

## インドネシア・スメル火山における小規模爆発に伴う 地震および空気振動観測

為栗 健・井口正人・Hetty TRIASTUTY\*・Iyan MULYANA\*  
Muhammad HENDRASTO\*・Achmad Djumarma WIRAKUSUMAH\*

\* インドネシア共和国火山地質災害防災局

### 要 旨

インドネシア・スメル火山において爆発的噴火に伴う爆発地震と空気振動の観測を行った。2002年9月14日～23日の観測期間中に872回の爆発的噴火が発生し、観測された爆発地震の地震波形の特徴、地震動と空気振動の関係を調べた。爆発地震の初動部分は押し波のP波、振幅の大きな引き波のP波に続き、初動の約1.5秒後にRayleigh波からなる1Hzの長周期振動が現れる。桜島火山においても同様な3つの位相が見られ、押し波のP波の特徴は桜島火山と類似している。引き波のP波に関しては、スメル火山においては上下動成分、桜島火山については水平動成分が卓越している。空気振動の振幅は地震動のRayleigh波の振幅と良い相関が見られた。観測された地震動および空気振動の振幅は桜島火山の振幅より1～2桁程度、諏訪之瀬島火山の振幅より1桁程度小さい。

キーワード: スメル火山, 爆発的噴火, 噴火地震, 空気振動

### 1. はじめに

インドネシア・ジャワ島東部に位置するスメル火山は標高3676mの安山岩質成層火山である(Fig. 1)。同火山は1941年から現在まで、ほぼ毎年のように噴火が発生しており、世界的にみても最も活動的な火山の一つである。最近では山頂火口において安山岩質溶岩を噴出し、空気振動を伴う小規模な爆発的噴火が頻発しており、噴火発生回数は1日に100回を超えることも多い。噴火の際は、しばしば溶岩ドームの一部が火口外(数100m)に噴石となって飛散し、噴煙高度は300～1000mに達する。また、溶岩ドームの崩落や爆発的噴火に伴い、火砕流が発生する。1994年2月に爆発音を伴う噴火により火砕流が発生し、南東斜面を河川に沿って11.5km流下した。その先端は集落まで達し、死傷者7名の被害が出た(石原ら, 1995)。

インドネシア共和国エネルギー・鉱物省地質・鉱物資源総局に属する火山地質災害防災局は活発な噴火活動を続けるスメル火山に観測所を設置し、火山活動の監視を行っている。山頂から南東6.4kmの位置に上下動

地震計を設置し、麓のGunung Sawur観測所まで地震波形信号を無線伝送し、地震観測を行っている。また、同観測所のスタッフにより噴火活動の目視観測を行っている。

スメル火山と同様に山頂火口において爆発的噴火を繰り返している桜島火山では、爆発的噴火の際に観測される爆発地震には、押し波のP波初動、振幅の大きな引き波のP波、初動から約2秒後に最大振幅を持つRayleigh波が見られる。押し波のP波と引き波のP波はそれぞれ深さ2kmにおける等方膨張と円筒収縮によって励起され、大振幅のRayleigh波は爆発地震発生の約1秒後に火口直下数100mにおける等方膨張と引き続いて起こる水平収縮により励起される。また、爆発的噴火に伴う空気振動の振幅はP波初動振幅よりRayleigh波の振幅と良い正の相関を持ち、発振時は火口直下浅部の等方膨張の発生とほぼ同時であることが明らかになっている(Tameguri et al., 2002)。一方、スメル火山の小規模爆発に伴う噴火地震については、これまでその震源位置や波動特性など基本的な性質も調べられていない。本研究では噴火に伴う地震動および

空気振動の観測をスメル火山において行い、その波動特性を調べるとともに、両者の関係を調べた。その規模と特性に関して桜島火山および諏訪之瀬島火山における爆発的噴火に伴う爆発地震、空気振動と比較を行った。

## 2. 観測

2002年9月14日～23日に広帯域地震計(0.02～70Hzで速度応答がフラット)、短周期地震計(固有周期1秒)および低周波マイクロフォンを用いた地震動、空気振動観測を行った。観測点分布をFig. 2に示す。短周期地震計および低周波マイクロフォンは山頂火口から南東6.4km(LEK)、広帯域地震計は山頂火口から北2.6km(KAL)の位置に設置した。データロガーはLS-8000SHを使用し、16bit分解能、100HzサンプリングでA/D変換した後、ハードディスクに連続収録を行った。10日間の観測期間中に872回の小規模爆発に伴う地震動および空気振動を記録することができた。

## 3. 地震活動と爆発的噴火活動

スメル火山ではFig. 3に示すような噴火地震を伴う小規模爆発が多数発生する。Gunung Sawur観測所では、



Fig. 1 Location map of Semeru volcano

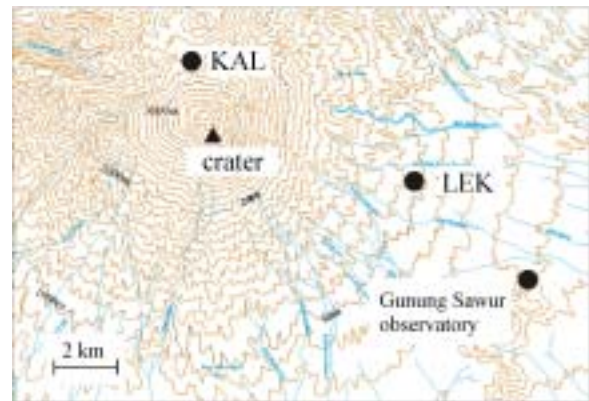


Fig. 2 Locations of seismic (KAL and LEK) and air-shock (LEK) stations

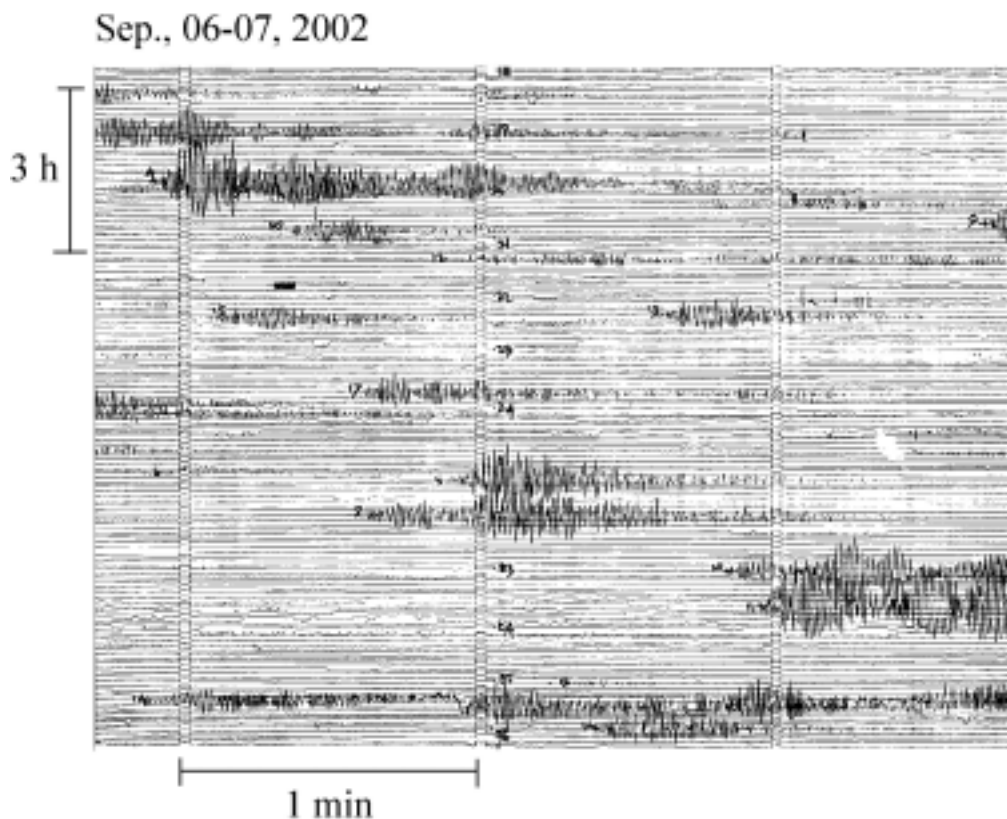


Fig. 3 Example of eruption earthquakes observed at LEK station

このような低周波地震のうち  $0.5 \mu\text{m/s}$  以上の振幅を持つものを噴火と定義している。Fig. 4 に 2001 年 7 月から 2002 年 9 月までのスメル火山における日別地震回数を示す。この期間に着目すると、2001 年 9 月から A 型地震（P 波、S 波が明瞭で震源の深い地震）が発生し始め、徐々に発生頻度が高まり、2002 年 4 月 3 日に 14 個発生している。また、2002 年 3 月末には火山性微動の発生頻度が急増している。その後、小規模爆発噴火が増加し、2002 年 4 月以降、噴火地震の日別発生頻度が 100~150 回に達した。本研究の観測は 2002 年 4 月から増加している爆発的噴火活動期間に行われた。

桜島火山（加茂，1978）や諏訪之瀬島火山（Iguchi，1991）では、A 型地震→B 型地震（浅部において発生する地震で S 波が不明瞭）→火山性微動の群発という火山性地震および微動の発生の推移を経て、爆発的噴火が活発化する。スメル火山においては、B 型地震の顕著な増加は認められなかったが、A 型地震の発生から火山性微動の多発を経て、爆発的噴火活動の活発化に至る時間推移は類似している。

Fig. 5 に 2002 年 1 月～4 月に発生した爆発的噴火の発生時間間隔を 5 分毎の頻度で示す。爆発的噴火の 92% は 1 時間以内の間隔で発生しており、10 分以内に発生したものは全体の 32% を占める。発生時間間隔が短いものの発生頻度が高い。また、1 時間以上経過して爆発が発生した場合、その後、数分間隔で繰り返し爆発的噴火が発生する傾向が見られた。桜島火山では、時間間隔が 1 時間以内のものは全体の 6.5% であるのに対して、諏訪之瀬島火山では全体の 89% であり（井口・石原，1990）、スメル火山の爆発的噴火の発生時間間隔は諏訪之瀬島火山における爆発的噴火の発生間隔と類似している。

#### 4. 波形の特徴

Fig. 6 に KAL 観測点で広帯域地震計によって観測された噴火地震の波形を示す。水平動は火口方向（RAD）とそれと直交する方向（TRA）に変換してある。地震動は約 1~2 分程度継続する。初動付近は上下動の振幅が大きいが、後続波では水平動の振幅が卓越している。Fig. 7 に初動から 5 秒間の 3 成分の波形を示す。押し波の P 波、それに続く引き波、P 波初動の約 1.5 秒後から現れるやや振幅の大きな長周期波動が見られる。押し波の初動に続き、引き波および長周期振動が見られる波形は桜島の爆発地震に類似しており、Tameguri et al., (2002) にならい、それぞれ P 相、D 相および LP 相と呼ぶことにする。P 相のパルス幅は 0.3-0.5 s、D 相は 0.7 s、LP 相は 1-1.25 s である。振動軌跡を見ると、初動から約 2 秒間の振幅は上下動および水平動の Radial

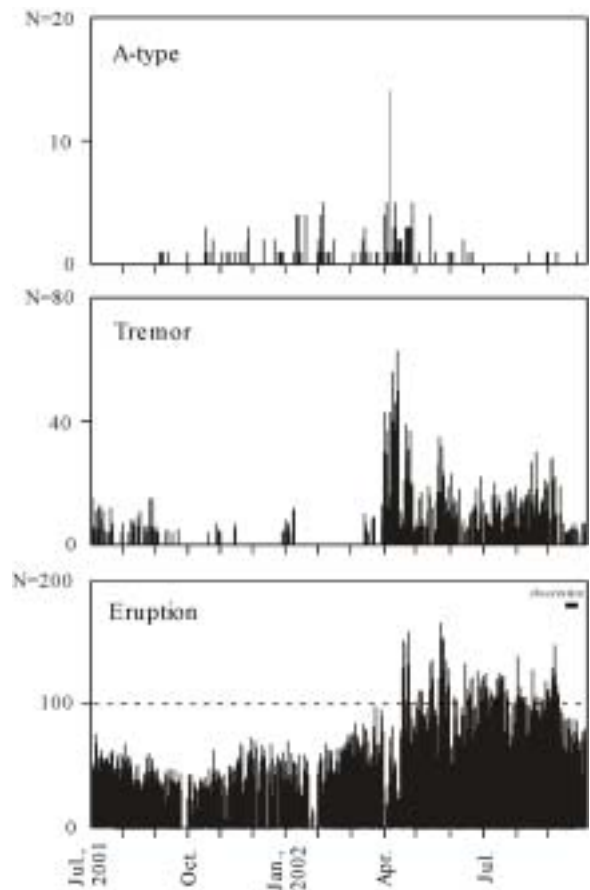


Fig. 4 Daily frequencies of A-type earthquakes, tremor, and eruption earthquakes at Semeru volcano during the period from July 2001 to September 2002

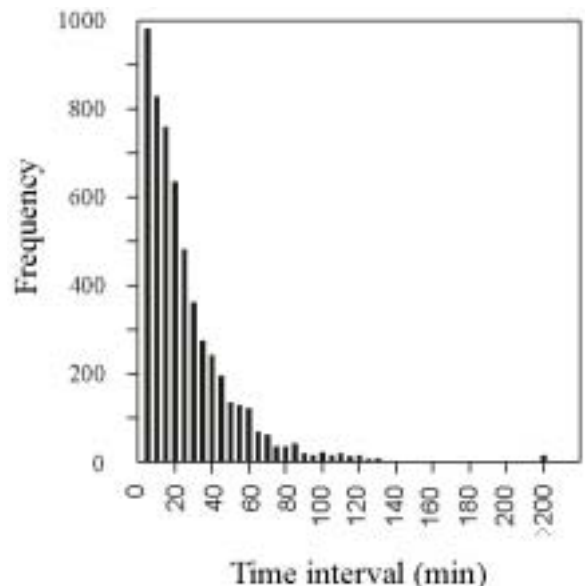


Fig. 5 Time interval of occurrence of explosive eruption every 5 minutes at Semeru volcano during the period from January to April 2002

成分で顕著であり、その後、transverse 成分を含めて水平動の振幅が大きくなっている。P 波初動は火口方向からの直線的な押し波であり、それに続く D 相は火口方向への直線的な引き波である。桜島火山の爆発地震の場合、震源は火口直下であり（例えば、Iguchi, 1994）、スメル火山においても震央が火口付近にあると仮定すると、P 波初動の 2~3 秒後からの LP 相の振動軌跡は波の進行方向と逆回転の楕円振動になる。LP 相は P 波初動の約 1.5 秒後から始まり、2, 3 秒後から明瞭な楕円振動を示す。振動軌跡の特徴から、P および D 相は P 波、LP 相は Rayleigh 波であると思われる。初動が識別できるものについては、これら 3 つの特徴的な位相はすべての噴火地震動で見られる。KAL 観測点の上下動成分における各位相の振幅は P 相が  $1.2 \mu\text{m/s}$  以下、D 相が  $0.8\sim 4.2 \mu\text{m/s}$ 、LP 相が  $1.2\sim 10.5 \mu\text{m/s}$  であった。

LEK 観測点における空気振動は KAL 観測点における P 波初動到達の 18 秒後に見られる (Fig. 8)。この空気振動の初動振幅は  $0.23\text{Pa}$ 、パルス幅は  $0.26$  秒である。空気振動の初動はすべて圧縮波であり、振幅は  $0.03\sim 1.11\text{Pa}$ 、パルス幅は  $0.19\sim 0.79$  秒の範囲であった。

KAL 17:20, Sep.21, 2002

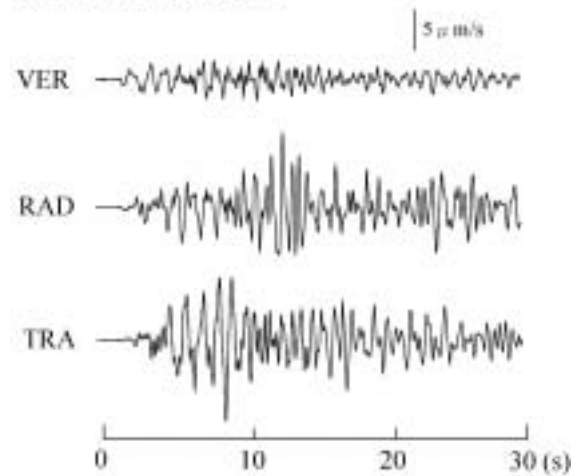


Fig. 6 An example of velocity waveform of explosion earthquake. The three traces represent vertical (VER), radial (RAD), and transverse (TRA) components from top to bottom.

## 5. 議論

### 5.1 噴火地震と空気振動の規模の比較

井口・石原 (1990) は桜島火山および諏訪之瀬島火山における爆発的噴火の地震動振幅と空気振動振幅の関係を調べた。それによると、爆発地震の最大振幅は桜島火山で  $30\sim 300 \mu\text{m/s}$ 、諏訪之瀬島火山で  $5\sim 70 \mu$

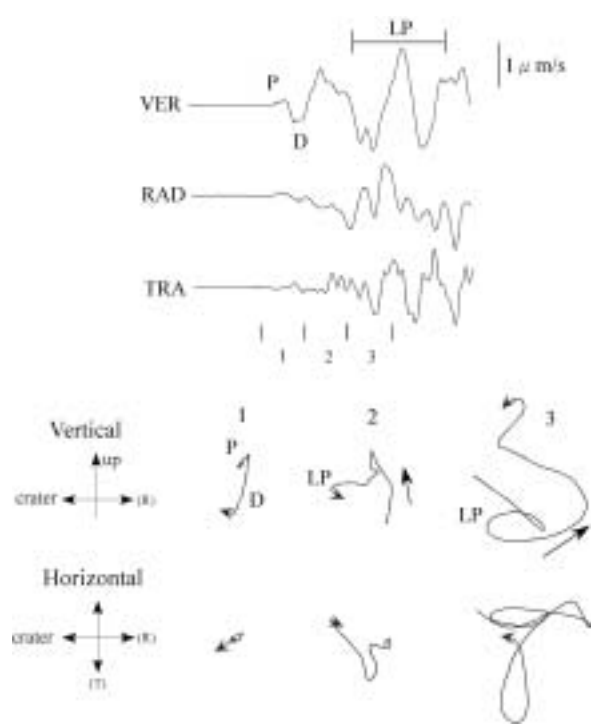


Fig. 7 Velocity waveform observed at KAL station (top). Particle motions on vertical cross-section in the radial direction and horizontal plane every 1 second (bottom)

17:20, Sep.21, 2002

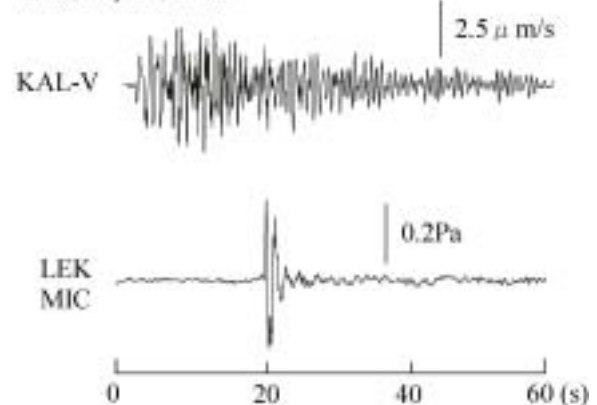


Fig. 8 Records of waveforms of vertical component observed at KAL station and air-shock observed at LEK station

$\text{m/s}$  である。スメル火山においては、本研究の観測期間中に得られた噴火地震の最大振幅は  $0.6\sim 10 \mu\text{m/s}$  程度であり、桜島よりも 1~2 桁、諏訪之瀬島よりも 1 桁小さい。また、桜島火山の空気振動振幅は  $10\sim 400\text{Pa}$ 、諏訪之瀬島火山においては  $4\sim 100\text{Pa}$  である。スメル火山においては、空気振動振幅は  $0.03\sim 1.1\text{Pa}$  であり、桜島火山よりも 2 桁、諏訪之瀬島火山よりも 1 桁小さい。地震動および空気振動の振幅はスメル火山<諏訪之瀬島火山<桜島火山の順で大きくなるといえる。

## 5.2 桜島火山の爆発地震における P, D, LP 相との比較

Fig. 9 に桜島火山における爆発地震の波形を示す。この波形は Figs. 6, 7 に示している KAL 観測点とほぼ同じ震央距離において、広帯域地震計によって記録された爆発地震の波形例である。P 波初動 (P 相) の後、やや振幅の大きな引き波が続き (D 相)、P 波初動の約 2 秒後に最大振幅をもつ長周期 (LP 相) が見られる。また、見かけ伝播速度、振動軌跡、振幅の距離減衰の特徴から、P, D 相は P 波、LP 相は Rayleigh 波であると考えられている (Tameguri et al., 2002)。

前章で述べたように、桜島と同様にスメル火山の波形には P 波の特徴を持つ P および D 相、Rayleigh 波の特徴を持つ LP 相が見られる。そこで、両火山における噴火に伴う地震動の 3 つの位相の特徴を比較してみた (Table 1)。P 相は、両火山において初動極性はどちらも押しであり、パルス幅も 0.5 秒程度と類似してい

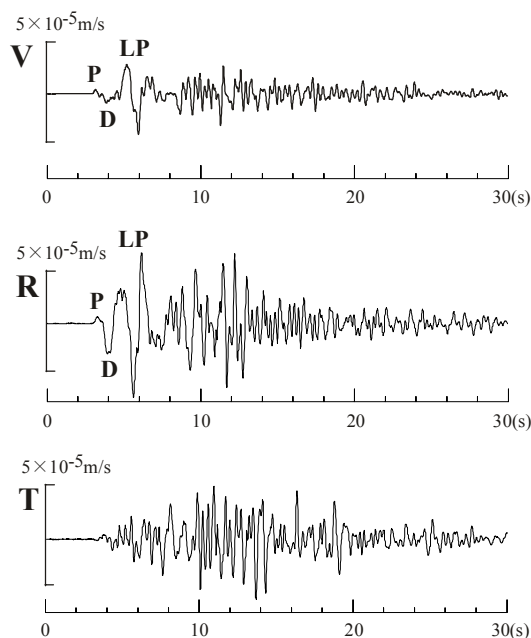


Fig. 9 An example of velocity waveform of explosion earthquake observed at Sakurajima volcano. Distance of the station from the crater is 2.8km, similarly to that of KAL station at Semeru volcano.

る。D 相に関しては、パルス幅はスメル火山の方が短い。上下動と水平動の振幅比については、スメル火山は上下動が約 3 倍大きいのに対し、桜島火山では水平動の方が上下動に比べ約 3 倍大きいということが大きく異なる点である (Figs. 7, 9)。スメル火山の LP 相の初動は着震時を読み取ることが困難であるため、極性に関しては限定できないが、桜島火山の LP 相は明瞭な押しである。スメル火山の LP 相のパルス幅は桜島火山の LP 相のほぼ半分である。桜島火山の爆発地震における各位相の振幅は P 相で 3~10  $\mu$  m/s、D 相で 6~45  $\mu$  m/s、LP 相で 20~80  $\mu$  m/s であり (Tameguri et al., 2002)、スメル火山における各位相の振幅は P 相で 1.2  $\mu$  m/s 以下、D 相で 0.8~4.2  $\mu$  m/s、LP 相で 1.2-10.5  $\mu$  m/s であることから、桜島火山の地震動より 1 桁程度小さいといえる。

桜島火山の爆発地震については、P, D 相は深さ 2km における等方膨張、円筒収縮によって励起されており、LP 相は火口直下浅部における等方膨張、水平収縮により発生している (Tameguri et al., 2002)。スメル火山における P 相の極性は、初動の明瞭な地震については 2 点ともに押しであることから、桜島火山同様に、膨張によって励起されている可能性がある。桜島火山の D 相の場合、水平動成分が卓越しており、スメル火山においては Vertical 成分が卓越している。D 相については、桜島火山とは異なるメカニズムによって励起されていると思われる。LP 相に関しては、桜島火山と比較して震源時間関数のパルス幅は短い可能性がある。

桜島火山の爆発地震の場合、P 相と LP 相は異なる震源から励起されており、両者の地震モーメントに相関は見られない (Tameguri et al., 2002)。観測点数、地震波速度構造の問題から、今回のスメル火山の観測では、観測点が 2 点しかないため、震源決定および地震モーメントの見積もりはできないので、試みに両相の振幅の関係を調べてみた (Fig. 10)。P 相の振幅が大きい場合、LP 相の振幅も大きくなる傾向は見られるが、両相のモーメントの相関性を議論するためには多点観測を行い、震源およびメカニズムの決定を行う必要がある。

等方膨張によって励起される地震動の P 波と Rayleigh 波の到達時と振幅を計算してみた。スメル火

Table 1. Comparison of characteristics of 3 phases between Semeru and Sakurajima volcanoes

	P phase		D phase		LP phase	
	Semeru	Sakurajima	Semeru	Sakurajima	Semeru	Sakurajima
Polarity	Push	Push	Pull	Pull	not clear	up (vertical)
Pulse width (s)	0.3-0.5	0.5	0.7-0.8	1	1-1.25	2
Amplitude ( $\mu$ m/s)	0-1.2	3-10	0.8-4.2	6-45	1.2-10.5	20-80

山近傍の地震波速度構造が未知のため、桜島火山と同様に  $V_p=2.5\text{km/s}$ 、ポアソン比 0.25 の半無限均質媒質を仮定した。震源が地表面にある場合、両相の到達時間差は 0.8 秒となり、P 相と LP 相の振幅比はほぼ説明できる。一方、震源の深さを 2km とした場合は、到達時間差は 1.3 秒となるが、Rayleigh 波の振幅が小さくなり、観測されている LP 相の振幅を説明できない。今回の解析ではスメル火山において P 相と LP 相が共通の震源によって励起されているか、もしくは深さの違い 2 つの震源が必要であるか決めることはできなかったが、少なくとも Rayleigh 波からなる LP 相の震源は浅部にある可能性が高い。

### 5.3 空気振動の波形の比較

次にスメル火山において観測された空気振動の波形を桜島および諏訪之瀬島火山の爆発に伴う空気振動と比較する (Fig. 11)。先に述べたようにスメル火山の空気振動の振幅は桜島火山より 2 桁、諏訪之瀬島火山より 1 桁程度小さい。桜島火山および諏訪之瀬島火山では圧縮相がそれに続く膨張相に比べ 2~3 倍大きい、スメル火山では圧縮相と膨張相の振幅がほぼ同じ振幅を持ち、さらにその後続く圧縮相の振幅も最初の圧縮相の 70~90% 程度に達する。

最初の圧縮相のパルス幅に着目すると、桜島火山では 1 秒付近にその頻度のピークがあり、パルス幅は 0.6~1.5 秒程度、また、諏訪之瀬島火山では 0.2 秒付近にピークがあり、パルス幅は 0.15~0.65 秒の範囲にある。スメル火山の空振波ではそのパルス幅が 0.19~0.79 秒であり桜島火山よりも諏訪之瀬島火山の空気振動の特徴に近い。噴煙の高度 (数 100m)、3 章に述べた発生間隔をはじめ、噴煙の到達距離 (500m 以下) など、噴火現象についてはスメル火山と諏訪之瀬島火山は類似した点が多い。

### 5.4 噴火に伴う地震動と空気振動の関係

桜島火山における空気振動の発振時は火口直下浅部における等方膨張の発震時と 0.3 秒以内で一致しており、空気振動の振幅は火口直下浅部における等方膨張によって励起される Rayleigh 波の振幅と良い相関がある (Tameguri et al., 2002)。

風によるノイズの少ない 92 例のイベントについて空気振動の振幅を調べた。Fig. 12 にスメル火山と桜島火山における空気振動振幅と噴火に伴う地震動の LP 相の振幅の関係を示す。スメル火山においても桜島火山と同様に LP 相の振幅が大きい場合、空気振動の振幅も大きくなる傾向が見られる。図中の丸で囲んだイベントは空気振動のパルス幅が 0.19~0.25 秒と短く、スメル火山で観測される空気振動の中では impulsive

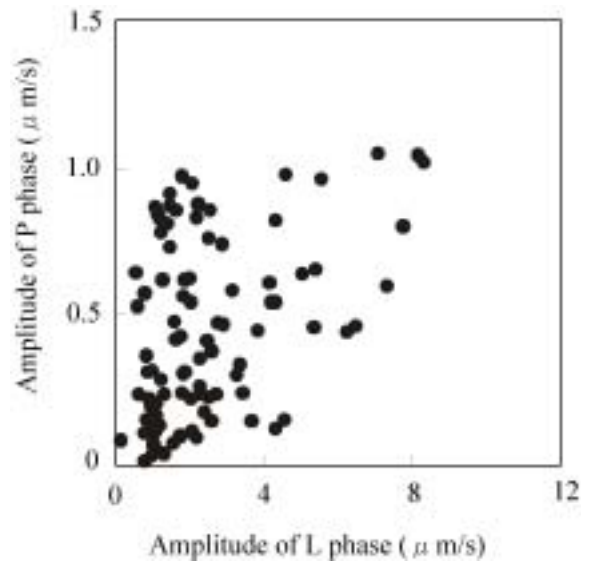


Fig. 10 Relation of amplitudes between P and LP phases at Semeru volcano

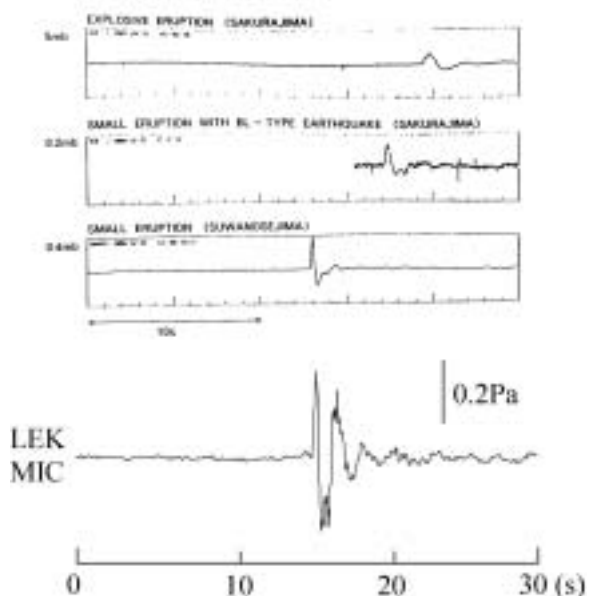


Fig. 11 Waveforms of air-shocks accompanied with explosive eruptions at Sakurajima (top), Suwanosejima (third) and Semeru (bottom) (after Iguchi and Ishihara, 1990)

な特徴を持ち、impulsive な空気振動では相対的に空気振動の振幅が大きくなる傾向が見られる。

## 6. まとめ

インドネシア・スメル火山において爆発的噴火に伴う爆発地震、空気振動観測を行い、872 例の爆発的噴火が観測された。爆発地震の波形は桜島火山の爆発地

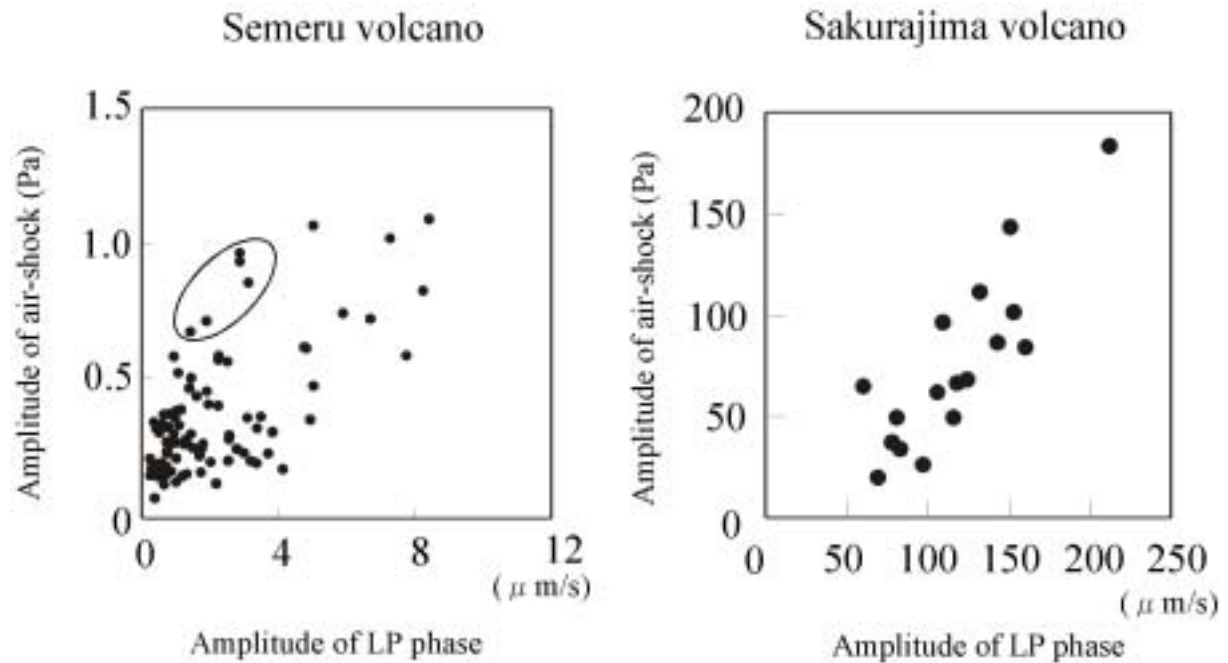


Fig. 12 Relation of amplitudes between LP phase and air-shock at Semeru (left) and Sakurajima volcanoes (right)

震に類似している。押し波の P 波，引き波の P 波が続き，P 波初動の約 1.5 秒後に Rayleigh 波が見られる。引き波の P 波は上下動成分の振幅が水平動成分の振幅より約 3 倍大きく，桜島火山における爆発地震の引き波の P 波とは特徴が異なっている。空気振動の振幅は Rayleigh 波の振幅と相関があり，桜島火山の特徴と類似している。爆発地震および空気振動の振幅は桜島火山の振幅より 2 桁程度，諏訪之瀬島火山より 1 桁程度小さい。

#### 謝 辞

インドネシア・スメル火山における地震動，空気振動観測を行うにあたり，Gunung Sawur 観測所のスタッフにご協力いただいた。また，インドネシア滞在中火山地質災害防災局のスタッフにお世話になった。本研究の経費は文部科学省在外研究員（創造開発研究）費によってまかなわれた。

#### 参考文献

井口正人・石原和弘 (1990) : 爆発的噴火に伴う地震動・空気振動の比較研究—桜島火山と諏訪之瀬島火山の比較—，京都大学防災研究所年報，33B-1，pp.1-12.  
石原和弘・井口正人・グデスアンティカ・ラデンスク

ヒヤール (1995) : インドネシア Semeru 火山の火山性地震・微動，京都大学防災研究所年報，38B-1，pp.173-182.

加茂幸介 (1978) : 桜島火山における噴火の前兆現象と予知，火山第 2 集，23，pp.53-64.

Iguchi, M. (1991) : Geophysical data collection using an interactive personal computer system (Part 1), Bull. Volcanol. Soc. Japan, 36, pp.335-343.

Iguchi, M. (1994) : A vertical expansion source model for The mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, 39, pp.49-67. 1994.

Tameguri, T., Iguchi, M., and Ishihara, K. (2002) : Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano Bull. Volcanol. Soc. Japan, 47, pp.197-215.

## **Observation of Eruption Earthquakes and Air-shocks Accompanied with Small Explosive Eruptions at Semeru Volcano, East Jawa, Indonesia**

Takeshi TAMEGURI, Masato IGUCHI, Hetty TRIASTUTY\*, Iyan MULYANA\*,  
Muhammad HENDRASTO\*, Achmad Djumarma WIRAKUSUMAH\*

\* Directorate of Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Indonesia

### **Synopsis**

Semeru volcano, an andesitic stratovolcano in East Java, Indonesia has continued eruptive activity with frequent minor explosion at the summit crater. Seismic and infrasonic observations were conducted at the volcano during the period from September 14-23, 2002. Eruption earthquakes and air-shocks were analyzed and compared with those of Sakurajima and Suwanosejima volcanoes. P-wave first motion is compression and is followed by a dilatational P-wave motion with larger amplitude. Rayleigh wave with longer period (Pulse width: 1.2 s) appear 1.5 s after the arrival of the first motion. The three phases are also observed at Sakurajima volcano. The characteristics of compressional P-wave first motion at Semeru volcano are similar to that of Sakurajima volcano. Radial component of a dilatational P-wave motion at Sakurajima volcano is dominant. In contrast, vertical component is dominant at Semeru volcano. Pulse width of Rayleigh wave at Semeru volcano is shorter than that of Sakurajima volcano. Amplitudes of Rayleigh waves correlate with the amplitudes of the air-shock. The amplitudes of the Rayleigh wave and air-shock at Semeru volcano are 1-2 orders smaller than those of Sakurajima volcano and 1 order smaller than that of Suwanosejima.

**Keywords:** Semeru volcano; explosive eruption; eruption earthquake; air-shock