

PIVを用いた桜島火山噴煙の噴出速度に関する検討

瀧本浩史*・石峯康浩**・木下紀正***・横尾亮彦****,*****・井口正人*****

* 東京工業大学国際開発工学専攻

** 理化学研究所

*** 鹿児島大学教育実践総合センター

**** 東北大学大学院理学系研究科

***** 京都大学防災研究所

要 旨

桜島火山・昭和火口の噴火活動で発生した噴煙の噴出速度を、PIV法で定量的に解析した。解析対象は、噴煙柱が安定して上昇し続けた2007年5月24日午前10時19分の噴火（上昇ケース）、および、噴煙柱の崩壊が見られた2008年5月7日午前6時38分の噴火（崩壊ケース）の2ケースとした。噴煙表面での陰影に対してPIV解析を行い、移動速度を算出したところ、いずれのケースにおいても良好な速度場が得られた。上昇ケースでは、噴火開始後5秒間の火口直上における最高鉛直速度の平均値は約26m/sとなり、これは噴煙上縁部の移動速度の同じ5秒間での平均値31m/sと近い値となった。同じく、崩壊ケースでは、火口直上の最高速度は19m/sとなった。また、上昇ケースについては、火口直上での鉛直速度の時系列に周期的な変化があり、そのストローハル数はおよそ1であった。この時間変化は、サーマル状の噴煙塊の通過に対応していると考えられる。

キーワード： 火山噴火、噴煙、噴出速度、PIV、映像解析

1. はじめに

桜島火山では2006年以降、昭和火口における噴火活動が活発になっている。特に、2009年10月以降、同火口での爆発的噴火が頻発し、火山灰の放出量も増加している。その結果、2009年1年間の桜島における爆発的噴火の回数が548回に達し、鹿児島地方気象台が記録を取り始めた1956年以降で最多となった。

最近の昭和火口における噴火の特徴は、2008年2月6日の例のように、火口直上で噴煙の一部が上昇速度を失って火口に向かって崩落し、小規模な火砕流を発生させる場合がある点である。この火砕流の発生様式は「噴煙柱崩壊型」と呼ばれ、1990年代に長崎県の雲仙普賢岳で頻発した「ドーム崩壊型」の火砕流よりも、甚大な災害を引き起こす傾向が強い。例えば、イタリア・ベスピオ火山のAD79年の噴火で噴煙柱崩壊型の火砕流が発生し、2000人以上が犠牲となっている（Sigurdsson et al. 1985）。このため、桜島火山においても、今後、大規模な噴煙柱崩壊型の火砕流が発生する危険性がないのか、発生要因に

ついて注意深く検討する必要がある。

噴煙柱崩壊型の火砕流は、主要な火山災害要因であるため、その発生メカニズムに関しては多くの研究が行われてきた（例えば、Wilson et al., 1978）。しかしながら、このようなタイプの火砕流は稀にしか起こらず、定量的な観測を実施できる機会が乏しい。そのため、理論・実験もしくはコンピュータ・シミュレーションに基づく先行研究がほとんどであった。一方、我々は、最近の昭和火口における一連の噴火において、噴煙柱の崩壊過程を含む良質な噴煙映像を取得することに成功した。そこで、噴煙柱崩壊の発生条件を明らかにすることを目指して、これらの映像に画像解析技法の一種であるPIV（画像粒子流速測定法）を適用し、噴煙運動を面的かつ定量的に把握することを試みた。

2. 手法

2.1 噴煙映像

本研究で用いた噴煙の映像は、京都大学防災研究

所附属火山活動研究センターが日本放送協会と共同で、高感度カメラによって、2006年6月以降、約3年間にわたり24時間体制で撮影したものの一部である。撮影地点は、昭和火口から約4km離れた黒神観測点である (Fig.1)。撮影に用いたカメラはNEC製NC-840Bで、撮影された映像は空間解像度640×480ピクセル、フレームレート30fpsである。

2.2 PIV

PIVは、トレーサー粒子によって可視化した流れ場を連続的に撮影し、各画像間の粒子位置の変位量を画像解析により求めることで流速を計測する手法である。通常は、実験室内にセットされた流れに微小粒子を混濁させ、シート状のレーザー光で可視化して映像を取得するが、火山噴煙の場合には、そのような操作ができない。そこで本研究では、噴煙表面上に現れる乱流渦の陰影を追跡することで、噴煙の運動速度を求めた。この陰影のパターンを追跡するアルゴリズムとしては、加賀ら (1994) が提唱した輝度差累積法を用いた。この手法を本研究に用いる利点は、石峯ら (2009) に詳しい。

PIVの画像解析では、噴煙表面の乱流渦の陰影を追跡するため、コントラストのつきやすい晴天時・順光時の映像であることが望ましい。逆光時のデータでは、信号雑音比が小さくなり、乱流渦の追跡が正しく行えないため、所々に速度データの欠損や誤ベクトルと呼ばれる不自然なベクトルが見られるためである。この問題を解決するには、感度の良いカメラを用いることや、僅かな明るさの違いを記録できる輝度階調の大きな撮影システムを利用することなどが挙げられる。夜間については、可視光による観測がほとんど不可能であるため、赤外映像 (例えば、金柿ら, 2004) の利用などを検討する必要がある。

また、本研究では、噴煙表面の移動速度を解析対象としていることに注意されたい。すなわち、噴煙内部の上昇速度をPIVから直接求めることはできない。そのため、噴煙のダイナミクスに関して、より詳細な検討を行うには、PIVで得られた観測データを既存の理論モデルや数値計算にフィードバックさせる必要がある。

さらに、PIVは解析時にいくつかのパラメータを設定する必要がある、その設定値によって結果に多少の差異が生じる。例えば、粒子の移動速度を求める際は、画像をいくつかの小領域に分割し、その領域内の粒子の分布を追跡することで、領域平均値となる移動速度を求める。この領域は検査領域と呼ばれ、そのサイズが重要なパラメータの一つとなる。検査領域を小さく設定すれば、より小さな渦スケールの運動を捉えることができる半面、陰影パターンの唯

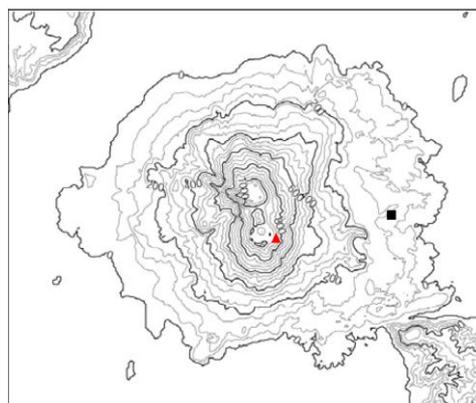


Fig.1 Location of Showa crater (red triangle) and Kurokami observation site (black square).

一性が失われるなどの要因により誤ベクトルが発生しやすくなる。本研究では、これらの検査領域サイズは、誤ベクトルの発生が除去可能な範囲で最小となるように設定した。さらに、濃淡のむらの小さな検査領域については誤ベクトルが発生しやすくなるため、検査領域内の輝度値の分散に下限となる閾値を設けて、解析を行わないようにした。

3. 解析結果

撮影条件が良好な噴煙の中から、噴煙柱が安定して上昇し続け、噴煙柱の崩壊が見られないケース (以下、“上昇ケース”と記す) として2007年5月24日午前10時19分に発生した噴煙を、また、噴煙柱の崩壊が起こったケース (以下、“崩壊ケース”) として2008年5月7日午前6時38分に発生した噴煙を解析対象として選択した。検査領域のサイズは、上昇ケースでは15ピクセル四方、崩壊ケースでは11ピクセル四方に設定した。各ケースでの1ピクセルはそれぞれ、0.60m, 1.58mに対応する。

Fig. 2a, bはそれぞれ、上昇ケース、及び崩壊ケースの瞬間の速度場を示したベクトル図である。いずれの図についても、ベクトルは連続的な分布をしており、噴煙部において現実的な速度ベクトルを抽出することに成功したと判断した。

3.1 上昇ケース

上昇ケースであるFig. 2aでは、強い上昇流が見られ、それがいくつかの塊になっている。そして、サーマルの上端付近で最大の鉛直速度が見られる。本ケースにおいては、上昇速度は常に大きな値を持っており、特に噴火開始からおよそ8秒後には83m/sと非常に大きな上昇速度に達している。ここで、上昇速度は、火口を中心とし、噴火後の噴煙幅で規定した火口付近領域での平均値を示している。本ケース

では、Fig. 2a中に赤枠で示す83m四方の領域が相当する。噴火開始後の5秒間で噴煙の最高点は約155m上昇していたことから、平均で31m/sの上昇速度を持っていたことが分かる。同じ5秒間での火口付近の最大鉛直速度の平均は26m/sであり、この噴煙の上昇速度に近い値を示していた。火口付近の最大鉛直速度が石峯ら(2009)よりもかなり小さくなっているのは、用いた検査領域のサイズの違いが大きな要因である(2.2節参照)。火口付近の噴煙の変位を注意深く確認した結果とPIVの結果を比較し、今回の解析結果がより適切な値であると判断した。火口付近で観測された最大鉛直速度の時系列変化はFig. 3aに示した。

Fig. 4は、異なる高度での鉛直速度の時間変化を示しており、それぞれ(a)火口直上、(b)火口より63m上空、(c)火口より126m上空の位置に相当する。いずれの図においても、鉛直速度には振動が見られ、特に火口直上で規則性が強い。また、その周波数はいずれの高さにおいても、噴火直後に最も高く、徐々に低周波へとシフトしている。そこで、Fig. 4(a)で示した時系列に対してウェーブレット変換を用いた周波数解析を行った。マザーウェーブレットにはMorletを用いた。Fig. 6は縦軸に周期、横軸に時間をとったウェーブレット係数のスケイログラムである。この図より、噴火開始後の0-20秒は約2.1秒(0.48Hz)、20-40秒では約3.2秒(0.31Hz)、40-60秒では約6.5秒(0.15Hz)の周期に対してウェーブレット係数が大きくなっていることが分かった。この周期Tを、それぞれの時間帯における火口付近での最大鉛直速度のブロック平均値Vを速度スケールとして、また、噴煙径のブロック平均値Lを長さスケールとして標準化を行うと、ストローハル数 $Sr=L/VT$ は以下ようになった。

$$(1) 0-20秒のとき, \quad Sr=62.4/(27.7 \times 2.1)=1.1$$

$$(2) 20-40秒のとき, \quad Sr=65.5/(21.4 \times 3.2)=1.0$$

$$(3) 40-60秒のとき, \quad Sr=88.1/(15.9 \times 6.5)=0.9$$

いずれの時間帯についても、 Sr は1に近い値を持っており、サーマルの発生周期は、噴煙の幅と噴出速度によって決定されていることを示唆している。

3.2 崩壊ケース

Fig. 2bは崩壊ケースの噴火開始60秒後の結果を示したものである。はっきりとした上昇流は確認できず、噴煙の上部で強い下降流となっている。Fig. 3bは、Fig. 2b中の赤枠内(155m四方)での最大鉛直速度の時系列を示しており、ほとんどの時間帯で、その値が上昇ケースに比べて小さくなっている。噴火開始後5秒間の平均最大鉛直速度は19m/sであった。ただし、噴火開始後から5秒間の噴煙の上縁部の移動

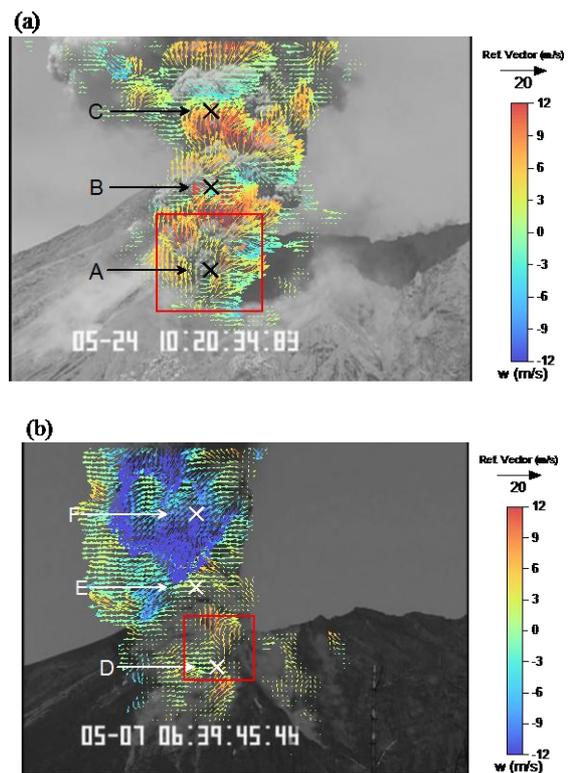


Fig.2 Typical results of the PIV analysis obtained from (a) Upflow case, and (b) Collapse case. Color scale represents the magnitude of vertical velocity. Red boxes indicate the vent areas (see Fig.3). See Fig.4 and Fig.5 for the positions of cross marks.

速度は34m/sであり、この値は上昇ケースとかなり近い。それにも関わらず、両ケースの最大鉛直速度が異なるのは、崩壊ケースでは噴火後火口付近ですぐに噴煙の下降が起こっているためである。Fig.5はFig.4と同様に異なる高さでの鉛直速度の時間変化を示したものである。火口直上(Fig.5(a))では最初に下降流が見られ、その後徐々に上昇流へと変化していく。しかし、この上昇流は火口から噴煙が出ているのではなく、崩壊した噴煙が舞い上がったために観測されたものである。火口の上空166m(Fig.5(b))の高さでは、噴火後早い段階で非常に大きな噴煙の沈降が見られ、その下降速度は30m/sにまで達している。また、火口の上空332m(Fig.5(c))では、噴煙の上昇に伴った正の鉛直速度がわずかに見られるものの、その後は常に下降流となっていることが分かる。

4. おわりに

本研究は、噴煙の噴出速度に関して、観測に基づく定量解析の可能性を検討し、その実用性を示した。また、噴煙柱の安定形成時と崩壊時の2ケースについて鉛直速度の時系列変化を比較することで、噴煙柱

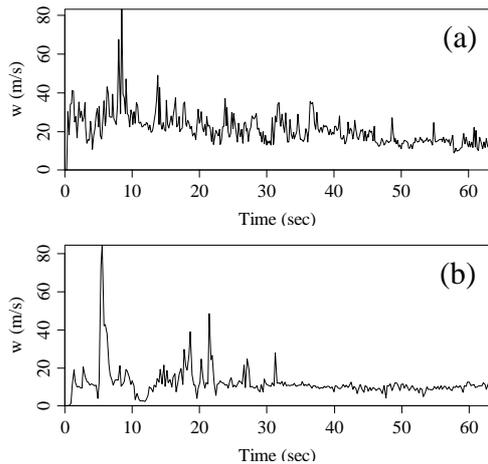


Fig.3 Maximum vertical velocity in the vent areas. The areas are indicated by the red boxes in Fig.2. (a) Upflow case, (b) Collapse case.

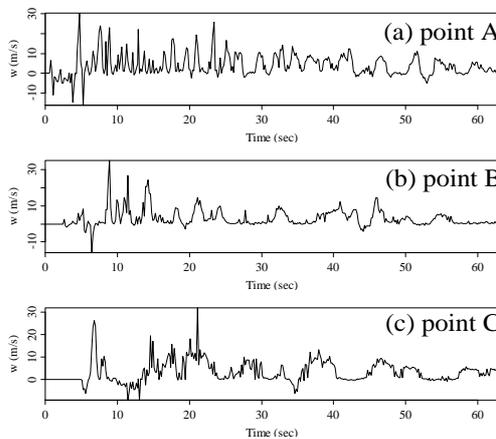


Fig.4 Time series of vertical velocity w in Upflow case at three different heights. The heights are indicated by cross marks in Fig.2.

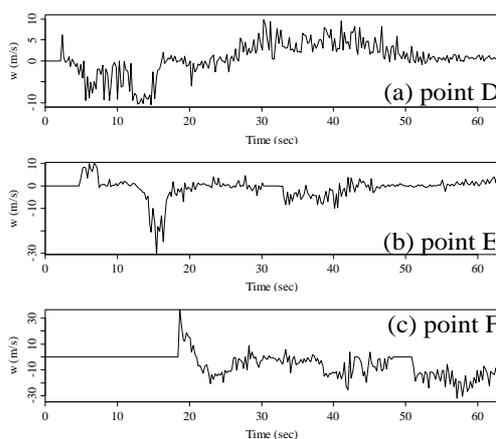


Fig.5 Same as Fig.4 but for Collapse case.

の崩壊がどのような条件の下で発生するのかについても検討を行った。崩壊ケースについては噴火直後の噴出速度が上昇ケースの噴出速度に比べて、小さな値を持っているという違いが見られた。

本研究では、噴煙表面の陰影がはっきりと見られる晴天・順光時のデータを解析対象としたが、今後は、赤外画像についても解析を行うなど、測定ケースを増やすことで、より一般的な議論に発展させていきたい。

PIV解析では可視化画像の解像度がそのまま測定分解能になるため、より高解像度のCCDカメラ等によって撮影されることが望ましい。しかも、噴火の瞬間を捉えるためには常時撮影する必要があり、長時間保存のためのシステムも不可欠である。将来的にはこれらの点に考慮し、PIV解析に適した噴煙画像が取得できる体制が実現することが期待される。

謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所の平成21年度共同研究（課題番号21G-12）として実施したものです。本研究を遂行するに当たっては、科学研究費補助金・若手研究(B)（課題番号20710134）の一部を利用しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 加賀昭和・井上義雄・山口克人（1994）：気流分布の画像解析のためのパターン追跡アルゴリズム，可視化情報，第14巻，pp. 38-45.
- 石峯康浩・瀧本浩史・神田学・木下紀正・横尾亮彦・井口正人（2009）：桜島火山・昭和火口で発生した噴煙のPIV解析，京都大学防災研究所年報，第52号B，pp. 319-322.
- 金柿主税・川野和昭・木下紀正（2004）：ビデオカメラによる近赤外画像の利用研究，鹿児島大学教育学部研究紀要，第55巻，pp. 11-24.
- Sigurdsson, H., Carey, S. Cornell, W. & Pescatore, T (1985): The Eruption of Vesuvius in A. D. 79. National Geographic Res. Vol. 1, pp.332-387
- Wilson L, Sparks RSJ, Huang TC, Watkins ND (1978) : The control of volcanic column heights by eruption energetics and dynamics. J. Geophys. Res. Vol. 83B4, pp 1829-1836

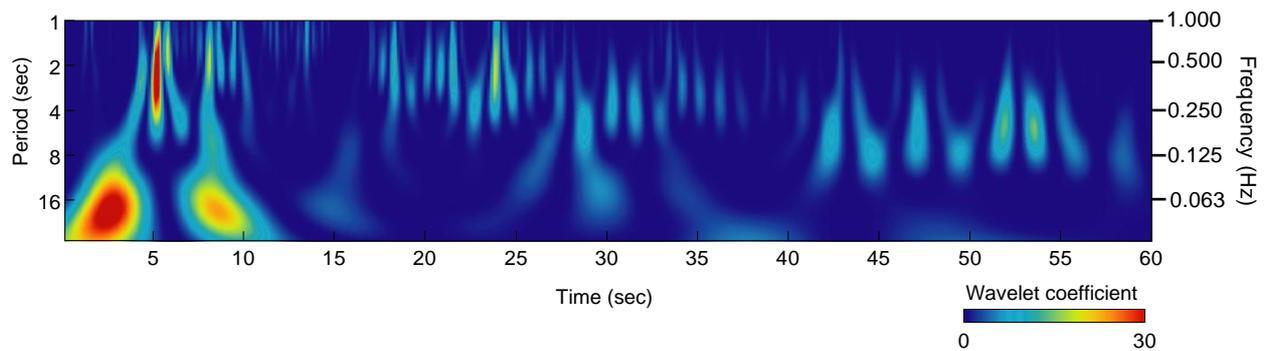


Fig.6 Scalogram to illustrate the dominant frequencies of the time series of vertical velocity observed just above the vent in upflow case.

Quantitative Analysis of the Discharge Speeds of the Ash Clouds from Sakurajima Volcano using Particle Image Velocimetry

Hiroshi TAKIMOTO*, Yasuhiro ISHIMINE**, Kisei KINOSHITA***, Akihiko YOKOO*****, and Masato IGUCHI*****

* Tokyo Institute of Technology

** RIKEN

*** Kagoshima University

**** Tohoku University

***** Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Synopsis

Particle Image Velocimetry (PIV) was used for the quantitative analysis of the discharge speeds of the ash clouds ejected from Showa crater of Sakurajima volcano in Kagoshima, Japan. Two movies were used for the analyses; one was the eruption on 24th May 2007, which has no collapsing eruption columns (“Case Upflow”), and another one was the eruption occurred on 7th May 2008, which entailed a collapsing eruption column (“Case Collapse”). In the analysis of PIV, spatial patterns of the turbulent eddies on ash cloud surface were tracked as tracers, and the resulting vector maps showed promising velocity fields. For “Case Upflow”, the discharge speed immediately above Showa crater was about 26 m/s during the first five seconds on average, while the average spreading speed of the uppermost part of the same ash cloud was about 31 m/s. Our investigation also revealed the periodic fluctuation of the vertical velocity obtained above Showa crater in “Case Upflow”. This fluctuation seems to be connected with the passing of thermal plumes, and Strouhal number of the fluctuation was found to be nearly unity.

Keywords: volcanic eruption, ash clouds, discharge speed, PIV, video analysis