であるため、化学輸送モデルによる黄砂予測(例えば、Tanaka *et al.*, 2003)のように、TTDMの新たな初期値(境界値⁴)問題と見ることでもできる。したがって、再飛散の影響を受けた可能性がある観測値に基づいて、逆解析(例えば、Tupper *et al.*, 2006; Connor and Connor, 2006)などを実行する場合、直接の供給源は火口になく(Thorsteinsson *et al.*, 2012)、また二次凝集の可能性もある(Liu *et al.*, 2014)ので注意を要する。

再飛散が起きる条件は、地表付近の風速(摩擦速度)と地表面の状態(土壤テフラの粒径や密度、植生や粗度、水分量など)に依存する。乾燥状態にあって、摩擦速度 v_* がある臨界速度 v_{*t} を超えると、土壤テフラの跳躍(サルテーション)が始まり、風が強くなるほど再飛散は激しくなる。黄砂のようなエアロゾルに対していくつかある飛散モデル(例えば、Shao, 2000)が、テフラの再飛散に応用されている。再飛散による鉛直上向きの放出フラックスは、例えばNAMEの運用では、 $v_* \geq v_{*t} = 0.4 \text{ m/s}$ かつ降水強度 0.01 mm/h 未満のとき、直径が $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の土壤テフラに対して一律に $(v_* - v_{*t})$ の3乗に比例する形で、地表面から 10 m まで一様に与えている(Leadbetter *et al.*, 2012)。またHYSPLITでは、(i) v_* の4乗のみに比例(Escudero *et al.*, 2006)または、(ii)土壤の粒径と種類(土性)を考慮(Draxler *et al.*, 2001)、さらにFALL3Dでは、(iii)サルテーションの水平フラックスと関係づけた3種類の放出フラックスが実装されている(Folch *et al.*, 2014a)。後者ほど精緻になるが、フラックスモデルは土壤水分量や粗度などに敏感で、テフラに覆

われた状態でこれらの量を推定することは観測も含め難しい課題であり、単純なモデルであっても価値を失っていない。

2-3 大気場の数値モデル

Table 1に挙げたTTDMはいずれもオフラインモデルである。すなわち、前節で述べてきたテフラの各過程を計算するのに必要な大気場は、TTDMの外部から入力する(Fig. 2)。TTDMを駆動させる大気場として、解析モデルではゾンデなどによる1次元の高層観測データが使われることもあるが、はじめに述べたように現在では、数値予報モデルで計算されたGPVが広く用いられている(Table 1)。一般にGPVにはときどきの大気場の解析値と、この解析値を初期値として数値予報モデルで未来を予測した予報値の2種類がある。現業気象機関の数値予報ルーチンでは、日々の天気予報のために、過去の予報値と現在の観測値のデータ同化(例えば、露木・川畑編, 2008)により、新たな解析値および予報値を作成するデータ同化サイクルを、スーパーコンピュータ上で実行している。この目的とは別に、過去の大気場を知るために再解析(Onogi *et al.*, 2007; Kobayashi *et al.*, 2015など)も行われている。

大気場の数値予報モデルによる解析値や予報値の作成には比較的大規模な計算が必要になるのに対し、オフラインのTTDMでは、大気場を背景場としてテフラの輸送を受動的(パッシブ)に、すなわちトレーサーは大気場(大気の流れなど)を変えないと仮定(Webster *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2013)するため、計算負荷が軽くなるのが利点である。即時的な情報発表が求められる現業モードで、パッシブなTTDMが運用されているのは主にこの理由による。テフラ輸送を予測するときはそのときの予報値が必要であるが、過去事例を対象とするときはより精度の高い解析値や再解析値を利用することも、オフラインモデルの特徴である。

オフラインのTTDMに入力されるGPVの要素は、輸送計算に必要な風、落下速度に必要な気温や気圧、空気密度、湿性沈着に必要な湿度や降水量などである。このうち、最も重要な要素は風であり(Witham *et al.*, 2012b)、TTDMの予報誤差も風の予報誤差に大きく依存する(Bowman *et al.*, 2013)。数値予報GPVの例として、NAMEに入力される英国気象局(UKMO)の全球領域統一モデル(MetUM)と、G/RATMに入力される気象庁の全球モデル(GSM)、メソモデル(MSM)および局地モデル(LFM)の仕様をTable 2に示す。いずれもオイラーモデ

⁴ ラグランジュ記述の移流拡散モデルでは、輸送計算する前のトレーサーの放出源(供給源)における“初期”分布のことを「初期値」と呼んでいる。「初期値」をある時刻での値に限定する場合、その時刻以外の“初期”分布を「境界値」と呼んで区別することがある。

Table 2. Specifications of NWP models used in the UKMO-NAME, JMA-GATM and RATM calculations (as of Aug. 2015).

Institution	UKMO		JMA	
	MetUM (Global)	GSM (GSM1403)	MSM (NHM)	LFM (asuca)
NWP	MetUM (Global)	GSM (GSM1403)	MSM (NHM)	LFM (asuca)
Forecast time	144 h (00, 12 UTC)* 48 h (06, 18 UTC)	84 h (00, 06, 18 UTC) 264 h (12 UTC)	39 h (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC)	9 h (hourly)
Temporal resolution	3 h	3 h	1 h	
Forecast domain	Global	Global	Japan and its surroundings	
Horizontal resolution	17 km	20 km	5 km	2 km
Vertical levels (Model top)	70 (80 km a.s.l.)†	100 (0.01 hPa)‡	48+2 (21.8 km a.s.l.)	58 (20.2 km a.s.l.)
Vertical coordinate	z	$\sigma-p$	Hybrid terrain-following	
Input elements	3D wind, temperature, pressure, specific humidity, dynamic cloud water/ice, etc.	2D horizontal wind, temperature, height, relative humidity, precipitation, etc.	3D momentum, potential temperature, pressure, density, mixing ratio, precipitation, etc.	
TTDM	NAME	GATM	RATM	

* In London VAAC, the NAME uses three hourly GPVs only from 00 and 12 UTC.

† In London VAAC, the NAME uses the lowest 59 levels up to approximately 30 km a.s.l.

‡ In Tokyo VAAC, the GATM uses the pressure levels (surface, 1,000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 and 10 hPa).

ルであり、MetUM と GSM はセミラグランジュ法で計算されている。また MetUM と MSM/LFM は非静力学モデルであり 3 次元の風の GPV が TTDM で使える。これに対し、静力学モデルである GSM の風の出力要素は 2 次元の水平風なので、鉛直流は診断して GATM で用いている (2-2-1 節参照)。

さて、自然現象に現れる種々の階層性のうち、大気現象については現象固有の時間スケール (周期や寿命) と水平スケール (波長や規模) の観点から、Orlanski (1975) による分類がある。数値予報モデルを用いて大気現象を解析し予測するには、現象の時空間スケールを表現できる分解能 (解像度) があることが必要である。このことは、オンラインあるいはオフラインで数値予報モデルの GPV を入力した TTDM によるテフラ輸送の予測についても同様である。つまり、数値予報モデルが対象とする大気現象の違いによって、TTDM で表現でき予測可能性のあるテフラ輸送の時空間スケールも決まってくる。大気現象の時空間スケールと TTDM の予測可能性の関係について、G/RATM の例を Fig. 4 に示す。数値予報モデルにおいて表現できる現象の最小スケールは、通常、格子間隔の 5~8 倍程度といわれており (永田・萬納寺, 1994; 藤田, 2012)、TTDM もこれに準じる。またオフラインの TTDM にとっては、GPV の時間間隔が粗いことも制約になる (2-1 節の (x))。すなわち、元の数値予報モデルでは細かい時間刻みで計算されており、例えば Table 2 の中で最も分解能が高い次世代非静力学モデル (asuca) である LFM の場合、タイムステップ 50/3 (≈ 16.67) 秒である (気象庁予報部, 2014)。これに対し、TTDM に入力できる GPV の出力間隔は、LFM の場合 1 時間ごとで

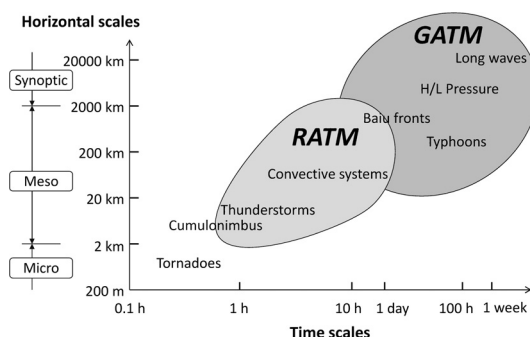


Fig. 4. Horizontal and time scales of atmospheric phenomena covered by the JMA's TTDMs (after Orlanski 1975; Muroi, 2012).

あり (Table 2)、これより短い時間スケールの現象は GPV から欠落している。そして TTDM の内部では、一般に GPV の出力間隔より短いタイムステップ (現在、LFM を入力する RATM の場合、最短 1 分) で計算するため、テフラ輸送の予測可能性が制限されることに留意しなければならない。また、GPV がその時刻の瞬時値か予報時間内の平均値かの違いも、その値を内挿して使用する TTDM では注意を要する。

3. テフラ輸送の予測の実例

テフラ輸送の予測プロダクトには、はじめに述べたとおり、大気中の浮遊テフラ (火山灰雲) を対象とした VAA と、地表面への降下テフラ (降灰) を対象とした降灰予報がある。本章ではそれぞれについて、2010 年エイヤフィヤトラヨークトル火山噴火と 2011 年新燃岳噴火

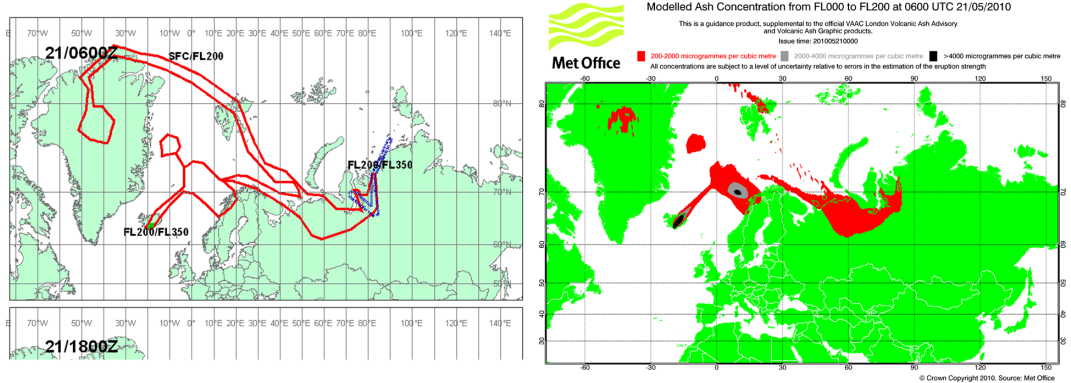


Fig. 5. Example of VAG issued by the London VAAC during the 2010 Eyjafjallajökull eruption. Forecast time is 6 h from initial time 00 UTC on 21 May 2010. (left) Official VAG product (advisory number 2010/142). Contours indicate ash predicted areas at three different height levels from surface to FL200 (0–6.1 km a.s.l.), from FL200 to FL350 (6.1–10.7 km a.s.l.) and from FL350 to FL550 (10.7–16.8 km a.s.l., not expected in this case). (right) Supplementary chart to the official VAG. Contours indicate ash predicted areas with three different concentrations from 0.2 to 2 mg/m³, from 2 to 4 mg/m³ and >4 mg/m³. Both charts were calculated by the UKMO-NAME.

の事例を取り、VAAと降灰予報の現状を紹介し、両者に共通するTTDMの検証について述べる。

3-1 火山灰雲の予測と航空路火山灰情報—2010年エイヤフィヤトラヨークトル火山噴火の事例

アイスランド南部に位置するエイヤフィヤトラヨークトル火山(標高:1,666m)では2010年3月20日に氷底噴火が始まり、4月14日に山頂付近からマグマ水蒸気爆発が発生した。アイスランド気象局(IMO)のCバンド気象レーダーによると、この噴火に伴う噴煙エコーは5月21日まで観測され、6時間平均の噴煙高度は最高で海拔7~8kmに達し、火山爆発指数VEI=3~4相当の噴火であった(Arason *et al.*, 2011; Karlsdóttir *et al.*, 2012; Gudmundsson *et al.*, 2012; Kristiansen *et al.*, 2012)。テフラの噴出が5月23日頃に止まった後も、強風時には、火山灰の再飛散が観測されている(Thorsteinsson *et al.*, 2012; Leadbetter *et al.*, 2012; Arnalds *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014)。

この噴火当時、アイスランドを責任領域にもつロンドンVAAC(UKMOに設置)から発表されたVAGの一例をFig.5左図に示す。VAGは通常、火山灰雲が検知されている間、6時間ごとに発表され、1回の発表につき実況図および6時間ごと18時間先までの予測の4図一組になっている。この予測はIMOからロンドンVAACに送られたパイロットレポートや噴煙エコー頂高度などの情報に基づき、NAMEで計算された(Karlsdóttir *et al.*, 2012)。入力値はTable2に示したMetUMであるが、2010年当時は水平格子間隔が現在より粗く25kmであった点が異なる。また供給源モデルは、Table1に示し

たように、火口から観測された噴煙高度までの一様な線状源であり、粒径分布はデフォルトで直径0.1~100 μ mを6ピンで与えられている(Leadbetter and Hort, 2011; Witham *et al.*, 2012b; Beckett *et al.*, 2014)。さらにNAMEの計算では、噴出後144時間経過したトレーサはカットオフする消散が入っているのが特徴である(Webster *et al.*, 2012)。Fig.5左図から分かるように、ICAO Annex 3(脚注1参照)で定められた公式のVAAでは、火山灰雲のあり/なしについてのみ、予想高度および領域を示すことになっており、このことは現在でも変更ない。これはゼロ容認(zero tolerance)、すなわち少しでも火山灰雲が予想されれば民間航空機は飛ばない(any ash, no fly)原則に基づいていたためである(Zehner *et al.*, 2012; Langmann *et al.*, 2012; Bonadonna *et al.*, 2012)。

4月14日の噴火から始めの6日間は、主に北風によってヨーロッパ広域に火山灰雲が広がり、第二次世界大戦以来、最大となる規模で航空便が欠航し各地の空港が閉鎖されたため、世界の航空輸送による経済活動などに大きな影響が及んだ(Petersen, 2010; 安田・他, 2011; Zehner *et al.*, 2012; Petersen *et al.*, 2012; Karlsdóttir *et al.*, 2012; UNISDR, 2015)。この主たる原因はもちろん自然起源の火山噴火にあるが、人為的な要因として、VAAの予測結果に基づくゼロ容認の飛行制限が指摘された。これを受けて、ヨーロッパ・北大西洋(EUR/NAT)地域では、噴火の期間中、何回かの改定を経て5月21日には、火山灰濃度が4 mg/m³以上は全面飛行禁止、2~4 mg/m³は事前許可が必要、0.2~2 mg/m³は条件遵守で飛行可能、0.2

mg/m³未満は通常飛行可能の飛行禁止基準が定められた。この基準に基づき、公式のVAAとは別に補助的情報の位置付けでUKMOから発表された火山灰濃度の分布予測がFig. 5右図である。同じ予報時刻の左図と比べて、予想範囲に濃淡が付いていることが分かる。濃度予測を行うためには、先の供給源モデルにおいてさらに質量噴出率を推定する必要がある。この課題に対し、NAMEでは次のような改良が行われた(Webster *et al.*, 2012; Witham *et al.*, 2012b)：当初使われた噴煙の高さと粒子供給率に関するVAFTADの参照テーブルを、Mastin *et al.* (2009)で調整することにより噴出率を求める。ただし長距離輸送を対象とした粒径分布を設定しているため、凝集も含め火口近傍に落下する質量欠損を考慮してMastin *et al.* (2009)で求まる全噴出率の5%を与える。さらにモデルでは表現できない局所的なピーク濃度を情報(Fig. 5右図)に示すために、(6)式で算出される平均濃度をモデルの分解能を考慮して20倍(現在は分解能が上がったため10倍)する。以上が2010年噴火の際に、NAMEの計算に基づき発表されたVAAと補助的情報の概要であるが、このほかにも各国の気象機関や研究機関ではTable 1に示していないモデル(例えば、Bartnicki *et al.*, 2010)も含め、火山灰雲の予測計算が多く行われた(Kristiansen *et al.*, 2012)。

火山灰雲の濃度予測については、ICAOを事務局とする国際火山灰タスクフォース(IVATF)が2010年噴火の最中に発足し議論された。しかし、予測精度の検証が不十分であることと安全運航のための正確な基準がないことから、予想濃度に基づく危険空域(danger area)の設定については勧告に至らず、IVATFは2012年に解散した。その後、議論はICAOの国際航空路火山監視運営部会(IAVWOPSG, 原田, 2009)に引き継がれ、濃度予測に関する技術開発は中長期課題になっている(上山, 2015)。VAA業務に関わるTTDMの開発は、IAVWOPSGで作成されたロードマップが公式な指針となるが、研究モードではWMOとの共催で開かれたワークショップ(Bonadonna *et al.*, 2012, 2014)や雑誌*Atmos. Environ.* **48** (2012)などで組まれた特集の記事が参考になる。これらの報告から抽出されるTTDMの課題については最終章にまとめることにする。ここでは目下、VAAの内容改善として予報時間を24時間先まで延ばすことが要請されており(上山, 2015)、一部のVAACから24時間予測の試験提供が始まっている(WMO, 2015)ことを記しておくに留める。

3-2 降灰の予測と降灰予報—2011年霧島山(新燃岳)噴火の事例

この節では、2011年新燃岳噴火における降灰の予測事

例について概要を述べた後、日本をはじめとする各国の降灰予報の現状を整理する。鹿児島・宮崎県境に位置する新燃岳(標高:1,421 m)では、2011年1月26日に本格的マグマ噴火が始まった。翌27日にかけて準プリニー式噴火が3回発生し、気象庁のCバンド気象レーダー観測網では、最高で海拔8.3~8.5 kmの噴煙エコーが観測された。この噴火に伴い、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テフラが落下した。産業技術総合研究所などにより調査されたこの2日間の降灰分布をFig. 6左図に示す。推定されたテフラの総質量から、2011年の噴火はVEI=3相当であった(Nakada *et al.* (2013)と*Earth Planets Space* **65.6** (2013), 地震時報**77.3** (2013)の特集などを参照)。

1月26~27日のテフラの輸送シミュレーションは、気象庁の非静力学モデル(JMA-NHM, Saito, 2012)によるHashimoto *et al.* (2012)、東京大学地震研究所の3次元非定常モデル(Suzuki *et al.*, 2005)によるSuzuki and Koyaguchi (2013)のほか、Table 1に挙げたTTDMではオイラーモデルのFALL3Dを用いた服部・他(2014)により実行されている。一例としてFig. 6右図に、ラグランジュモデルであるRATMに、噴火当時のLFMのGPVを入力して予測した結果を示した。この初期値はSuzuki (1983)の供給源モデルに依拠し、Hashimoto *et al.* (2012)と同様に、噴煙エコー頂高度を使用して作成、粒径分布は中央粒径0.25 mm、標準偏差1.0の対数正規分布(ただし上限96 mmと下限0.65 μmにカットオフ)を仮定、噴出量はモートの噴煙の高さの4乗則(Sparks *et al.* (1997)の0.259とMastin *et al.* (2009)の0.241の中間値)を援用して、気象レーダーでボリュウムスキャンする10分ごとに推定した。RATMの供給源モデルとして現在、Suzuki (1983)を使用しているのは、降灰予報では全国の活火山を対象として、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する必要があるためである。この方法では、噴煙の高さとその継続時間が、火山灰雲の流向と降灰量の予想の双方に影響することに留意を要する。このときの火山灰雲は、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場で別の方向に流れていたことが気象衛星から観測されており(例えば、飯野・他, 2011)、初期値に用いた噴煙エコー頂高度の時間変化と対応していた。またFig. 6左図の降灰分布と比較して、右図の降灰予測は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持つ降灰域の特徴はほぼ再現でき、予想降灰量は、火口に接近するほど降灰量の勾配が大きくなり水平格子間隔が十分細くないため過少になるが、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という結果が得ら

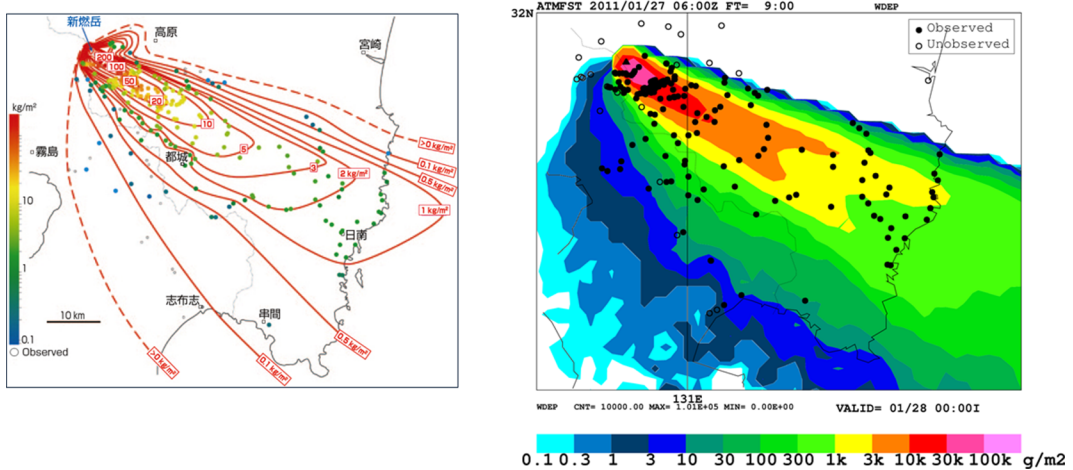


Fig. 6. Comparison of tephra fall quantity for the eruption at Shinmoe-dake volcano. (left) Observation of tephra fall deposits (kg/m^2) during 26-27 January 2011 (from Furukawa, 2011). (right) Prediction of accumulated tephra fall (g/m^2) from initial time 15 JST 26 until 00 JST 28 January 2011 by the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

れている。さらに降礫の範囲について、噴煙内部で高所まで持ち上げられて風で流される火山礫は TTDM で予測可能であり、降礫予測では 2-2-3 節で述べた火山礫の密度および形状が落下時間および輸送距離に有意に影響することを RATM で確認している (新堀・他, 2014)。

気象庁の降灰予報ははじめに述べたとおり、2007 年 11 月の気象業務法の改正を受け、火山現象予報の一つとして、2008 年 3 月から発表を開始した。当初は降灰域のみの予報であったが、上述の RATM による降下テフラ予測の研究を基に、降灰予報に関するニーズ調査 (気象庁, 2013) を行い、2012 年度に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」を開催した。さらに降礫については、2012~13 年度に開催された「火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会」において即時的予測の方法が検討された。これらの検討会からの提言 (気象庁地震火山部, 2013) や検討結果 (気象庁, 2014) を踏まえ、約 1 年間の桜島での試験提供を経た後、2015 年 3 月より新しい降灰予報の提供を開始した (Hasegawa *et al.*, 2015; 山里, 2015 など)。情報体系は、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 種類の降灰予報に高度化された。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、それぞれの階級における健康被害、交通機関、ライフラインなどへの影響および防災対応を示

した降灰量階級表 (気象庁地震火山部, 2013) を作成して、予報文に示している。なお前者の検討会では、外出困難となる厚さ 2 cm 以上の降灰に対して「極めて多量」の階級を設けることも提案されたが、具体的な防災対応を考える上で検討すべき問題が多いことから、降灰警報の導入を含め、今後の課題とされた。降灰予報 (定時) と (速報) では、火山礫の予想落下範囲も合わせて発表される。

海外では、一般向けに降灰予報を運用している国は多くない。例えば IMO では、2010 年エイヤフィヤトラヨークトル火山噴火の際に火山周辺の特に農家を対象に日降灰量 1 mm 以上の予想降灰域を発表し (Karlisdóttir *et al.*, 2012)、現在は NAME と VOL-CALPUFF が同局で運用されている (Bonadonna *et al.*, 2014)。最近ではアラスカ火山観測所 (AVO) から、公式な予報ではないが、北太平洋 (NOPAC) 地域の火山噴火に関して Ash3d による 5 階級 (100, 25, 6, 0.8, 0.1 mm) の予測が公表されている。またイタリア国立地球物理学火山学研究所 (INGV) のカタニーヤにあるエトナ火山観測所では、市民保護庁向けに、予め想定した 3 つの噴火シナリオに対して、5 つの TTDM (FALL3D, HAZMAP, Tephra2, PUFF (改良版) および VOL-CALPUFF) を 3 時間ごと 48 時間先まで実行し、予想される降灰量に関しては 6 階級 (5000, 1000, 100, 50, 10, 1 g/m^2) で示している (Scollo *et al.*, 2009, 2011; Folch, 2012; Bonadonna *et al.*, 2014)。この複数モデル、複数シナリオによる予報システムは、Folch *et al.* (2008a, b) によって作成された APOLLO と呼ばれるプラット

フォームが原型になっている (Scollo *et al.*, 2008).

3-3 検証

前2節で述べたTTDMによる火山灰雲や降灰の予測は、検証されることによって、その精度が示される。検証作業は、2章で述べた素過程からTTDMの組み立てがボトムアップのモデル開発であるのに対し、トップダウンのアプローチと捉えられる(堀田・原, 2012)。統計的検証は、一般に観測値や数値予報モデルの解析値に対して行われる。ここでは観測値が十分にあることを前提として、テフラや放射性物質の拡散予測の検証に用いられる代表的な指標について述べる。

火山灰雲の予測の検証には、観測として衛星解析を用いることが多い(Stunder *et al.*, 2007)。火山灰雲があり／なしの定性的な観測しかない場合、同じ検証格子について、予測のあり／なしとの4分割表(Table 3)から、適中率、空振り率、見逃し率、バイアスコア、スレットスコアなどのスコア(例えば、原, 2008b)を取るのが一般的である。例えばスレットスコアTSは、CSIやFMSとも呼ばれ、Table 3の記号を用いると

$$TS \equiv \frac{FO}{FO+FX+XO} \quad (25)$$

で定義される。スレットスコアは出現頻度の低い現象に対する予測精度の検証に適しており、レーダー・アメダス解析雨量(R/A)や数値予報の降水の検証(例えば、Nagata, 2011)に使われるように、TTDMではHYSPLIT(Stunder *et al.*, 2007)およびPUFFとの供給源パラメータを変えた比較(Webley *et al.*, 2009)などで火山灰雲の検証に使われており、東京VAACでも同指標によるGATMの検証を行っている(上山, 2015)。 $0 \leq TS \leq 1$ の値を取り完全予報で $TS=1$ となるが、Stunder *et al.* (2007)によると、VAAの18時間予測では $TS > 0.25$ あれば受容可能とされている。スコアによる検証は、火山灰雲だけでなく、降灰予測に対しても適用可能である。

定量的な観測値が得られているときは、予測値と直接比較する指標として、平方根平均二乗誤差(RMSE)や偏り(バイアス)を診るための平均誤差を使うことができる。上記のスコアやこれらの誤差を求める場合、標本の取り方には、時間方向(予報時間ごと)と空間方向(予報象限ごと)があり、目的に応じてより細かく点検できる。例えば、RATMによる降灰予測では、降灰調査による観測値に対して、スコアによる予想降灰域の検証と火口からの距離ごとにRMSEおよび平均誤差を算出して予想降灰量の検証を行っている(新堀・他, 2014)。

数多ある移流拡散モデルのうちのいくつかは、元来テフラが予測対象ではなく、1986年チェルノブイリ原子力

Table 3. 2×2 contingency table. *FO*, *FX*, *XO* and *XX* denote the number of occurrences in each category, respectively.

Predictions	Observations	
	Yes	No
Yes	<i>FO</i> (Hit)	<i>FX</i> (False alarm)
No	<i>XO</i> (Miss)	<i>XX</i> (Correct rejection)

発電所事故(原発事故)を契機に始まった開発に起源を持つ(MLDP0, NAMEやGATMなど)。放射性物質の拡散と対比して、テフラの場合、噴火の規模に応じて鉛直方向のスケールが大きいこと、粒径分布が幅広く、鉛直移流や湿性沈着より重力落下の影響が大きいこと、放射性崩壊は無視できることなどの違いがある。しかし、はじめに述べた大気汚染や放射性物質の拡散予測の検証は長い歴史を持つため(Chang and Hanna, 2004)、その方法はテフラに対しても参考になる。人為起源の環境汚染としては、この10年間で最悪となる福島第一原発事故が2011年東北地方太平洋沖地震の後に発生した。同年、この事故に関する気象解析についての技術タスクチームがWMOに設置され、タスクチーム活動の一つとして、MLDP0, HYSPLIT, FLEXPART, NAMEおよびRATMによる比較計算が行われた(WMO, 2013; 斉藤・他, 2014; Draxler *et al.*, 2015; Saito *et al.*, 2015b)。いずれもTable 1にある移流拡散モデルであり、各々のモデルでは粒径分布、落下速度、沈着速度や洗浄係数などを放射性物質の種類に合わせて調整した上で実行された(Arnold *et al.*, 2012, 2015; Leadbetter *et al.*, 2015; Saito *et al.*, 2015a)。モデル相互比較はその後、化学輸送モデルも含めて日本学術会議(2014)において実施された。タスクチーム活動の検証では、バイアスやFMSのほか、ピアソンの相関係数やコルモゴロフ・スミルノフのパラメータなど(Stohl *et al.*, 1998; Mosca *et al.*, 1998)を規格化して足し合わせたメトリック(Draxler, 2006)を定義して、その値によりランク付けしている。この検証結果から、テフラ輸送にも当てはまると考えられる結論として、数値予報の降水量のみを精度のより高いR/Aに替えても予測は改善しないこと、アンサンブル予測は独立性の高いスコアを有するメンバーを選択して平均を取ると改善することなどが示されている(Draxler *et al.*, 2015; Solazzo and Galmarini, 2015)。

4. おわりに—今後の課題

現在、テフラの移流拡散モデルであるTTDMに考慮されている主な素過程と入力される大気場の数値予報モ

デルおよび TTDM による火山灰雲や降灰の予測と検証について述べてきた。テフラ輸送の予測精度に影響を及ぼす要因のうち、TTDM の初期値を与える供給源モデルやその基になる火山噴煙の観測については本稿では十分に述べなかった。おわりにあたり、TTDM による予測の不確実性の観点から、これら初期値、入力値および移流拡散モデリングにある課題をいくつか挙げる。

初期値の供給源パラメータに関する課題

予測問題では初期値が重要であり、TTDM の予測結果は、供給源モデルを特徴づける噴煙の高さ、噴出率、粒径分布などの供給源パラメータに大きく依存する (TTDM の供給源パラメータ依存性については例えば、Webley and Steensen (2012) や Beckett *et al.* (2014) を参照)。供給源パラメータもまた、TTDM や数値予報モデルと同様に、現業モードか否かによってその性質が異なる。すなわち、現業モードでは現状、噴出率は現業で観測可能な噴煙の高さと継続時間から推定し、粒径分布は予め仮定している (WMO, 2012)。また Table 1 に示したように、放出源の形状や粒子供給率は多くの VAAC で線状源を与えており (3-1 節)、また気象庁の降灰予報では Suzuki (1983) を用いているなど (3-2 節)、いずれの供給源モデルにも風の影響が考慮されていないなどの課題がある。他方、研究モードでは、噴出源のパラメータ (マグマの温度や火口の大きさなど) や大気場のプロファイル (風や湿度など) を陽に考慮した精緻な噴煙柱モデルとして、3-2 節で挙げた国産モデルに加え海外では、USGS の 1 次元モデルである Plumeria (Mastin, 2007) やブリストル大学の PlumeRise (Woodhouse *et al.*, 2013)、マックス・プランク研究所などで開発されている 3 次元非静力学モデルの ATHAM (Herzog *et al.*, 2003 など) などがある。これらの TTDM への適用は、例えば Plumeria が FLEXPART や NAME による逆解析 (Stohl *et al.*, 2011; Kristiansen *et al.*, 2012) で使用されているが、現業モードではまだなく、VOL-CALPUFF の初期値における BENT モデル利用 (2-1 節) のように、いかに運用するかが課題である。さらに ATHAM では、Textor *et al.* (2006) により湿性凝集が実装されており、例えば 2009 年リグウト火山噴火の際の雹の形成に伴う凝集の誘発が再現されている (Van Eaton *et al.*, 2015)。凝集のモデル化は、TTDM と同様に (2-2-5-1 節)、供給源モデルにおいても重要な課題となっている (Bonadonna *et al.*, 2014)。

供給源モデルの改良とともに、精度の高い供給源パラメータを得るには、遠望カメラや航空機からの通報に加え、リモートセンシングによる観測も有効である。特に火口近傍の噴煙観測に対して、3-1, 2 節で示した気象レーダーは昼夜全天候下での観測可能性がある。噴煙か

らのエコー強度や偏波パラメータから降灰量などを導く定量的降灰推定 (例えば、真木・他, 2015) の研究が、自動降灰計 (例えば、田島・他, 2015) などによるグランドトゥースに基づく検証とともに、次の 10 年に進むと予想される。また広域では、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する大気の流れが気象衛星やライダーで捉えられる。衛星観測については金子 (2005) の報告以降、火山灰プロダクト (光学的厚さ、有効粒径、気柱積算量など) の算出やその算出に必要な火山灰雲の光学特性 (複素屈折率) の推定に関する研究が進んでおり (Ishimoto *et al.*, 2016)、2015 年 7 月から運用を開始したひまわり 8 号とともに観測・監視技術の向上が期待される。ライダーに関しても、火山灰雲の観測と予測との比較やその解析から浮遊火山灰の高度分布などを推定する研究が行われている (コリンズ・他, 2007; Dacre *et al.*, 2011; Devenish *et al.*, 2012a; 酒井・他, 2014 など)。そしてこれらの観測は降灰強度など、TTDM による予測の時間方向の検証 (例えば、鬼澤・他, 2013) にも資するものである。さらに迅速化を求めるには、噴火時の地殻変動や震動データから噴出率を推定する Kozono *et al.* (2013) や井口 (2013) の方法があり、それぞれ新燃岳の 2011 年噴火や桜島の爆発/非爆発的噴火で有効なことが示されている。気象庁 (2014) でも検討されており、現業モードで利用するためには他の活火山へ適用できるか考える必要がある。

入力値の時空間分解能に関する課題

Table 1 に挙げた TTDM のようなオフラインの移流拡散モデルは、入力値である数値予報モデルの GPV と対であり、双方の品質がよくなければ予測精度は向上しない (Lin, 2012)。GPV の格子間隔と時間間隔をともに上げることにより、移流拡散モデルの予測精度は改善することが、NAME のバイアスおよび相関係数による検証で示されている (Davis and Dacre, 2009)。格子間隔は、モデル地形の分解能にも関わるため、火口近傍での降灰量の勾配 (3-2 節) や火山風下での山岳波の影響 (Watt *et al.*, 2015) を表現する上でも重要である。2-3 節で述べた現業気象機関の数値予報モデルの空間分解能は年々上がってきているが、GPV の出力時間間隔は粗いままである (Bowman *et al.*, 2013)。移流拡散モデルの入力値としての GPV にも、時空間分解能のバランスが求められる。

移流拡散モデリングのシステム誤差に関する課題

TTDM の現業化にも関わる今後の大きな目標としては、火山灰雲の濃度に関する予測と降灰も含めた確率的予測が挙げられる。濃度予測に関しては、3-1 節で述べたとおり IVATF からの勧告は見送られた。浮遊火山灰が少しでも予想されれば無理な運航はしない方がよいと

思うが、現状、ニーズがあり、気柱積算量に基づく表現などが新たに検討されている (WMO, 2015)。この課題に取り組むには、上述した大気中の火山灰濃度の観測が不可欠であるとともに、移流拡散モデリングの立場からは、その観測値と既存の供給源モデルや TTDM の予測値を基に新たな初期値を解析するための火山灰データ同化 (石井・他, 2015) の研究が今後、重要になると考えられる。また確率的予測については、IAVW ロードマップに記載された課題であり (上山, 2015)、その代表的な方法にアンサンブル予測がある。アンサンブル予測は、データ同化と同様に数値予報では既に現業化されている技術で、予測の不確実性を考慮した複数のモデル計算から確率的に最も確からしい予測を行う。Bonadonna *et al.* (2014) が挙げている TTDM の予測に不確実性をもたらす要因は、(i) 初期値の供給源パラメータの誤差、(ii) 入力値の GPV の誤差、そして (iii) TTDM 自体の不完全性に大きくまとめられる。これらの不確実性に対して例えば、(i) Ash3d あるいは PUFF で噴煙の高さと粒子供給率に摂動を与える Denlinger *et al.* (2012a, b)、(ii) HYSPLIT で水平・鉛直方向に 1 格子ずつの GPV を入力した計 27 メンバーによる Draxler (2003) や BENT モデルを初期値に用いた PUFF (Bursik *et al.*, 2012) で風の場にも摂動を与える Stefanescu *et al.* (2014) などの研究が進行している。

また移流拡散モデリングの本質に関わる (iii) に対しては、2-2 節の素過程の不十分性や各過程における不確実性を抽出することが必要である。例えば、空気の抵抗係数には多くのモデルがあり、そこに考慮されるカニンガム補正は本来、球形粒子のストークスの抵抗係数 (15) 式に対する補正である。不整形粒子に対しては、(16) 式の粘性項のみへの単純適用 (新堀・他, 2014) や Dahneke (1973) のスケール変換したクヌーセン数の関数利用 (Schwaiger *et al.*, 2012) などがあるが、Fig. 3 に示したようにこの領域のテフラの終端落下速度は検証不十分である。他の過程も同様に、TTDM に含まれる不確実性を明らかにした上で、どの要素が予測に及ぼす影響が大きいかを調べるのが肝要と考える。なお、(iii) に対する異なるアプローチとしてマルチモデルアンサンブル (例えば、Solazzo and Galmarini, 2015) があるが、TTDM への適用はまだ見当たらない。

最後に VEI=5 程度の大規模噴火に伴う降灰対策について、広域的な火山防災対策に係る検討会 (2013) からは、その一つとしての確かな予警報のための調査研究・技術開発に取り組むべきことが提言されている。さらに大規模を超える巨大噴火になると、テフラや火山ガスが大気へ及ぼす作用 (放射過程における日傘効果など) によ

り、気候変動も引き起こされる (例えば、高橋, 2012)。巨大噴火に対して傘型噴煙 (Costa *et al.*, 2013) を考慮した FALL3D による放出源推定 (Costa *et al.*, 2014) や、Ash3d による降灰予測 (Mastin *et al.*, 2014) が試みられているが、これらの計算に使用されている GPV には噴火現象が大気場へ与える影響が入っていない。これは入力値に関する課題でもあり、オフラインの移流拡散モデルによる予測の限界を踏まえた上でこの課題に対処するには、硫酸エアロゾル粒子の生成・消滅過程や化学反応を陽に扱える、オンラインの化学輸送モデルによる予測 (例えば、梶野・田中, 2016) も考える必要がある。移流拡散モデルあるいは化学輸送モデル、いずれを用いるにしても、大規模以上の噴火では成層圏内でのテフラの輸送過程が重要になる。数値モデルの予測可能性が上がった今日、対流圏～成層圏の大規模な物質輸送過程をラグランジュ的に調べた先駆的な研究 (Kida, 1977, 1983) に回帰することも無意味ではないであろう。

謝 辞

執筆に際しては、気象庁気象研究所の永田 雅前所長、火山研究部の福井敬一前室長、高木朗充室長、石井憲介研究官、予報研究部の橋本明弘主任研究官、地震火山部火山課降灰予報係の菅井 明前係長、東京 VAAC の五十嵐陽子前技術専門官、土山博昭技術専門官、林 洋介技官から有益なコメントを戴きました。査読者である火山研究部長の山里 平氏、東京大学地震研究所教授の小屋口剛博氏ならびに編集委員長の橋本武志氏、編集担当の山本 希氏からのご指摘により、本稿は改善されました。ここに感謝いたします。

List of Acronyms

ACCESS	Australian Community Climate and Earth-System Simulator
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International
APOLLO	Automatic Procedure to Model Volcanic Ash Dispersion
ARL	Air Resources Laboratory
ARPEGE	Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ARW	Advanced Research WRF
asuca	Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere
ATDM	Atmospheric Transport Dispersion and Deposition Model
ATHAM	Active Tracer High Resolution Atmospher-

	ic Model	MEDIA	Modèle Eulêhen de Dispersion Atmosphérique
AVO	Alaska Volcano Observatory		
BoM	Bureau of Meteorology	MetService	Meteorological Service of New Zealand
BSC	Barcelona Supercomputing Center	MetUM	UKMO Unified Model
CANERM	Canadian Emergency Response Model	MLDP0	Modèle Lagrangien de Dispersion de Particules d'ordre zéro
CMC	Canadian Meteorological Centre		
COSMO	Consortium for Small-scale Modeling	MOCAGE	Modèle de Chimie Atmosphérique à Grande Echelle
CSI	Critical Success Index		
DWD	Deutscher Wetterdienst	MRI	Meteorological Research Institute
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	MSM	Mesoscale Model
		NAM	North American Model
ERA	ECMWF Reanalysis	NAME	Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment
ESP	Eruption Source Parameter		
ETA	η (model)	NCAR	National Center for Atmospheric Research
EUR/NAT	European and North Atlantic	NCEP	National Centers for Environmental Prediction
FLEXPART	Flexible Particle Dispersion Model		
FMS	Figure of Merit in Space	NHM	Nonhydrostatic Model
GATM	Global Atmospheric Transport Model	NILU	Norsk Institutt for Luftforskning
GDAS	Global Data Assimilation System	NIWA	National Institute of Water and Atmospheric Research
GEM	Global Environmental Multiscale (model)		
GFS	Global Forecast System	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
GNS	Institute of Geological and Nuclear Sciences		
GPV	Grid Point Value	NOPAC	North Pacific
GSM	Global Spectral Model	NWP	Numerical Weather Prediction (model)
HARMONIE	HIRLAM-ALADIN Research on Mesoscale Operational NWP in Europe	NZLAM	New Zealand Limited Area Model
		R/A	Radar/Rain gauge-Analyzed Precipitation
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	RATM	Regional Atmospheric Transport Model
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (model)	READY	Real-time Environmental Applications and Display System
IAVW	International Airways Volcano Watch	RMSE	Root Mean Square Error
IAVWOPSG	IAVW Operations Group	SMN	Servicio Meteorológico Nacional
ICAO	International Civil Aviation Organization	TKE	Turbulent Kinetic Energy
IFS	Integrated Forecasting System	TS	Threat Score
IMO	Icelandic Meteorological Office	TTDM	Tephra Transport and Dispersion Model
INGV	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	UAF	University of Alaska Fairbanks
		UKMO	United Kingdom Meteorological Office
IVATF	International Volcanic Ash Task Force	USF	University of South Florida
JMA	Japan Meteorological Agency	USGS	United States Geological Survey
JRA	Japanese Reanalysis	UTC	Universal Time Coordinated
JST	Japan Standard Time	VAA	Volcanic Ash Advisory
LFM	Local Forecast Model	VAAC	Volcanic Ash Advisory Center
LPDM	Lagrangian Particle Dispersion Model	VAFF	Volcanic Ash Fall Forecast
LWC	Liquid Water Content	VAFTAD	Volcanic Ash Forecast Transport and Dispersion (model)
MA	Mesoscale Analysis		
MAFALDA	Modeling and Forecasting Ash Loading and Dispersal in the Atmosphere	VAG	Volcanic Ash Graphic
		VATDM	Volcanic Ash Transport and Dispersion Model

VEI	Volcanic Explosivity Index
VOL-CALPUFF	Volcanic California PUFF
WMO	World Meteorological Organization
WRF	Weather Research and Forecasting (model)
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

引用文献

- 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, 223-228.
- Alfano, F., Bonadonna, C., Delmelle, P. and Costantini, L. (2011) Insights on tephra settling velocity from morphological observations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **208**, 86-98.
- Aloisi, M., D'Agostino, M., Dean, K. G., Mostaccio, A. and Neri, G. (2002) Satellite analysis and PUFF simulation of the eruptive cloud generated by the Mount Etna paroxysm of 22 July 1998. *J. Geophys. Res.*, **107**, 2373.
- Arason, P., Petersen, G. N. and Björnsson, H. (2011) Observations of the altitude of the volcanic plume during the eruption of Eyjafjallajökull, April-May 2010. *Earth Syst. Sci. Data*, **3**, 9-17.
- Araooupour, H., Wang, C.-H. and Weil, S. A. (1982) Particle-particle interaction force in a dilute gas-solid system. *Chem. Eng. Sci.*, **37**, 1379-1386.
- Armentieri, P., Macedonio, G. and Pareschi, M. T. (1988) A numerical model for simulation of tephra transport and deposition: Applications to May 18, 1980, Mt. St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.*, **93**, 6463-6476.
- Arnalds, O., Thorarinsdóttir, E. F., Thorsson, J., Waldhauserova, P. D. and Agustsdóttir, A. M. (2013) An extreme wind erosion event of the fresh Eyjafjallajökull 2010 volcanic ash. *Sci. Rep.*, **3**: 1257.
- Arnold, D., *et al.* (2012) Lagrangian models for nuclear studies: Examples and applications. In *Lagrangian Modeling of the Atmosphere* (Lin, J., *et al.* eds), 329-347. *Geophys. Monograph*, **200**, Amer. Geophys. Union.
- Arnold, D., Maurer, C., Wotawa, G., Draxler, R., Saito, K. and Seibert, P. (2015) Influence of the meteorological input on the atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 212-225.
- Bagheri, G. H., Bonadonna, C., Manzella, I. and Vonlanthen, P. (2015) On the characterization of size and shape of irregular particles. *Powder Technol.*, **270**, 141-153.
- Barberi, F., Macedonio, G., Pareschi, M. T. and Santacroce, R. (1990) Mapping the tephra fallout risk: An example from Vesuvius, Italy. *Nature*, **344**, 142-144.
- Barsotti, S. and Neri, A. (2008) The VOL-CALPUFF model for atmospheric ash dispersal: 2. Application to the weak Mount Etna plume of July 2001. *J. Geophys. Res.*, **113**, B03209.
- Barsotti, S., Neri, A. and Scire, J. S. (2008a) The VOL-CALPUFF model for atmospheric ash dispersal: 1. Approach and physical formulation. *J. Geophys. Res.*, **113**, B03208.
- Barsotti, S., Nannipieri, L. and Neri, A. (2008b) MAFALDA: An early warning modeling tool to forecast volcanic ash dispersal and deposition. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q12019.
- Barsotti, S., Andronico, D., Neri, A., Del Carlo, P., Baxter, P. J., Aspinall, W. P. and Hincks, T. (2010) Quantitative assessment of volcanic ash hazards for health and infrastructure at Mt. Etna (Italy) by numerical simulation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **192**, 85-96.
- Bartnicki, J., Haakenstad, H. and Hov, Ø. (2010) Volcano version of the SNAP model. *Met.no Rep.*, **15/2010**, 79 p.
- Baumann, R. and Schlager, H. (2012) Lagrangian modeling of transport and dispersion of air constituents. In *Atmospheric Physics: Background-Methods-Trends* (Schumann, U. ed), 381-399. Springer, Heidelberg.
- Beckett, F. M., Witham, C. S., Hort, M. C., Stevenson, J. A., Bonadonna, C. and Millington, S. C. (2014) The sensitivity of NAME forecasts of the transport of volcanic ash clouds to the physical characteristics assigned to the particles. *Met Office Forecasting Res. Tech. Rep.*, **592**, 39 p.
- Bonadonna, C. and Phillips, J. C. (2003) Sedimentation from strong volcanic plumes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 2340.
- Bonadonna, C. and Costa, A. (2013) Modeling tephra sedimentation from volcanic plumes. In *Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism* (Fagents, S. A., *et al.* eds), 173-202. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Bonadonna, C., Macedonio, G. and Sparks, R. S. J. (2002) Numerical modelling of tephra fallout associated with dome collapses and Vulcanian explosions: Application to hazard assessment on Montserrat. In *The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T. H. and Kokelaar, B. P. eds), 517-537. *Geol. Soc. (London) Memoir*, **21**.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. and Hincks, T. K. (2005) Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *J. Geophys. Res.*, **110**, B03203.
- Bonadonna, C., Folch, A., Loughlin, S. and Puempel, H. (2012) Future developments in modelling and monitoring of volcanic ash clouds: Outcomes from the first IAVCEI-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation. *Bull. Volcanol.*, **74**: 1-10.
- Bonadonna, C., Webley, P., Hort, M., Folch, A., Loughlin, S. and Puempel, H. (2014) 2nd IUGG-WMO workshop on Ash Dispersal Forecast and Civil Aviation. *Consensual Document*, 34 p.
- Bonasia, R., Costa, A., Folch, A., Macedonio, G. and Capra, L. (2012) Numerical simulation of tephra transport and deposition of the 1982 El Chichón eruption and implications for hazard assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **231-232**, 39-49.
- Bowman, K. P., Lin, J. C., Stohl, A., Draxler, R., Konopka, P., Andrews, A. and Brunner, D. (2013) Input data requirements for Lagrangian trajectory models. *Bull. Amer. Meteor.*

- Soc.*, **94**, 1051–1058.
- Brown, R. J., Bonadonna, C. and Durant, A. J. (2012) A review of volcanic ash aggregation. *Phys. Chem. Earth.*, **45–46**, 65–78.
- Bursik, M. (2001) Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 3621–3624.
- Bursik, M., *et al.* (2012) Estimation and propagation of volcanic source parameter uncertainty in an ash transport and dispersal model: Application to the Eyjafjallajökull plume of 14–16 April 2010. *Bull. Volcanol.*, **74**, 2321–2338.
- Chang, J. C. and Hanna, S. R. (2004) Air quality model performance evaluation. *Meteor. Atmos. Phys.*, **87**, 167–196.
- Collini, E., Osores, M. S., Folch, A., Viramonte, J. G., Villarosa, G. and Salmuni, G. (2013) Volcanic ash forecast during the June 2011 Cordón Caulle eruption. *Nat. Hazards*, **66**, 389–412.
- コリンズ, R. L. ・ フォセサット, J. ・ サッセン, K. ・ ウェブ
レー, P. W. ・ アトキンソン, D. E. ・ デイーン, K. G. ・ ケ
イヒル, C. F. ・ 水谷耕平 (2007) 米国アラスカ州オーガ
スティン火山の 2006 年噴火における火山雲の変動の
予測と検証. 情報通信研究機構季報, **53**, 13–24.
- Connor, L. J. and Connor, C. B. (2006) Inversion is the key to dispersion: Understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout. In *Statistics in Volcanology* (Mader, H. M., *et al.* eds), 231–242. Geol. Soc., London.
- Connor, C. B., Hill, B. E., Winfrey, B., Franklin, N. M. and La Femina, P. C. (2001) Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Nat. Hazards Rev.*, **2**, 33–42.
- Cornell, W., Carey, S. and Sigurdsson, H. (1983) Computer simulation of transport and deposition of the Campanian Y-5 ash. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17**, 89–109.
- Costa, A., Macedonio, G. and Folch, A. (2006) A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **241**, 634–647.
- Costa, A., Folch, A. and Macedonio, G. (2010) A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 1. Theoretical formulation. *J. Geophys. Res.*, **115**, B09201.
- Costa, A., Folch, A. and Macedonio, G. (2013) Density-driven transport in the umbrella region of volcanic clouds: Implications for tephra dispersion models. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4823–4827.
- Costa, A., Smith, V. C., Macedonio, G. and Matthews, N. E. (2014) The magnitude and impact of the Youngest Toba Tuff super-eruption. *Front. Earth Sci.*, **2**: 16.
- Dacre, H. F., *et al.* (2011) Evaluating the structure and magnitude of the ash plume during the initial phase of the 2010 Eyjafjallajökull eruption using lidar observations and NAME simulations. *J. Geophys. Res.*, **116**, D00U03.
- Dahneke, B. E. (1973) Slip correction factors for nonspherical bodies — III the form of the general law. *J. Aerosol Sci.*, **4**, 163–170.
- D’Amours, R. (1998) Modeling the ETEX plume dispersion with the Canadian emergency response model. *Atmos. Environ.*, **32**, 4335–4341.
- D’Amours, R. and Malo, A. (2004) A zeroth order Lagrangian particle dispersion model MLDP0. Internal Report, CMC, 19 p.
- D’Amours, R., Malo, A., Servranckx, R., Bensimon, D., Trudel, S. and Gauthier-Bilodeau, J.-P. (2010) Application of the atmospheric Lagrangian particle dispersion model MLDP0 to the 2008 eruptions of Okmok and Kasatochi volcanoes. *J. Geophys. Res.*, **115**, D00L11.
- D’Amours, R., Malo, A., Flesch, T., Wilson, J., Gauthier, J.-P. and Servranckx, R. (2015) The Canadian Meteorological Centre’s atmospheric transport and dispersion modelling suite. *Atmos.-Ocean*, **53**, 176–199.
- Davis, L. S. and Dacre, H. F. (2009) Can dispersion model predictions be improved by increasing the temporal and spatial resolution of the meteorological input data? *Weather*, **64**, 232–237.
- Deardorff, J. W. (1980) Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, **18**, 495–527.
- Dellino, P., Mele, D., Bonasia, R., Braia, G., La Volpe, L. and Sulpizio, R. (2005) The analysis of the influence of pumice shape on its terminal velocity. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L21306.
- Denlinger, R. P., Pavolonis, M. and Sieglaff, J. (2012a) A robust method to forecast volcanic ash clouds. *J. Geophys. Res.*, **117**, D13208.
- Denlinger, R. P., Webley, P., Mastin, L. G. and Schwaiger, H. (2012b) A Bayesian method to rank different model forecasts of the same volcanic ash cloud. In *Lagrangian Modeling of the Atmosphere* (Lin, J., *et al.* eds), 299–310. *Geophys. Monograph*, **200**, Amer. Geophys. Union.
- Devenish, B. J., Thomson, D. J., Marengo, F., Leadbetter, S. J., Ricketts, H. and Dacre, H. F. (2012a) A study of the arrival over the United Kingdom in April 2010 of the Eyjafjallajökull ash cloud using ground-based lidar and numerical simulations. *Atmos. Environ.*, **48**, 152–164.
- Devenish, B. J., Francis, P. N., Johnson, B. T., Sparks, R. S. J. and Thomson, D. J. (2012b) Sensitivity analysis of dispersion modeling of volcanic ash from Eyjafjallajökull in May 2010. *J. Geophys. Res.*, **117**, D00U21.
- Dingwell, A. and Rutgersson, A. (2014) Estimating volcanic ash hazard in European airspace. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 55–66.
- Draxler, R. R. (2003) Evaluation of an ensemble dispersion calculation. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 308–317.
- Draxler, R. R. (2006) The use of global and mesoscale meteorological model data to predict the transport and dispersion of tracer plumes over Washington, D. C. *Wea. Forecasting*, **21**, 383–394.
- Draxler, R. R. and Hess, G. D. (1997) Description of the HYSPLIT_4 modeling system. *NOAA Tech. Memo.*, **ERL ARL-224**, 24 p.
- Draxler, R. R. and Hess, G. D. (1998) An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, **47**, 295–308.
- Draxler, R. R., Gillette, D. A., Kirkpatrick, J. S. and Heller, J. (2001) Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmos. Environ.*, **35**,

- 4315-4330.
- Draxler, R., *et al.* (2015) World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 172-184.
- Durant, A. J. and Rose, W. I. (2009) Sedimentological constraints on hydrometeor-enhanced particle deposition: 1992 eruptions of Crater Peak, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 40-59.
- Durant, A. J., Rose, W. I., Sarna-Wojcicki, A. M., Carey, S. and Volentik, A. C. M. (2009) Hydrometeor-enhanced tephra sedimentation: Constraints from the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens. *J. Geophys. Res.*, **114**, B03204.
- 遠藤邦彦・福岡孝昭・宮地直道・隅田まり (1986) テフラ研究における最近の進歩. 火山, **30**, S237-S266.
- Escudero, M., Stein, A., Draxler, R. R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S. and Avila, A. (2006) Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPPLIT) model. *J. Geophys. Res.*, **111**, D06210.
- Feng, J. (2007) A 3-mode parameterization of below-cloud scavenging of aerosols for use in atmospheric dispersion models. *Atmos. Environ.*, **41**, 6808-6822.
- Feng, J. (2008) A size-resolved model and a four-mode parameterization of dry deposition of atmospheric aerosols. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12201.
- Fero, J., Carey, S. N. and Merrill, J. T. (2008) Simulation of the 1980 eruption of Mount St. Helens using the ash-tracking model PUFF. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 355-366.
- Fero, J., Carey, S. N. and Merrill, J. T. (2009) Simulating the dispersal of tephra from the 1991 Pinatubo eruption: Implications for the formation of widespread ash layers. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 120-131.
- Folch, A. (2012) A review of tephra transport and dispersal models: Evolution, current status, and future perspectives. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **235-236**, 96-115.
- Folch, A., Cavazzoni, C., Costa, A. and Macedonio, G. (2008a) An automatic procedure to forecast tephra fallout. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **177**, 767-777.
- Folch, A., Jorba, O. and Viramonte, J. (2008b) Volcanic ash forecast — Application to the May 2008 Chaitén eruption. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **8**, 927-940.
- Folch, A., Costa, A. and Macedonio, G. (2009) FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash. *Comput. Geosci.*, **35**, 1334-1342.
- Folch, A., Costa, A., Durant, A. and Macedonio, G. (2010) A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: 2. Model application. *J. Geophys. Res.*, **115**, B09202.
- Folch, A., Costa, A. and Basart, S. (2012) Validation of the FALL3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmos. Environ.*, **48**, 165-183.
- Folch, A., Mingari, L., Osorio, M. S. and Collini, E. (2014a) Modeling volcanic ash resuspension — Application to the 14-18 October 2011 outbreak episode in central Patagonia, Argentina. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **14**, 119-133.
- Folch, A., Costa, A. and Macedonio, G. (2014b) FALL3D-7.0 User's Manual. BSC-CNS, 42 p.
- 藤田慎一・カワラタニ, R. K.・高橋 章 (1989) 降雨による火山噴出物の洗浄作用—桜島をモデルに選んで—。環境科学会誌, **2**, 193-204.
- 藤田慎一・三浦和彦・大河内 博・速水 洋・松田和秀・櫻井達也 (2014) 越境大気汚染の物理と化学. 成山堂書店, 247 p.
- 藤田 司 (2012) 数値予報プロダクトの利用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 54-60.
- 福山 力・泉 克幸・内山政弘 (2004) 大気エアロゾルの乾性沈着—最近の文献拾い読み. エアロゾル研究, **19**, 245-253.
- 古川竜太 (2011) 霧島山新燃岳 2011 年噴火. 産総研 TODAY, **2011-09**, 15.
- Ganser, G. H. (1993) A rational approach to drag prediction of spherical and nonspherical particles. *Powder Technol.*, **77**, 143-152.
- Gifford, F. A. (1982) Horizontal diffusion in the atmosphere: A Lagrangian-dynamical theory. *Atmos. Environ.*, **16**, 505-512.
- Gifford, F. A. (1984) The random force theory: Application to meso- and large-scale atmospheric diffusion. *Bound.-Layer Meteor.*, **30**, 159-175.
- Glaze, L. S. and Self, S. (1991) Ashfall dispersal for the 16 September 1986, eruption of Lascar, Chile, calculated by a turbulent diffusion model. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1237-1240.
- Gudmundsson, M. T., *et al.* (2012) Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Sci. Rep.*, **2**: 572.
- 鉢嶺 猛 (1999) 航空路火山灰情報と火山灰拡散予測の提供. 航空気象ノート, **57**, 31-38.
- 原 旅人 (2008a) 乱流のモデリング. 数値予報課報告・別冊, **54**, 気象庁予報部, 119-124.
- 原 旅人 (2008b) 統計的検証に用いる代表的な指標. 数値予報課報告・別冊, **54**, 気象庁予報部, 262-263.
- 原田智史 (2009) 国際航空路火山監視運営部会 (IAVWOPSG) 第 4 回会合出席報告. 航空気象ノート, **69-70**, 40-49.
- Hasegawa, Y., Sugai, A., Hayashi, Yo., Hayashi, Yu., Saito, S. and Shimbori, T. (2015) Improvements of volcanic ash fall forecasts issued by the Japan Meteorological Agency. *J. Appl. Volcanol.*, **4**: 2.
- Hashimoto, A., Shimbori, T. and Fukui, K. (2012) Tephra fall simulation for the eruptions at Mt. Shinmoe-dake during 26-27 January 2011 with JMANHM. *SOLA*, **8**, 37-40.
- 服部康男・須藤 仁・土志田 潔・平口博丸 (2014) 数値シミュレーションによる降下火山灰の輸送・堆積特性評価法の開発 (その 1)—新燃岳噴火の降灰挙動における気象影響評価—. 電力中央研究所報告, **N14004**, 19 p.
- 早川由紀夫 (1996) 火山. 地震と火山 (地学団体研究会編), 新版地学教育講座, **2**, 93-179.
- Heffter, J. L. (1996) Volcanic ash model verification using a

- Klyuchevskoi eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1489-1492.
- Heffter, J.L. and Stunder, B.J.B. (1993) Volcanic Ash Forecast Transport And Dispersion (VAFTAD) model. *Wea. Forecasting*, **8**, 533-541.
- Hertel, O., Christensen, J., Runge, E.H., Asman, W.A.H., Berkowicz, R. and Hovmand, M.F. (1995) Development and testing of a new variable scale air pollution model — ACDEP. *Atmos. Environ.*, **29**, 1267-1290.
- Herzog, M., Oberhuber, J.M. and Graf, H.-F. (2003) A prognostic turbulence scheme for the nonhydrostatic plume model ATHAM. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2783-2796.
- Hicks, B.B. (1986) Differences in wet and dry particle deposition parameters between North America and Europe. In *Aerosols: Research, Risk Assessment and Control Strategies* (Lee, S.D., et al. eds), 973-982. Lewis Pub., Chelsea.
- 堀田大介・原 旅人 (2012) 物理過程開発のボトムアップ・アプローチとトップダウン・アプローチ. 数値予報課報告・別冊, **58**, 気象庁予報部, 120-122.
- Hurst, A.W. (1994) ASHFALL — A computer program for estimating volcanic ash fallout. Report and Users Guide. *GNS Sci. Rep.*, **94/23**, 22 p.
- Hurst, A.W. and Turner, R. (1999) Performance of the program ASHFALL for forecasting ashfall during the 1995 and 1996 eruptions of Ruapehu volcano. *N.Z.J. Geol. Geophys.*, **42**, 615-622.
- Hurst, T. and Smith, W. (2004) A Monte Carlo methodology for modelling ashfall hazards. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **138**, 393-403.
- 井田喜明 (2014) 自然災害のシミュレーション入門. 朝倉書店, 245 p.
- 井口正人 (2013) 噴火微動を用いた火山灰放出量のモニタリング手法. 京都大学防災研究所年報, **56B**, 221-225.
- 飯野直子・金柿主税・木下紀正 (2011) 霧島新燃岳 2011 年噴煙の映像解析と移流解析. 熊本大学教育学部紀要自然科学, **60**, 69-76.
- 石井憲介・新堀敏基・福井敬一・佐藤英一・橋本明弘 (2015) 移流拡散モデルのための即時的な火山灰データ同化システムの構築にむけて. 日本火山学会講演予稿集, **72**.
- 石峯康浩 (2007) 火山研究への貢献が期待される多様なコンピュータシミュレーション. 火山, **52**, 221-239.
- Ishimoto, H., Masuda, K., Fukui, K., Shimbori, T., Inazawa, T., Tsuchiyama, H., Ishii, K. and Sakurai, T. (2016) Estimation of the refractive index of volcanic ash from satellite infrared sounder data. *Remote. Sens. Environ.*, **174**, 165-180.
- Iwasaki, T., Maki, T. and Katayama, K. (1998) Tracer transport model at Japan Meteorological Agency and its application to the ETEX data. *Atmos. Environ.*, **32**, 4285-4295.
- James, M.R., Lane, S.J. and Gilbert, J.S. (2003) Density, construction, and drag coefficient of electrostatic volcanic ash aggregates. *J. Geophys. Res.*, **108**, 2435.
- Jones, A. (2004) Atmospheric dispersion modelling at the Met Office. *Weather*, **59**, 311-316.
- Jones, A., Thomson, D., Hort, M. and Devenish, B. (2007) The U.K. Met Office's next-generation atmospheric dispersion model, NAME III. In *Air Pollution Modeling and Its Application XVII* (Borrego, C. and Norman, A.-L. eds), 580-589. Springer, New York.
- Josse, B., Simon, P. and Peuch, V.-H. (2004) Radon global simulations with the multiscale chemistry and transport model MOCAGE. *Tellus*, **56B**, 339-356.
- 梶野瑞王・田中泰宙 (2016) 火山噴火と大気環境—第 4 講 火山噴出物の大気動態・環境影響—② 硫酸化合物. 大気環境学会誌, **51**, A1-A9.
- 鎌田政明 (1975) 火山活動と地球環境. 火山, **20**, 355-362.
- Kaminski, E., Tait, S., Ferrucci, F., Martet, M., Hirn, B. and Husson, P. (2011) Estimation of ash injection in the atmosphere by basaltic volcanic plumes: The case of the Eyjafjallajökull 2010 eruption. *J. Geophys. Res.*, **116**, B00C02.
- 金子隆之 (2005) 衛星リモートセンシングによる火山の赤外観測. 火山, **50**, S233-S251.
- Karlsdóttir, S., Gylfason, Á. G., Höskuldsson, Á., Brandsdóttir, B., Ilyinskaya, E., Gudmundsson, M.T. and Högnadóttir, Þ. (2012) The 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland (Þorkelsson, B. ed), Report to ICAO, 206 p.
- Kida, H. (1977) A numerical investigation of the atmospheric general circulation and stratospheric-tropospheric mass exchange. *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 52-70, 71-88.
- Kida, H. (1983) General circulation of air parcels and transport characteristics derived from a hemispheric GCM. *J. Meteor. Soc. Japan*, **61**, 171-187, 510-523.
- 木下紀正 (1996) 火山噴煙の上昇と移流・拡散. 可視化情報, **16**, 230-235.
- 気象庁 (2013) 降灰予報の改善に向けたニーズ調査 調査報告書, 101 p.
- 気象庁 (2014) 火山噴火予知連絡会火山活動評価検討会 報告書—噴火現象の即時的な把握手法について—, 93 p.
- 気象庁予報部 (2014) 次世代非静力学モデル asuca. 数値予報課報告・別冊, **60**, 151 p.
- 気象庁地震火山部 (2013) 降灰予報の高度化に向けた検討会 報告書, 259 p.
- 北田敏廣 (1994) 酸性降水の輸送・反応・沈着モデル. 気象研究ノート, **182**, 95-117.
- Kitada, T., Carmichael, G.R. and Peters, L.K. (1986) Effects of dry deposition on the concentration-distributions of atmospheric pollutants within land- and sea-breeze circulations. *Atmos. Environ.*, **20**, 1999-2010.
- 北原和夫 (1997) 非平衡系の統計力学. 岩波書店, 279 p.
- Klemp, J.B. and Wilhelmson, R.B. (1978) The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1070-1096.
- Kobayashi, S., et al. (2015) The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- 国土庁防災局 (1992) 火山噴火災害危険区域予測図作成指針, 153+49 p.
- 広域的な火山防災対策に係る検討会 (2013) 大規模火山災害対策への提言, 24 p.
- 小屋口剛博 (2005) 噴火のダイナミクス: 噴火タイプおよび噴出物・堆積物の性質の観点から. 火山, **50**,

- S151-S166.
- 小屋川剛博 (2008) 火山現象のモデリング. 東京大学出版会, 637p.
- 小山真人 (2005) 火山に関する知識・情報の伝達と普及—減災の視点でみた現状と課題—. *火山*, **50**, S289-S317.
- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, Y.J. (2013) Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bull. Volcanol.*, **75**: 695.
- Kratzmann, D.J., Carey, S.N., Fero, J., Scasso, R. A. and Naranjo, J.-A. (2010) Simulations of tephra dispersal from the 1991 explosive eruptions of Hudson volcano, Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **190**, 337-352.
- Kristiansen, N.I., *et al.* (2012) Performance assessment of a volcanic ash transport model mini-ensemble used for inverse modeling of the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *J. Geophys. Res.*, **117**, D00U11.
- Langmann, B., Folch, A., Hensch, M. and Matthias, V. (2012) Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April–May 2010. *Atmos. Environ.*, **48**, 1-8.
- Leadbetter, S.J. and Hort, M.C. (2011) Volcanic ash hazard climatology for an eruption of Hekla volcano, Iceland. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **199**, 230-241.
- Leadbetter, S.J., Hort, M.C., von Löwis, S., Weber, K. and Witham, C.S. (2012) Modeling the resuspension of ash deposited during the eruption of Eyjafjallajökull in spring 2010. *J. Geophys. Res.*, **117**, D00U10.
- Leadbetter, S. J., Hort, M. C., Jones, A. R., Webster, H. N. and Draxler, R. R. (2015) Sensitivity of the modelled deposition of Caesium-137 from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant to the wet deposition parameterisation in NAME. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 200-211.
- Lin, J. C. (2012) Lagrangian modeling of the atmosphere: An introduction. In *Lagrangian Modeling of the Atmosphere* (Lin, J., *et al.* eds), 1-11. *Geophys. Monograph*, **200**, Amer. Geophys. Union.
- Liu, E. J., Cashman, K. V., Beckett, F. M., Witham, C. S., Leadbetter, S. J., Hort, M. C. and Guðmundsson, S. (2014) Ash mists and brown snow: Remobilization of volcanic ash from recent Icelandic eruptions. *J. Geophys. Res.*, **119**, 9463-9480.
- Liu, H., Jacob, D.J., Bey, I. and Yantosca, R.M. (2001) Constraints from ^{210}Pb and ^7Be on wet deposition and transport in a global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields. *J. Geophys. Res.*, **106**, 12109-12128.
- Louis, J.-F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound.-Layer Meteor.*, **17**, 187-202.
- Louis, J.-F., Tiedtke, M. and Geleyn, J.F. (1982) A short history of the operational PBL-parameterization at ECMWF. Workshop on planetary boundary layer parameterization. ECMWF, 59-79.
- Macedonio, G. and Costa, A. (2014) HAZMAP-2.4.2 User Manual. INGV, 26p.
- Macedonio, G., Pareschi, M. T. and Santacroce, R. (1988) A numerical simulation of the Plinian fall phase of 79 A.D. eruption of Vesuvius. *J. Geophys. Res.*, **93**, 14817-14827.
- Macedonio, G., Costa, A. and Longo, A. (2005) A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Comput. Geosci.*, **31**, 837-845.
- Macedonio, G., Costa, A. and Folch, A. (2008) Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 366-377.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編 火山灰アトラス [日本列島とその周辺]. 東京大学出版会, 336p.
- 真木雅之・井口正人・藤田英輔・三輪学央・前坂 剛・出世ゆかり・小園誠史・桃谷辰也・山路昭彦 (2015) 気象レーダによる桜島火山噴煙の観測. 京都大学防災研究所年報, **58B**, 76-85.
- 眞木貴史・岩崎俊樹 (1995) 移流拡散モデル. 平成7年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 79-81.
- 萬年一剛 (2013) 降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 の理論と現状—第四紀学での利用を視野に. 第四紀研究, **52**, 173-187.
- 萬納寺信崇 (1994) 移流拡散モデル. 数値予報課報告・別冊, **41**, 気象庁予報部, 94.
- Mari, C., Jacob, D. J. and Bechtold, P. (2000) Transport and scavenging of soluble gases in a deep convective cloud. *J. Geophys. Res.*, **105**, 22255-22267.
- Mastin, L. G. (2007) A user-friendly one-dimensional model for wet volcanic plumes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **8**, Q03014.
- Mastin, L. G., *et al.* (2009) 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.
- Mastin, L. G., Schwaiger, H., Schneider, D.J., Wallace, K.L., Schaefer, J. and Denlinger, R.P. (2013a) Injection, transport, and deposition of tephra during event 5 at Redoubt volcano, 23 March, 2009. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **259**, 201-213.
- Mastin, L. G., Randall, M. J., Schwaiger, H.F. and Denlinger, R.P. (2013b) User's guide and reference to Ash3d — A three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition. *USGS Open-File Rep.*, **2013-1122**, 48 p.
- Mastin, L. G., Van Eaton, A.R. and Lowenstern, J.B. (2014) Modeling ash fall distribution from a Yellowstone super-eruption. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **15**, 3459-3475.
- 松村崇行 (2000) セミラグランジュ法. 数値予報課報告・別冊, **46**, 気象庁予報部, 67-84.
- Mosca, S., Graziani, G., Klug, W., Bellasio, R. and Bianconi, R. (1998) A statistical methodology for the evaluation of long-range dispersion models: An application to the ETEX exercise. *Atmos. Environ.*, **32**, 4307-4324.
- 村尾直人 (2011) 大気モデル—第6講 流跡線解析—. 大気環境学会誌, **46**, A61-A67.
- 室井ちあし (2012) 概要. 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-7.
- Nagata, K. (2011) Quantitative precipitation estimation and quantitative precipitation forecasting by the Japan Meteorological Agency. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **89**, 103-114.

- logical Agency. *RSMC Tokyo-Typhoon Center Tech. Rev.*, **13**, 37-50.
- 永田 雅・萬納寺信崇 (1994) 利用上の留意点. 数値予報課報告・別冊, **41**, 気象庁予報部, 97-111.
- 内閣府 (防災担当)・消防庁・国土交通省水管理・国土保全局砂防部・気象庁 (2013) 火山防災マップ作成指針, 108+104 p.
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y. and Maeno, F. (2013) The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan. *Earth Planets Space*, **65**, 475-488.
- Näslund, E. and Thaning, L. (1991) On the settling velocity in a nonstationary atmosphere. *Aerosol Sci. Technol.*, **14**, 247-256.
- Nho-Kim, E.-Y., Michou, M. and Peuch, V.-H. (2004) Parameterization of size-dependent particle dry deposition velocities for global modeling. *Atmos. Environ.*, **38**, 1933-1942.
- 日本学術会議 (2014) 東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較. 日本学術会議総合工学委員会 原子力事故対応分科会報告, 103 p.
- 二宮 洗三 (2012) 気象と地球の環境科学 (改訂3版). オーム社, 240 p.
- 大野希一・山川修治・大石雅之・高橋 康・上野龍之・井田貴史 (2005) 凝集粒子を用いた噴煙高度の推定—浅間火山 2004 年 9 月 23 日噴火に伴う降下火砕物の堆積様式—. *火山*, **50**, 535-554.
- 鬼澤真也・他 (2013) 2011 年霧島山新燃岳噴火における降灰観測と予測. 験震時報, **77**, 215-222.
- Onogi, K., et al. (2007) The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Orlanski, I. (1975) A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **56**, 527-530.
- Osores, M. S., Folch, A., Collini, E., Villarosa, G., Durant, A., Pujol, G. and Viramonte, J. G. (2013) Validation of the FALL3D model for the 2008 Chaitén eruption using field and satellite data. *Andean Geol.*, **40**, 262-276.
- Petersen, G. N. (2010) A short meteorological overview of the Eyjafjallajökull eruption 14 April-23 May 2010. *Weather*, **65**, 203-207.
- Petersen, G. N., Björnsson, H. and Arason, P. (2012) The impact of the atmosphere on the Eyjafjallajökull 2010 eruption plume. *J. Geophys. Res.*, **117**, D00U07.
- Pfeiffer, T., Costa, A. and Macedonio, G. (2005) A model for the numerical simulation of tephra fall deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **140**, 273-294.
- Piedelievre, J. P., Musson-Genon, L. and Bompay, F. (1990) MEDIA — An Eulerian model of atmospheric dispersion: First validation on the Chernobyl release. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 1205-1220.
- Pisso, I., Real, E., Law, K. S., Legras, B., Bousserez, N., Attié, J. L. and Schlager, H. (2009) Estimation of mixing in the troposphere from Lagrangian trace gas reconstructions during long-range pollution plume transport. *J. Geophys. Res.*, **114**, D19301.
- Pudykiewicz, J. (1989) Simulation of the Chernobyl dispersion with a 3-D hemispheric tracer model. *Tellus*, **41B**, 391-412.
- Pudykiewicz, J. (1991) Environmental prediction systems: Design, implementation aspects and operational experience with application to accidental releases. In *Air Pollution Modeling and Its Application VIII* (van Dop, H. and Steyn, D. G. eds), 561-590. Springer, New York.
- Riley, C. M., Rose, W. I. and Bluth, G. J. S. (2003) Quantitative shape measurements of distal volcanic ash. *J. Geophys. Res.*, **108**, 2504.
- Ryall, D. B. and Maryon, R. H. (1998) Validation of the UK Met. Office's NAME model against the ETEX dataset. *Atmos. Environ.*, **32**, 4265-4276.
- Saito, K. (2012) The JMA nonhydrostatic model and its applications to operation and research. In *Atmospheric Model Applications* (Yucel, I. ed), 85-110. InTech, Croatia.
- 斉藤和雄・新堀敏基・原 旅人・豊田英司・加藤輝之・藤田 司・永田和彦・本田有機 (2014) WMO「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」活動. 測候時報, **81**, 1-30.
- Saito, K., Shimbori, T. and Draxler, R. (2015a) JMA's regional atmospheric transport model calculations for the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 185-199.
- Saito, K., et al. (2015b) Contribution of JMA to the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and relevant atmospheric transport modeling at MRI. *Tech. Rep. MRI*, **76**, 225 p.
- 斎藤祥司・桜田正美・長谷川嘉彦 (1999) 航空路火山灰情報業務. 測候時報, **66**, 101-118.
- 酒井 哲・他 (2014) 佐賀のライダーとスカイラジオメータによって検出された桜島の火山灰の高度分布と光学特性. 日本リモートセンシング学会誌, **34**, 197-204.
- Sakamoto, M. (2013) Atmospheric Transport Model. Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency, 95-98.
- Sandu, L., Bompay, F. and Stefan, S. (2003) Validation of atmospheric dispersion models using ETEX data. *Int. J. Environ. Pollut.*, **19**, 367-389.
- 佐藤純次・里村雄彦・佐々木秀孝・村治能孝 (1995) 硫酸化物の長距離輸送モデルと東アジア地域への適用. 気象研究所技術報告, **34**, 106 p.
- 澤田可洋 (1997) 航空路火山灰情報センター業務の発足—空中火山災害の概要とその防止・軽減—. *気象*, **482**, 10-15.
- Schwaiger, H. F., Denlinger, R. P. and Mastin, L. G. (2012) Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *J. Geophys. Res.*, **117**, B04204.
- Scollo, S., Folch, A. and Costa, A. (2008) A parametric and comparative study of different tephra fallout models. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **176**, 199-211.
- Scollo, S., Prestifilippo, M., Spata, G., D'Agostino, M. and Coltelli, M. (2009) Monitoring and forecasting Etna volcanic plumes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 1573-1585.
- Scollo, S., Prestifilippo, M., Coltelli, M., Peterson, R. A. and

- Spata, G. (2011) A statistical approach to evaluate the tephra deposit and ash concentration from PUFF model forecasts. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **200**, 129–142.
- Searcy, C., Dean, K. and Stringer, W. (1998) PUFF: A high-resolution volcanic ash tracking model. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **80**, 1–16.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N. (2006) **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change** (2nd ed.). Wiley, New Jersey, 1232 p.
- Shao, Y. (2000) **Physics and Modelling of Wind Erosion** (1st ed.). Kluwer Academic Pub., Dordrecht, 393 p.
- 新堀敏基 (2008) 降灰予測への応用. 数値予報課報告・別冊, **54**, 気象庁予報部, 234–240.
- Shimbori, T., Aikawa, Y. and Seino, N. (2009) Operational implementation of the tephra fall forecast with the JMA mesoscale tracer transport model. *CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, **39**, 0529–0530.
- 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, **61**, 13–29.
- 新堀敏基・甲斐玲子・林 洋介・林 勇太・菅井 明・長谷川嘉彦・橋本明弘・高木朗充・山本哲也・福井敬一 (2014) 領域移流拡散モデルによる降下火砕物予測—2011年霧島山(新燃岳)噴火の事例—. 気象研究所研究報告, **65**, 75–107.
- 下鶴大輔 (1989) 成層圏に注入される火山灰. 地学雑, **98**, 782–790.
- 白土正明 (2013) 航空機のための火山灰情報. 防災科学技術研究所研究資料, **380**, 17–19.
- Simpson, J. J., Hufford, G. L., Pieri, D., Servranckx, R., Berg, J. S. and Bauer, C. (2002) The February 2001 eruption of Mount Cleveland, Alaska: Case study of an aviation hazard. *Wea. Forecasting*, **17**, 691–704.
- Slinn, W. G. N. (1982) Predictions for particle deposition to vegetative canopies. *Atmos. Environ.*, **16**, 1785–1794.
- Solazzo, E. and Galmarini, S. (2015) The Fukushima-1³⁷Cs deposition case study: Properties of the multi-model ensemble. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 226–233.
- Sparks, R. S. J., Bursik, M. I., Carey, S. N., Gilbert, J. S., Glaze, L. S., Sigurdsson, H. and Woods, A. W. (1997) **Volcanic Plumes**. Wiley, Chichester, 574 p.
- Spinetti, C., Barsotti, S., Neri, A., Buongiorno, M. F., Doumaz, F. and Nannipieri, L. (2013) Investigation of the complex dynamics and structure of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash cloud using multispectral images and numerical simulations. *J. Geophys. Res.*, **118**, 4729–4747.
- Sportisse, B. (2007) A review of parameterizations for modelling dry deposition and scavenging of radionuclides. *Atmos. Environ.*, **41**, 2683–2698.
- Stefanescu, E. R., et al. (2014) Temporal, probabilistic mapping of ash clouds using wind field stochastic variability and uncertain eruption source parameters: Example of the 14 April 2010 Eyjafjallajökull eruption. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **6**, 1173–1184.
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D. and Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **96**, 2059–2077.
- Stohl, A. and Thomson, D. J. (1999) A density correction for Lagrangian particle dispersion models. *Bound.-Layer Meteor.*, **90**, 155–167.
- Stohl, A., Hittenberger, M. and Wotawa, G. (1998) Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large-scale tracer experiment data. *Atmos. Environ.*, **32**, 4245–4264.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P. and Wotawa, G. (2005) Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2461–2474.
- Stohl, A., et al. (2011) Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: The 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 4333–4351.
- Stunder, B. J. B., Heffter, J. L. and Draxler, R. R. (2007) Airborne volcanic ash forecast area reliability. *Wea. Forecasting*, **22**, 1132–1139.
- 須藤 仁・服部康男 (2011) 数値流体解析を用いた降下火山灰のハザード評価技術に関する調査. 電力中央研究所報告, **N10028**, 20p.
- 須藤 茂・猪股隆行・佐々木 寿・向山 栄 (2007) わが国の降下火山灰データベース作成. 地質調査研究報告, **58**, 261–321.
- 須藤 茂・猪股隆行・佐々木 寿・向山 栄 (2010) 過去の降下火山灰分布公表資料から推測されるわが国の降灰確率予測図作成試案. 火山, **55**, 13–20.
- Suzuki, T. (1983) A theoretical model for dispersion of tephra. In *Arc Volcanism: Physics and Tectonics* (Shimozuru, D. and Yokoyama, I. eds), 95–113. TERRAPUB, Tokyo.
- 鈴木建夫 (1990) 火山噴火時における降下火砕物災害の予測. 職業訓練大学校紀要, **19A**, 1–17.
- Suzuki, Y. J. and Koyaguchi, T. (2013) 3D numerical simulation of volcanic eruption clouds during the 2011 Shinmoedake eruptions. *Earth Planets Space*, **65**, 581–589.
- Suzuki, Y. J., Koyaguchi, T., Ogawa, M. and Hachisu, I. (2005) A numerical study of turbulent mixing in eruption clouds using a three-dimensional fluid dynamics model. *J. Geophys. Res.*, **110**, B08201.
- 田島靖久・小原大輔・福田謙太郎・下村幸男 (2015) 自動降灰量計の開発について. こうえいフォーラム, **23**, 39–46.
- 高橋幹二 (2003) エアロゾル学の基礎 (日本エアロゾル学会編). 森北出版, 221 p.
- 高橋正樹 (2012) 超巨大噴火と「火山の冬」. エアロゾル研究, **27**, 278–283.
- Takasugi, T. and Nakamura, H. (1988) A tracer diffusion model coupled with the JMA global spectral model. *JMA/NPD Tech. Rep.*, **24**, 48 p.
- Tanaka, H. L. (1994) Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt volcano, Alaska. Proc. First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, *USGS Bull.*, **2047**, 283–291.
- Tanaka, H. L. and Yamamoto, K. (2002) Numerical simulations of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan

- on 31 March 2000 using PUFF model. *Earth Planets Space*, **54**, 743–752.
- 田中正之 (1975) 火山噴火と気候. 火山, **20**, 363–376.
- Tanaka, T. Y., Orito, K., Sekiyama, T. T., Shibata, K., Chiba, M. and Tanaka, H. (2003) MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM: Model description. *Pap. Met. Geophys.*, **53**, 119–138.
- Textor, C., Graf, H.-F., Herzog, M., Oberhuber, J. M., Rose, W. I. and Ernst, G. G. J. (2006) Volcanic particle aggregation in explosive eruption columns. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **150**, 359–377, 378–394.
- Thomson, D. J. and Wilson, J. D. (2012) History of Lagrangian stochastic models for turbulent dispersion. In *Lagrangian Modeling of the Atmosphere* (Lin, J., et al. eds), 19–36. *Geophys. Monograph*, **200**, Amer. Geophys. Union.
- Thorsteinsson, T., Jóhannsson, T., Stohl, A. and Kristiansen, N. I. (2012) High levels of particulate matter in Iceland due to direct ash emissions by the Eyjafjallajökull eruption and resuspension of deposited ash. *J. Geophys. Res.*, **117**, B00C05.
- 露木 義・川畑拓矢編 (2008) 気象学におけるデータ同化. 気象研究ノート, **217**, 277 p.
- Tupper, A., Davey, J., Stewart, P., Stunder, B., Servranckx, R. and Prata, F. (2006) Aircraft encounters with volcanic clouds over Micronesia, Oceania, 2002–03. *Aust. Meteor. Mag.*, **55**, 289–299.
- Turner, R. and Hurst, T. (2001) Factors influencing volcanic ash dispersal from the 1995 and 1996 eruptions of Mount Ruapehu, New Zealand. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 56–69.
- Turner, R., Moore, S., Pardo, N., Kereszturi, G., Uddstrom, M., Hurst, T. and Cronin, S. (2014) The use of Numerical Weather Prediction and a Lagrangian transport (NAME-III) and dispersion (ASHFALL) models to explain patterns of observed ash deposition and dispersion following the August 2012 Te Maari, New Zealand eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **286**, 437–451.
- 上山哲幸 (2015) 国際航空路火山監視運営グループ (IAVWOPSG)～これまでの成果と今後の課題～. 航空気象ノート, **76–77**, 11–18.
- 宇川 彰・押山 淳・小柳義夫・杉原正顕・住 明正・中村春木 (2013) 計算の科学. 岩波講座 計算科学, **1**, 172 p.
- UNISDR (2015) Making development sustainable: The future of disaster risk management. Global assessment report on disaster risk reduction. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), 311 p.
- Van Eaton, A. R., Mastin, L. G., Herzog, M., Schwaiger, H. F., Schneider, D. J., Wallace, K. L. and Clarke, A. B. (2015) Hail formation triggers rapid ash aggregation in volcanic plumes. *Nature Commun.*, **6**: 7860.
- Venkatram, A. and Pleim, J. (1999) The electrical analogy does not apply to modeling dry deposition of particles. *Atmos. Environ.*, **33**, 3075–3076.
- Walker, G. P. L., Wilson, L. and Bowell, E. L. G. (1971) Explosive volcanic eruptions — I the rate of fall of pyroclasts. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **22**, 377–383.
- Watt, S. F. L., Gilbert, J. S., Folch, A., Phillips, J. C. and Cai, X. M. (2015) An example of enhanced tephra deposition driven by topographically induced atmospheric turbulence. *Bull. Volcanol.*, **77**: 35.
- Webley, P. and Mastin, L. (2009) Improved prediction and tracking of volcanic ash clouds. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 1–9.
- Webley, P. W. and Steensen, T. (2012) Operational volcanic ash cloud modeling: Discussion on model inputs, products, and the application of real-time probabilistic forecasting. In *Lagrangian Modeling of the Atmosphere* (Lin, J., et al. eds), 271–298. *Geophys. Monograph*, **200**, Amer. Geophys. Union.
- Webley, P. W., Stunder, B. J. B. and Dean, K. G. (2009) Preliminary sensitivity study of eruption source parameters for operational volcanic ash cloud transport and dispersion models — A case study of the August 1992 eruption of the Crater Peak vent, Mount Spurr, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 108–119.
- Webley, P. W., Dean, K. G., Dehn, J., Bailey, J. E. and Peterson, R. (2010) Volcanic-ash dispersion modeling of the 2006 eruption of Augustine volcano using the Puff model. In *The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska* (Power, J. A., et al. eds), 507–526. *USGS Prof. Pap.*, **1769**.
- Webley, P. W., Dean, K., Peterson, R., Steffke, A., Harrild, M. and Groves, J. (2012) Dispersion modeling of volcanic ash clouds: North Pacific eruptions, the past 40 years: 1970–2010. *Nat. Hazards*, **61**, 661–671.
- Webster, H. N. and Thomson, D. J. (2011) Dry deposition modelling in a Lagrangian dispersion model. *Int. J. Environ. Pollut.*, **47**, 1–9.
- Webster, H. N. and Thomson, D. J. (2014) The NAME wet deposition scheme. *Met Office Forecasting Res. Tech. Rep.*, **584**, 41 p.
- Webster, H. N., et al. (2012) Operational prediction of ash concentrations in the distal volcanic cloud from the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *J. Geophys. Res.*, **117**, D00U08.
- Weinzierl, B., Sailer, T., Sauer, D., Minikin, A., Reitebuch, O., Mayer, B. and Schumann, U. (2012) The Eyjafjalla eruption in 2010 and the volcanic impact on aviation. In *Atmospheric Physics: Background–Methods–Trends* (Schumann, U. ed), 625–644. Springer, Heidelberg.
- White, F. M. (1974) **Viscous Fluid Flow** (1st ed.). McGraw-Hill, New York, 725 p.
- Williamson, D. L. and Rasch, P. J. (1989) Two-dimensional semi-Lagrangian transport with shape-preserving interpolation. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 102–129.
- Wilson, J. D., Ferrandino, F. J. and Thurtell, G. W. (1989) A relationship between deposition velocity and trajectory reflection probability for use in stochastic Lagrangian dispersion models. *Agric. For. Meteorol.*, **47**, 139–154.
- Wilson, L. and Huang, T. C. (1979) The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **44**, 311–324.
- Witham, C. S., Hort, M. C., Potts, R., Servranckx, R., Husson, P. and Bonnardot, F. (2007) Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvötn eruption. *Meteor. Appl.*, **14**, 27–38.

- Witham, C., Webster, H., Hort, M., Jones, A. and Thomson, D. (2012a) Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions. *Atmos. Environ.*, **48**, 219–229.
- Witham, C., Hort, M., Thomson, D., Leadbetter, S., Devenish, B. and Webster, H. (2012b) The current volcanic ash modelling set-up at the London VAAC. *Met Office Tech. Summary*, v1.1, 7 p.
- WMO (2012) VAAC ‘Inputs and Outputs’ (Ins and Outs) Dispersion Modelling Workshop. Final Report, 25 p.
- WMO (2013) Evaluation of meteorological analyses for the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *WMO Tech. Rep.*, **1120**, 64 p.
- WMO (2015) WMO VAAC “Best Practice” Workshop. Final Report, 32 p.
- Woodhouse, M. J., Hogg, A. J., Phillips, J. C. and Sparks, R. S. J. (2013) Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. *J. Geophys. Res.*, **118**, 92–109.
- 山里 平 (2005) 近代火山観測の歴史—気象庁の監視観測を中心に—. 火山, **50**, S7–S18.
- 山里 平 (2015) 新しい降灰予報について. 災害情報, **13**, 30–33.
- 安田成夫・梶谷義雄・多々納裕一・小野寺三朗 (2011) アイスランドにおける火山噴火と航空関連の大混乱. 京都大学防災研究所年報, **54 A**, 59–65.
- 米原 仁 (2012) 境界層過程. 数値予報課報告・別冊, **58**, 気象庁予報部, 8–28.
- Zehner, C., ed (2012) Monitoring Volcanic Ash from Space. ESA-EUMETSAT workshop on the 14 April to 23 May 2010 eruption at the Eyjafjöll volcano, South Iceland. *ESA Pub.*, **STM-280**, 109 p.

(編集担当 山本 希)