

## 噴火の前後に発生する火山性地震のスペクトル-桜島, 1975年2月の活動-

著者	角田 寿喜, 野中 義彦
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	12
ページ	1-14
別言語のタイトル	Spectra of Volcanic Earthquakes Related to the Eruptions of Sakura-jima Volcano I February, 1975
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10232/00006929">http://hdl.handle.net/10232/00006929</a>

## 噴火の前後に発生する火山性地震のスペクトル —桜島, 1975年2月の活動—

角田 寿喜\*・野中 義彦\*\*

(1979年9月7日受理)

Spectra of Volcanic Earthquakes Related to the Eruptions of  
Sakura-jima Volcano in February, 1975

Toshiki KAKUTA and Yoshihiko NONAKA

### Abstract

Spectral features of seismograms are investigated for the events closely related to four eruptions on February 26, 27 and 28, 1975, based upon an assumption that variations in spectral compositions can be interpreted as the changes in focal depths of events.

A swarm of volcanic earthquakes started about 17 minutes before the eruption of 03h55 (JST) on February 26. The highest activity of the swarm occurred at the eruption and focal depths of these events were as deep as that of the explosion earthquake. These facts indicate that the generation of events is correlated to the explosion mechanism.

Two eruptions occurred at 03h55 and 04h48 on February 27. No remarkable precursory activities of volcanic earthquakes were observed for the former eruption. Events related to the latter were first observed about 35 minutes before the eruption. These events are readily distinguished from those following the former eruption by the predominant frequency of power spectrum, spectral composition, running spectrum or seismic activity. Energy sources of the two eruptions were at small depth under the vent so that continuous tremors accompanying the emission of a large quantity of volcanic smoke were observed just before the eruptions.

Precursory activities of strong B-type volcanic earthquakes occurred 8 minutes before the eruption of 00h16 on February 28, which was the most violent one of eruptions since January 1, 1975. Running spectra of Ct-type were pronounced for these events though they had features of another type in a broad view of spectrum. In addition to this phenomenon, little emission of volcanic smoke and low predominant frequency in the spectrum imply that a great deal of energy might be interrupted at a depth from flowing up.

### 1. はじめに

火山性地震や微動は、エネルギー蓄積の度合とかマグマの通り道の状況など、火山内部の状態によって、時により、波形や振幅、発生頻度、震源域、発震機構などを複雑に変えて出現す

\* 鹿児島大学理学部地学教室 Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, Japan.

\*\* 千葉県立京葉高等学校 Chiba Prefectural Keiyō Senior High School, Ichihara City, Chiba Prefecture, Japan.

る。ある場合には、火山体深部で発生した地震活動が噴火の前駆現象となるが、有感地震を含むような活発な地震活動も、それだけで終わってしまう場合もある〔桜島に例をとれば、1972年10月2日の噴火（鹿児島地方気象台、1972）と1968年5月の有感地震群発（鹿児島地方気象台、1969）〕。また、B型地震の群発と噴火との対応も一般的に認められる現象ではあるが、「例外」が多いのも事実である。これらはいずれも、火山現象が相互に複雑に絡み合って進行しているのに、その一断面しかみていないために起こることである。現象の発生様式には、個々の火山特有の性質もあるとはいえ、基本的には、その時々火山の状態に対応した特徴を有し、将来の火山活動に関する情報を呈示している。その特徴を適確に掴み、情報を読取るには、できる限り総合的な調査をすることが必要で、その意味では火山性地震や微動のスペクトル構造を調べるのは重要である。すなわち、地震の発震機構や震源の深さ、波が通過する媒質などの変化は、観測される地震波のスペクトル構造を変えるから、そこには火山の活動状態の複合的な反映が存在するはずである。

この論文では、1975年2月の桜島火山の総合調査の際に得られた観測資料にもとづき、噴火の前後に群発する火山性地震のスペクトル構造を時間的変化に注目して調べる。観測点は、東桜島町有村の鹿児島大学桜島火山観測所周辺に展開された臨時観測網によるもので、使用した換振器はすべて固有周波数1Hzの上下動である。これらについての詳細はすでに前の報告（角田・吉山、1977）にあるので、ここでは観測点の配置（Fig.1）と地震計の総合周波数特性（Fig.2）を示すにとどめる。

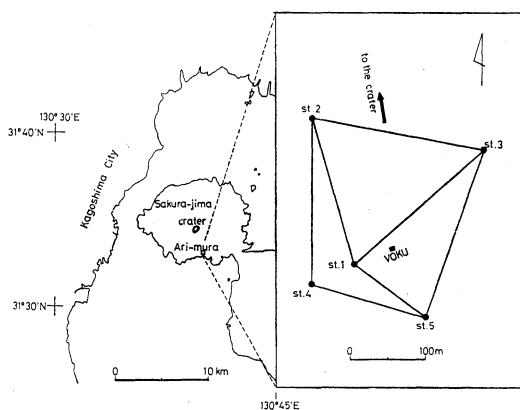


Fig. 1. Index map of Sakurajima and the observation net (enlarged in the right). VOKU is the volcanological observatory of Kogoshima University.

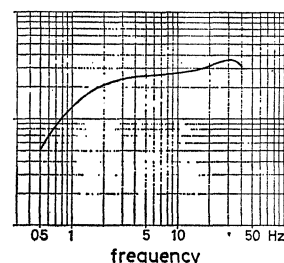


Fig. 2. Frequency response of the system.

スペクトルの計算には、hanning window をかけて Fourier 積分をおこなう方法を用いている。短い時系列の解析には、Maximum Entropy 法 (MEM) が有効といわれているが、適当な長さの時系列をとれば、ここで用いる方法は、分解能の点でも MEM に劣らず、結果の安定度では優れている。ただし、適当な長さとは対象とする波の周期との比で決まる量である。

## 2. フーリエスペクトルの特徴

地震波のスペクトル構造は、観測点近傍の地下構造によって、変形、増幅される。したがって、ごく近接した観測点であっても、地質条件などが異なれば、地震の波にあらわれる周波数

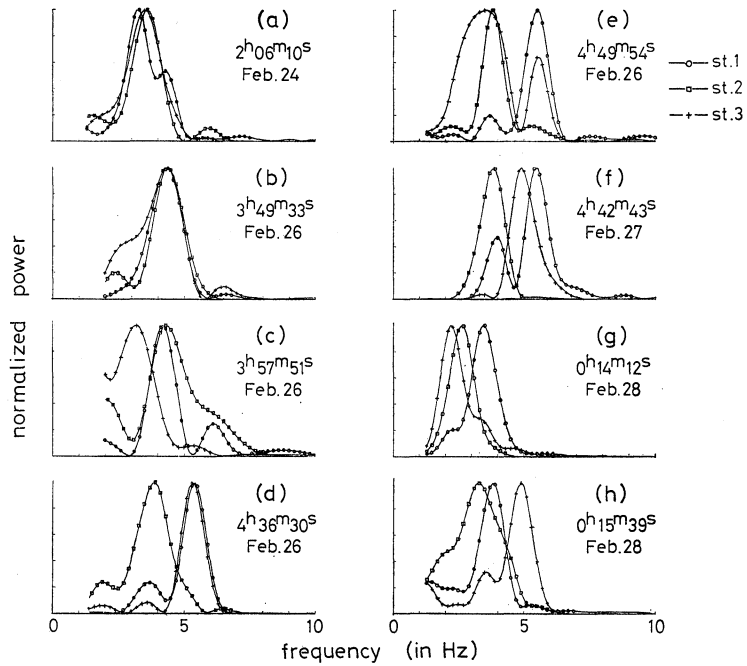


Fig. 3. Comparison of power spectra between three stations. Record length of 1.0 to 1.5 sec for the initial part of each seismogram is analyzed. The power spectrum in linear scale is normalized.

特性も変化する。

Fig. 3 は火山性地震の初動部分についての power spectra の例で、それぞれの地震ごとに、三つの観測点間での違いを示したものである。ただし、計算は 0.02 秒間隔で数値化された長さ 1.0~1.5 秒の記録についておこなわれ、観測点としては、観測システムが同一型式の st.1~3 が選ばれている。前回の報告(角田・吉山, 1977)にもあるように、これらの観測点における火山性地震の卓越周波数は多くが 2~6 Hz の間にあるが、三つの観測点間の関係でみると、Fig. 3 (b) のように卓越周波数が完全に一致する例は少なく、ある場合には st. 2 でより低周波の波が卓越し [例えば Fig. 3 (d, f)], ある場合には st. 3 でそうなる [Fig. 3 (c, g)] というように、個々の場合で多様である。これらの関係は、観測点ごとにとった卓越周波数の頻度分布を比較することによって、大局的にながめられる (Fig. 4)。これによると、st. 1 と st. 3 とでは低周波の側と高周波の側に分離したふたつの群が認められるのに対し、st. 2 ではその分離が消えている。また、相対的に高い周波数の波が卓越しやすいのは st. 1 で、低い周波数の卓越しやすいのが st. 3 である。

火山の状態変化に関する情報として、地震波スペクトルの時間的変化を追跡するには、観測

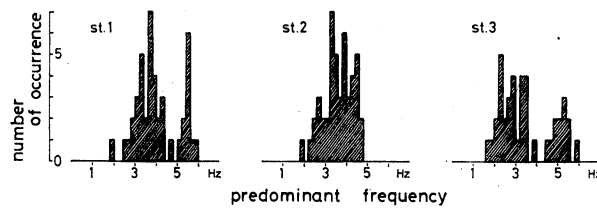


Fig. 4. Histograms of predominant frequencies of power spectra at three stations.

点の地盤特性が震源域あるいは波の伝搬経路などの変化の検出に障害とならないことが必要である。それには、地震のタイプが異なれば、観測されるスペクトルに明瞭な違いがあらわれること、すなわち、卓越周波数の頻度分布において明瞭な群としての分離が認められることが基準となる。以下、この条件を考慮し *st. 3* を観測点として選ぶが、記録の状態という点でもこの観測点が最良であった。

火山性地震では S 相の不明瞭な地震が発生数の大部分を占めるというひとつの特徴がある。いわゆる B 型地震と呼ばれるもので、これらにおいては S 相ばかりか初動さえもが不明瞭になるものも少なくない。このような条件下での対応としては、最大振幅部分に焦点をあてることが考えられる。当然、波動論的な不明確さは避けられないが、少なくとも、現象論的にはすべての地震を統一的に扱うことが可能である。

最大振幅部分を取扱う場合には、波動論的あいまいさがあることと、いくつかの波群が含まれている可能性のあることを考慮すれば、適当な長さの記録についての *running spectrum* をとり、周波数変化の *pattern* をみるというのが、スペクトル解析のひとつの方法になりうる。Fig. 5 には最大振幅部分を含む 5 秒間の長さの記録について計算された *running spectrum* の例が示されている。ただし、ここでの計算は、それぞれ 1.5 秒の長さごとにおこなわれ、0.2 秒ずつずらして繰返されている。サンプリングの間隔はすべて 0.02 秒である。図には、こうして計算された *power* の値が規格化され、到達時間の関数として記されている。なお、実線で囲まれた部分はスペクトルの *peak* の位置であり、黒く塗り潰された部分は、そこに最大の *peak* があることを示している。

一般的にいて、*running spectrum* にみる構造はきわめて複雑である。卓越周波数が一定値に安定する部分はせいぜい 1~2 秒間で、その間に、正分散的あるいは逆分散的な波群が入り

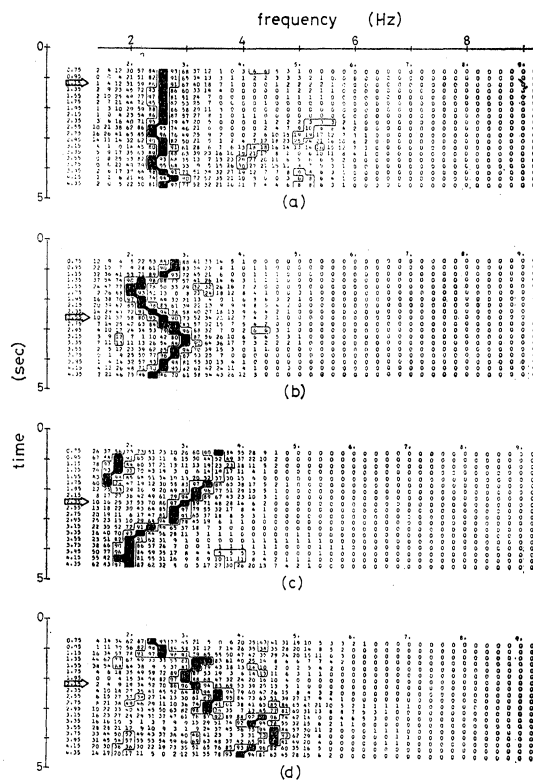


Fig. 5. Representative patterns of running spectra classified into four, (a) constant type (Ct-type), (b) normal dispersion type (Nr-type), (c) inverse dispersion type (Iv-type) and (d) random type (Rd-type). This classification is based upon the feature of the spectrum at the power maximum which is shown by an arrow on the left column. The power in linear scale is normalized to 99 at the maximum in each spectrum. The area contoured with a thin curve shows a location of a peak or of a group of peaks. The maximum is shaded. Analyses are made for a record length of 5 sec around the maximum amplitude of the seismogram with a sampling rate of 0.02 sec.

乱れて現われる。したがって、その特徴を掴むには何らかの制限が必要であるが、ここでは火山性地震の特性を考慮に入れて、power が最大になる部分の卓越周波数と周波数変化の pattern に注目することにしよう。Fig. 5 は、この方法で分類された周波数変化パターンの4つの典型例で、左側時刻欄の矢印が power が最大になる時刻を示している。ここで (a) はスペクトル peak の位置が安定していて変動の少ないタイプの「一定値型 (Ct-type)」, (b) は周波数の低い波ほど早く出現する「正分散型 (Nr-type)」, (c) は、逆に、周波数の高い波が先に現われる「逆分散型 (Iv-type)」である。また、(d) は上記の分類では判定の難しいタイプのもので、ここでは「ランダム型 (Rd-type)」とされている。

正分散あるいは逆分散という現象は、ふつう、波の伝搬経路の状態に起因するものとされ、地下の構造をもとめるための資料として広く使われている。しかし、Fig. 5 にみられる分散現象は、解析される地震の震源がすべて火口周辺にあって震央距離もせいぜい 2~3km であることを考慮すれば、波の伝搬する経路の違いとするには、変動量が大きすぎて定量的に無理がある。したがって、これらの pattern の変化は主として震源特性の変化に起因するものと推定される。

### 3. スペクトルの時間的変化の要因に関する考察

DIBBLE (1974) は、Ruapehu 火山 (New Zealand) の活動に伴う火山性地震と微動について power spectrum の連続記録をとり、seismic power の変化と発生する振動のタイプの変化を、噴火活動との関連で調べている。彼の報告では周波数の変化については触れられていないが、下鶴 (1978) はその power spectrum に噴火の 10 数分前から 8Hz の波が出始めていることに注目している。

1930 年の阿蘇山の活動において、佐々 (1937) は、ある型の微動で噴火の直前に振幅が増大し周期が短くなるという現象を見つけ、これはその擾乱源が上昇してきたことを表わしていると考えた。一方、下鶴ほか (1975) は浅間山の噴火の前に頻発する B 型地震には極めて周期の短い波が卓越すると報告している。彼らは、これを噴火前駆期には水平動振幅に対する上下動振幅の比が静穏期に比べると大きくなるという現象と結びつけて、前駆期には B 型地震の震源が相対的に深くなり、波が減衰の小さな部分を通して到達するため、短周期成分の波が観測されるようになると解釈した。噴火直前の火山性地震あるいは微動に短周期成分が卓越することはかなり広範に認められる現象といえそうであるが、その振動源に関する解釈については、このようにまったく逆の見方が存在している。

岡田 (1973) は、数値計算により、火薬震源によって生じた Rayleigh 波について、火薬の位置が深いほど周波数の低いところでの source space function が相対的に卓越することを示している。岡田のモデルは表面層が一層の半無限弾性体で、震源はその表面層内にあるが、この結果は佐々 (1937) や菊地 (1962) の解釈と定性的には一致する。

卓越周波数が変化することについては、HARKRIDER (1964) や岡田 (1973) の理論式をみれば、異なる特性をもつ層へ震源が移ると起こることは明白である。したがって、表面波を主要な構成要素とする火山性地震や微動では、卓越周波数の時間的変化や短周期成分の卓越を震源の深さの変化に対応させることは可能であり、この際、周期の短くなることが震源の浅くなることに対応する。しかし、これは定性的に言えることであって、定量的にはまだ問題が残っている。前節でも述べたように、観測される火山性地震あるいは微動の卓越周波数は 2~6Hz である。その波長はせいぜい数百 m であるから、これらの波が表面波として現われるためには、

震源の火口からの深さは数百m以浅であることが必要である。B型地震の震源域は火口附近と考えられ(水上ほか, 1957), 実際に火口周辺に震源の決められた地震もある(西, 1971)が, みかけ速度と到来方向を調べる観測では水平面より上方から到来する波は観測されず(角田・吉山, 1977), しかも, 減衰の大きな表層附近を伝搬してくるのに数km先まで到達するような大きなエネルギーの地震が極く浅い部分で発生するのは可能かどうか, また, 爆発地震の震源は一般に火口から1~3kmの深さにある(西, 1976)のに, それに先行しあるいは続いて起こる地震群だけが, なぜとび離れた浅い箇所では起こるのか, などである。

佐々(1937)にしても, 下鶴ほか(1975)にしても, 波の周期の変化を震源の深さ変化に対応づける点は共通であるが, その波が表面波であるのか実体波なのかという波動論的解釈において見解を異にしている。その結果として, 同じ短周期成分が卓越するという現象を, 一方は震源域の浅部への移行と解釈し, 他方は深部への移行と解釈する。

観測される波が実体波であれば, その周期を震源の深さと対応づける理論的根拠は, 伝搬経路での減衰の違いを考える以外にはなく, やや弱い, この場合は震源を推定できるはずであるから, それによって判断すればよいであろう。

火山性地震のスペクトルにあらわれる時間的変化を震源の深さの変化に対応させる考えはきわめて自然の発想である。理論的には表面波の場合が考えやすく, また, B型地震には表面波が卓越するという考えは多い[水上ほか(1957), 吉川ほか(1963)など], 近接した観測点間でも波形の対応が良くない(角田・吉山, 1977)など, 表面波説にとって有利と思われるが, 震源の深さ変化を推定する方法として確立するには, 伝搬経路の構造を知ることを含めて定量的な吟味が必要である。

#### 4. 噴火活動とスペクトルの変化

観測は2月17日から28日の期間で, 22時から翌日5時までの夜間におこなわれた。この期間は, 桜島の活動が比較的活発で, 19, 20の両日を除き, 連日1回以上の噴火活動があったが, ここではそれらのうち, 26日3時55分, 27日3時35分および4時48分, 28日0時16分の噴火について, その前後に発生した地震の活動とスペクトルの特徴を調べる。地震の活動状況を表わすものとしては, 2分間単位で, 発生した火山性地震の最大振幅の2乗の和をとり, その時間的な変化をみることにする。ただし, 爆発地震は圧倒的に大きく記録上でも完全に飽和しているのを除外し, また, 単位も適当に規格化して図示している(Fig. 6, 10)。Fig. 6の白ぬきで記された活動は振動継続時間が約1分の火山性微動に対応するものである。多くの火山性地震の振動継続時間が概ね10~20秒であるのに比して, この微動の継続時間は長く, タイプが異なる。その発生パターンからみて, 噴火活動に直接関係があるとは思われないが, 地震活動が静かな時期には目立つので, 参考程度に示されている。Fig. 6(a)および(b)の上欄の白ぬき矩形は噴煙活動に伴って生ずる連続微動の発生を示している。矩形の長さはその継続時間を表わす。観測が夜間なので一々確認はされていないが, これから, 26, 27の両日には, 活発に噴煙活動の展開されたことが推定される。

##### (1) 2月26日 3時55分の噴火

Fig. 7(a)は, 26日0時から5時20分の間発生した地震の主なものについて, その初動部分1.0~1.5秒の記録から計算されたスペクトルの卓越周波数を時間の関数として示したものである。

Fig. 6. Activities of volcanic earthquakes except explosion earthquakes, (a) from 21h45 (JST) on 25th to 05h21 on 26th of February, 1975 and (b) from 22h21 on 26th to 05h04 on 27th. The activity is defined as the sum of squares of maximum amplitudes per every two minutes. The opened bar is the activity of the tremor with the duration about 60 sec. The rectangle in the upper part of the figure shows the duration of continuous tremors accompanied with the emission of a large quantity of volcanic smoke.

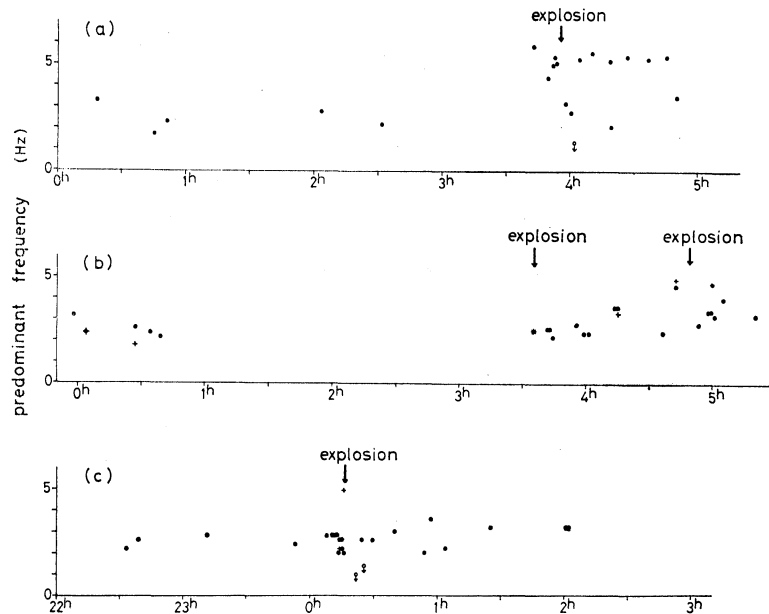
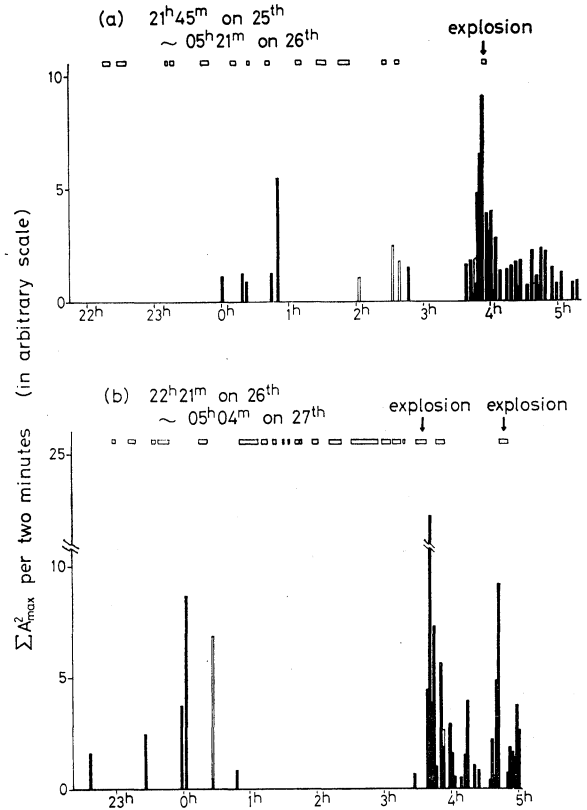


Fig. 7. Predominant frequency of power spectrum versus time, (a) from 00h00 to 05h20 (JST) on 26th, (b) from 23h50 on 26th to 05h30 on 27th and (c) from 22h00 on 27th to 03h10 on 28th. The closed circle in (a) or the cross in (b) and (c) is the result by the analysis of the initial part of the seismogram. The closed circle in (b) and (c) is that for power maximum. The open circle with an arrow in (a) and (c) indicates that the predominant frequency is lower than the value. A result for a continuous tremor just before the eruption of 03h35 on 27th is shown in (b) with a star mark.



この日の観測は25日21時45分に開始されているが、26日0時までの間に顕著な地震活動は認められない〔Fig. 6 (a)〕。噴火の前駆現象としては、卓越周波数5~6Hzの地震群の活動が目につく。噴火の僅か17分前から始まるこの活動は、その卓越周波数が、それ以前の活動に比べて著しく高いことが特徴である。噴火の後には卓越周波数の低い地震もいくつかみえるが、これらは、長周期の波がかぶさっていたり、あるいは later phase の混入によってみかけ上現われたもので、基本的には同一の地震群に属するものである〔たとえば、Fig. 3 (c, e)〕。この地震群の多くは、先に述べた st. 2 での卓越周波数が他の観測点に比して低く決まるものに相当し〔Fig. 3 (d, f)〕、そのために計算の精度は概して良くないが、波の伝搬するみかけ速度は相対的に大きく、その到来方向は北北東ないしは北北西に決まる。したがって、震源は火口周辺のやや深部にあると推定される。ちなみに、集中観測（加茂ほか、1975）のデータより決めた3時55分の爆発地震の震源は、南岳火口の北方約1kmの、深さが海面下1.2kmの位置になるが、この爆発地震について計算されたみかけ速度は先の地震群のものと大差はない。

これ以外の噴火前の活動としては、0時01分から0時52分間に起きた6個の地震と2時47分の地震、他には2時03分から2時40分間に発生した4個の振動継続時間の長い微動があるだけで、発生時刻からみても、卓越周波数からみても、これらの地震と先の地震群の違いは著しく、活動に大きな隔たりが認められる。噴煙現象が噴火の直前までの約70分間顕著ではなかったこと、これに先立つ噴火が13時間前（25日14時53分）であったことなどと考えあわせると、この噴火は、火道が幾分閉塞した状態にあって、火山体のやや深部で化学的な反応のような現象が急速に進行し発生したものと推測される。少量の噴石をとばす噴火の後、地震群の活動は徐々に低下するが、波形からみてその震源域に基本的な変化はみられず、したがって、噴火の原因となった現象は噴火後も引き続いて発生していると考えられる。これは噴火の機構を考える上での重要な手懸りとなる。噴火の前後では火道の状態は変わっているはずである。供給されるエネルギー量にも違いはあるかもしれないが、基本的には、火道の状態の違いによって制約されるような現象——火道が閉塞状態にあると発生が加速され、解放状態で衰退するような性質の現象が、この場合の噴火の機構として想定される。

## (2) 2月27日 3時35分の噴火と4時48分の噴火

これらの噴火活動の前後に発生した地震の活動度は Fig. 6 (b) に、卓越周波数の時間的变化は Fig. 7 (b) に示されている。ただし、卓越周波数は、26日23時50分から27日5時30分までの間に起きた主な地震について、最大振幅部分の5秒間の記録から計算されたものである。

噴火との関連で地震活動の様子をみると、3時35分の噴火と4時48分の噴火の間で明瞭な移り変わりのあることが、地震活動度〔Fig. 6 (b)〕、最大振幅部分の5秒間についてのスペクトル (Fig. 8)、卓越周波数〔Fig. 7 (b)〕、および running spectrum〔Fig. 9 (a)〕のすべてにおいてみられる。まず、最も違いの明瞭な卓越周波数については、4時01分の地震以前では、それが平均して2.5Hzであるのに対し、4時13分以後の地震では、ばらつきは大きくなるものの、大部分が3Hz以上になる。これに対応して、スペクトルにも、4時13分の地震から短周期成分の卓越が目立ってくる。running spectrum の pattern でみると、前の地震群では「一定値型」の出現頻度が多く、後のものではそれ以外の型をとる割合が多くなる。さらに地震活動度でも、3時35分の噴火以後、比較的単調に減少して4時01分の地震の後約6分間ゼロレベルにまで落ちるが、その後にはまた回復の兆しがみられる。すなわち、4時01分から13分間で、活動に明瞭な移り変わりがある。

Fig. 8. Normalized power spectra of volcanic earthquakes occurred from 23h58 on 26th to 05h19 on 27th. Note the difference between those before 04h01 and those after 04h13.

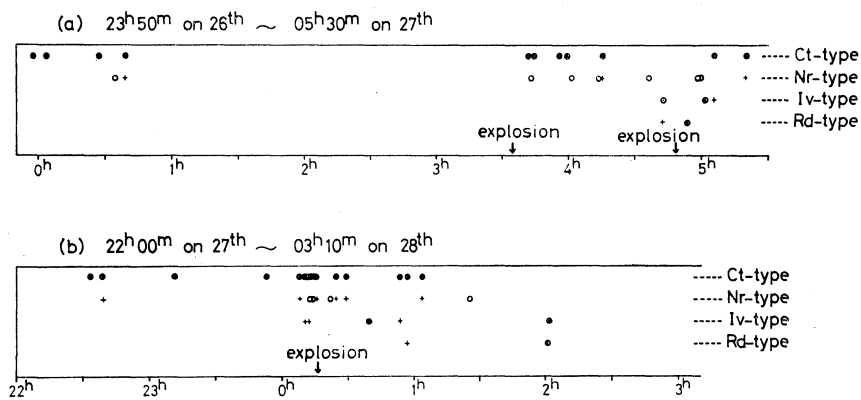
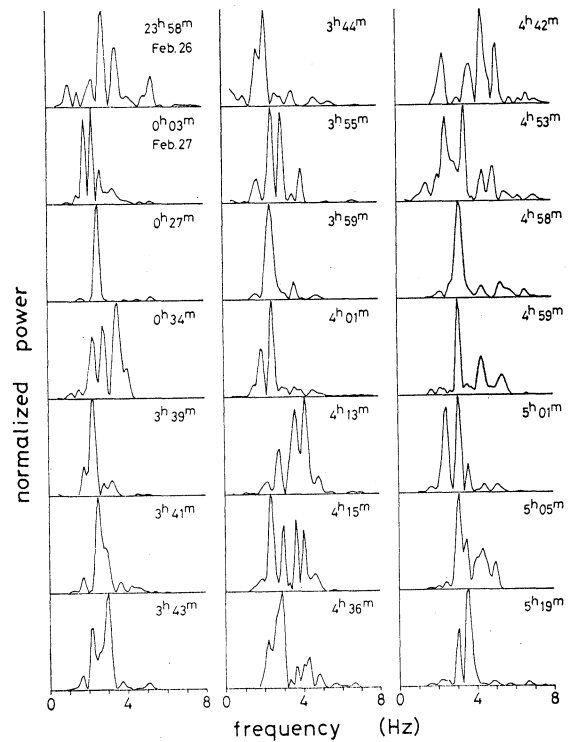


Fig. 9. Pattern of running spectrum versus time, (a) from 23h50 on 26th to 05h30 on 27th and (b) from 22h00 on 27th to 03h10 on 28th. Four types of patterns are shown with different marks in their respective rows. The cross shows the pattern around the power maximum in a broad view of the spectrum. It is remarkable that the patterns except Ct-type are more predominant in a swarm of earthquakes closely connected with an eruption.

3時35分の噴火では、噴火前の地震活動のレベルが極度に低いことと噴煙活動の活発なことが特徴である [Fig.6 (b)]。3時27分には微小地震が1個観測されるが、これを除けば、0時49分から噴火までの間に連続微動以外の活動は認められないし、この僅か1個の地震にしても、振幅は小さく、また噴火後に発生する地震とは違い、S-Pが1.8秒で初動部分に5~6 Hzの波が卓越するタイプで、先の考察からすれば、火山体のやや深部に発生する地震である。噴火後に発生する地震では、これに対して、その卓越周波数は0時台の地震のそれと大差はな

いし、また、噴火直前の連続微動中の一部についての解析結果〔Fig. 7(b) 中の \*印〕とも違いはなく、噴煙活動の活発さと併せて考えると、その活動域は浅いと推定される。

活発な噴煙活動が頻繁に繰返されることは、火山内部から供給されるエネルギーが途中で遮られることなく放出されることを意味する。これは噴火に前駆する地震活動が認められないことから首肯できる。噴火後には火道の状態が変わって噴煙活動は低下し地震活動が活発化するが、この地震群の卓越周波数がこの観測点で最も出現頻度の多いもので噴火前に発生した地震のそれと違いがなく (Fig. 7), また running spectrum に「一定値型」が多いこと [Fig. 9 (a)] は、この地震群をひき起こすエネルギー源が、マグマの逆流 (下鶴, 1978) や火道の崩壊によるよりも、内部から供給されるものが基本であることを示している。ただし、噴火前には地震のなかった所に地震が群発するのであるから、火道の崩壊などの二次的効果は存在する。

4時13分から始まる地震活動は、4時48分の噴火に関連した活動と考えられる。先にも述べたように、これらの地震群では、スペクトルに短周期成分が卓越し、卓越周波数も高くなる。また running spectrum には「一定値型」以外の出現頻度が多くなり、噴煙活動に伴う連続微動は、4時48分の噴火の僅か4分前までの約50分間、活動を停止する [Fig. 6(b)]。

running spectrum における卓越周波数の変動は震源特性の変動に対応していて、観測される波が何であるにせよ「一定値型」は地震活動の場が安定していることを表わし、それ以外の型は不安定であることを示す。観測される波が表面波であれば、「正分散型」は活動の場が浅部へ移っていくことを、「逆分散型」は深部へ戻っていくことを表わす。短い時間間隔で続いて起こるような噴火の前後の場の状態を考えれば、場に乱れがあることは予想され、したがって、さまざまな型の running spectrum の出現が期待される。

噴煙活動に伴う連続微動の活動停止は、火道の閉塞か発泡現象の不活発さに由来するものであるが、4時48分の噴火では、地震活動が比較的活発であったことを考慮すれば、火道の閉塞のほうが適切である。短周期成分の卓越からは地震の活動域が浅部に移ったことが推定され、running spectrum の pattern の乱れからは火道のあちこちが破壊の起きやすい状態になっていることが推定される。また噴火に向けて地震活動度は増加し [Fig. 6 (b)], 連続微動の振幅がしだいに増大する中で噴火が発生する。これらのことから、火道のごく浅部が閉塞状態にあって、火山内部から供給されたエネルギーが浅部に蓄積されて噴火をひき起こす過程を想定させる。

### (3) 2月28日 0時16分の噴火

この噴火は、噴煙の量や高さ、爆発地震の最大振幅、噴石の量、空振の大きさなど (中村, 1977) を総合すると、1月1日 (1975年) 以来の活動の中で規模は最大である。噴火に伴う地震活動でも、噴火の前あるいは後の活動との相対的關係にもみられるように、26, 27両日に比べてその活動度は圧倒的に大きく (Fig. 10), 噴火の前触れとしての地震活動も、噴火の規模に対応して早期に出現することが期待される。ところが、噴火の僅か8分前まではそれらしき現象はみあたらない。すなわち、この日の観測は27日21時40分に開始され、最初の火山性地震が22時01分に記録されるが、以後、0時08分までの間は散発的な活動しかみられない (Fig. 10)。前駆期間が8分というのは26日の噴火や27日4時48分の噴火に比べても相当短く、噴火の規模が前駆期間と独立であることを示している。

0時08分からは、Fig. 11 (a, b) にみるようなB型地震の活動が活発に展開される。これが

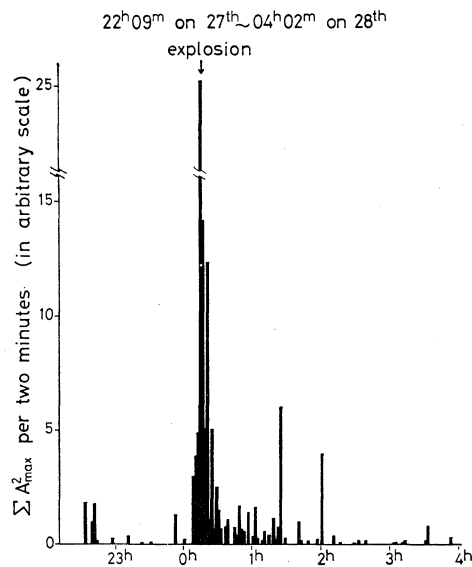


Fig. 10. Activities of volcanic earthquakes except the explosion earthquake from 22h09, 27th to 04h10, 28th.

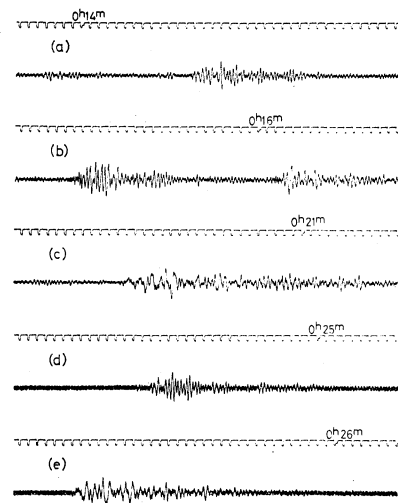


Fig. 11. Examples of seismograms of volcanic earthquakes just before and after the eruption of 00h16 on 28th. The events of (a), (b) and (d) are B-type earthquakes. Very low frequency waves in (c) and (e) are remarkable though these types of events were rare in our observations.

噴火の前駆現象であることを最も端的に特徴づけるのは、地震の発生頻度と振幅にあらわれた地震活動度(Fig. 10)で、それまで散発的であった地震が毎分1~3個の割合で発生するようになり、振幅も全体的傾向として、噴火発生に向けて増加し続ける。一方、最大振幅部分の卓越周波数は2~3Hz [Fig. 7 (c)]で、スペクトルは27日3時35分の噴火に伴う地震群のそれ(Fig. 8)と似ていて形状もほぼ一定し、また噴火前のスペクトルに短周期成分が卓越するといった現象もなく、噴火の切迫の徴候はスペクトルには現われていないように見える(Fig. 12)。running spectrumのpattern [Fig. 9 (b)]でも、Fig. 5に示したような単純な型は姿を消して、前日の活動に較べても複雑な型になるが、powerが最大のところでのpeakの位置の変動を約1秒間にわたって見る(図中の丸印)限りでは、「一定値型」の出現頻度が圧倒的に大きく、噴火前の場の乱れはきわめて小さいかのようなのである。しかし、そのpower最大の部分を中心として全体を大局的にみた場合(図中の+印)には、事情は変わってくる。この場合、噴火の直前直後には「正分散型」の傾向が強くなっている。すなわち、比較的単純な型の「一定値型」はなくなって、running spectrumは複雑化し、表面波説によれば、深部から浅部へのエネルギーの流れを示唆するpatternが出現する。なお、Fig. 9において、大局的にみた場合の結果が示されていないのは、それが最大powerの部分の短い区間についての結果と一致する場合で、比較的容易に単純な型に分類できる場合である。

この噴火に伴った爆発地震の震源を集中観測のデータから決めると、北岳の南西で、深さは海面下1.5kmの地点となる。また、噴火前には、少量の水蒸気を除いて噴煙活動は完全に停止し、26, 27の両日にあらわれたような連続微動は観測されない。これらはいずれも、噴火のエネルギー源が深部にあり、しかも火道が閉塞状態にあったことを示すもので、観測された地震の卓越周波数が相対的に低いこととも対応する。

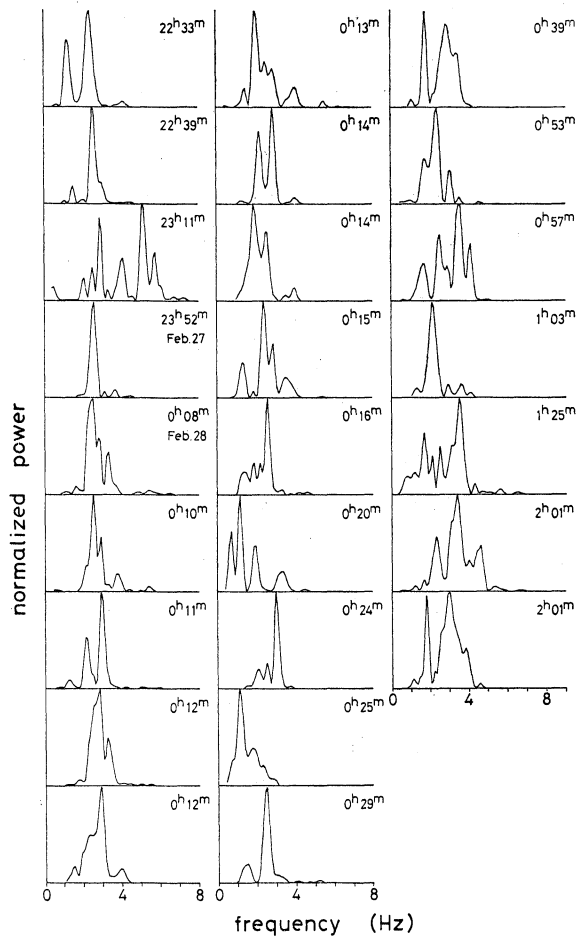


Fig. 12. Normalized power spectra of volcanic earthquakes occurred before and after the eruption of 00h16 on February 28. Note the waves of not so high frequency just before the eruption.

活動が活発に展開される地震群の卓越周波数が低いところで一定し、running spectrum で power 最大の部分に「一定値型」の傾向が強く現われることは、火口のやや深い部分——火口から数百mの深さ——で、そこを震源域とする活動が強まっていることのあらわれである。噴火のエネルギー源が深部にあることを考えあわせれば、これはそこを突き破ろうとする活動に対応するとも考えられ、したがって、これらの出現状況を噴火の規模との関連で調べることは重要である。

噴火の後にはきわめて低い周波数の波が卓越する地震の起きていることも注目に値する [Fig. 11 (c, e)]。特に0時20分の地震は、爆発地震を除けば、この噴火に関連した地震群の中で振幅が最も大きい部類に入り、現象として重要と思われる。しかし、この種のもは今回の観測では出現が稀で、活動に関する法則性を見出せない。

噴火後に卓越周波数の存在範囲もいくぶん拡がり [Fig. 7 (c)], Fig. 12 においても短周期成分の卓越した地震が多くみられるようになることは、地震の発生する範囲——特に深さ方向の——が拡大することに対応していると考えられる。きわめて低い周波数の波が卓越する地震の発生も、これに関連があるのかもしれないが、何分にも資料が不足である。

## 5. む す び

2月26日から28日にかけて連続して発生した4回の噴火について、地震活動度、スペクト

ルの形状と卓越周波数, **running spectrum** の **pattern** から, 噴火に伴う地震活動の特徴を調べ, 火山内部の状態を推測した。きわめて短い期間に連続した噴火であったが, それぞれ固有の発生様式の地震活動を伴い, 噴火エネルギーの存在域や噴火の発生機構に違いのあることを示した。

26日の噴火では, 噴火の約17分前から, 初動部分に5~6Hzの波が卓越する地震が群発する。これらは爆発地震の震源とあまり違わないところに震源域を有し, S-Pが1.4~2.0秒の実体波を主要な構成部分とする地震で, その発生様式からみて, 噴火の発生機構と密接な関連があると推定される。

27日3時35分の噴火は, 前駆する地震活動がなく, 噴煙活動が活発に続く中での噴火であったことから, 火道が解放状態にあって発生した噴火と考えられる。噴火後に発生した地震群は, 卓越周波数がやや低いB型地震で, **running spectrum** には「一定値型」が卓越する。表面波説によれば, これらの震源域は火口から数百mの深さにあると推測され, 卓越周波数の比較から, 噴煙活動に伴う連続微動の発生域とも共通するものがうかがい知れる。地震の発生状況から推測すれば, これらの地震群のエネルギーは, マグマの逆流や火道の崩壊など表面からの還元ではなく, 火山体の深部から供給される一次的なものである。

27日4時48分の噴火に前駆するB型地震では卓越周波数がやや大きくなっている。これは, 表面波説によると, エネルギーの深部から浅部への移行に伴う地震活動域の上昇をあらわす現象と解釈され, 噴火の直前に噴煙活動が活発化することからも, その妥当性が裏付けられる。この噴火に伴う地震群では, **running spectrum** の **pattern** に「一定値型」の出現頻度がきわめて少なかったが, これは火道の中をエネルギーが移動する場合の動きやすさに対応していると考えられる。移動に対して完全に障害がなければ地震は発生しないが, 大きな障害があれば, そこを突破しようとして「一定値型」が多くなるというのが表面波説からの帰結である。

28日0時16分の噴火は一連の活動の中では規模が圧倒的に大きく, 噴き飛ばした噴石量も多量であった。この噴火の前駆地震は僅か8分前から始まっている。その卓越周波数は相対的に低くて, **running spectrum** は複雑化しつつも「一定値型」が卓越し, 深部から供給される大きな量のエネルギーが, 火山体のやや深い部分でせきとめられているという状況に対応する現象がみられる。これはエネルギーの大きな噴火に特有の現象と考えられ, 噴火直前の急激な地震活動度の上昇や噴煙活動の停止にも, その反映が示されている。

一般に, 噴火に伴う地震群の卓越周波数は活動に固有の値をとるが, 地震の活動様式の変化に対応して明瞭な変化が現われるとは限らない。これはスペクトルそのものにおいても同様で, 噴火前に短周期成分が卓越するという現象も一般的とは認め難く, その形状から活動の変化に対応する特徴を検出するのも容易ではない。しかし, 地震の発生頻度と振幅の大きさを考慮に入れた地震活動度や **running spectrum** の **pattern** 変化, 噴煙活動などを併せて総合的にみるならば, 活動様式の移り変わりを検出するのはもちろん, 活動の特徴を明確にして, 火山体内部の状態を推定することが可能になる。

表面波の卓越周波数は, **source space function** の **peak** に一致するものではなく, **medium response** との兼ね合いで決まる量である。したがって, それを直接震源の深さに対応させることはできないが, 震源が深くなると低周波の波が卓越するから, 相対的な震源の深さの関係は推定できる。この性質を利用すれば, 近距離の観測点の **running spectrum** は, 火山を地学的に調べる場合の手法としては大いに有力であり, また, 変動速度が大きいという火山活動の特徴を考えれば重要でもある。

今回の観測は上下動成分のみであったので、下鶴ほか (1975) のように、上下動成分と水平動成分の比に関する検討はできなかったが、この現象は、震源の深さが変わることによって、表面波でも起こりうる現象である。ただし、縦軸に水平動の振幅を、横軸に上下動の振幅をとったグラフでは、原点を通る何本かの直線のまわりに観測値がばらつくはずで、桜島の爆発地震の最大振幅について調べた結果 (中村, 1979, 私信) では、実際にそうになっている。その意味では、勾配 1 の直線を平行移動したような結果が得られている下鶴ほか (1975) の場合は解釈が難しい。

### 謝 辞

佐藤泰夫教授には、表面波に関する御教示をいただき、また、草稿の閲読をお願いして、貴重な助言と励ましをいただいた。鹿児島地方気象台の中村理祐調査官との振幅比に関する議論は有益であった。

計算は鹿児島大学電子計算機室のお世話になった。

### 参 考 文 献

- 鹿児島地方気象台 (1969): 鹿児島県下の地震・火山活動状況と鹿児島県下の地震・津波・火山の監視体制. 鹿児島県の地震火山概況, 鹿児島県地震火山調査研究協議会, 18-40.
- 鹿児島地方気象台 (1972): 昭和 47 年 10 月 2 日桜島南岳爆発に関する火山速報. 昭和 47 年防災業務実施状況報告書 6 号.
- DIBBLE, R.R. (1974): Volcanic seismology and accompanying activity of Ruapehu Volcano, New Zealand. In *Physical Volcanology* (CIVETTA, L. et al. eds.), Elsevier, 49-85.
- HARKRIDER, D.G. (1964): Surface waves in multilayered elastic media, I. Rayleigh and Love waves from buried sources in a multilayered elastic half-space. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **54**, 627-679.
- 角田寿喜・吉山良一 (1977): 桜島火山における地震観測——高度差を考慮に入れた多点観測. 火山, 第 2 集, **22**, 1-12.
- 加茂幸介・西潔・古沢 保・赤松純平・吉山良一・角田寿喜・吉留道哉 (1975): 地震活動調査. 桜島火山の総合調査報告 (加茂幸介編), 1-5.
- 菊地茂智 (1962): 阿蘇山における短周期火山性微動について. 火山, 第 2 集, **7**, 1-16.
- 水上 武・茂木清夫・平賀士郎・宮崎 務 (1957): 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, **2**, 78-90.
- 中村理祐 (1977): 昭和 50 年と 51 年における鹿児島県下の地震・火山活動状況. 鹿児島県の地震と火山, **9**, 1-56.
- 西 潔 (1971): 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. 京大防災研年報, **14 A**, 113-121.
- 西 潔 (1976): 桜島火山の爆発地震について. 京大防災研年報, **19 A**, 69-73.
- 岡田 広 (1973): 爆発震源の葉量とレイリー波の卓越周期との関係. 北大地物研究報告, **29**, 17-31.
- 佐々憲三 (1937): 阿蘇火山爆発予知の問題. 火山, **3**, 125-143.
- 下鶴大輔・内堀貞雄・行田紀也・小山悦郎・宮崎 務・松本時子・長田 昇・寺尾弘子 (1975): 1973 年の浅間山噴火活動について. 震研彙報, **50**, 115-151.
- 下鶴大輔 (1978): 地震学的手法による噴火予知研究. 火山, 第 2 集, **23**, 7-18.
- 吉川圭三・和田卓彦・加茂幸介・小野博尉 (1963): 桜島の火山性地震の性質について (第 1 報). 火山, 第 2 集, **8**, 11-19.