

## 火薬爆発によって生ずる地震波動について (2)

—振幅と火薬量および爆破条件との関係—

飯塚 進\*

## On Seismic Waves Generated by Explosions (2)

—Relations between the maximum amplitude and charge amounts or explosion conditions—

By

Susumu IIZUKA

## Abstract

Relations between the maximum amplitude and charge amounts or explosion conditions are discussed. (All explosions treated here are so-called "intermediate scale explosion".)

It is found that the seismic efficiency of explosion, assuming it is expressed by the maximum amplitude, is influenced by shot depth, geological conditions of shot hole, the number of shot holes using at one time, and so on.

Above all, the seismic efficiency seems to be strongly affected by the number of shot holes using at one time.

A few comments on the later phase and its related subjects are also given.

## 1. ま え が き

火薬爆発によって人工地震を発生させる場合に、震源をコントロールすることは重要な問題の一つである。特に火薬爆発のエネルギーを最も効率よく波動エネルギーに変換するための条件を探る課題は、地震探査技術の向上のためにも重要な位置を占めており、従来から多くの研究者や地震探査技術者によって論じられてきた。

しかしながら、火薬爆発に伴う諸現象には、弾性波動論だけではかたづかない複雑な問題が含まれており、まだ実験的にも理論的にも解明されなければならない問題は多いように思われる。

筆者は、さきにいわれる「中発破」によって生ずる地震波動の問題について報告したが(飯塚, 1967), この小論では、「中発破」の際の火薬の効き方について興味ある観測資料が得られたので、それを中心に2, 3述べる。

1966年12月から翌年1月にかけて、UMPの一環である深層試錐の先行調査として、伊豆大島付近の地震探査が実施された(市川, 1967)。その際、大島の北端乳ヶ崎に18の爆破孔が設けられ、延14回、総火薬量約1

トンの爆破が行なわれた。ここで解析に使用する記録は、上記の爆破地震動を、気象庁大島測候所の地震計によって観測した9例に限られる。

## 2. 観測方法および爆破について

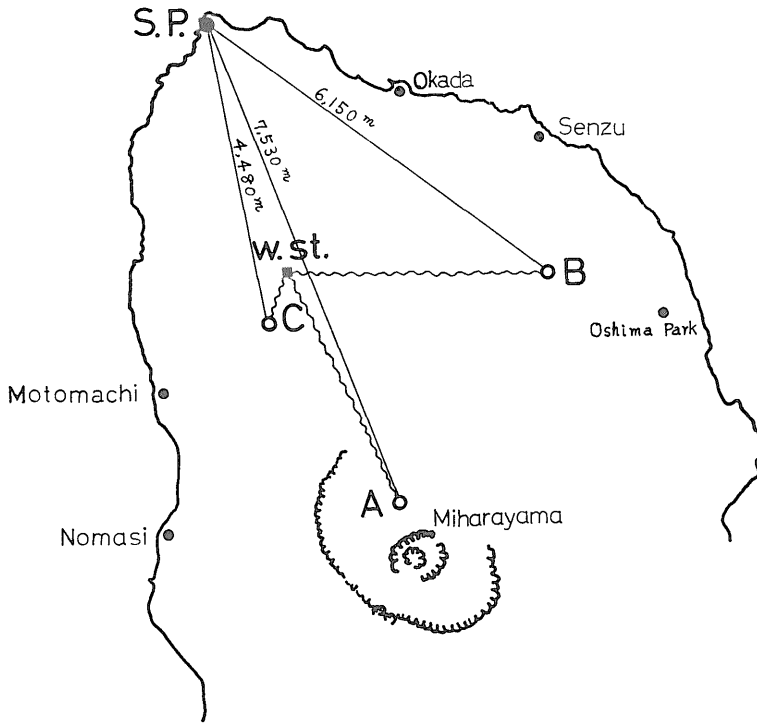
## 2.1 換振器の位置と計器の特性

大島測候所の換振器の位置は、第1図の通りで、A(カルデラ内)、B(泉津)、C(元町)の3点から成り、各点にはそれぞれ3成分(南北成分、N-S; 東西成分、E-W; 上下成分、U-D)の換振器が設置されている。信号は、各点からケーブルによって測候所(w. st.)まで送られ、増幅、記録される。爆破点とA, B, C各点間の距離(震央距離)は、5万分の1地形図上から読み取って図示してある。

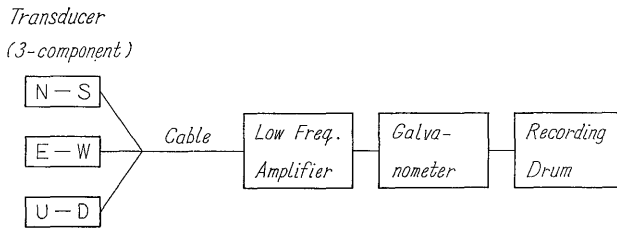
換振器と計器類の定数および倍率等は次の通りである。

換振器	固有周期	$T_0 = 1.0 \text{ sec}$
	減衰係数	$h = 0.5$
	電圧感度	$G > 2 \text{ volt/cm/sec}$
検流計	固有周期	$T_g \approx 1/15 \text{ sec}$
	電流感度	$I_g \approx 5 \text{ mm/mA}$
記録ドラム	幅	300 mm
	円周	900 mm

\* 物理探査部



第1図 爆破点および観測点の位置  
Position of shot point and observation stations



第2図 観測装置のブロックダイアグラム  
Block diagram of recording system

送り 60 mm/min

ス書き

総合倍率 3成分とも約500倍

観測装置のブロック・ダイアグラムは第2図の通りである。

## 2.2 爆破孔の配列と地質条件

爆破孔の配列と、各孔の地質条件を第3図 a, b に示す。海岸に近い No.1 孔と No.2 孔には硬質の玄武岩溶岩がみられる。この2孔以外は、表層は薄いローム層におおわれ、その下部は主として砂層または礫混じりの砂層から成り、基底部に溶岩または溶岩岩屑がみられるものもある。溶岩またはその岩屑のみられない孔も、大部分これらの層に達した位置で掘さくを停止したことが

わかっている。

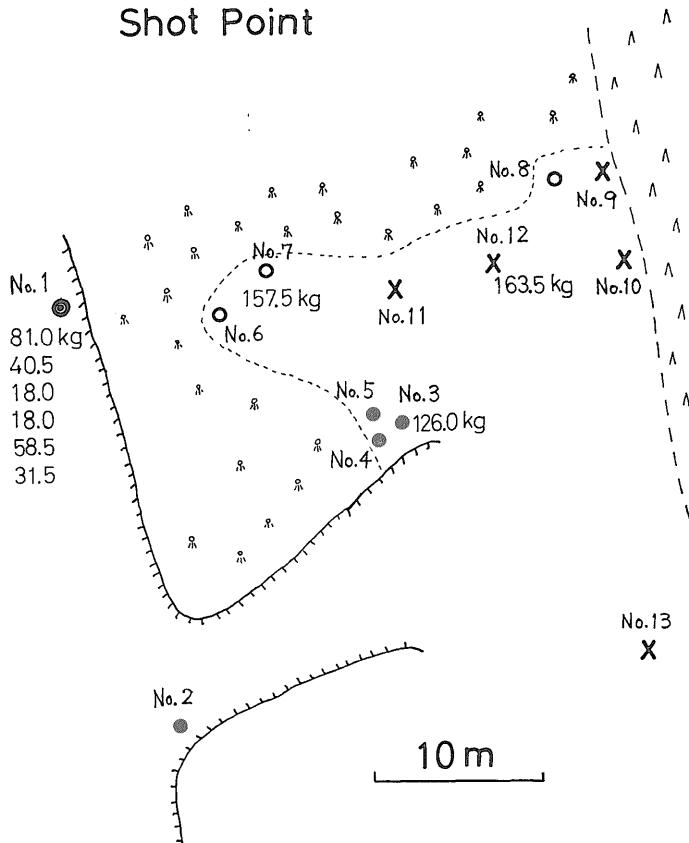
以上のように、軟硬の対照がきわめて著しいのが特徴であり、このような地質条件が火薬の効き方や、波形に影響を与えることは後に述べる。

## 2.3 爆破のデータ

爆破の行なわれた日時、使用した爆破孔、火薬量などは、第1表にまとめてある(大島地震探査では、ショットマークを海上の観測船まで無線で送る方式をとったため正確なショットタイムがわからない)。

これらの爆破のうち、大島測候所の地震計で記録されたものは、○印をつけた7回で、1月26日、28日の2回は、計器類は作動中であつたにもかかわらず記録がとれていない。

### Shot Point

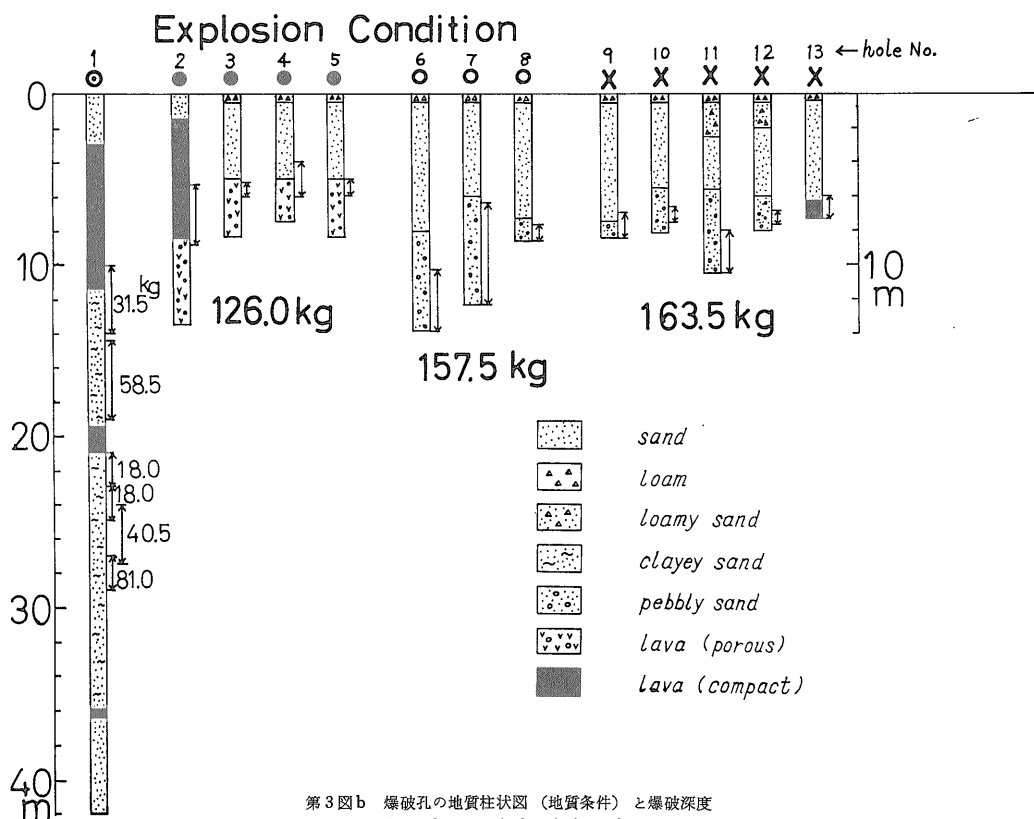


第3図a 爆破孔の分布  
Distribution of shot holes

第1表 爆破に関する資料  
Data on explosions

shot No.	shot time	hole No.	depth	charge amount	charge length	cap	remarks
	date h m		m	kg	m		
1	1/20, 10:08	1	29.0	81.0	2.0	1	○
2	" , 13:39	1	27.5	40.5	3.5	"	○
3	" , 14:57	1	25.0	18.0	2.0	"	○
4	" , 16:06	1	23.0	18.0	2.0	"	○
5	1/21, 10:43	1	19.0	58.5	4.6	"	○
6	" , 13:38	1	14.0	31.5	4.0	"	○
7	1/26, 13:07	2	9.0	31.5	3.5	"	×
		3	6.0	31.5	0.8	"	
		4	6.0	31.5	2.0	"	
		5	6.0	31.5	1.0	"	
8	" , 14:45	6	14.0	67.5	3.5	"	○
		7	12.5	63.0	6.0	"	
		8	8.7	27.0	1.0	"	
		9	8.5	36.0	1.5	"	
9	1/28, 09:56	10	7.5	31.5	0.9	"	×
		11	10.5	45.0	2.5	"	
		12	7.6	24.0	0.8	"	
		13	7.3	27.0	1.3	"	

○印は記録されたもの、×印は記録のとれなかったもの。○…seismograms are obtained. ×…seismograms could not be obtained.



第3図b 爆破孔の地質柱状図(地質条件)と爆破深度  
Geological conditions of shot hole and shot depth

### 3. 観測結果とその考察

#### 3.1 得られた記録の概観

A点(カルデラ内)の記録は、火山性のノイズのため判別できないのでここでは省略する。したがって解析には、B、C两点の記録のみを用いることにする。第4図a, b, cは、得られた記録のうち典型的なものの一例である。初動の発震時、最大振幅等の験測結果を第2表にまとめた。

得られた記録から次のことがわかる。

① B点とC点では、記録全体の形がちがっている。B点の記録は、C点にくらべると最大振幅が小さく、振動の継続時間が長い。

② 水平成分の最大振幅は、すべての場合について、上下成分の最大振幅よりも大きい。

③ 最大振幅と火薬量との関係は、非常に複雑で、火薬量が増せば振幅が大きくなるという傾向から著しくずれている場合がある。

④ 1月26日、28日の爆破は、火薬量が多かったにもかかわらず記録されていない。

⑤ いくつかの記録には、later phase が現われている。

これらの点について、以下に若干の考察を加えてみることにしよう。

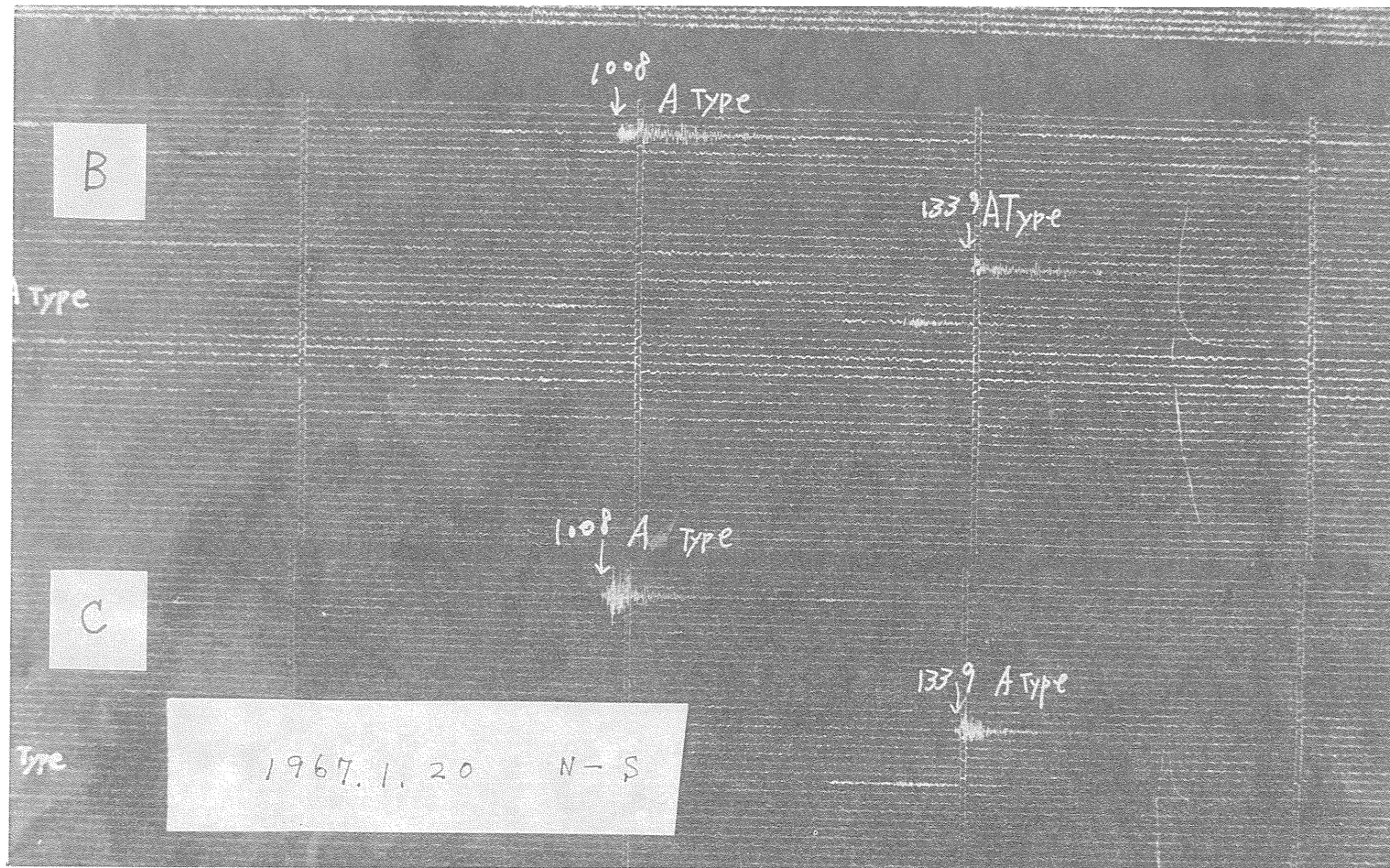
#### 3.2 最大振幅と火薬量との関係

振幅と火薬量との関係を論じた論文は、まだまだ多くはないようである(RICHARD, H. & PIEUCHOT, M. 1956; GASKELL, T. F., 1956; 村松, 1962)。受振点で観測される記録振幅に影響を与える要因がいくつもある、非常に複雑だからである。

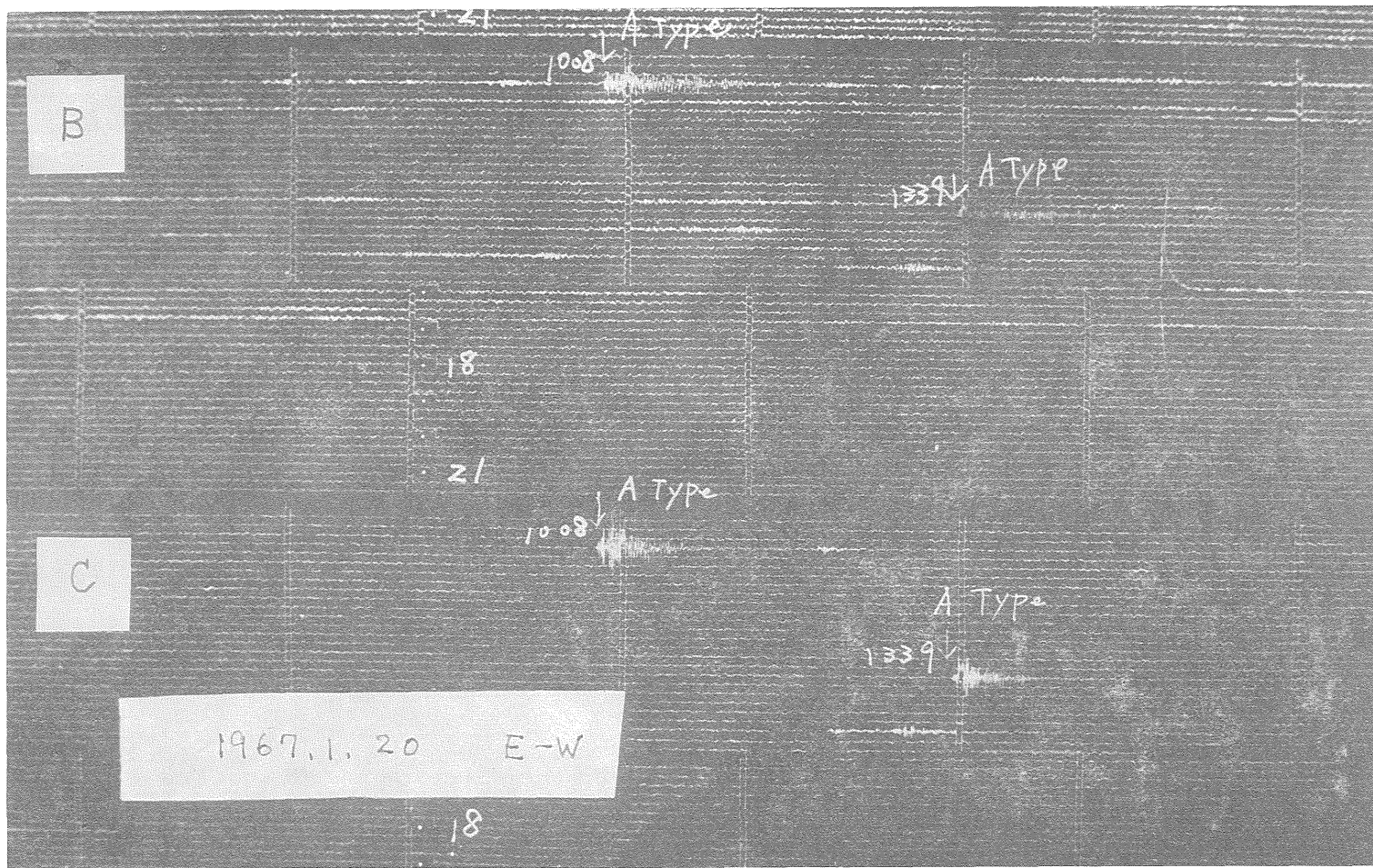
さて、各記録から最大振幅を読み取り、火薬量との関係を表わしたのが第5図a, bである(shot No. 3とNo. 4は、同一薬量で、第2表からわかる通り、最大振幅もほぼ等しいので、記録の良好な方の値を用いてプロットしてある)。

いま、最も振幅の卓越しているE-W成分の最大振幅からMagnitudeを求め、この値を使ってエネルギーを計算し、火薬量との関係を見ることにしよう。

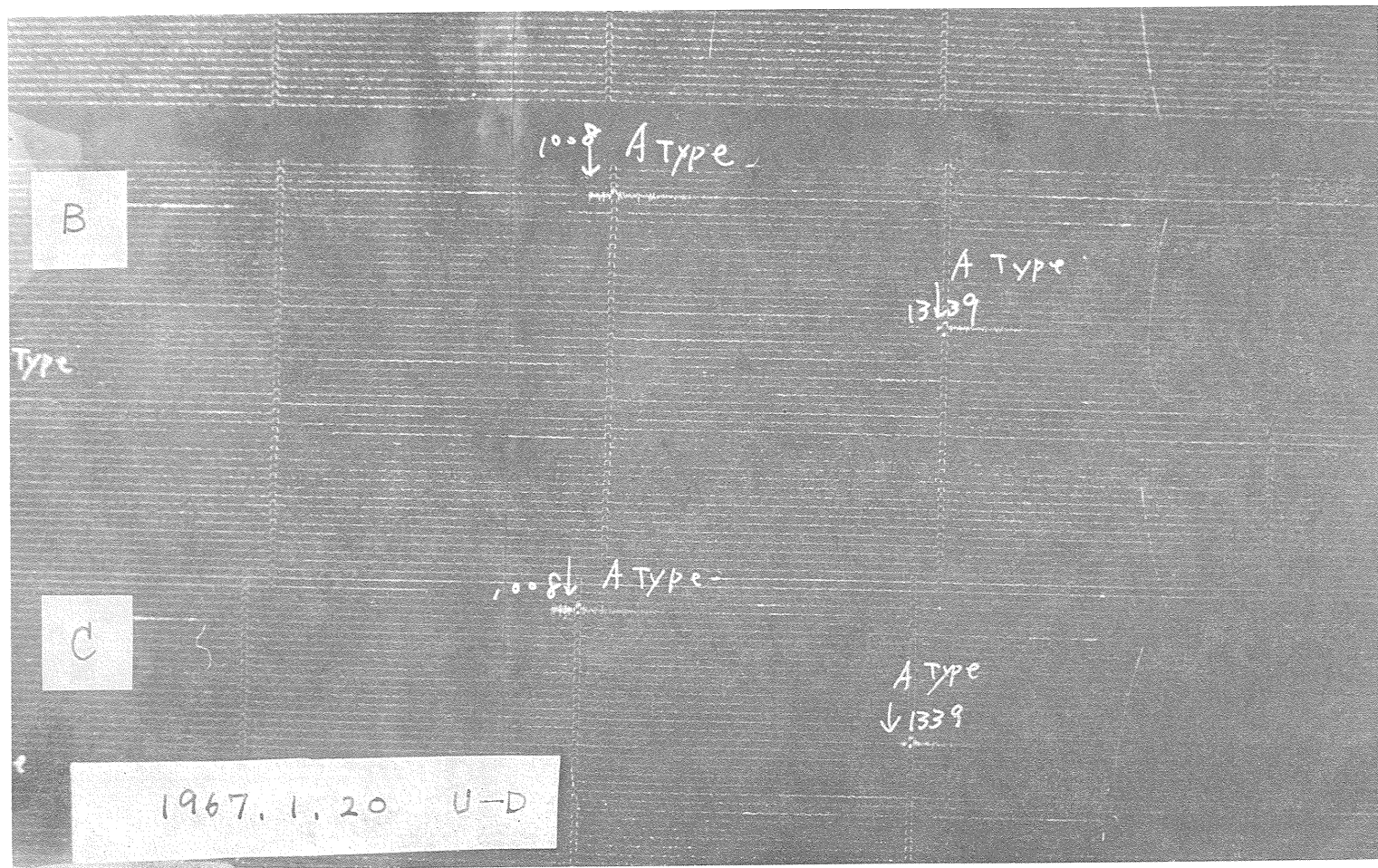
坪井(1954)によれば、日本付近に起こる地震のMagnitudeは次式によって求められる。



第4図a 記録例  
Example of seismograms



第4図b



第4図 c

第2表a 驗測表(觀測点B)  
Arrival time, the maximum amplitude and period (Obs. Pt. B)

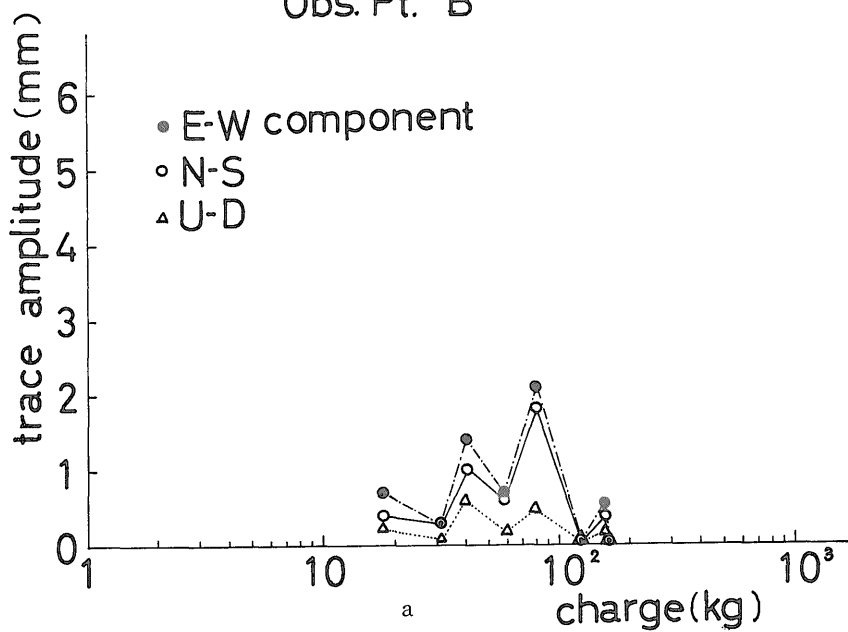
shot No.	component	first arrival			second arrival	maximum amplitude	period
		h	m	s	s	mm	sec
1	N-S	1967.1.20,	10 07	56.3	57.9	1.8	0.1
	E-W			56.3		2.1	0.1
	U-D			56.0		0.5	0.1
2	N-S	1967.1.20,	13 38	59.2		1.0	0.1
	E-W			59.1		1.4	0.1
	U-D			59.0		0.6	0.1
3	N-S	1967.1.20,	14 57	57.0		0.6	0.1
	E-W			57.2		0.3	0.1
	U-D			57.0			
4	N-S	1967.1.20,	16 06	01.3		0.4	
	E-W			01.3		0.8	
	U-D			01.1		0.2	0.1
5	N-S	1967.1.21,	10 42	55.4	57.1	0.6	0.1
	E-W			55.4		0.7	0.1
	U-D			55.1		0.2	
6	N-S	1967.1.21,	13 37	55.2		0.3	
	E-W			55.2		0.3	0.1
	U-D			55.0		0.1	
7	N-S	1967.1.26,	13 07				
	E-W						
	U-D						
8	N-S	1967.1.26,	14 44	57.0		0.4	0.1
	E-W			56.7		0.6	0.1
	U-D			56.6		0.2	
9	N-S	1967.1.28,	09 56				
	E-W						
	U-D						

第2表b 驗測表(觀測点C)  
Arrival time, the maximum amplitude and period (Obs. Pt. C)

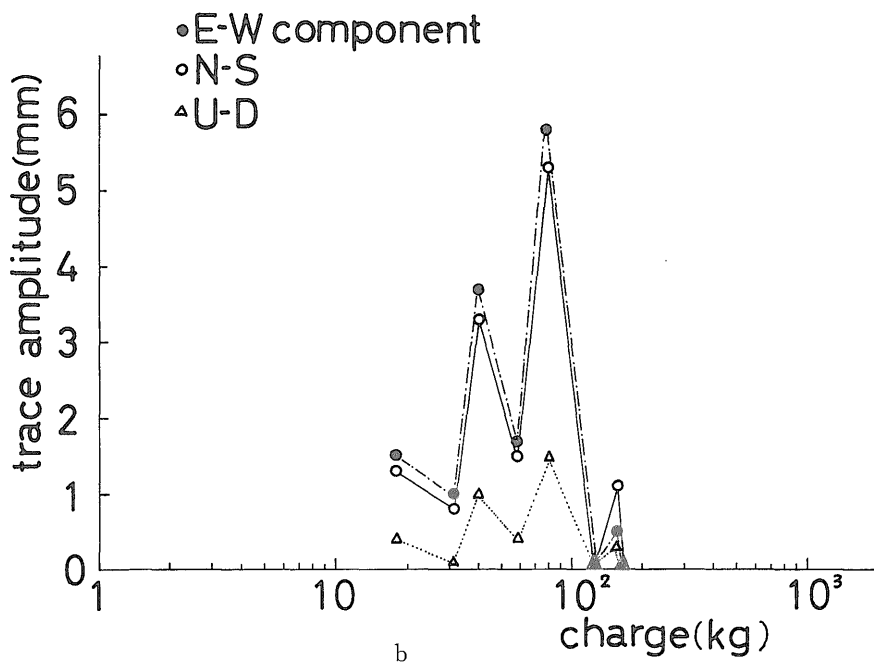
shot No.	component	first arrival			second arrival	maximum amplitude	period
		h	m	s	s	mm	
1	N-S	1967.1.20,	10 07	55.8	57.3	5.3	0.1
	E-W			55.8	57.5	5.8	0.1
	U-D			55.7		1.5	0.1
2	N-S	1967.1.20,	13 38	58.8	00.5	3.3	0.1
	E-W			58.7		3.7	0.1
	U-D			58.7		1.0	0.1
3	N-S	1967.1.20,	14 57	56.7		1.3	0.1
	E-W			56.9		1.5	0.1
	U-D			56.7		0.4	0.1
4	N-S	1967.1.20,	16 06	01.0	02.3	1.3	0.1
	E-W			01.0		1.5	0.1
	U-D			00.9			
5	N-S	1967.1.21,	10 42	54.9	56.4	1.5	0.1
	E-W			55.1	56.6	1.7	0.1
	U-D			54.8		0.4	
6	N-S	1967.1.21,	13 37	54.8	56.4	0.8	0.1
	E-W			54.9		1.0	0.1
	U-D			54.5		0.1	
7	N-S	1967.1.26,	13 07				
	E-W						
	U-D						
8	N-S	1967.1.26,	14 44	56.5		1.1	0.1
	E-W			56.3		0.5	0.1
	U-D			56.4		0.3	
9	N-S	1967.1.28,	09 56				
	E-W						
	U-D						



Obs. Pt. B



Obs. Pt. C



第5図 a, b 最大振幅と火薬量との関係  
Relation between the maximum amplitude and charge amounts

$$M=1.73 \log 4 + \log A - 0.83 \quad (1)$$

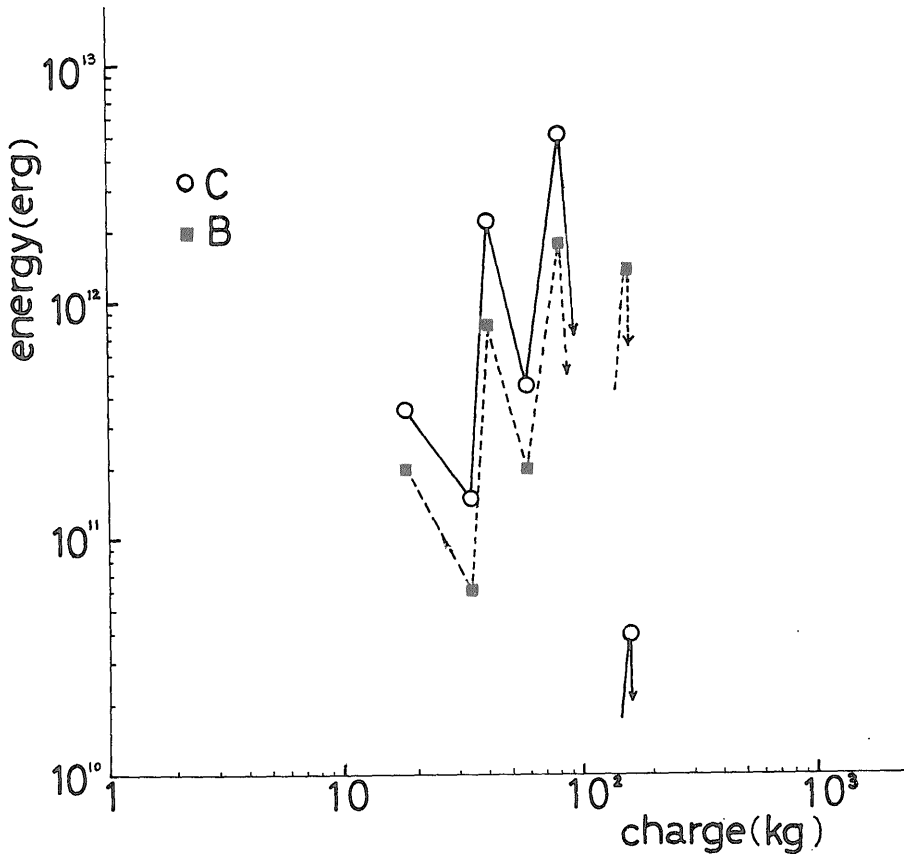
ただし、 $A$  は震央距離  $4$  (km) における最大振幅で、単位はミクロンで表わす。(1) 式を求めるとき、坪井は、日本全国をいくつかの地域に分け、その各々の地域について  $M$  を求める式を導いている。したがって、ある特定の地域の問題を扱う場合には、その地域のデータから求めた  $M$  の式を使う方がよい。なぜなら、(1) 式は地域ごとのバラツキが平均化されてしまっているからである。ところで、東京付近にあてはまる  $M$  の式は次の通りである。

ので、order の議論には問題にならない。

エネルギーと火薬量との関係は第6図のようになる。

いま、最大振幅またはエネルギー (Magnitude でもよい) でもって、火薬の効き方の程度を表わすものと仮定する。第5図または第6図を、爆破条件を示す第3図とくらべてみると、火薬の効き方の良否を支配する主な要因として次の3つが考えられる。

- 1) 一回の爆破に使用する孔数、すなわち火薬を1孔にまとめるか多数孔に分割するか。
- 2) 火薬装てん深度



第6図 エネルギーと火薬量との関係  
Relation between seismic energy and charge amounts

$$M=1.55 \log 4 + \log A - 0.46 \quad (2)$$

(2) 式から求めた  $M$  の値を用いて、次のGUTENBERG & RICHTER (1956) の関係式からエネルギー  $E$  を計算した。

$$\log E = 9.4 + 2.14 M - 0.054 M^2 \quad (3)$$

同一爆破について、B、C 両点の記録から独立に  $M$ 、 $E$  の値を計算すると、両者は少しくいちがっているが、これは前述したように両点の記録の特徴の相異によるも

### 3) 爆破孔の地質条件

一見してわかることは、火薬装てん深度が浅くなるか、または火薬が分割されるほど効きがわるくなる傾向がはっきりと現われていることである。さらに装てん位置が溶岩層の上にあるか下にあるかによって、効き方に影響している。これらの点を少しくわしくみてみることにしよう。

- 1) 1孔爆破; No. 1 の爆破孔で行なった shot No.

1 から No. 6 までの爆破で、初めの 4 回 (shot No. 1 ~ No. 4) は、火薬量と振幅にきれいな直線関係がみとめられる (火薬量 18 kg の爆破 2 回は、図では 1 点で表わされている)。

この 4 回は、深さにして最大約 5 m の差があるが、いずれも 2 枚の溶岩層の下で爆破したものであり、地質的には同一条件とみなしてさしつかえない。直線関係の勾配がかなり急なのは、火薬量が少なくなると同時に爆破深度が浅くなっているためであろう。

ところが、浅い方の 2 回 (shot No. 5, No. 6) は、2 枚の溶岩層の間で爆破したものであり、深い部分の前 4 回とくらべると振幅は 2 分の 1 以下である。これは爆破深度の影響以外に地質条件が変わったことが大きくきいているものと思われる。

2) 複数孔爆破; shot No. 7, No. 8, No. 9 の 3 回は、複数孔を使っている。このうち、shot No. 7 と No.

は、爆破深度と地質条件はほぼ同一とみなされるからである。

以上の事実は、複数孔爆破がいかに効きがわるいかを示す例として注目値する。この問題は重要なので、データがもっと増えた段階であらためて論じることにした。

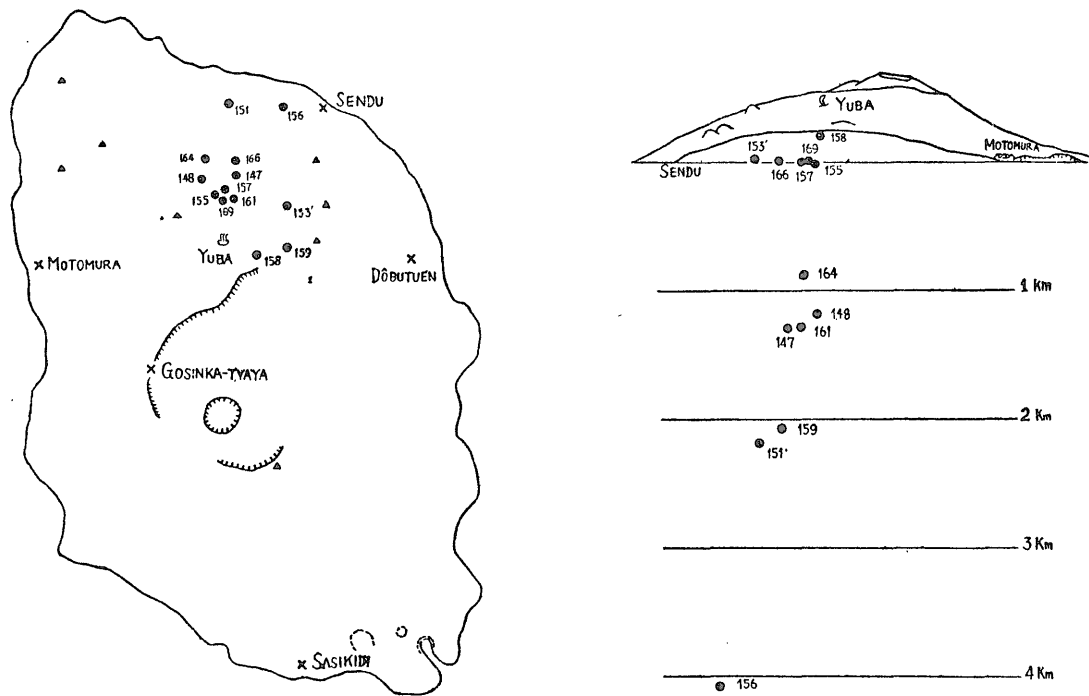
### 3.3 P-S 時間の推定と、2, 3 の結果

昭和 13 年、伊豆大島で群生した地震を観測した結果 (第 7 図) にもとづいて、高橋・永田 (1939) は、ポアソン比を 0.27 と仮定して縦波速度  $V_p$ 、横波速度  $V_s$  と深さ  $d$  との関係を次のように求めている。

$$V_p = 2.0 (1 + 0.38 d) \text{ km/sec} \quad (4)$$

$$V_s = 1.1 (1 + 0.38 d) \text{ km/sec} \quad (5)$$

今回の実験場所は、第 7 図の通りこの群生地震の震源位置とほぼ一致しているのので、高橋・永田の式を用いて、爆破点と観測点を結ぶ波線の最深点とその位置での



第 7 図 昭和 13 年 6 月 18 日頃大島に頻発した地震群の震源分布 (高橋・永田による)  
Distribution of hypocenter of earthquake swarms occurred at Oshima island in June 1938 (after TAKAHASHI & NAGATA)

9 は観測にかからず、shot No. 8 は火薬量が 1 桁小さい shot No. 3, No. 4 と comparable order の振幅 (エネルギー) しか示していない。これら 3 回については、爆破条件のちがい、すなわち、前者の 2 回は、後者の 1 回よりも使用孔数が多く、1 孔当たりの分割火薬量が少なくなっていることが、その原因である。この場合

速さ、および走時を計算してみる。

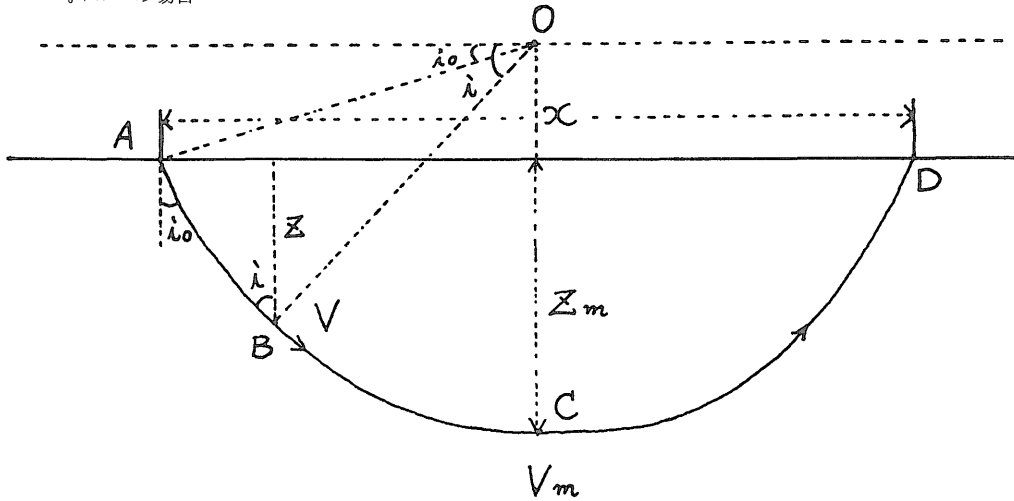
いま、速度が深さと共に直線的に増す場合は、

$$V = V_0 + kZ \quad (6)$$

ただし、 $V_0$  は  $Z=0$  での速さ、 $Z$  は深さ、 $k$  は定数とする。

最深点の深さ  $Z_m$ 、その位置での速度  $V_m$ 、走時  $T$  は

$V = V_0 + kZ$  の場合



第8図 速度が深さと共に直線的に変化する場合の波線  
An example of seismic ray in the case of linear variation of velocity with depth

第3表 最深点での速度と深さおよび走時 (P波の場合)

The maximum velocity and depth at the deepest point and travel time (P-wave)

observation point	epicentral distance $x$ (km)	maximum velocity $V_m$ (km/sec)	deepest point $Z_m$ (km)	travel time $T_p$ (sec)
B	6.2	3.0	1.3	2.6
C	4.5	2.6	0.8	2.0

第4表 最深点での速度と深さおよび走時 (S波の場合)

The maximum velocity and depth at the deepest point and travel time (S-wave)

observation point	epicentral distance $x$ (km)	maximum velocity $V_m$ (km/sec)	deepest point $Z_m$ (km)	travel time $T_s$ (sec)
B	6.2	1.7	1.3	4.8
C	4.5	1.4	0.8	3.7

次式で表わされる (第8図参照)。

$$Z_m = \frac{V_m - V_0}{k} \quad (7)$$

$$V_m = V_0 \sqrt{1 + \left(\frac{kx}{2V_0}\right)^2} \quad (8)$$

$$T = \frac{2}{k} \sinh^{-1} \frac{kx}{2V_0} \quad (9)$$

a) 縦波の場合, (4) より  $V_p = 2.0 + 0.76Z$ ,  $V_0 =$

2.0 km/sec,  $k = 0.76$  であるから, (7), (8), (9) より, 観測点 B, C の値を計算すると第3表のようになる。

b) 横波の場合は, (5) より  $V_s = 1.1 + 0.42Z$ ,  $V_0 = 1.1$  km/sec,  $k = 0.42$ 。したがって縦波の場合と同じように計算すると第4表の通りになる。

以上の結果から, P-S 時間  $t_c = T_s - T_p$  を計算し, 観測値  $t_0$  と比較すると次のようになる。

観測点	$t_c$ (sec)	$t_0$ (sec)
B	2.2	1.6~1.7
C	1.7	1.5~1.8

B点では計算値の方が大きく、C点ではほぼ一致している。この差異は、地質構造のちがいに起因するものであろう。波線の最深点  $Z_m$  は、縦波、横波ともに、B点では 1.3 km、C点では 0.8 km で、震央距離が短かいので、差が現われない。

### 3.4 水平成分の波が卓越する理由

記録からわかることは、すべての場合について水平成分が卓越していることである。最大振幅で、記録紙上、上下動の4倍にも達する場合がある。この原因として考えられることは、

- 1) 溶岩のシートにさえぎられて、爆発のエネルギーが主として水平方向に発散し、震源で S 波が発生する、
- 2) 前節の計算からも明らかのように、速度勾配が急で射出角が小さくなり、そのため水平成分が卓越する、などである。1) の場合は、一種の震源操作をほどこしたことになり、このような場合に S 波が発生することは十分考えられることである。

### 3.5 B点とC点で記録の波形が異なる理由

B点とC点の記録の特徴は、1) 震動の継続時間はB点の方が長く、2) 最大振幅はC点の方が大きい、ことである。この原因は、波の通過してくる地下構造のちがいによるものと思われる。すなわち、C点に到達する波は、均質な溶岩のシート状の層内を伝わってくるもの、これに反してB点にくる波は、溶岩と凝灰岩が交互にあらわれるような水平方向にも不均質な媒質を伝わってきたものと推定される。これが波形のちがいとなって現われているのであろう。

## 4. あとがき

われわれが日常行なう地震探査では、初動を明瞭に記録することに最大の眼目をおいており、火薬の効き方も、主として初動の切れ工合いで判断する場合が多い。したがって、効き方を定量的に議論することはなかなかむずかしいのが現状である。

実用上有効な火薬量算定方式を確立したり、震源に操作を加えて有用な波を発生させるといった震源コントロールの問題を解明するためにも、この種の研究は重要である。

特に最近注目されはじめた深さ 10 km 前後まで(いわゆる upper crust)の微細構造探査等の目的で行なわれる「中発破」については、小規模な地震探査や、火薬

量トン order の「大発破」の理論や経験を外挿して間に合わせている場合が多いのである。それで良いのかどうかも、まだはっきりわかっていない。したがって「中発破」に関するデータは、基礎的なものまで含めてまだ「原始蓄積」の段階にあり、この小論もその一つの試みであることをつけ加えておかねばならない。

## 謝 辞

記録をはじめ、大切な資料の使用をお許しくださった気象庁大島測候所の赤羽俊朗所長と田沢堅太郎氏に厚くお礼申しあげる。

## 文 献

- GASKELL, T. F. (1956) : The Relation between Size of Charge and Amplitude of Refracted Wave, *Geophys. Prospecting*, vol. 4, p. 185~193.
- GUTENBERG, B. & RICHTER, C. F. (1956) : Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration (2nd Paper), *Bull. Seism. Soc. Amer.*, vol. 46, p. 105~145.
- 市川 金徳 (1967) : 伊豆大島周辺地震探査について (UMP), 昭和 42 年度春季地震学会にて発表
- 飯塚 進 (1967) : 火薬爆発によって生ずる地震波動について (I), 地質調査所月報, 第 18 巻, 第 12 号, p. 831~842
- 村松 郁栄 (1962) : 爆破地震動における薬量と地動速度振幅との関係, 爆破地震動研究グループ会報, 第 20 号, p. 51~70
- RICHARD, H. & PIEUCHOT, M. (1956) : Seismic Efficiency of Explosives, *Geophys. Prospecting*, vol. 4, p. 167~184.
- 高橋竜太郎・永田武 (1939) : 昭和 13 年 6 月 18 日頃大島に頻発した地震群について, 地震, 第 1 輯, 第 11 巻, p. 161~167
- 坪井 忠二 (1954) : 地震動の最大振幅から地震の規模 M を定めることについて, 地震, 第 2 輯, 第 7 巻, p. 185~193