

インドネシア Merapi 火山の噴火機構に関する研究 (序報)

加茂 幸介・石原 和弘・井口 正人・ウィンピー W. チェチェップ
スバンドリヨ・スハルノ・アントニウス ラドモプルボ・オニー K. スガンタ

PRELIMINARY REPORT ON COMPARATIVE STUDY OF ERUPTION MECHANISM OF MERAPI VOLCANO IN INDONESIA WITH JAPANESE VOLCANOES

By *Kosuke KAMO, Kazuhiro ISHIHARA, Masato IGUCHI, Wimpy S. TJETJEP,*
SUBANDRIYO, SUHARNO, Antonius RATDOMOPURBO and Ony K. SUGANDA

Synopsis

The eruptive activity of Merapi, the precursory phenomena and its magma supply system are summarized based on research made by the Volcanological Survey of Indonesia and are discussed in comparison with those at Mt. Unzen and Sakurajima. Although the output rate of lava and the type of magma at Merapi are much different from those at Mt. Unzen in 1991-1992, the sequence of eruptive activity and precursory phenomena are basically similar with each other: explosive eruptions at the initial stages of activity, pyroclastic flows due to collapse of lava domes, growth of lava domes by repeated domings, precursory seismic activity and remarkable ground deformation of summit area and so on. Magma supply system at Merapi inferred from the hypocentral distribution of volcanic earthquakes are quite similar with that at Sakurajima: the vertically elongated distribution from the summit to 5 km in depth, a seismicity gap at 2-3 km deep and aseismic zone below 5 km. These suggest the vertical magma conduit of 5 km long from magma reservoirs to the summit and a magma pocket around 2-3 km deep at the both volcanoes.

1. はじめに

インドネシアは日本と同様に安山岩質の活火山が多く、火山噴火による災害を繰り返して経験してきた。インドネシア火山調査所は、火山活動の監視、火山地質図・災害予測図の作成、避難勧告を含む火山活動情報の発令および火山災害についての住民への啓蒙活動を総括的に行っている同国の唯一の機関である。これまでに、1982年のガルングン (Galunggung)、1983年のコロ (Colo)、1984年のメラピ (Merapi)、1987年のキーベシ (Kie Besi) 及び1990年のケルト (Kelut) の噴火などを予測・事前に避難勧告を出し、被害を最小限にとどめた実績がある¹⁾。同調査所は、火山の噴火機構研究にも力を注ぎ、メラピ火山を中心にアメリカ、フランス等との共同研究をととして観測研究体制の充実を行ってきた。

防災研究所は、北海道大学、東京大学および東京工業大学の火山研究者の協力を得て、インドネシア火山調査所との間で、メラピ火山等ジャワ島の火山の噴火機構に関する共同研究に着手した。ジャワ島の活火山には、わが国の活火山に類似した噴火様式を示す安山岩質火山が多い。桜島と同様に長期間にわたり爆発的

噴火を繰り返しているスメル (Semeru) 火山, 草津白根山と同様に火口湖や地熱地帯で水蒸気爆発を生じるディエン (Dieng) 火山, そして雲仙普賢岳と同様に山頂に溶岩ドームを生成し, ドーム崩落による火砕流を発生するメラピ火山などである。両国の火山について噴火の前駆現象や噴火に伴伴する現象の比較研究により, 噴火機構および火山噴火予知の研究が進展すると期待される。

共同研究の対象火山のひとつとして, ジャワ島中部のメラピ火山を選んだ。同火山から 20km 南には古都ジョクジャカルタ, 南西山麓にはボロブドール遺跡が位置する。同火山は, 歴史時代において噴火, 火砕流, 泥流等による火山災害をしばしば惹起してきた。そのため, 火山の観測研究の歴史も古く, 火山観測所はオランダ統治時代の 1920 年代に設置され, 1930 年にはウィーヘルト地震計による観測が開始された。1968 年の下鶴等の調査²⁾を契機に高倍率地震観測も始まり, 1982 年には米国地質調査所の援助により, 山頂を取り囲む 6 点からジョクジャカルタ市内のメラピ火山観測所へ地震波形をテレメータするシステムが完成した。地震観測点の位置と光波測距儀による山体変形測定のための測線を Fig. 1 に示した。メラピ山頂の北西約 7 km にあるジャラカ観測室 (Fig. 1 中の JRA) ではコスベックによる二酸化硫黄の放出量の遠隔測定がなされている。その他, 地磁気の連続観測, 山頂部での傾斜観測や火山ガスの採取分析等地球化学的調査も実施されている。観測研究に従事しているスタッフの数は, 山麓に配置された 5 観測室の観測員と併せて, 約 40 名である。同火山には, 共同研究の一貫として, 空振計および傾斜計を設置した。

本稿では, インドネシア火山調査所のメラピ火山に関する地球物理学的観測資料と研究成果をもとにその噴火活動及び前駆現象などについて概説し, 桜島及び雲仙岳との対照をととして, その特徴を考察した。

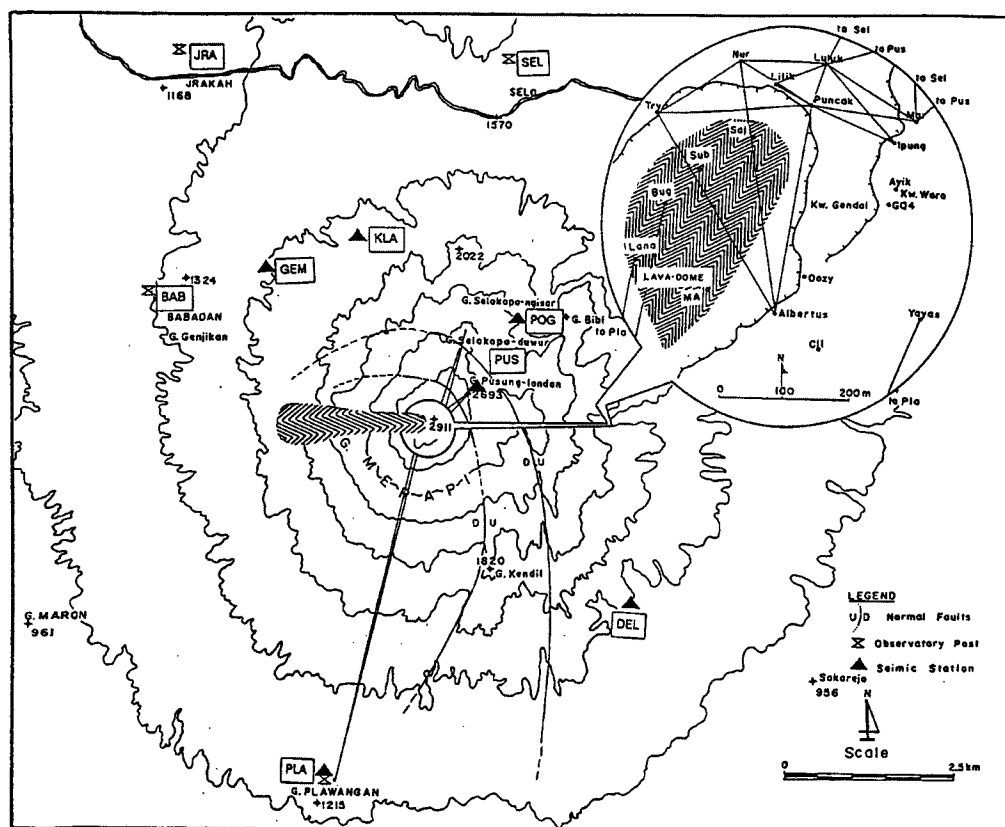


Fig. 1 Locations of observation posts, seismic stations and EDM network at Merapi Volcano operated by Volcanological Survey of Indonesia.

2. メラピ火山の噴火様式の特徴

メラピ火山は海拔2900m余の成層火山である。山頂部は歴史時代の玄武岩質安山岩～安山岩 (SiO_2 : 52～59%) の溶岩ドームや溶岩流で覆われている (Fig. 2)。活動期のために溶岩流やドームの出現により山頂の地形が変化して、Fig. 3 に示すように、火砕流の流下方向も変化してきた³⁾。

有史時代最古の噴火は1006年の噴火であり、その際、山頂部の北東側から南西方向へ、Fig. 1 に図示したような馬蹄形の山体崩壊が生じたと考えられている^{4), 5)}。その後、16世紀までの約500年間の噴火記録は無い。インドネシア火山調査所の資料⁶⁾を元に、16世紀以降の活動をFig. 4 にまとめた。19世紀以降は、数ヶ月～12年の休止期間を挟んで、数年間にわたる活動を間欠的に繰り返してきた。活動初期に爆発により既存の溶岩ドームを破壊し、その後の活発な溶岩流出あるいは溶岩ドームの成長期にその崩落により火砕流を繰り返し発生する (いわゆるメラピ型火砕流) 活動例が多い⁴⁾。このような活動を1年未満の短い活動低下期をはさみ繰り返す1967年から1969年にかけての活動³⁾のような例もある。小爆発なしに、既存の溶岩ドームの崩落による火砕流で始まり、その後に新たな溶岩ドームが出現し活動が終わる1986年のような場合もある。同年10月に1984年の溶岩ドーム崩落による火砕流が発生した後、翌年1月にかけて $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の溶岩が新たに噴出し、活動が休止した。

最近の活動調査資料によると、1回の活動による噴出溶岩の総量は約 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ である。1968-1969年及び1984年の推定値は、それぞれ、約 $10.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 及び $16.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ である^{3), 7)}。1992-1993年の活動期の溶岩噴出率は、 $17,000 \sim 29,000 \text{ m}^3/\text{日}$ ($50 \sim 80 \text{ 万 m}^3/\text{月}$)⁵⁾であり、噴出総量は約 $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ と概算される。

1991年からの雲仙普賢岳の活動と比較すると次のようなことが指摘できる。雲仙普賢岳の1991年5月以降の活動では、デイサイト溶岩 (SiO_2 : 64～65%) を噴出し、ドームの成長と崩落及びドームの崩落による火砕流発生を繰り返してきた^{8), 9)}。その間に既存のドームの脇から、あるいはその頂部から新たなドームの成長が始まり、1992年末までに9個を数えた。山頂部の地形は、メラピのそれに類似してきた。1992年の末までの総噴出量は約 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ と推定される。1回のドーム形成毎に平均 $1.4 \times 10^7 \text{ m}^3$ のマグマが噴出したことになる。メラピ火山の1サイクルの活動とほぼ同じである。雲仙普賢岳は、単純な比較で言えば、

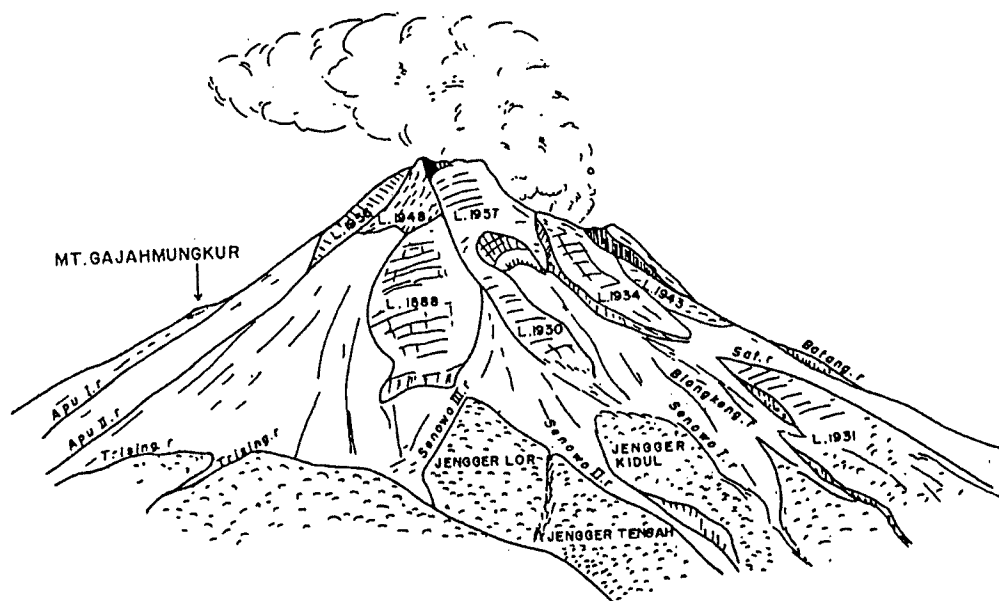


Fig. 2 Merapi Volcano sketched from Babadan post (BAB), northwest of the summit, on April 10, 1967 by Suryo.

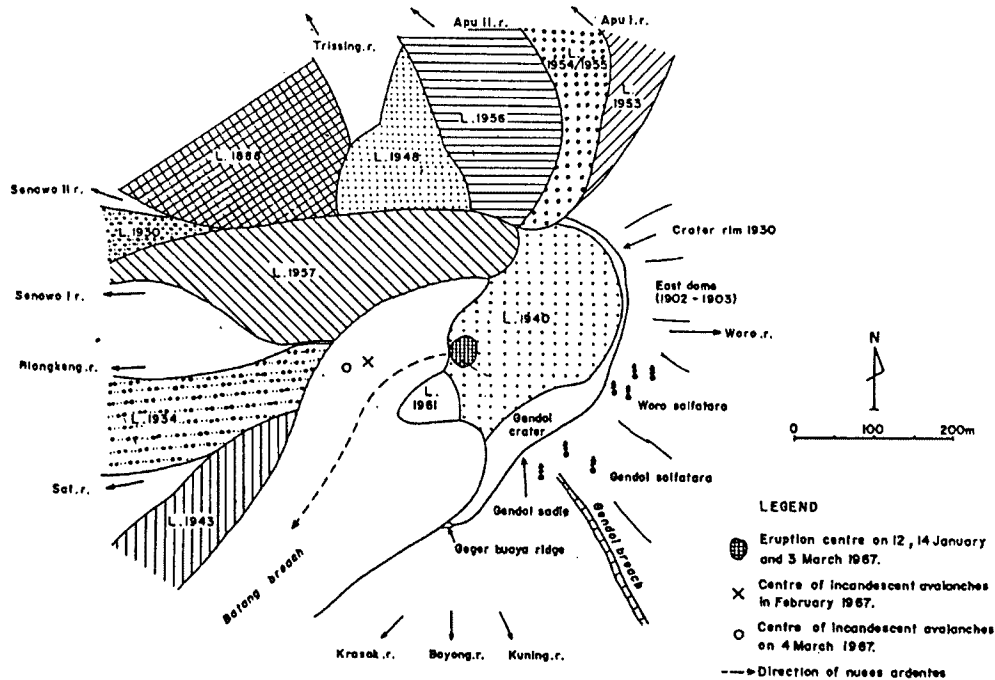


Fig. 3 A sketchmap of the summit of Merapi by Suryo on April 9, 1967. The areas of historic lava flows and domes are illustrated with other information.

メラピ火山の10数サイクルの活動を、約1年半で行ったことになる。なお、雲仙普賢岳では、活動当初の1991年6月8日と11日に爆発的噴火が発生した。メラピ火山でも、前述のように、同様のことが一般的傾向として認められる。

雲仙普賢岳の1991年以降の活動とメラピ火山の活動の顕著な相違点は、マグマの性質と活動期の溶岩の噴出率である。前者の溶岩はデイサイト質であり、後者は安山岩質である。雲仙普賢岳の活動当初の15ヶ月間の平均的な噴出率は約800万 m^3 /月と見積もられ⁸⁾、メラピ火山の活動期の噴出率より約1桁大きい。

3. 活動の前駆現象

メラピ火山の各種の観測資料はSuharno, Subandriyo等によって、データベースが作成され、各種の図表が作成されている^{10), 11)}。それらの図と研究報告を参照しながら、地震活動、地盤変動等と噴火活動の関係を概観する。

1983～1992年の地震活動と噴火活動の関係をFig. 5に示す。この図には、各月の溶岩ドームの崩落による振動(avalanche: rockfall)、溶岩噴出にともなって発生すると考えられる地震¹²⁾(multiphase)及び火山性地震(volcanic)の発生回数が示してある。この内、avalancheとmultiphaseの発生頻度の増減は顕著であるため、対数スケールでその回数が示してある。「volcanic」は、桜島等でA型地震と分類している高周波の火山性地震(卓越周波数4-7Hz)を示しており、低周波地震(卓越周波数約1.5Hz)及び火山性微動の回数は含まれていない。multiphase地震(以下ではMPと略す)は卓越周波数3-4Hzで振動継続時間が長い(数10秒)地震であり、Shimozuru et.al.²⁾によりType 4(many phases)と分類された地震である。メラピ火山の火山性地震・微動の分類は、Ratdomopurboによる詳細な報告¹³⁾がある。

この図で示してある「Eruption」は爆発的噴火の発生に限定しており、この期間では、1984年6月13日と15日及び1992年2月2日に発生していて、いずれも顕著な火砕流をともなった。Fig. 5では火砕流発

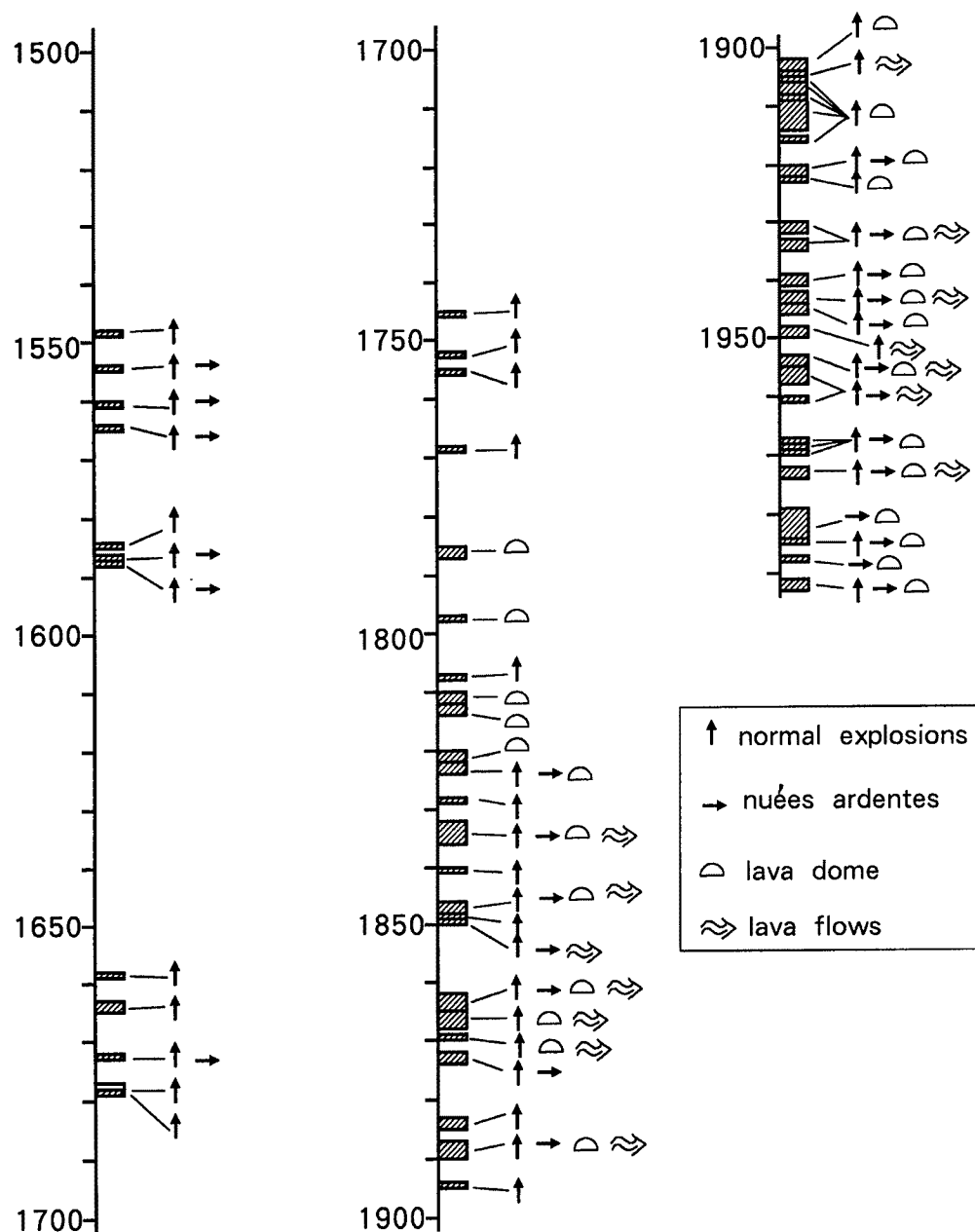


Fig. 4 Chronology of eruptive activity at Merapi Volcano.

生を示していないが, avalanche が5,000～10,000回/月を越えるような3つの期間, 1984年6月～9月¹⁴⁾, 1986年10月¹⁵⁾及び1992年1月末～4月に発生した。この図から, これら3つの活動期に先行あるいは同期して, avalanche, volcanic 及びMPの発生回数が増加傾向を示していることが分かる。なお, この3つの活動期を除く期間も溶岩ドームの緩やかな成長と崩落が観察されている。

1984年の活動では¹⁴⁾, 同年6月13日の噴火へ向けて5月はじめから avalanche の発生頻度が数10回/日から数100回/日へと増加した。Volcanic (A型地震)の発生はこの噴火の約1週間前から増加(10～30回/日)した。MPの発生頻度は噴火後から次第に高まり, その発生頻度がピークに達した8月～9月にかけて顕著な火砕流が発生した。1984年末の山頂火口内の溶岩ドームの体積は $2.85 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定された。

MERAPI EARTHQUAKES 1983-1992

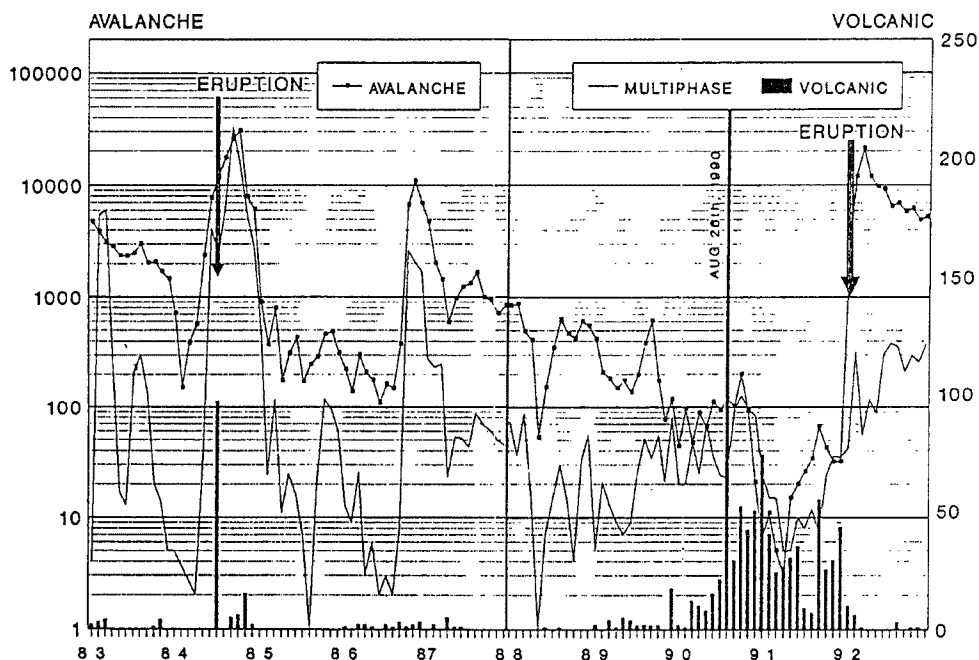


Fig. 5 Monthly frequency of volcanic earthquakes, multiphase events and avalanches (rockfalls) at Merapi (Subandriyo, 1992). Those of multiphase events and avalanches are indicated by a logarithmic scale.

1986年の活動では¹⁵⁾, 9月第2週から avalanche の発生頻度が増加し, 10月上旬に1984年溶岩ドームの崩落による火砕流発生を契機に顕著なMPの増加と火砕流の発生が認められた。火口内の溶岩ドームの体積は10月からの5ヶ月間に $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 増加し, 約 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ となった。その後も溶岩ドームはゆるやかな成長を続け, 1992年の活動直前には, 約 $6.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ になった。

1992年の活動については, Tjetjep et.al.⁵⁾が総合的な報告をしている。地震活動から見た顕著な前駆現象は, 噴火発生の約3年前からの高周波火山性地震 (Volcanic) の多発である。火山調査所では, 高周波火山性地震を震源が2kmより浅いHFB型とそれより深いHFA型に区分しているが, その両方の発生頻度が1989年からはじめから1990年末にかけて漸増した。他方, avalanche の発生頻度は1986年の活動以降, 漸次減少している。1990年8月26日にはHFB型地震が群発したが, 噴火に至らず, 山頂火口から高さ約1,000mの白煙 (水蒸気) の放出でおさまった。Tjetjep et.al. は, この時点では1984年溶岩ドームを破壊するだけのエネルギーが蓄積されていなかったと解釈している。1991年以降も高周波地震の発生頻度は高いレベルを保ち, avalanche 及びMPの発生頻度も同年3~4月に極小を示した後, 増加傾向に転じた。また, 1991年からはじめから低周波地震 (LF) と火山性微動の発生頻度が増加し, 12月から翌1992年1月上旬まで数回/日のレベルを保った。avalanche の発生頻度は, 同年1月上旬まで平均約1回/日であったが, それ以降, 漸次増加して下旬には100~200回/日になった。

1992年1月20日に山腹の2カ所の観測室で赤熱溶岩の崩落が確認され, 火山調査所は1月24日に第1段階の警告 (Waspada: Attention level) を出した。1992年の溶岩は, 1984年の溶岩ドームを破壊することなく, その北東の付け根から噴出を開始した。火山調査所の警告の発令経過を Table 1⁵⁾に示す。1月31日に約300万 m^3 の新たな溶岩の噴出と, 最初の火砕流 (約800m流下) が発生が確認され, 2月1日に第2段階の警告 (Siaga: Standby level) が発令された。翌2日12時31分から火砕流が継続し, その到達距

Table 1. Alert level during Merapi 1992 Eruption issued by the Volcanological Survey of Indonesia

Alert level	Date of announcement	Criteria	Interpretation
Waspada (1st level)	Jan. 24, 1992	Glowing avalanche of 1992 lava domes. Seismic swarms in 1991.	Start of eruption cycle. Lava avalanche would increase.
Siaga (2nd level)	Feb. 1, 1992	First pyroclastic flow. Time interval of lava decreased. SO ₂ increased.	Pyroclastic flow would be frequently repeated. Activity increased.
Siap (3rd level)	Feb. 2, 1992	Time interval of avalanche continuously decreased Pyroclastic flow frequently occurred	Eruption occur Flow distance increase
Siaga (2nd level)	Feb. 12, 1992	SO ₂ decreased. Doming earthquakes increased	Low gas-pressure dome formation
Waspada (1st level)	Mar. 9, 1992	Seismic energy decreased. Avalanche increased.	Eruption is less possible. Gravitational factor.
Normal-Active	Jul. 16, 1993	Activity stabilize	Start of calming period

after Tjetjep et. al. (1993).

離が2.5kmに達し、14時20分に第3段階の警告（Siap: Ready to evacuation）を発令した。最初の爆発は16時05分に発生して、噴煙柱が約2.6kmに達し、火砕流は4.5km流下した。その後も22時30分まで小爆発と火砕流の発生が断続的に続いた。MPの発生頻度はこの噴火の後に増加して、4月まで火砕流が間欠的に発生した。

以上の3つの活動期において、地震活動と噴火活動の関係についての共通点は次のようにまとめられる。

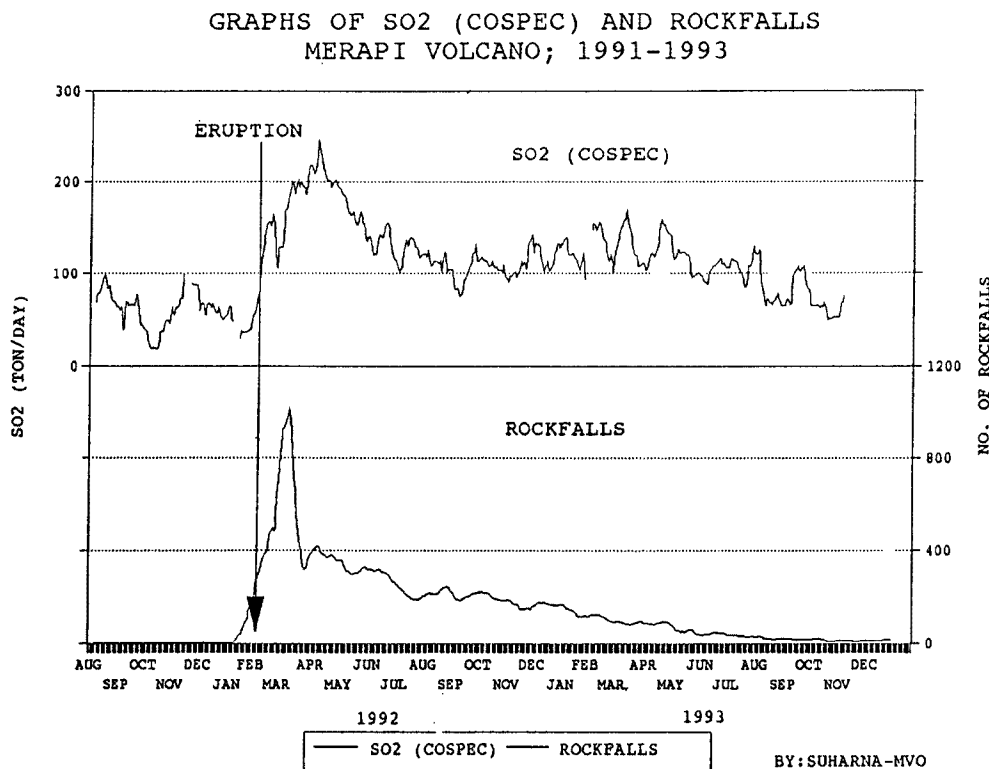
(1) 主活動の半月～1ヶ月前には、溶岩ドームの小規模な崩落（Avalanche）の発生頻度が増加した。
 (2) 主活動の前には高周波火山性地震（HFA及びHFB）の発生頻度が増加する。発生期間は、約1週間～約3年と大きな巾がある。ただし、この種の地震の発生頻度の高まりは、直ちに噴火には結びつかない。avalancheあるいは低周波地震（LF）や火山性微動の発生を伴うことが必要条件のようである。メラピ火山に類似した安山岩質火山の桜島、浅間山、十勝岳の山頂爆発活動の前にも、高周波地震（A型あるいはHF）の発生の後に、低周波地震（B型あるいはLF）の発生頻度が増加している^{16), 17)}。雲仙普賢岳でも、1991年5月20日の最初の溶岩ドーム出現前の5月12日から、火口直下の浅部での微小地震とともに火山性微動が激増したことが報告されている¹⁸⁾。

(3) MPの発生は、爆発的噴火あるいは顕著な火砕流発生により火道上部の溶岩ドームが破壊された後に溶岩が噴出する過程で急増する傾向がある。ただし、1969年1月7日および8日の噴火の場合には、約20日前からMPの発生頻度が増加（500～1,500回/日）したという報告¹²⁾がある。

地震活動からみたメラピ火山の活動の最も顕著な前駆現象は、溶岩ドームの成長率と相関関係の強いavalancheの発生頻度の増加である。高周波地震（HFAおよびHFB）の多発、低周波地震（LF）、微動も前駆現象ではあるが、その発生頻度や発生期間は、上昇噴出しようとするマグマの粘性、火道の状態などにより活動期毎に変化すると考えられる⁵⁾。

1992年の活動では、前駆現象としてのSO₂の放出量の増加と山頂付近の地盤の伸長（膨張）も観測された。

1991年8月からのSO₂の1日あたり放出量の変化を、Rockfall（avalanche）の発生回数の変化と併せて、Fig. 6¹⁰⁾に示した。本稿冒頭で述べたように、メラピ火山の北東に位置するジャラカ観測室において、COSPECによる測定が毎日実施されている。1992年1月末までは100ton/日未満、噴火が発生した1992年



2月から翌年7月頃までが100ton/日以上、そしてそれ以後が、100ton/日以下という経過を辿り、全体としてRockfall (avalanche) の発生頻度と似た傾向を示している。しかし、SO₂の放出率の増加が噴火の前兆と認識されたのは、**Table 1**に示したように、噴火の前日である。1月末までは、マグマ本体の深度が大きい、あるいは浅くても粘性の高い溶岩に火山ガスの放出がさえぎられたため、SO₂の放出率が低かったと考えられる⁵⁾。雲仙普賢岳の活動においても、明確なSO₂の放出が確認されたのは、1991年6月8日と11日の爆発的噴火が発生した後である¹⁹⁾。SO₂の放出率は火山の活動度の指標とはいえる²⁰⁾が、噴火活動の前に急増するとは限らないようである。

メラピ火山観測所の Subandriyo¹¹⁾ は、1988 年から米国 Pennsylvania 州立大学の Barry Voight 教授らと共同して山頂部において辺長測量を実施してきた（測線の配置：**Fig. 1**）。山頂の南約 5 km にあるプラワンガン観測室（PLW）から山頂に固定した反射鏡の間の光波測定により、山頂部の地盤が伸長したことを示唆する辺長の短縮が測定された（**Fig. 7**）。実際に、火口を横断する長さ約 350m の測線では 1991 年までの 3 年間に約 1 m の伸長が、1991 年 2 月に始まった火口縁での Radial Crack の幅の測定でも 5 cm/年の開口幅の拡大が測定され、山頂火口を中心とした地盤の膨張が確認された。

雲仙普賢岳でも、斎藤らの光波測量によって、1991年5月20日の溶岩ドーム出現に先立ち、5月10日頃から山頂部地盤が伸長したことを示唆する顕著な辺長変化が測定された²¹⁾。

1991 年の雲仙普賢岳と 1992 年のメラピ火山の溶岩ドーム噴出活動の前駆現象をまとめた (Table 2)。前駆現象の発現期間には、約 10 日間と約 3 年という大きな差があるが、類似した現象が観測されたことがわかる。

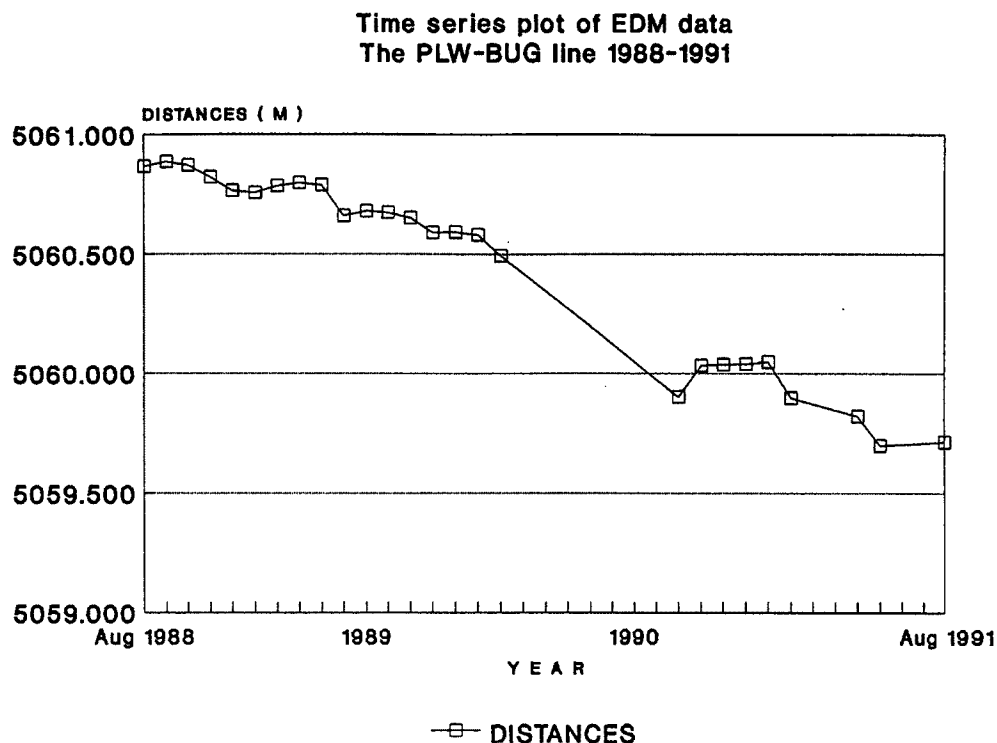


Fig. 7 Distance change between the south foot of Merapi (PLW) and the summit (BUG) after Subandriyo (1992).

Table 2. Precursory phenomena of doming activity at Merapi Volcano in 1992 and Mt. Unzen in 1991

Items of Activity	1992 Merapi Activity	1991 Unzen Activity
Onset of HF seismic activity at summits	1989 (3 years before)	May 12, 1991 (1 week before)
Start of LF events or volcanic tremors	April, 1990 (2 years before)	May 12, 1991 (1 week before)
Onset of ground deformation at summit area	around summer of 1988 (3.5 years before)	around May 10, 1991 (10 days before)
Appearance of new lava or domes	around Jan. 20, 1992	May 20, 1991
First pyroclastic flows	Jan. 31, 1992	May 24, 1991
Increase in emission rate of SO ₂	a few days before the eruption on Feb. 2	after the explosive eruptions on Jun. 11
Explosive eruptions	Feb. 2, 1992	Jun. 8 and 11, 1991

after Tjetjep et. al. (1993), Subandriyo (1992), Matsuo et. al. (1993), Saito et. al. (1991) and Geochemical Party, Joint University Research Group (1992).

4. メラピ火山のマグマ供給システム

メラピ火山観測所には、1991年にフランスから地震波形をパソコンへ集録し、解析するシステムが導入され、震源決定精度が向上した。1991年から1993年までのメラピ火山の高周波火山性地震 HFA および HFB の南北断面に投影した震源分布を Fig.8¹⁰⁾に示した。

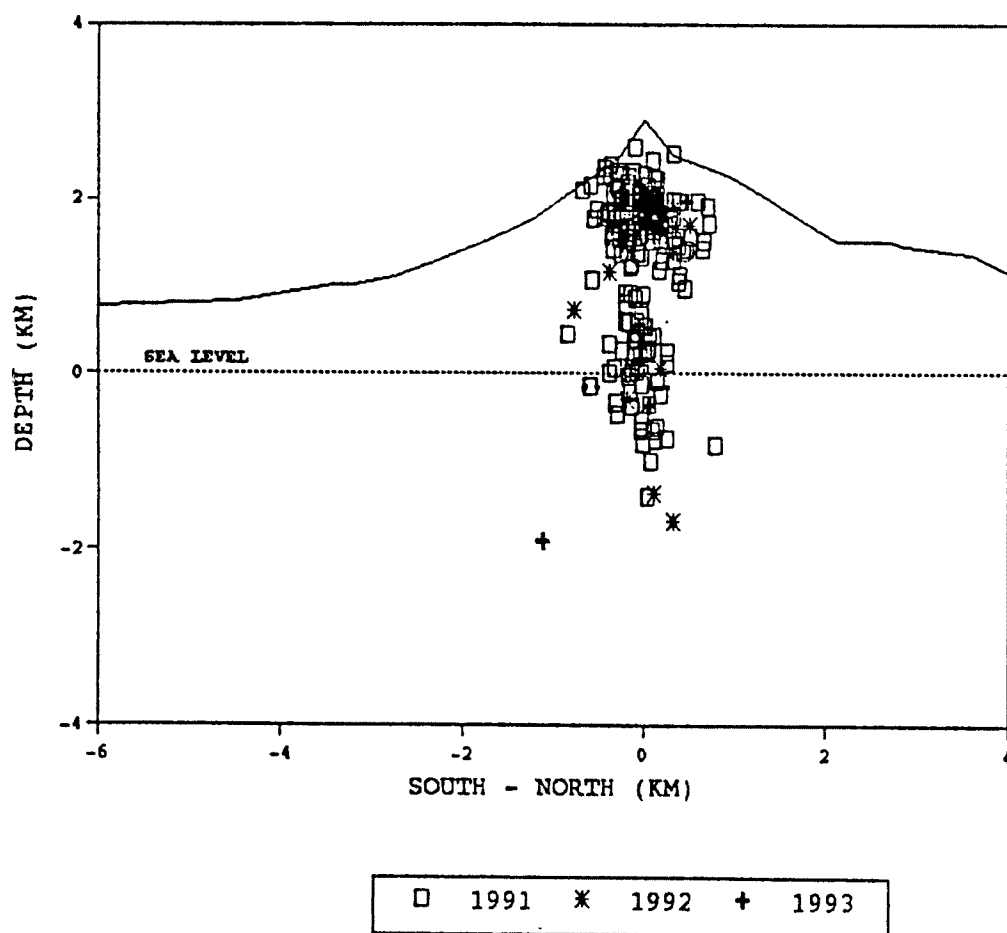


Fig. 8 Hypocentral distribution of volcanic earthquakes projected on a south to north cross-section beneath Merapi (after Suharno, 1994). Note the vertically elongated seismic zone, a seismicity gap 1 km above sea level and aseismic zone deeper portion than 2 km below sea level. Ratdomopurbo (1992) interpreted each correspond to the magma conduit, a magma pocket and the magma reservoir, respectively.

震源は山頂直下からほぼ約 5 km の深さまでほぼ鉛直状に延びている。興味深いのは、火口直下の深さ約 2 km (海拔約 1,000m 付近) に地震の発生しない部分 (seismicity gap) が認められることと、5 km 以深で地震が発生していないことである。

Ratdomopurbo¹³⁾ は、2 km 付近の seismicity gap が火山体の構造を反映した有意なものかどうか確かめるため、1984 年の活動期と 1990 年に発生した地震について、山頂の観測点 PUS と南東斜面の DEL の初動の到達時刻差を読み取り、到達時刻差毎の地震の発生頻度を調べた。その結果、震源の深さ約 2 km に相当する時間差のところで、いずれの活動期においても、発生頻度が極小になっていることを確かめた。彼は、5 km 以深にマグマ溜りがあって、そこから山頂付近へ延びる火道が、この seismicity gap 付近で部分的に拡大していてマグマポケットが形成していると考えた。

同様の震源分布の特徴は、桜島においても確認されている。桜島の A 型地震の震源分布を Fig. 9 に示した。メラピ火山と同様に山頂火口から海面下約 4 km まで鉛直に震源分布が延びている。A 型地震の震源分布は火道の存在を示唆している。地盤変動の力源の位置および地震波の減衰域の検討から、海面下 4 km 以深にマグマ溜りが存在すると考えられている^{22), 23)}。もう一つの注目すべきことは、A 型地震の発生頻度が

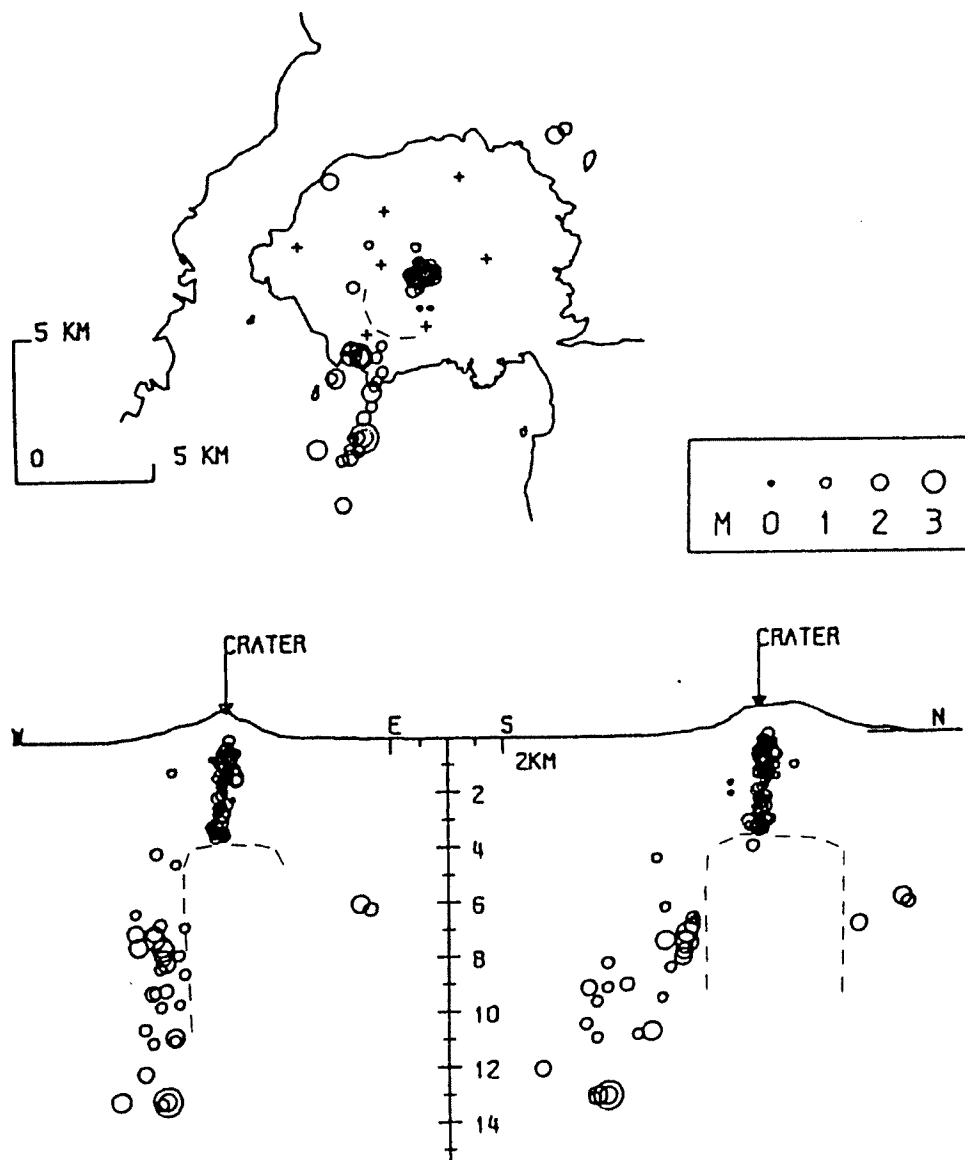


Fig. 9 The hypocenters of A-type earthquakes during 1975-1986, and aseismic zone that infers magma storage outlined by the dashed lines (Ishihara, 1990). Note a slight seismicity gap around 2 km below sea level which may suggest a small magma pocket (Ishihara, 1988).

海面下約 2 km 付近で極小になっていることである。

石原²²⁾は海面下約 2 km 付近で A 型地震の発生頻度が極小になることについて、この深度を境に発震機構に違いがあること、始良カルデラの噴出物と基盤の境界の深度にほぼ相当することから、地質・密度の変化により火道が部分的に拡大している可能性を指摘した。前述のように、メラピ火山は過去の大噴火により山体の崩壊を生じた。桜島と同様の推論をするならば、2 km 付近の seismicity gap は、旧山体とその後の形成した新しい山体の境界といったメラピ火山の山体の地質構造に関連している可能性がある。そこでは、旧山体・新山体の岩石とマグマの密度の関係により上昇してきたマグマが一時停滞し、Ratdomopurbo が推論したようにマグマポケットが形成されているかも知れない。

もし、マグマ溜りやマグマポケットといったマグマの貯溜システムがメラピ火山の浅部に存在するなら

ば、溶岩噴出前にその内部圧が高まり、桜島で観測されたような山頂付近の地盤の上昇と膨張²⁴⁾が生じることが期待される。Subandriyo et. al.²⁵⁾は、メラピ火山の山頂火口の縁に設置した傾斜計によって、1993年2月と4月の顕著な火砕流の発生期に先立ち、それぞれ、約250及び30 μ radianの傾斜変化を捉えた。この観測結果は、山頂火口浅部に何らかの噴出前のマグマの貯溜場所が存在する可能性を示している。今後の研究の進展が期待される。

5. まとめ

京都大学防災研究所とインドネシア火山調査所との間の共同研究の対象火山のひとつであるメラピ火山について、その活動やマグマ供給システムの特徴を火山調査所の研究報告をもとにして分析し、雲仙普賢岳および桜島における研究成果と比較対照した。

(1) メラピ火山は、19世紀以降、数ヶ月～12年の休止期間をはさみ、数年間にわたる活動を現在までに約45回続けてきた。その活動の多くは、初期に爆発的噴火を発生し、以後溶岩ドームの成長と崩落、および火砕流の発生をともなった。噴火活動の経過は、雲仙普賢岳の1991年のそれと類似している。近年の活動についての調査では、1回の活動の溶岩噴出総量は約 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、噴出率は数万 $\text{m}^3/\text{日}$ である。これらの値は、雲仙普賢岳より約1桁小さい。

(2) メラピ火山の近年の3回の活動に共通して認められる前駆現象は、山頂直下での高周波火山性地震の発生と溶岩ドームの小規模な崩落の発生頻度の増加である。但し、火山性地震の前駆期間には、約1週間～約3年と巾がある。主活動開始の最も確かな前兆は、溶岩ドームの成長率を反映した崩落 (avalanche: rockfall) の発生頻度の急増である。

1992年の活動に先だっては、約3年前から、山頂部の地盤の膨張、山頂直下の地震の多発、低周波火山性地震や微動の発生が認められた。1991年の雲仙普賢岳の溶岩ドーム出現に先だっても、発生頻度および前駆期間は異なるが、同様の前駆現象が観測されている。

(3) メラピ火山の火山性地震の震源分布は山頂直下から約5kmの深さまで鉛直に延びる。約2kmの深度付近に seismicity gap がある。5km以深にマグマ溜りが存在し、そこから山頂へ延びる火道が存在し、約2km付近でマグマポケット (火道の部分的拡大) を形成していると考えられる。同様の震源分布の特徴は桜島火山においても認められる。火山性地震の震源分布から類推されるメラピ火山の直下のマグマ供給システムは桜島のそれと類似している。

謝 辞

現地調査にあたって、インドネシア側では、鉱山エネルギー省地質鉱物資源総局長 Adjat Sudradjat 博士、火山調査所火山解析部長 Raden Sukhyar 博士および調査所の多くの職員、日本側では、桜島火山観測所高山鐵朗技官、東京大学地震研究所鍵山恒臣助教授および東京工業大学草津白根火山観測所平林順一助教授にお世話になった。また、米国 Pennsylvania 州立大学 Barry Voight 教授には、傾斜観測について貴重な助言を頂いた。これらの方々に厚く御礼申し上げます。

また、本研究には、科研費・国際学術研究 (代表：村本嘉雄教授、課題番号：04044190 および 05044094)、国際防災共同研究事業費および在外研究員などの経費を用いた。文部省当局および関係の各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Sudradjat, A. : Volcanic Hazard Mitigation, Kumpulan Karya Ilmiah Hasil Penyelidikan Gunung-

- pi Dan Panasbumi, Direktorat Vulkanologi, 1992, pp.1-4.
- 2) Shimozuru, D., T. Miyazaki, N. Gyoda, and J. Matahelumual : Volcanological Survey of Indonesian Volcanoes. Part 2. Seismic Observation at Merapi Volcano, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 47, 1969, pp.969-990.
- 3) Suryo, I. : Report on the Volcanic Activity in Indonesia during the period 1964-1970, Bull. Volcanol. Sur. Indonesia, No.106, 1985, p.150.
- 4) Sudradjat, A. : Merapi Volcano, Direktorat Vulkanologi, 1984, p.19.
- 5) Tjetjep, W.S., A. Ratdomopurbo, Suharno, Supriati, M.Ch., Subandriyo, D.A. and Sri Sumarti : Preliminary account of the 1992 eruption of Merapi, Central Java, Indonesia, Proc. 22nd Ann. Conv. Indonesian Assoc. Geologists, 1993, pp.241-257.
- 6) Volcanological Survey of Indonesia : Gunung Merapi, Bull. Volcanol. Sur. Indonesia (Special edition), No.122, 1990, 24p.
- 7) Sudradjat, A. and Siswawidjono, S. : Merapi Volcano, Bull. Volcanic Eruptions, No.24, 1987, pp.23.
- 8) 中田節也：雲仙普賢岳 1991 ～ 1993 年の噴火における溶岩ドームの成長，火山，第 38 巻，1993，pp.39-43.
- 9) Nakada, S. and Fujii, T. : Preliminary Report on the Activity at Unzen Volcano (Japan), November 1990-November 1991 : Dacite Lava Domes and Pyroclastic Flows, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., Vol. 54, 1993, pp.319-333.
- 10) Suharno : Graphs of Merapi Volcano, Merapi Volc. Obs., 1994, 36p.
- 11) Subandriyo : Geophysical Phenomena of the 1992 Merapi Eruption, Kumpulan Karya Ilmiah Hasil Penyelidikan Gunungapi Dan Panasbumi, Direktorat Vulkanologi, 1992, pp.69-87.
- 12) Siswawidjono, S. and Djumarna, A. : A Review of the Seismic Monitoring Methods Applied to the Indonesian Volcanoes, Proc. Indonesian-French Volcanol. Seminar (eds. Sudradjat, A. and Sabroux, J.C.), 1986, pp.15-54.
- 13) Ratdomopurbo, A. : Seismik Dan Sistem Vulkanis Gunung Merapi, Kumpulan Karya Ilmiah Hasil Penyelidikan Gunungapi Dan Panasbumi, Direktorat Vulkanologi, 1992, pp.159-189.
- 14) Siswawidjono, S., Tulus, A. Djumarna, J. Matahelumual, W.S. Tjetjep, I. Pratomo, and I. Bahar : The Activity of Merapi Volcano, Central Java, in 1984, Proc. 14th Ann. Conv. Indonesian Assoc. Geologists, 1985, pp.181-192 (in Indonesian).
- 15) Ratdomopurbo, A. : Merapi Volcano, Bull. Volcanic Eruptions, No.26, 1989, pp.22.
- 16) 加茂幸介：桜島における噴火の前駆現象と予知，火山，第 23 巻，1978，pp.53-64.
- 17) Okada, H., Y. Nishimura, H. Miyamachi, H. Mori, and K. Ishihara : Geophysical Significance of the 1988-1989 Explosive Eruption of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 35, 1990, pp.175-203.
- 18) 松尾綱道・清水洋・馬越孝道・太田一也：雲仙火山 1990-1992 噴火活動の概要，平成3年度科研費・研究成果報告書「雲仙岳溶岩流出の予知に関する観測研究」，1992，pp.3-11.
- 19) 大学合同観測班地球化学班：雲仙火山の火山活動と地球化学的観測，火山，第 37 巻，1992，pp.103-108.
- 20) Ohta, K., N. Matsuwo, H. Shimizu, R. Fukui, M. Kamada, and T. Kagiya : Emission Rates of Sulfur-dioxide from Some Volcanoes in Japan, Proc. Kagoshima Intern. Conf. Volcanoes, 1989, pp.420-423.
- 21) 斎藤英二・渡辺和明・須藤茂・星住英夫・遠藤秀典：光波測距による普賢岳の山体変動の測定，日本

- リモートセンシング学会誌, 第 11 巻, 第 3 号, 1991, pp.57-60.
- 22) 石原和弘: 地球物理学的観測による桜島火山のマグマ溜りおよび火道の推定, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号 B-1, 1988, pp.59-73.
- 23) Kamo, K. : A Dialogue with Sakurajima Volcano, Proc. Kagoshima Intern. Conf. Volcanoes, 1989, pp.3-13.
- 24) Ishihara, K. : Pressure Sources and Induced Ground Deformation Associated with Explosive Eruptions at an Andesitic Volcano : Sakurajima Volcano, Japan, in 'Magma Transport and Storage' (ed. M. P. Ryan), 1990, pp.335-356.
- 25) Subandriyo, Suharno, Young, K. and Voight, B. : Mechanism of Lava Dome Growth and Pyroclastic Flows of the 1992-1993 Eruption of Merapi Volcano, Proc. 22nd Ann. Conv. Indonesian Assoc. Geologists, 1993, pp.45-50.