

火山噴煙数値モデルのベンチマークテスト

Results of the eruptive column model inter-comparison study

*鈴木 雄治郎¹、コスタ アントニオ^{1,2}*Yujiro Suzuki¹, Antonio Costa^{1,2}

1.東京大学地震研究所、2.Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Bologna

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Bologna

爆発的火山噴火で形成する噴煙柱の高度は、噴出率などの噴出条件を推定するための重要な観測可能量となる。また、大気中における火山灰の拡散計算において、噴煙高度は初期値として用いられる。したがって、噴煙高度と噴出条件の関係を定量的に正しく見積もることは、火山学において最も重要な課題のひとつである。これまで数十年間で、数多くの火山噴煙モデルが開発されてきた。特にこの10年で、水蒸気の相変化の影響を考慮したモデルや、圧縮性流体力学に基づいた時間発展モデルなど、洗練されたモデルが提案された。本研究では、これまでに提案されたこれらの噴煙モデルによるベンチマークテストを行った。なお、この比較研究プロジェクトは、IAVCEI Commission on Tephra Hazard Modellingによって推進された。

ベンチマークテストは、解析モデル、1次元モデル、3次元モデルの3種類を用いた。解析モデルでは、大気構造を単純化し、噴煙と大気の混合効率を経験的係数（エントレインメント係数）で表すことによって、噴煙高度と噴出率を解析的に取り扱った。1次元モデルでは、噴煙の中心軸方向に座標軸に沿った物理量プロファイルを計算する。ただし、1次元モデルでは、噴煙柱が定常的であると仮定し、噴煙・大気の混合効率を経験的に与える。3次元モデルでは、流体力学的な扱いをし、噴煙の非定常な振る舞いを計算する。3次元モデルでは、噴煙と大気の混合は渦拡散によって直接計算されるため、混合効率を仮定する必要がない。本ベンチマークテストでは、4個の解析モデル、9個の1次元モデル、4個の3次元モデルを用いた。噴火強度（噴出率）の異なる2つの噴火事例（weak plumeとstrong plumeと呼ぶ）に関し、共通する計算条件を与え、異なるモデルによる計算結果を比較した。

計算結果を比較したところ、モデルによって定式化が異なるにも関わらず、噴煙の最高高度に関していずれのモデルも非常に良い一致をみた。噴煙高度のばらつきの標準偏差は、weak plumeで20%以内、strong plumeで約10%であった。噴煙と大気の密度が釣り合う浮力中立点の高度についてもモデル間の一致は良く、標準偏差はweak plumeで9%、strong plumeで19%程度であった。噴煙の中心軸に沿った物理量分布を比較したところ、1次元モデルと3次元モデルに違いが見られ、その違いはstrong plumeで顕著であった。本比較により、1次元モデルで仮定されている噴煙・大気の混合効率は、weak plumeの場合には適切な噴煙高度を見積もることができるが、strong plumeの場合には噴煙高度を過小評価してしまうことが分かった。今後、3次元シミュレーションを用いて混合効率を求めることにより、1次元モデルの実用性が高まると考えられる。

キーワード：爆発的火山噴火、噴煙柱ダイナミクス、流体力学モデル、モデル間比較、噴火条件パラメータ

Keywords: explosive volcanism, eruptive plumes dynamics, fluid dynamic models, model inter-comparison, eruption source parameters

降礫予測における風の影響を考慮した供給源モデルの検討

Consideration of Wind Effects on the Eruption Source for the Lapilli Fall Prediction

*新堀 敏基¹、林 洋介²、菅井 明^{1,2}、黒木 英州²、白土 正明²、藤原 健治³、石井 憲介¹、佐藤 英一¹、福井 敬一¹

*Toshiki Shimbori¹, Yosuke Hayashi², Akira Sugai^{1,2}, Hidekuni Kuroki², Shomei Shirato², Kenji Fujiwara³, Kensuke Ishii¹, Eiichi Sato¹, Keiichi Fukui¹

1.気象研究所、2.気象庁、3.鹿児島地方気象台

1.Meteorological Research Institute, 2.Japan Meteorological Agency, 3.Kagoshima Local Meteorological Office

火山噴火発生に伴う降下火砕物のうち、比較的短時間で降ってくる小さな噴石（降下火山礫、以下、降礫）は、風の影響を受けると遠地まで輸送されることがある。このため近年の噴火でも、火口から10数km離れた居住地域まで達した粒径数cmの降礫により、怪我などの人的被害や自動車のガラス破損といった物的被害が発生している（例えば、気象庁地震火山部、2013）。このような災害を軽減するために、2015年3月から始まった気象庁の新しい降灰予報（Hasegawa et al., 2015; 菅井・他、2015）では、その定時と速報において、降灰とともに降礫の予想範囲を発表している。降灰予報は、領域移流拡散モデル（JMA-RATM、以下、RATM）の計算結果に基づくが、その初期値である火山灰・火山礫の供給源モデルにはこれまで、風の影響を考慮していなかった。このため、強風時の降灰・降礫の予想範囲は過小傾向になる問題がある。

この課題に対処するために気象研究所では、鹿児島地方気象台との地方共同研究「桜島噴火に伴う降下火山レキによる被害軽減のための研究」（2014～16年度）の一環として、高層気象台の測風ライダーを用いた火山近傍での観測（星野・他、本セッション）とともに、RATMの供給源モデルの改良を進めている。RATMの初期値は現在、経験的な供給源モデルであるSuzuki（1983）に依拠しているが、本研究では特に弱い噴煙において風の影響を考慮するにあたり、

(i) 鉛直分布（Suzukiの粒子供給率関数）は変えない

(ii) 水平分布のみ井田（2014）の方法で風下へシフト

の方針を取った。本発表では、このシンプルな方法を適用した供給源モデルを初期値とする、RATMによる降礫予測について、2013年桜島噴火や2015年口永良部島噴火などの事例で降灰予測とともに検証する。

風の影響を考慮した物理的な噴煙モデルには、BENTモデル（Bursik, 2001）を始め、SK-3Dモデル（Suzuki and Koyaguchi, 2015）や気象庁非静力学モデル（橋本・他、本セッション）などの研究がある。これらの成果を、降灰予報の初期値として運用で活用するためには、あらゆる気象条件の下で、全国の活火山を対象に、噴火時に観測できる物理量から、即時的に作成できることが必要であり、本研究における改良はそれまでの橋渡しと考えている。また供給源モデルの改良は、今後、気象レーダー（例えば、佐藤・他、本セッション）や気象衛星ひまわり8号（例えば、林・他、本セッション）による観測値を取り込んだ火山灰データ同化（石井・他、本セッション）に基づく解析値（初期値）作成において、その第一推定値を改善する意味でも重要になる。

参考文献

Bursik, M., 2001: Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3621-3624.

Hasegawa, Y., A. Sugai, Yo. Hayashi, Yu. Hayashi, S. Saito and T. Shimbori, 2015: Improvements of Volcanic Ash Fall Forecasts issued by the Japan Meteorological Agency. *J. Appl. Volcanol.*, 4: 2.

井田喜明, 2014: 自然災害のシミュレーション入門. 朝倉書店, pp. 139-154.

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, p. 259.

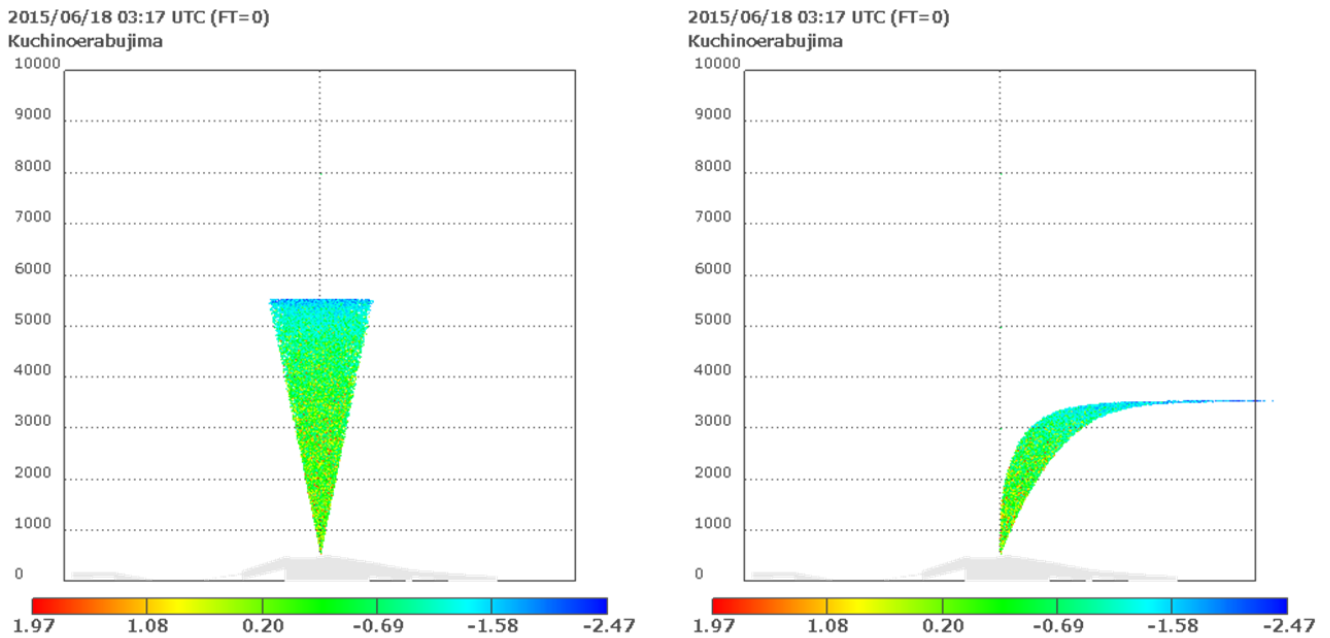
菅井 明・黒木英州・林 洋介・新堀敏基, 2015: 新しい降灰予報について. 日本火山学会講演予稿集, 155.

Suzuki, T., 1983: A theoretical model for dispersion of tephra: Arc Volcanism. *TERRAPUB*, pp. 95-113.

Suzuki, Y. J. and T. Koyaguchi, 2015: Effects of wind on entrainment efficiency in volcanic plumes. J. Geophys. Res., 120, 6122-6140.

キーワード：移流拡散モデル、供給源パラメータ、風の影響、火山礫、火山灰、降灰予報

Keywords: Atmospheric Transport Model, eruption source parameter, effects of wind, lapilli, volcanic ashes, Volcanic Ash Fall Forecast



Examples of eruption sources (vertical cross-sections of initial tracers) in the JMA-RATM. Left: without wind effects based on Suzuki distribution. Right: with wind effects in this research. Colors indicate the logarithmic grain-sizes of tracers.

気象レーダー網を用いた噴煙高度のベイズ推定

Bayesian Estimation of Volcanic Ash Plume Height by Weather Radar Network

*佐藤 英一¹、福井 敬一¹、新堀 敏基¹、石井 憲介¹、高木 朗充¹、菅井 明²、黒木 英州²、真木 雅之³

*Eiichi Sato¹, Keiichi Fukui¹, Toshiki Shimbori¹, Kensuke Ishii¹, Akimichi Takagi¹, Akira Sugai², Hidekuni Kuroki², Masayuki Maki³

1.気象研究所、2.気象庁、3.鹿児島大学

1.Meteorological Research Institute, 2.Japan Meteorological Agency, 3.Kagoshima University

現在、気象庁の降灰予報は、基本的に遠望カメラから得られた噴煙高度を用いて作成した初期値を利用している。この手法には、視界が悪い場合、目視観測による初期値の作成が困難であるという欠点がある。そのような状況の中、期待されているのが気象レーダー等のリモートセンシングによる噴煙高度の推定である。気象レーダーは電波を用いるため、曇りの天気でも噴煙を捉えることが出来る。ただし、雨天の場合、気象庁一般気象レーダーのような単偏波レーダーでは検出が難しい。

著者らは、2014年9月27日の御嶽山の噴火事例の解析を行い、気象庁一般気象レーダー網によるエコー頂高度は、間ノ岳から取られた写真から導出した噴煙高度の情報と比べて過大評価であったと結論付けた。噴煙を捉えたレーダー中、東京レーダーのビーム高度が異常伝搬により過大評価され、その結果、それらを合成したエコー頂高度も過大となってしまったことと考えられる。より高度な噴煙高度推定をするため、ベイズ推定を用いた手法を提案する。その手法は以下の通りである。各レーダーによる観測データから、噴煙のトップが存在する確率密度関数（PDF）を仮定する。噴煙高度の事前確率の中、それらのPDFを合成することで、エコー頂高度を単一の推定値ではなく、確率密度分布で表現することが出来る。また、事前確率については、ベイズ更新することで精度を高めることが出来る。この手法を用いることで、一部のレーダーが示す異常な噴煙高度は、他のレーダーが示す確率の低い領域に存在するため、合成された確率密度分布における確率も低くなる。この手法の欠点は、特に対象の火山をカバーしているレーダーが少ない場合に、噴煙の存在する範囲を十分絞ることが出来ないことである。その場合、事前確率の影響が大きくなると思われる。本発表では、この手法を噴火事例に適用した結果を紹介する。

キーワード：噴煙高度、気象レーダー網、ベイズ推定

Keywords: Volcanic Ash Plume Height, Weather Radar Network, Bayesian Estimation

移流拡散モデルにおける噴煙のレーダー観測の即時的な利用

Real-time data assimilation of radar-based volcanic ash data in an atmospheric transport model

*石井 憲介¹、新堀 敏基¹、福井 敬一¹、佐藤 英一¹、橋本 明弘¹

*kensuke ishii¹, Toshiki Shimbori¹, Keiichi Fukui¹, Eiichi Sato¹, Akihiro Hashimoto¹

1. 気象研究所

1. Meteorological Research Institute

気象庁東京航空路火山灰情報センター（東京VAAC）では、航空路上の浮遊火山灰による航空機への影響を回避するために、全球移流拡散モデル（JMA-GATM）を用いて火山灰の予測を行っている。

火山噴火発生時の予測計算に用いる火山灰分布の初期値の作成には、Suzuki(1983)に基づく簡易な火山灰供給源モデルが用いられているが、このモデルでは噴煙の形状や火山灰粒子の粒径分布をあらかじめ仮定している。このため、事例によっては実際の噴煙の複雑な形状や粒径分布を表現することができず、予測精度の低下につながっていると考えられる。

一方、気象研究所火山研究部では、平成27年度末から桜島火山において、気象レーダーによる噴煙観測を開始する計画である。そこで、レーダー観測によって得られた観測値をJMA-GATMの初期値に同化し、観測に基づく現実的な噴煙の形状や粒径分布を初期値とすることにより、火山灰の予測精度を向上させることを目的として、火山灰データ同化システムの構築を目指している（日本火山学会2015年秋季大会, P72）。

データ同化手法は、即時性を重視し計算コストの小さな3次元変分法を採用した。解析変数は火山灰密度、及び、粒径パラメータ2個（中央粒径、分散）を選び、互いに独立な変数と仮定した。また、観測誤差共分散行列は対角行列、背景誤差共分散行列は距離に応じて減少するガウス型を仮定した。第一推定値は、火山灰供給源モデル、または、予報値を利用する予定であるが、第一推定値において火山灰が無い格子点には粒径パラメータの値は存在しないため、3次元変分法で計算するためには何らかの値を設定しておく必要がある。そこで、観測によって修正が行われる格子においては、第一推定値に火山灰が無い場合、近傍の第一推定値または観測値を内挿することにより第一推定値を修正することとした。

現在、レーダー観測は開始前であるため、仮想的な観測値を作成し、動作確認をしつつ開発を進めている。本発表では、開発の進捗と仮想的な観測値を用いた実験結果について報告する。

謝辞：プログラムの動作確認の中で、平成26年度東京大学地震研究所一般共同利用の支援を受け鈴木雄治郎先生からご提供頂いたシミュレーション結果を使用しました。

キーワード：データ同化、移流拡散モデル、レーダー、火山灰、数値シミュレーション

Keywords: data assimilation, Atmospheric Transport Model, radar, volcanic ash, numerical simulation

デジタルカメラ画像を利用した火山噴煙の噴火開始検知アルゴリズムの開発

An algorithm for detecting the onset of volcanic eruption from digital images

齊藤 雅典¹、*松本 恵子²、柳田 泰宏²、久利 美和³Masanori Saito¹, *Keiko Matsumoto², Yasuhiro Yanagida², Miwa Kuri³

1.東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻、2.東北大学大学院理学研究科地学専攻、3.東北大学災害科学国際研究所

1.Department of Geophysics, Graduate school of Science, Tohoku University, 2.Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, 3.International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University

活動的火山の噴火現象の準リアルタイムモニタリングは、噴火現象の理解のためにも、また火山関連災害を減らすためにも重要である。しかし噴火発生時は立ち入り規制が敷かれるため、新たな観測点の設置は困難である。そこで本研究では、火口周辺に即時展開可能で簡便な小型火山観測装置に実装できる観測システム開発を目指し、一般的な可視領域のデジタルカメラから逐次取得した画像データを用いて、火山噴火の発生検知と噴煙域を判別するアルゴリズムを開発した。さらに、阿蘇山の2015年9月14日噴火の画像に対してアルゴリズムを検証した。

一般に、画像から対象を判別するには、統計的に決定された閾値を用いる方法が使われている。しかし、最適な閾値は大気の状態や太陽の位置などによって異なるため、固定した閾値による誤判別が生じる。そこで本研究では、画像から取り出したデジタル値を光学理論に基づいた物理パラメータに変換し、画像ごとに噴煙判別の最適な閾値を設定して対象を判別するアルゴリズムを開発した。特徴は、統計的な値を得るための事前データが不要で、またそれを用いることによるデータの偏りの影響がない点である。本研究で開発したアルゴリズムは2つのステップを要する。まず、入力画像（JPEG）から取り出したRGB値を、輝度を示すIntensity Index、及び散乱の波長依存性を示すSmall Particle IndexとMolecular Indexに変換する。これにRGBを加えた6つのパラメータから、固定した閾値を用いて晴天・雲域・噴煙域の判別が可能になった。次に、前後の時間の画像の噴煙域面積の時間微分から「噴火開始」を検知する。検知できた場合、新たに噴煙域として拡大した画素から物理パラメータを取得し、噴煙判別の最適な閾値を構築する。この画素における誤判別は非常に少ないことを確認した。このようなプロセスで、最適な閾値を逐次設定して、すべての画像に対して噴煙判別を行った。

開発したアルゴリズムを、阿蘇山の2015年9月14日噴火の気象庁の噴煙画像（9時4分～10時8分まで、2分おき）に適用した。定常的な白色噴煙を放出する状態（9時44分時点まで）では、解析画像は噴火活動が平穏である青色を表示した。一方、9時46分の画像では「噴火開始」を検知し、噴煙に該当する部分を赤色、それ以外に該当する部分を白色で表示できた。噴煙が発達している間は、噴煙域の時間変化に設定した閾値以上であれば噴煙域を赤色表示し続けた。しかし、噴煙が画像全体を覆ってしまつて噴煙域の時間変化が閾値以下になると青色表示に戻った。気象庁は9時43分に噴火が発生したと発表しているものの、対応する画像では9時44分までは定常的な噴煙を上げていて、灰色の噴煙が噴出したのは9時46分である（検知した「噴火開始」）。従つて本手法は、画像のみから噴火の遷移や噴火の開始を検知するのに適していると言える。また、未噴火から噴火開始を検知できるだけでなく、阿蘇のように定常的に噴煙を放出している噴火から爆発的噴火への遷移を検知できることも本アルゴリズムの特徴である。さらに今回は一枚の画像の解析に要する計算時間が1秒程度であるので、準リアルタイム解析が可能なシステムと言える。

現在、無人ヘリで運搬可能な小型火山観測装置にデジタルカメラを実装して試験運用しており、今後は、実際に取得した画像を本アルゴリズムで解析して火山活動を判断したいと考えている。

キーワード：噴煙、デジタルカメラ、準リアルタイム

Keywords: volcanic plume, digital camera, near real-time

噴煙柱崩壊に伴う火砕流の2層浅水波モデル計算

Numerical simulations of a two-layer shallow-water model for pyroclastic flows by column collapse

*志水 宏行¹、小屋口 剛博¹、鈴木 雄治郎¹

*Hiroyuki SHIMIZU¹, Takehiro KOYAGUCHI¹, Yujiro J. SUZUKI¹

1.東京大学地震研究所

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

爆発的火山噴火では、噴煙柱の崩壊によって生じる火砕流がしばしば観察される。火砕物粒子と火山ガスから成る火砕流は、周囲大気との密度差を駆動力に地表面を流動する重力流として振る舞う。火砕流の内部には、粒子濃度の低い上部領域（低密度部）と粒子濃度の高い底部領域（高密度部）から成る密度成層が発達する。火砕流の拡大速度や到達距離といったダイナミクスは、各領域における物理過程（例えば、周囲大気を取り込みや地表面との摩擦）や領域間の相互作用（例えば、沈降に伴う粒子の領域間移動）の影響を受ける。本研究では、火砕流ダイナミクスに対するこれらの影響を、重力流の流体力学的理論に基づく数値シミュレーションによって定量化し理解することを目的とする。

密度成層をもつ火砕流を表現するために、本研究では、低密度部と高密度部から成る2層流モデルを開発した。2層それぞれを浅水波方程式に基づいて定式化し、HLL数値流束を用いた有限体積法に基づいてそれらを離散化した。低密度部では、粒子の沈降・上面からの周囲大気を取り込み・下面での高密度部から受ける抵抗を考慮した。高密度部では、地表面との摩擦・低密度部からの粒子の供給・粒子の堆積作用を考慮した。また、浅水波方程式に基づいて重力流の振る舞いを解くためには、流れの先端において、流れの駆動力と周囲流体から受ける抵抗の力学的バランスを正確に計算することが重要であり、流れの密度によってその数値的取り扱いが異なる（志水ほか、2015, JpGU）。低密度部では、先端部にその力学的バランスを境界条件として与えた。一方、高密度部では、先端よりも先の領域に厚さが十分に薄く静止した仮想流体層を与えることによって、その力学的バランスを近似的に計算した。

単発的な噴煙柱崩壊による火砕流を想定した数値シミュレーションを行った。低密度部のみから成る静止した流体を矩形で与え、それが時間 $t=0$ において開放された際の水平面上での時間発展を観察した。計算の結果、初期に静止していた低密度部が重力流として発達する様子を捉えた。低密度部からの沈降粒子が供給されることで高密度部が発達し、その高密度部も重力流として拡大した。さらに、高密度部の粒子が沈降し、地表面に堆積層を形成した。粒子の沈降速度が高密度部や堆積層の発達に与える影響を調べるため、粒径を変えた計算を行った。粒径が小さい場合、低密度部から高密度部への粒子供給率は小さくなり、高密度部はあまり発達しなかった。その結果、高密度部の拡大速度は低密度部よりも小さく、高密度部は低密度部を追従するレジームとなった。一方、粒径が大きい場合、低密度部から高密度部への粒子供給率が大きくなり、高密度部が著しく発達した。その結果、高密度部の拡大速度は低密度部よりも大きく、高密度部が低密度部に先行するレジームとなった。これらのレジームの違いは、火砕流堆積物の最下層が低密度部と高密度部のどちらによって形成されるかを定めるため、野外観察で見られる堆積構造の多様性を説明する可能性がある。

キーワード：火砕流、浅水波モデル、2層流モデル、数値シミュレーション、噴煙柱崩壊、火砕流堆積物

Keywords: pyroclastic flows, shallow-water model, two-layer model, numerical simulation, volcanic column collapse, pyroclastic flow deposits