

インドネシア Semeru 火山の火山性地震・微動

石原 和弘・井口 正人・グデ スアンティカ・
ラデン スクヒャール

VOLCANIC EARTHQUAKES AND TREMORS AT SEMERU VOLCANO, INDONESIA, AND THE COMPARISON WITH THOSE AT SAKURAJIMA AND SUWANOSEJIMA VOLCANOES

By *Kazuhiro ISHIHARA, Masato IGUCHI, Gede SUANTIKA and Raden SUKHYAR*

Synopsis

Semeru volcano, an andesitic stratovolcano in East Java, Indonesia has erupted intermittently for more than 50 years. On February 3, 1994, the volcano erupted violently accompanied with remarkable pyroclastic flows. Seismic activity prior to the eruption was characterized by occurrence of deep volcanic earthquakes, and successive increase in shallow earthquakes and tremors continuing for 9 days until the eruption. Such a sequence of the seismic activity has been often observed at Sakurajima. Volcanic earthquakes and tremors observed at the volcano are quite similar to those recorded at Sakurajima and Suwanosejima volcanoes; those are A-type earthquakes, B-type earthquakes, explosion-earthquakes, harmonic (C-type) tremors and non-harmonic tremors. Spectral analysis for these events at the three volcanoes were done. The peak frequencies of them at Semeru and Sakurajima are almost same, but lower than those at Suwanosejima. This result suggests that Semeru has a shallow magma conduit of similar size with that of Sakurajima. It is noteworthy that harmonic tremors at Semeru have a few discrete frequency peaks of integer multiple, and the frequencies change with time, similar to those at the other two volcanoes.

1. は じ め に

インドネシアのジャワ島東部に位置するスメル (Semeru) 火山は標高 3,690 m の安山岩質成層火山であり、同島の最高峰である (Fig. 1 参照)。同火山は、ジャワ島中部のメラビ火山と並んで同国の中で最も活動的な火山の一つである。インドネシア火山調査所の資料によれば¹⁾、1830 年から 1913 年まで、及び 1941 年から現在までほぼ毎年のように噴火が発生している。安山岩質溶岩を噴出し、空気振動を伴う爆発的噴火 (ストロンボリ式〜ブルカノ式噴火) を繰り返してきた。多量の溶岩が噴出して溶岩ドームあるいは溶岩流を形成することが多い。噴火の発生場所は主に山頂部であるが、山腹で発生した噴火の記録もある。活動最盛期には、メラビ

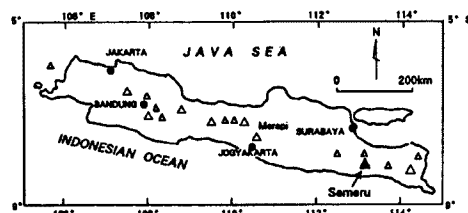


Fig. 1. Location map of Semeru Volcano

火山や雲仙普賢岳と同様に、山頂火口は溶岩ドームや溶岩流で埋まるので、爆発的噴火が発生するとそれらが破砕されて火砕流が発生する。更に、その堆積物は降雨期に泥流発生の原因となる。火砕流や泥流により周辺の住民は繰り返し被害を受けてきた。最近では、1994年2月に爆発的噴火に伴う火砕流によって7名の死傷者がでた。

1993年に桜島火山観測所とインドネシア火山調査所が共同研究を開始する時点で、我々は、桜島とスメル火山の活動様式と記録された火山性地震・微動の類似性に注目し、火山性地震・微動の分類とそれらの発生機構に関して共通の認識を得るために、両火山の地震記録の比較解析を行うことを計画した。両火山の活動様式の類似性は、1) 噴出溶岩が安山岩質であること、および、2) 長期にわたる山頂での爆発的噴火の繰り返しである。

本稿では、スメル火山の1994年の活動前後の地震活動の特徴および、桜島と諏訪之瀬島の常時地震観測点で記録された典型的な地震・微動の波形およびスペクトル解析の結果を報告する。

2. 1994年2月の噴火前の地震活動

1994年2月3日早朝に強い爆発音をともなった噴火により火砕流が発生して、南東斜面を河川に沿って11.5 km 流下した (Fig. 2)。その先端が Summersari 村に達して、多くの家と 150 ha の耕作地が破壊され、死者 4 名、負傷者 3 名 (内 2 名は後日死亡) の被害が出た。火山調査所の調査では、同村内の火砕流堆積物の温度は 100 ~ 146°C であった。また、この火砕流によって火山調査所の地震観測点のひとつが破壊された。インドネシア火山調査所は、活発な噴火活動を続けるスメル火山に 3 観測所を配置し、監視を続けてきた。山頂から南東 6.4 km の地点に 1 成分の地震計を設置して、麓の Gunung Sawur 観測所まで地震波形信号を無線搬送し、地震活動を監視してきた。また、臨時観測点を多数設け、震源決定も行っている。

この 1994 年 2 月 3 日の火砕流を発生した噴火に至るまでの経緯を火山性地震の日別発生回数からみる (Fig. 3)。1993 年終わってから小噴火と溶岩崩落が頻繁に繰り返されており、日平均 100 回程度の小噴火が観測されている。噴火発生の約 4 ヶ月前に A 型地震 (震源の深い地震) の発生頻度が高まり、1 月 ~ 1 ヶ月前に B 型地震 (震源の浅い地震) が多発している。更に、噴火直前の 9 日前の 1 月 25 日から顕著な火山性微動が群発しはじめた。記録をみるとほぼ連続的に発生しており、harmonic な震動に噴火に伴う震動や浅い火山性地震などが入り交じっているように見える。

桜島では爆発的噴火活動の前には火口への溶岩の上昇に対応する B 型地震が群発する²⁾。しかも、顕著な爆発の発生前の B 型地震群発中には、次第にその波形が単純化して harmonic な震動から構成さ

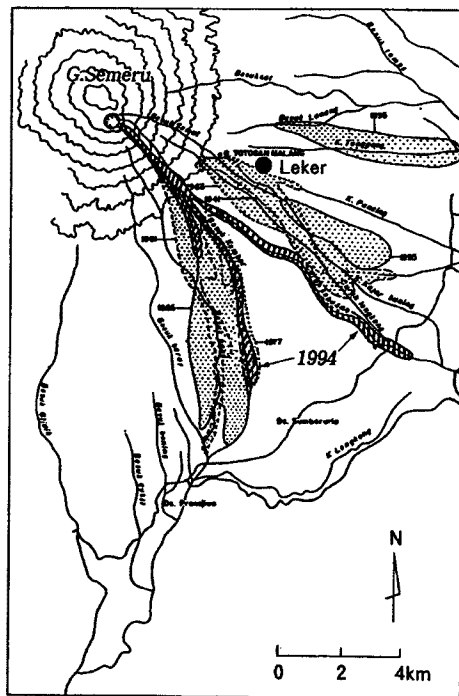


Fig. 2. Distribution of pyroclastic flow deposit of Semeru volcano during 1895 - 1994. Hatched area represents pyroclastic flow deposit by February 3, 1994 eruption and shaded area are older ones. Location of the seismic station is indicated by a solid circle.

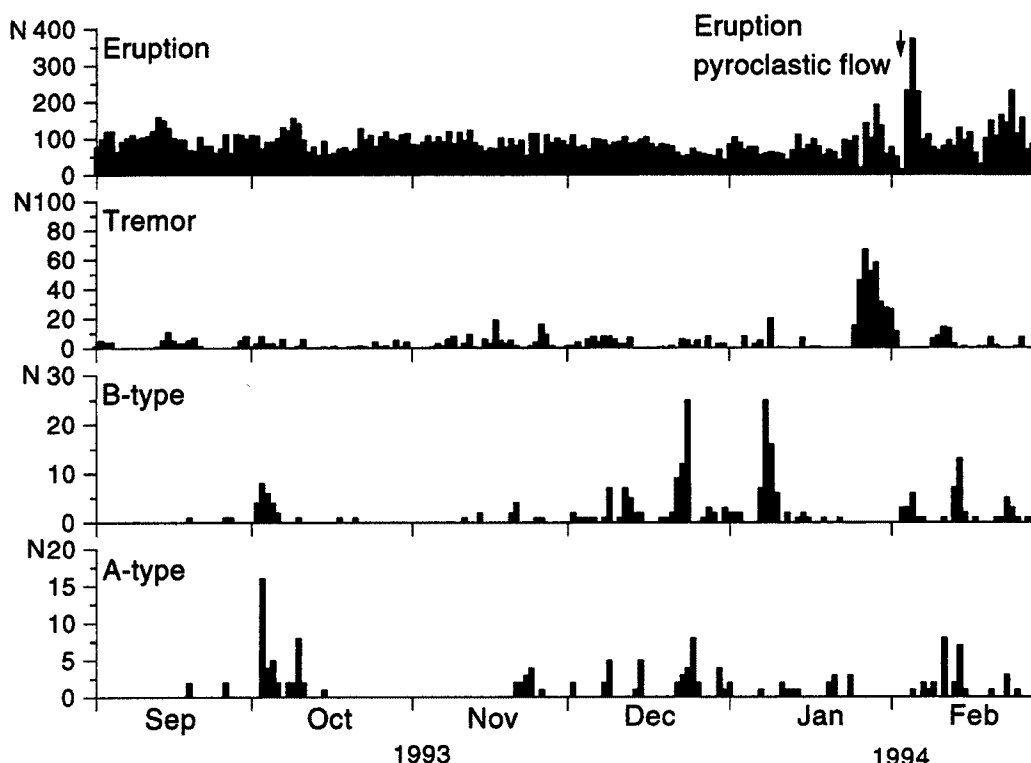


Fig. 3. Daily frequency of volcanic earthquakes and tremors at Semeru Volcano

れるC型微動に移行する現象が認められる³⁾。火砕流発生直前のスメル火山記録は振り切れており、波形の変化を明確に認識することはできないが、2月3日の噴火前の連続的な微動は、桜島のB型地震の群発と同じ現象かも知れない。また、桜島火山のB型地震群発は溶岩が火口へ噴出する際に発生することが知られている⁴⁾。スメル火山で記録された連続的な微動は、溶岩の活発な噴出に対応し、それが顕著な火砕流の原因となったと考えられる。

いづれにしても、スメル火山の今回の一連の火山性地震の発生様式の推移、すなわち、A型地震→B型地震→微動(B型地震?)の群発→爆発的噴火という経過は、爆発的噴火活動を繰り返してきたわが国の安山岩質火山、浅間山⁵⁾、桜島²⁾、諏訪之瀬島⁶⁾でもしばしば観察され、爆発的噴火予測の経験則となっている。今回のスメル火山の活動でも、現地観測所から、事前にその危険性が周辺の集落へ連絡されていた。

3. 火山性地震の分類

スメル火山、桜島火山、諏訪之瀬島火山において発生する火山性地震の代表的な波形をFig. 4, Fig. 5およびFig. 6に示す。いづれの地震も固有周期1sの上下動地震計により、観測されたものである。スメル火山の記録は円弧書きのドラムレコーダ(KINEMATRICS PS-2)に記録されたもの、桜島の場合はアナログテープに記録されたもの、諏訪之瀬島の場合は、パソコンにデジタル収録されたものである。地震計の火口からの距離はスメル、桜島、諏訪之瀬島について、それぞれ、6.4, 2.8, 3.3 kmである。これら3火山では、波形の類似した地震と微動が発生していることが分かる。

桜島の場合、P波、S波の位相が明瞭で高周波成分が卓越したものをA型地震、低周波成分が卓越して初動が不明瞭なものをB型地震、また、爆発的噴火に伴うものを爆発地震と呼んでいる。B型地震につい

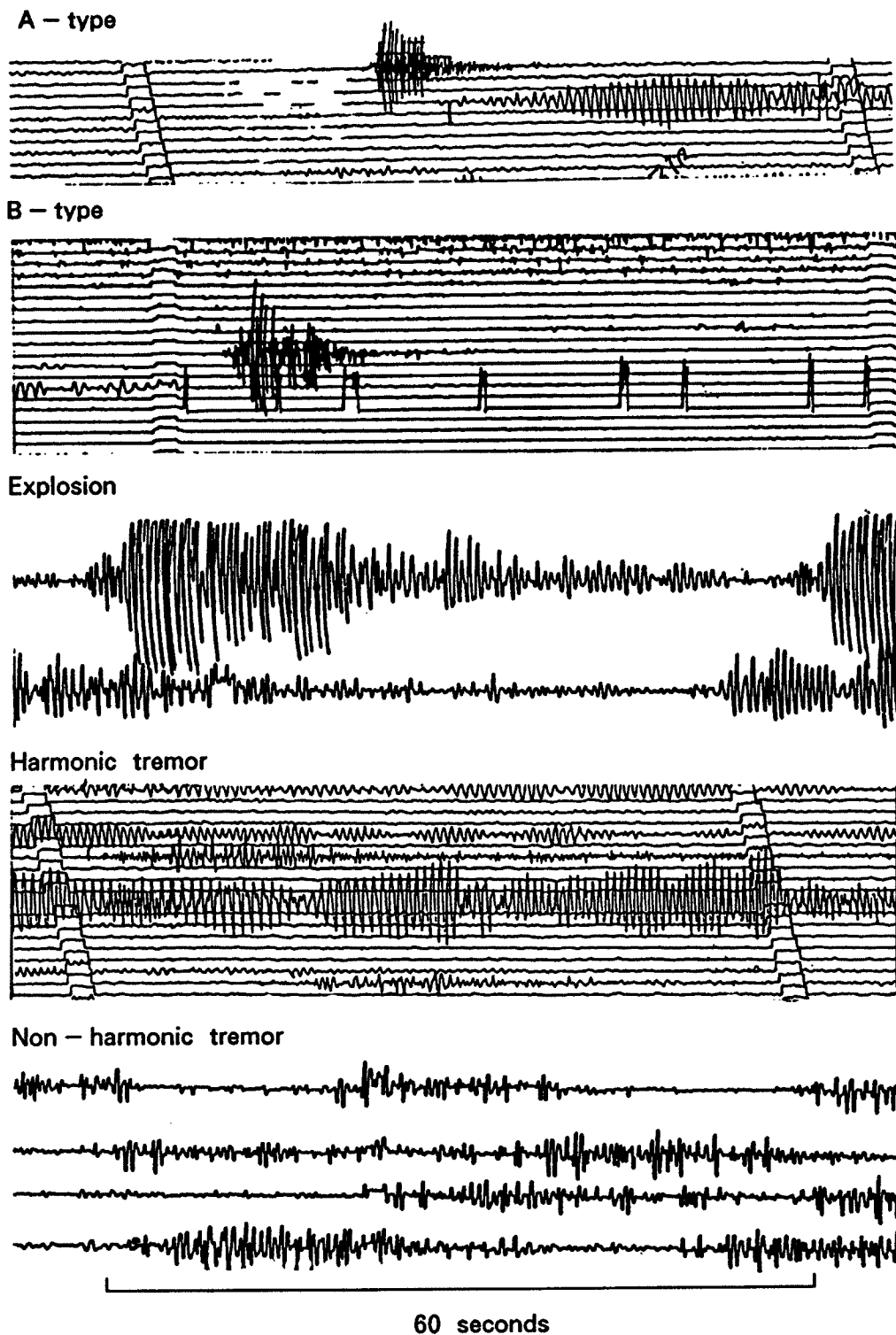


Fig. 4. Typical seismograms observed at Semeru volcano. The seismometer is installed 6.4 km southeast of the summit.

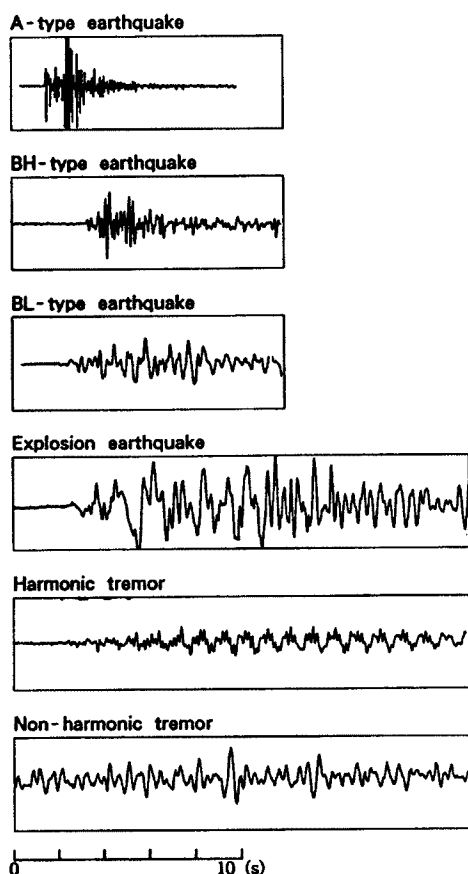


Fig. 5. Typical seismograms at Sakurajima volcano

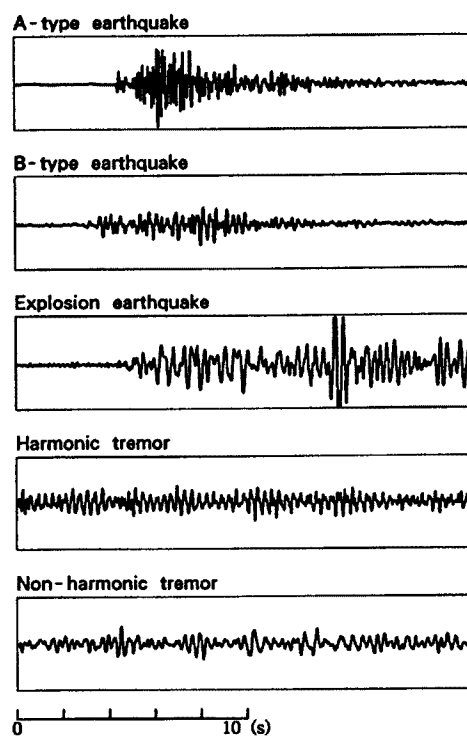


Fig. 6. Typical seismograms at Suwanosejima volcano

ては 5–8 Hz の高周波成分が卓越する BH 型と 1–3 Hz の低周波が卓越する BL 型に細分される⁷⁾。発生回数は BL 型が圧倒的に多く、BH 型は数ヶ月間の静穏期の後に発生することが多い。火山性微動については、harmonic または monotonic な震動が卓越するものを C 型、顕著なスペクトルのピークが見られないものを D' 型として分類している。

諏訪之瀬島の場合もこの分類方法を適用してきた⁶⁾。ただし、BH 型に対応する地震はこれまでのところ観測されていない。

スメル火山で観測される地震と微動についてもこの分類方法をあてはめることができる。火山性地震は、A 型地震、B 型地震、及び噴火を伴う爆発地震に分類される。記録紙の送り速度が 2 mm/s と遅いため、桜島の BH 型に相当する地震があるかどうか識別できなかった。また、火山性微動には、harmonic な微動と広い周波数帯域をもち、不規則な振動が繰り返される微動の 2 種類ある。特に、harmonic な微動の規則的な振動からなる wave packet がビートをうつように繰り返される波形の特徴は桜島の C 型に極めて類似している。

4. スペクトル

スメル、桜島および諏訪之瀬島において発生する火山性地震、特に、安山岩質火山に特有な B 型、爆発地震および火山性微動を定量的に比較するため、スペクトル解析を行った。スメル火山のインク書き記録を XY- デジタイザーを用いてトレースすることにより数値化した。XY- デジタイザーの読み取り精度は公称 0.1 mm である。記録紙の送り速度は 2 mm/s と低速であるので、記録紙をコピー機で拡大して数値化精度の向上を図った。また、円弧書き補正を行った。最終的には、100 サンプル / 秒相当の波形データセットを作成した。原記録紙送りの速度とテレメータに使用された low pass filter を考慮するとスペクトル解析で信頼のおける周波数領域は 5 Hz までである。桜島の記録は、アナログ磁気テープに記録された波形を再生し、A/D 変換器を用いて 100 サンプル / 秒でデジタル化した。諏訪之瀬島の記録は 100 サンプル / 秒でデジタル収録されている。

スペクトルは初動から 1024 サンプル (10.24 s) のデータを用いて FFT により計算した。スメル、桜島および諏訪之瀬島の B 型地震、爆発地震、harmonic tremor および non-harmonic tremor のスペクトルを Fig. 7 a-d に示す。

(1) B 型地震

桜島については BL 型を示した。ここで示した桜島と諏訪之瀬島の例では、1.8 Hz と 3.4 Hz にピークがある。スメル火山の場合は、3.1 Hz にピークがある。桜島の BL 型の場合はピーク周波数はおよそ 1 ~ 3 Hz に現われることが知られており⁷⁾、この 3 火山の B 型地震のスペクトルの間には、大きな相違はない。

(2) 爆発地震

桜島、諏訪之瀬島およびスメル火山のピーク周波数は、それぞれ、1.5, 2.2, 1.2 Hz である。スメル火山の爆発地震のスペクトルのピークは桜島とほぼ同じであり、3 Hz 以下の低周波成分に富む。それに対して、諏訪之瀬島の場合は、2-3 Hz にピークがあり、他の 2 火山に比べて、より高周波成分に富んでいる。

(3) Harmonic な微動

3 火山とも基本周波数とその整数倍の周波数にスペクトルのピークが現われるという特徴がある。すなわち、桜島の場合は、1.2, 2.3, 3.5, 4.6 Hz にピークがあり、1.2 Hz を基本周波数としてその 2 倍、3 倍、4 倍の周波数にピークが現れている。また、スメル火山の場合は 1.2, 2.4, 3.5 Hz にピークが現われており、1.2 Hz を基本周波数として、その 2 倍および 3 倍の周波数にピークがある。諏訪之瀬島の場合は、3.2 Hz と 6.4 Hz にピークがあり、3.2 Hz を基本周波数としてその 2 倍の周波数に次のピークがある。基本周波数を比べると、桜島とスメルはほぼ同じであるが、それに比べて諏訪之瀬島の場合は約 3 倍高い。

(4) Non-harmonic な微動

harmonic tremor が孤立した幾つかピークからなるのに対し、non-harmonic tremor は B 型地震と同じ程度に周波数の帯域が広い。桜島の場合、スペクトルのピークは 2.2 Hz にあり、1.3 Hz ~ 3.8 Hz の帯域でピーク周波数の振幅の 1/2 以上の振幅を保っている。スメルの場合も同様で、ピーク周波数は 1.8 Hz にあるが、1.6 Hz から 2.8 Hz の範囲の振幅はピーク周波数の振幅の 1/2 以上である。他方、諏訪之瀬島の場合は、ピーク周波数が 4.0 Hz と他の 2 火山と比べると高く、2.5-2.8, 3.1-3.6, 3.9-4.8, 6.8-7.0 Hz 付近がピーク周波数の振幅の 1/2 を越えている。

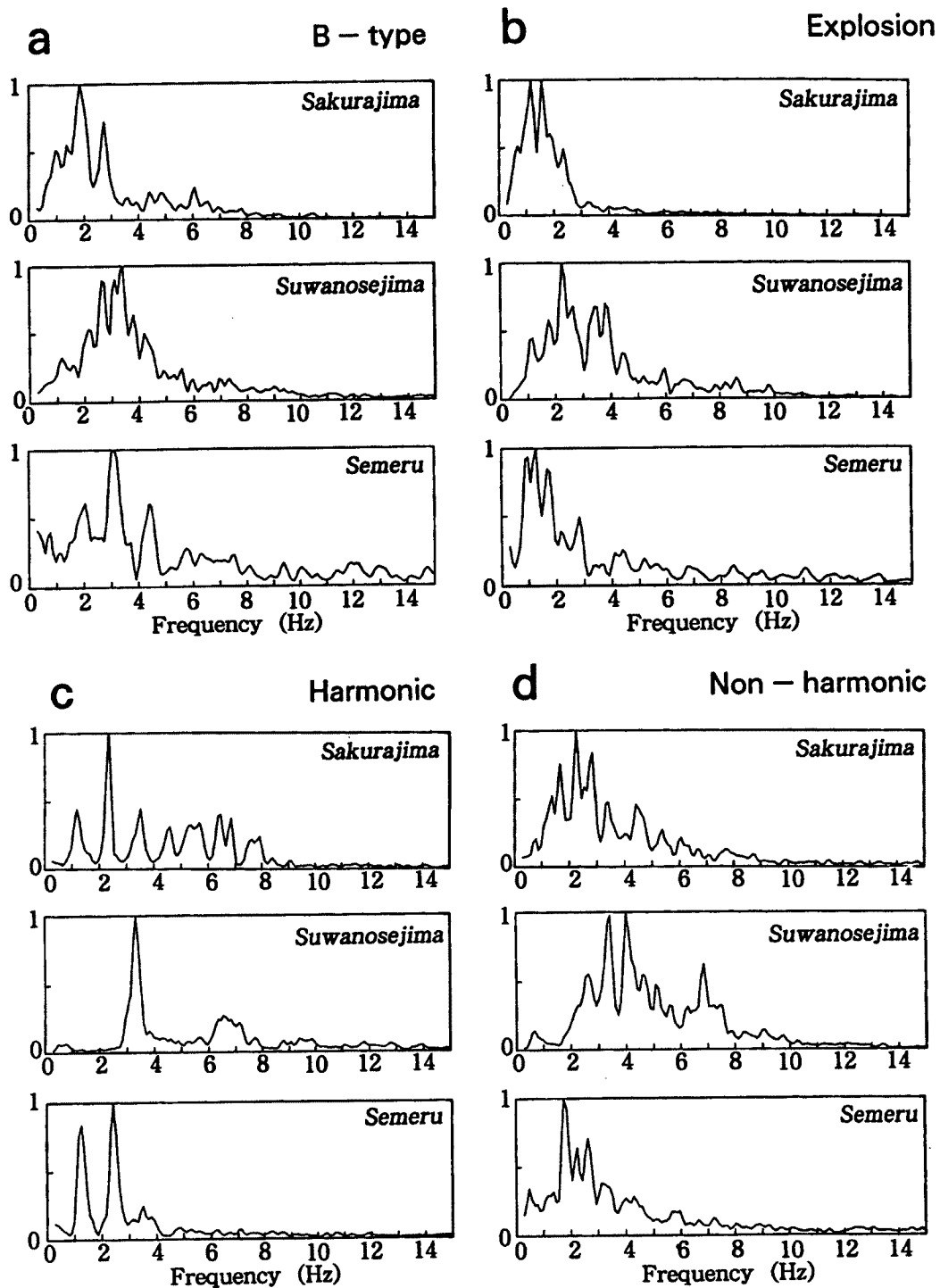


Fig. 7. Comparison of velocity spectra. The spectra of B-type, explosion earthquakes and harmonic and non-harmonic tremors at Semeru, Sakurajima and Suwanosejima were calculated by FFT and are shown in linear scale. The amplitudes are normalized by those at peak frequencies.

5. 議 論

インドネシア・スメル火山に発生する火山性地震と微動について、同火山と同様に、安山岩質で山頂噴火を長期間にわたり継続している桜島および諏訪之瀬島の火山性地震と比較した。

桜島火山では、これまで、A 型、B 型 (BH, BL)、爆発地震、C 型 (harmonic 微動) および D' 型 (non-harmonic な微動) に分類し、同じ分類方法を諏訪之瀬島にも適用してきた。本研究において、スメル火山で観測された地震波形を調べたところ、同じ分類方法が適用できることがわかった。

この分類方法に従って、1994 年 2 月の顕著な噴火前の地震活動をみると、桜島、諏訪之瀬島や浅間山といった爆発的噴火を繰り返してきた安山岩質火山と同様の経過を辿っていることが分かった。即ち、顕著な爆発的活動に向かっての地震活動の推移、「A 型地震の発生→B 型地震の増加→B 型地震あるいは微動の群発→顕著な爆発的噴火」という経過である。特に、B 型地震や微動の群発は、溶岩の火道から火口底への噴出に対応していて⁴⁾、顕著な爆発的噴火の準備が整ったことを意味しており、安山岩質火山の噴火予測にとって最も注目すべき現象であることが指摘されてきたが^{2,3)}、このことがスメル火山の今回の事例でも確認された。

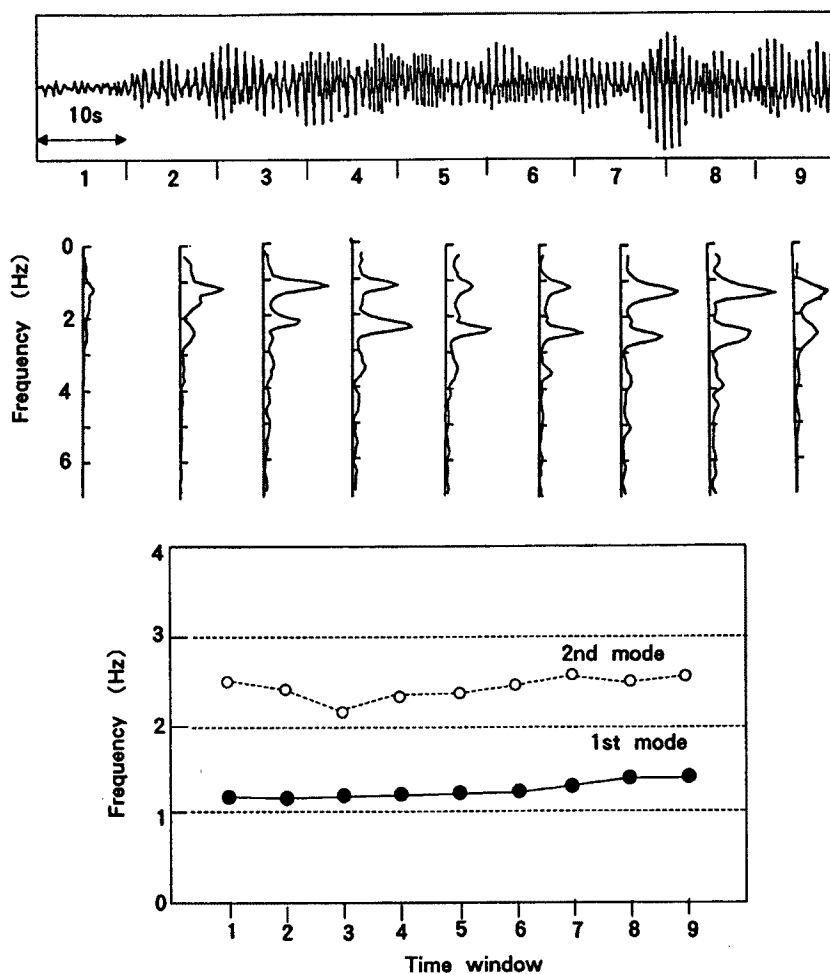


Fig. 8. Change in peak frequency of an harmonic tremor at Semeru Volcano. The harmonic tremor was divided into 9 time-windows with the interval of 10s. Frequencies of the fundamental and second modes are shown in the bottom figure.

スメル火山の火山性地震と微動のスペクトル構造の基本的特徴が桜島・諏訪之瀬島の火山性地震・微動に類似していることが分かった。特に、火道の内部で発生していると考えられる^{7,8)} B 型地震、爆発地震、harmonic tremor および non-harmonic tremor のスペクトルの卓越周波数がスメル火山と桜島ではほぼ一致し、諏訪之瀬島ではそれより 2～3 倍高いことが興味深い。

加茂・他⁹⁾は、桜島の harmonic な微動について境界において acoustic impedance が大きく変化する構造、火道内における火山ガスに満たされた空洞の固有振動によって発生するものと推定している。火山性微動発生に関する幾つかのモデル^{9,10)}によれば、微動のスペクトル構造はマグマの存在する空洞の大きさや、密度、P 波速度、粘性といったマグマの物性に依存する。スメル火山においても同様のスペクトル構造をもった harmonic な微動がみられることは、十分な大きさの火道が存在し、しかもその大きさや、火道内部マグマの物性や状態が桜島と類似していることを示唆する。Ishihara¹¹⁾は桜島の A 型地震と爆発地震の震源分布から火道の径を 300 m×600 m 程度と推定している。スメル火山ではインドネシア火山調査所の Surono 博士により震源決定が行われており（私信）、火山性地震の震源分布等から火道の大きさや形状が明らかになるものと思われる。一方、諏訪之瀬島の場合は、基本周波数が 3.2 Hz と高周波である。諏訪之瀬島の火口の vent の大きさは数 m 程度であり^{12,13)}、桜島の vent (60 m) より小さい。火道の大きさが小さいか、火道内部のマグマの物性や状態が異なっているものと推定される。

加茂・他⁹⁾は、harmonic な微動の基本周波数は時間とともに変化することを指摘し、空洞の体積の変化および空洞の気体の状態変化による音速変化によるものと解釈している。同様の現象は Langila 火山でもみられる¹⁴⁾。Fig. 8 に示すように、スメル火山においても基本周波数は時間とともに 1.1 Hz から 1.4 Hz まで変化している。harmonic な微動がみられる多くの火山で短時間のうちに基本周波数が変化する現象がみられることは興味深い。

6. 結 論

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) スメル火山の火山性地震、微動は、桜島、浅間山や諏訪之瀬島などわが国の爆発的噴火を繰り返してきた安山岩質火山と同じ分類方法が適用できる。また、その分類に従って地震活動の推移を追跡することが、噴火予測にとっても有効であることが、スメル火山の事例でも確かめられた。
- (2) スメル火山において発生する火山性地震・微動の種類とそのスペクトル構造、また、爆発的噴火発生至る地震活動の推移が桜島の場合に似ていることは、マグマの性質及び火道など火山の浅部構造の類似性を反映していると思われる。
- (3) スメル火山でも harmonic な微動の基本周波数の時間変化が確認された。

謝 辞

インドネシア火山調査所火山観測部 Syamsul Rizal 課長および同火山解析部火山物理課長 Surono 博士には、スメル火山の活動に関するデータを頂くと共に、本研究に関する研究討論に加わって頂いた。本研究は、文部省科学研究費補助金・国際学術研究（研究代表者：入倉孝次郎教授、課題番号：06044258）、在外研究員費（井口正人）、国際共同研究事業費等によるものである。また、著者の 1 人である Gede Suantika は国際協力事業団の火山学・火山砂防工学研修コースに研修員として参加し、桜島火山観測所滞在中に本研究の一部を行った。

参 考 文 献

- 1) Kusumadinata, K. ed. : Catalogue of References on Indonesian Volcanoes with Eruptions in Historical Time. Volcanological Survey of Indonesia, 1979, pp. 304 - 319.
- 2) 加茂幸介 : 桜島における噴火の前兆現象と予知, 火山第 2 集, 第 23 卷, 1978, pp. 53 - 64.
- 3) 西 潔 : 爆発に先行する火山性 B 型地震の群発, 京都大学防災研年報, 第 27 号 B-1, 1984, pp. 29 - 34.
- 4) 石原和弘・井口正人 : 火山体の変形と, 表面活動と火山性地震発生の関係 (1) —微小地震の群発現象について—, 京都大学防災研年報, 第 32 号 B-1, 1989, pp. 1 - 11.
- 5) Minakami, T. : Seismology and volcanoes in Japan, Physical Volcanology, Elsevier, 1974, pp. 1 - 27.
- 6) Iguchi, M. : Geophysical data collection using an interactive personal computer system (Part 1), Bull. Volcanolo. Soc. Japan, Vol. 36, 1991, pp. 335 - 343.
- 7) Iguchi, M. : A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano : Sakurajima, Japan, Bull. Volcanolo. Soc. Japan, Vol. 39, 1994, pp. 49 - 67.
- 8) 加茂幸介・古澤 保・赤松純平 : 桜島の火山性微動の性質について, 火山第 2 集, 第 22 卷, 1977, pp. 41 - 58.
- 9) Chouet, B. : Excitation of a buried magmatic pipe : A seismic source model for volcanic tremor, Jour. Geophys. Res., Vol. 90, 1985, pp. 1881 - 1893.
- 10) Crosson, R. S. and Bame, D. A. : A spherical source model for low frequency volcanic earthquakes, Jour. Geophys. Res., Vol. 90, 1985, pp. 10, 237 - 10, 247.
- 11) Ishihara, K. : Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano : Sakurajima volcano, Japan, Magma transport and storage (ed. Ryan, M. P.), John Wiley & Sons, 1990, pp. 335 - 356.
- 12) 井口正人・石原和弘 : 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—, 京都大学防災研年報, 第 33 号 B-1, 1990, pp. 1 - 12.
- 13) 井口正人・鍵山恒臣・増谷文雄 : 諏訪之瀬島火山における熱測定, 第 2 回諏訪之瀬島火山の集中総合観測, 1993, pp. 47 - 53.
- 14) Mori, J., Patia, H., McKee, C., Itikarai, I., Lowenstein, P., De Saint Ours, P., Talai, B. : Seismicity associated with eruptive activity at Langila Volcano, Papua New Guinea, Jour. Volcanolo, Geotherm. Res., Vol. 38, 1989, pp. 243 - 255.