

火山性地震 BL・BH の初動の押し引き分布

井口 正人

DISTRIBUTION OF THE INITIAL MOTIONS OF VOLCANIC MICROEARTHQUAKES (B-TYPE) AT SAKURAJIMA VOLCANO

By Masato IGUCHI

Synopsis

Volcanic microearthquakes called "B-type" are closely related with explosive activity. Previous researchers divided B-type earthquakes into subclasses by the predominant frequency. However, hypocenters and focal mechanism of the individual subclasses in B-type earthquakes have not been determined because of the unclear onsets.

In order to detect the initial motions clearly, seismometers were installed in the boreholes around the active crater of Sakurajima Volcano. In this paper, B-type earthquakes whose dominant frequencies are 1-3 Hz and 5-8 Hz, are named as BL-type and BH-type earthquakes, respectively. The hypocenters and distribution of the initial motions of BL-type and BH-type earthquakes were examined. The results were summarised as follows.

(1) Focal depths of BL-type earthquakes were determined at the depth of less than 2 km below the sea level. BH-type earthquakes had deeper hypocenters than BL-type. The maximum depth of BH-type was 2.5 km.

(2) Most of BL-type earthquakes which occurred isolatedly and BH-type earthquakes had all compressional arrivals. BL-type earthquakes which occurred in swarms had all compressional or all dilatational arrivals, with the ratio of 61% to 35%. The initial motions of the remainders were mixed with compressions and dilatations. The distributions of initial motions did not show that focal mechanisms of BL-type and BH-type earthquakes were quadrant types.

1. はじめに

桜島火山や浅間火山など安山岩質の火山では「B型」¹⁾と呼ばれる火山性微小地震が多数発生する。B型地震は、振幅の減衰の状態から、火口付近の1 km以内の深さにあると推定されてきたが^{1)-4),6)}、多点観測に基づく震源決定により、1 kmよりも深い場所でも発生していることが明らかになってきている^{7),10)}。

爆発的噴火活動の活発化に先行して、B型地震の発生頻度が増加する^{3),4),9)}。吉川・西⁵⁾、鍵山ら¹⁰⁾、Shimozuru and Kagiya¹¹⁾は、卓越周波数からB型地震を分類し、それぞれ、爆発的噴火に至る発生様式が異なって

いることを指摘した。しかし、B型地震は規模が小さく減衰も著しいために初動は不明瞭な場合が多く、分類されたそれぞれのtypeのB型地震の震源分布までは明らかになっていない。また、その発震機構もほとんどわかっていない。

そこで、桜島火山観測所では、B型地震の初動を明瞭に捕捉するために、これまで地上に設置していた地震計を、順次、地中に埋設し、観測を行ってきた。ここでは、卓越周波数からB型地震を、『BL』、『BH』の2種類に分類し、それぞれの震源位置と初動の押し引き分布を調べる。また、BLについては、発生様式の観点からも初動の押し引き分布を検討する。

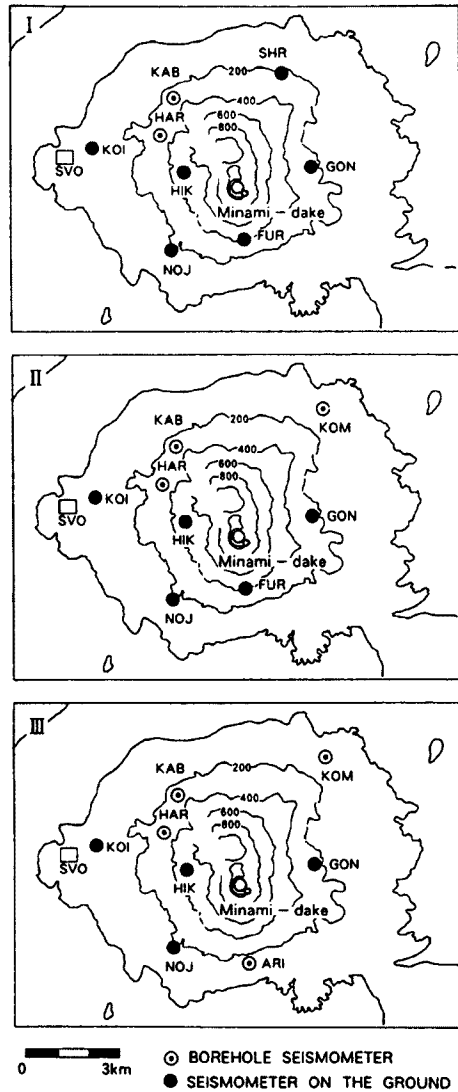


Fig. 1. Transition of the seismic network at Sakurajima Volcano. Period I: June 1, 1986—February 5, 1987, Period II: February 6, 1987—January 21, 1988, Period III: after January 22, 1988.

2. 観測点の配置

1986年の6月から1988年10月までのB型地震を取り扱うが、この期間内では、地震計の地中への埋設に伴い観測点の位置に変更があり、そのため、震源分布に多少の変化がみられる。特に、FURからARIへの移設によって、震源がそれ以前に比べ約0.5 km深く決定されるようになっている。このことについては、附録に詳しく述べる。観測点の配置の変遷をFig. 1にまとめて示す。二重丸は、地中地震計が設置されている観測点である。地中地震計は火山体内部の標高約40 mの同一平面上に位置するように設置され、その深度は、290 m (HAR), 140 m (KAB), 90 m (KOM), 85 m (ARI)である。また、固有周期はいずれも1.0秒である。

3. スペクトルによる分類

桜島火山において発生する典型的なB型地震約60個について、FFTによりスペクトルを調べたところ、1-3 Hzの低周波成分が卓越するものと、5-8 Hzより高周波数成分が卓越するものに大別されることが分かった。ここでは、卓越周波数が、1-3 Hzおよび5-8 Hzの周波数帯域にあるものをそれぞれ、『BL』、『BH』と定義する。

南岳火口から2.8 kmの距離にあるHAR(深度290 m)において記録されたBLおよびBHの波形と図示した区間(10.24秒)のスペクトルの例をFig. 2(a)-(c)に示す。Fig. 2(a)に示すものは、単発的に発生したBLであり、1 Hz前後の低周波成分が卓越する。Fig. 2(b)に示すものは、いわゆる『B型群発地震』に含まれ、1 Hzと3 Hz付近にpeakがある。群発中のBLの方が、単発的に発生するBLに比べ、卓越周波数が高い傾向がみられる。

Fig. 2(c)に示すものは、BHであり、6-7 Hz付近の周波数成分が卓越している。今回取り扱ったBHのほとんどは、1987年9月3, 4日および10月16, 17日に群

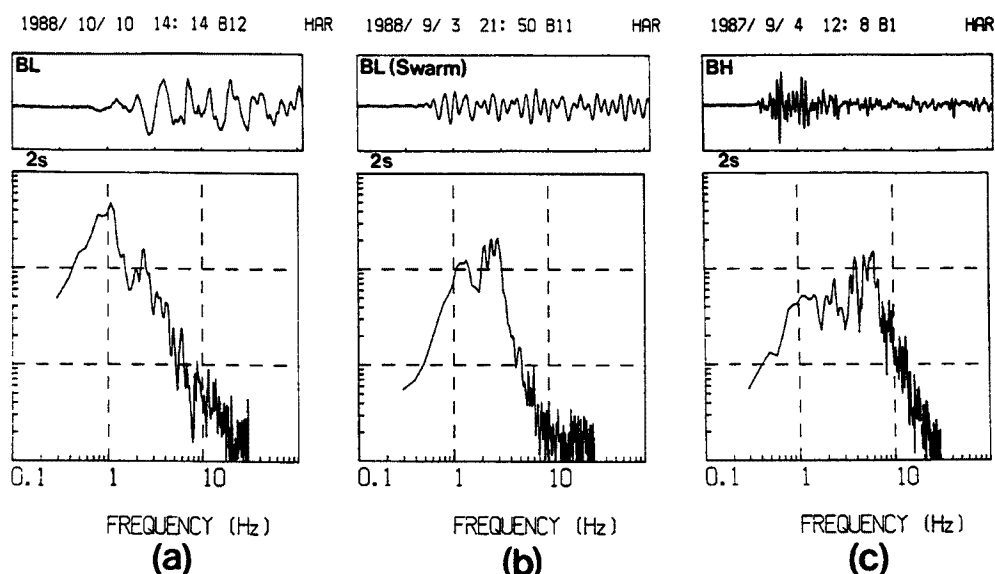


Fig. 2. Waveforms and spectra. (a) Isolated BL-type earthquake. (b) BL-type earthquake which occurred in swarm. (c) BH-type earthquake which occurred in swarm.

発したものである。

4. 震源位置

4.1 多点観測による震源決定

P波初動着震時を水平動成分も考慮して読み取り、桜島島内にあるすべての観測点(8観測点)において初動が読み取れたものについて、P波速度2.5 km/sの半無限均質構造を仮定し、震源決定を行った。

観測点の移設により震源分布に変化がみられるので、まず、観測点の配置の異なる3つの期間(期間I:1986年6月1日-1987年2月5日, 期間II:1987年2月6日-1988年1月21日, 期間III:1988年1月22日以降)にわけて検討する。それぞれの期間のBLおよびBHの震源分布をFig. 3に示す。なお、本稿においても、震源の深さはこれまでどおり^{9),13)}海水面からの深度により表すことにする。

BLの震源は、期間I, IIでは南岳火口直下の深さ0-2 kmの範囲に、期間IIIでは、やや深く、1-2.5 kmの深度にある。BHの場合、ほとんどのものが期間IIに含まれるが、その震源の深さは、期間IIでは火口直下の1.5-2.5 km, 期間IIIでは2.5 kmである。

観測点の移動のために震源分布に多少の変化が見られるが、各期間に共通していえることは、全体的にBLよりBHの方が、震源が深いということである。期間IIでは、BHの半数以上が最も深い場所に震源決定されたBLよりも深く、期間IIIでも1例ではあるが、BHがいつれのBLよりも深い。

両者の震源の深さの相対的な関係をHARにおける初動の入射角を用いて検証する。入射角は、水平動の火口方向の成分と上下動成分の振幅比から求める。HARでは、地震計は地表面からの深度290 mに設置されており、入射角、初動の立ち上がり時間、P波の伝播速度を考慮すると、初動部分は、地表面での反射の影響を受けていないと考えられる。限られた狭い範囲に震央が分布する爆発地震およびB型地震に対しては、HARにおける初動の入射角の変化は、震源の深さのちがいを反映していると考えてよい。

BLおよびBHの初動の入射角の頻度分布をFig. 4に示す。BLの入射角は、ほとんど58-72°に分布している。BHの入射角は、40-60°であり、BLに比較して鉛直方向に近い。したがって、初動の入射角からも、BH

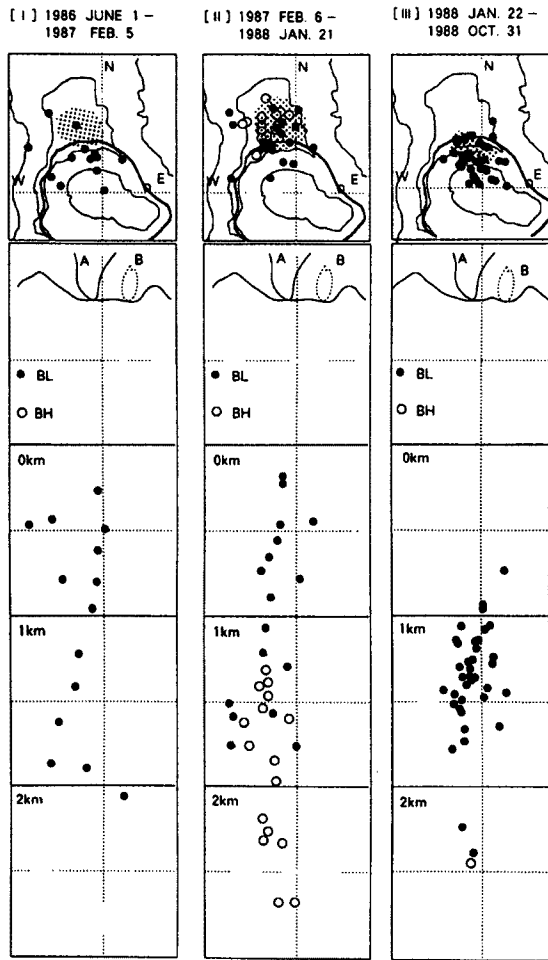


Fig. 3. Hypocenters of BL-type and BH-type earthquakes in the period I, II, III. Dotted areas represent hypocentral ranges of explosion-quakes.

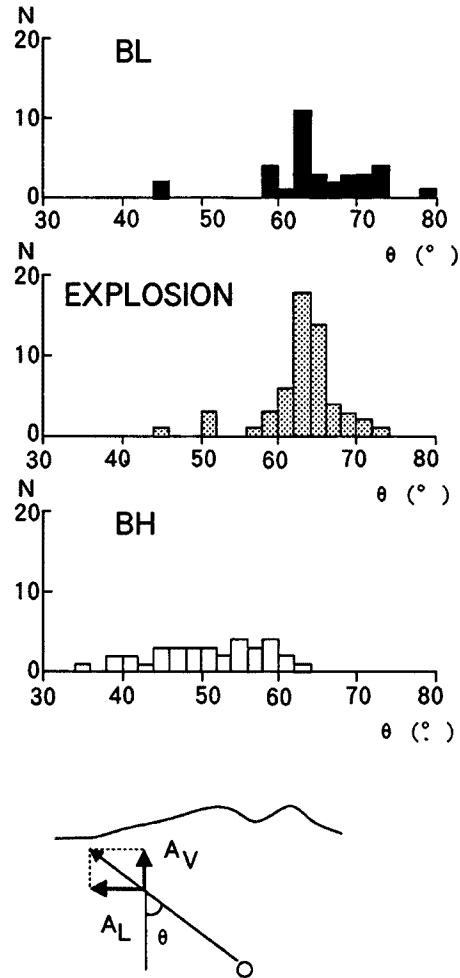


Fig. 4. Histogram of incident angles of BL-type, BH-type earthquakes and explosion-quakes.

の震源は、BLよりも深いといえる。

BLとBHの震央は、ともに南岳火口内に分布し、両者の系統的なちがいはみいだせない。また、単発的に発生するBLと群発中のBLの震源分布のちがいも明確ではない。

4.2 BL, BHの発生域の検討

BLの震源は、それぞれの期間により多少の変化がみられる。特に、期間IIIでは、それ以前に比べて、約0.5 km震源が深く求まっている可能性が高く(附録参照)、実際の震源は、震源計算により求められた位置より浅い場所にあると考える方が妥当であろう。個々のBL, BHに対する震源位置の補正についてはさらに詳細な検討を要するが、分布域全体の鉛直方向の広がり把握の上では、すべての震源位置に同じ補正量を与えてもさしつかえないと判断し、期間IIIの震源を0.5 kmだけ浅くした。その結果、期間IIIのBLの震源は、0.5-2.0 kmの範囲に、また、BHは2 km付近に分布することになる。期間I, IIおよび深度補正を施した期間IIIのBLおよびBHの震源分布を重ね、Fig. 5に示す。今回の震源計算では、BLは0-2 kmの深さに、BHは1-2.5 kmの深さに求められたといえる。

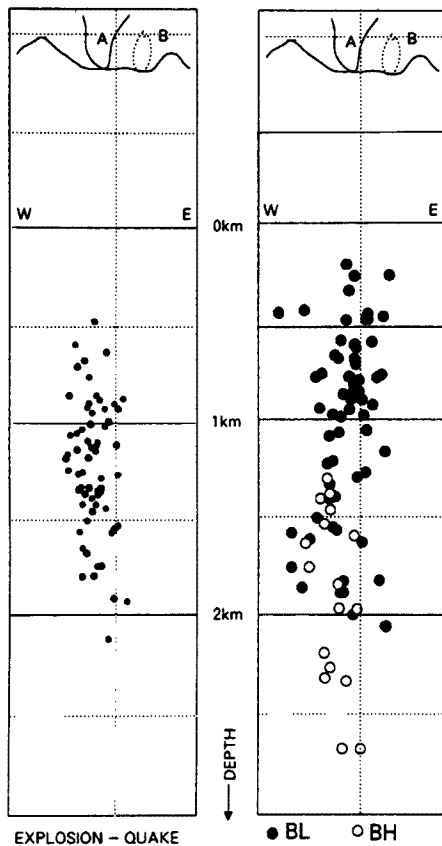


Fig. 5. Hypocenters of BL-type, BH-type earthquakes and explosion-quakes during the period from June 1986 to October 1988. Depths of events after January 1988 are decreased by 0.5 km.

5. 押し引き分布

桜島島内にある8つの観測点のうち、4観測点以上において初動が読み取れるBL, BHについて、水平動成分も含めて押し引き分布を検討した。

BLについては、全観測点において押しである場合が79%、全観測点において引きである場合が19%、押し引きが混在する場合が2%である。震源決定されたBLについて、全観測点において押しである場合および全観測点において引きである場合の、P波の初動分布(震源球の上半球をステレオ投影)および水平動の振動方向を、それぞれFig. 6, Fig. 7に例示する。

4観測点以上において初動が読み取れるBLの98%は、全観測点において押し、または、全観測点において引きであり、押しの観測点と引きの観測点が混在するものは2%(4個)である。全観測点において押しとなるものと全観測点において引きとなるものの割合を、BLの発生様式に着目して調べてみると、単発的に発生するBLの場合、両者の割合は95%:5%であるのに対し、群発中のBLでは、61%:35%である。BLについては、全観測点において押しとなるものと全観測点において引きとなるものの割合は、発生様式により

海水面より浅い部分にはBL, BHとも震源が求まっていない。火口に近接した臨時観測では、B型地震の震源が火口底から1 km以内の深さ(海水面より浅い部分)にも決められているが⁷⁾、今回の観測網は、その臨時観測網より火口からの距離が大きいため、海水面より浅い部分において発生する地震については、初動が遠方の観測点において不明瞭であることから震源決定の対象としなかった可能性もある。今回の解析からは、震源の深さの上限を決めることはむずかしく、BLは深度2 km(火口底から3 km)よりも浅い部分において発生する地震と考えた方がよさそうである。BHについては、分布域の下限は、BLよりもさらに0.5 kmほど深く、深度2.5 km(火口底から3.5 km)よりも浅い場所において発生しているといえる。

B型地震の群発は、爆発的噴火の前駆現象とみなされ⁹⁾、両者間には密接な関係がある。そこで、同じ方法により爆発地震を震源決定し、BL, BHと爆発地震の震源の分布域を比較してみる。爆発地震の分布範囲および深度補正を施した震源位置をそれぞれFig. 3およびFig. 5に示す。

Fig. 3の震央分布からみてBLの震央は爆発地震よりも広い範囲に分布する傾向がある。深さ分布については、BLの震源域は爆発地震とほぼ同じといえる。このことは、Fig. 4に示すようにBLと爆発地震のHARにおける入射角が、ともに58-72°の範囲に分布していることからわかる。一方、BHの場合は約半数が、爆発地震の発生域よりも深い場所に分布し、全体的にみるとBHの方が深いといえる。このことは、BHの入射角が40-60°であり、爆発地震の入射角に比較して鉛直方向に近いことから確認できる。

BLおよびBHの発生域および表面現象・地盤変動から推定されるそれぞれの群発現象の物理的な意味については本年報において別の報告に述べる¹²⁾。

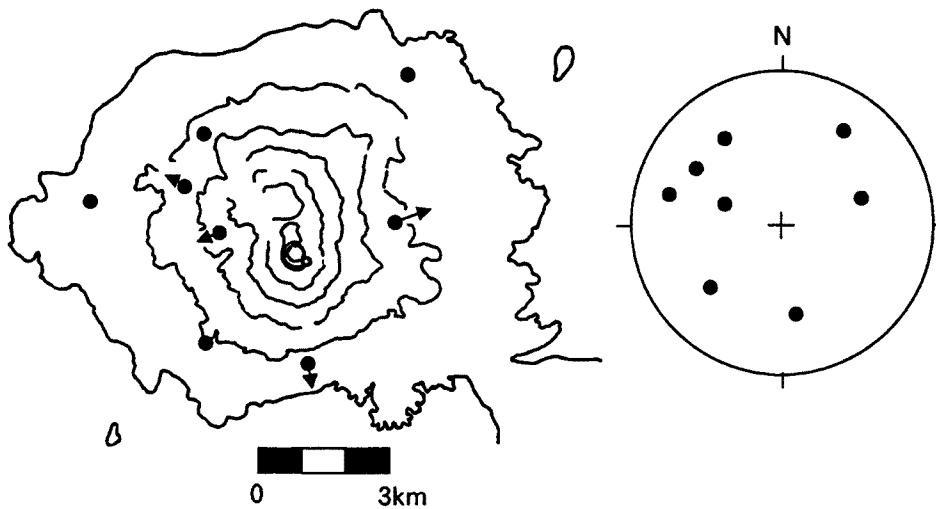


Fig. 6. Distribution of the initial motions of a BL-type earthquake, 14 : 14, October 10, 1988. Solid circles represent that the initial motions are compressions. Left : Geographical distribution. Arrows show horizontal components of the initial motions. Right : Stereographic projection of the upper hemisphere of the focal sphere.

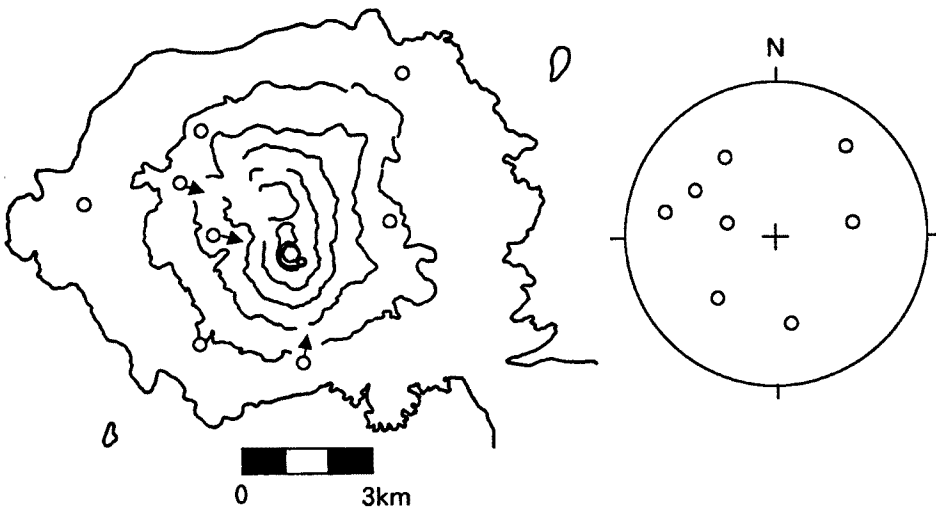


Fig. 7. Distribution of the initial motions of a BL-type earthquake, 21 : 50, September 3, 1988. Open circles represent that the initial motions are dilatations.

変化しており、群発中のBLの方が単発的に発生するBLに比べ、引きとなる割合が高いといえる。

BHについては、全観測点において押しである場合が94%を占め、残り6%（2個）は押し引きが混在する。全観測点において押しである場合のP波初動分布の例をFig. 8に示す。

全観測点において押しであるもの、全観測点において引きであるもの、押しとなる観測点と引きとなる観測点が混在するものの個数をTable 1にまとめて示す。

群発中の4個のBLおよび2個のBHでは、押しの観測点と引きの観測点が存在する。このうち、1986年

Table 1. Summary of distribution of initial motions of BL-type and BH-type earthquakes

	BL-type			BH-type
	Isolated	Swarming	Total	
All compressional arrivals	122 (95%)	67 (61%)	189 (79%)	84 (94%)
Mixed with compressional and dilatational arrivals	0 (0%)	4 (4%)	4 (2%)	2 (4%)
All dilatational arrivals	6 (5%)	39 (35%)	45 (19%)	0 (0%)
Total number	128	110	238	36

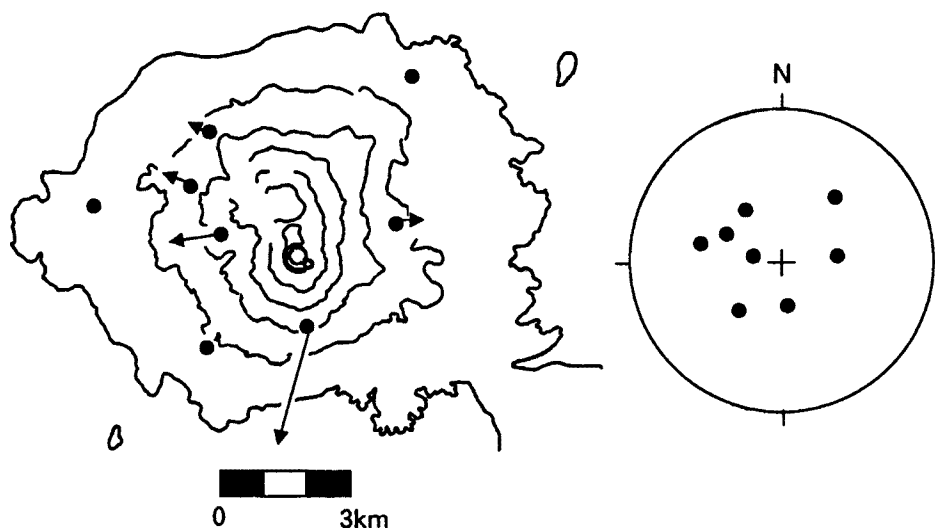


Fig. 8. Distribution of the initial motions of a BH-type earthquake, 12 : 08, September 4, 1987. Solid circles represent that the initial motions are compressions.

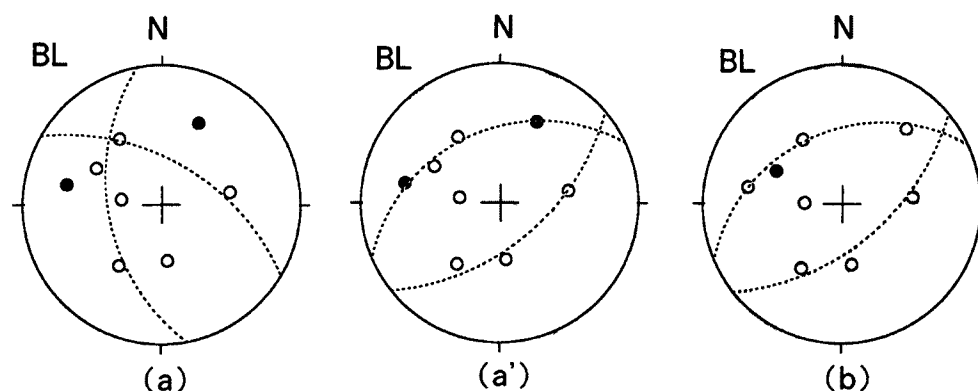


Fig. 9. Distribution of the initial motions of BL-type earthquakes and the possible fault-plane solutions. (a), (a') 04 : 18, August 8, 1986. (b) 19 : 27, July 16, 1987.

8月8日4時18分と1987年7月16日19時27分に発生したBLは震源決定することができたので、その押し引き分布が4象限型の断層モデルによって説明できるかどうか検討する。

1986年8月8日4時18分のBLでは、SHRとKOIにおいて押しであり、その他の観測点は引きである。この場合、Fig. 9 (a)あるいは(a')に示すようなメカニズム解が得られる可能性がある。しかし、押しと判定されたSHR、KOIでは、地表に上下動のみの地震計が設置されているうえに、震央からの距離が大きく振幅も小さいので、他の観測点よりも初動の判定が困難であり、初動を誤認したかもしれない。

また、1987年7月16日19時27分に発生したBLでは、HARだけが押し、その他の観測点は引きである。このBLについては、Fig. 9 (b)に示すようなメカニズム解が考えられるが、震央が多数のBLの集中している領域から西へ約0.3 km離れた位置に求まっていることから、HAR以外の観測点では、初動から半波長以上、後のphaseを初動と判定した可能性もある。

4象限型の発震機構をもっているとするれば、いずれの場合も、ほとんどの観測点はnodal line付近に位置することになるので、かなり明瞭なS波が観測されるはずである。S波の検出については、particle motionなどを調べる必要があるが、少なくとも、originalな波形からは明瞭なS波を、いずれの観測点においても識別できない。

今回の解析では、この2つのBLについても4象限型の発震機構を持っているという積極的な証拠は見いだせない。B型地震については、polarization filterを使用することによりS波を明瞭化することができる¹⁴⁾。BLおよびBHの発震機構を決定するためには、S波の振幅分布およびpolarization angleを明らかにする必要があると思われる。

6. まとめ

火山性B型地震を卓越周波数から1-3 Hzが卓越するもの(BL)と5-8 Hzが卓越するもの(BH)に分類し、それぞれの震源位置、押し引き分布について調べた結果をまとめると次のようになる。

1) BLの震源は、爆発地震の発生域とほぼ同じく、火口直下の深度2 km以浅にあり、BHよりは浅い。単発的に発生するBLの95%は、全観測点において初動が押しであるが、群発中のBLは、全観測点において押しであるものの割合が61%、全観測点において引しであるものの割合が35%であり、単発的に発生するBLにくらべ、全観測点において引きとなるものの割合が高い。

2) BHの震源は火口直下の2.5 km以浅の深さにあり、全体的にみれば、BLおよび爆発地震の発生域よりも深い。また、BHの94%は、全観測点において初動が押しである。

本研究にあたっては、加茂幸介教授・石原和弘氏にご助言いただきました。また、観測は桜島火山観測所職員によって維持されている。併せてお礼申し上げます。

なお、この研究の経費の一部は、文部省科学研究費補助金(課題番号63540303)によるものである。

参 考 文 献

- 1) Minakami T., T. Ishikawa and K. Yagi: The 1944 Eruption of Volcano Usu in Hokkaido, Japan, Bull. Volcanol. Tome XI, 1951, pp. 45-157
- 2) 水上 武・茂木清夫・平賀士郎・宮崎 務: 桜島の爆発的噴火と同火山に発生する地震の研究(1), 火山, 第2集, 第2巻, 1957, pp. 78-90
- 3) Minakami T.: Fundamental Research for Predicting Volcanic Eruptions (Part 1), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 38, 1960, pp. 497-544
- 4) 水上 武: 噴火と火山に発生する地震との研究 第1報 特に浅間火山の地震と噴火との関係, 火山, 第2集, 第4巻, 1959, pp. 104-114
- 5) 吉川圭三・西 潔: 桜島火山に於ける地震観測について(第4報)(火山性地震の分類および頻度分布について), 京都大学防災研究所年報, 第8号, 1965, pp. 51-57

- 6) 西 潔：桜島火山の火口近傍に於ける高感度地震観測 (I), 火山, 第2集, 第11巻, 1966, pp. 84-92
- 7) 西 潔：桜島火山の火山性微小地震と爆発の研究(2)—火山性地震の震源分布—, 京都大学防災研究所年報, 第14号 A, 1971, pp. 113-121
- 8) 西 潔：桜島火山の爆発地震について, 京都大学防災研究所年報, 第19号 B-1, 1976, pp. 69-73
- 9) 加茂幸介：桜島における噴火の前駆現象と予知, 火山, 第2集, 第23巻, 1978, pp. 53-64
- 10) 鍵山恒臣・行田紀也・小山悦郎・辻 浩：浅間火山の小規模噴火の前駆現象, 第20回自然災害科学総合シンポジウム, 1983, pp. 361-364
- 11) Shimozuru D. and T. Kagiya : Some Significant Features of Pre-Eruption Volcanic Earthquakes, Volcanic Hazards, J. H. Latter (Ed.), IAVCEI Proceeding 1, 1989, pp. 504-512
- 12) 石原和弘・井口正人：火山体の変形, 表面活動と火山性地震発生との関係(1)—微小地震の群発現象について—, 京都大学防災研究所年報, 第32号 B-1, 1989, pp. 1-12
- 13) 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
- 14) 井口正人：火口近傍における火山性地震波の解析, 火山, 第2集, 第30巻, pp. 1-10

附録

観測点の移設と震源位置の変化について

これまでの観測点の位置では, 観測井を掘削することが困難であるため, 1986年6月以降2度, 桜島北部および南部の観測点を約1 km 移設した。火山地帯においては上下方向へも水平方向へも地質構造が不均質であるため, 1 km の観測点の移動は, 震源決定結果に与える影響が大きいと予想される。そこで, 山頂噴火

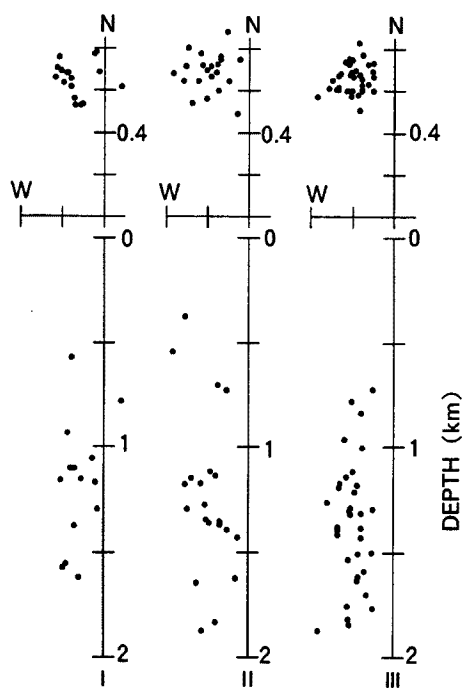


Fig. 10. Hypocenters determined by the arrival times of 6 stations fixed during the period I-III.

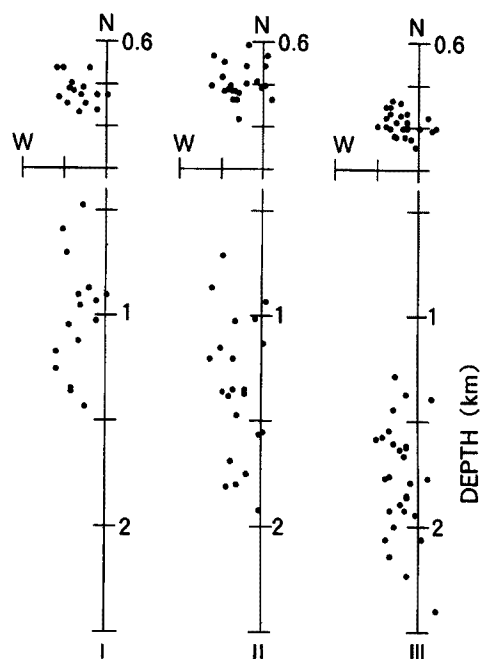


Fig. 11. Shifts of hypocenters of the explosion-quakes by the displacements of the stations (cf. Fig.1) .

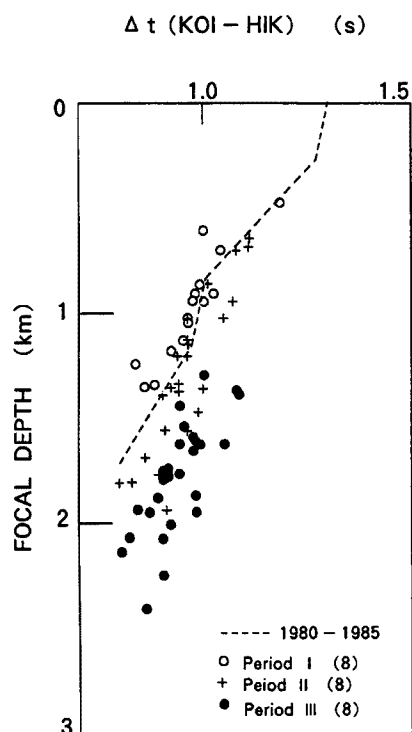


Fig. 12. Diagram of focal depths versus differences in arrival times between stations KOI and HIK.

における火山性地震としては規模が大きく、発生回数も多い爆発地震を用いて、観測点の移動による震源位置の変化の傾向を調べることにする。ここでは、観測点の配置のちがいに、便宜上、1986年6月1日から1987年2月5日までを期間I、1987年2月6日から1988年1月21日までを期間II、1988年1月22日以降を期間IIIとする。各期間における観測点の配置は、Fig. 1に示したとおりである。

まず移動しなかった HIK, GON, NOJ, HAR, KAB, KOI の6観測点を用いた震源計算結果について Fig. 10に示す。求められた震央分布は、桜島南部の観測点を除いたために、南岳火口からは著しく北へ偏っているが、期間I-IIIを通じて、爆発地震の震源分布に大きな変化はみられない。

次に、移設した観測点を含め、8観測点すべてを用いてそれぞれの期間における震源計算を行い、震源分布の変化を調べてみる。各期間における震源分布を Fig. 11に示す。桜島の北部および南部において観測点を移設したので、震源は、東西方向にはほぼ同じ位置にあるが、南北方向には、期間Iを基準にすると、平均して期間IIでは北へ0.1 km、期間IIIでは南へ0.15 km移動している。また、深さは、期間Iでは0.5-1.5 kmに、期間IIでは0.5-2.0 kmに、期間IIIでは1.2-2.5 kmの範囲に求まっている。移設した観測点を除いた震源決定では、震源分布に変化がみられないので、それぞれの期間における震源分布のちがいは、観測点の移設による見かけ上のものと考えられる。

そこで、南岳火口に最も接近している HIK と火口からみて HIK の延長線上にある KOI の着震時の差 ($\Delta t_{\text{KOI-HIK}}$) を利用してそれぞれの期間における震源の深さの変化を定量的に見積ってみる。Fig. 11に示すように爆発地震の震央は火口付近の直径約0.3 kmの範囲に密集しており、 $\Delta t_{\text{KOI-HIK}}$ から、相対的な震源の深さを推定することができる。 $\Delta t_{\text{KOI-HIK}}$ と震源の深さの関係を Fig. 12に示す。地震計を地中に埋設する以前の1980-1985年の観測点の配置に基づく震源計算では、爆発地震の震源は火口直下の0-2 kmの深さに決まっている¹³⁾。この期間の $\Delta t_{\text{KOI-HIK}}$ と震源の深さの関係は、Fig. 12に点線により示すような曲線により近似される。期間I, IIの震源の深さは1980-1985年の近似曲線から ± 0.2 kmの範囲内にあるが、期間IIIの震源は、1980-1985年の近似曲線および期間I, IIの震源よりも相対的に0.5-0.8 km深くなっている。HARにおける初動の入射角から判断すると1980-1985年および期間I, IIの観測点の配置に基づく計算結果の方が実際の震源位置に近いと思われる。したがって、期間IIIについては、実際の震源が、少なくとも0.5 kmは浅い場所にあると考えた方が妥当であろう。