

## 物理観測による新燃岳の噴火規模の即時的な推定の試み

### Feasibility Study for Immediate Estimating the Scale of the Eruption of Shinmoedake through Geophysical Observations

高木朗充<sup>1</sup>, 新堀敏基<sup>1</sup>, 山本哲也<sup>1</sup>, 白土正明<sup>2</sup>, 平祐太郎<sup>3</sup>, 加藤幸司<sup>4</sup>, 福井敬一<sup>5</sup>  
Akimichi TAKAGI<sup>1</sup>, Toshiki SHIMBORI<sup>1</sup>, Tetsuya YAMAMOTO<sup>1</sup>, Shomei SHIRATO<sup>2</sup>, Yutaro TAIRA<sup>3</sup>,  
Koji KATO<sup>4</sup>, and Keiichi FUKUI<sup>5</sup>

(Received July 20, 2012; Accepted April 16, 2013)

**ABSTRACT:** In order to reduce volcanic disasters, it is necessary to detect eruptions, and it is important to monitor and/or forecast the scale and type of eruption and volcanic ejecta in real time. The series of eruptions at Shinmoedake, Kirishimayama volcanoes in 2011 was volcanic activity accompanied by huge amounts of ejecta, including sub-plinian eruption. By using various data observed during this eruption, we began researching the feasibility of estimating the scale of the eruption.

We investigated the volcanic plume velocity by applying particle image velocimetry (PIV) analysis (Takimoto et al., 2011) to video images of the 2011 Shinmoedake eruption that were taken with JMA's monitoring cameras. The eruption on March 13 was analyzed due to favorable analysis conditions because of the calm wind. By applying PIV analysis to this eruption that continued for 15 minutes, the kinetic energy of ejecta was estimated. There is a high correlation between the time variation of the kinetic energy and the time variation of the squared amplitude of the infrasound signal of the eruption.

The apparent total volume of ejecta estimated by PIV analysis was 1.5 billion cubic meters. This apparent total volume includes volcanic gases, entrained air, and pyroclasts. According to the field survey (ERI and NIED, 2011), the total amount of ashfall was estimated to be around 1 million tons. In other words, the apparent total amount of ejecta calculated through PIV analysis is equivalent to 1500 times the total amount of ashfall surveyed.

There is a high correlation between the time variation of the kinetic energy and the time variation of the squared amplitude of the infrasound signal of the eruption. Based on the above results, if the relationships between the kinetic energy and infrasound signals can be determined, we can monitor the eruption rate of ejecta by infrasound monitoring.

#### 1 はじめに

2011年に発生した霧島山新燃岳の噴火は、近年のわが国の火山噴火の中では、比較的短時間に多量の火山砕屑物を噴出する活動であった。しかし、噴煙活動を正確に把握することが容易ではなかったことから、即時的には噴出活動の定量的な把握ができて

いなかった。噴火現象を検知し、噴火様式、噴火規模、噴出物の到達範囲、及びその量を予測あるいはリアルタイムで実況把握することは、火山災害を軽減する上で重要である。とりわけ噴火規模を噴火の初期段階で推定することが可能になれば、その後の防災行動において有効な情報となる。

<sup>1</sup> 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

<sup>2</sup> 気象庁地震火山部火山課, Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department

現所属: 鹿児島地方気象台, Kagoshima Local Meteorological Observatory

<sup>3</sup> 気象庁地震火山部火山課, Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department

現所属: 内閣府, Cabinet Office

<sup>4</sup> 福岡管区気象台地震火山課, Seismological and Volcanological Division, Fukuoka District Meteorological Observatory

現所属: 気象庁地震火山部火山課, Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department

<sup>5</sup> 地磁気観測所, Kakioka Magnetic Observatory

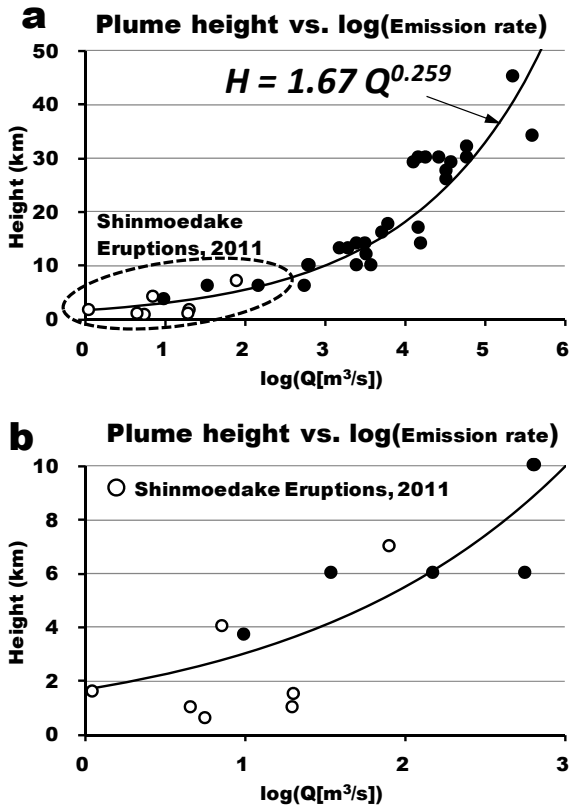


Fig. 1 a: Relationship between plume height and emission rate of eruptive pyroclast, according to Sparks et al. (1997). Results of the 2011 Shinmoedake eruptions, referred to Table 1, are added as open circles. b: Zooming in on the image of a.

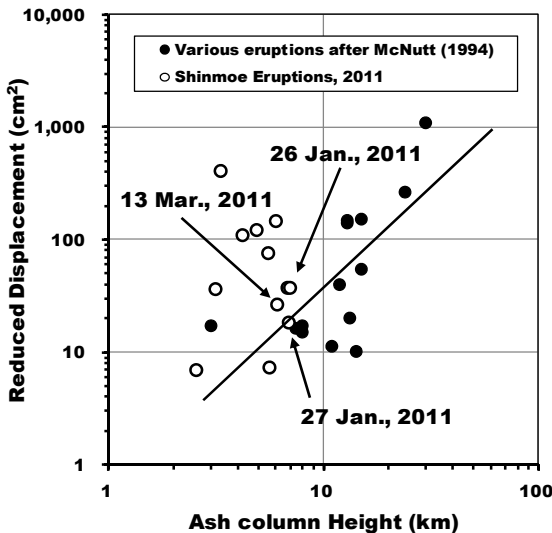


Fig. 2 Relationship between reduced displacement of volcanic tremor and ash column height, according to McNutt (1994). Results of the 2011 Shinmoedake eruptions are added.

Sparks et al. (1997) は、噴火継続期間における平均的な噴出率は、噴煙の高さの約 4 乗に比例することを示した。また、McNutt (1994) は、噴煙の高さが 3km 以上の場合、噴煙の高さは火口からの距離で規格化した噴火微動の最大振幅の 2 乗と相関があることを示した。これらから、噴煙の高さから噴火に伴う火山砕屑物の噴出量を推定することができ、また、噴煙の高さを把握できない場合でも、噴火微動の最大振幅を観測することにより、間接的に噴出量が推定できることになる。

Fig. 1 は、Sparks et al. (1997) が世界中の 28 の規模の大きな噴火で得られた噴煙の高さと噴出率の関係 (黒丸) をプロットした図に、2011 年霧島山新燃岳の噴火のうち噴煙の高さ及び噴出率を見積もることができた 7 回の噴火データ (白丸) を加筆した図である。噴煙の高さは、気象レーダーにより推定された新堀他 (2013) の結果を用いた。噴出物量は、産業技術総合研究所・アジア航測 (2011) 等による。図中の曲線は黒丸に対する近似曲線を示す。Fig. 1a は噴煙の高さが 50km までのすべての事例をプロットした図であり、2011 年新燃岳噴火も近似曲線近くにプロットされ相関が高いように見える。しかし、噴煙の高さ 10km 以下に限って見ると (Fig. 1b)、それほど相関が高いとはいえない。

Fig. 2 は、McNutt (1994) が世界中で発生した 14 の規模の大きな噴火で得られた噴煙の高さと距離で規格化した微動振幅の関係 (黒丸) をプロットした図に、2011 年霧島山新燃岳の噴火 (爆発的噴火は除く) で観測されたデータ (白丸) を加筆した図である。噴煙の高さは新堀他 (2013) による。図中の直線は黒丸に対する近似直線を示す。新燃岳の噴火のうち、2011 年 1 月 26 日や 1 月 27 日のように、明らかに噴出量が多かった噴火に関しては、近似直線の近くにプロットされ McNutt (1994) の相関に合致するが、噴出量がそれほど多くなかった噴火については相関が悪く、規格化した微動振幅に比べ、噴煙は低い。

これらの結果は、Sparks et al. (1997) や McNutt (1994) の関係図が規模の大きな噴火を対象にしているためであり、噴煙高が 10km 以下であった 2011 年新燃岳の噴火活動では、噴出量が大きかった 1 月 26~27 日の噴火以外の多くは、相関が高くないのは不自然ではない。このように噴煙の高さと噴火

微動の最大振幅だけから、噴出量の小さい噴火の規模を直ちに推定することは困難である。

2011年1月から始まった霧島山新燃岳の噴火は、多量の噴出物を放出する準プリニー式噴火を含む活動となった。この噴火によって得られた、噴火映像、地震動、空振動データ等を用い、噴火規模を即時的に推定することが可能かどうかの予備的な調査を行った結果、空振データから逐次的に噴出率を推定する手法が有効であることがわかったので報告する。

## 2 手法

2011年の新燃岳の噴火の中から解析条件のよい事例を選択し、噴火規模の推定手法を目指すためのフィジビリティ調査（実現可能性調査）を行う。

2011年の新燃岳の噴火活動では、噴火事象毎に地質調査が行われ火山砕屑物の噴出量が推定されていることから、物理観測による推定と地質調査に基づく推定とを比較検討するよい機会に恵まれている。そこで、野外調査により総噴出量がわかっている噴火について、噴煙画像解析を行うことでみかけの噴出率推移とみかけの運動エネルギーの推移を把握する。一方、地震と空振の記録からエネルギー次元の推移を計算することが可能である。そこで、画像解析から推定された運動エネルギー推移と地震・空振のエネルギー推移を比較することで、両者の関係が導かれれば、結果的にみかけの噴出率推移も見積もられる可能性がある。








このように、総噴出量が既知の噴火事象に対して、画像解析を利用して噴出率を計算することで把握したみかけ運動エネルギーと地震動及び空振動を比較することにより、間接的に噴火規模を推定する手法を提案する。

## 3 観測

### 3.1 噴火事例

小論における調査では、一連の噴火期間における噴煙活動を画像解析するため、解析条件にふさわしい噴火事例を選択する必要がある。まず、連続的な噴火映像が存在すること、次に夜間では噴煙を正確に解析できないため、日中の噴火活動であること、そして、噴煙活動の全容が把握できる映像が存在することが選択条件である。最も活動的であった2011年1月26、27日の噴火は、噴火の途中から火山灰が

Table 1 List of main plume events of the 2011 Shinmoedake eruption. Except for No.2, these events are shown in Fig. 1.

Number	Date (2011) (JST)	Duration (hour)	Plume height (meter) * after Shinmoei et al.(2012)	Eruptive volume ( $\times 10^6 \text{ t/a}$ )	Picture (Inokoshi camera)
1	1/26-27	33.0	7000*	24.0	
2	2/14 05:07-	-	7900*	0.02 - 0.07	
3	2/24 03:38-	1.4	>600	0.07	
4	3/3 15:15-	19.8	>1500	0.2	NO PICTURE
5	3/13 17:45-	1.1	6100*	0.2 - 1.0	
6	3/23 08:23-	1.1	3200*	0.008 - 0.2	
7	4/3 08:41-	1.1	3500*	0.03 - 0.07	
8	4/18 19:22-	2.6	5600*	0.02 - 0.11	

立ち込めて噴火活動を視認することが困難になった。

2011年の新燃岳の主な噴火をTable 1に示す。噴煙の高さの一部は、レーダーで推定した新堀他(2013)による。本研究の解析条件にふさわしい前述の条件を最もよく満たす事象は3月13日の噴火であった。この噴火活動の末期は日没のために活動を捉え切れていないが、この季節に卓越する北西風も弱く、概ね噴煙活動の全容を把握できた。よって、この噴火について解析することとする。

### 3.2 観測データ

2011年3月13日の噴火時点で、霧島山周辺で地震動、空振動を同じ場所で観測している観測点は4か所ある。また、カメラによる遠望観測地点も4か所であった(Fig. 3)。これらのうち、小論で用いる地震及び空振の観測点をKITK(新燃岳火口から南東3.1km)、遠望観測点をINOKOISHI(新燃岳火口から南7.6km)とした。KITKは2010年の新設点であり、地震計センサーは100m深のボアホール型である。またINOKOISHI観測点は、北西からの季節

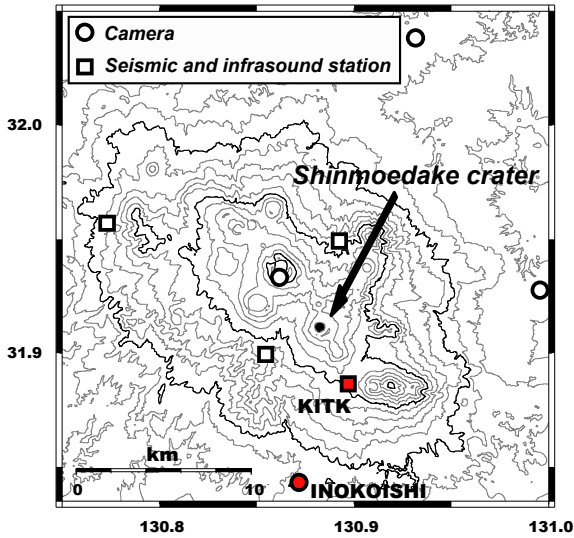


Fig. 3 Topographical map and distribution of camera sites and seismic and infrasound observation stations around Shinmoedake crater, Kirishimayama volcanoes. Red indicates stations used in this study.

風に流される噴煙も概観できる位置にある。これらの観測点はすべて福岡管区気象台火山監視・情報センターが管理しているものである。

地震データは、ミットヨ社製 V225 で記録された速度波形上下動成分であり、空振データは、アコー社製 TYPE7114 で記録された圧力波形である。サンプリング周波数はともに 100Hz である。画像データは、パナソニック社製 WV-E850 の高感度カメラで撮影された可視画像であり、640×480 画素のフルカラー-JPG ファイルで、サンプリング周波数は 0.5Hz (2 秒間隔) である。新燃岳火口直上における空間分解能は、1 画素あたり 10.2m である。

#### 4 解析

##### 4.1 噴煙画像解析

遠望カメラで撮影された新燃岳の噴火画像に対して、粒子画像流速測定法 (Takimoto, 2011) による解析 (Particle Image Velocimetry 解析, PIV 解析) を用い、噴煙の噴出速度を求めた。PIV 解析とは、画像処理により粒子画像の時間的変位から、2 次元面内の速度場を定量的な情報として多点同時計測する計測技術である。火山噴火に伴う噴煙活動に適用すれば噴煙の挙動を把握することが可能と考えられ、これまでにいくつかの解析事例がある (石峯他, 2009)。

噴煙活動の規模、解析の目的、撮影時の天候等の

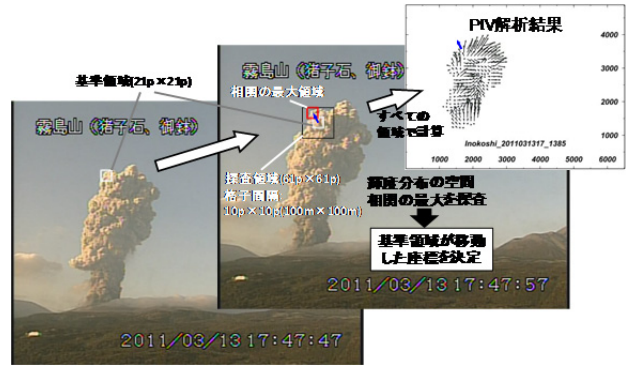


Fig. 4 Steps and parameters for converting camera images to PIV analysis images.

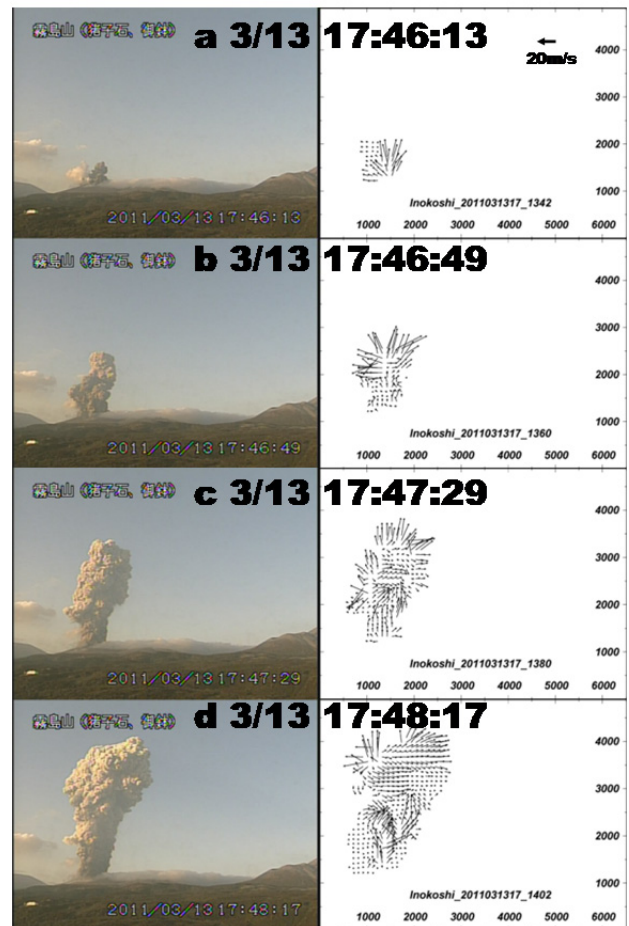


Fig. 5 Sample of PIV analysis images applied to the March 13 eruption.

条件、カメラの仕様、対象物とカメラとの位置関係等により、様々なパラメータ設定が必要であり、それらは試行錯誤的に調整する必要がある。PIV 解析では、噴煙の特徴的なセルを追跡することで噴煙の

2 次元的な変位速度分布を求める．具体的には時間の異なる 2 枚の画像における輝度分布の空間相関が最大となる場所を探索する．追跡する基準領域のサイズ，探索する領域のサイズ，比較する画像の時間間隔などのパラメータは，適切な値を与えなければ，噴煙活動を再現するような解析結果を得ることはできない．火口からの火砕物の噴出率を把握するという目的のため，パラメータを以下の様に設定した．解析手順を Fig. 4 に示す．

基準領域	21 x 21 pixel (214.2 x 214.2m)
探索領域	61 x 61 pixel (622.2 x 622.2m)
格子間隔	10 x 10 pixel (102 x 102m)
解析時間間隔	1 flame (2 sec)
比較時間間隔	5 flame (10 sec)

これらの設定により，2011 年 3 月 13 日 17:45 から始まった噴煙活動の PIV 解析を 18:00 まで実施し，噴煙の 2 次元噴出速度分布の時間変化を計算した．Fig. 5 に，噴火開始から 3 分以内の 4 枚の PIV 解析結果のスナップショットの例を示す．鹿児島地方気象台によると，この噴火の継続時間は約 1 時間であるが，18:00 以降の噴火活動は極めて微弱であり，噴火開始後の 15 分間の噴火活動で総噴出量のうちのほとんどが噴出したものと考えられる．

この PIV 解析結果を用いて，以下の考え方からみかけの噴出率を求めた．浮力の影響が小さいと考えられる新燃岳火口の直上から上方に 3 格子領域（約 300m），また水平方向には 16 格子領域（約 1600m）の合計 48 格子領域で解析された噴出速度を用いて，まず，時刻  $t$  における平均噴出速度  $V(t)$  を求めた．次に火口直上 48 格子領域に占める噴煙の水平分布から，噴煙断面を円形と仮定した火口直上における噴煙柱の断面積  $S(t)$  を求める．みかけの噴出率  $Q_{ap}(t)$  [ $m^3/sec$ ] は， $V(t)$  と  $S(t)$  の積で与えられる．

$$Q_{ap}(t) = V(t) S(t) \quad (1)$$

ここでは火砕物の他，火山ガスや周辺大気も取り込んでいる可能性があるため，これをみかけ噴出率と呼ぶことにする．

次に，単位時間あたりの噴煙のみかけの運動エネルギー  $E_{ap}(t)$  [J/sec] を見積もる．未知数である噴煙密

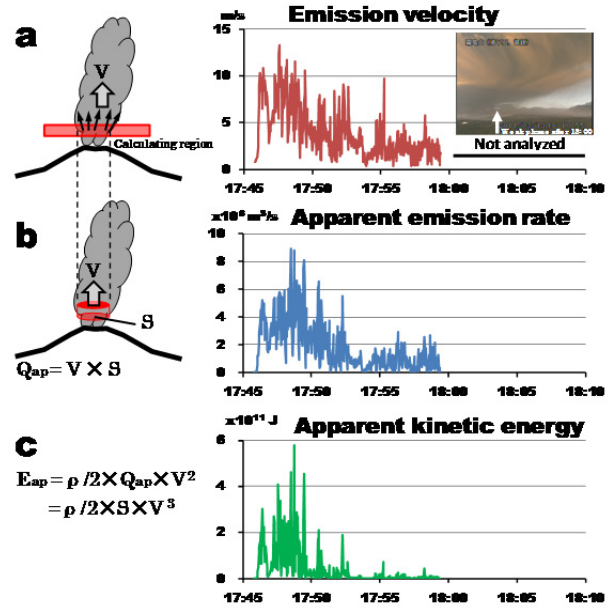


Fig. 6 Time series of emission velocity of ejecta (a), apparent emission rate (b) and apparent kinetic energy of plume (c) estimated by PIV analysis.

度を  $\rho$  [ $kg/m^3$ ] とすると，

$$E_{ap}(t) = \frac{1}{2} \rho Q_{ap} V(t)^2 \quad (2)$$

となる．これに (1) 式を代入すると，

$$E_{ap}(t) = \frac{1}{2} \rho S V(t)^3 \quad (3)$$

となる．

以上の考え方と，それに従って計算された結果を Fig. 6 に示す．Fig. 6a は噴出速度を，Fig. 6b はみかけ噴出率を，Fig. 6c は単位時間あたりの噴煙のみかけの運動エネルギーを示す．ただし，噴煙密度は未知であるが，Fig. 6c のグラフでは  $\rho$  は仮に降下火山灰の密度に近い  $1000 [kg/m^3]$  として示した．計算時間の間隔は画像のサンプリングと同じ 2 秒毎とした．

#### 4.2 地震・空振解析

KIKT で記録された地震動と空振動のエネルギーの推移を見るため，2 秒毎の速度振幅及び圧力振幅の 2 乗平均値（以下，それぞれ SAS, PAS と呼ぶ）を算出した (Fig. 7)．なお，空振波形は低周波ノイ

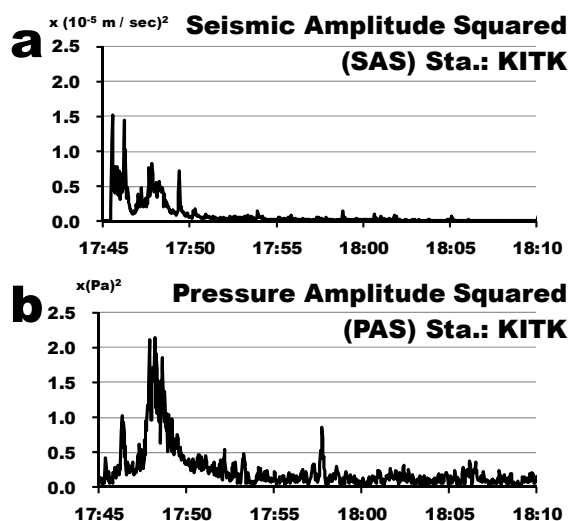


Fig. 7 Time variation of the seismic amplitude squared (SAS) (a) and the infrasound pressure amplitude squared (PAS) (b).

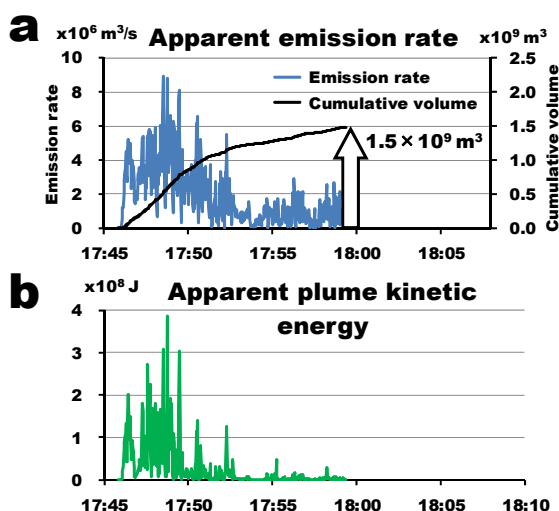


Fig. 8 Time variation of apparent emission rate and cumulative volume (a) and time variation of apparent plume kinetic energy (b) estimated by PIV analysis.

ズが重畳するので、0.15~0.10Hz のパワー型ローカットフィルターを施した後、算出した。

### 5 結果と議論

2011 年 3 月 13 日の新燃岳の噴火に対して画像解析を行い、いくつかの仮定のもとエネルギーの次元で活動推移を示した (Fig. 6c)。また地震及び空振記録による SAS, PAS を示すことでエネルギーの次元で推移を示した (Fig. 7)。これらを比較すると、噴

煙のみかけ運動エネルギーの時間変化 (Fig. 6c) は、SAS の時間変化 (Fig. 7a) との相関よりも PAS の時間変化 (Fig. 7b) の方との相関が高い。

Fig. 8a は、Fig. 6b で示した噴煙のみかけ噴出率にその積算曲線を加えて示したものであり、噴煙のみかけ噴出量は、噴煙活動が弱まった 18 時頃までに  $1.5 \times 10^9$  [m<sup>3</sup>] に達したことがわかる。一方、東京大学地震研究所・防災科学技術研究所 (2011) によると、噴火後の降灰量調査からこの噴火の総噴出重量は約  $1 \times 10^6$  [ton] であることがわかっている。これは体積に換算すると約  $1 \times 10^6$  [m<sup>3</sup>] である。画像解析により見積もられた噴煙のみかけ噴出量  $1.5 \times 10^9$  [m<sup>3</sup>] は、噴煙密度を降下火山灰の密度 1000 [kg/m<sup>3</sup>] と仮置きして算出したものであるため大きく計算され、実際の総噴出量の 1500 倍となっていたことになる。つまり、PIV 解析から推定された火口直上での噴煙密度  $\rho$  は降下火山灰の密度の 1/1500、つまり  $0.67$  [kg/m<sup>3</sup>] であったことを意味する。Fig. 8b は、噴煙のみかけ運動エネルギーとして示した Fig. 6c を  $\rho = 0.67$  として示し直した噴煙の運動エネルギーの推移である。このように、この 3 月 13 日の噴火事例については噴煙密度を考慮した計算が可能になったため、これまで噴煙のみかけ運動エネルギーと呼んでいたものを、以下、噴煙の運動エネルギーと呼ぶ。

Fig. 9 は、噴煙の運動エネルギーに対して、SAS 及び PAS を比較した図である。SAS 及び PAS と噴煙の運動エネルギーの 17:45~18:00 の 15 分間の時間推移について相互相関係数をそれぞれ計算した結果、SAS では 45%、PAS では 58% となった。地震記録よりも空振記録の振幅 2 乗値の方が、噴煙の運動エネルギーの推移をよく反映していることがわかる。

SAS, PAS と噴煙の運動エネルギーとの推移を比べると、噴出活動のピークである 17 時 48 分頃の位相は特に PAS とよく一致している。一方、SAS は噴火が始まった 17 時 45 分頃に最大となり、噴煙の運動エネルギーの位相と一致しない。噴火に伴う物質の移動により生じる空振記録から得られた PAS は、噴出物の運動エネルギーに対して相関が高いと考えられる。しかし、地震動の記録は、噴出現象に伴う微動の他、地中における励起振動を含む可能性がある。噴火初期に SAS が大きい理由は、噴出物が火道を突き破り地表に達するまでに、地震動を生じてさせているためと考えられる。よって、風が弱い等の

気象条件においては空振観測の方が、噴煙のみかけ運動エネルギーの推定に効果的と考えられる。

また、PAS から噴煙の運動エネルギーを推定するために、PAS に係数をかけた値と、PIV から推定された噴煙の運動エネルギーの値との残差 2 乗和が最小となるような換算係数  $k$  を算出した結果、 $1.1 \times 10^8 [\text{J}/\text{Pa}^2]$  と求まった。Fig. 9b はこの換算係数を PAS にかけて得られた空振エネルギーに相当するものとして示した。Fig. 9a は同様の手順で SAS について示したものである。

この噴火事例で推定された噴煙密度に対する降下火山灰密度の比を  $\alpha$  ( $=1/1500$ ) とすると、噴煙の運動エネルギー  $E(t)$  は (2) 式から

$$E(t) = \frac{1}{2} \alpha \rho Q_{ap} V(t)^2 \quad (2)'$$

と表せる。式 (1), (2)' より  $V(t)$  を消去することにより導かれるみかけ噴出率  $Q_{ap}(t)$  は、

$$Q_{ap}(t) = \left( \frac{2S(t)^2 E(t)}{\alpha \rho} \right)^{1/3} \quad (4)$$

と表される。これと、PAS ( $P(t)^2$ ) と噴煙のエネルギー  $E(t)$  との関係、

$$E(t) = k P(t)^2 \quad (5)$$

から、みかけ噴出率  $Q_{ap}(t)$  は、

$$Q_{ap}(t) = \left( \frac{2S(t)^2 \cdot k P(t)^2}{\alpha \rho} \right)^{1/3} \quad (6)$$

と表される。つまり、みかけ噴出率の時間変化は、空振振幅の時間変化  $P(t)$ 、火口直上の噴煙の断面積  $S(t)$  及び空振エネルギー換算係数  $k$ 、噴煙密度  $\alpha \rho$  から見積もることができることを意味する。

(1) 式により監視カメラによる画像解析から推定したみかけ噴出率と、(6) 式により空振記録から換算したみかけ噴出率を比較した図を Fig. 10a に示す。空振データから見積もったみかけ噴出率の時間推移は、画像から推定したみかけ噴出率の時間変化をよく再現していることがわかる。Fig. 10b はみかけ噴

出率から推定された積算曲線である。計算値による曲線は 17:50 頃以降、画像からの観測値と乖離が始まる。これは、噴出規模が相対的に弱まるほど、空振振幅に重畳するバックグラウンドノイズにより噴出率が過大見積もりされているためと考えられる。

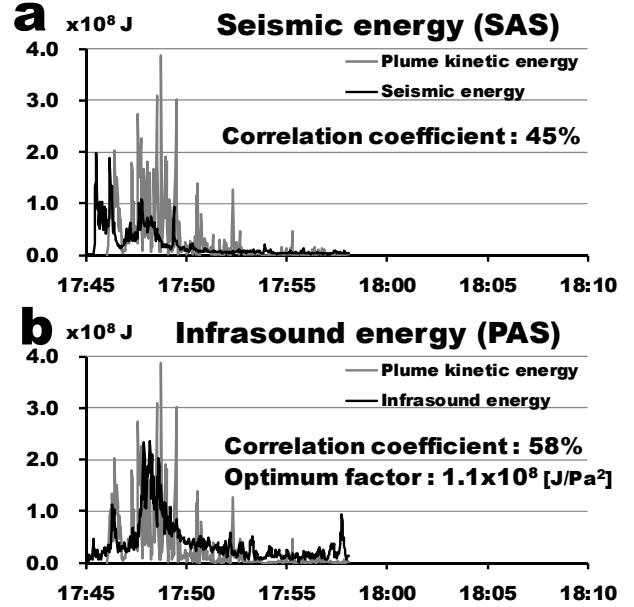


Fig. 9 Comparison between plume kinetic energy flux and estimated energy flux. Infrasound energy (b) is a better fit for plume energy flux than seismic energy (a).

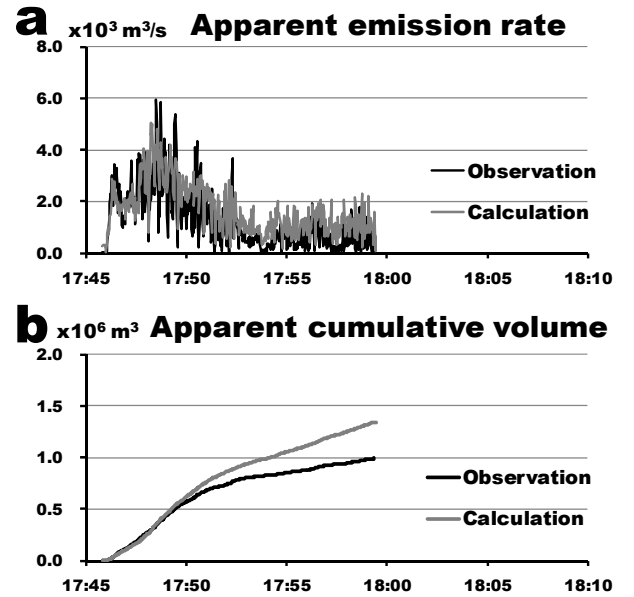


Fig. 10 Comparison between observation and calculation of apparent emission. a: Apparent emission rate. b: Apparent cumulative volume.

## 6 まとめ

噴火規模を物理観測により即時的に推定する手法を検討するため、2011年3月13日に発生した新燃岳の噴火を対象にしてフィージビリティ調査を行った。監視カメラによる噴火映像を PIV 解析し、噴出速度分布を把握することにより得られた噴煙のみかけの運動エネルギーと、地震記録及び空振記録を比較した。その結果、噴煙のみかけのエネルギーと空振振幅 2 乗値の時間推移の相関が高いことが明らかになった。以上から、空振データによる噴煙のみかけ噴出率を把握する手法を提案した。今後、もし何らかの方法あるいは仮定により、実際の噴出物の噴出率と噴煙のみかけの噴出率の比を知ることができるようになれば、噴出率を逐次的に推定し、総噴出量という噴火規模を把握する可能性を示した。

今回のフィージビリティ調査では、比較的条件のよいひとつの噴火現象に限って、1か所の映像データと1か所の地震・空振観測点から解析を行ったにすぎない。より精度を高めてこの手法を普遍化するには、複数の方位からの画像解析や、複数の観測点における空振解析を行うような調査が必要である。

また噴出の挙動は、各噴火事象によって異なる可能性があり、以上の解析を複数の噴火現象に適用し、多数の蓄積された解析結果から統計的な処理も考慮した手法の検討も今後必要と考える。

さらに、気象レーダーや気象衛星による噴煙の検知も報告されており（新堀他, 2013）、このようなリモートセンシング技術を利用した噴火規模の推定を今後積極的に取り込んでいく必要もあると考える。

## 謝辞

観測データは福岡管区気象台及び鹿児島地方気象台職員による観測点の設置、維持によって取得できたものであり、そのデータの使用にあたり記して感謝の意を表す。火山課菅井 明氏と一名の匿名の査読者、及び編集長の内藤宏人氏からの適切なお指摘は、本稿を改善する上で大変有益であった。また、PIV 解析の使用については瀧本浩史氏のプログラムを使用させていただいた。また小園誠史氏には PIV 解析に関する助言を頂いた。深く感謝の意を表す。

## 文献

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, **52B**, 319-322.
- 産業技術総合研究所・アジア航測 (2011): 新燃岳 2011年1月26日以降のテフラ噴出量, 第120回火山噴火予知連絡会資料, 64-67.
- 新堀敏基・桜井利幸・田原基行・福井敬一 (2013): 気象レーダー・衛星による火山噴煙観測—2011年霧島山(新燃岳)噴火の事例—, 験震時報, **77**, 141-216.
- 東京大学地震研究所・防災科学技術研究所 (2011): 霧島山(新燃岳)のブルカノ式噴火ステージの噴出量, 火口内堆積量および噴出物の時間変化, 第120回火山噴火予知連絡会資料, 59.
- McNutt, S.R. (1994): Volcanic Tremor Amplitude Correlated with Eruption Explosivity and its Potential Use in Determining Ash Hazards to Aviation, U.S. Geological Survey Professional Paper, **2047**, 377-385.
- Sparks, R. S. J., M. I. Bursik, S. N. Carey, J. S. Gilbert, L. S. Glaze, H. Sigurdsson, and A. W. Woods (1997): Volcanic Plumes, John Wiley, New York. 574 pp.
- Takimoto H., A. Sato, J. Barlow, R. Moriwaki, A. Inagaki, S. Onomura, and M. Kanda (2011): Particle Image Velocimetry Measurements of Turbulent Flow Within Outdoor and Indoor Urban Scale Models and Flushing Motions in Urban Canopy Layers, Boundary-Layer Meteorology **140**:295-314, DOI 10.1007/s10546-011-9612-6

(編集担当 坂井孝行・長岡 優)