

8. 1973 年浅間火山噴火に伴う爆発地震について (第 1 報) スペクトル解析

今 井 博
地震研究所 行 田 紀 也
小 山 悦 郎

(昭和 54 年 5 月 25 日受理)

1. はじめに

浅間火山は長野県と群馬県の境にあり、日本では最も活動的な活火山の一つである。歴史的にも爆発的な噴火を繰り返して多大な被害をもたらしてきた。1968 年までの活動状況は水上等によって既に報告されている (MINAKAMI, 1935 a, 1935 b, 水上, 1959, 水上他, 1959, MINAKAMI, 1960, MINAKAMI *et al.*, 1970)。1973 年の噴火活動は 1961 年の活動期から 11 年ぶりのことである。1973 年 2 月 1 日の噴火を契機としたこの一連の噴火活動の概要は下鶴等が報告している (下鶴, 1973, 下鶴他, 1975)。また、この噴火活動に伴う小規模な火砕流については荒牧 (1973), ARAMAKI and HARAMURA (1975), 村井 (1974) がそれぞれ報告している。

下鶴 (1978) は火山性地震 (volcanic earthquakes) を「火山およびその周辺に発生する浅い地震」と定義した。この定義は震源の平面的範囲あるいは深さに関する量については何ら示唆していないが、水上 (1959) の分類した「火山に発生する地震」、即ち、A 型地震、B 型地震、爆発地震、火山性微動の 4 種類の包括を意味する。火山性地震の発生様式から、その発生機構が推考される。例えば、伊豆大島に発生する火山性地震の発生機構については田中康裕 (1970) が論じているが、下鶴 (1978) は一般的に次のように述べている：magma の上昇に伴って浅い地震が発生し、噴火に伴って爆発源を中心とした爆発地震が発生する。さらに、magma の逆流や地形変動に伴って応力の再分配による地震が発生する。

上述したように、爆発地震 (explosion earthquakes) は火山爆発に伴って発生する地震波動を意味し、従って、この発生機構は噴火のメカニズムを知る上で重要な手掛りを与えることは言をまたない。MINAKAMI (1970, 1974) は爆発地震の地震学的特徴を A 型地震、あるいはいわゆる tectonic earthquakes と比較して次のように述べた：(1) 地震動において長周期が卓越している、(2) S-phase が明瞭でなく表面波が卓越している、(3) 初動が観測点の位置する方位によらず上下動地震計では UP または水平動地震計では PUSH である。HONDA (1962) が指摘したように、tectonic earthquakes は 4 象限型に押し引きが分布する。MINAKAMI の指摘からすれば、上述 (3) の特徴を持つ爆発地震の発震機構は、その力源が double couple で説明される tectonic earthquakes のそれと異なり地下における火薬爆発の発震機構に類似すると推察される。因に、tectonic earthquakes と underground nuclear explosion とを比較・議論を行なった論文も少な

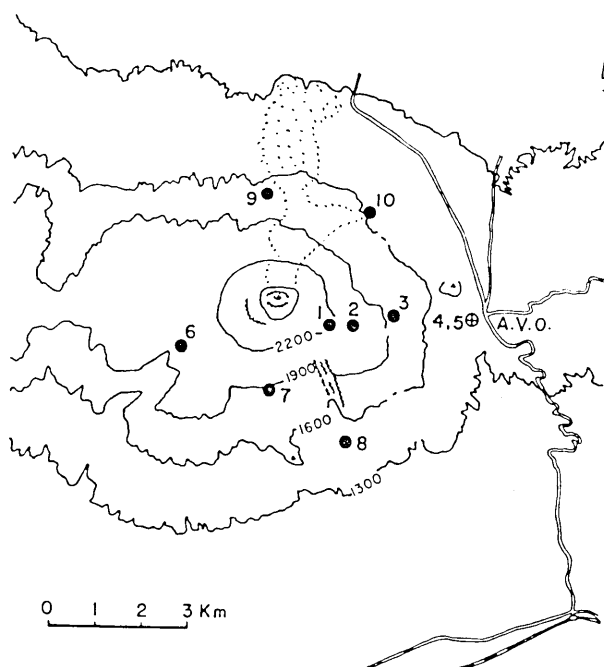


Fig. 1. Locality of seismic stations and the Asama Volcano Observatory (A. V. O.). Seismic signals are telemetered by underground cables to A. V. O. and are registered on smoked paper recording drums. The seismograms which are analysed in this paper were detected by the seismographs at NAKANOSAWA vault. The stations are named as follows.

- | | |
|--------------------------------------|---------------------|
| 1. SHIN-FUJIMIZAKA (SHIN-HUZIMIZAKA) | 6. GIPPA-YAMA |
| 2. FUJIMIZAKA (HUZIMIZAKA) | 7. SEKISON-SAN |
| 3. SANNOTORII | 8. HOTOKEIWA |
| 4. NAKANOSAWA | 9. ONIOSHIDASHI |
| 5. A. V. O. | 10. KUROMAME-GAWARA |

くない (例えば, CARDER and CLOUD, 1959, ROMNEY, 1959, WERTH and HERBST, 1963, HASKELL, 1967, MOLNAR, 1971, WYSS, 1971, AKI *et al.*, 1974 など). 一方, 爆発地震の初動が引き波で観測された例もある. 例えば, SASSA (1935) は 1933 年の阿蘇山の爆発地震について 4 象限型発震機構で説明し, また田中康裕 (1970) は秋田駒ヶ岳の Stromboli 式噴火に伴う地震を高木の導いた 3 種類の震源モデル (高木, 1943, 1950, 1952, 1953 a, 1953 b) をあてはめて, 観測とよく調和する非対称押円錐型機構で説明した. 下鶴他 (1975) は, 浅間火山の 1973 年 2 月 1 日と 3 月 10 日の爆発地震について, 三ノ鳥居 (Fig. 1) で水平動地震計で PUSH が観測されたにも拘らず上下動地震計では DOWN が観測されたことを報告している (Table 1). また, MINAKAMI の指摘 (2) にあるように, 爆発地震記象において P 波と S 波を分離し, さらに表面波をそれらの波群から分離することは容易ではない. 爆発地震において, 表面波が卓越することは下鶴他 (1971) も指摘している. しかし, 震央距離が大きい時は later phase が読みとれる場合がある. 竹山

Table 1. List of initial motion of the explosion earthquakes in 1973.

Seismic Station	Component	Feb. 1	Feb. 11	Feb. 14	Feb. 15	Feb. 20	Mar. 10	Apr. 18	Apr. 26
FUJ	HR*	PUSH	—	—	—	—	—	—	—
	UD	—	—	—	—	—	—	—	—
SAN	EW	E(PUSH)	—	E(PUSH)	E(PUSH)	—	E(PUSH)	E(PUSH)	E(PUSH)
	NS	S	—	(N)	S	—	S	S	S
	UD	D	U	U	U	—	D	U	U
NAK	EW	E(PUSH)	—	—	E(PUSH)	E(PUSH)	E(PUSH)	E(PUSH)	E(PUSH)
	NS	S	—	—	S	S	S	S	S
	UD	U	—	—	U	U	U	U	U
A.V.O.	EW	E(PUSH)	—	E	—	E	E(PUSH)	E(PUSH)	E(PUSH)
	NS	N	—	N	—	N	N	N	—
	UD	—	—	—	—	—	U	U	—
SEK	HR	PUSH	—	—	—	—	PUSH	PUSH	—
	UD	—	U	U	U	—	—	—	—
HOT	HR	PUSH	PUSH	PUSH	PUSH	—	PUSH	PUSH	—
	UD	—	U	U	U	—	—	—	—
GIP	UD	—	—	—	U	—	—	—	—
ONI	HR	PUSH	(PULL)	PUSH	PULL	—	—	—	—
KUR	HR	—	PUSH	PUSH	PUSH	—	PUSH	PUSH	—
	UD	—	U	—	—	—	—	—	—

*HR means a horizontal seismometer of which pendulum moves in radial direction to the summit crater.

(after SHIMOZURU *et al.*, 1975)

他 (1960) は 1958 年の浅間火山の爆発地震について, 第 I 波から第 VII 波までの波群に分け, それらの速度を求めた. 最後に, 爆発地震について強調すべき特徴は初動部分において見掛けの周期がその後に続く記象尾部に比べて長周期であることである. これは A 型地震あるいは **tectonic earthquakes** とは全く異なる特徴である.

本論文で議論する爆発地震記象は 1 点 3 成分で東大浅間火山観測所観測点の一つ, 中ノ沢観測壕 (Fig. 1) において記録された記象である. 地震計は固有周期 5 秒, 倍率 500 倍の変位型地震計である. 観測点と火口の位置関係は E-W 成分がほぼ **radial** 方向で, N-S 成分がほぼ **transverse** 方向になっており, 火口から約 4.2 km 離れている.

爆発地震波解析の第 1 報として, M. E. M. および F. F. T. を用いて, 1973 年の噴火活動に際し得られた爆発地震記象のスペクトル解析を行なったので, その結果を述べる. この結果は爆発地震の発生様式, 換言すれば, 噴火のメカニズムを知る上で重要な手掛りを与えることは明らかである.

2. データと解析方法

2-1. 円弧書き補正

解析した地震記象は記録紙送り速度 1 mm/sec の煤書きで, ペンガルバ (arm の長さ

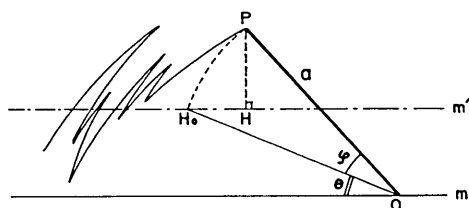


Fig. 2. Correction for the effect of a finite arm length. m , m' , a and θ denote true zero line, shifted zero line, arm length and deflection angle, respectively. Correction for the effect of arm (\overline{OP}) is made by Eqs. (1) and (2). (t_i , y_i) ($i=1, 2, \dots, N$) is read for m .

12.0 cm) を用いたドラム方式で記録されたものである。SKOKO *et al.* (1965) による補正式は linear trend のある直線書きによって記録された記象に対しては適用できるが、円弧書きでさらに arm がその静止位置(電源 OFF の状態)において、記録紙送りの方向に対して θ だけ傾いている場合 (Fig. 2) には、これを適用することができない。本論文では次のような補

正を行なった。零線 m' に対して読み取られる点 P の座標 (t_i , y_i) はその点における記録紙上の時刻と振幅である。真の時刻 t_i^0 , 振幅 y_i^0 は、

$$t_i^0 = t_i - [a \cos \theta - \sqrt{a^2 \cos^2 \theta - (y_i^2 + 2y_i a \cos \theta)}] / Sp, \quad (1)$$

$$y_i^0 = a \{-\theta + \sin^{-1}(\theta + y_i/a)\}, \quad (2)$$

で与えられる (Appendix A)。ここで、 a は arm の長さ、 Sp は記録紙送り速度である。(1), (2) 式を見て判るように未知数 θ は依然として含まれている。従って、ある θ に対する各々の t_i^0 ($i=1, 2, \dots, N$) について計算し、時間の逆行が生じない、即ち、 $t_{k-1}^0 < t_k^0$ ($k=2, 3, \dots, N$) を常に満たす θ の上限、下限を trial and error 方式によって求め、

$$\theta = \theta^0 = (\theta_{\max} + \theta_{\min}) / 2, \quad (3)$$

として、(1), (2) 式から (t_i^0 , y_i^0) ($i=1, 2, \dots, N$) を求める。ただし、 θ_{\max} は θ の上限、 θ_{\min} は θ の下限である。 θ_{\max} よび θ_{\min} を degree で小数第2位まで求め、(3) 式から求めた θ により補正を行なった。

2-2. データ

解析を行なった地震記象は Table 2 に示した爆発地震の中で seismic energy が 10^{15}

Table 2. Magnitude and energy of the explosion earthquakes in 1973.

Date	Magnitude	Energy	Amplitude of Air Waves
Feb. 1	2.7	6.2×10^{15} ergs	4.1 mb (+3.3 mb, -0.8 mb)
6	1.8	3.2×10^{14}	0.1
6	1.5	1.1×10^{14}	
11	1.7	2.1×10^{14}	0.4
14	1.9	3.8×10^{14}	0.5 (+0.4, -0.1)
15	2.2	1.3×10^{15}	1.8 (+1.2, -0.6)
20	2.6	4.7×10^{15}	2.3 (+1.9, -0.4)
Mar. 10	2.8	9.8×10^{15}	0.9 (+0.8, -0.1)
Apr. 18	2.5	3.7×10^{15}	3.7 (+2.8, -0.9)
26	2.2	1.4×10^{15}	3.0 (+2.0, -1.0)

Values of air waves are due to Karuizawa Weather Station, J. M. A.

Amplitude of air waves on Mar. 10 was recorded as 2.7 mb at A. V. O.

(after SHIMOZURU *et al.*, 1975)

ergs を越える Feb. 1, Feb. 15, Feb. 20, Mar. 10, Apr. 18, Apr. 26 の記象に限った。特に 11 年ぶりに活動期に入った最初の噴火である Feb. 1 の記象と、今回の一連の爆発地震の中で最大規模であった Mar. 10 の記象とについては少々詳しく解析を行なった。データは固有周期 5 秒地震計 3 成分の記象を写真にとって拡大し、peak と trough を読み取り、2-1 で述べた円弧書き補正を行なった後、データの間隔を 0.1 秒として cos-曲線によって内挿した。cos-曲線による内挿については、SKOKO *et al.* (1965) によった。

2-3. 地震計の特性補正

位相特性については、それに関するデータがないため補正を行なうことができなかった。振幅特性については、Fig. 3 に示した倍率特性曲線によってその補正を行なった。出力される周波数域は計算の手続き上、凡そ 0.02 Hz から 5 Hz までだが、Fig. 3 から判るように 0.15 Hz 以下の長周期成分に対しては補正することができなかった。従って、この論文では補正できなかった長周期成分についての議論を行なっていない。後述するように 1973 年の爆発地震の特徴的な周波数域は凡そ 0.2 Hz から 2 Hz 程度の範囲である。したがって、周波数による振幅特性についての補正に関しては問題はないと考える。

2-4. M. E. M. (Maximum Entropy Method) と filter の長さ

M. E. M. は 1967 年 Burg によって提唱された power spectral density の推定方法である。理論的にもその性質は詳細に議論されている (例えば, LACOSS, 1971, ULYRCH and BISHOP, 1975, JOHNSON and ANDERSEN, 1978, SAITO, 1978, SWINGLER, 1979 など)。ここでは CHEN and STEGEN (1974) および大内・南雲 (1975) に従ってその理論の概略を述べる。

地震波を定常ガウス過程 (第一次マルコフ過程) と仮定し、その情報論的エントロピーが最大になるように power spectral density $P(f)$ を推定する。 $P(f)$ は、

$$P(f) = (P_M/2f_N) |1 + \sum_{n=1}^M a_n \exp(i2\pi f n \Delta t)|^{-2}, \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $\{1, a_1, a_2, \dots, a_M\}$ は予測誤差フィルター (predicted error filter) の係数、 f_N はナイキスト周波数 (Nyquist frequency)、 P_M は予測誤差の 2 乗平均 (分散) である。 P_M および filter の係数は、

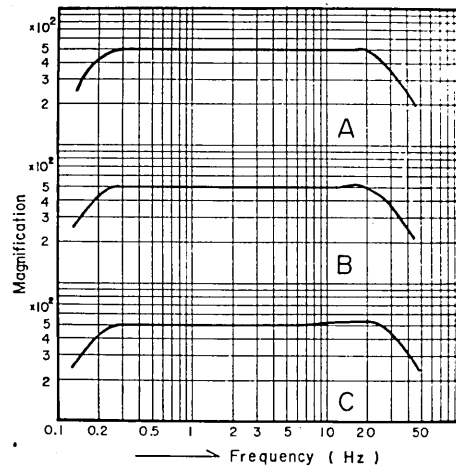


Fig. 3. Displacement magnification curves of three component seismographs. A, B and C denote vertical (U-D), horizontal (N-S) and horizontal (E-W) seismographs at NAKANOSAWA ($T_0=5.0$ sec), respectively.

$$\begin{bmatrix} \phi_0 & \cdots & \phi_M \\ \phi_1 & \cdots & \phi_{M-1} \\ \vdots & & \vdots \\ \phi_M & \cdots & \phi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_M \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

を解くことによって求められる. $\phi_i (i=1, 2, \dots, M)$ は自己共分散関数 (autocovariance function) である. $\phi_i (i=1, 2, \dots, M)$ が与えられれば,

$$\phi_{M+l} = - \sum_{n=1}^M a_n \phi_{M+l-n} \quad (l \geq 1), \quad (6)$$

によって残りの $\phi_{M+1}, \phi_{M+2}, \dots$ が順に求められることになる. 一方, 従来の Blackman-Turkey による power spectral density の推定法においては「与えられていない」自己共分散関数は 0 と仮定している. 従って, M. E. M. はこれと明らかに異なる.

M. E. M. を用いる際, 問題となるのが従来から言われている filter の長さ M である. M はデータが長い場合には, Akaike の F. P. E. criterion を用いて容易に決定することができる (例えば, ULRICH and BISHOP, 1975, FRYER *et al.*, 1975 など). しかし, データが短い場合には, M の決定は一般に困難であり, 解析者の恣意による他はない (大内・南雲, 1975).

初動部分の卓越周期および running spectra を M. E. M. を用いて求める際, データは 50 点 (0.1 秒間隔で 5 秒間というサンプリング幅) としたので, データは短かく, filter の長さは容易に決定できない. 本論文では, Fig. 4 に示す方法で filter の長さ M を決定した. 横軸は filter の長さ M をデータの数 N に対する割合に換算した値 (%) を示し, 縦軸は卓越周波数 (Location of peak) と, その周波数成分の持つ power spectral density の値 (Peak value) とを示す. 内挿する前の全データは 50 点 (5 秒間) で, N は 50 点のデータを 3 次の spline 関数を用いて内挿した時のデータ数である (Appendix B). 従って, サンプリングのデータは常に 5 秒間で一定である.

filter の長さ M の変化に対して Location of peak が安定で, 且つ, その Peak value が最大となることを条件とすると, Fig. 4 からこの条件を満たす場合は, $N=50, M=15$ (30%), もしくは, $N=500, M=125$ (25%) の 2 つの場合である. 他の $N=80, 100, 250$ の場合はそれぞれ卓越周波数が M によって変化し, その安定性は見られない. spline 関数を用いて内挿する計算時間や M の値の増加によって (5) 式を解く計算時間の増加を考慮すると, $M=15$ (内挿はしない) とするのが適当であろうと考える. 以上の理由により, M. E. M. 解析においては, filter の長さ M は常に 15 とし計算を行なった.

2-5. 地震記象尾部 (Coda) のスペクトル解析

記象尾部についてのスペクトル解析を行なう場合, 初動の解析のようにそのデータの長さによる制限を受けない. ここでは, データとして初動の 10 秒後から 51.2 秒間 (データ数では 512 点) を選び, F. F. T. (Fast Fourier Transform) を用いて卓越周期を求めた. さらに, スペクトル・ウィンドウを用いてスペクトルの平滑化 (smoothing) を行ない, 各々の記象について, スペクトルの比較を容易にした.

スペクトル・ウィンドウはサイドローブが小さく, しかも負のサイドローブを持たない Parzen window を用いた (BÅTH, 1974, p. 162). ただし, 移動平均を行なう場合周波数

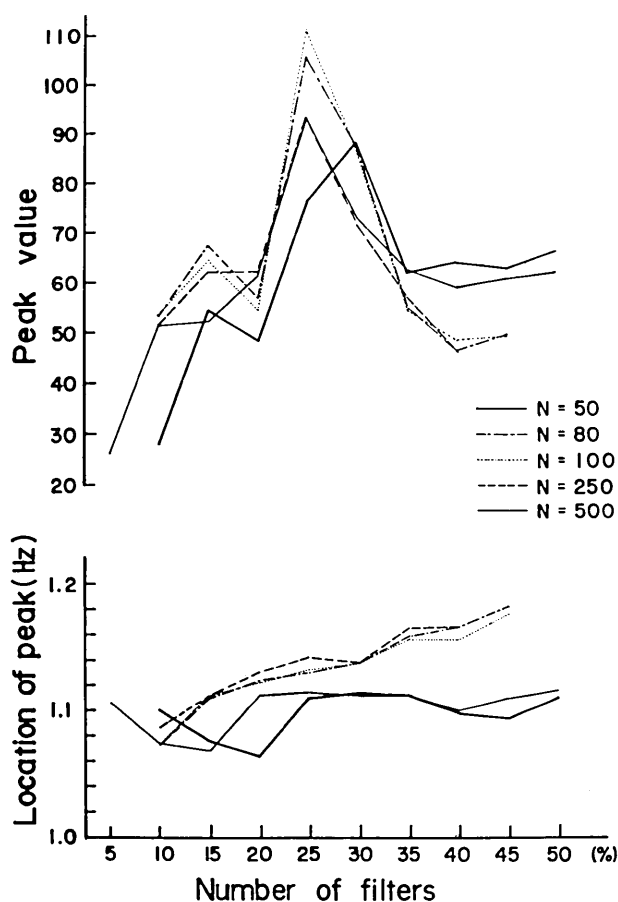


Fig. 4. Peak value of spectra and location of peak as a function of filter length, which is represented by the percent of the ratio of number of filters (M) to the number of data (N) interpolated by spline function of the three order. Peak value and location of peak denote power spectral density by M. E. M. in arbitrary unit and predominant frequency, respectively. The number of filters is determined as 30% ($M=15$) by the constraints that peak value of spectra holds maximum without peak shift and by considering the time of calculation.

領域であるから、時間領域表示の Parzen window を周波数領域表示に変換してこれを用いなければならない。window 幅は F.F.T. によって出力されるスペクトルと、それを smoothing したスペクトルとを比較して window closing 法によってその大きさを決定した。ここで注意しなければならないのは、F.F.T. によって出力される卓越周波数と smoothing を行なった後のそれとは多少の違いが生ずることである。これは smoothing によってその近傍の spectral density が、いま注目している周波数の持つ spectral density にその影響を及ぼすためである。しかし、この smoothing による卓越周波数の差異

は後述する議論では殆んど問題にならない。

Table 3. Predominant period of initial part of the explosion earthquakes analysed by M. E. M.

	Date	Component	M.E.M.P.P.*	M.E.M.S.D.**
3. 結 果	Feb. 1	U-D	2.33 (sec)	2843.76
		N-S	1.10	246.74
		E-W	2.13	2169.29
3-1. M.E.M. 解析	Feb. 15	U-D	2.08	93.04
N-S		0.88	95.49	
E-W		0.94	8.65	
3-1-1. 初動 5 秒間のスペクトル解析	Feb. 20	N-S	1.64	224.61
		E-W	2.70	943.94
		U-D	1.30	1028.02
記象を見ると立ち上がりから 5 秒間程度が特徴的であることは明らかである。この論文では、「初動」を立ち上がりから 5 秒間と定義し、その「初動」に対してスペクトル解析を行なった。従って、P 波を他の later phase と分離して解析を行なったとは言えない。しかし、そのような P 波と later	Mar. 10	N-S	1.67	869.56
		E-W	2.50	579.04
		U-D	2.38	2345.99
	Apr. 18	N-S	1.19	227.42
		E-W	2.50	426.40
		U-D	1.00	269.58
	Apr. 26	N-S	1.18	157.43
		E-W	1.85	595.66

*Predominant period.

**Power spectral density in arbitrary unit.

データ数が 50 点以下になると分解能の良いスペクトルは得られない。従って、爆発地震の初動部分の特徴を記述するために、また分解能の良いスペクトルを得るために、データ数を最小限の 50 点として計算を行なった。Table 3 に M.E.M. による「初動」の卓越周期 (M.E.M. Predominant Period 以後 M.E.M. P.P. と略記する) とその power spectral density (M.E.M. S.D. と略記する) を示す。M.E.M. S.D. に出力される値は記録された原記象を mm 単位で測定し、その値を入力したときの計算結果である。大内・南雲 (1975) は、Burg の指摘、即ち、M.E.M. はスペクトル密度を推定するのであり、そのピーク値は正しい値を示さないかもしれないが、その面積は正しい値に比例する、と述べている。従って、power spectral density の値を直接比較することは危険である。しかし、卓越周波数について議論することはもちろん可能である。また、単一周波数 (例えば、sinusoid) に対しては M.E.M. スペクトルは鋭いピークを与えるから、そのピーク値が大きいということは、記象の解析しているその部分に単一周波数成分が卓越していることは明らかであるが、その周波数成分の振幅が大きいことも示唆している。

M.E.M. P.P. において特徴的なことは、第一に N-S 成分に比べて E-W 成分の方が長周期であること、第二に Apr. 18 の U-D 成分を除けば U-D 成分の卓越周期は噴火活動の時間的推移に従って短周期になっていることである。即ち、今回の一連の噴火の中で最初の Feb. 1 の爆発地震の記象 U-D 成分において長周期であり、それに比べて最大規模である Mar. 10 の U-D 成分はかなり短周期である。

3-1-2. M.E.M. Running Spectra

Fig. 5 に reduced seismograms と M.E.M. を用いた running spectra を示す。reduced seismograms は最大振幅で normalize してある。先にも述べたように、「初動」

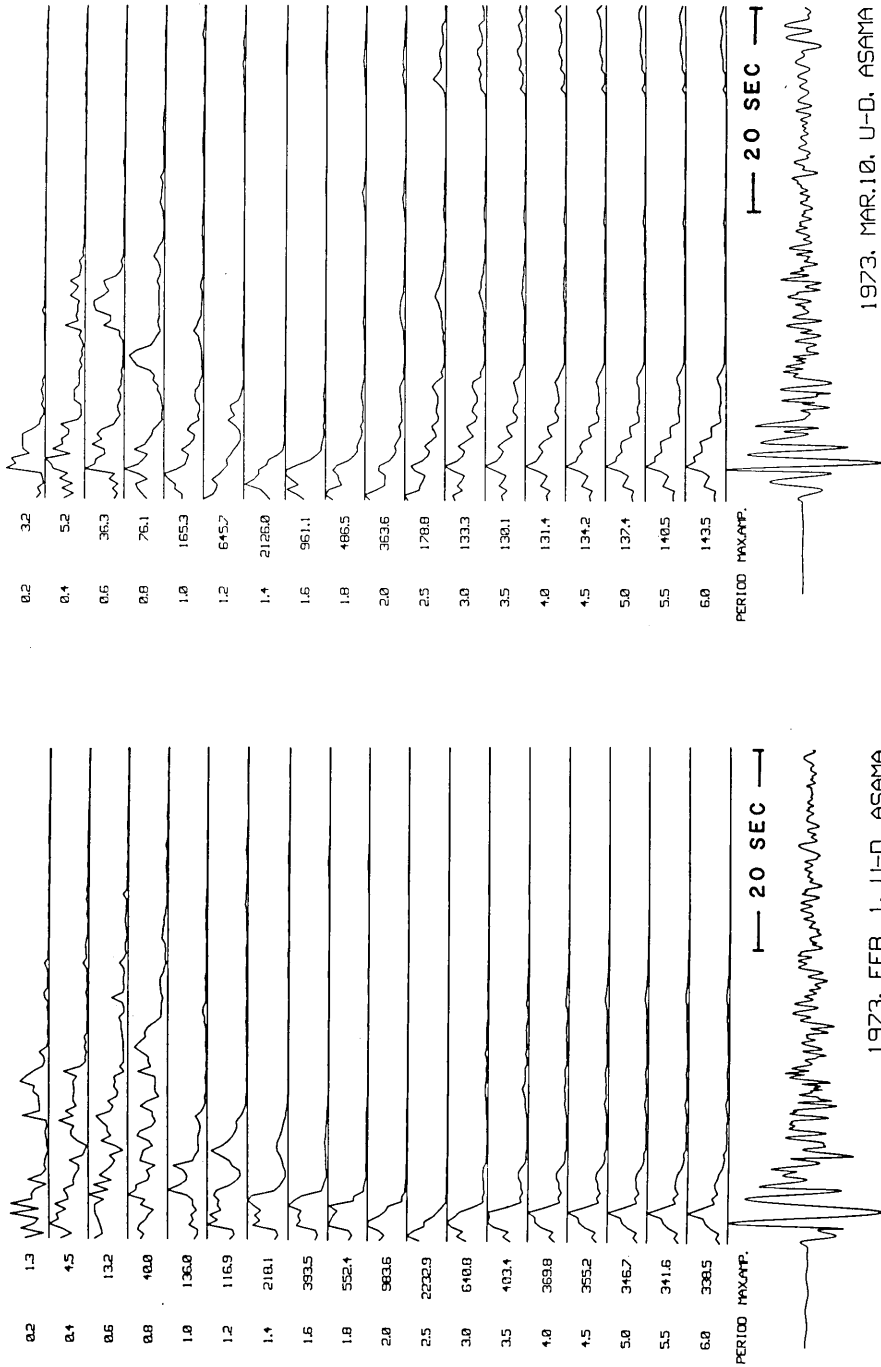
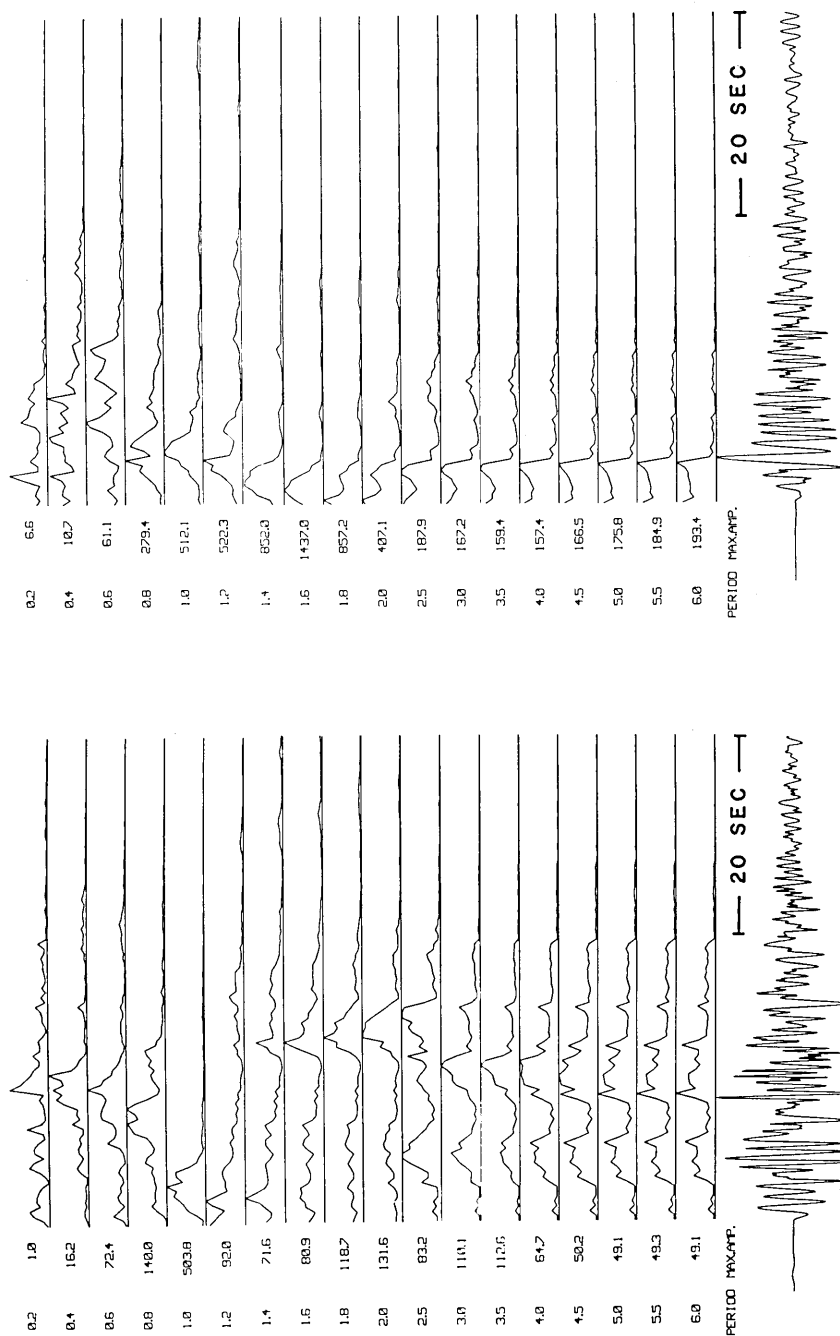
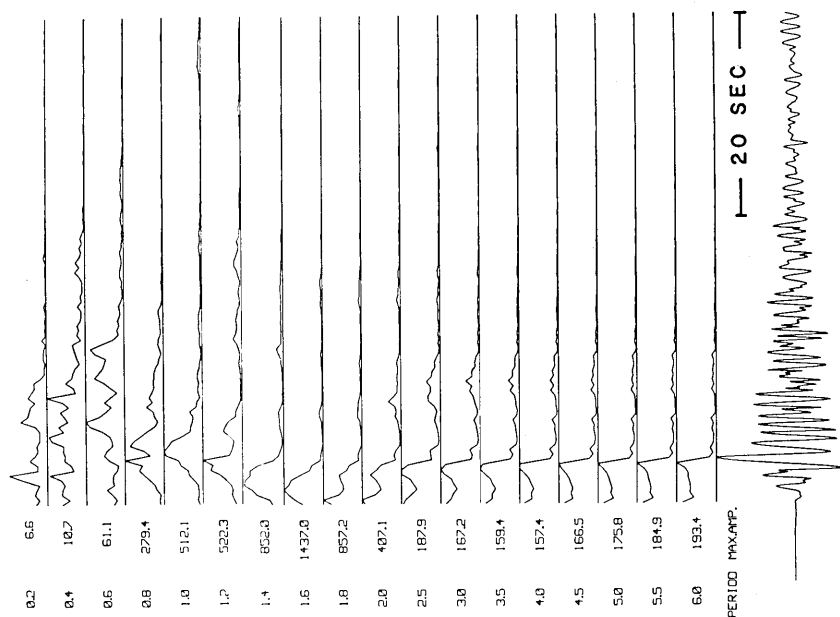


Fig. 5. Running spectra of the explosion earthquakes on Feb. 1 and on Mar. 10 in 1973 analysed by M. E. M. with the seismograms, which are normalized by the maximum amplitude, at the time intervals of 0.1 sec.



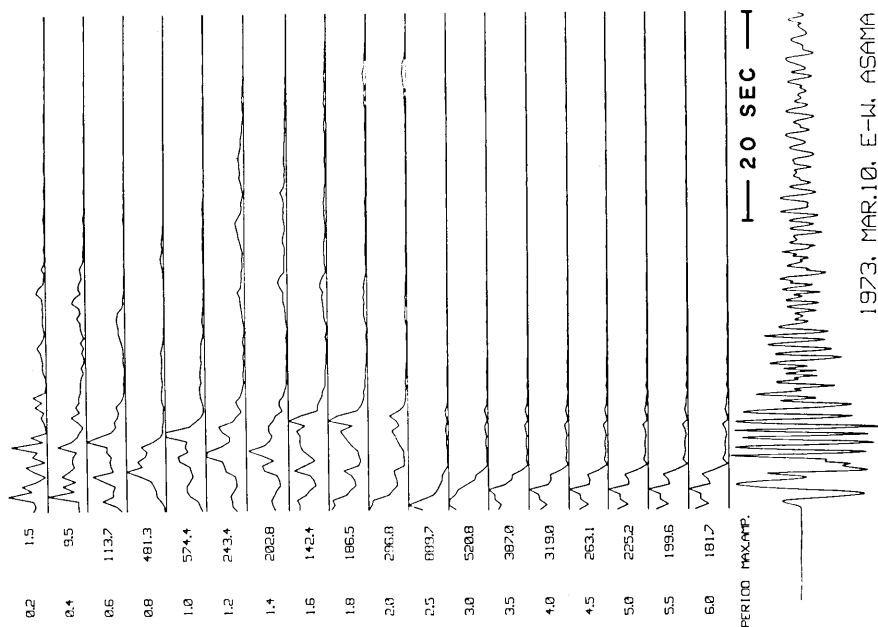
1973, FEB. 1, N-S, ASAMA

Fig. 5-c



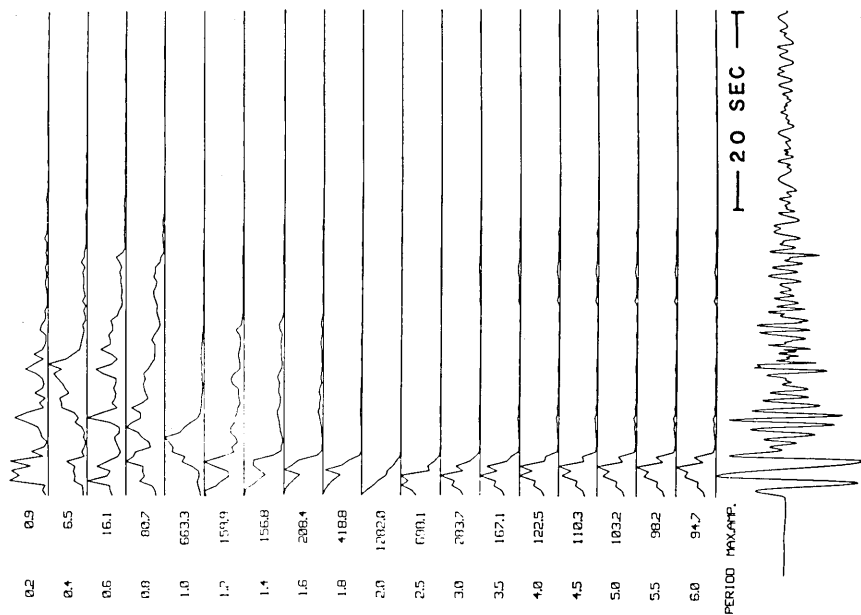
1973, MAR. 10, N-S, ASAMA

Fig. 5-d



1973, MAR.10, E-W, ASAMA

Fig. 5-f



1973, FEB. 1, E-W, ASAMA

Fig. 5-e

に長周期が卓越していることは明らかである。解析は Feb. 1 と Mar. 10 の爆発地震のそれぞれ 3 成分に対して行なった。表示方法は、まず立ち上がりから 50 点 (5 秒間) のスペクトルを計算し、一点目に plot する。次に時系列に沿って 5 点 (0.5 秒) shift させてスペクトルを計算し二点目に plot して一点目と直線で結ぶ。以下同様にして 100 回 (50 秒間) shift させた。従って Fig. 5 はある周期成分の power spectral density が時系列に沿ってどんな変化をするか示したものである。ただし、それぞれの周期成分の持つピーク値 (sweep maximum amplitude) で normalize した。解析した周期は 18 種類で Table 4 にピーク値を示す。Fig. 5 から判るように殆んどの記象は長周期成分が立ち上がりから 10 数秒の間で減少している。

Fig. 6 に周期とピーク値との関係を示す。Feb. 1 の記象については、U-D 成分で 2.5 秒付近にピークがあり、N-S 成分では 1 秒付近にピークがある。それに対して E-W 成分では 1 秒と 2 秒付近にそれぞれピークを持ち、その間の 1.4~1.6 秒付近に splitting が見られる。また、Mar. 10 の記象については、U-D 成分や N-S 成分が 1.4~1.6 秒付近でピークを持つのに対し、E-W 成分では Feb. 1 と同様に 1.6 秒付近で splitting が見られる。従って、両方の地震記象について、E-W 成分、即ち、radial 方向の成分で 1.6 秒付近の周期において、そのスペクトルに splitting が見られることは特徴的なことである。

Table 4. Sweep maximum amplitude analysed by M. E. M. (in arbitrary unit)

Period	Date					
	Feb. 1			Mar. 10		
	U-D	Component N-S	E-W	U-D	Component N-S	E-W
0.2 (sec)	1.29	0.97	0.91	3.16	6.59	1.47
0.4	4.50	16.21	6.51	5.22	10.66	9.46
0.6	13.24	72.37	16.09	36.29	61.07	113.66
0.8	40.03	139.98	80.75	76.14	279.40	481.30
1.0	135.99	503.78	663.25	165.27	512.13	574.40
1.2	116.94	92.04	159.87	645.67	522.27	243.44
1.4	218.07	71.62	156.84	2125.95	851.99	202.82
1.6	393.47	80.93	208.39	961.13	1437.02	142.38
1.8	552.44	118.75	418.78	486.46	857.24	186.48
2.0	983.64	131.61	1281.99	363.65	407.14	296.75
2.5	2232.85	83.20	698.09	178.75	189.87	889.66
3.0	640.76	110.04	283.66	133.26	167.23	520.82
3.5	403.37	112.61	167.09	130.14	159.35	387.00
4.0	369.75	64.67	122.53	131.41	157.44	319.05
4.5	355.16	50.23	110.29	134.19	166.49	263.14
5.0	346.71	49.09	103.16	137.37	175.85	225.18
5.5	341.16	49.28	98.22	140.52	184.92	199.56
6.0	338.45	49.15	94.66	143.45	193.44	181.71

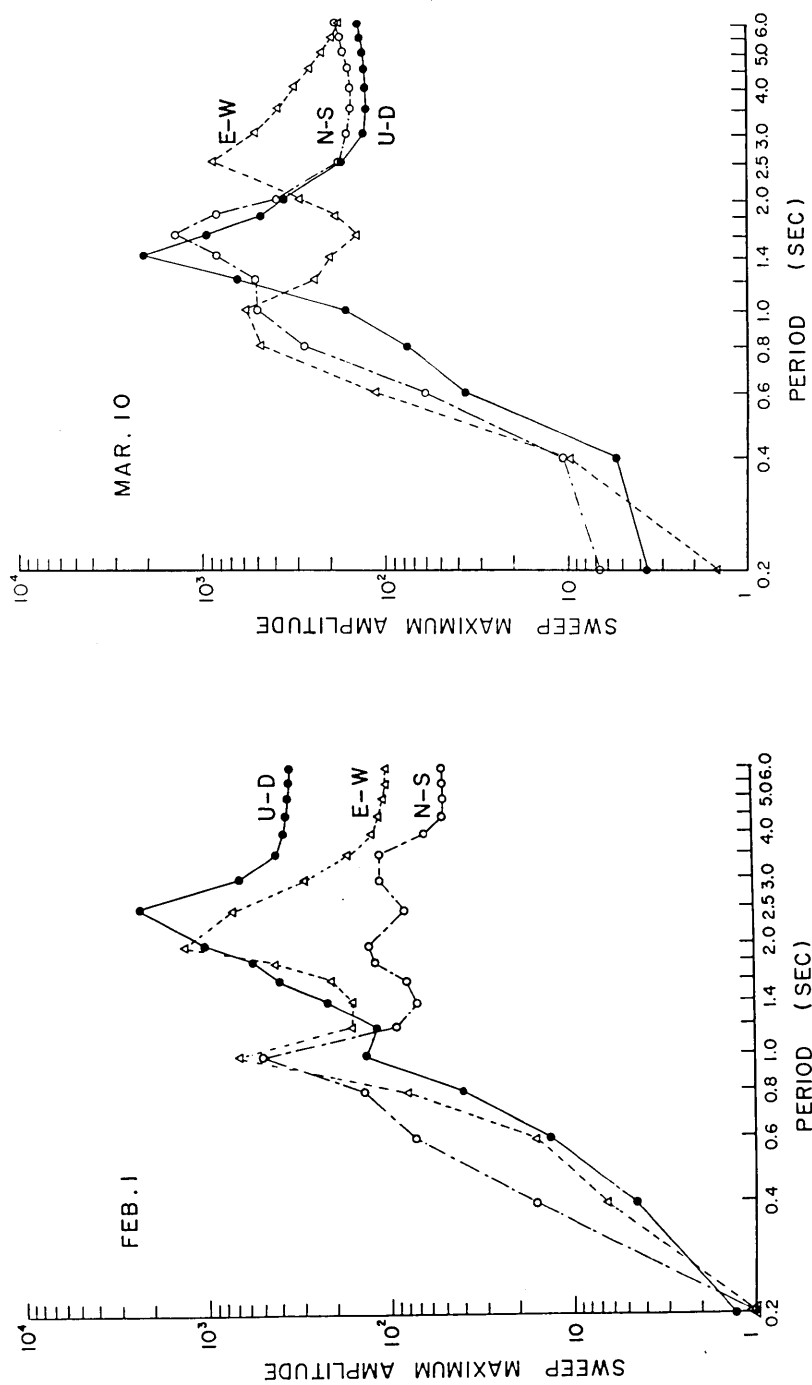


Fig. 6. Sweep maximum amplitude analysed by M. E. M. in arbitrary unit, corrected for frequency response of magnification, and period of the explosion earthquakes on Feb. 1 and on Mar. 10 in 1973.

3-1-3. M. E. M. Running Diagram

Fig. 5 に示した running spectra を 99 種類 (0.1 Hz から 5 Hz まで 0.05 Hz の間隔) の周波数について計算し、縦軸に時系列、横軸に周波数を取り、時系列の中のある時刻とある周波数によって作られる格子点に power spectral density を与え、contour を書いたものを Fig. 7 に示す。これを「Running Diagram」と呼ぶことにする。格子点に与える値の計算、換言すれば、running spectra の計算は 3-1-2 で述べた方法と同じである。横軸は上述したように時系列に沿う時刻で立ち上がりを 0.0 sec とし、時系列に沿って 0.0 sec から 5.0 sec までを解析し、出力される 0.1 Hz から 5.0 Hz に対する power spectral density を第一列目の格子点に与える。第二列目には同様に 0.5 sec から 5.5 sec までの時系列に対応する。従って、Fig. 7 には格子点は 99×101 個存在し、それに対して contour を描いている。contour は、

$$H(N)=10 \times N^2 \quad (N=1, 2, \dots), \quad (7)$$

によって定め、X-Y plotter によって描いた。プログラムの手続き上、contour が閉じていない部分がある。しかし、実際のパターンと殆んど相違はないと考えられる。Fig. 7 から判る、卓越周波数について特徴的なことを列記する。

a) Feb. 1, U-D 成分について (Fig. 7-a)

0.4 Hz 付近の長周期が初動部分に集中し、その後 0.2 Hz 付近の長周期と 1.0 Hz 付近の短周期への分離が見られ、さらに 1.0 Hz 付近から 1.3 Hz 付近への移行が見られる。

b) Feb. 1, N-S 成分について (Fig. 7-b)

初動部分に 0.9 Hz 付近に波群があるが立ち上がりから 2 秒ほど後には 1.1 Hz 付近と 0.5 Hz 付近の卓越周波数の分離が見られる。さらに短周期成分は 1.3 Hz 付近への移行が見られる。

c) Feb. 1, E-W 成分について (Fig. 7-c)

初動部分の 0.5 Hz 付近の鋭いピークから 1.0 Hz 付近の鋭いピークへ卓越周波数が移行し、その後の時系列に沿ってほぼ一定した卓越周波数を呈している。

d) Mar. 10, U-D 成分について (Fig. 7-d)

初動部分の 0.7 Hz 付近のピークが、0.8 Hz 付近の波群に移行した後、1.5 Hz 付近の短周期成分と 0.5 Hz 付近の長周期成分に分離している。初動から 40 秒後付近に 0.5 Hz 程度の長周期成分が若干見られるのも特徴的である。

e) Mar. N-S 成分について (Fig. 7-e)

初動部分の 0.7 Hz 付近のピークが 1.0 Hz, 1.2 Hz へと移行し、その後 0.8 Hz 付近の長周期が再び卓越することが特徴的で、E-W 成分にも同様なことが見られる。

f) Mar. 10, E-W 成分について (Fig. 7-f)

初動部分に 0.4 Hz 付近にピークがあるが 2 秒も経過しない間に 1.2 Hz 付近のピークに移行し、長周期へ shift しそうになるが、再び 1.2 Hz 付近にピークを持つ。その後、0.8 Hz から 0.9 Hz 程度の長周期が再び卓越する。

Running Diagram から上述した結果が得られるが、さらに強調したいことは、Feb. 1 においても Mar. 10 においても E-W 成分の卓越周波数の時系列に沿う分離が顕著なこ

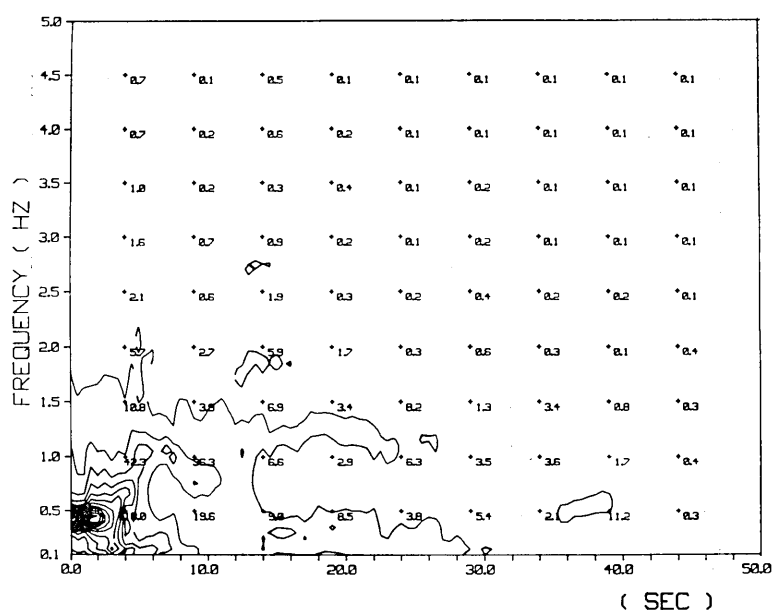


Fig. 7-a

1973, FEB. 1, U-D, ASAMA

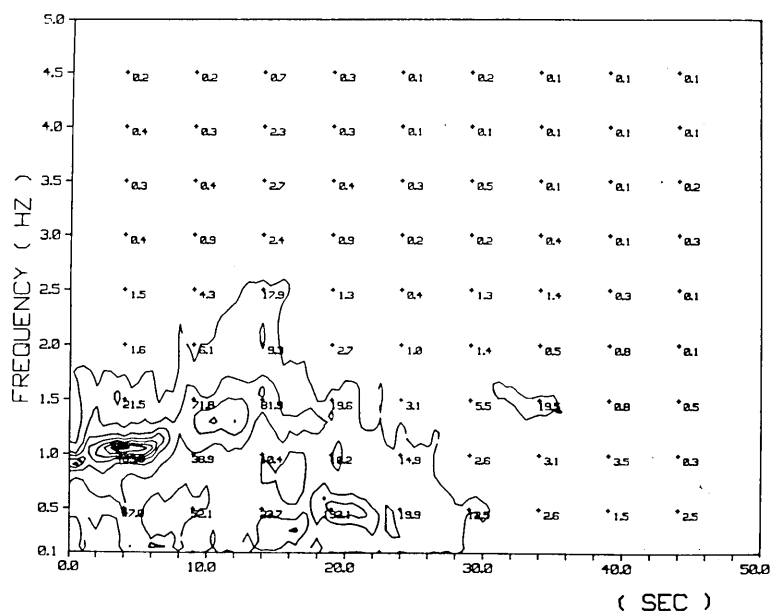


Fig. 7-b

1973, FEB. 1, N-S, ASAMA

Fig. 7. Running diagrams of the explosion earthquakes on Feb. 1 and on Mar. 10 in 1973 analysed by M.E.M. The ordinate and abscissa represent frequency and starting time of M.E.M. analysis along the time sequence, respectively. Numbers in these diagrams are power spectral densities by M.E.M. in arbitrary unit, corrected for frequency response of magnification. Contours are calculated as follows: $H(N) = 10 \times N^2$ ($N=1, 2, \dots$). The predominant period of the initial part of seismic waves change and/or separate into other periods.

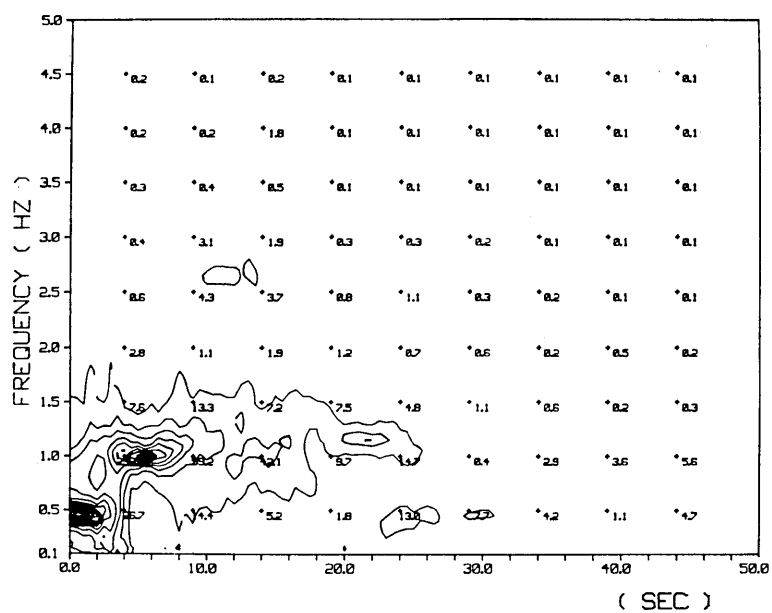


Fig. 7-c

1973, FEB. 1, E-W, ASAMA

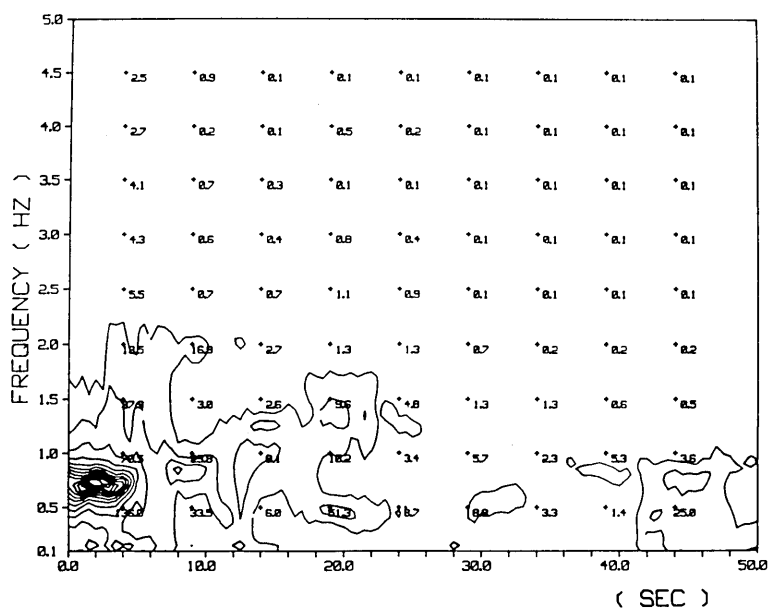
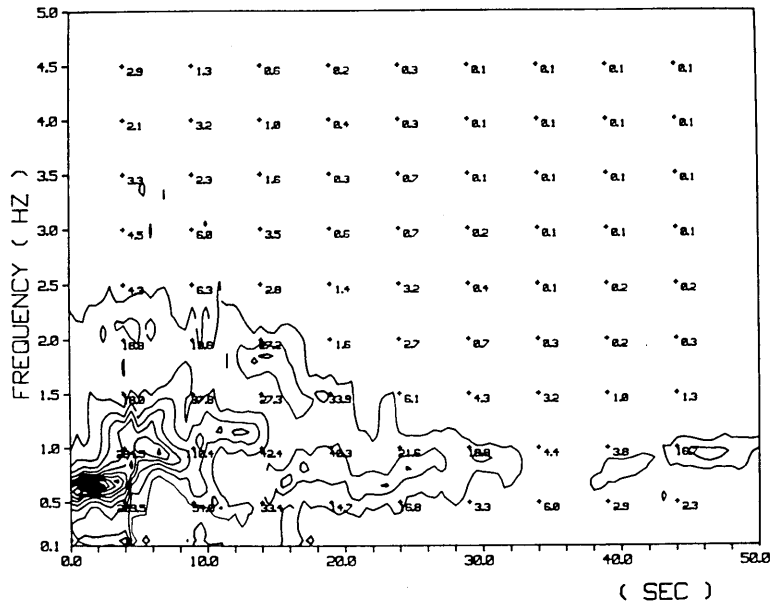


Fig. 7-d

1973, MAR.10, U-D, ASAMA



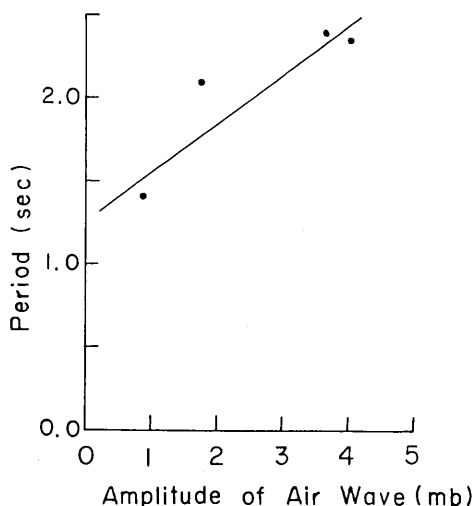


Fig. 8. Relation between the predominant period of the initial part (5 sec from on-set) of the explosion earthquakes and amplitude of air waves.

初動部分 (U-D 成分) が長周期になる傾向がある。これは、爆発の機構を考える上で一つの重要な事実である。

3-2. F.F.T. を用いた地震記象尾部 (Coda) のスペクトル解析

3-2-1. 記象尾部のスペクトル解析

立ち上がり (on-set) から 10 秒間を除いて 51.2 秒間を F.F.T. を用いて Feb. 1 と Mar. 10 の記象に対しスペクトル解析を行なった。結果を Table 5 に示す。2-5 で述べたように F.F.T. による出力 (before smoothing) とスペクトル・ウィンドウを用いて平滑化を行なった出力 (after smoothing) は Table 5 に示す程度の違いを生ずる。記象尾部の部分では E-W 成分よりも N-S 成分、即ち、transverse 方向の成分で長周期が卓越している。

Table 5. Predominant period of the later part of the seismograms analysed by F.F.T.

Date	Component	Period (Before smoothing)	Period (After smoothing)
Feb. 1	U-D	5.69 (sec)	5.12 (sec)
	N-S	0.70	0.70
	E-W	0.85	0.87
Feb. 20	N-S	6.40	5.12
	E-W	1.00	1.38
Mar. 10	U-D	1.60	1.19
	N-S	1.31	1.28
	E-W	0.91	0.93
Apr. 18	U-D	5.12	4.65
	N-S	1.46	1.46
	E-W	0.97	0.98

とである。

3-1-4. 初動部分の卓越周期と空振の大きさ

爆発地震の seismic energy と空振の大きさとは特別の相関関係がないが (下鶴地, 1975), U-D 成分の M.E.M. P.P. と空振の大きさは Fig. 8 に示すような直線関係があるように見える。U-D 成分の M.E.M. P.P. の値を P sec, 空振の大きさを A mb とすると,

$$P(\text{sec}) = 1.26 + 0.29A(\text{mb}), \quad (8)$$

という関係が得られる。空振の大きさ A が大きければ爆発地震の

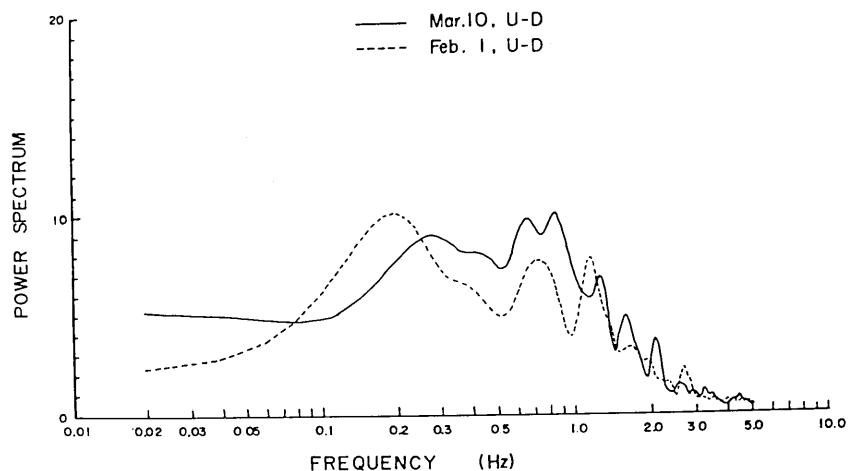


Fig. 9-a

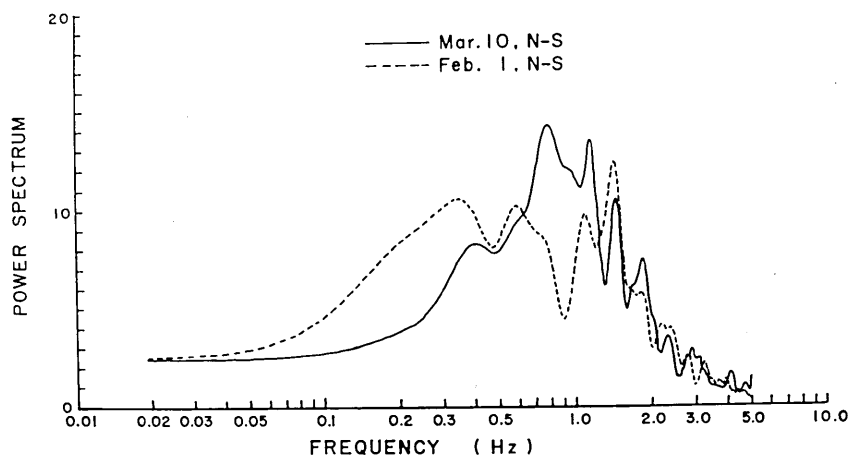


Fig. 9-b

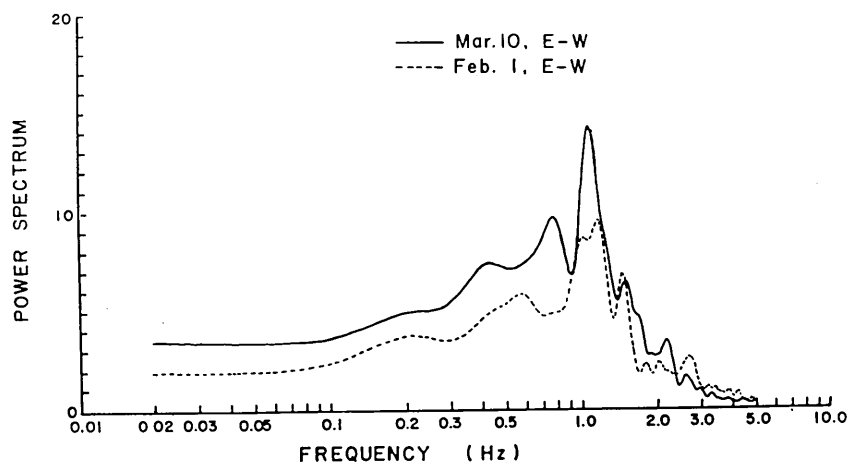


Fig. 9-c

Fig. 9. F.F.T. spectra of the explosion earthquakes on Feb. 1 (broken line) and on Mar. 10 (solid line), corrected for frequency response of magnification, and smoothed by a spectral window.

3-2-2. Feb. 1 と Mar. 10 のスペクトルの特徴

Feb. 1 と Mar. 10 における爆発地震の各々の成分を比較し、その特徴を列記する (Fig. 9).

a) U-D 成分について (Fig. 9-a)

Feb. 1 は 0.2 Hz 付近の周波数が、また、Mar. 10 は 0.5~1.0 Hz 付近の周波数が卓越しており、両者は明らかに異なっている。

b) N-S 成分について (Fig. 9-b)

Feb. 1 は 1.4 Hz 付近の周波数が卓越しているが、0.3~0.4 Hz 付近の長周期成分も無視できない。一方、Mar. 10 は 0.7~1.3 Hz 付近の周波数が卓越している。

c) E-W 成分について (Fig. 9-c)

Feb. 1 と Mar. 10 は殆んど同様のスペクトル・パターンを示し、Mar. 10 は Feb. 1 にバイアスがかかった形になっている。これは、a) および b) では見られなかった特徴である。

4. ま と め

1973 年浅間火山の爆発地震記象について M. E. M. および F. F. T. を用いてスペクトル解析を行なった。その結果は次のようにまとめられる。

1) 「初動」の卓越周期について

- ① N-S 成分に比べて E-W 成分の初動は長周期である。
- ② Apr. 18 の U-D 成分を除けば、U-D 成分の「初動」の卓越周期は噴火活動の時間的推移に従って短周期になる。
- ③ 空振の大きさと U-D 成分の初動における卓越周期とは正の傾きを持つ直線関係があるように思われる。

2) Feb. 1 と Mar. 10 の地震記象について

- ① E-W 成分の sweep maximum amplitude において、1.6 秒付近で splitting が見られる。
- ② 時系列に沿う卓越周波数の移行、あるいは分離が見られる。
- ③ U-D 成分の記象尾部におけるスペクトルについて比較すると、Feb. 1 の記象の方が Mar. 10 のそれよりも長周期成分が卓越していることが判る。また、N-S 成分と E-W 成分の記象尾部におけるスペクトルとを比較すると、Feb. 1 の記象も Mar. 10 のそれも N-S 成分の方が E-W 成分に比べて長周期成分が卓越していることが判る。これは「初動」の卓越周期の解析結果と全く逆の結果である。さらに、E-W 成分同士を比較して特徴的なことは、両者のスペクトルは殆んど同じパターンを示しており、Mar. 10 のスペクトルは Feb. 1 のそれにバイアスがかかった形になっていることである。

5. 考 察

地震波のスペクトル解析を行なう場合、解析結果として出力されるスペクトル $S(\omega)$ は震源過程に依存する震源スペクトル $A(\omega)$ と地震波の伝播経路に依存する transfer func-

tion, さらに地震計の特性 $P(\omega)$ のそれぞれの関数になっていることは周知のことである。従って, $S(\omega)$ が大きな違いを持つことを理由にそのスペクトルの違いを震源過程の違いによるものであるとは断言できない。今回の解析のように, 震央距離が同じでも震源の深さが異なれば, $S(\omega)$ に違いを生ずる可能性があるからである。例えば, 震源の深さが異なれば地震波の伝播経路が異なるであろう。また, 爆発地震が火道中での magma の急激な発泡によるものとすれば, 深さによる火道の形状や静水圧の差異が考えられるから, それは爆発地震の発生機構に影響を及ぼすであろう。

ここで 4. の 2) で述べた Feb. 1 と Mar. 10 の記象に対する解析結果について考えてみることにする。E-W 成分のスペクトルについての特徴は 4. の 2) の ①, および ③ で述べたように, スペクトルにおける splitting やスペクトルの型 (パターン) にその類似性が見られることである。これに対して, U-D 成分においても, N-S 成分においても, そのような明らかな類似性は見られない。スペクトルに splitting が見られることやパターンの類似性を示す要因として次のようなことが考えられる。

第一に, 震源過程によるものである。特に, スペクトルの splitting については震源における周期解のモードとして説明されるかもしれない。さらに, 4. の 2) の ② で述べた時系列に沿う卓越周波数の移行・分離は, このモードの時間的変化を反映していると考えられる。

第二に, 伝播経路によるものである。火山体の地下構造は極めて複雑である。火山体のこのような複雑な地質構造 (例えば, 溶岩流, 火砕流, 降下軽石, 火山灰等の重畳した成層構造) や火山帯内部における crack や dyke 等は, その中を伝播する地震波に対してある種の「フィルター」の役目をし, 特定の周波数成分を遮断すると考えられる。しかしながら, (爆発地震の震源の深さに関する情報は得られていないが) 地下構造の地震波に対する影響が震源の深さによらず一定であるとすれば, $S(\omega)$ は, 爆発地震発生に関与した energy の差 (バイアス) を除いて, 同様であるだろう。そして, この「フィルター」は E-W 成分だけ作用し, U-D 成分や N-S 成分には顕著な影響を与えないと考えられる。なぜなら, U-D 成分や N-S 成分には前述したような E-W 成分に見られる類似性は認められないからである。

Feb. 1 の噴火は 11 年ぶりの最初のものであり, その後は単発的な小噴火や微噴火を続け, 今回の一連の噴火活動の中で最大規模の Mar. 10 の噴火に至る。下鶴他 (1975) はこの Mar. 10 の噴火において初めてパン皮状火山弾および軽石の多量噴出があったことを報告している。また, 荒牧 (1973) は, Mar. 10 の噴火に際し観測された火砕流について, その規模が Feb. 1 や Feb. 6 に観測されたそれよりも大きいことを報告している。

スペクトル解析の結果からは, Feb. 1 の爆発地震はその波動全体について Mar. 10 のそれよりも長周期成分が卓越していることが結論できる。これは, 下鶴他 (1975) が近地観測所や遠地観測所の記録から検討し結論したものと一致する。

以上のような爆発地震の波動的差異と噴火現象の記述から次のようなことが推考される: Feb. 1 の爆発は 11 年ぶりの噴火であり, 火道中に (そのメカニズムは判らないが) 蓄えられた energy は火道部の「蓋」, 換言すれば, 火口底をつき破ることにその殆んどが費やされた。小規模な火砕流により火道中の magma は流出したがその量は少なく, 火

道中には未だこの爆発に関与した magma が存在している。Feb. 6 から Mar. 10 までに単発的な小噴火や微噴火があった。これは火道中の magma 内での急激な発泡現象や連続的な degassing によるものであろう。このことは、この期間に多量の火山灰の噴出があったことと調和的である。火道中（上部）で degassing が起これば、magma は見掛け上 dense になるであろう。Mar. 10 の噴火はこの火道上部の dense になった magma を噴出し、さらに火砕流も発生させた。この際、essential なものをかなり噴出したであろう。それは、Mar. 10 の噴火でパン皮状火山弾や多量の軽石の噴出があったことと調和的である。爆発地震発生に関与した magma は、Feb. 1 と比べて（その後に magma の供給がなければ）、その量においては少なくなり、その密度においては見掛け上大きくなっているであろうから、これは Feb. 1 の爆発地震に比べて Mar. 10 の爆発地震の方が短周期成分において卓越していることと調和的である。

以上述べたことはあくまでも推考の域を脱していない。この他いろいろな説明が考えられよう。例えば、Feb. 1 の爆発地震の卓越周期と Mar. 10 のその違いは、火道中に存在する magma の上下運動によるものかもしれないし、あるいはまた発泡現象の差異によるものかもしれない。

爆発地震に関して議論した例は少なくない（例えば、竹山他、1960、吉川他、1963、田中康裕、1967、1970、1971、田中・神宮、1979、田中和夫、1971 など）。もし、爆発地震の発生機構として、magma の発泡過程で起こる急激な体積増加によるものであると考えるならば（下鶴、1978）、爆発地震の震源の深さはその event の起こる深さを意味していると考えられる。また、その発生機構は火薬爆発のそれと類似するであろう。理論的な火薬爆発の球状震源モデルでは、観測される初動の立ち上がりは全ての観測点において上下動地震計では UP また水平動地震計では PUSH である。しかし、実際の火薬爆発で引き波が観測された例もあり、その原因は不明である。今回の爆発地震の初動は殆んどが上下動地震計で UP であり、水平動地震計では PUSH である。したがって、その発生機構は火薬爆発のそれと類似すると考えて差し支えないであろう。しかしながら、注目すべきことは、今回の一連の爆発地震の中で最大規模であった Feb. 1 と Mar. 10 の初動の立ち上がりについて、三ノ鳥居だけで水平動地震計が PUSH であるにも拘らず、上下動地震計で DOWN が観測されたことである。これは、爆発地震の震源の深さによるものか、震源過程によるものか、またあるいは層構造における直達波と head wave の違いによるものか、他の原因によるものかは不明である。

ここで議論した記象は固有周期 5 秒の地震計で記録されたものである。しかも、2-3 で述べたように、振幅特性の補正に対する制限から長周期成分についての情報を得ることができなかった。爆発地震の地震波動には、現在記録可能な周波数帯域よりも、長周期成分が含まれている可能性がある。今後は、地震計の周波数帯域やダイナミックレンジをさらに広げた観測を行なうことが必要であろう。

次報では、地震波動の種類・性質その他について論ずる。

6. 謝 辞

この研究をまとめるにあたり、懇切な御指導を頂いた下鶴大輔教授・渡部暉彦助教授を

はじめ火山研究部の皆様に深く感謝の意を表します。

Appendix A. 円弧書き補正

Fig. 2 に示したように, arm がその静止位置において記録紙送りの方向に対して θ だけ傾いている場合を考える. 点 P の座標 (t_i, y_i) はある基準に基づいて引かれた零線(基準線) m' に垂線をおろし, その足を H として,

$$t_i = t_i(H), \quad (\text{A-1})$$

$$y_i = \text{sign}(H-P) \cdot \overline{PH}, \quad (\text{A-2})$$

に従ってその時刻 t_i と振幅 y_i が記象から読み取られたとする. ここで, $\text{sign}(H-P)$ は点 P が零線 m' より上方にある時はプラス, 下方にある時はマイナスの符号であることを意味する. ペンガルバの支点が記録紙送りにより見掛け上移動する方向(直線 m)に対し, 静止状態 (OH_0) で θ だけ傾いている場合, 点 P は OH_0 からさらに φ だけずれた位置にある. a を arm の長さ, HH_0 を Δl_i , OP の OH_0 からのずれを φ_i , 記録紙の送り速度を Sp , データの総数を N , 真の時刻と真の振幅をそれぞれ t_i^0, y_i^0 とすると, $i=1, 2, \dots, N$ について,

$$\Delta l_i \sin \theta + y_i \cos \theta = a \sin \varphi_i, \quad (\text{A-3})$$

$$a - \Delta l_i \cos \theta + y_i \sin \theta = a \cos \varphi_i, \quad (\text{A-4})$$

が成り立つ. 求める t_i^0, y_i^0 は,

$$t_i^0 = t_i - \Delta l_i / Sp, \quad (\text{A-5})$$

$$y_i^0 = a \varphi_i, \quad (\text{A-6})$$

によって求められる. (A-3), (A-4) 式から $\Delta l_i, \varphi_i$ を求め, (A-5), (A-6) に代入すると 2-1 に述べた, (1), (2) 式が求まる.

Appendix B. spline 関数による内挿

データの内挿に際し注意を要することは, その内挿方法の妥当性である. 従って, その内挿方法について検討を試みた.

spline 関数は,

$$y_i = \begin{cases} 0 & (i=1, 2, \dots, n_1) \\ 1 & (i=n_1+1, n_1+2, \dots, n), \end{cases} \quad (\text{B-1})$$

というデータに対しては y_{n_1}, y_{n_1+1} 付近で内挿前に存在しなかった振動が起こり, 質の短周期成分が加わる, というおかしい内挿をする. 一方,

$$y_i = \begin{cases} 0 & (i=1, 2, \dots, n') \\ -0.5 \cos \{\pi(i-n')/N_0\} + 0.5 & (i=n'+1, \dots, n'+N_0) \\ 1 & (i=n'+N_0+1, \dots, n), \end{cases} \quad (\text{B-2})$$

というデータに対してはそのデータに沿って reasonable な内挿を行なう. ここで用いた

地震記象は (B-2) 式の形で内挿していることは 2-2 で述べた。従って spline 関数による内挿については問題はないと結論される。

文 献

- AKI, K., M. BOUCHON, and P. REASENBERG, 1974, Seismic source function for an underground nuclear explosion, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **64**, 131-148.
- 荒牧重雄, 1973, 浅間火山 1973 年 2-3 月の噴火の際に発生した小型火砕流, 火山, **18**, 79-94.
- ARAMAKI, S. and H. HARAMURA, 1975, Geochemical notes (1): Chemical and mineral compositions of ejecta of 1973 eruption, Asama Volcano, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **50**, 109-114.
- BÄTH, M., 1974, *Spectral analysis in Geophysics*, 563 p, Elsevier.
- CARDER, D. S. and W. K. CLOUD, 1959, Surface motion from large nuclear explosions, *J. Geophys. Res.*, **64**, 1471-1487.
- CHEN, W. Y. and G. R. STEGEN, 1974, Experiments with Maximum Entropy power spectra of sinusoids, *J. Geophys. Res.*, **79**, 3019-3022.
- FRYER, G. P., M. E. ODEGARD, and G. H. SUTTON, 1975, Deconvolution and spectral estimation using final prediction error, *Geophysics*, **40**, 411-425.
- HASKELL, N. A., 1967, Analytic approximation for the elastic radiation from a contained underground explosion, *J. Geophys. Res.*, **72**, 2583-2587.
- HONDA, H., 1962, Earthquake mechanism and seismic waves, *J. Phys. Earth*, **10**, 1-97.
- JOHNSEN, S. J. and N. ANDERSEN, 1978, On power estimation in Maximum Entropy Method analysis, *Geophysics*, **43**, 681-690.
- LACOSS, R. T., 1971, Data adaptive spectral analysis method, *Geophysics*, **36**, 661-675.
- MINAKAMI, T., 1935 a, The explosive activities of Volcano Asama in 1935. (Part I), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **13**, 629-644.
- MINAKAMI, T., 1935 b, The explosive activities of Volcano Asama in 1935. (Part II), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **13**, 798-800.
- 水上 武, 1959, 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, **4**, 104-114.
- 水上 武, 平賀士郎, 内堀貞雄, 宮崎 務, 1959, 噴火と火山に発生する地震との研究 (第 2 報) 特に浅間火山の噴火予知の問題に関して, 火山, **4**, 115-130.
- MINAKAMI, T., 1960, Fundamental research for predicting volcanic eruptions. (Part I), *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **38**, 497-544.
- MINAKAMI, T., S. UTIBORI, S. HIRAGA, T. MIYAZAKI, N. GYODA, and T. UTSUNOMIYA, 1970, Seismometrical studies of Volcano Asama (Part I). Seismic and volcanic activities of Asama during 1934-1969, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 235-301.
- MINAKAMI, T., 1974, Seismology of volcanoes in Japan, in *Physical Volcanology* edited by L. Civetta *et al.*, chap. 1, 1-28, Elsevier.
- MOLNAR, P., 1971, P-wave spectra from underground nuclear explosion, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **23**, 273-287.
- 村井 勇, 1974, 1973 年の浅間火山の噴火活動と小規模火砕流, 地震研究所速報, **13**, 127-162.
- 大内 徹, 南雲昭三郎, 1975, Maximum Entropy Method の地震波解析への応用, 地震研究所彙報, **50**, 359-384.
- ROMNEY, C., 1959, Amplitudes of seismic body waves from underground nuclear explosion, *J. Geophys. Res.*, **64**, 1489-1498.
- SAITO, M., 1978, Possible instability in the Burg Maximum Entropy Method, *J. Phys. Earth*, **26**, 123-128.
- SASSA, K., 1935, Volcanic micro-tremors and eruption-earthquakes. Part I of the geophysical studies on the Volcano Aso, *Mem. Coll. Sci. Ser. A, Kyoto Univ.*, **18**, 255-293.
- 下鶴大輔, 行田紀也, 竹田豊太郎, 1971, 爆発地震の二, 三の性質, 火山, **16**, 秋田駒ヶ岳 1970-1971 年噴火特集号, 143-152.
- 下鶴大輔, 1973, 浅間火山の最近の噴火活動について, 火山, **18**, 33-34.

- 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 年の浅間噴火活動について, 地震研究所彙報, 50, 115-151.
- 下鶴大輔, 1978, 地震学的手法による噴火予知の研究, 火山, 23, 7-18.
- SKOKO, D., Y. SATÔ and I. OCHI, 1965, Reduction and analysis of seismograms consisting of only Maxima and Minima, *J. Phys. Earth*, 13, 5-9.
- SWINGLER, D. N., 1979, A comparison between Burg's Maximum Entropy Method and a nonrecursive technique for the spectral analysis of deterministic signals, *J. Geophys. Res.*, 84, 679-685.
- 高木 聖, 1943, 震源(第1報), 験震時報, 13, 1-11.
- 高木 聖, 1950, 震源(第2報)附地下探査への応用, 験震時報, 14, 1-17.
- 高木 聖, 1952, 震源(第3報)内部球窩に静水圧の作用する場合, 験震時報, 16, 34-52.
- 高木 聖, 1953 a, 震源(第4報)内部球窩に Aperiodic な力が作用する場合, 験震時報, 17, 1-30.
- 高木 聖, 1953 b, 震源(第5報)強制力が作用する場合, 験震時報, 17, 31-51.
- 竹山一郎, 田中康裕, 小林悦夫, 磯野良徳, 1960, 1958 年 11 月 10 日の浅間山爆発による地震と空振, 験震時報, 25, 45-53.
- 田中和夫, 1971, 噴火地震活動, 火山, 16, 秋田駒ヶ岳 1970-1971 年噴火特集号, 135-142.
- 田中康裕, 1967, 桜島の爆発地震について, 火山, 12, 26-40.
- 田中康裕, 1970, 伊豆大島の地震計測学的研究(Ⅲ), 噴火微動・前駆地震・A型地震, 気象研究所研究報告, 21, 243-289.
- 田中康裕, 1971, 爆発地震のメカニズム, 火山, 16, 秋田駒ヶ岳 1970-1971 年噴火特集号, 153-161.
- 田中康裕, 神宮 博, 1979, 浅間山の火山性地震の記象型およびその地震の発生時期の特徴, 気象研究所研究報告, 30, 61-74.
- ULRYCH, T. and T. N. BISHOP, 1975, Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 13, 183-200.
- WERTH, G. C. and R. F. HERBST, 1963, Comparison of amplitudes of seismic waves from nuclear explosions in four mediums, *J. Geophys. Res.*, 68, 1463-1475.
- WYSS, M., 1971, Comparison of underground explosion and earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 76, 2716-2729.
- 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, 8, 11-19.

8. *Explosion Earthquakes Associated with the 1973 Eruptions of Asama Volcano. (Part I) Spectral Studies.*

By Hiroshi IMAI, Noriya GYODA and Etsuro KOYAMA,
Earthquake Research Institute.

Asama Volcano, located in the central part of Honshu, commenced an eruption at the summit crater on Feb. 1 in 1973 after 11 years' quiescence and a series of explosive eruptions continued until April 26 of the same year. The data of three component seismograms analysed in this paper were recorded by long-period seismographs ($T_0=5.0$ sec) at the seismic station NAKANOSAWA located 4.2 km east of the summit crater and were registered on smoked paper recording drums at the Asama Volcano Observatory. Power spectral analyses were carried out separately, by use of the Maximum Entropy method and the Fast Fourier Transform method for both the initial parts and the later parts, of the explosion earthquakes that exceeded 10^{15} ergs in seismic energy.

The results of the spectral studies are as follows:

1) As to the initial parts (5 sec from on-set) of seismic waves, N-S components prevail in longer periods against E-W components.

2) As to the later parts (51.2 sec after 10 sec from on-set), the results are contrary to 1). Moreover, E-W components of Feb. 1 and Mar. 10 resemble each other. The other components (U-D, N-S), however, are different from each other. Particularly, it should be emphasized that the maximum value of the spectrum for the U-D component is found at about 0.2 Hz on Feb. 1 but at about 0.7-1.3 Hz on Mar. 10.

3) Sweep maximum amplitudes (or running diagrams) for E-W components have splittings at about 1.4-1.6 sec.

4) Predominant periods of the initial part of seismic waves on running diagrams change and/or separate into other periods.

As the results of these analyses, it is recognized that the explosion earthquake on Feb. 1 is different from others on the mechanism, particularly, from that on Mar. 10. In addition, it is characteristic that the spectra of the later parts for E-W components, which are in a radial direction from the summit crater, are stable in shape. It is obvious that these results give some clue to the knowledge of the mechanism of explosion earthquakes, and of eruptions.