

桜島火山・昭和火口で発生した噴煙のPIV解析

石峯康浩*・瀧本浩史**・神田学**・木下紀正***・横尾亮彦・井口正人

* 防災科学技術研究所火山防災研究部（現所属・理化学研究所）

** 東京工業大学国際開発工学専攻

*** 鹿児島大学教育実践総合センター

要 旨

桜島火山・昭和火口の噴火活動で発生した噴煙を撮影した映像にPIV法を適用し、噴煙の噴出速度を求めた。流れの中に混入した浮遊粒子をトレーサーとして用いるオーソドックスなPIV法とは異なり、本研究では、乱流渦の濃淡をトレーサーとして、加賀ら（1994）が提唱した逐次棄却法を適用した。その結果、視界が良い晴天の日中時に撮影された映像においては、噴煙の噴出速度を適切に抽出することに成功した。例えば、2007年5月24日午前10時19分の噴火では、噴火開始後5秒間の火口直上における最高速度の平均値は約83 m/sと、同じ5秒間での噴煙最高点の平均上昇速度（約31 m/s）の約2.7倍に達していたことが分かった。

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

火山活動は発生頻度が低いものの、いったん活発化すると、長期化・大規模化する傾向が強く、社会的な影響が顕著である。そのため、火山噴火の兆候をいち早く察知し、素早い防災対応への貢献が大きいと期待される火山性地震や地殻変動などの観測は、日本国内の多くの活火山で精力的に整備が進められている。

その半面、噴煙や火砕流など、火山噴火が始まってから地表面で生じる現象に関しては、定量的な観測を行う技術の開発があまり進んでおらず、目視で状況を確認する程度というのが現状である。そのため、火山災害発生時の状況把握を十分な精度でできない恐れが高い。

特に、桜島火山の昭和火口では、2006年以降、噴火活動が活発になっており、小規模ながらも、たびたび噴煙を噴出している。その中には、2008年2月6日の噴火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事例も含まれている。このような火砕流の発生様式は「噴煙柱崩壊」と呼ばれており、過去に世界各地で甚大な災害を引き起こしている。この

ことは、桜島火山においても、今後、大規模な噴煙柱崩壊が発生しないか、十分に警戒をしていく必要があることを示唆している。

噴煙柱崩壊の発生要因を解明するためには、噴煙の噴出速度をはじめとした噴煙そのものの運動特性を定量化することが極めて重要である。そこで、本研究では、同火口で発生した噴煙の映像に画像解析技法の一種であるPIV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. PIV法の概要

PIVは、Particle Image Velocimetryの略であり、文字通り、粒子によって可視化した流れの画像を解析して、速度を特定する流速測定手法である。粒子としては、周りの流体の流れに必要な精度で追従する程度に小さく、かつ、照明光をよく反射するなど、画像上で場所を特定しやすい特性のものを利用するのが一般的である。そのような粒子を混入した流れの画像を複数の時刻で取得し、異なった時刻の画像どうしを比較する。具体的には、画像を小さな検査領域に分割し、各領域について離散相互相関関数：

$$R_{II'}(x,y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i,j)I'(i+x,j+y) \quad (1)$$

を計算する。ここで、 $I(i,j)$ は、参照元となる画像内の位置 (i,j) における輝度、 $I'(i+x,j+y)$ は一定時刻過ぎた後の画像における位置 $(i+x,j+y)$ における輝度である。 K, L はそれぞれ検査領域中心からの*i*方向、*j*方向の最も遠いピクセルを表している。式 (1) を最大とする (x,y) の実際の距離と、撮影時刻の時間差から速度を求めるとというのが基本概念である。

考え方そのものの歴史は古く、Naylor and Frazer (1917) がしばしば先駆的な研究として引用される。しかし、実際に科学的な計測技術として著しく発展したのは、計算機性能が向上して大規模な演算処理が可能になった1980年代以降である。最近では、流体計測の主流と言えるほどに広く利用されるようになっており、ラッフエルら (2000) や可視化情報学会 (2002) などの優れた解説書も多数、出版されている。

本来のPIV解析は、実験室において制御された流れに対して行うことを想定しているため、流れ中に可視化用の微小粒子を混濁させることが可能である。しかしながら、火山噴煙の場合、そのような操作はできない。また、噴煙には火山灰粒子が含まれているものの、細かすぎて既存のカメラと撮影技術では、個々の粒子を同定することはできない。そこで、本研究では、瀧本ら (2009) の手法を応用して、乱流渦の濃淡の運動を追跡することで、噴煙そのものの運動速度を求めようを試みた。

上の手法を採用するのに併せて、2画像間の相関を取るにあたっては、加賀ら (1994) が提唱した逐次棄却法を適用した。逐次棄却法では、式 (1) の代わりに

$$R_{II'}(x,y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L |I(i,j) - I'(i+x,j+y)| \quad (2)$$

という関数を使い、この値が最小になる領域どうしの距離から速度を求めるとのが特徴である。

式 (1) では、輝度値の大きい位置に重み付けをした形でパターンマッチングを行うことになる。これは、トレーサー粒子のように意識的に輝度を上げた物体を追跡する場合には都合がよいが、連続濃度を持つ渦の移動を追跡する場合には適していない。特に、火山噴煙の場合、輝度の大きな火山弾などが画像中に小さなピクセルで捉えられていれば、式 (1) では平均的な渦構造の運動ではなく、火山弾の運動を追跡して速度を決定してしまう危険性が高い。

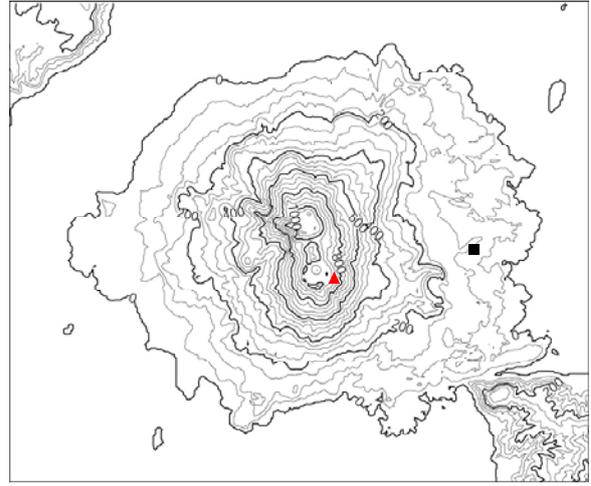


Fig. 1 Location of Showa crater (red triangle) and Kurokami observation site (black square).

一方で、式 (2) を使えば、乱流渦の広がりのある構造を作る濃淡を同様の重みで評価することができ、本研究の目的に適した結果が得やすい。そこで、本研究では、逐次棄却法に対応しているライブラリー社製の商用ソフト「FlowPIV」を解析に利用した。

3. 映像の概要

京都大学防災研究所火山活動研究センターでは、日本放送協会と共同で、昭和火口から約4キロ離れた黒神観測点 (Fig.1) において、2006年6月以降、約3年間にわたり24時間体制で高感度カメラにて常時撮影してきた。これらの映像の中から、噴火の瞬間を捉えた映像を抽出し、その映像にPIV解析を適用することを試みた。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画素、フレームレート30fpsである。

また、PIV解析に最適な画像の撮影方法などを検討するため、京都大学防災研究所の平成20年度萌芽的共同研究の経費にて購入したビデオカメラなどを用いて、昭和火口から発生する噴煙を撮影することも試みた。同共同研究以外の経費による出張を含め、平成20年度内に計4回、桜島火山を訪問し、撮影の機会を探った。しかし、訪問中には噴火が発生せず、残念ながら、この試みはうまくいかなかった。

4. 解析結果

ここでは、定量的な速度の抽出に成功した2007年5月24日午前10時19分に発生した噴煙の映像 (Fig.2) を例に、解析手順を説明する。

元映像は、R (赤)、G (緑)、B (青) それぞれの輝度値を持つカラー画像である。これをまず、256



Fig. 2 An example of original images used for PIV analysis (The eruption at 10:19 on 24 May 2007 at Showa crater).

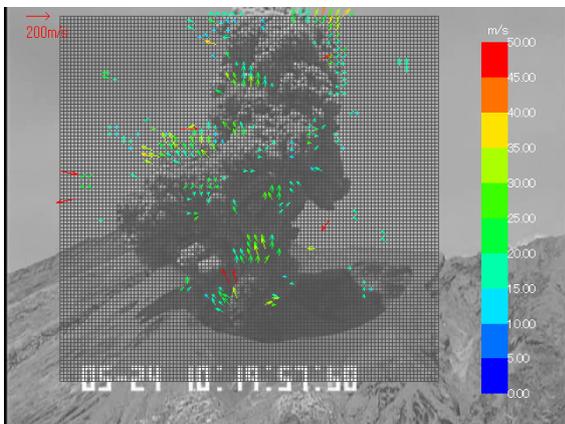


Fig. 3 A typical result of direct PIV analysis using the original images shown in Fig. 2. There are some erroneous vectors.

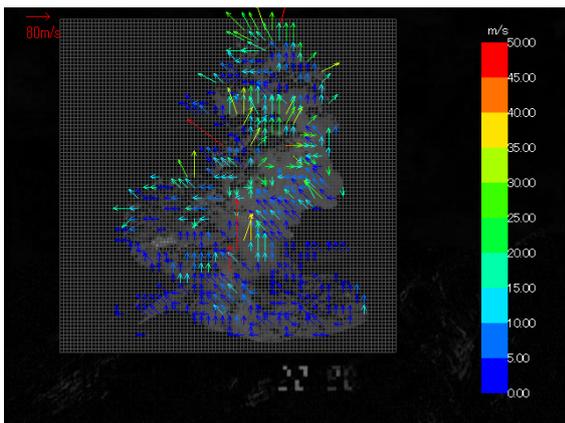


Fig. 4 A typical result of PIV analysis using the images that represent the difference from the initial image.

階調のグレースケールに変換した。このままの映像に PIV 解析を試みると Fig.3 のように、噴煙の部分で速度が特定できない領域が多くなった。その反面、大きな速度での移動がないと予想される背景部分で、画像ムラによって生じる高い相関部分を不適切に抽出して得られる解析上のエラー（一般に過誤ベクトルと呼ばれるもの）を多く含む結果となった。

そこで、グレースケールに変換した各フレームの画像について、さらに噴煙発生直前の画像との差分を取り、その連続画像に対して、PIV 解析を行った。その結果、Fig.4 のように信頼できる速度分布を得ることに成功した。Fig.4 を得る解析に当たっては、一つの検査領域のサイズを縦横ともに 11 ピクセルずつ取り、その画像中心からさらに縦横とも 11 ピクセルの間を探索することによって速度を特定した。また、画像は、映像として記録されていた連続する 2 枚を利用した。すなわち、時間間隔 1/30 秒である。

ここで示した噴火の例では、噴火開始後 5 秒間の火口直上における最高速度の平均値は約 83 m/s だった。この速度は、同じ 5 秒間での噴煙最高点の平均上昇速度（約 31 m/s）の約 2.7 倍だった。このように噴煙の噴出速度と最高点の上昇速度を同時に特定することが可能になったことは、大きな成果である。

他の噴火についても、乱流渦の濃淡が明瞭な、天気の良い日中に、逆光にならない状態で撮影した噴煙映像では、同様の信頼できる速度分布を得ることができた。しかしながら、夜間や明け方など、十分な明るさが得られない場合や、曇りがちで視界が不明瞭な場合などでは、良好な結果が得られなかった。このため、より多くの噴火事例において、確実に速度を特定できるようにするためには、今後、さらなる手法の改良が必要な状況である。

また、通常の PIV 解析では、レーザーシートなどを利用して測定する平面を特定し、その面に直交する方向から撮影する。本研究ではこのような操作を加えておらず、噴煙表面の移動量をそのまま速度として扱っているため、カメラから見た奥行き方向の速度成分の影響が結果に含まれている。このような誤差が含まれていても、噴煙の運動を解析するに当たっては十分な情報量を持っているとみなすこともできるが、今後、より定量的な議論を行っていくためには、この点についても注意深い考察が必要となると考えられる。

5. おわりに

桜島火山においては、2006年以降の昭和火口の噴火に伴い、非常に貴重な噴火映像を撮影、記録することに成功した。この映像記録から噴煙運動に關す

る定量的な物理特性を抽出することを目指して、近年、流体力学の分野で著しく発展したPIV解析の技法を適用して、噴煙の噴出速度を同定することを試みた。その結果、視界のクリアな日中に撮影された映像に関しては、信頼できる速度分布を得ることに成功した。適用範囲を広げるには、手法のさらなる改良が必要になると予想されるが、今後の噴煙解析の有用なツールになると期待できる良好な見通しを得ることができた。さらには、PIV解析によって得られた結果を、噴煙の一次元理論モデルや数値シミュレーションの結果と比較することによって、噴煙柱の崩壊条件をはじめとした噴煙のダイナミクスについて、より深い理解が得られるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所の平成20年度萌芽的共同研究（課題番号20H-01）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。

参考文献

- 加賀昭和・井上義雄・山口克人（1994）：気流分布の画像計測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.
- 可視化情報学会（2002）：PIVハンドブック，森北出版，328pp.
- 瀧本浩史・佐藤 歩・小野村史穂・神田 学（2009）：PIVを用いた乱流計測－屋外模型都市と室内模型都市の相互比較－，土木学会水工学論文集，第53巻，pp.241-246.
- ラッフェル，M.・ヴィラート，C.E.・コンペンハンス，J.（2000）：PIVの基礎と応用-粒子画像流速測定法-，小林敏雄監修・岡本孝司・川橋正昭・西尾 茂訳，シュプリンガー・フェアラーク東京，246pp.
- Naylor, J.L. and Frazer, B.A. (1917) : Preliminary report upon an experimental method of investigating, by the aid of kinematographic photography, the history of eddying flow past a model immersed in water, Tech. Rep. Advisory Commit. For Aeronau. For 1917-1918, Vol.1, London, His Majesty's Office.

PIV Analysis of Ash Clouds Ejected from Showa Crater of Sakurajima Volcano

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

* National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (Present address: RIKEN)

** Tokyo Institute of Technology

*** Kagoshima University

Synopsis

The discharge speeds of ash clouds ejected from Showa crater of Sakurajima volcano in Kagoshima, Japan, were obtained by applying the Particle Image Velocimetry (PIV) method, which is a computer-aided image analysis technique, to close-up video images recorded during recent eruptions. The spatial patterns of turbulent eddies were used as tracers instead of suspended particles to yield velocity distributions with Successive Abandonment Method proposed by Kaga et al. (1994). The discharge speeds of ash clouds were successfully identified for the video images with a clear view in daytime. This study revealed that the discharge speed immediately above Showa crater was about 83 m/s during the first five seconds on average for the ash cloud on 24 May 2007 while the average spreading speed of the uppermost part of the same ash cloud was about 31 m/s.

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