

## インドネシア・グントール火山における地震活動

井口正人・石原和弘・高山鐵朗・ゲデ スアンティカ・ウィンピー チェチュエッ  
プ・ラデン スクヒヤール・イガン スタウイジャジャ・オニー スガンダ

### SEISMIC ACTIVITY AT GUNTUR VOLCANO, WEST JAWA, INDONESIA

By Masato IGUCHI, Kazuhiro ISHIIHARA, Tetsuro TAKAYAMA, Gede SUANTIKA, Wimpy S. TJETJEP, Raden  
SUKHYAR, Igan S. SUTAWIDAJA and Ony K. SUGANDA

#### Synopsis

Guntur volcano is an andesitic volcano, located in West Jawa, Indonesia. The last eruption occurred in 1843 and no eruptions have occurred since then, however, seismic activity has been active. A seismic network composed of 4 stations has been operated since October, 1994, in the collaborative study between Sakurajima Volcanological Observatory, DPRI, Kyoto University and Volcanological Survey of Indonesia, DGGM, Indonesia. Seismic signals are transmitted to Guntur Volcano Observatory and recorded in data loggers in which timing system is calibrated by GPS. Locations of hypocenters are calculated assuming a homogeneous half space of  $V_p = 2.76$  km/s determined previously. Hypocenters are distributed at depth of 0 to 4 km beneath sea level around Guntur crater, 0 to 2 km beneath west of Guntur crater and at depth of < 10 km around Kamojang caldera. The hypocentral locations are calibrated by adding 7 stations temporarily during December 1995 to February 1996. The result of calibration shows  $V_p$  value of 2.76 km/s is acceptable as velocity of P-wave in determination of hypocenters by using 4 permanent stations and assuming homogeneous half space. The hypocenters seem to be distributed vertically beneath Guntur crater and aligned along faults near Kamojang caldera. Magnitude of earthquakes in the cylindrical zone, beneath Guntur crater is < 0.7 and that out of the zone is < 3. This suggests the rock beneath the crater was highly fractured by previous eruptions.

#### 1. はじめに

Guntur 火山はインドネシア・ジャワ島西部、バンドン市から南東へ 35 km の距離に位置する安山岩質の成層火山である。Guntur 火山では、19 世紀中頃まで噴火活動がしばしば繰り返され、1840 年の噴火では Guntur 火口から溶岩が流出し、約 3 km 離れた Cipanas まで達した<sup>1)</sup>。最後の噴火は 1843 年であり、以後 150 年間、Guntur 火口に小規模な噴気活動がある以外は、噴火活動は記録されていない。

Guntur 火山においては 1986 年からインドネシア火山調査所が地震観測を継続している。Guntur 火山周辺では、1 ヶ月に平均 20 回の火山性地震が発生するが、しばしば多発することもある。これまで数点の地震観測点を設置して短期間の臨時観測が行われてきたが<sup>2)-4)</sup>、震源位置が決められた地震は数個だけであり、震源分布の特徴を議論するには至っていない。

京都大学防災研究所は、インドネシア火山調査所の所属する鉱山エネルギー省鉱物資源総局と1993年7月に主に、ジャワ島の活火山を対象にして、共同研究の契約を締結した。1994年度からは事業計画に基づく「インドネシアの火山噴火機構とテクトニクスに関する共同研究」が開始された。Guntur火山における火山性地震の震源位置を特定するために、防災研究所附属桜島火山観測所はインドネシア火山調査所と共同して、1994年10月に地震観測網を構築した。1996年3月までの約1年半の間に約300個の火山性地震が記録された。本稿では、Guntur火山における火山性地震の震源分布の特徴について述べ、火口や火山周辺の断層やカルデラなどの地質学的な特徴と関連させて考察する。

## 2. 火山活動の特徴

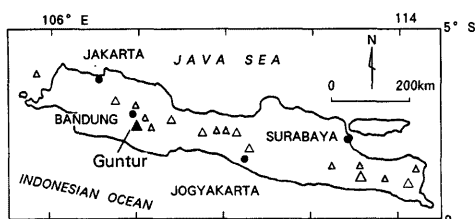


Fig. 1 Location of Guntur volcano. Guntur volcano is located 35 km southeast from Bandung, West Java, Indonesia.

Guntur火山は、インドネシア・ジャワ島西部、バンドン市の南東に位置する（Fig. 1）。付近には、1822年および1982年に大噴火が発生したGalunggung、1772年に山体崩壊を起したPapandayan、Cikuraiなどの活火山が存在する。Guntur火山は、最高峰のGunung Masigit (2249 m)、Gunung Agun、Gunung Guntur、Gunung Picung、Gunung Gadjah、や側火山のGunung Putriなどからなる火山の集合体である。最近の噴火はGuntur火口において発生しているが、北西部にはGandapura、西部にはKamojangカルデラがある。Kamojangカルデラでは地熱活動が活発であり、多数の噴気が存在する。地熱発電のためのプラントが稼働中であり、新たな地熱井の開発も進められている。Kamojangカルデラの南西には、Darajatカルデラに沿う噴気地帯が存在する。また、Guntur火山の南東部のCipanasには温泉が湧出している。Fig. 2に“Data dasar gunungapi Indonesia”<sup>1)</sup>において確実に噴火と記載されているものに基づき、Guntur火山の最近の噴火史を示す。記録されている最も古い噴火は1690年に発生し、以後、19世紀半ばまでしばしば噴火が発生した。その名前がスンダ語で「雷」を意味するように、爆発的な噴火様式で特徴づけられる。1780年および1840年の噴火では溶岩が流出した。1840年の噴火では、Guntur火口から溶岩が流出し、3 km離れたCipanasまで達した。引き続き、1841年と1843年にも規模の大きい噴火が発生した。その後、Guntur火山においては噴火は発生しておらず、現在のGuntur火口は樹木に覆われて

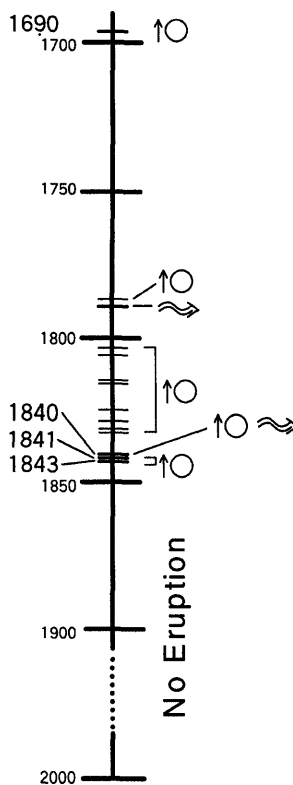


Fig. 2 Chronology of volcanic activity at Guntur Volcano.

おり、火口縁に小規模の噴気がみられるだけである。

インドネシア火山調査所は、1986年から Guntur 火山において地震観測を開始した。1989年6月には、山頂火口から0.8 km 東南東の Citiis に地震計を設置し、Guntur 火山観測所までテレメータしてドラムレコーダに連続観測を行っている。1990年以降の月別地震発生回数を Fig. 3 に示す。1990年～1995年までの月平均地震回数は、21回であるが、1992年5月～7月、1993年5月～8月にみられるように、60～70回に達することもあり、火山性地震の活動度は高いといえる。1993年8月以降は月に10～30回程度の発生回数で推移している。

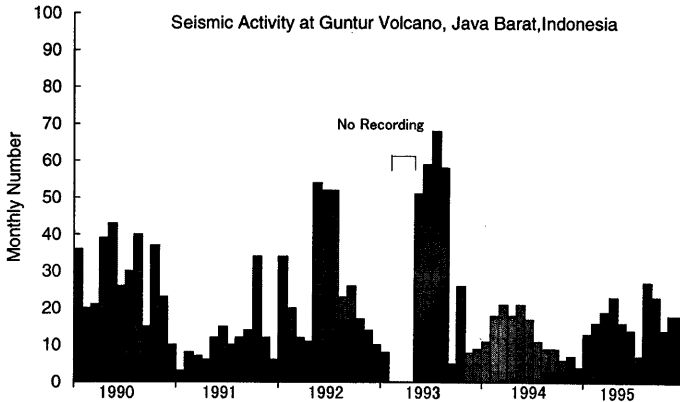


Fig. 3 Monthly number of volcanic earthquakes at Guntur volcano. The numbers are counted, based on seismograms observed at CTS 0.8 km apart from Guntur crater. All the seismic events observed during 1990-1995 are A-type earthquakes.

### 3. 観 測

既設の観測点 Citiis (CTS) に加え、1994年10月に、Guntur 火山群東部の Pasir Cileungsi (PSC)、南部の Gunung Putri (PTR)、西部の Legok Pulus (LGP) の3観測点を新たに設置した (Fig. 4)。Fig. 5 に観測システムの系統図を示す。PSC、PTR および LGP では3成分一体型 (固有周期1秒、減衰定数0.7) の Markproduct L4-C-3D 速度型地震計を使用した。CTS では上下動のみである。地震計からの出力信号は無線テレメータ装置によって Guntur 火山観測所へ伝送される。テレメータ装置の電力は太陽電池により供給される。Guntur 火山観測所では、無線テレメータ装置の受信機からの信号がトリガー方式により3台のデータロガー (LS-8000VF: 内部メモリ 20 Mbyte, 1995年10月以降は LS-8000SH) に0.01秒のサンプリング間隔でデジタル収録される。3台のデータロガーの収録は、データロガーのトリガー信号出力機能と外部トリガー入力機能により同期して行われる。また、GPSによりデータロガーの内部時計は3時間毎に較正され、サンプリング間隔である0.01秒の時刻精度は維持される。データロガーの内部メモリに記録された地震波形データは PCMCIA カードのインターフェースを経由してパソコンに転送された後、光磁気ディスクに記録される。地震波形が記録された光磁気ディスクをバンドンのインドネシア火山調査所、または日本に持ち帰ることにより解析を行う。観測された全成分の波形の例を Fig. 6 に示す。

*Seismic Network at Guntur, West Jawa, Indonesia*

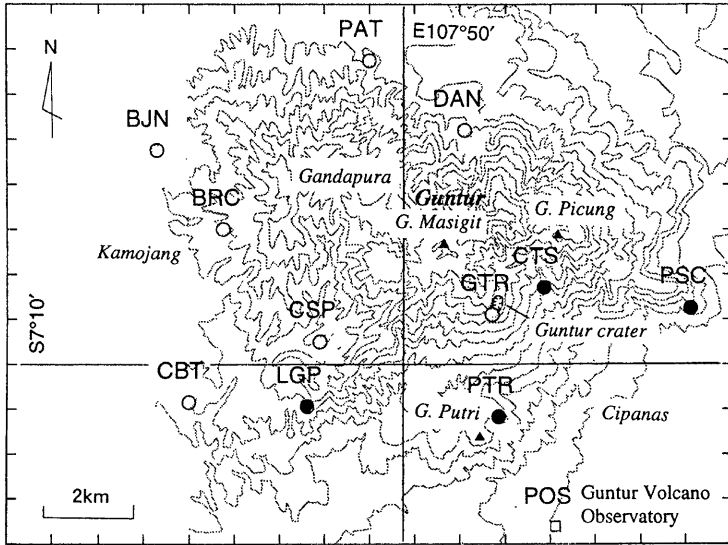


Fig. 4 Location of seismic stations. Permanent stations CTS, PSC, PTR and LGP are represented by solid circles. Hatched circles denote temporary seismic stations installed during December 18, 1995 to February 5, 1996. "POS" is Guntur Volcano Observatory.

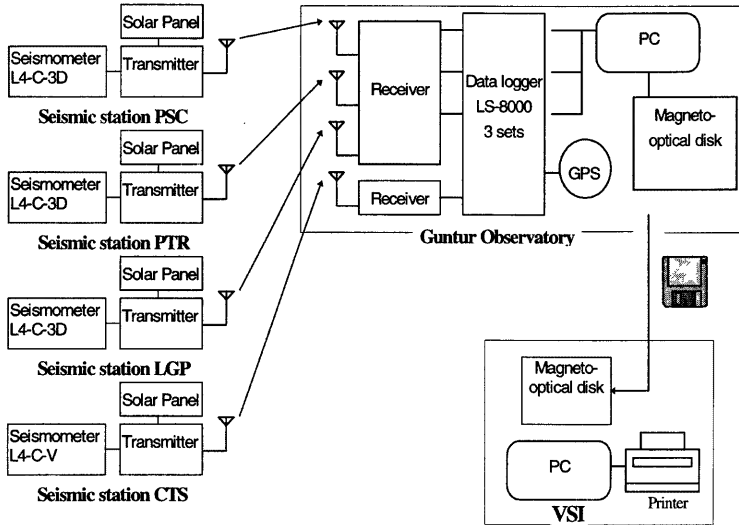


Fig. 5 Block diagram of observation system at Guntur volcano.

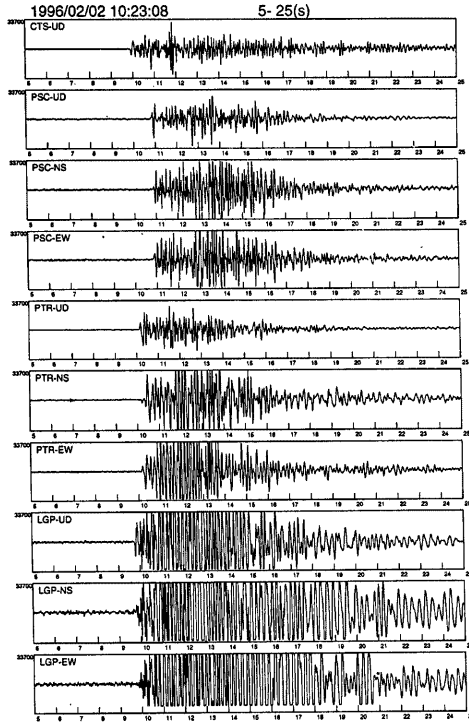


Fig. 6 Typical seismograms at Guntur volcano. The seismograms were observed at permanent stations CTS, PSC, PTR and LGP. UD, NS and EW denote vertical, north-south and east-west components, respectively.

#### 4. 震源分布

インドネシア火山観測所の臨時観測では、P波速度として、 $2.76 \text{ km/s}$ の均質構造が使われているので<sup>2)</sup>、本研究においてもこの値を採用して震源決定を試みた。1994年11月から1996年3月までの震源の位置をFig. 7に示す。震央はGuntur火口周辺とGandapuraカルデラ周辺、およびKamojangカルデラの北東部、東部に分布している。希ではあるが、南部のGunung Putri、東のGunung Picung周辺においても発生している。東西断面についてみると、Guntur火口周辺では、海面下深さ3~4 km付近まで分布している。また、Guntur火口周辺では、震源が円筒状に集中している。Gandapuraカルデラの下では、海面下2~3 km付近に分布する。一方、Kamojangカルデラの周辺では地震が海面下4~9 kmに分布し、Guntur火口周辺よりも相対的に深い場所において発生している。

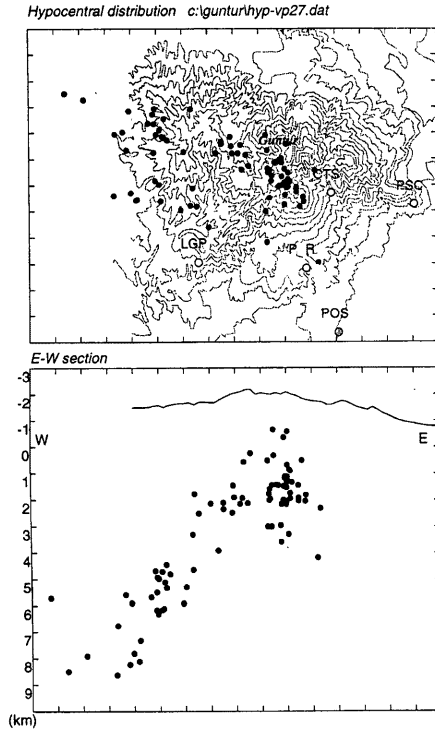


Fig. 7 Hypocentral distribution during November 1994 to March 1996. Hypocenters were determined by using 4 permanent stations, assuming homogeneous half space of  $V_p = 2.76$  km/s. Upper and lower figures are epicenter distribution and projection on vertical cross-section of east-west, respectively.

## 5. 震源位置の検討

1994年以前に行われた短期間の臨時地震観測の結果<sup>2)-4)</sup>からはGuntur火山における震源分布の傾向が明らかではなかったため、1994年10月の観測点設置時には、Guntur火山観測所にテレメータすることが可能なことを条件に観測点の位置を選定した。しかし、これまでの観測から明らかになった震源分布からみると、観測点は東および南に偏っており、震源の位置は観測点の配置の偏りの影響を受けている可能性が高い。そこで、震源位置を取り囲むように、観測点を増設した臨時観測を1995年12月18日から1996年2月5日まで行った。7点の臨時観測点の位置をFig. 4に示した。無線テレメータ観測点と併せて震源域を取り囲むように、Guntur火山群の北部および西部、更にGuntur火口縁に設置した。これらの臨時観測点における地震計(Markproduct L-22D:上下動, 固有周波数2 Hz, ダンピング定数:0.7)の出力信号はデータロ

ガー (LS-8000SH：内部メモリ 4 Mbyte) にトリガー方式により収録された。データロガーの内部時計は GPS により校正される。GPS 受信機の位置情報設定の不具合のために 1996 年 1 月 10 日以前のデータは、0.02 から 0.03 s の精度でしか時刻校正されていない。それ以降のデータについては、各観測点の間の時刻精度はサンプリング間隔 (0.01 s) 以下に保たれた。Fig. 8 に 11 個の観測点すべてにおいて記録された地震の例を示す。

まず、震源決定の際に、2～5 km/s の範囲で P 波速度を変えて着震時と理論走時の最小二乗誤差を評価することにより、震源決定に最適な均質構造における P 波速度の再検討を行った。観測期間中、7 観測点以上において P 波初動が読み取れた地震 16 個について最小二乗誤差を評価したところ、誤差が最小となるのは地震により異なり、P 波速度を 2.7～4.3 km/s としたときであった。これまでの臨時観測により、火山性地震に対しては  $V_p = 2.76$  km/s で震源決定を行うことがよいこと、遠地地震の P 波初動の見かけ速度は 4.3 km/s であることが知られている<sup>2)</sup>。このことは、Guntur 火山には速度構造として  $V_p = 2.7$  km/s の第 1 層と  $V_p = 4.3$  km/s の第 2 層があり、均質構造を仮定した場合には、震源の深さによって誤差が最小となる P 波速度が見かけ上異なっていることを意味するのかもしれない。しかしながら、第 1 層の厚さを見積もることが困難であるため、ここではその中間の 3.5 km/s を代表的な均質 P 波速度として再計算を行った。Fig. 9 に固定の 4 観測点 (CTS, PSC, PTR, LGP) を使用して再決定された震源位置を示す。3.5 km/s の均質構造を仮定して震源決定を行った場合、Guntur 火口の周辺では地震は海面下 2～3 km 付近まで分布し、下限の深さがやや浅くなる。Gandapura カルデラの下では海面上 1 km に震源が決められた。また、Kamojang カルデラの直下では深さ海面下 4 km 付近まで分布し下限の深さは浅くなるが、Guntur 火口周辺よりも深い場所まで地震が分布する傾向は変わらない。

Fig. 10 に 7 観測点以上において P 波初動が読み取れた地震について、4 観測点の場合と臨時観測点を加えた場合の比較を示す。定常観測網から離れる Kamojang カルデラ周辺の地震は、4 観測点を使って震源決定を行った場合、北東へ 1～6 km 移動し、深さ方向に 1～7 km 程度浅くなる傾向がみられる。特に、観測網から離れるにしたがい、その相違が顕著である。今回の臨時観測期間では、Guntur 火口周辺の地震については比較することができなかったがその相違は小さいと予想される。7 観測点以上を使って決められた震源位置が真の震源位置に近いとすれば、定常観測の 4 点だけを使い、均質構造を仮定して震源決定を行う場合、最初に仮定した  $V_p = 2.76$  km/s の値は概ね妥当といえる。

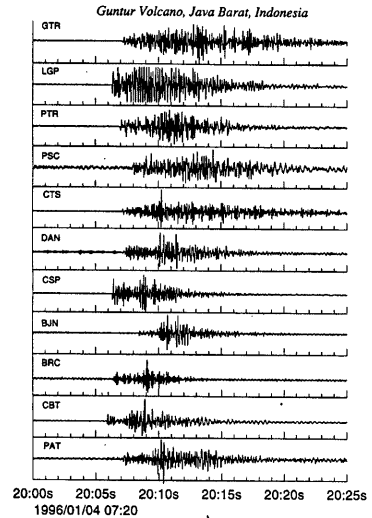


Fig. 8 Examples of earthquakes observed at all the stations. Vertical components are shown.

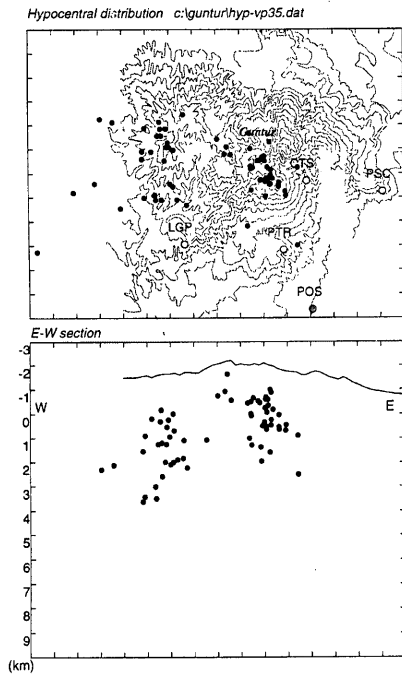


Fig. 9 Hypocenter distribution assuming homogeneous half space of  $V_p = 3.5$  km/s. Upper and lower figures are epicenter distribution and hypocenter distributions projected on vertical cross-section of east-west, respectively.

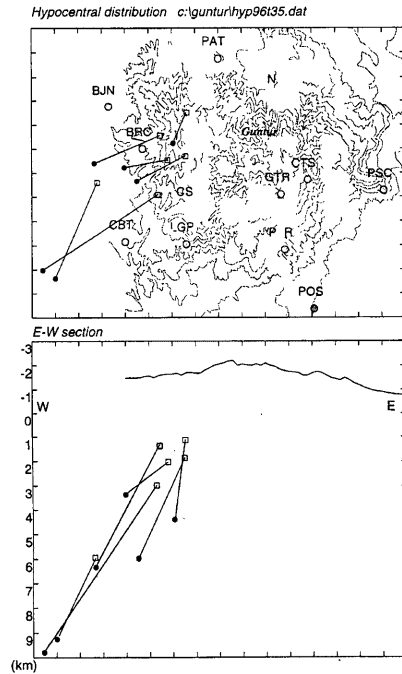


Fig. 10 Difference between locations of hypocenters (represented by square) determined from 4 permanent stations and those (solid circle) done from 11 stations including 7 temporary seismic stations. Homogeneous half space of  $V_p = 3.5$  km/s is assumed.

## 6. 議論とまとめ

1994年10月に4点の定常観測点からなる地震観測網を設置し、Guntur火山の火山性地震の観測を行ってきた。これまでのところ、火山性地震は、(1) Guntur火口周辺の深さ3~4kmまでの円筒状の領域、(2) Guntur火口からGandapuraカルデラにかけての領域、(3) Kamojangカルデラの東部および北東部の深さ海面下10kmまでに発生している。1994年11月から1996年3月までの震央位置を地質図に記載されている火口と断層の位置と比較する。Guntur火山群の火口およびその周辺の断層の位置を震央分布とあわせて示した (Fig. 11)。Guntur火口の西側からは、南西のLGPの方向および北西のGandapuraカルデラの方向に断層が伸びる。また、Kamojangカルデラの東には、カルデラ側が下がりとなる南北方向の断層がある。さらに、同カルデラの北側には走行が北西-南東方向の断層が二本存在する。

Guntur火口周辺の地震はGuntur山頂の火口の直下に円筒状に分布することから、桜島など他の安山岩



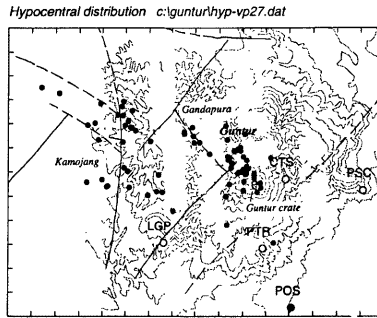


Fig. 11 Distribution of craters and faults around Guntur volcano. Epicenters are plotted on the map.

質の火山において得られている震源分布<sup>5), 6)</sup> から考えて、過去の噴火の際にできた火道の周辺に発生するものかもしれない。Guntur 火口の北西部の地震の分布は、Guntur 火口から Gandapura カルデラの方向に伸びる断層と一致する。Kamojang カルデラ周辺の地震は、観測網から離れるため、その決定精度そのものはよいとは考えられないが、カルデラの東および北に位置する断層とおおよそその位置が一致する。以上のことから、Guntur 火山周辺に発生する地震は、火口や断層といった地表に表れた弱線に沿って発生していると推定される。

Guntur 火山周辺において発生する地震のマグニチュードの空間分布を検討した。Fig. 12 にマグニチュードと Guntur 火口からの距離との関係を東西断面を例に示す。マグニチュードは、Guntur 火山観測所のルーチン観測において F-P 時間から経験的に決められたものである。Guntur 火口からの中心より 1 km 以上西側では、これまでの観測からマグニチュードの上限はおよそ 3 とみなせる。一方、Guntur 火口直下の地震についてみると、地震の発生頻度は高いにもかかわらず、規模の大きい地震は発生しておらず、その上限は 0.7 である。Guntur 火口周辺の地震も Kamojang カルデラ周辺の地震も P 波および S 波が識別できることから、構造的な地震に類似した A 型地震であり、岩石のせん断破壊によって発生すると考えられ

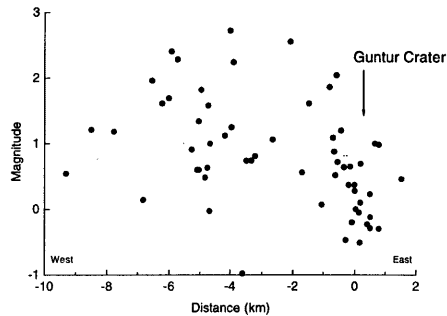


Fig. 12 Spatial distribution of magnitude of earthquakes on east-west direction.

る<sup>5)</sup>。規模の小さい地震のマグニチュードは、断層の長さの3乗の常用対数に比例するとされているので<sup>7)</sup>、Guntur 火口周辺の地震の地震の破壊面積は Kamojang カルデラ周辺の地震に比べて小さいと考えられる。Guntur 火口から離れると Kamojang カルデラ周辺の地震と同等の規模の地震が発生しているので、この地震の規模の相違が、火口周辺の破砕度の相違によるものとすれば、火口周辺の震源分布と波形を詳細に調べることによって、火道の構造を推定することが可能である。

Kamojang カルデラ周辺の地震が地表に表れた断層面に沿って発生しているかどうかについては、同カルデラの西部に観測点を設置して精密な震源分布を得るとともに、発震機構を調べ節面の方向を特定する必要がある。このカルデラ周辺の断層は、南西の Darajat カルデラの方向に伸び、更にその南には Papandayan 火山がある。この地域の火山は、お互いに近接している上に、その間にはカルデラや地熱地帯などの火山起源の地質構造が多数見られる。Guntur 火山の地震活動と火山活動との関係の評価するためには、火口周辺の観測だけでは不十分であり、Galunggung, Papandayan, Cikurai などの火山や周辺のカルデラを含めた広域的な観測を行う必要があろう。

### 謝 辞

本研究は、京都大学防災研究所(所長田中寅夫教授)とインドネシア共和国鉱山エネルギー省鉱物資源総局(総局長 Adjat Sudrajat 博士)との間の共同研究の契約に基づいて行われ、その締結には加茂幸介京都大学名誉教授(現熊本工業大学教授)、西村進京都大学名誉教授、Soebroto Modjo 前インドネシア火山調査所長が尽力された。また、観測器材のインドネシア国内への通関にあたっては UNESCO ジャカルタ事務所の橋爪道郎博士、インドネシア共和国大蔵省、在インドネシア日本大使館西沢二等書記官、インドネシア火山調査所 Endang Saifudin 氏に御助力いただいた。観測計器の日本からの輸送にあたり日本航空運行部の小野寺三朗課長には大変お世話になった。インドネシア火山調査所火山観測部長 Suratman 氏には本システムの設置に関してご理解頂き、観測点の設置および観測システムの維持については Guntur 火山観測所の Mamad Sumarna, Rohana, Ade, の3氏によるところが大きい。データロガーにインストールされる地震判定のソフトウェアは東北大学理学部地震予知・噴火予知センターの森田裕一博士(現東京大学地震研究所)に改良をお願いした。本研究に要した経費は国際共同研究事業費、科学研究費補助金(国際学術研究(共同研究) : 課題番号 06044258 代表者入倉孝次郎)、在外研究員旅費(井口正人)により賄われた。以上、記して御礼申し上げます。

### 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.190-200.
- 2) Rasjid, S. A., Kusma and Samid : Laporan Penyelidikan Kegempaan Komplek Vulkanik G. Guntur-Papandayan, Januari-Maret 1989, Proyek penyelidikan Gunungapi dan panasbumi, Direktorat Vulkanologi, 1989, pp.1-81.
- 3) Team seismik seksi instrumentasi/seismik subdit analisa gunungapi Direktorat Vulkanologi : Laporan penyelidikan seismik G. Guntur, 9 Mei-22 Juni, 1990, Direktorat Vulkanologi, 1990, pp.1-22.
- 4) Kastiman Sitorus : Laporan pengamatan dan penyelidikan seismik G. Guntur, Kabupaten Garut, Jawa Barat, Proyek pengamatan/pengawasan dan pemetaan gunungapi Direktorat Vulkanologi 1990-1991, 1991, pp.1-20.
- 5) 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.

- 6) 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.
- 7) Kanamori, H. and Anderson, D. L. : Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seis. Soc. Am., Vol.65, 1975, pp.1073-1095.