

火山活動度予測のための火山性震動高速自動処理

西 潔

AUTOMATIC DATA PROCESSING SYSTEM FOR VOLCANIC EARTHQUAKES AND TREMORS

By *Kiyoshi* NISHI

Synopsis

At the active volcano, numerous volcanic earthquakes and tremors with several kinds occur reflecting the conditions of activity of the volcano. In order to monitor, interpret and predict the volcanic activity, an automatic data processing system for volcanic earthquakes and tremors is indispensable.

From this view point, an automatic data processing system with the following functions has been developed: 1) Automatic event detection and classification of volcanic earthquakes and tremors 2) Filing and display of the results 3) Evaluation and prediction of volcanic activity 4) Display of the results of evaluation and prediction, and generation of alarm and control signals.

For the purpose of obtaining the most effective threshold value of classification parameters a concept of synthetic hit rate (SHR) is introduced. This is defined as $SHR = (H/J) * (H/P)$, where H is the number of hit of judgement, J is the number of judgement and P is the number of phenomena being considered. Applying this concept, evaluation of judgement considering miss and overlooked become possible.

According to a test operation in 1986, SHR of classification is 0.8-0.9 in the case of A type, B type and explosion earthquakes, and is 0.5-0.7 in the case of other types. SHR of H day (the day judged to be high level volcanic activity and may occur some explosions) is nearly 0.4. As to the number of explosions, the number of 88% of total explosions are occurred in H day.

1. はじめに

活動の活発化した火山においては、通常の構造性地震と異なる多種多様の火山性地震、微動が発生する。これらの火山性地震、微動は、火山の活動状態を反映して発生しているのでこれらのタイプ毎の発生状況を正確に知ることは火山活動を把握し予測を行う上で重要である^{1),2)}。また、噴火予知では直前予知が重要な課題となりつつあるが、これらの火山性地震、微動を人力により処理するには限界があり、刻々変化する火山活動を連続的に把握し監視するためには、電算機を用いた自動処理システムが必要である。この観点から桜島火山観測所では(1)火山性地震、微動などの種類を自動的に分類し(2)それぞれの発生状況を記録表示し(3)更にこの結果から火山活動の予測を行い(4)場合によっては外部に警報を出力する機能を有するシステムを開発している。

従来は、火山監視といえばセンサーからの信号をテレメータし記録機に接続してこと足れりとしていたが、データの表示と共に適切なデータ処理を行い、結果を表示し警報を出力するシステムが活火山に対処するた

めに必要である。

2. 処理システムの概要

2.1 ハードウェアの構成

ハードウェアの構成図を Fig. 2 に示す。システムは主記憶容量 1 MB のミニコンを主体とし、他に 40 MB の DISK, MT, カラー GD, XY プロッターで構成されている。図の斜線で示したシステムは既設の火山観測用データ解析処理装置で、LP, CR, PT などの端末はこのシステムと共用である。

2.2 処理方法

(1) 入力データ

観測点の分布を Fig. 1 に示す。地動の波形データは、島内の中域火山観測網 7 点の内の任意の 6 点のデータが入力される。噴火に伴って発生する空気震動のデータとしては、火口の西縁 5.5 km にある桜島火山観測所に設置してある超低周波マイクロフォンの出力が用いられる。島外の広域観測網については波形データは入力されず、広域観測システムによるトリガー信号が入力される。また、既設の火山観測データ解析処理装置からは、震源データの入力が計画されている。

(2) 処理の流れ

処理の概略の flow を Fig. 3 に示す。システムに入力された 6 点の波形データと空振データは 60 Hz でサンプリングされる。観測点毎に DC 成分、ノイズレベル、トリガーレベル、終了レベルが計測され、DC レベル、ノイズレベルが予め設定した範囲内でない観測点は欠測とみなし観測点名を表示する。入力された 6 点のうち、予め指定した優先順位により、上位 3 点のデータについて地震の検出以後のデータ処理が行なわれる。上位 3 点に欠測が出た場合は下位の観測点のデータが繰り上がって処理される。

(a) 地震の検出

入力データがトリガーレベルを指定サンプル以上にわたってこえたとき、その観測点に地震が到来したとみなす。また、入力データが指定サンプルの間、終了レベル以下であったとき地震の終了とみなす。B 型地

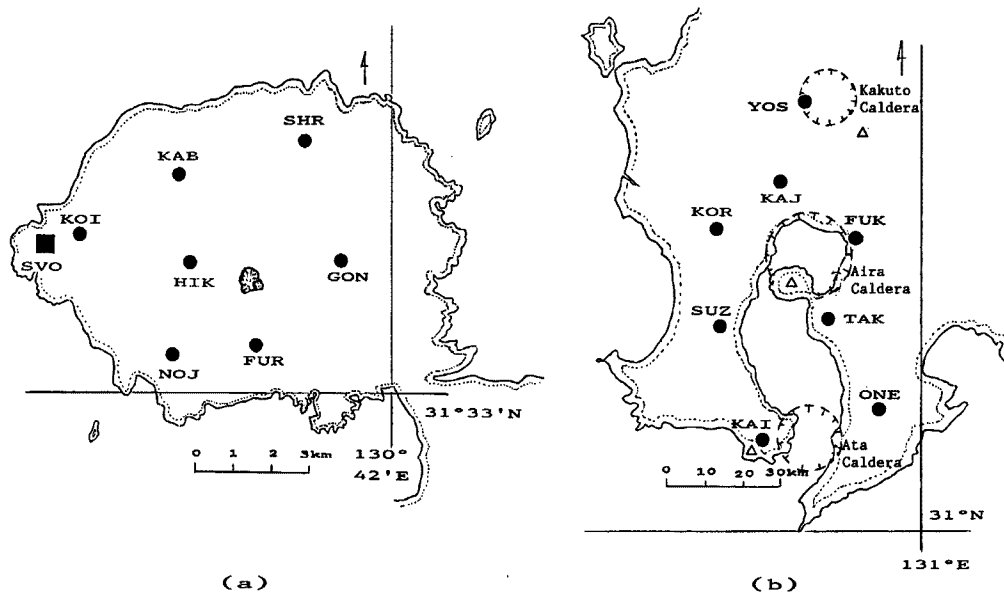


Fig. 1. Location of seismic stations.
 (a) Stations of middle range seismic observation network.
 (b) Stations of wide range seismic observation network.

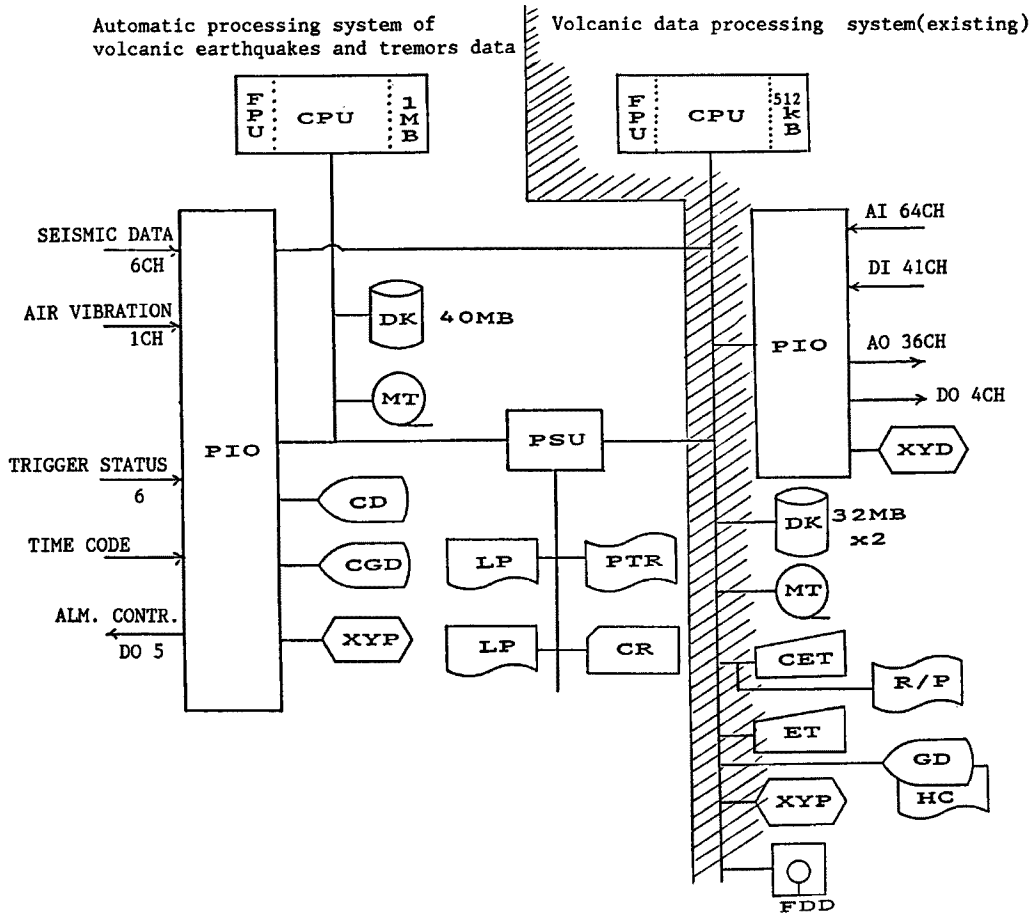


Fig. 2. Hardware system of automatic data processing system for volcanic earthquakes and tremors data.

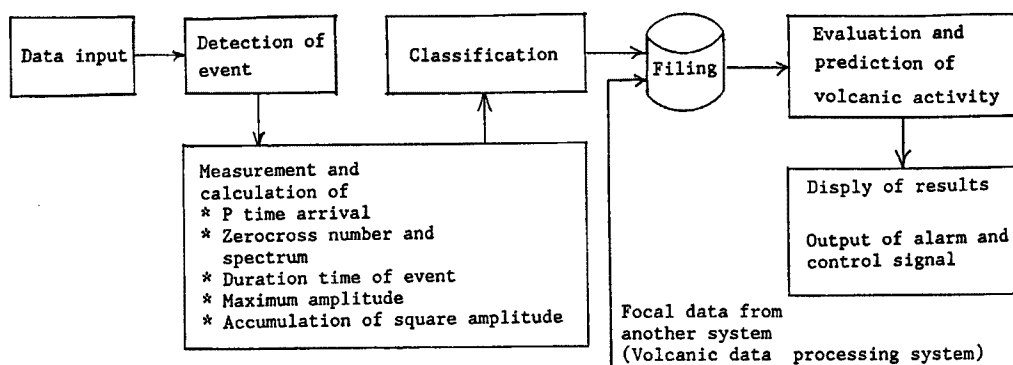


Fig. 3. General flow of the data processing.

震の群発時には入力データが終了レベルに至らない間に次の地震が発生することがある。この場合には、一定のレベル以上の入力があった時点で新しい地震が発生したとみなす。

(b) 地震、微動の分類

地震を検出したとき、広域観測システムにより島外の観測点も既に地震を検出していてトリガー状態が○

Table 1. Conditions for classification of volcanic earthquakes and tremors

Type Condition	Earthquake				Continuous tremor			
	Not volcanic	A type	B type	Explosion	Eruption	Tremor	C type	Debris flow
I	○	×	×	×	×	×	×	×
II	●	○	×	●	●	●	●	●
III	●	○	×	×	×	×	×	○
IV	●	○	○	●	×	×	×	×
V	●	●	●	○	○	×	●	●
VI	●	●	×	●	×	×	○	●
VII	●	●	×	○	×	×	×	×

Condition I: Trigger time of wide range seismic observation network is earlier than that of middle range one.

II: Attenuation of maximum amplitude is less than a certain constant.

III: Zerocross number of one second during P arrival is less than a certain constant.

IV: Duration time of event is less than a certain constant.

V: Maximum amplitude is more than a certain constant.

VI: Frequencies at the peaks of spectrum are integer multiples of fundamental frequency.

VII: Event is accompanied with air vibration whose maximum amplitude is more than a certain constant.

○ :Valid

×

● :Either will do

Nの場合は、検出した地震は島外の地震であるとして、以後の処理は行なわない。分類に用いる計測値は、初動から1秒間のゼロクロス数、震動継続時間、最大振幅、空振の振幅および地動のスペクトルである。分類はこれらによる条件を組合わせて行なう。条件の組み合わせを **Table 1** に示す。例えば、(i)最大振幅の比が一定値以下であり、(ii)初動から1秒間のゼロクロス数が一定値以上であり、(iii)更に震動継続時間が一定値以下である場合は、A型地震と判定されるが、これはA型地震の震源が深いため観測点間の振幅比が浅い地震と比較して小さいこと、B型地震より高周波の波動であること、孤立型の震動であること、に対応している。

(c) 地震の原簿

地震が終了したとき、分類に用いた計測値と分類結果および地動振幅の二乗積算値が DISK に地震の原簿としてファイルされる。このファイルを用いて、各タイプ毎の発生状況を示す日報、月報が出力され、また、火山活動を判定し活動予測が行なわれる。

(d) 表示、警報および制御信号

地震の検出時刻、終了時刻、分類結果、欠測観測点、活動予測等が CD 画面に表示される。また、火山活動度が一定のレベルをこえたときに警報信号が出力され、B型地震が多発した場合には記録器を制御するための制御信号が出力される。

3. 運用方法と結果

3.1 総合的中率

火山性震動を分類する際に用いた基準が分類に関してどの程度有効であったかを評価するために、また更に一般的にはある事象をある基準を用いて識別、判定した際、その基準がどの程度有効であったかを評価するために、次式で定義される総合的中率 (Synthetic hit rate) なる概念を導入した。

$$\text{総合的中率} = \left(\frac{\text{的中数}}{\text{判定数}} \right) * \left(\frac{\text{的中数}}{\text{事象数}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

これは、的中率を、判定数に占める割合 (的中数/判定数) と事象数に占める割合 (的中数/事象数) の両面から評価するために必要となる概念で、いわゆる空振りと見逃しを考慮した的中率と言うことが出来る。

Fig. 4 にこの関係を模式的に示した。

判定的中率 = 的中数 / 判定数 : 判定数当たりの的中率,

事象的中率 = 的中数 / 事象数 : 事象数当たりの的中率,

とすれば、(1) 式は

$$\text{総合的中率} = \text{判定的中率} * \text{事象的中率} \dots \dots \dots (2)$$

である。

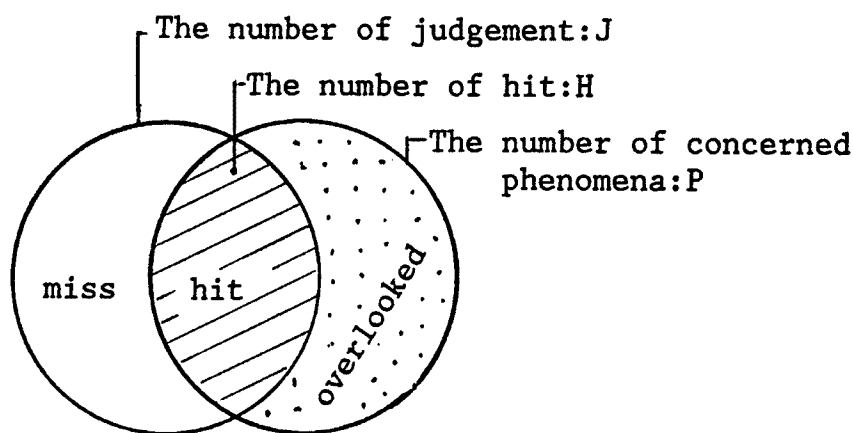
空振りを重視する場合は式 (1) において、(的中数/判定数) の項 (判定的中率) に定数またはべき数の重みをつけ、あるいは見逃しを重視する場合は (的中数/現象数) の項 (事象的中率) に同様の重みを付けて総合的中率が最大となる基準を求めればよい。

3.2 分類と結果

1986年において、**Table 1** に示した方法によって分類した結果について述べる。

(a) A型地震の判定

最大振幅の比が一定値以下であり、震動継続時間が一定値以下である地震について更に、初動から1秒間のゼロクロス数が一定値以上であるとA型地震と判定するが、A型地震の判定の場合ゼロクロス数が一定値以上であることが重要な条件となる。ゼロクロス数の基準値のとりかたによる的中数と総合的中率の変化を **Fig. 5** に示す。**Fig. 5** において、(a), (b)共に横軸は3観測点のゼロクロス数の合計値である。図において(a)の縦軸は対応するゼロクロス数以上の地震数の積算値であり、白丸はA型地震と判定した地震数、黒丸



$$\text{Synthetic hit rate: SHR} = \frac{H}{J} \cdot \frac{H}{P}$$

Fig. 4. Schematic representation and definition of the synthetic hit rate (SHR).

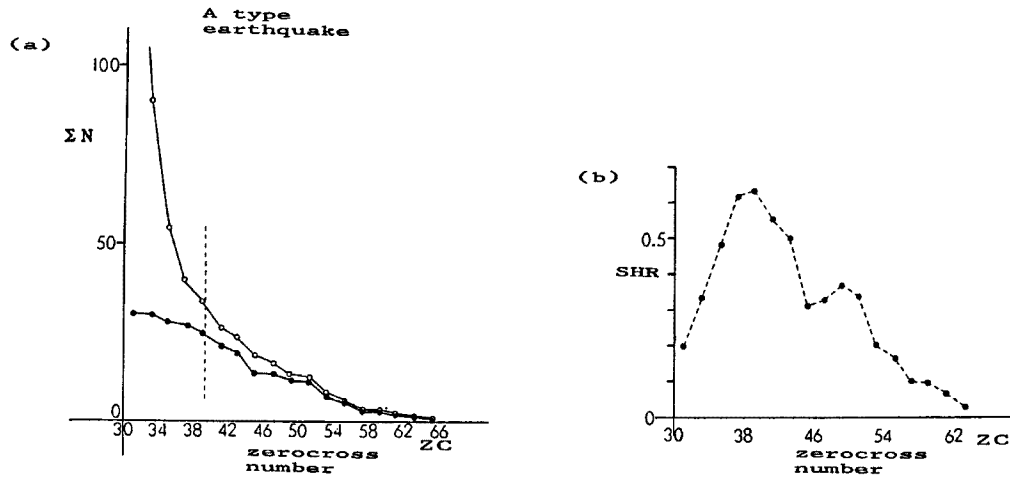


Fig. 5. a) Distribution of number of earthquakes whose zerocross numbers are equal to or larger than ZC (zerocross number). Blank dots are as to the earthquakes which are classified into A type volcanic earthquake. Real A type earthquakes are shown by solid dots.

Vertical broken line indicates the most suitable zerocross number which makes SHR maximum (see the Fig. 5(b)).

b) Synthetic hit rate as a function of zerocross number. In both of a) and b), zerocross numbers are the sum of data obtained at 3 different stations.

はそのうち実際にA型地震であった地震数の積算値である。

図から判るように、基準のゼロクロス数を小さくとると真のA型地震より多くの地震をA型地震と判定し、いわゆる空振りが多くなる。また、ゼロクロス数を大きくするとA型地震と判定した地震の大部分が真のA型地震となるが(即ち、空振りは少ないが)、判定した地震数は真のA型地震の総数と比較すると少なく見逃しが多い。そこで、最も適切な値を設定するために、式(1)で定義した総合的中率をゼロクロス数毎に計算し最大の総合的中率を与える値を用いることにする。ゼロクロス数毎の総合的中率をFig. 5の(b)に示した。図から判るようにゼロクロス数39を基準値として用いるのがよい。この場合、A型地震と判定した地震は33個であり、このうち25個が真のA型地震であるので、8個が空振りである。一方真のA型地震の総数は30個であるので、5個を見逃したことになる。この場合の総合的中率は、 $\text{総合的中率} = (\text{的中数} / \text{判定数}) * (\text{的中数} / \text{現象数}) = (25 / 33) * (25 / 30) = 0.63$ である。

(b) 爆発地震の判定

爆発地震の判定の場合は空気震動の振幅が重要な基準となる。基準のとりかたによる、的中数と、総合的中率の変化をFig. 6に示す。横軸が空気震動の振幅である以外、縦軸の意味はFig. 5と同じである。図から判るように、

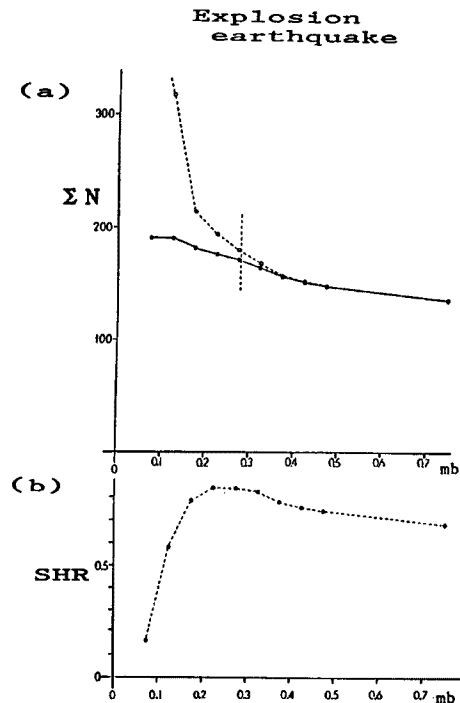


Fig. 6. Same as Fig. 5. except that earthquakes are explosion earthquake and horizontal axis is maximum amplitude of air vibration (mb) accompanying the explosion.

基準値として 0.25 mb を用いると総合的中率は最大となり0.84である。

(c) その他の震動

その他の震動として、B型地震、C型地震、噴煙に伴って発生する震動、微動等があるが、総合的中率はB型地震が0.8~0.9程度、その他が0.5~0.7程度である。

3.3 火山活動度の判定と活動予測

火山性震動の発生状態から火山活動度を定義し活動予測を行う方法は幾つか考えられるが、ここではB型地震の発生状態のみを用いる方法を述べる。Fig. 7 に自動的に分類されたB型地震の1時間毎の発生頻度を示した。図中×は爆発を示す。鋭い刺状の箇所はB型地震の群発に対応している。B型地震の群発が多発している所では爆発も多発していることが判る^{3),4)}。このB型地震の群発が多発している状態を定量的に表すために次式で定義される値を用いる。これは、B型地震の振幅の二乗を1時間毎に積算した値についての deviation である。

$$DEV = \sqrt{\sum(a_i - \bar{a})^2 / N} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $a_i = \sum a_i^2$, $\bar{a} = \sum a_i / N$, $N = 120$,

ここで、 $N = 120$ 、即ち5日とするが、これは経験的にB型地震の群発の後5日間程度は爆発発生の可能性が高いことがわかっているためである。式(3)で定義されるDEVの1時間毎の値をFig. 8に示した。図中、丸印は爆発を示す。ここで、DEVの値がある値以上の日を活動度が高く(Hレベル日)爆発の可能性のある日と判定した場合、実際に爆発が発生したか否かを調べ分類の際と同様に総合的中率が最大になるDEVの値を求めると $DEV = 2.5$ となる。DEV値が2.5未満の日を安全日(爆発の発生する可能性の低い日)、DEV値が2.5以上の日を危険日(爆発の発生する可能性が高い日)とした場合の1986年の結果をTable 2に示す。Table 2において、欠測のため安全日と危険日の合計は361日となっている。

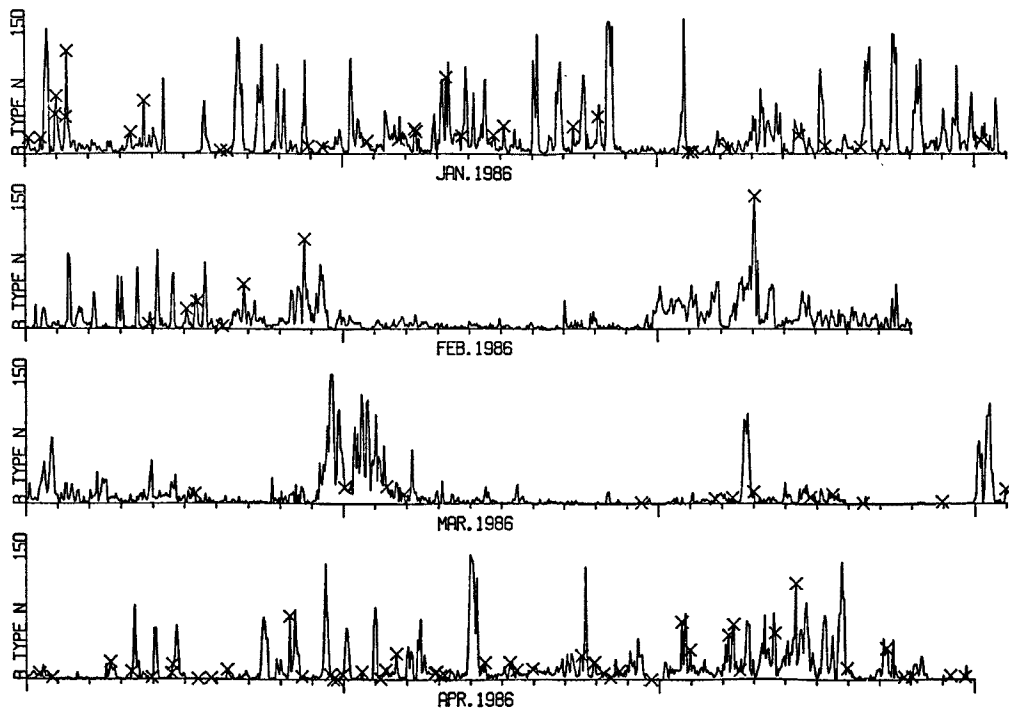


Fig. 7. Hourly number of B type volcanic earthquakes classified automatically by this system. X marks indicate the time when volcanic explosions occurred.

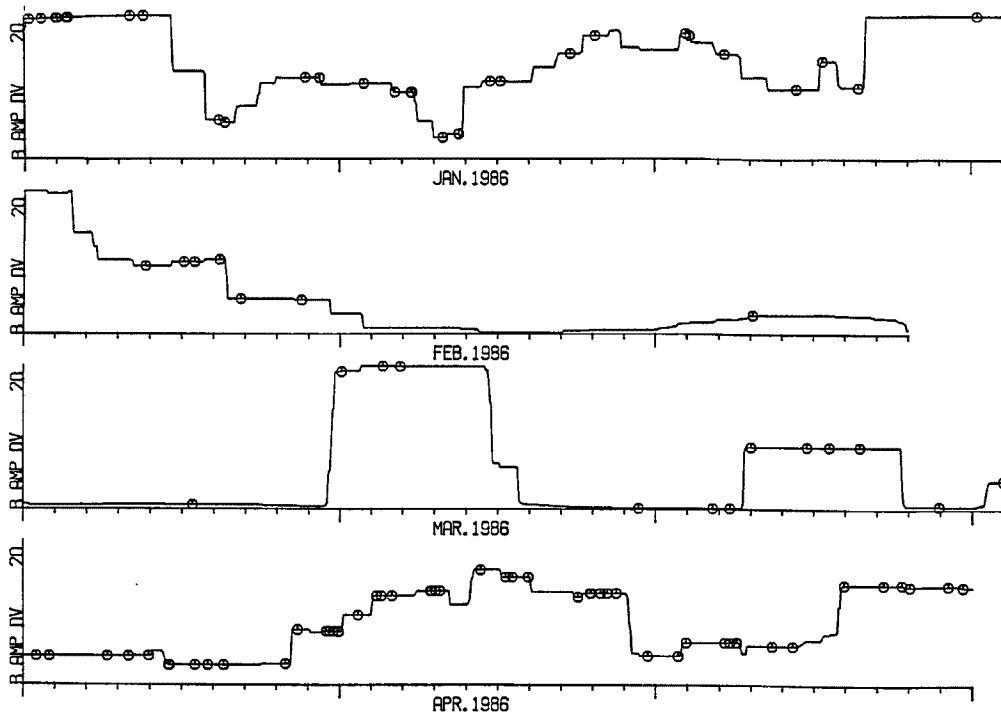


Fig. 8. Variation of DEV and volcanic activity. ○ marks indicate the time when explosions occurred.

Table 2. The level of Volcanic activity, the number of days and the number of explosions against the value of DEV

DEV	Level	The number of deys (E , NE)		The number of explosions
0~2.5	L	116	(21, 95)	23 (12%)
2.5~	H	245	(123, 122)	174 (88%)
Total		361	(144, 217)	197 (100%)

Dev: Deviation of accumulated square amplitude of B type earthquakes defined by eq. (3).

Level: Level of volcanic ctivity H: High level L: Low level

E: Days when explosions occurred NE: Days when explosions did not occur

安全日と判定した日数は116日あり、このうち95日は実際に爆発は発生していない。判定数当りの的中率、即ち、判定的中率 $=95/116=0.82$ である。一方、爆発が発生しなかった日の総数は217日でありこのうちの95日を安全日としての中させたことになるので、事象当たりの的中率、即ち、事象的中率 $=95/217=0.44$ である。従って、総合的中率 $=0.82 * 0.44=0.36$

危険日と判定した日数は245日であり、このうち123日に実際に爆発が発生している。即ち、判定的中率は $123/245=0.50$ である。一方、爆発が発生した日の総数は144日であり、このうちの123日を危険日としての中させたことになるので、事象的中率 $=123/144=0.85$ である。従って、総合的中率 $=0.50 * 0.85=0.43$ である。

爆発回数に関しては、安全日に発生した爆発は23であり、危険日に発生した爆発は174である。即ち、総爆発回数の88%が危険日に発生した。

4. まとめと今後の問題点

火山活動を反映して発生する各種の火山性震動を自動的に分類し、この結果を用いて火山活動を予測し、結果を表示し、警報を出力することを目的としたシステムを開発している。リアルタイムで入力された地動信号から、イベントを検出し、その到達時刻、周波数、振幅などに関連した値と震動継続時間および空気震動を伴う場合は振幅を計測して分類を行う。分類にさいしては、空振り、見逃しを考慮した総合的中率なる概念を導入して分類的中率を評価し、分類に用いるパラメータの最適の基準値を求めた。

1986年における結果では、A型地震の総合的中率は0.63、爆発地震では0.84、B型地震では、0.8~0.9程度、その他で0.5~0.7程度である。

火山活動については、B型地震の発生状態から活動度の定義を試みた。1986年の結果では、安全日についての総合的中率は0.36、危険日についての総合的中率は0.43である。一方、爆発回数から見ると、88%の爆発が危険日と判定された日に発生した。

A型地震、爆発地震の自動分類の際判定を誤ることがあるが、どちらも典型的な場合に誤ることはない。判定を誤るのはA型地震についてはゼロクロス数の小さい場合、爆発地震については空気震動の振幅が小さい場合など人手による場合でも迷うような場合である。C型微動の分類にはスペクトルのピークを与える周波数が整数倍であるという性質⁵⁾を用いているが、振幅が大きい場合は振幅が飽和して波形が歪む。このためスペクトルが正確に求められず判定を誤る場合があり、ゼロクロス数による方法も併用して分類する必要がある。

活動度の判定と予測に関しては、今回の例では、B型地震の群発に着目したが、噴出物量の多い爆発や、空気震動の大きい爆発の前に短周期で震源の浅いと思われる地震が発生することがありこのような現象も定量化して判定に用いる必要がある。また、活動の予測は地震活動からだけでおこなうのは限界があり、他の観測データを組み込み総合的な判定を行う別のシステムが必要である。本システムは、このようなシステムに火山性震動の観測から得られる情報を出力することが出来る。

本システムの主要な構想は京都大学防災研究所桜島火山観測所加茂幸介教授によって与えられた。桜島火山観測所石原和弘、井口正人の両氏からは有益な議論と御協力をいただいた。システムの導入については沖電気工業 K. K.の援助があった。以上の方々にお礼申し上げます。

研究費の一部は、昭和61年度文部省科学研究費自然災害特別研究(2)No. 61052037、「九州地区噴火災害の中期・短期予測に関する基礎的研究」(代表者、西 潔)によった。

参 考 文 献

- 1) 加茂幸介：桜島における噴火の前兆現象と予知，火山，第2集，23，1978，pp. 53-64.
- 2) 西 潔：桜島火山の火山性地震，火山体の物理的場の比較研究による噴火災害予測，昭和59年度科学研究費自然災害特別研究(1)研究成果報告書，1985，pp. 30-33.
- 3) 西 潔：桜島における微小地震の群発と爆発との関係，第11回災害科学総合シンポジウム講演論文集，1974，pp. 345-346.
- 4) 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，27B-1，1984，pp. 29-34.
- 5) 加茂幸介・古沢 保・赤松純平：桜島の火山性微動について，火山，第2集，22，1977，pp. 41-58.