

火山性地震のスペクトル的研究 (1)

—爆 発 地 震—

西

潔

SPECTRAL STUDY ON THE VOLCANIC EARTHQUAKE (1)

—EXPLOSION EARTHQUAKE—

By Kiyoshi NISHI

Synopsis

Spectral study on the explosion earthquakes of Sakurajima Volcano was carried out. As the results of the spectral analysis based on the source mechanism of Sharp's explosion type, and the measurement of the amplitude of the air shock wave, the following knowledges are obtained;

(1) The most peak frequency of the velocity spectra of the initial motion of the explosion earthquakes are about 2 Hz, and the radii of the cavity estimated from the peak frequency are about 0.2 Km.

(2) The maximum amplitude of the air shock wave of explosion is not depend on the dimension of the cavity of the source, but on the pressure within the cavity.

1. は じ め に

火山活動に関連して発生する火山性地震の発生機構の解明は、火山活動の過程を明らかにし実用的な噴火予知を達成する上で重要な問題である。火山性地震の発生機構を解明する方法のひとつに、地震波のスペクトル解析の結果から震源モデルの組立て又は震源パラメータの推定を行う方法がある。

火山性地震のなかには、すくなくとも記録上の波形で見ると構造的な地震とは異なるものが多い。今回は火山性地震のなかでは最も特徴的な爆発地震についてスペクトル解析を行い、爆発源モデルを用いて震源パラメータを推定した。爆発地震が他の火山性地震と異なる点は空気振動を伴う点であり、この空振が震源パラメータの何によって支配されているかを明らかにした。又従来爆発に伴う空気振動と爆発地震の最大振巾との相関はあまりよくないとされて来たが、今回の解析結果でその理由が明らかになったものと考えられる。

2. 爆発源モデルとスペクトル

爆発源モデルとして、無限弾性体内に球状の空隙があり壁の垂直方向に step function で示される圧力が作用するというモデル¹⁾²⁾を採用する。

このモデルの far-field における変位 u は、Sharp (1942) によれば次式で示される。

$$u = \frac{a^2 p_0}{2\sqrt{2} \mu r} e^{\omega \tau / \sqrt{2}} \sin \omega \tau \quad (\tau \geq 0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$= 0 \quad (\tau < 0)$$

ここで

r : 球の中心からの距離

a : 球の半径

p_0 : 球の内壁に作用した圧力

τ : $t - (r - a)v/t$: 圧力が作用したときから計り始めた時刻, v : p 波速度)

$$\omega = 2\sqrt{2} v/3a$$

μ : 剛性率

をそれぞれ表わす。

観測値は moving coil type の電磁式地震計によって得られ速度に比例した値であるから (1) 式で示される地動の速度スペクトルを求める。そのために先ず変位スペクトルの振巾 $\Omega_{\text{dis.}}(\omega)$ を求めると (1) より

$$\begin{aligned}\Omega_{\text{dis.}}(\omega) &= \left| \int_0^\infty \frac{a^2 p_0}{2\sqrt{2} \mu r} u(t) e^{-\omega_0 t / \sqrt{2}} (\sin \omega_0 t) e^{-i\omega t} dt \right| \\ &= \frac{a^2 p_0}{2\sqrt{2} \mu r} \cdot \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega^2 - \frac{\omega_0^2}{2})^2 + 2\omega_0^2}} \dots\dots\dots(2)\end{aligned}$$

となる。ここで

$u(t)$: Heaviside unit-step function

$$\omega_0 = 2\sqrt{2} v/3a$$

を表わす。

従って速度スペクトルの振巾 $\Omega_{\text{vel.}}(\omega)$ は (2) より直ちに

$$\Omega_{\text{vel.}}(\omega) = \frac{a^2 p_0}{2\sqrt{2} \mu r} \cdot \frac{\omega_0 \omega}{\sqrt{(\omega^2 - \frac{\omega_0^2}{2})^2 + 2\omega_0^2}} \dots\dots\dots(3)$$

と求まる。

スペクトルは $\frac{d\Omega_{\text{vel.}}(\omega)}{d\omega} = 0$ より $\omega = \sqrt{\frac{3}{2}} \omega_0$ のとき最大となる。即ち速度スペクトルの卓越周波数 f

は

$$\begin{aligned}f &= \sqrt{\frac{3}{2}} \omega_0 / 2\pi \\ &= v / \sqrt{3} \pi a\end{aligned}$$

で与えられるから、爆発源の半径 a は速度スペクトルの卓越周波数 f を既知として

$$a = \frac{v}{\sqrt{3} \pi f} \dots\dots\dots(4)$$

となる。

次に速度振巾を最大値を $\dot{u}_{\text{max}}$ とすると (1) より

$$\dot{u}_{\text{max}} \propto a p_0 v / \mu r \dots\dots\dots(5)$$

となる。

同一観測点における比較の場合を考えて $r = \text{const}$ とすると, (4), (5) 式より内部圧 p_0 は

$$p_0 \propto f \cdot \dot{u}_{\text{max}} \dots\dots\dots(6)$$

となる。

従って (4) 式により速度スペクトルの卓越周波数から震源域の半径がわかり, (6) 式により卓越周波数と最大振巾から内部圧については大きさの比較を行うことが可能となる。

3. データと解析結果

解析に用いた記録は地動については中域火山観測網の鍋山観測点のものである。これは火口から約 15 km

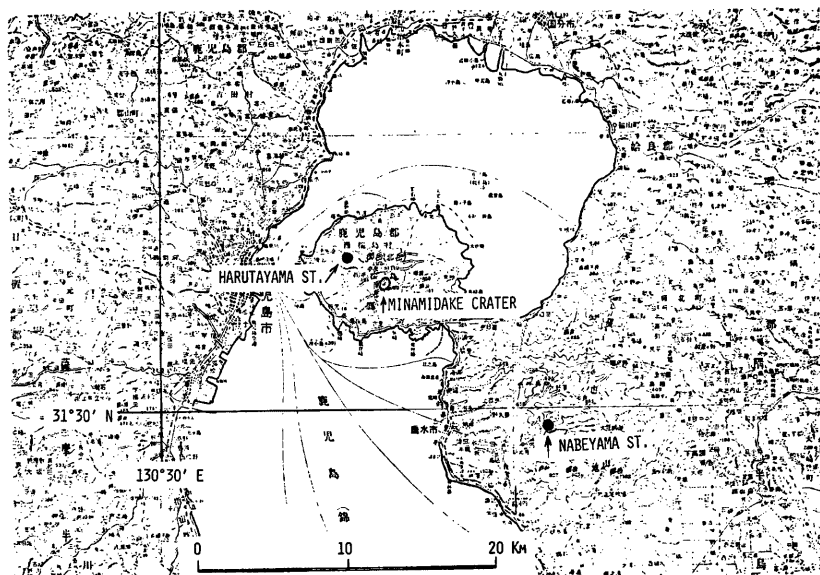


Fig. 1. Location of observation stations used in this study and the Minamidake crater.

の距離にあるため後で述べる velocity orbit からわかるように、波の伝搬速度差による分離がよく、この観測点の爆発地震の初動部分は p 波のみから構成されていると考えられるからである。観測点には固有周期 1 秒の換振器が 3 成分設置されていて有線テレメータによって観測所本館において集中記録が行なわれている。

空気振動の計測は火口から約 3 km の春田山観測所に設置されている志田式微気圧計によった。Fig. 1 に鍋山観測点、春田山観測所および火口の位置を示す。

解析を行ったデータは 1979 年 10 月～1980 年 3 月末迄のものである。火口から 15 km 離れた鍋山観測点で初動が明瞭に記録されている爆発をとり上げているため、通常の南岳火口で発生している爆発の中ではやや大きいものを pick up していることになる。しかしこの期間に被害を与えるような規模の爆発は発生していない。

爆発地震の記録例を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示した爆発地震の初動から 1.5 秒間の velocity orbit を Fig. 3 に示す。図からわかるように初動部分はほぼ火口方向から push で到来している P 波と考えてよいことがわかる。Fig. 3 に示した振動様式は初動から約 3 秒間続き図には示していないがその後 SV 波と思われる phase が現われる。

スペクトルは MEM (Maximum Entropy Method) により求め³⁾、卓越周波数を決定した。この方法は予測誤差 filter の項数の決定に任意性がある欠点はあるが短かいデータに対しては FFT に比較して高い分解能を示すため注目されている。

解析はデータ処理装置の graphic display を用いて記録の表示、解析に必要なパラメータの指定、解析結果の表示等を行った。解析を行った範囲は初動の 1 波長分である。400 Hz でサンプリングされたデータを用いデータ数としては 200 前後である。予測誤差 filter の項数はデータ数、 S/N 比、解析の目的等に

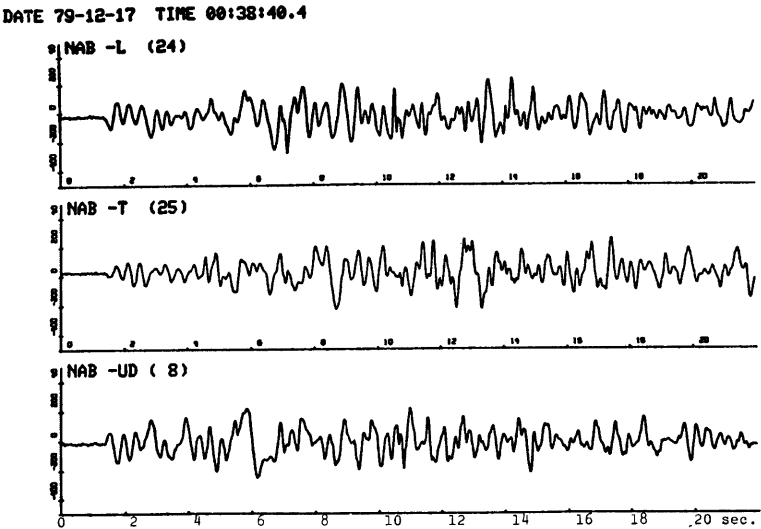


Fig. 2. Example of a record of explosion earthquake.
Upper record (NAB-L) is a longitudinal component to the crater, middle one (NAB-T) is a transversal component to the crater and lower one (NAB-UD) is a vertical component.

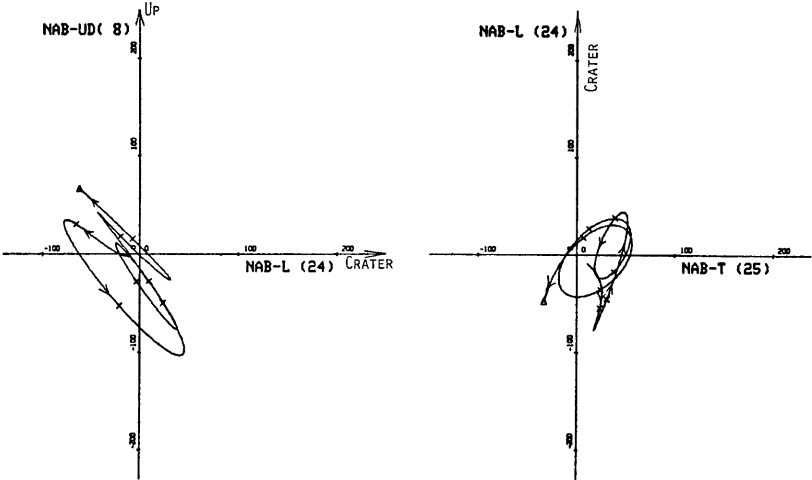


Fig. 3. Examples of velocity orbit for 1.5 sec from the onset of the initial motion.
Symbols of the component are as in Figure 2.

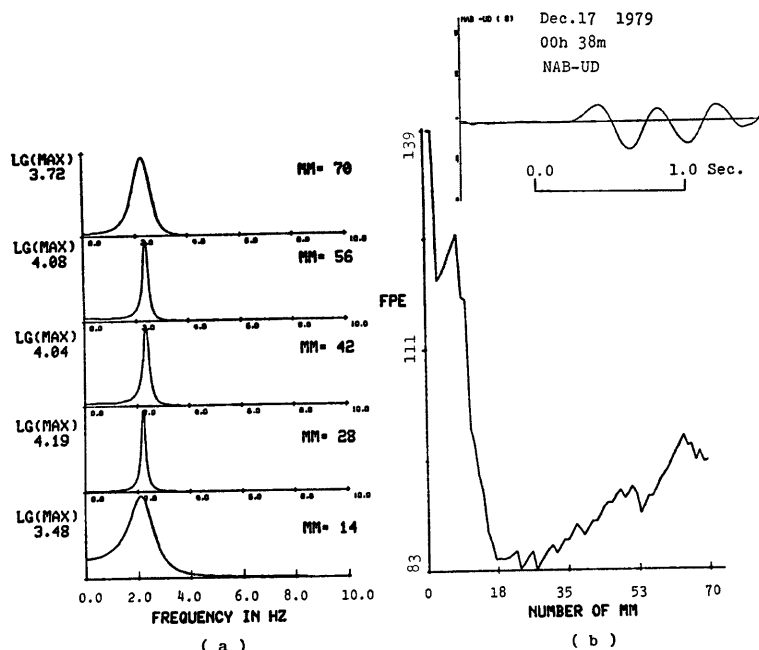


Fig. 4. Example of spectral analysis by MEM.

- (a) Change of spectrum by the number of coefficients of prediction error filter. In the figure, MM means the number of coefficients of prediction error filter, LG (MAX) means the logarithmic value of maximum power, and each spectrum is normalized relative to its maximum value. Power is displayed in linear scale.
- (b) Value of final prediction error versus the number of filter coefficients. Trace shows the analyzed record.

よって一概には決定できない³⁾。データ数を一定にしておいて filter の項数を固定する方法がとられることがあるがデータの S/N 比が変わる場合は filter の項数も変えなければならない。この解析では filter の項数を変えた場合のスペクトル及び FPE (Final Prediction Error) の値を参考にして⁴⁾、項数を決定した。Fig. 4 に graphic display 上に表示した filter の項数の変化に対応するスペクトルと FPE の値の例を示した。

爆発の記録毎に初動部分の卓越周波数と最大速度振幅を求め (4), (5) 式より震源域の半径 a と内部圧力に比例する値を求めた。卓越周波数は多くの場合 2 Hz であり、これから求められる震源域の半径は P 波速度として島内の震源決定の際に用いる値 2.5 km/sec を仮定すると、約 2 km となる。得られた a と p_0 の値と空気振動の大きさとの関係を見るためにそれぞれの関係を示したのが Fig. 5 である。Fig. 5 から空気振動の大きさに最も関係のある震源パラメータは内部圧力であることがわかる。これに反して震源域の大きさを示す cavity の半径とはすくなくとも今回解析した規模のはんいの爆発については無関係である。

従来から空気振動の大きさと爆発地震の最大振幅との間にはあまりよい相関は見られなかったが、爆発震源モデルにおける内部圧力とは上述のようによい相関がみられることがわかった。空気振動の大きさと爆発

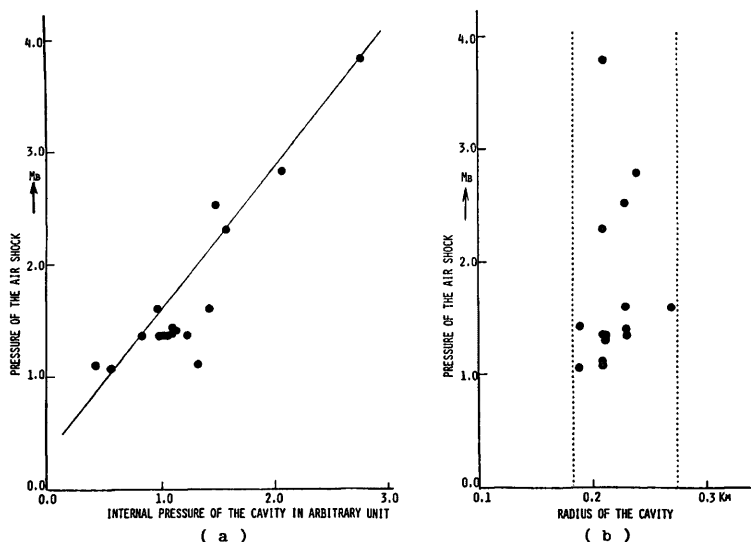


Fig. 5. Relation between the pressure of air shock wave and (a) internal pressure of of the cavity, (b) radius of the cavity.

地震の最大振巾との間により相関がみられないのは、空気振動の大きさが内部圧力に直接関係していると思われるのに反して爆発地震の最大振巾は内部圧力、震源域の大きさ、地震波の伝搬経路と観測点の地盤特性等が影響しているためと考えられる。

4. ま と め

爆発震源モデルとして無限弾性体内に球状の cavity を考え壁の垂直方向に step function で示される内部圧力が作用すると言った震源モデルを用いて、爆発地震の初動のスペクトルと震源パラメータとの関係を求め観測データに適用した。観測データは波の伝搬速度差による分離が行なわれ、初動部分が P 波のみで構成されるように火口から 15 km 離れた観測点のものをを用いた。卓越周波数は多くの場合 2 Hz であり、これから求められる震源域の半径は約 0.2 km である。スペクトル解析から得られた震源パラメータについて、爆発地震の最も特徴的な性質である空振との関係を求めた。その結果、震源パラメータのうち空振の大きさに関係があるのは内部圧であり震源域の大きさには、すくなくとも今回解析した程度の規模の爆発地震については無関係であることがわかった。

この結果は従来爆発に伴う空気振動の大きさが爆発地震の最大振巾とよい相関を示さなかった点を説明するものと考えられる。即ち、空気振動の大きさは内部圧力に直接関係しているのに対して、爆発地震の最大振巾は内部圧力の他に震源域の大きさ、地震伝搬経路と観測点の地盤特性等の影響を大きく受けているためであろう。

おわりに観測に従事されている桜島火山観測所の諸氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Sharp, J.A.: The Propagation of Elastic Waves by Explosion Pressures, *Geophysics*, Vol. 7, 1942, pp. 144-154.
- 2) Kawasumi, H., and R. Yoshiyama: On an Elastic Wave Animated by the Potential Energy of Initial Energy of Initial Strain, *Bull. Earthq. Res. Inst.* Vol. 13, 1935, pp. 496-503.
- 3) 例えば Anderson, N.: On the calculation of filter coefficients for maximum entropy spectral analysis, *Geophysics*, Vol. 39, 1974, pp. 69-72.
- 4) Fryer, G.J., M.E. Odegard, and G.H. Sutton: Deconvolution and spectral estimation using final prediction error, *Geophysics*, Vol. 40, 1975, pp. 411-425.