

## 阿蘇火山の波形の似た火山性地震

小 野 博 尉

### VOLCANIC EARTHQUAKES WITH SIMILAR WAVEFORM AT VOLCANO ASO

By *Hiroyasu ONO*

#### Synopsis

Volcanic earthquakes near the active crater of Naka-dake, Volcano Aso, can be divided into two kinds, high frequency events and low frequency ones. High frequency events are dominated by signals with higher frequency than 10 Hz and occur in the depth range, 0-3 km below sea level. Low frequency events are located in 2 km range of shallow depth directly beneath the crater bottom, 1.2 km above sea level.

The low frequency events appeared mostly as earthquake swarm. The similar events having similar waveforms were recognized among the low frequency events. In a series of seismic activity, the similar event activity occurred at first and then was accompanied with non-similar event activity.

Ten groups of the similar events were classified in 1984-1986. It is supposed that the similar events are associated with the movement of magmatic material in the volcanic vent.

#### 1. は じ め に

阿蘇火山の中央火口丘では、現在活動中の中岳火口の極く近傍に火山性地震が発生する。これらの震源は、火口の直下から震源位置が深くなるにつれて東南側にずれるものの、深さも海拔-3 km 以浅で、火口の下の比較的狭い範囲にある。これらの火山性地震は、波形の見かけの周波数によって、10 Hz を境に高周波地震と低周波地震に分けることができる。

低周波地震は発生頻度にむらがあり高周波地震に比べてより火山活動と関係があるようにみえる。低周波地震はいくつかのグループに分けることができるが、波形のよく似たいわゆる相似地震として発生するものが多い。時期的にまとまって群発的に生じた地震は相似地震であることが多く、同じ時期に複数の相似地震の発生することもあり、また、2年間にわたって同じ波形の地震が発生している例も見つかった。

ここでは1984年—1986年の火山性地震をとりあげる。この期間には火山灰の噴出活動や小規模の噴石活動もあり、火山活動との関連についても考察する。

#### 2. 1984—1986年の火山活動と火山性地震

1979年の噴火活動の後、阿蘇火山の火山活動は静穏となった。1980年2月以降阿蘇中岳第一火口には湯だまりが生じ火孔は閉塞状態となった。時には土砂噴出や噴湯現象もみられたが全般的に静穏に推移した。

1984年4月より湯だまりの水位が低下しはじめ、9月中頃には火口底の一部が露出した。それとともに火山活動は次第に活発化した。10月下旬には東側火口壁下に開いた新火孔(841火孔)から鳴動を伴った火山灰の噴出があり活発な活動を続けたが、11月12日に火孔のまわりの堆積物が崩れ、火孔は埋没した。その後

も土砂噴はみられたが12月中旬より活発化の傾向を示した。12月下旬には湯だまりはほとんどなくなり時々火山灰の噴出があった<sup>1)</sup>。

1985年1月18日、3月1日、5月6日にそれぞれ火口底に新火孔(851, 852, 853火孔)が確認され活動の中心が移動した。この間、火山灰を含んだ噴煙活動が続き、4月25日には火孔から高さ30mに達する火炎が観測され、火口内で噴石の噴出も観測されている。5月15日には852火孔と853火孔が合体し直径約40mの火孔(853火孔)となった。これ以降、噴石にスコリアと思われるものが多く含まれるようになり、6月になっても同様の状態が続いた。6月下旬になって降雨のため853火孔内にかなりの雨水や土砂が流れ込んで火孔は閉塞状態となり、湯だまりが形成されて火山灰等の火山活動は停止した。その後1985年末にかけて湯だまりが減少の傾向を示し小規模な土砂噴・噴湯現象が観測された<sup>2),3)</sup>。

1986年には降雨とともに湯だまりの湯量は増加したが、一般的には湯量は減少に向かい、6月には東側火口壁下に噴気孔が開孔し青白ガスを噴出しているのが観測されたが、この噴気孔は湯量の増減に伴って埋没・出現した。湯量の少ない時には土砂噴出もみられたが、表面活動は全般的には静穏に推移した<sup>3)</sup>。

1984—1986年の火山性地震の発生の月別頻度分布を、京都大学理学部火山研究施設の火口周辺地震観測網で観測したデータにより、**Fig.1**に示す。これはトリガー方式の観測によって検知された地震数であり、

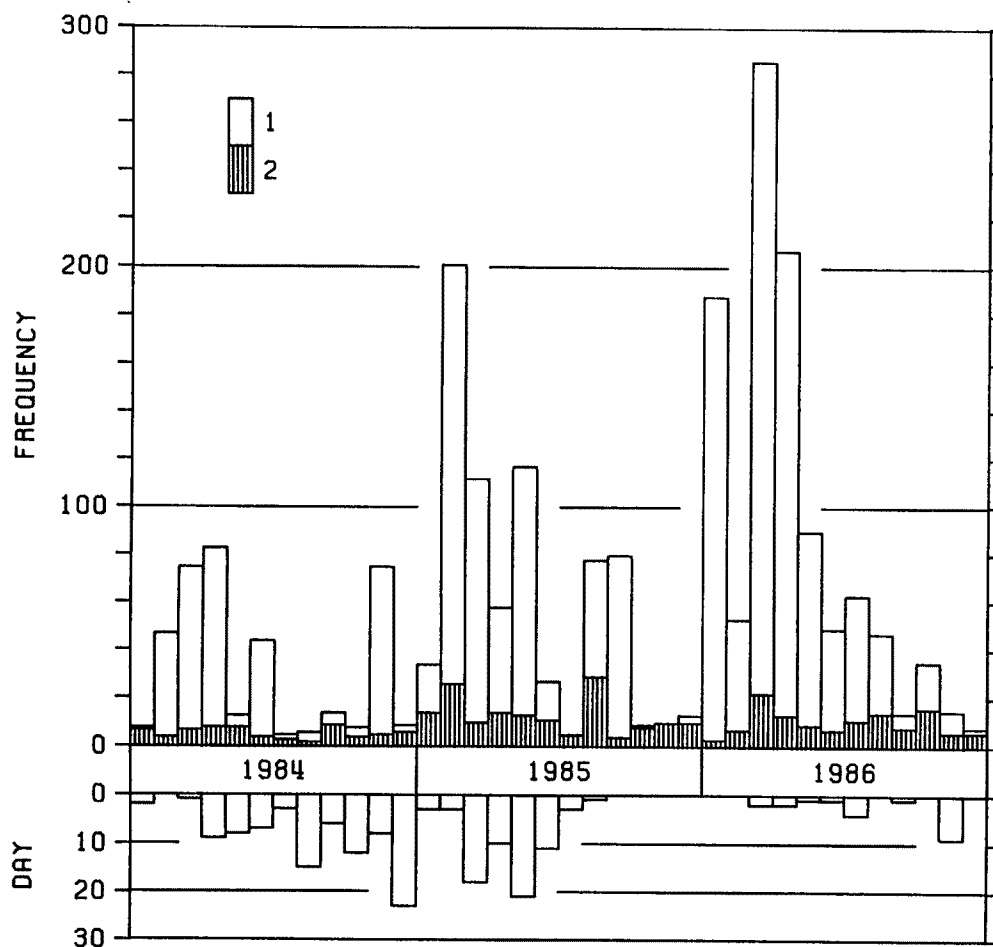


Fig. 1. Monthly frequency of volcanic earthquakes (upper) and days for the appearance of continuous volcanic tremors (lower).

1: low frequency events, 2: high frequency ones.

KAW, SUN, KAE の3観測点の全てにおいて、速度振幅の最大が  $6 \times 10^{-6} \text{m/s}$  以上の地震である。下欄には火山性地震の場合と同じ基準で観測された、火山性連続微動の出現した日数が示されている。阿蘇火山では火山性微動が火山活動の指標として重要であり、この連続微動出現日数が先に述べた火口表面活動とよく対応している。しかし、火山灰を噴出していた時期でも火山性微動エネルギーは1日当り  $10^{12} \text{erg}$  であり、活動の程度は、1979年の噴火活動時の  $10^{14} \text{erg}^4)$  に比べて2桁も低かった。

**Fig. 1** では火山性地震が低周波地震と高周波地震に分けて示されている。火山性地震は地震波形のみかけの周波数で、10 Hz よりも高周波成分の顕著な高周波地震と、10 Hz よりも低周波成分が目立つ低周波地震に分けることができる。しかし、この区分は、全ての地震について必ずしも明白ではない。なかには、高周波成分と低周波成分の混在している地震があり、相対的に規模の大きな地震は高周波成分が顕著である。震源の浅い場合には火口（震央）に近い観測点 KAE では短周期成分が目立つことも多い。また、地盤の特性を反映して高周波成分の卓越する観測点 (KAW, UMA) と低周波成分の卓越する観測点 (SUN, KIS) がある。したがって、**Fig. 1** では、明らかに高周波地震とみなせる地震のみを高周波地震として表示し、それ以外の地震を、中間的な地震も含めて、低周波地震として表示している。

高周波地震は **Fig. 1** に示されるように、月10個程度発生しているが、数は少なく、特に火山活動に伴って増減するといった傾向は見られない。時には数個が群発的に発生することもあるが、通常、散発的に起こる。この期間で、1985年8月30日16—19時に19個の高周波地震が群発的に発生したのが、唯一の例外である。

**Fig. 1** にみられるように、低周波地震は発生にむらがあり、群発して起こることが多い。しかも、時間的に集中して発生した低周波地震は、相互に波形の類似したものが多い。**Fig. 1** では低周波地震としたが、この内にはみかけの周波数が5 Hz 以下のいわゆる孤立型火山性微動も含まれている。

**Fig. 1** には、各年の前半に地震発生頻度の山がみられる。1984年4月から湯だまりの湯量が減少しはじめたがこの前に地震が発生した。1984年11月の地震は1時間半の間に群発したもので、一度開孔した火孔が埋

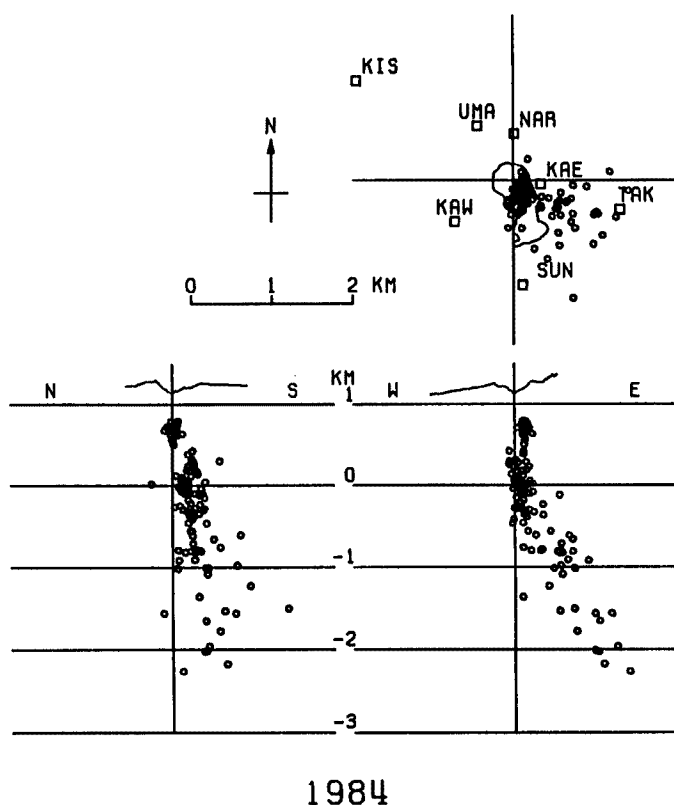


Fig. 2. Map showing location of seismograph stations and distribution of volcanic earthquakes near the crater of Naka-dake, Volcano Aso, in 1984.

没している時に起きている。1985年前半の地震は、噴石活動を含む火山活動の活発な時期に対応している。6月下旬に火孔が閉塞し火山活動が一応収まった8—9月に、8月30日の高周波地震の群発をはさんで、低周波地震活動がみられた。1986年に入っても地震活動の高揚がみられたが、火口表面活動が年の後半に向かって上昇傾向にあるのに反して地震発生頻度は減少している。次の活動への準備段階とも推測される。1985年前半を除けば、いずれも火口表面活動が相対的に静穏な時に地震活動がみられた。

阿蘇火山の活動火口のある中岳周辺に発生する火山性地震の震源分布を1984年を例として **Fig. 2** に示す。震源分布は毎年ほとんど変化なく同じような分布を示す<sup>5)</sup>。すなわち、震源位置は火口直下であり、深くなるにつれて南東に広がる傾向を示す。低周波地震の震源は浅く海拔-1 km よりも深くなることはほとんどない。これに対して高周波地震は海拔 0 m から-3 km の間で発生する。

### 3. 相似地震

#### 3.1 分類

観測点毎に、観測された火山性地震の記録波形を並べてみて、その振幅の山谷の、時間的な位置の対応のよいものを、相似地震と称することにする。実際に、このような作業を行って相似地震をひろいあげた。こ

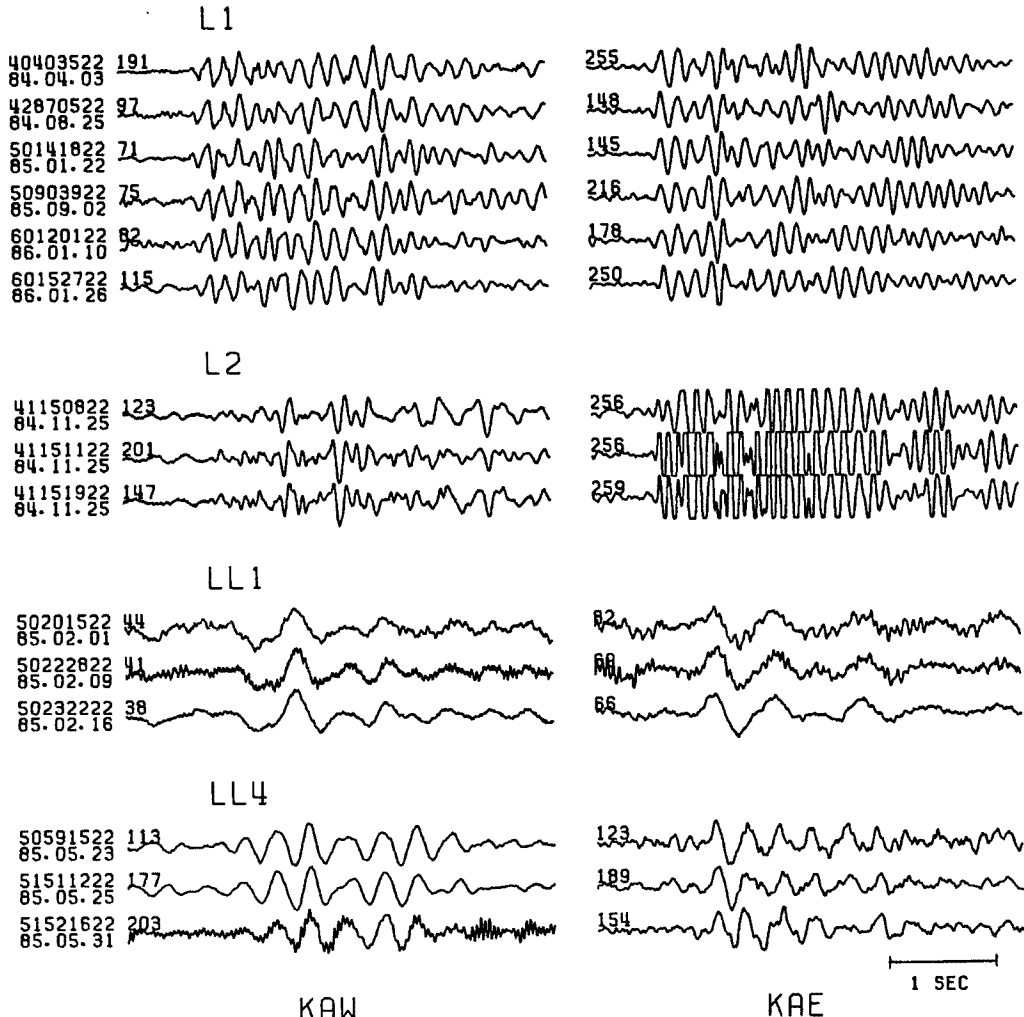


Fig. 3. Waveforms for the similar events.

これらの火山性地震は全て震源位置が求まっているわけではないが、これまでの震源分布 (Fig. 2) や各観測点での振幅分布から、震央は火口を中心とする限られた領域にあると考えられる。火口から離れた観測点 KIS では相対的に振幅も小さくなり S/N が悪くなる。したがって、KIS を除く 6 観測点の観測波形について、それぞれに波形の類似する地震を相似地震としてひろいあげた。

相似地震の例を 2 観測点 KAW と KAE について地震の発生日時とともに Fig. 3 に示している。この図では、振幅巾が等しくなるように記象が調整されている。記象に付された数字は各記象の最大記録振幅を示しており単位は  $1.3 \times 10^{-7} \text{m/s}$  である。これらは固有周期 1 秒の地震計で観測された記象であるが、相似地震としてグループ分けした地震波形の山谷の対応の良いのが認められる。高周波成分が重なっている場合もあって、振幅の小さい一見して類似性の目立たない部分でも、記象を並べてみると、振幅の大きい主要部

Table 1. Groups of similar events

group	frequency Hz	number	period of appearance
L1	6 - 7	453	24 months
L2	7 - 9	64	1.5 hours
L3	4 - 9	32	50 days
L4	5 - 7	67	14 days
L5	4 - 6	25	5 days
LL1	2(- 3)	75	42 days
LL2	4(- 9)	10	10 days
LL3	3 - 4	19	8 days
LL4	3	80	10 days
LL5	3 - 5	13	4 days

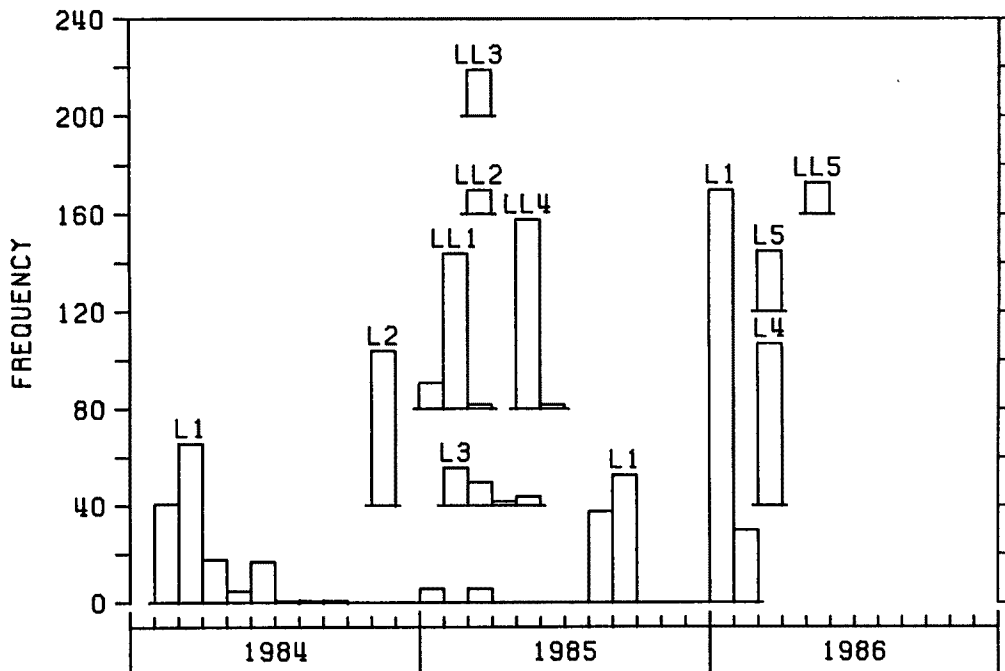


Fig. 4. Monthly frequency of the similar events.

はもちろんのこと、振幅の小さい部分でも山谷の対応が認められる。

相似地震の地震個数が10以上のものが、1984—1986年の3年間に10群みつかった。これらを **Table 1** に示す。また、発生の時間的経過を **Fig. 4** に示す。これら10群の相似地震はいずれも低周波地震であって、Lグループ (L1-L5) はみかけの周波数が5-10 Hz のもの、LLグループ (LL1-LL5) は2-4 Hz のものである。LLグループはいわゆる孤立型火山性微動である。

Lグループは、火口に近い観測点で高周波成分の目立つ L2, L3 群と、全ての観測点で同じ周波数の L1, L4, L5 群に分けることができる。LLグループもまた、**Fig. 3** に示したみかけの周波数の低い LL1 群、Lグループに近い LL2 群、これらの中間に相当する LL3, LL4, LL5 群、の3つに分けることができる。特に LL4 群は **Fig. 3** に示されるように正弦波的な3 Hz の振動である。

LLグループのうちの LL1-LL4 群はいずれも火口表面活動の活発な時期に発生した。1985年前半期には次々と火口底に新火孔が開孔し活動の中心が移動したが、LL1 群は851火孔の開孔と、LL2, LL3群は852火孔の開孔と、それぞれ時を同じくして発生しはじめた。LL4 群は853火孔の開孔後のスコリアを含む噴石活動の期間中に起こっている。

1群の出現期間は、2年以上 (L1) から2時間 (L5) とまちまちであるが多くは5日—2週間である。

高周波地震では、1985年8月30日の群発的に発生した地震のうち、連続して起こった地震の間で、2, 3例、相似地震がみられたが、個数は2—3個と少ないので **Fig. 4** では除外されている。同様のことは低周波地震にもあり、数が少なくて **Fig. 4** に示されていないものも多く存在する。

### 3.2 震源位置

高周波地震はほとんどの場合、5点以上の観測点で初動が検出可能で、震源位置を決めることができるのに対して、低周波地震は初動の立上りが不明瞭な場合が多く震源位置の求まらない場合が多い。さらに、火山連続微動が初動の S/N を減じている。したがって、低周波地震である10群の相似地震のうち、通常の観測作業で震源位置の求まっているのは、L1, L2, L3 の3群であった。これらの震源分布を **Fig. 5** に示している。

L1 群は2年以上にわたって類似の波形の保たれている地震群である。数が多いので1984年と1985年に分けて示されている。これらは火口直下の海拔0m 付近を中心に分布している。

L2 群は、1984年11月25日23:44から26日01:15の間に発生した地震群であり、1.5時間に66個の地震を観測した。震源分布の中心は火口直下の海拔0.7 km、火口底から0.5 km の位置にあり、浅いところで発生した。これは、1984年11月12日に火孔のまわりの堆積物が崩れて、10月下旬に開孔した841火孔が湯だまりに埋没し表面活動の低下した時期に当っており、12月中旬のやや活発化する前に当る。阿蘇山測候所の11月26日の火口観測によって湯だまりの減少が確認されており、これとの何らかの関係が推測される。

L3 群は、表面活動の比較的活発な1985年2月から5月に発生した。地震波形は一見すると L2 群と同じように見えるが波形をつきあわせると明らかに異なる群に分かれる。L3 群の地震の初動は S/N が悪く、震源位置は **Fig. 5** にみられるようにばらついている。しかし、その位置は L1 群と L2 群の間で起こっていることが推定される。

LLグループの相似地震の震源位置は求まっていない。火口に近い観測点と遠い観測点の最大振幅の比が、Lグループに比べて LLグループの方が1に近いことから、LLグループの方が深い所で起こるとも考えられる。しかし、LLグループは、みかけ周波数の低いこと、前節に述べたように表面活動の活発な時期に起こること、からこのような判断は早計であろう。

### 3.3 考察

相似地震は、発震機構が等しくてかつ波動の伝播路が同じであるがゆえに、観測した地震記録波形が似ると考えられる。火山直下の浅いところで繰り返す地震を発生させる機構とはどのようなものであろうか。有珠火山の1977—1978年の活動時にも相似地震 (earthquake families) が起こったが、溶岩ドームが形成さ

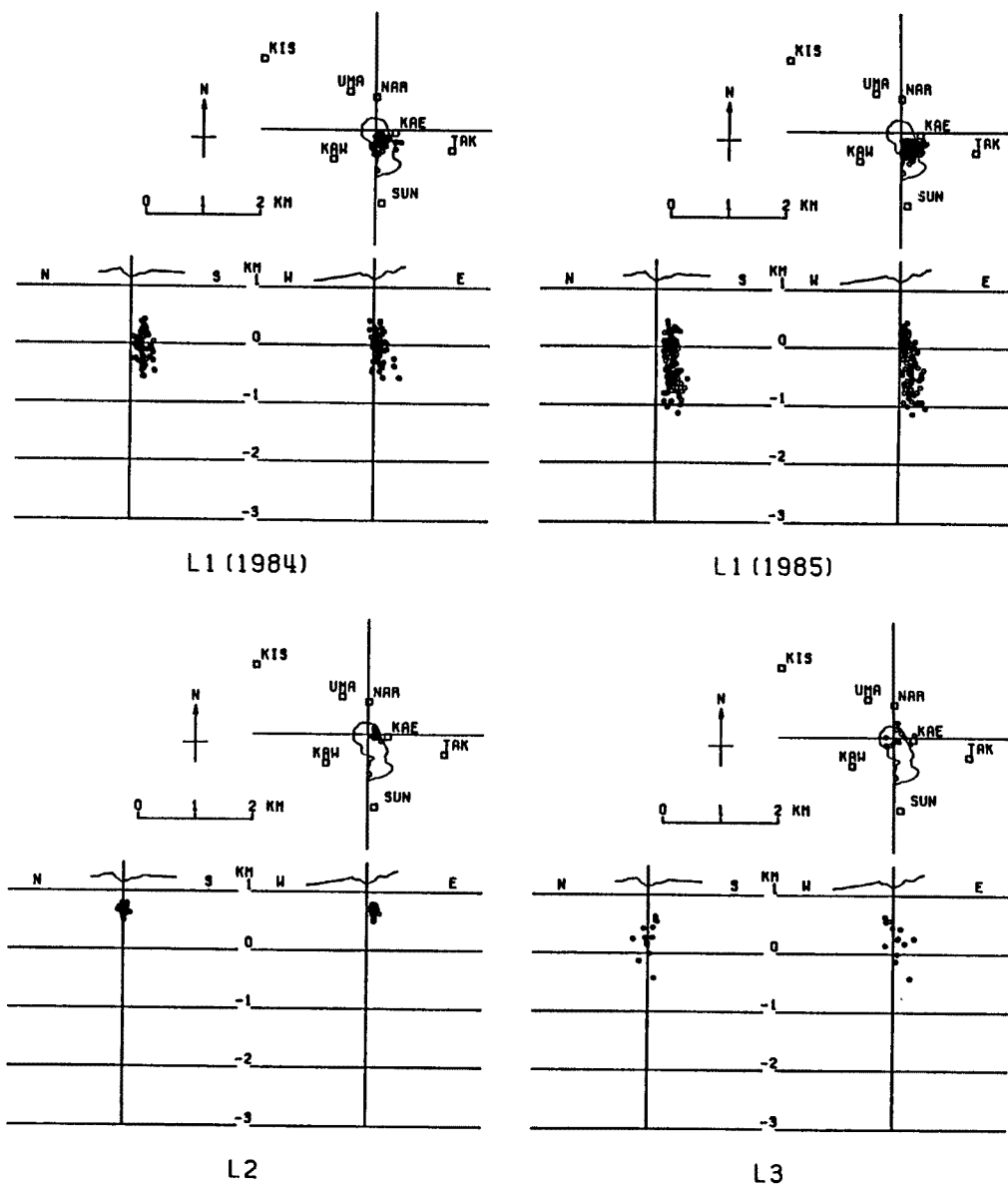


Fig. 5. Distributions of the similar events.

れる時のスティックスリップ運動，すなわち，断層運動とされている<sup>6)</sup>。事実，有珠火山ではオガリ山の成長という地殻変動が現れている。

しかし，阿蘇火山では有珠火山ほどマグマの粘性は高くないので断層運動は考えにくい。また，地震の規模も小さく，断層運動のような地殻変動の存在を示唆するような観測データは得られていない。

阿蘇火山における火山性地震の震源は深部からほぼ垂直に活動中の火口底へ向って分布しており，火山物質が火口へ上昇するときに通る火道の位置を暗示する。阿蘇火山の孤立型微動は，従来，火道内での物質の動きに関係して発生するものと考えられている。LL グループの相似地震は火山性孤立型微動に該当するが，火山表面活動の活発な時に現れている。

Fig. 6 には L1 群の発生時間間隔を置いた相似地震 3 例の，各観測点における上下動の記象（左側）と，それに対応するフーリエ・スペクトラム（右側）が示されている。スペクトラム図では，縦軸は対数目盛で

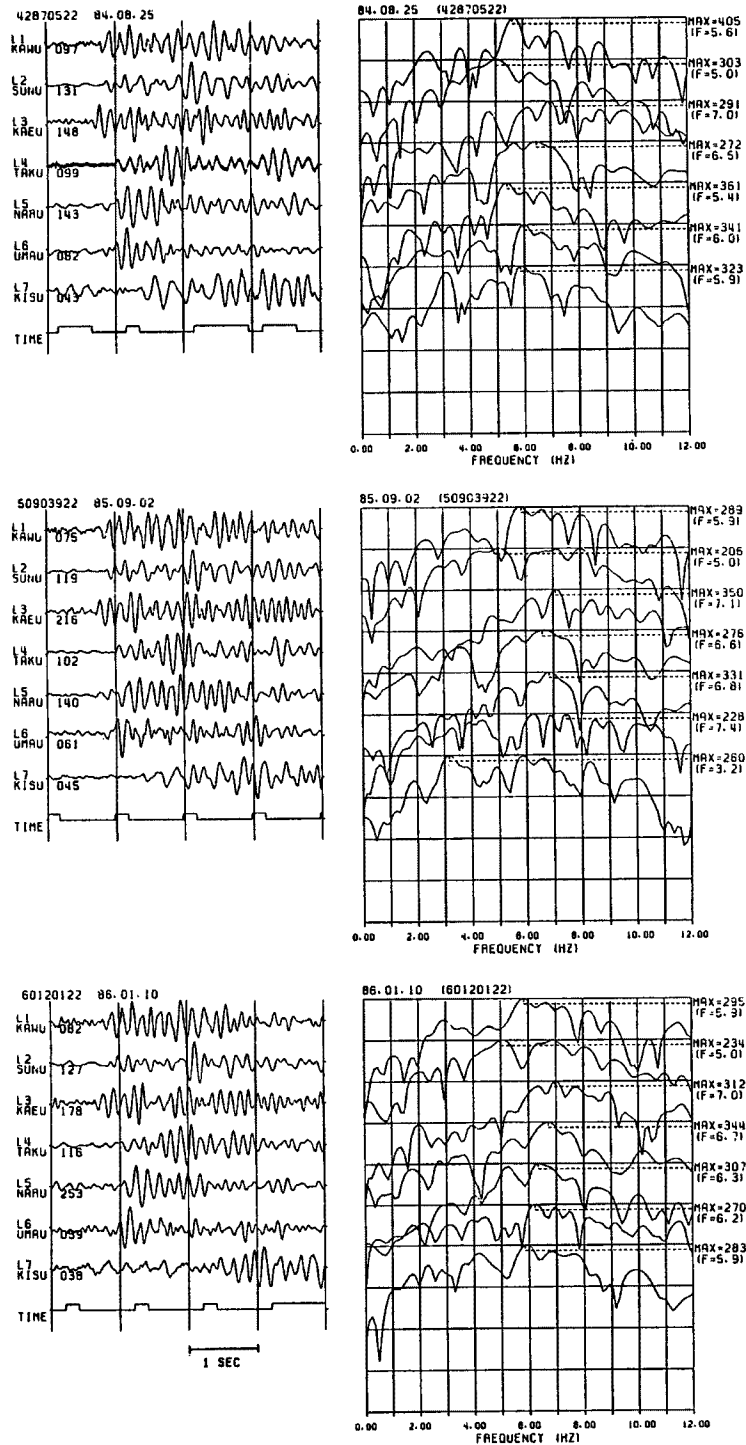


Fig. 6. Waveforms and their Fourier spectrum for the group L1 of similar events.

表されており、1目盛が1桁に相当する。右端には最大スペクトル振幅の相対値とその周波数が付されている。  
Lグループの相似地震は Fig. 3 や Fig. 6 の記象にみられるようにS波を識別することのできない地震で



ある。L1 群のように2年間も類似の波形の地震が起こることから、Lグループの相似地震も孤立型微動と同様の機構で発生すると考えるのが妥当であろう。

波動のエネルギーの時間的配分という観点から相似地震波形の包絡線を想定すると、地震波形の山谷の位置の対応のよさに比べてかなり類似性が劣る。また、同じ群の地震の間で観測点間の振幅比が必ずしも一定でないことが、Fig.3 において記象に付された最大振幅の数値を比べてみても明白である。(ただし、数値が250以上の場合には振幅が、+側または-側の、片方または両方でスケール・オーバーしている可能性があり、比較できない。)さらに、Fig.6 のスペクトラムは、それぞれの観測点における地震の波形間の類似性に比べて、観測点間の差異が明らかである。

これらのことは相似地震間での発震機構の違いの現われとも考えられる。相似地震は低周波地震であるので、ほとんどの場合、Fig.3 や Fig.6 にみられるように、初動は鋭い相ではじまるわけではない。したがって、初動の判定にはある種の任意性の含まれるのはやむをえない。小さい地震動の場合には初動が隠されていることもありうるし、実際に、記象上で初動と判定できる時刻から最初の山または谷までの1/4周期の時間が相似地震間で一定でないことも事実である。しかし、同一群に属する相似地震の初動がすべて同じセンスではじまっているとはどうしても読みとれない場合がある。各観測点への振幅分布が同一群の相似地震の間で必ずしも一定していないこととあわせて考えると、異なる機構の現象が原因となって相似波形をもった振動が形成されることを示唆しているのであろうか。

1984年から1986年の3年間に10群の相似地震として選びだされた地震の数は838個で、低周波地震の45%に当る。この期間の低周波地震の発生頻度分布は各年の前半に山があり、相似地震はこの山の時間的に早い時期に起こっている。すなわち、まず相似地震が発生し次いで相似地震に属さない地震が目立つようになる。すなわち、地下深部からのエネルギーの供給により生じた応力が相似地震として解放され、さらに、相似地震の発生によって生じた2次的な応力分布がまわりで地震を起こすという過程が考えられる。

これまで述べてきたことは推測の域をでないところが多い。また、火山活動との関係については3年間のつきあわせにしか過ぎず、今後の観測による検討はもちろんのこと、以前に遡る必要もある。しかし、阿蘇火山の火山活動の状況を判断し、その推移を予測する上で、相似地震は火山性連続微動とともに重要と考える。

#### 4. ま と め

阿蘇火山の中岳火口周辺で発生する火山性地震は、みかけの周波数 10 Hz を境として高周波地震と低周波地震に分けることができる。これらの震源は現在活動中の中岳第一火口直下にある。

低周波地震は火口底から海拔-1 km までのおよそ 2 km の範囲で発生するのに対して、高周波地震は主に海拔 0 m から-3 km の間に起こり水平的にも震源域は広い。

高周波地震は数も少なく月平均10個程度であり、その発生は阿蘇火山の表面活動と無関係にみえる。

低周波地震は群発的に発生することが多く、相似地震であることが多い。1984—1986年で10群の相似地震を識別した。これら10群の相似地震はみかけの周波数が 2-4 Hz の LL グループ (LL1-LL5) と 5-10Hz の L グループ (L1-L5) に分けることができる。

LL グループの相似地震は火山表面活動の活発な時期に発生するのに対して、Lグループは静穏期または高揚期であってもその中の活動休止期に起こる。

阿蘇火山においてはこれら相似地震は火道での物質の移動と関連して発生する孤立型微動と考えられる。

1984—1986年に相似地震として識別された地震の数は838個で、この期間の低周波地震の総数の45%に当る。発生の経過に関しては、一連の地震活動の初期に相似地震が発生し、徐々に相似地震でない地震へと変わる傾向がある。この場合初期に発生する相似地震は、表面活動の静穏期にはLグループであり、高揚期にはLLグループであった。

おわりにあたり、本稿で使用した観測データを得るための、観測に携わってこられた京都大学理学部火山研究施設各位に御礼申し上げます。

なお、この研究に使用した経費の一部は、文部省科学研究費補助金（自然災害特別研究(2)、代表者：京大防災研・西 潔）によったことを付記します。

#### 参 考 文 献

- 1) 気象庁：火山報告（1984年），Vol. 24, 1985.
- 2) 気象庁：火山報告（1985年），Vol. 25, 1986.
- 3) 阿蘇山測候所：定期火山情報・臨時火山情報，1985・1986.
- 4) 須藤靖明：火山性微動の消長（1978—1982年），阿蘇火山の集中総合観測（第2回）報告，1984，pp. 1-6.
- 5) 小野博尉：阿蘇火山中岳周辺の地震活動（1981年），阿蘇火山の集中総合観測（第2回）報告，1984，pp. 7-16.
- 6) Okada, Hm., H. Watanabe, H. Yamashita and I. Yokoyama: Seismological significance of the 1977-1978 eruptions and the magma intrusion process of Usu volcano, Hokkaido. J. Volcanol. Geotherm. Res., 9, pp. 311-334.