

火山体の変形，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—

石原 和弘・井口 正人

THE RELATIONSHIP BETWEEN MICRO-EARTHQUAKE SWARMS AND VOLCANIC ACTIVITY AT SAKURAJIMA VOLCANO

By *Kazuhiro* ISHIHARA and *Masato* IGUCHI

Synopsis

The swarms of volcanic micro-earthquakes called as B-type earthquakes have been the most typical forerunner for explosive eruptions at Sakurajima Volcano since 1955. The physical meanings of B-type earthquake swarm was examined in relation to ground deformation and eruptive activity. B-type earthquakes were categorized into two types by their predominant frequency in this study. The one is named as a BL-type earthquake (low frequency : 1-3 Hz) and originates at a part shallower than 3 km beneath the summit crater. The other is a BH-type earthquake (high frequency : 5-8 Hz) and the hypocenter ranges from 2 to 3.5 km. The epicenters of both type earthquakes are located in the region of the summit with an extent smaller than the size of the crater.

BH swarms were observed mainly during inflation-stage with no significant changes of eruptive activity. On the contrary, BL swarms originates during the period of rapid deflation of the summit area with the successive emission of volcanic ash and gases, and they were sometimes accompanied with the intermittent ejection of volcanic bombs similar to Strombolian eruption and the emission of weak infrasonic waves.

These results suggest that BH-type earthquakes may reflect the intrusion of magma in the conduit, and that BL-type earthquakes are generated closely related with the degassing of magma extruded up to the crater bottom.

1. はじめに

山頂噴火活動が続いている桜島では，様々な波形の火山性地震や微動が観測される。これまで，Minakami の火山性地震の分類¹⁾を基本にして，卓越周波数など波形上の特徴から，A型地震，B型地震，爆発地震等に分類し，爆発的噴火活動との関係，震源分布や発震機構などについて研究がなされてきた。

これらの地震の内，P波とS波が識別可能で波形が構造性地震と類似したA型地震およびVulcano式噴火と対応して観測される爆発地震については，震源分布や発震機構などが明らかになりつつある^{2)~6)}。

B型地震は，A型地震にも爆発地震にも分類できない卓越周波数が10 Hz以下の微小・極微小地震であり，最も多く発生している地震である。臨時地震観測により山頂火口付近で発生していることが確かめられ

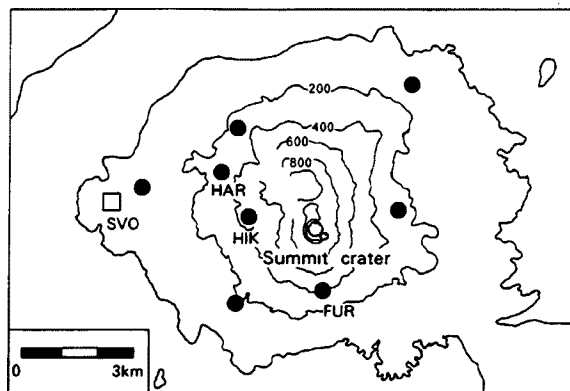


Fig. 1. Location of seismic stations and the Sakurajima Volcanological Observatory (SVO). Water-tube tiltmeters are installed in an underground tunnel at HAR, and a TV camera and an infrasonic microphone are at SVO.

関係に違いが認められることが指摘されている^{11,12)}。また、B型地震の発生頻度が増加した後、急激に噴火活動が減退した例も報告されている¹²⁾。更に、桜島において、地震記録と表面現象を対比して観察すると、噴煙や白煙の放出と対応する場合とそうでない場合がある。

これまでのB型地震に関する研究によって、B型地震が火山体の浅い場所でのマグマの挙動に関係して発生しているらしいと分かったものの、具体的にどのような過程で発生しているのか明らかになっていない。筆者らは、B型地震の発生機構を解明するには、B型地震の波動の性質についての研究と分類、震源決定、発震機構など地震学的側面からの approach が必要なのは当然であるが、B型地震が発生している時点の表面活動や地盤変動の特徴を把握しておくことも重要であると考えた。

桜島南岳山頂火口の北西2.8 kmにある観測坑道に設置した水管傾斜計及び伸縮計では個々の爆発的噴火に対応した山頂部地盤の隆起膨張現象^{13,14)}のみならず、B型地震が群発する時間帯にも顕著な地盤の変動が観測されている。また、桜島内の地中地震計による観測網が整備された結果、SN比の良好な記録が得られるようになった。そこで、TVカメラおよび超低周波コンデンサーマイクロホン¹⁵⁾による表面現象の観測、水管傾斜計による地盤変動観測から見て、火山活動のどのような段階でB型地震が群発しているのか検討した。TVカメラ等の観測計器の配置はFig. 1に示した。なお、B型地震の震源決定および初動の押し引き分布については、筆者のひとりが別に報告している¹⁶⁾。

2. B型地震の分類と震源

山頂火口の北西2.9 kmにあるハルタ山 (Fig. 1中の HAR) の地中地震計 (固有周期: 1秒) で得られた記録上でB型地震の波形を観察すると、1-2 Hzの低周波成分が卓越するものと5-10 Hzのやや高周波成分が卓越する場合がある。B型地震の典型的な記録2例を、A型地震及び爆発地震の記録とともに、Fig. 2に示した。また、これらの地震記録のスペクトルをFig. 3に示している。図中でBLと記した地震は1 Hz付近の低周波成分が卓越しているのに対して、BHは5-7 Hzのやや高周波成分が高い帯域の成分が卓越していることが分かる。更に、BH、BLおよび爆発地震は10 Hz以上の高周波成分が欠落しているのに対して、A型地震はむしろ10 Hz以上の高周波成分が卓越していることが分かる。このことは、A地震と他の火山性地震とは震源域の物理的状態が異なることを示唆している。本稿では、1-3 Hzの帯域が卓越するB型地震をBL、5-

ている^{7,8)}。しかし、B型地震は規模が小さいためにこれまでの常時観測網では震源決定が困難であり、震源分布および発震機構についての研究はほとんどなされていない。

これまでのB型地震に関する研究は、主として爆発的噴火活動との時間的関係を調べるものであった。桜島や浅間山などの安山岩質火山では、爆発的噴火活動が始まる前に、B型地震の発生頻度が高くなる、あるいは群発する事例が多数回確認されている。また、B型地震が数時間にわたって群発の後、桜島南岳の山頂火口に溶岩が貯溜していることが確認されたことから、B型地震の群発はマグマが火口底へ上昇する過程に係わっていると推定されている^{9,10)}。しかし、B型地震はA型地震にも爆発地震にも区分できない微小地震の総称であって、様々な波形の地震を含む。卓越周波数によっていくつかに区分し、一連の活動期の中で爆発的噴火との時間的関係を調べると、その対応

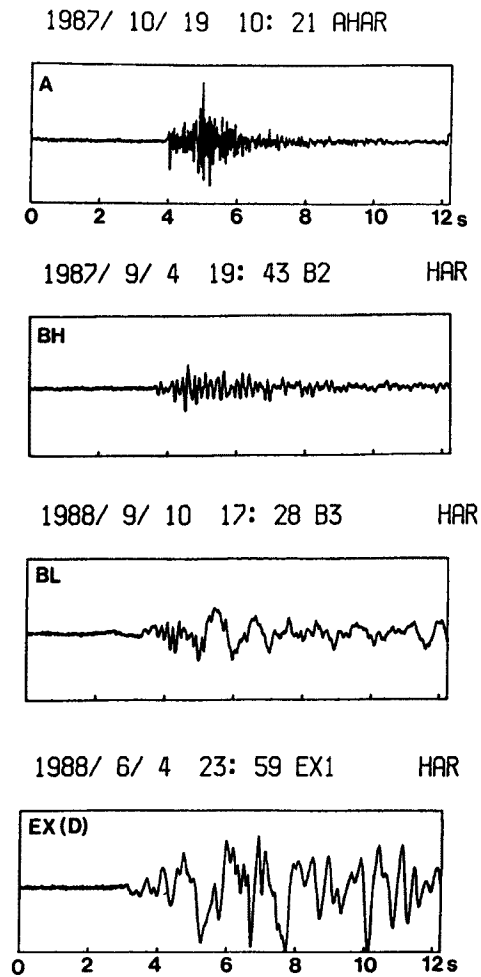


Fig. 2. Typical seismograms (velocity) of A-type, BH-type, BL-type earthquakes and an explosion-quake recorded by a borehole seismometer at HAR.

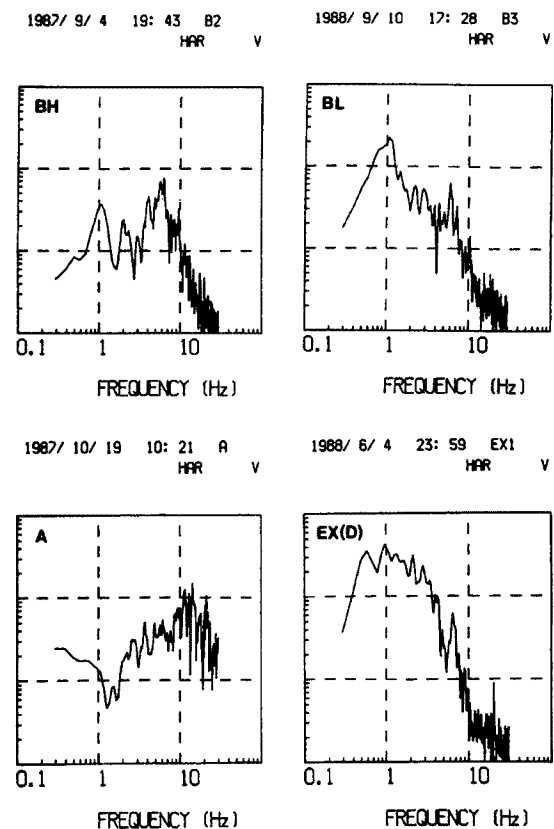


Fig. 3. FFT spectra of A-type, BH-type, BL-type earthquakes and an explosion-quake.

8 Hz の成分が卓越する B 型地震を BH と定義する。

南岳山頂火口を東西に横切る断面に投影した最近 3 か年の BL および BH の震源分布を，爆発地震の震源域と併せて Fig. 4 に示した。BL, BH は共に，爆発地震と同じく山頂火口の直下で発生している。BL の震源域の下限が爆発地震の震源域の下限（海面レベル下 2 km）とほぼ同じであるのに対して，BH の震源域は，爆発地震より 0.5 km 程度深く迄延びている。BL および BH は，Fig. 5 に示した爆発地震と A 型地震の震源分布¹⁷⁾ から推定されている火道の内部，あるいはその周囲で発生していると推定される。

3. B 型地震の群発現象と地盤変動・噴火活動の関係

桜島の最近の山頂噴火活動に観測される火山性微小地震の群発のほとんどは，卓越周波数の低い BL で構成されている。BL の群発中に，連続微動も併せて観測される場合もある。

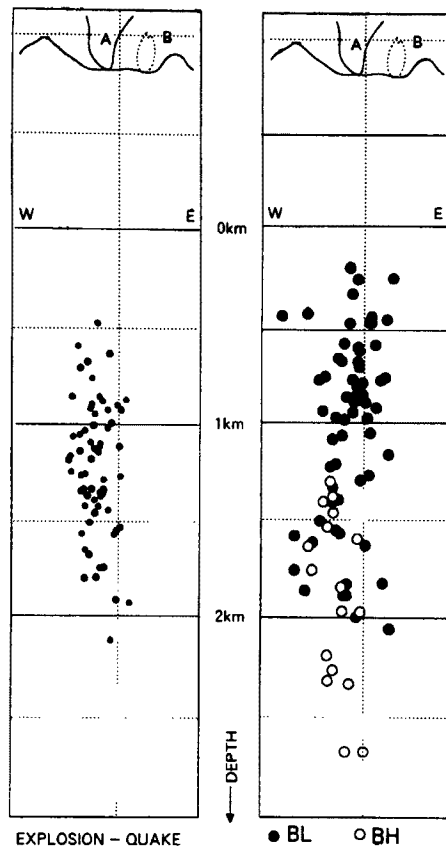


Fig. 4. Hypocentral distribution of BH-type, BL-type earthquakes and explosion-quakes during the period from June of 1986 to October, 1988 on an east-west section cross the summit crater of Sakurajima.

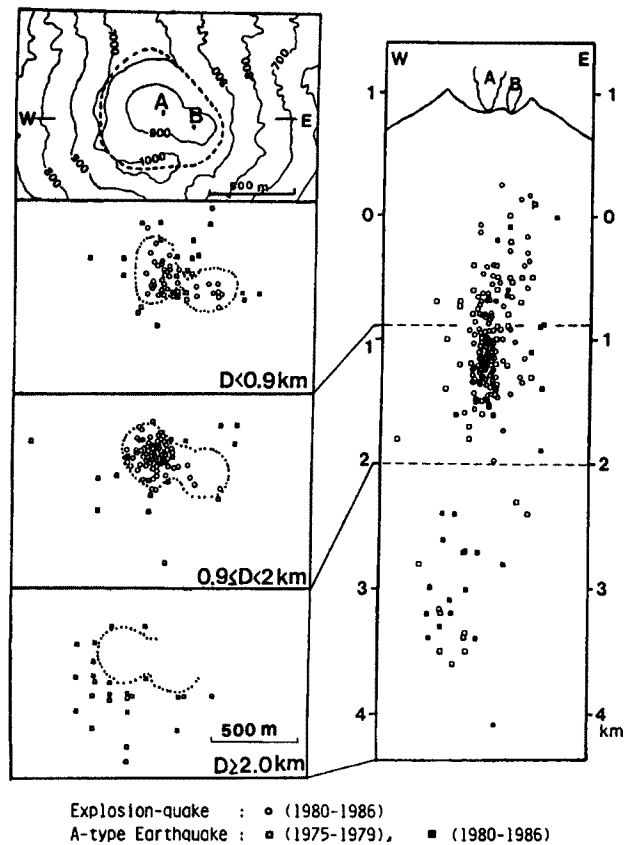


Fig. 5. Hypocentral distribution of A-type earthquakes and explosion-quakes : (right) hypocenters projected onto an E-W section across the summit crater and (left) epicenters of events in the three ranges of depth (after Ishihara 1988).

3.1 BLの群発現象について

ハルタ山観測坑道 HAR における火口方向の傾斜変化と BL 群発の時間的關係を Fig. 6 に示した。TV 画像の解析による表面活動との関係も併せて示してある。群発中は山頂方向の地盤が急激に下がったことを示す傾斜変化が観測された。地盤変動の面からみると、BL は山頂火口の地下の圧力が低下する過程で群発しているといえる。

TV 画像上の噴煙の色から判断して、火山灰の放出を伴う噴煙(黒-灰色)、水蒸気等火山ガスの放出(白煙)及びそれらの中間的な場合(灰白色)に分け、更に噴煙・噴気の高さを5段階に分けて示した。地盤の隆起過程では噴煙量の減少あるいは白煙が観察されるが (Photo. 1a), BL の群発している時間帯には、山頂方向の地盤が下降すると共に、火山灰を含む噴煙が放出されていることが分かる (Photo. 1b)。表面活動からみると、火山灰が間欠的に(火山ガスと共に)放出される過程で BL が群発しているといえる。

1986年以降の BL 群発中には例外なく山頂方向が下降する傾斜が観測されている。火口から 1.7 km の距離にある観測点 HIK (Fig. 1) での BL 群発中の震動エネルギーの積算値と HAR における傾斜変化量の関係

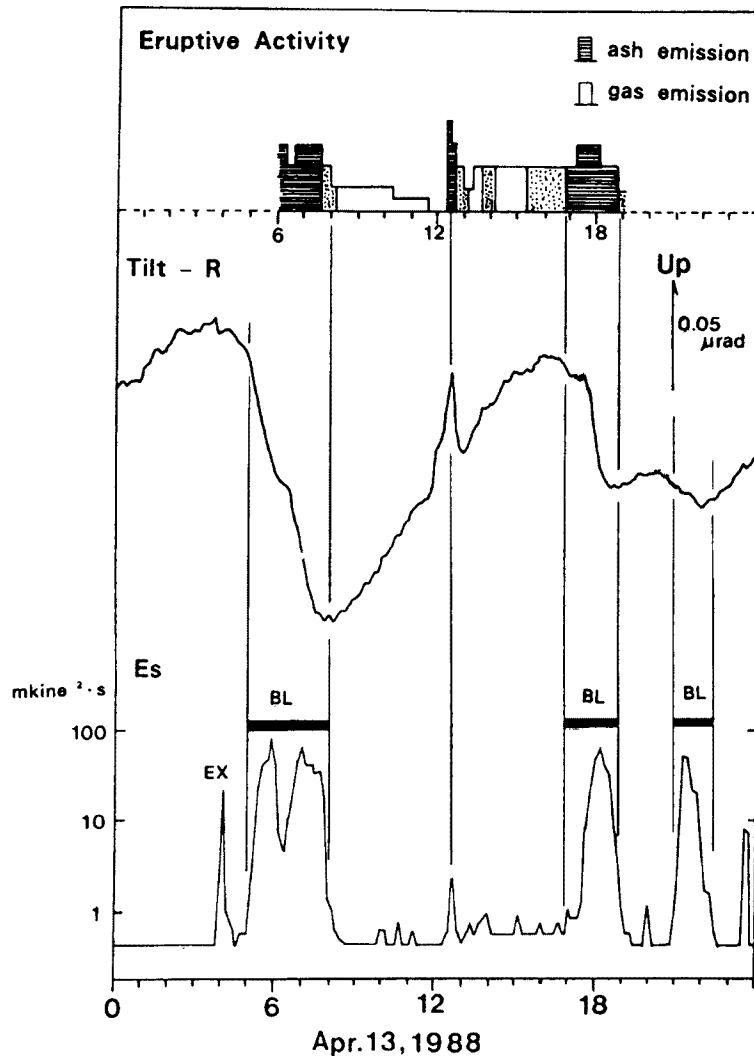


Fig. 6. Eruptive activity, ground-tilt in the radial direction to the summit crater and seismic activity on April 13, 1988. The intensity of eruptive activity is classified into 5 grades by the height of eruption column. Es (indicator of seismic energy) is counted from the amplitude of seismic signals at the station HIK.

を Fig. 7 に示した。

夜間に BL 群発が発生すると、Photo. 2 に示したような Stromboli 式噴火に似た赤熱した噴石の間欠的な噴出・火映現象が観察される場合がある。噴石の到達高度は、火口の rim から、50-100 m 位までで、噴出初速度は、最大で 60 m/s 程度と見積られる。Vulcano 式噴火の時の噴石の放出初速度 (110-240 m/s) の 1/2-1/4 程度である。間欠的な赤熱した噴石の放出や火映現象が観察されるということは、揮発成分に富んだマグマが火口底まで上昇して溢れでている状態であることを示唆している。

赤熱した噴石の放出が観察されるような場合、山頂火口から 5.6 km 離れた桜島火山観測所 (Fig. 1 中の SVO) では、超低周波コンデンサマイクロホンで、Fig. 8 に示したような微弱な空気振動 (インフラソニック波) が間欠的に観測される。振幅は、最大 0.1 mb (Vulcano 式噴火に伴う空振波の数 10 分の 1) 程度であ

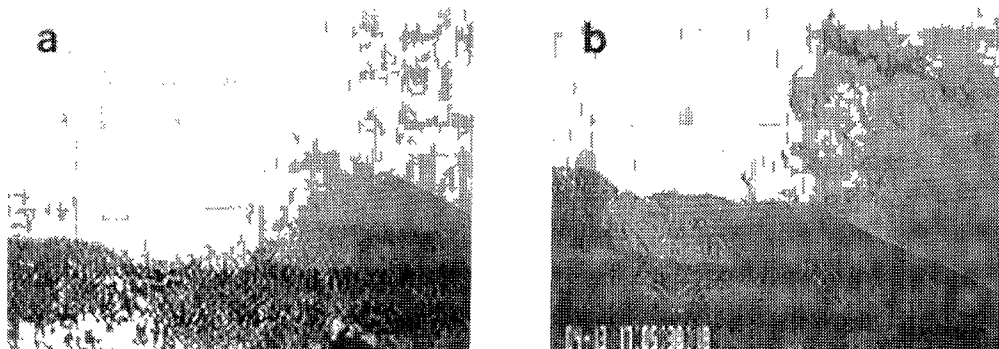


Photo. 1. TV images of the eruptive activity at the Sakurajima volcano on April 13, 1988. Photo (a) indicates white steam emission at 14:52 JST, and the photo (b) does successive emission of volcanic ash at 17:05 JST.

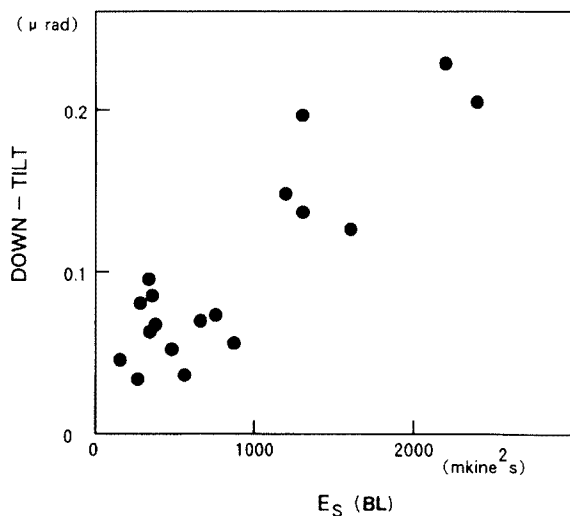


Fig. 7. Relationship between cumulative seismic energy at HIK and downward ground-tilt during BL type earthquake swarms.



Photo. 2. Intermittent ejection of volcanic bombs similar to a Strombolian eruption during a BL type earthquake swarm (00:56 JST, April 26, 1988). The maximum ejection velocity is estimated to be about 60 m/s.

る。空気振動が山頂火口で発生した時刻に戻して、BLの発生時刻との対応関係を調べると、群発中は対応関係を見いだすのが困難な場合もあるが、孤立型のBLについてみると、両者がほぼ同時刻に発生していることが分かる。このことは、BLが爆発地震と同様に火道内で発生していることを強く示唆している。これまで述べた表面現象の特徴から、BLが群発している時には、火口底までマグマが上昇して、effusiveなマグマの噴出が生じているといえる。

3.2 BIIの群発現象について

1987年2月以降桜島南岳の山頂噴火活動は、比較的静穏であったが、9月中旬から爆発回数が増加した。その活動に先立ち、9月3日から4日にかけて比較的短周期成分が卓越するB型地震、BHが群発した。9月3日20時から24時間の傾斜変化と震動エネルギーの関係をFig. 9に示した。BHおよびBLの発生した時間帯が記入してある。3日22時から約8時間の内に、約0.2 μradの急激な山頂方向の上昇が生じた後、4日06時50分頃に0.01 μrad程度の微小な下降を示した。約2時間変動が停滞した後、再び上昇を示した。12時過

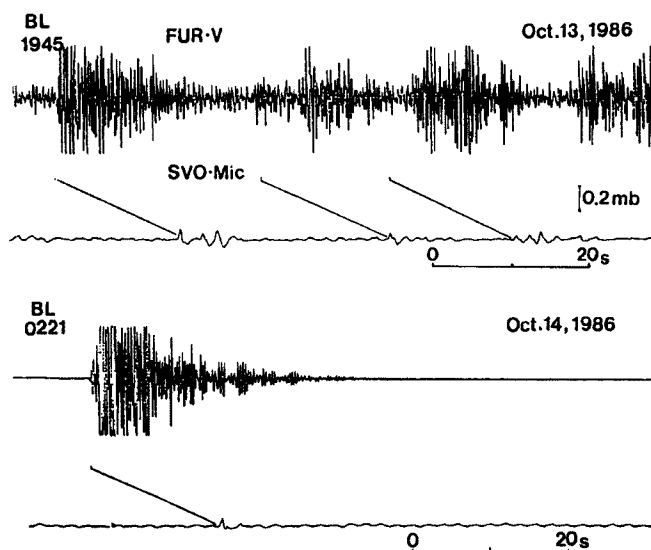


Fig. 8. Records of BL-type earthquakes at FUR and infrasonic waves observed at SVO.

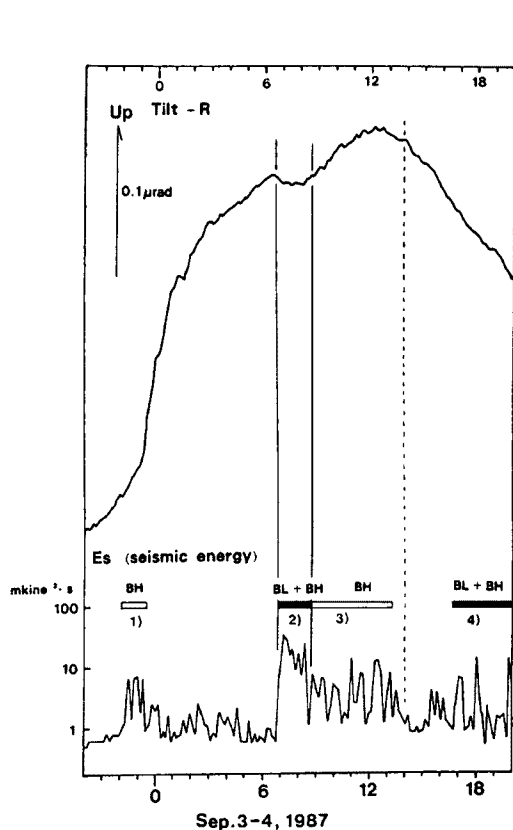


Fig. 9. Radial ground-tilt and seismic activity during BH-type earthquake swarms, and during BH- and BL-type mixed swarms.

SEISMOGRAM at HAR (Sep. 3-4, 1987)

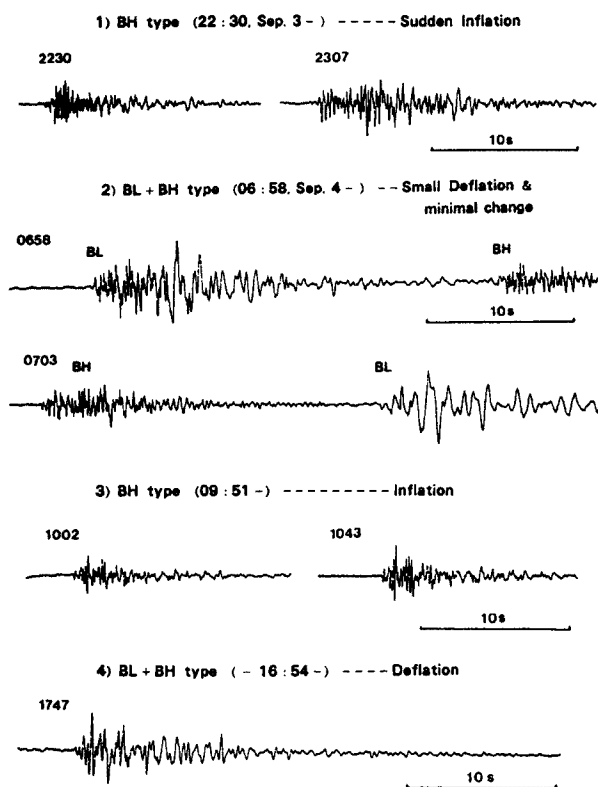


Fig. 10. Typical records of BH-type and BL-type earthquakes during each period indicated in Fig. 9.

ぎからは、緩やかな下降が続いている。

傾斜変動の傾向から 4 つの期間に分け、それぞれの期間に発生している B 型地震の典型的な記録例を Fig. 10 に示した。2 度の隆起過程に於いては、BH が群発している。他方、隆起が停滞あるいは下降している段階では、BH の発生も認められるが、BL が混在していることが分かる。このことは、BH が隆起過程に係わって発生しているのに対して、BL の発生は火山体内部の圧力が低下する過程に関係していることを示している。なお、鹿児島地方気象台の定時観測 (09時, 15時) によれば、白煙の放出は認められたが、火山灰を含むような噴煙の放出は確認されていない。また、ノイズレベル (0.01 mb) を超えるインフラソニック波は観測されていない。なお、1987年11月1日から2日にかけても BH が頻発したが、ここで示した例と同じく急激な隆起過程で BH が群発し、隆起停滞状態では BH と BL が混在して発生した。

4. 議論

B 型地震を卓越周波数により BL と BH の 2 つに区分して、それぞれが群発する時間帯の表面活動と地盤変動の特徴を調べた。その結果をまとめて Table 1 に示した。BL と BH は、表面活動および地盤変動のいずれの面からみても対照的な段階で群発している。つまり、BH は、山頂部地盤が隆起する過程で顕著な表面活動の変化を伴わず発生し、BL は、山頂部の地盤の急激な沈降過程と一致してマグマの噴出を伴いながら群発する傾向がある。しかも、BL および BH は共に山頂火口直下で発生し、比較的顕著な表面活動を伴う BL の震源域のほうが BH に比べて浅い傾向がある。これらの関係から類推して、BH は桜島火山の深部からマグマが火道で貫入する過程で発生する地震であり、BL は火道の上端付近、つまり、火口底付近まで既にマグマの先端が上昇していて発泡噴出する過程で発生する地震といえる。BH と BL の具体的な発生メカニズムについては、発震機構を決めるには現在の地震観測点の分布は不十分であるなどの観測上の問題点があつてこれ以上論ずることができない。しかし、マグマの発泡・噴出過程と係わっていると推察される BL と爆発地震の震源の下限が共に海面下 2 km 付近 (火口底から約 3 km: 静水圧換算で約 600 bar) であることの意味は、安

Table 1. Eruptive activity and ground deformation observed during the swarms of BH-type earthquakes and those of BL-type earthquakes at the Sakurajima volcano

	BH-type event	BL-type events
(Characteristics of BH-type and BL-type earthquakes)		
predominant frequency	5—8 Hz	1—3 Hz
focal depths	2—3.5 km	shallower than 3 km
(Eruptive activity)	no significant changes	Successive emission of volcanic ash and gases Intermittent ejection of volcanic bombs (similar to a Strombolian eruption) Intermittent emission of weak infrasonic waves
(Ground deformation)	Inflation of the summit (upward tilt)	Rapid deflation of the summit (downward tilt)
(Related volcanic process inferred from observations)	Intrusion of magma into the magma conduit	Effusive extrusion of magma from a vent of the summit crater

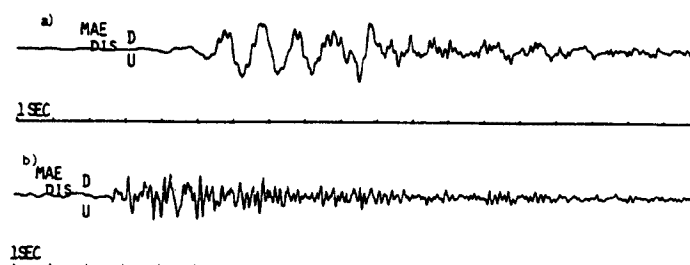


Fig. 11. Typical seismograms (displacement) of low-frequency earthquakes a), and high-frequency earthquakes b) observed at a site 1.2 km east of the summit crater of Asama volcano (after Shimozuru and Kagiya 1989).

山岩質マグマの物理化学的実験と比較検討することによって明らかにすることができるかも知れない。

ここで、桜島および浅間山の2つの安山岩質火山に於ける火山性地震，特にB型地震に関するこれまでの研究と本研究の結果を比較して，分類の仕方や震源について検討し，今後の課題を述べる。

Minakami¹⁾が断わっているように，A型地震やB型地震といった名称は火山で発生する地震を区分するために便宜上つけられたものである。Minakamiの定義によれば，A型地震は火山体の深部(1 km以深)で発生する地震で，構造性地震と同様にP波，S波の位相が識別できる地震である。B型地震は噴火口付近の極浅い場所(1 km以浅)で発生し，その結果表面波が卓越しS波が不明瞭になる。また，B型地震はVulcano式噴火が発生する火山で頻繁に観測される地震であると断わっている。しかし，実際のところ個々の火山性地震について震源の位置および深さを推定することは困難であり，桜島では振幅の火口からの距離による減衰が大きく，P波とS波の識別が困難で，低周波数成分が卓越する地震をB型地震と分類してきた。

B型地震の波形や震源の深さが一連の活動期の中で時間と共に変化している可能性は，既に水上ら¹²⁾によって指摘されている。桜島では，吉川・西¹¹⁾が，B型地震を周期の短いほうから，SP，BSおよびBに区分している。卓越周波数，波形から判断すると，BSがBH，BがBLに相当する。SPは火口から約2 kmくらいの範囲で観測される極微小地震であり，今回の解析の対象には含まれていない。また，Fig. 11に示したような浅間山で観測された¹⁸⁾やや高周波地震 B_{HIGH} と低周波地震 B_{LOW} は，それぞれBHおよびBLに相当すると考えられる。また，下鶴ら¹⁹⁾は，桜島におけるBL群発に似た浅間山の群発地震の際に間欠的な噴煙の放出が観察された事を報告している。わが国の代表的な2つの安山岩質火山では，山頂噴火活動期に類似した火山性地震が観測されているといえる。

B型地震の震源の深さについては最近の精密な地震観測により，必ずしもMinakami¹⁾の定義が妥当ではないことが示されている。桜島では，B型地震の震源域は，A型の震源域より浅くなる傾向があるが，B型地震の中にはA型地震の震源より深い場合もあることが指摘されている⁷⁾。浅間山でも，やや高周波の卓越するB型地震(B_{HIGH})が山頂火口の直下約2 kmの深さまで分布していることが示されている²⁰⁾。今回の震源決定によっても，爆発地震の震源域よりやや深いところでもBHが発生していることが示された。つまり，精密な観測網によって震源決定を行ってみると，Minakamiが振幅の減衰から推測したよりもはるかに深いところまで(A型地震の震源域の範囲まで)B型地震の震源域が延びているといえる。MinakamiのB型地震の定義の内，震源の深さに関する部分は修正すべきであろう。

火山体の構造と関連してB型地震の震源分布をみてみると，浅間山でも桜島でも山頂火口付近で限られた領域で発生しており，しかも震央の広がりか火口の大きさと同程度かそれよりも狭いことに気づく^{7), 20)}。桜島の場合，爆発地震の震央域と同程度かやや大きく¹⁶⁾，A型地震の震央域より狭い。従って，B型地震は火道の内部あるいはその極く近傍で発生していると考えられる。また，前述のように，地中地震計の記録を解析し

てみると、B型地震(BH, BL)のスペクトル構造はA型地震と大きく異なり、10 Hz以上の成分が欠落しているという特徴が爆発地震と共通している。BLやBHの震源域と同程度の深度でもA型地震が発生しているわけであるから、このスペクトルの違いを地震波の伝播経路の物性の違いで説明するのは困難と考えられる。スペクトル構造の違いは、A型地震が火山体のうち brittle な物性の領域(固体)で発生するのに対して、B型地震は ductile な物性あるいは melt 状態にある領域で発生しているという震源域の物性の違いを反映している可能性が高い。A型地震とB型地震の分類に火山学的な意味があるとすれば、震源の深さの違いではなく、火道等火山体特有の構造にもその意味を求めるべきではないかと考える。

BLが火口直下の爆発地震の震源域とほぼ同じ領域で発生し、噴煙の放出、場合によっては噴石の放出や微弱な空気振動の発生を伴うとなると、BLは「噴火地震」といってもよいことになり、爆発地震との区別が付きにくくなる。Minakami¹⁾は、振幅の大小を除けば波形上爆発地震とB型地震の間に有意な違いが認められないこと、石本-飯田の係数 m がほぼ一致することなどから、B型地震の特別な場合(ある程度以上規模が大きい場合)が爆発地震(爆発的噴火を引き起こすB型地震)であると推定した。爆発地震は、BLより規模が大きく主要部分で1 Hz以下の低周波成分が卓越するという特徴があるが、実際に、地表に設置してある固有周期1秒の地震計の記録を一見したところでは、いづれか判断しがたい場合がまれにある。Minakamiの推論の是非を明らかにするには、BLと爆発地震の発震機構、規模の頻度分布および波動の性質(特に、1 Hz以下のスペクトル構造)の比較検討が必要である。

5. まとめ

桜島の山頂噴火活動期に発生する火山性微小地震B型地震を卓越周波数により2種類BHおよびBLに分類した上で、群発する時間帯の表面活動および地盤変動の特徴を調べた。その結果、それぞれのタイプのB型地震の群発する時間帯の地盤変動および表面活動の特徴は対照的であることが明らかになった。短周期成分が卓越するBHはマグマが深部から火道へ貫入する過程で発生しているのに対して、BLは火道上部でのマグマの発泡・噴出過程に深く関わっていると考えられる。また、震源分布とスペクトル構造についてA型地震および爆発地震と対比して考察すると、BL, BHは共に山頂火口直下の火道内あるいはその極近傍で発生していると考えられる。

本研究を進めるにあたっては、加茂幸介教授に貴重な助言を頂いた。また、TV画像の記録方式の改良については高山鐵朗技官、保守等には園田忠惟技官はじめ桜島火山観測所所員に負うところが大きい。ビデオテープの編集等は、的場孝子さんに助力頂いた。これらの方々に厚く御礼申し上げます。なお、本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)を用いた。

参 考 文 献

- 1) Minakami, T.: Fundamental Research for Predicting Volcanic Eruptions (part 1), Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 38, 1960, pp. 497-544.
- 2) 西 潔: 桜島火山に発生するやや深い地震の発震機構, 京大防災研年報, 第21号 B-1, 1978, pp. 69-73.
- 3) Ishihara, K.: Dynamical Analysis of Volcanic Explosion, J. Geodynamics, Vol. 3, 1985, pp. 327-349.
- 4) 西 潔: 火山性地震のスペクトル的研究(1)—爆発地震—, 京大防災研年報, 第23号 B-1, 1980, pp. 29-35.
- 5) 山里 平: 爆発地震の初動分布, 火山, 第2集, 第32巻, 1987, pp. 289-300.
- 6) 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. 19-28.
- 7) 西 潔: 桜島火山の火山性極微小地震と爆発の研究(2)—火山性地震の震源分布—, 京大防災研年報, 第14号 A, 1971, pp. 113-121.
- 8) 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, 1985, pp. 1-10.
- 9) Nishi, K.: Seismological Study on the Sakurajima Volcano (1)—Classification of Explosions and

Some Characteristics of These Explosion—, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 20, 1970, pp. 23-35.

- 10) 西 潔：爆発に先行する火山性 B 型地震の群発，京大防災研年報，第27号 B-1，1984，pp. 29-34.
- 11) 吉川圭三・西潔：桜島火山における地震観測について（第 4 報），京大防災研究所年報，第 8 号，1965，pp. 51-57.
- 12) 水上 武・佐久間修三・茂木清夫・平賀士郎：噴火と火山に発生する地震との研究（第 3 報），火山，第 2 集，第 4 巻，1960，pp. 133-151.
- 13) 加茂幸介・石原和弘：地盤変動連続観測で捕捉された山頂噴火の前駆現象，京大防災研年報，第29号 B-1，1986，pp. 1-12.
- 14) Kamo, K. and K. Ishihara: A preliminary Experiment on Automated Judgement of the Stages of Eruptive Activity Using Tiltmeter Records at Sakurajima, Japan. IAVCEI Proc. Volcanology, Vol. 1, 1989, pp. 585-598.
- 15) 石原和弘・井口正人・田平 誠：火山爆発に伴う空気振動の観測，第 5 回桜島火山の集中総合観測，1986，pp. 131-138.
- 16) 井口正人：火山性地震 BL・BH の初動の押し引き分布，京大防災研年報，第32号 B-1，1989，pp. 13-22.
- 17) 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，京大防災研究所年報，第 31号 B-1，1988，pp. 59-73.
- 18) Shimozuru, D. and T. Kagiya: Some Significant Features of Pre-Eruption Volcanic Earthquakes, IAVCEI Proc. Volcanology, Vol. 1, 1989, pp. 504-512.
- 19) 下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎努・松本時子・長田昇・寺尾弘子：1983年の浅間山噴火活動について，地震研究所彙報，第50巻，1975，pp. 115-151.
- 20) 鍵山恒臣・行田紀也・小山悦郎・辻 浩：浅間火山小規模噴火の前駆的現象，第20回自然災害科学総合シンポジウム，1983，pp. 361-364.