

## 火山噴煙の気象レーダー観測

### Volcanic ash plume observation by weather radars

\*佐藤 英一<sup>1</sup>、福井 敬一<sup>1</sup>、新堀 敏基<sup>1</sup>、石井 憲介<sup>1</sup>、徳本 哲男<sup>1</sup>、真木 雅之<sup>2</sup>、井口 正人<sup>3</sup>

\*Eiichi Sato<sup>1</sup>, Keiichi Fukui<sup>1</sup>, Toshiki Shimbori<sup>1</sup>, Kensuke Ishii<sup>1</sup>, Tetsuo Tokumoto<sup>1</sup>, Masayuki Maki<sup>2</sup>, Masato Iguchi<sup>3</sup>

1. 気象研究所、2. 鹿児島大学、3. 京都大学

1. Meteorological Research Institute, 2. Kagoshima University, 3. Kyoto University

これまで、気象レーダーで噴火を観測した事例は数多くある（例えば、澤田（2003）、Marzanoほか（2013））が、定量的な火山灰推定（QAE）技術は未だ確立されていない。その原因のひとつとして、反射強度の不確実性がある。大まかにいえば、このパラメーターは物質の大きさと数の両方を表すが、その2つを分離することが出来ない。言い換えると、反射強度だけでは、粒径分布（PSD）を決定することは出来ない。

そのような状況の中、二重偏波気象レーダーによる火山噴煙の観測が、噴煙内部のPSDに対する情報を得られると期待されている。一般に、二重偏波レーダーは水平と垂直の2つの電波を同時に送信し受信することで、2成分の比や相関係数を得ることが出来る。これらのパラメーターは、QAEに対して有効であると考えられる。

火山噴煙の観測に有効と考えられるもう一つの手段が高速スキャンレーダーである。高速スキャンレーダーによる観測は火山噴煙の3次元画像をわずかな時間で得られるため、この種のレーダーが噴煙のダイナミクスの理解に貢献すると期待している。

気象研究所では、2018年3月からXバンドMPレーダー（MRI-XMP）とKuバンド高速スキャンレーダー（MRI-Ku）による桜島の噴煙観測を開始している。本発表では、桜島の噴火に伴う噴煙のレーダー観測結果を示すとともに、今後の課題や展望について議論する。

#### 参考文献：

澤田可洋, 2003: 気象レーダーで観測された噴煙エコーの記録, 測候時報, **70.4**, 119-169.

Marzano, F. S., E. Picciotti, M. Montopoli, and G. Vulpiani, 2013: Inside volcanic clouds: Remote sensing of ash plumes using microwave weather radars, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1567–1586, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00160.1.

キーワード：火山噴煙、気象レーダー、二重偏波レーダー、高速スキャンレーダー、桜島

Keywords: volcanic ash plume, weather radar, polarimetric radar, fast-scan radar, Sakurajima volcano

# 火山灰拡散予測のための火山灰データ同化システムの開発

## Development of a Volcanic Ash Data Assimilation System for Atmospheric Transport Model

\*石井 憲介<sup>1</sup>、新堀 敏基<sup>1</sup>、佐藤 英一<sup>1</sup>、林 勇太<sup>2,1</sup>、徳本 哲男<sup>1</sup>、福井 敬一<sup>1</sup>、橋本 明弘<sup>1</sup>

\*Kensuke Ishii<sup>1</sup>, Toshiki Shimbori<sup>1</sup>, Eiichi Sato<sup>1</sup>, Yuta Hayashi<sup>2,1</sup>, Tetsuo Tokumoto<sup>1</sup>, Keiichi Fukui<sup>1</sup>, Akihiro Hashimoto<sup>1</sup>

1. 気象研究所火山研究部、2. 気象衛星センター

1. Meteorological Research Institute, 2. Meteorological Satellite Center

In the Japan Meteorological Agency (JMA), there are two major operations related to volcanic ash forecasting: the Volcanic Ash Fall Forecast (VAFF) and the Volcanic Ash Advisory (VAA). The VAFF provides information for local governments and residents who may be affected by ash fall from volcanoes (Hasegawa et al., 2015). The VAA is issued to airline companies and aviation authorities for safe aviation services.

In these operations, the forecasts are calculated by atmospheric transport models including advection process, gravitational fall process and deposition process (wet/dry). The most important and uncertain factor of the models is the initial condition of volcanic ash. In operations, the initial condition is based on the empirical model of Suzuki (1983). Since it includes many assumptions and empirical research, it often fails to reproduce actual plumes of volcanic eruptions.

On the other hand, in recent years, research of observation techniques of volcanic ash by weather radar and satellites have advanced. The Meteorological Research Institute (MRI), one of the facilities of JMA, has started observation using two different types of weather radar. Besides, in 2015, the Himawari-8 geostationary meteorological satellite was put into operation. Himawari-8 has sixteen observation bands as against five in its predecessor, MTSAT-2. Using this abundant observation data of new-generation satellite, physical quantities of volcanic ash clouds (including top height, mass loading and particle radius) can be retrieved (Hayashi et al., JpGU2016).

In the present study, using both radar and satellite observation, we are developing a volcanic ash data assimilation system to improve initial conditions of the atmospheric transport models.

We have adopted the three-dimensional variational data assimilation scheme (3D-Var), which has low computational cost and is suitable for creating initial conditions immediately after an eruption occurs. Analysis variables are concentration of ash and size distribution parameters (median particle size and dispersion) which are mutually independent. It is assumed that observation error covariance matrix is diagonal, and background error covariance matrix has the relationship between correlation and distance and has the Gaussian form (Ishii et al., JpGU2016).

From the radar observation, it is expected that we can obtain three-dimensional ash concentration in the atmosphere and parameters of ash particle size distribution in the atmosphere. On the other hand, the satellite observation is expected to provide only two-dimensional parameters of ash clouds such as mass loading, top height and particle radius. Currently, we are trying to estimate the thickness of ash clouds using vertical wind shear.

Here, we show two case studies of data assimilation system. One is the February 14th, 2014 eruption case of Kelut in Indonesia for an experiment of data assimilation with virtual radar observation, and the other is the May 29th, 2015 eruption case of Kuchinoerabujima in Japan for an experiment of data assimilation with actual satellite observations.

References

- 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.
- Hayashi, Y., D. Uesawa, K. Bessho (2016) Observation of volcanic ash clouds by Himawari-8. JpGU 2016, MIS26-06.
- Ishii, K., T. Shimbori, K. Fukui, E. Sato, A. Hashimoto (2016) Real-time data assimilation of radar-based volcanic ash data in an atmospheric transport model. JpGU 2016, MIS26-P04.
- Suzuki, T., 1983: A theoretical model for dispersion of tephra.:Arc volcanism: Physics and tectonics, D. Shimozuru and I. Yokoyama, editors, *TERRAPUB, Tokyo*, 95-113.

キーワード : データ同化、移流拡散モデル、火山灰

Keywords: data assimilation, atmospheric transport model, volcanic ash

## ひまわり8号30秒データで見た噴火直後の火山噴煙

### Observations of volcanic eruption columns using Himawari-8 Super-Rapid Scan 30-sec imagery

\*福井 敬一<sup>1</sup>、佐藤 英一<sup>1</sup>、林 勇太<sup>2,1</sup>、松田 康平<sup>3</sup>、石井 憲介<sup>1</sup>、新堀 敏基<sup>1</sup>、徳本 哲男<sup>1</sup>

\*Keiichi Fukui<sup>1</sup>, Eiichi Sato<sup>1</sup>, Yuta Hayashi<sup>2,1</sup>, Kohei Matsuda<sup>3</sup>, Kensuke Ishii<sup>1</sup>, Toshiki Shimbori<sup>1</sup>, Tetsuo Tokumoto<sup>1</sup>

1. 気象研究所火山研究部、2. 気象衛星センター、3. 気象庁火山課

1. Meteorological Research Institute/JMA, 2. Meteorological Satellite Center/JMA, 3. Japan Meteorological Agency

気象庁は2015年7月7日より、次世代静止気象衛星ひまわり8号の運用を開始した。ひまわり8号に搭載された可視赤外放射計 (Advanced Himawari Imager, AHI) は、前代のひまわり7号MTSAT-2に搭載されていた放射計に対し、観測波長帯数が5バンド (可視1, 赤外4) から16バンド (可視3, 近赤外3, 赤外10) へと大幅に増強され、空間分解能もほぼ倍に高解像度化した。さらに、全球の観測頻度も60分ごとから10分ごとに向上するとともに、日本域 (東西2000 km, 南北1000 kmに2分割) や台風観測などに利用される東西南北1000km四方の可動領域では常時2.5分ごとの観測も可能となっている (領域観測1, 2, 3)。また、東西1000km, 南北500kmの領域2か所 (領域観測4, 5) を常時約30秒ごとに観測している。この観測は、主に位置合わせや月を利用した感度校正を目的としている (Bessho *et al.* 2016) が、火山噴火や積乱雲の観測にも活用可能であり、最近では試験的に、桜島や浅間山などを含む領域を対象として観測していることも多い。

ひまわり8号の高解像度・高頻度観測によってMTSATに比べ小さな噴火も観測可能となるとともに、多バンド化によって、火山灰雲高度推定の精度向上と、火山灰雲の光学的厚さや粒径などの情報を含む火山灰プロダクトの開発が進められている (Hayashi *et al.* 2016)。さらに、火山ガス (SO<sub>2</sub>) の検出も可能となってきている。

我々は、噴火直前の火口の温度状況や噴火直後の噴煙柱の成長の様子を捉えるため、30秒ごとの超高頻度観測 (Super-Rapid Scan) データを利用した研究を開始した。手始めに、空間分解能0.5kmのバンド3 (0.64 μm) による桜島爆発時の噴煙柱のひまわり画像と監視カメラ、気象レーダーデータ (Sato *et al.* 2017) を比較し、ひまわり画像によって噴煙柱の上昇過程をどの程度把握可能か調査した。

#### 参考文献

Bessho, K. *et al.* (2016) An Introduction to Himawari-8/9 —Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 151-183, DOI:10.2151/jmsj.2016-009.

Hayashi, Y. *et al.* (2016) Observation of volcanic ash clouds by Himawari-8. JpGU 2016, MIS26-06.

Sato, E. *et al.* (2017) Volcanic ash plume observation by weather radars. JpGU2017.

キーワード：ひまわり8号、30秒データ、噴煙柱、火山噴火、静止気象衛星、桜島

Keywords: Himawari-8, Super-Rapid Scan, eruption column, volcanic eruption, geostationary meteorological satellite, Sakurajima volcano

## A sequence of plinian eruption preceded by dome destruction at Kelud volcano, Indonesia, on February 13, 2014: insights from tephra fallout and pyroclastic density current deposits

\*前野 深<sup>1</sup>、中田 節也<sup>1</sup>、吉本 充宏<sup>2</sup>、嶋野 岳人<sup>3</sup>、外西 奈津美<sup>1</sup>、Zaennudin Akhmad<sup>4</sup>、井口 正人<sup>5</sup>  
\*Fukashi Maeno<sup>1</sup>, Setsuya Nakada<sup>1</sup>, Mitsuhiro Yoshimoto<sup>2</sup>, Taketo Shimano<sup>3</sup>, Natsumi Hokanishi<sup>1</sup>, Akhmad Zaennudin<sup>4</sup>, Masato Iguchi<sup>5</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 山梨県富士山科学研究所、3. 常葉大学大学院環境防災研究科、4. Centre for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Bandung, Indonesia、5. 京都大学防災研究所火山活動研究センター

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government, 3. Graduate School of Environmental and Disaster Research, Tokoha University, 4. Centre for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Bandung, Indonesia, 5. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

A plinian-style eruption with a radially spreading umbrella cloud occurred on February 13, 2014, at Kelud volcano, Indonesia. We present the sequence of this plinian event based on a geological study of the eruptive products, analysis of satellite images of the eruption plume, and surface features of the volcanic edifice before and after the eruption. The eruptive deposits were divided into four major depositional units (Units A, B, C, and D) and used to determine the sequence of events. The plinian phase was preceded by partial destruction of the existing lava dome and generation of high-energy pyroclastic density currents (PDCs) with a maximum runout distance of ~6.8 km mainly towards the NE. The PDCs produced a series of depositional subunits (Units A<sub>0-2</sub>) and caused surface damage (blown-down trees and vegetation) over an area of 12 km<sup>2</sup> (stage 1). The main phase of the eruption was characterized by a strong eruption plume that produced widespread fallout tephra (Unit B) over East and Central Java (stage 2). The winds above the volcano significantly affected the tephra dispersal process. In stage 3, the plinian column collapsed, generating dense PDCs that flowed down the volcano valleys, producing pumiceous lobate deposits (Unit C). The declining phase of the eruption produced fine-rich fallout tephra layers (Unit D<sub>1-2</sub>) from low-level eruption plumes and/or ash lofted from PDCs. The eruption sequence constructed from field observations is supported by geophysical observations, including remote seismic and infrasound signals, total electron content variation, lightning strokes, and satellite observations. The initial high-energy PDCs and fallout tephra contained juvenile pumice and dome-derived lithic clasts, and isolated crystals originated from the fragmentation of porphyritic magma. The deposit features and componentry suggest that newly ascended magma triggered the destruction of the lava dome and the generation of high-energy PDCs, and during the subsequent climactic phase the dome was completely destroyed. Thus, the pre-existing lava dome significantly affected the course of the eruption. This type of eruption sequence has not been previously documented in the historical records of Kelud volcano activity. The total volume of erupted material was estimated as 0.25–0.50 km<sup>3</sup> (bulk deposit volume), corresponding to 0.14–0.28 km<sup>3</sup> in DRE, and the mean eruption rate as  $6.5 \pm 2.8 \times 10^7$  kg/s. The scale of the 2014 eruption had a VEI of 4, and was one of the largest eruptions at Kelud volcano over the past century. The eruption sequence and estimated physical parameters of the 2014 eruption will help assess future volcanic activity and potential hazards at Kelud volcano.

キーワード：プリニアン、火砕物密度流、倒木、溶岩ドーム、ケルウト

Keywords: Plinian, pyroclastic density current, blown-down tree, lava dome, Kelud

# 浮力増加を伴う乱流プルームの一次元定常モデルの構築と火山噴煙への適用

## A One-dimensional Steady State Model of a Buoyancy-generating Turbulent Plume and its Application to Volcanic Eruption Columns

\*石峯 康浩<sup>1</sup>

\*Yasuhiro Ishimine<sup>1</sup>

1. 国立保健医療科学院健康危機管理研究部

1. Department of Health Crisis Management, National Institute of Public Health

高さとともに浮力フラックスが増加する乱流プルームの一次元定常モデルについて発表する。噴煙柱の基本的な特徴を適切に表現するには、火山噴煙に取り込まれる大気の熱膨張によって浮力フラックスが増加することを定式化することが重要であると考えからである。初めに、一様な静止流体中で浮力フラックスが高さに比例して増加する仮想的な軸対象の乱流プルームに関して議論し、プルーム内の流体の上昇速度が高さによらず一定という解析解が得られることを示す。この結果は、上昇速度が高さの1/3乗に比例して減少するという非圧縮乱流プルームの解と対照的である。一様な流体ならびに成層流体中のより現実的な乱流プルームに関しても上のモデルを修正して議論し、いくつかの特徴的な長さスケールを導入する。これらの長さスケールを使って浮力が増加する場合の乱流プルームの到達高度についても議論する。これらの長さスケールを使った数値解析により、実際の火山噴煙では最高高度に到達する前に熱エネルギーを大気を膨張させるためにすべて消費してしまっていることが示唆された。また、実際の火山噴煙柱内の浮力フラックスは、従来の非圧縮流体の乱流プルームに関する理論で見積もられているものの半分以下である可能性も示唆された。今回、構築した一次元モデルは、噴煙柱の“超浮力的な振る舞い”に関する物理背景についても新たな知見をもたらしたと考えられるので、この点についても発表する。

キーワード：噴煙柱、乱流プルーム、一次元モデル、浮力フラックス、熱膨張

Keywords: Eruption column, Turbulent plume, One-dimensional model, Buoyancy flux, Thermal expansion

# 桜島火山近傍LIDAR観測による火山噴出物の散乱特性

## Backscattering characteristic of volcanic eruptions based on LIDAR observation around Sakurajima Volcano

\*日向 洋<sup>1</sup>、井口 正人<sup>2</sup>、鍵山 恒臣<sup>1</sup>

\*Hiroshi Hinata<sup>1</sup>, Masato Iguchi<sup>2</sup>, Tsuneomi Kagiya<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 京都大学防災研究所附属火山活動研究センター

1. Graduate school of Science, Kyoto University, 2. Sakurajima Volcano Reserach Center, Disaster Prevention Reserach Institute, Kyoto University

火山から遠方に設置されたLIDAR (Light detection and Ranging) によって噴火後に大気中を浮遊している火山灰が観測され、粒子によるレーザー光の散乱を示す散乱強度や粒子の非球形度を示す偏光解消度について議論されてきた (例えば, Sassen et al., 2007). 本研究では, 2009年以降, 火山噴火が多発する桜島火山の昭和火口の上空を対象としてLIDAR観測を行い, 火山灰を含む噴煙および白色噴煙の散乱強度と偏光解消度の時間変化および空間分布を明らかにした.

白色噴煙は偏光解消度の最頻値が火口上空において0.05~0.10と雲と同様の値となったことから, 水滴からなることが確かめられた. 散乱強度は火口周辺で最大値となり, 移流される方向に離れていくにしたがって, 低下するが, 偏光解消度は増加した. 水滴の蒸発速度を求め, 乾燥した大気との接触により火口上空では多かった水滴が蒸発し, 非球形粒子の火山灰粒子の割合が相対的に高くなっていったと推定した.

一方, 爆発時に放出された火山灰を含む噴煙の偏光解消度は最頻値が0.40~0.45と, 雲および白色噴煙と比較して大きくなった. 特に, 爆発噴火発生直後の火口上空では最大0.72の偏光解消度が得られた. この高い偏光解消度は火口から離れると, 急激に低下し, 0.45~0.50の値に収束した. 火口上空は非球形粒子である火山灰濃度が高く, 高い偏光解消度が得られたものと考えられる. 一方, その低下については, 火山灰粒子の拡散および落下による火山灰粒子の濃度の減少や, 噴煙上昇に伴う上昇気流または噴煙の冷却により生成された水滴の混入がその原因と推測できる.

キーワード : 白色噴煙、火山灰を含む噴煙、ライダー、散乱強度、偏光解消度、桜島火山

Keywords: Volcanic smoke colored white, Volcanic smoke include volcanic ash, LIDAR, Backscattering intensity, Depolarization ratio, Sakurajima Volcano