

火薬爆発によって生ずる地震波動について (1)

飯塚 進*

On Seismic Waves Generated by Explosions (1)

By

Susumu IIZUKA

Abstract

1. Introduction

It has been tried by many investigators to research the structure of upper parts of the crust precisely by the explosion seismological method and to estimate stress accumulation at depth from velocity changes of seismic waves generated by an explosion.

For the purpose of further investigations, various fundamental considerations and experiments must be studied, that is, the determination of optimum charge amounts, the effects of shot depth, geological conditions of shot hole, observed wave groups, the predominant period of waves generated, variations of the amplitude and the form of seismic waves through different media, and so on.

There are two research groups of explosion seismology in Japan. One is the Research Group for Explosion Seismology (RGES) and the other is the Research Group of Seismic Exploration (RGSE).

The investigations of crust and upper mantle structure in the Japanese islands have been performed by the members of RGES. On the other hand, the RGSE have studied experimentally and theoretically on the seismic waves generated by a very small explosion.

The present experiments correspond to the case of intermediate scale explosions in comparison with the ones carried out by above-mentioned two research groups. As the first step, the following three subjects are discussed in the present paper:

- 1) the characteristics of wave groups observed
- 2) the predominant periods in the initial motions
- 3) the dispersion of surface waves

2. Experimental Procedure

The positions of shot points and observation station on this experiment are shown in Fig. 1. All detonations were made under water of Japan Sea and only one observation station was placed on a small island, Awashima, Niigata prefecture. The vertical component transducer ($f_0 = 3.5$ cps) was used and, through pre- and main amplifier, connected with the magnetic tape recorder.

Charge amounts and epicentral distance, Δ , in each shot are shown in Table 1.

3. Experimental Results and Discussion

- (1) Classification of wave groups and its rise and fall

By analyzing the seismograms, three wave groups are recognized as follows.

A-group: remarkable phases continuing the initial part of vibrations, probably consisting of body waves (mainly refracted P-wave).

B-group: at $\Delta = 120$ km, it appears clearly, small amplitude, probably surface waves.

C-group: it appears in the range of $\Delta = 30 \sim 80$ km, having almost constant period,

* 物理探査部

relatively large amplitude, low group velocity, and certainly surface waves.

(2) The predominant periods in the initial motions

The predominant periods in the initial motions for the both cases of charge amounts 50 kg and 100 kg are examined by Fourier analysis. It shows about 0.2 sec in the range of several tens kilometers of the epicentral distance in both cases.

The relation between charge amounts and the predominant period in the initial motions is shown in Fig. 5.

(3) Dispersion of wave group C

The periods of this wave group are mostly limited within 0.1–0.2 sec and it is not dispersive. Its group velocity shows a value of 1,300–1,400 m/sec, lower than the sound velocity in water (= 1,500 m/sec).

From these facts, it is inferred that wave group C corresponds to the Airy-phase.

(4) Time-distance curve

The time-distance curve shows that underground structure in this region is composed of the following three layers.

1st layer—apparent velocity 5.7 km/sec

2nd layer—apparent velocity 6.4 km/sec

3rd layer—apparent velocity 7.8 km/sec

It certainly seems that 3rd layer is under Moho-discontinuity.

4. Conclusion

The main results of present experiments are as follows:

1) In case of under water explosion, we can obtain the records with high accuracy in the range of several tens kilometers of the epicentral distance, only for 50 kg in charge amounts, if noise-level at the observation station is sufficiently low.

2) The wave records can be classified into three groups. These are called A, B, and C wave groups. Wave group A consists of body waves, and B and C are supposed of surface waves.

3) The predominant period of the initial motions is about 0.2 sec.

4) Wave group C is not dispersive and its group velocity is slower than the sound velocity in water, so that this group seems to be the Airy-phase.

5) It is inferred the underground structure in this region is composed of three layers.

1. ま え が き

最近、地震探査によって地下数 km から 10 km 位までの、いわゆる upper crust の構造をくわしく調べたり、地震予知の問題に関連して、その深さでの岩石物性の異常や変化を、火薬爆発によって生ずる地震波の速度変化から検出しようという試みが行なわれている¹⁾²⁾。これらの問題を解明するためには、もっと基礎的な研究がなされなければならない。

震源としての火薬の最適量、爆破の条件、観測される地震波群とその消長、震源から送りだされる波の卓越周期、振幅、波形などと媒質のちがいによるこれらの変化、表面波と地下構造の関係など、いろいろな問題がある。

人工地震を使って地殻の構造を解明したり、あるいは小規模な火薬爆発によって生じる地震波動を実験的理論的に明らかにしようとする基礎的研究が、戦後の日本において、組織的に行なわれてきた。前者は「爆破地震動研究グループ」(通称、大爆破グループ)によって、1950年以來行なわれている日本列島の地殻構造の研究であり、後者は、1952年に結成された「地震探鉱実験グループ」(通称、小発破グループ)によって精力的に行なわれている研究がそれである³⁾⁴⁾。

今回われわれが行なった実験は、この「大爆破」と「小発破」の中間領域、いわゆる「中発破」の問題に相当する。

われわれと観点は異なるけれども、MOLOTOVA(1964)⁵⁾の研究は、この領域の問題をとり上げた一例といえるか

も知れない。しかしながら、筆者の知る限り、この問題を系統的にとり上げた実験はまだない。

まず第一段階として、今回の実験では

- 1) 観測される地震波群とその消長
- 2) 初動部分の卓越周期
- 3) 表面波の分散性

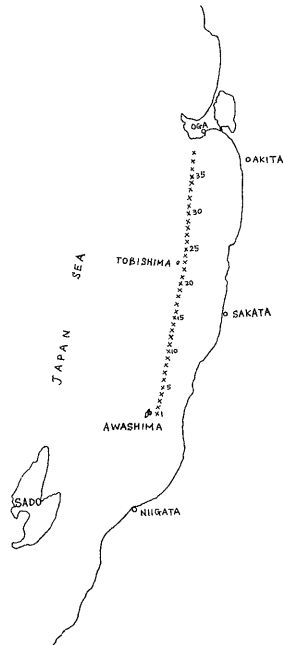
について調べてみたので報告する。

なお、野外観測は、新潟県下の粟島において、昭和40年10月5日から18日まで2週間にわたって行なわれ、筆者のほか物理探査部の市川金徳技官が参加した。

粟島での観測に際して御援助いただいた東大地震研究所浅野周三助教授、震央距離その他の貴重な資料を提供して下さった北大理学部地球物理学教室田望助教授に深く謝意を表するしだいである。

2. 実験方法

今回の実験は、村内必典らにより行なわれた日本海における地震探査の爆破を利用させていただいた。観測点は新潟県粟島におき、爆破は、海中爆発による爆破点移動方式である。観測点および爆破点の位置を第1図に示してある。



第1図 観測点および爆破点の位置
 ●—観測点, ×—爆破点
 Position of observation station and shot points.
 ●—observation station, ×—shot point

使用した換振器は、3.5サイクルの上下動で、記録は磁気テープに録音し、電磁オシログラフにより再生記

第1表 火薬量と震央距離

Charge amounts and epicentral distance.

Shot No.	charge amount	epicentral distance	Shot No.	charge amount	epicentral distance
	kg	km		kg	km
1	50	3.58	20	50	76.79
2	50	3.75	21	100	81.11
3	50	6.74	22	50	85.42
4	300	10.33	23	100	89.49
5	50	14.55	24	50	93.61
6	50	18.90	25	100	97.71
7	50	23.13	26	50	101.78
8	300	27.60	27	100	105.91
9	50	31.99	28	50	110.00
10	50	36.44	29	100	114.17
11	50	40.48	30	50	118.40
12	300	44.62	31	100	122.49
13	100	48.88	32	50	126.58
14	50	52.63	33	100	130.55
15	100	56.22	34	50	134.82
16	50	59.92	35	50	139.50
17	100	64.31	36	50	144.00
18	50	68.30	37	100	148.67
19	100	72.61	38	100	153.35

録を得た。録音時のテープ速度は9.5cm/secであり、また再生時に、波群の消長をみるためには2cm/sec、フーリエ分析と表面波の分散性を調べるためには約13cm/secの紙送り速度で再生した。

各爆破の火薬量と震央距離を第1表にまとめておく。

3. 観測結果とその考察

3.1 波群の分類とその消長

小規模の火薬爆発によって生ずる地震波動の研究は、地震探査実験グループによって精力的に行なわれてきたことは先に述べた。それらの実験結果を総括すれば「小発破」によって生ずる地震波群は、I~IV群の4つの波群に分類され、それぞれの波群の性質についても順次明らかにされつつある(たとえば、TAZIME (1956)⁶⁾)。すなわち、第I群は実体波(直接または屈折P波)、第II群から第IV群までの波は表面波群(Rayleigh型分散波)と解釈されている。「小発破」の場合でさえも、まだすべてが解明しつくされているわけではなく、たとえば、飯田・他(1966)⁷⁾によれば、第II群は表面波ではなく実体波のな波であるともいわれている。

さて、火薬量の多いわれわれの実験の場合も、どのような波が発生するかという問題はもっとも基礎的かつ重

要な問題であるから「小発破」の例にならって波群の分類を試み、その消長についてまず最初に調べてみることにしよう。

第2図は、得られた記録を震央距離 d (km)の順に、初動をそろえて並べたものである。今回の実験の主眼点である d =数10km での波群の消長をくわしくみるため、その区間の記録は全部あげてあるが、他の部分は代表的な記録を抜きだしてかかげた。実際の爆破は、第1表からわかるように、必ずしも等間隔で行なわれてはいないが、記録の配列に際しては、等間隔とみなして書いてある。また、記録はできるだけ完全な形でとるように心がけたので、途中で何回か Gain 調整を行なった。それでも shot No. 5, 7, 19 などについては、初動より10数秒間振り切れてしまっているの、図の上では手直して書いてある。

まず第1に明らかなことは、shot No. 9 から No. 21 ($d=32\sim 81$ km) に現われる顕著な波群の存在である。これをC波群と名づけよう。この波群は、群速度がおそいので、 d の増加による分離性がきわめてよい。C波群は表面波と考えられる。

また、この波群は、shot No. 9 ($d=32$ km) よりも近い所では、他の波群と重なり合っていて見分けがつかない。一方、shot No. 22 ($d=85$ km) 以遠では急に消滅しているが、ここで観測条件や爆破条件に変化はないのであるから、伝播経路、すなわち地下構造の変化に原因を求める以外にない。地下構造を明らかにして、C波群の生成、伝播、消滅の過程を探ることは将来の問題として残される。

第2は、shot No. 31 ($d=122$ km) に明瞭に出現する波群がある。これをB波群とよぶことにする。B波群はC波群にくらべると、振幅が小さくかつ分離性がよくないため、shot No. 19, 28, 30, 34 などに、わずかに現われているのが認められるのみである。これもまた表面波の可能性が強い。

当初、われわれは、「小発破」の経験から、数個の波群を期待したのであるが、以上のB、C両波群以外は、波群として系統的に分類することは、少なくとも今回の実験からは不可能であることがわかった。

初動部分に引き続き顕著な Phase は、実体波(主として屈折P波)と推定されるが、個々の Trace からはいくつかの Phase を読み取ることができる。しかしながら、このおのおの Phase をさらにくわしく検討するためには、地下構造を知らなければならない。したがって今回は、これらを一括してA波群とよんでおこう。A波群の解析は、重要な問題点として今後に残されている。

3.2 初動部分の卓越周期

地震波動は、震源から離れるにつれて、周期の短い波ほど速く減衰してしまうことはよく知られている。そこでまず最初に、火薬量50kgまたは100kgと一定の場合、震央距離が増すにつれて初動部分の卓越周期がどのように変化するかを調べるため、フーリエ分析を行なってみた。

初動部分のスペクトル分析の方法としては、震源の性状を解明するために、KASAHARA (1957)⁸⁾が行なった荷重函数をかけて初動部分を強調する方法があるが、ここでは目的も異なるのでこの方法は用いない。

第2表 フーリエ分析に用いた記録の Shot No. と震央距離

Shot number and epicentral distance of seismogram used for the Fourier analysis.

charge amounts 50kg		charge amounts 100kg	
shot No.	epicentral distance	shot No.	epicentral distance
5	14.55 km	13	48.88 km
11	40.48	15	56.22
16	59.92		
20	76.79		

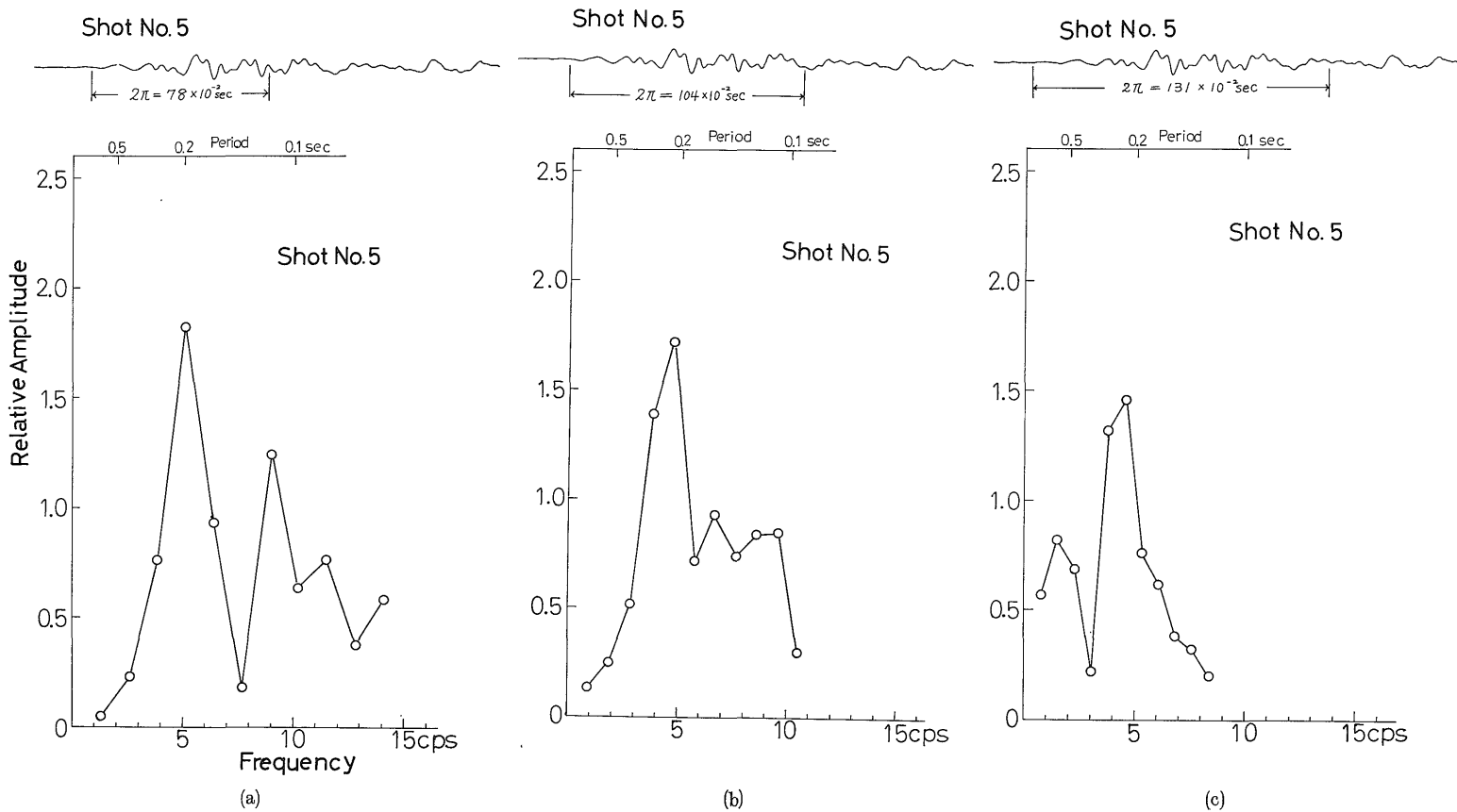
解析に用いた記録は、第2表のとおりで、それらの初動部分を第3図(a)~(i)の上部に示す。フーリエ分析には、友田(1955)の方法⁹⁾を用いた。

shot No. 5 の場合、 $2\pi=78\times 10^{-2}$ sec, 104×10^{-2} sec, 131×10^{-2} sec の3通り、shot No. 11 の場合、 $2\pi=78\times 10^{-2}$ sec, 131×10^{-2} sec の2通りと、 2π の長さを変えてみたが、いずれも大差ないので、他は1通りのみ計算した。 $n=24$ 等分である。

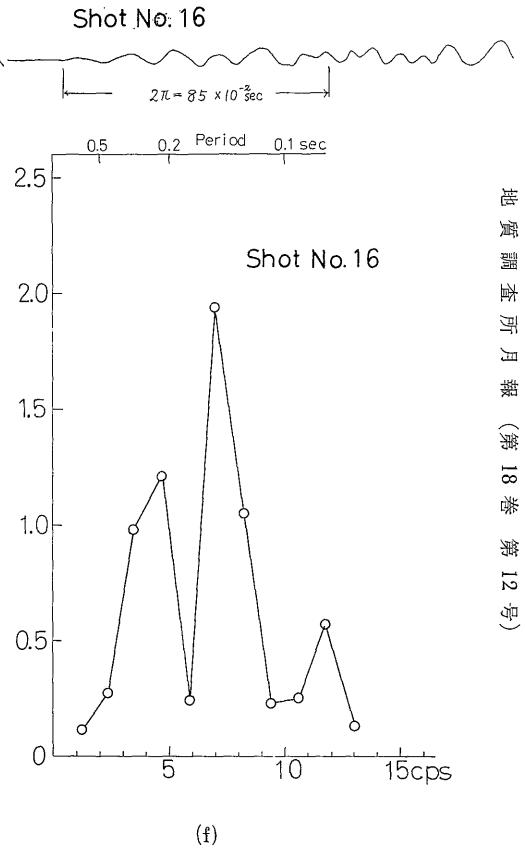
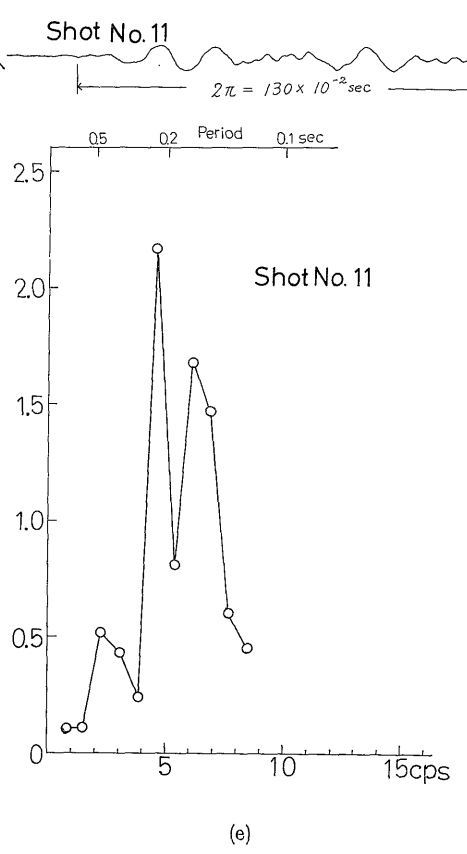
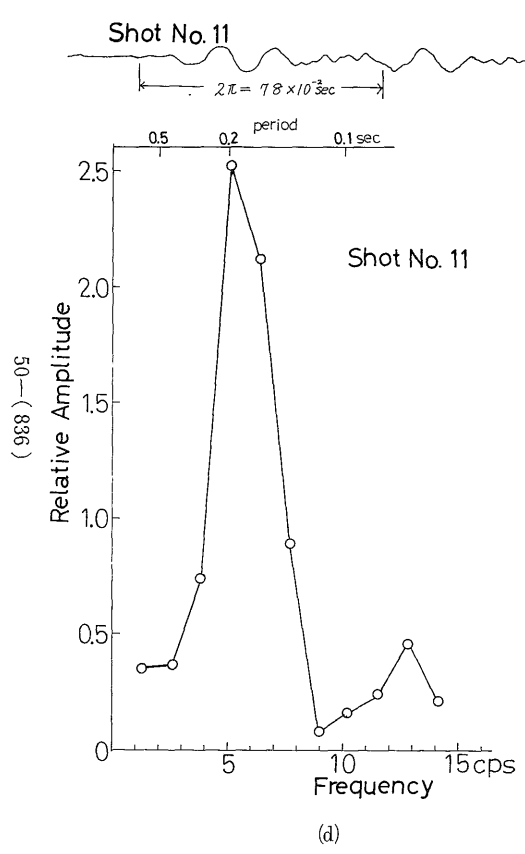
分析結果を第3図(a)~(i)に示す(将来、解析区間 2π の長さをいろいろ変え、sampling n の数をふやして、電子計算機による精密な計算をやってみたいと考えている)。

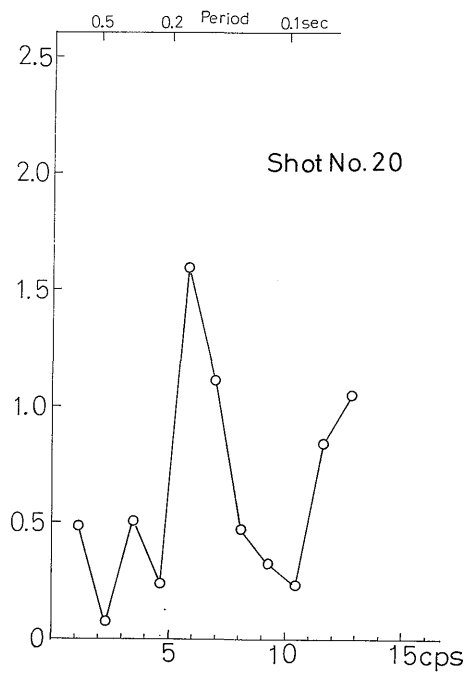
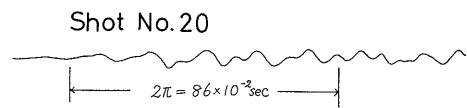
a) 火薬量50kgの場合

震央距離 $d=15$ km の shot No. 5 と、 $d=40$ km の shot No. 11 とのフーリエ分析結果をくらべてみると、卓越周期は約0.2秒でほとんど変化していないが、スペクトラム全体の様子はかなり変化している。すなわち、shot No. 11 では、短周期の成分波の減衰が著しい。ところが奇妙なことには、shot No. 16 ($d=60$ km), shot No. 20 ($d=77$ km) になると、 d が増しているにもかかわらず、卓越周期が約0.15秒とわずかながら短くなる傾向が現われている。この原因はよくわからない。さらに

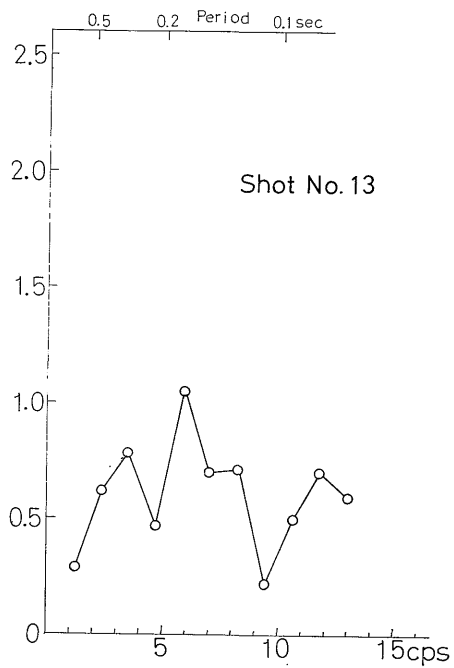
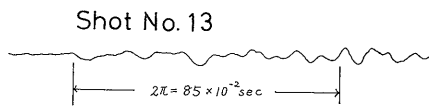


第3図 初動部分の記録とその周波数スペクトル
Initial parts of seismograms and its frequency spectra.

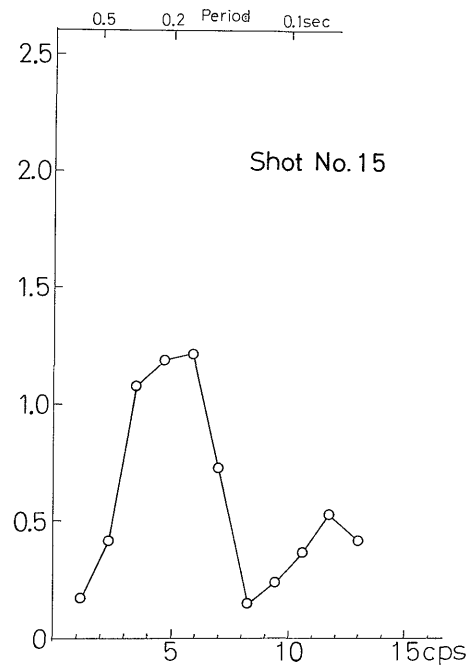
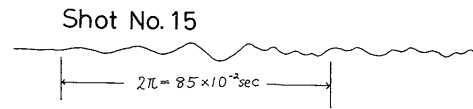




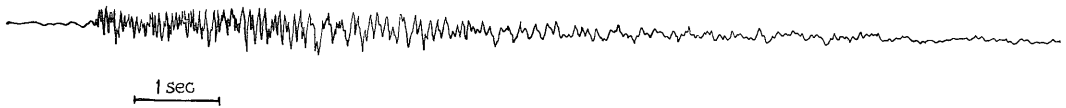
(g)



(h)



(i)



第4図 自然地震の記録の1例
An example of natural earthquakes.

shot No. 20 の場合には、0.1秒以下の短周期の成分波が優勢になる傾向を示しており、これは火薬爆発以外の震動が重なり合っているためかも知れない（今の場合、爆破は海中で行なわれているので、震源の条件は一定と考えてよい）。

粟島は、1964年6月に起こった新潟地震(M=7.5)の余震区域のほぼ中央に位置するから、微小な自然地震の重なりも考えられないことではない。実際に、観測中いくつかの微小地震が記録された。その1例を第4図に示しておく。

b) 火薬量100kgの場合

shot No. 13 (d=49km), shot No. 15 (d=56km) とともに卓越周期は約0.2秒で、火薬量による変化はほとんどみとめられない。

しかしながら、火薬量50kgの場合にくらべると、相対的に、卓越周期よりも長い周期の成分波が優勢になっていることがわかる。これは、火薬量が2倍になったためと推定される。

よく知られているように、任意の地点で観測される地震波の周波数特性 $Y(\omega)$ は、震源の周波数特性を $Y_1(\omega)$ 、媒質の周波数特性を $Y_2(\omega)$ 、記録器の周波数特性を $Y_3(\omega)$ とすれば、

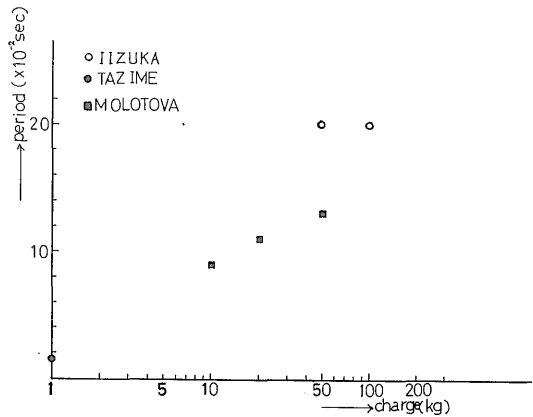
$$Y(\omega) = Y_1(\omega) \cdot Y_2(\omega) \cdot Y_3(\omega)$$

で表わされる。

今、水中で爆破を行なっているので、火薬量一定の場合には、 $Y_1(\omega)$ は変化しないと考えてよい。また $Y_3(\omega)$ も同一記録器を使う限り一定である。 $Y_2(\omega)$ は、一般的には震央距離が増加すれば、高周波が減衰して低周波領域へとピークが移動してくるはずである。ところがこの実験では、火薬量50kg、100kgのいずれの場合も卓越周期は約0.2秒であり、かつ震央距離による変化もほとんど認められないのである。

したがって、この観測事実は、震源から送りだされる波動エネルギーが、火薬量50~100kgでは周期0.2秒付近に集中しているのか、または、観測点付近の表層の周波数特性が大きくさいているのかの、いずれかを示すものであろう。しかしながら、換振器を設置した場所が、中新世中期に貫入した粗粒玄武岩上であることから、後者の要因はこの場合考えにくい。

次に、火薬量と卓越周期との関係について考えてみる



第5図 火薬量と卓越周期との関係
Relation between charge amounts and the predominant period.

ことにしよう。実験例は少ないのであるが「小発破」の場合について、TAZIME (1957)¹⁰⁾の行なった研究がある。TAZIMEの実験では、火薬量は雷管1本からはじめて最大0.1kgであるが、その範囲内では、P波の周期は一定で 1.5×10^{-2} sec となっている。

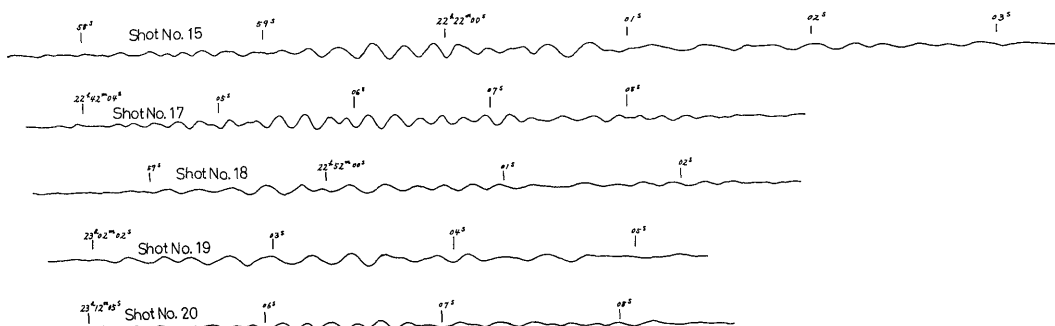
われわれの実験でも、火薬量50~100kgの範囲では、周期約0.2秒で一定とみなし得る。しかしながら、両者を組み合わせると、周期一定の関係は明らかに成り立たない。第5図は、火薬量と卓越周期との関係をプロットしたものである。TAZIMEとわれわれの結果の間をうめるために、MOLOTOVAの論文⁵⁾から、火薬量10, 20, 50kgの場合について引用してある。この図では、爆破条件と震央距離の差異を無視しているため、正確な議論はできないが、いずれにしても、火薬量が増加すれば初動部分の卓越周期が長くなることは確かであり、どのように変化するかはさらにくわしい実験にまたねばならない。

3.3 C波群の波の分散性

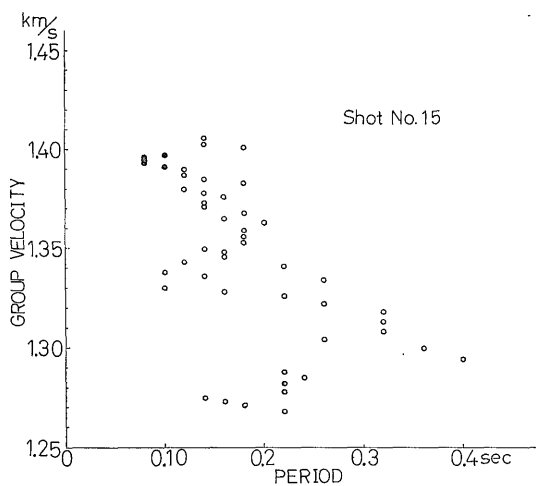
C波群の波は、震央距離約30km以内ではA波群(多分B波群も)の波と重なり合っていたものが、それ以降では明瞭に孤立した波群として分離し、さらに約80kmを越えると消滅してしまうことは先に述べた。

この波群は、群速度が他の波群にくらべて著しく小さいこと、振幅が比較的大きいこと、波の通過する媒質の構造に左右されるらしいこと、などの理由から表面波と考えられるので、その分散性について調べてみた。選ん

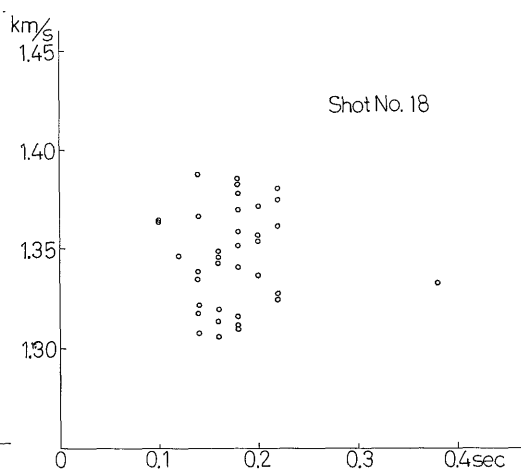
火薬爆発によって生ずる地震波動について (飯塚 進)



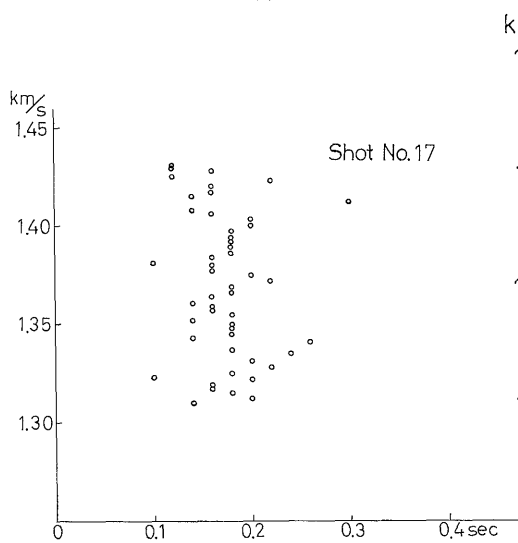
第6図 分散性の解析に用いたC波群の記録
Seismograms of wave group C used for dispersion analysis.



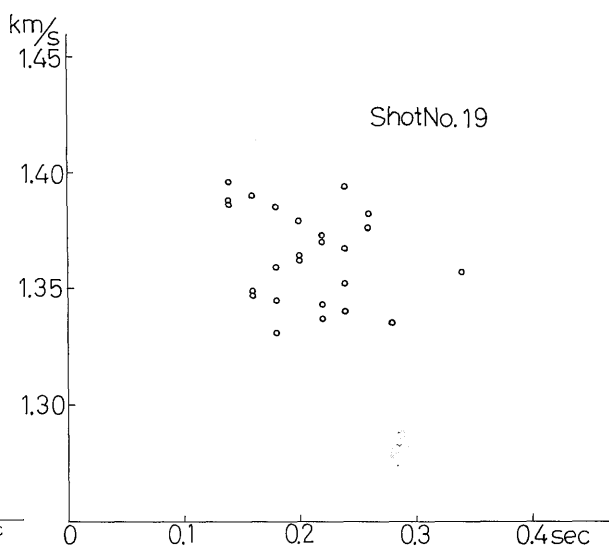
(a)



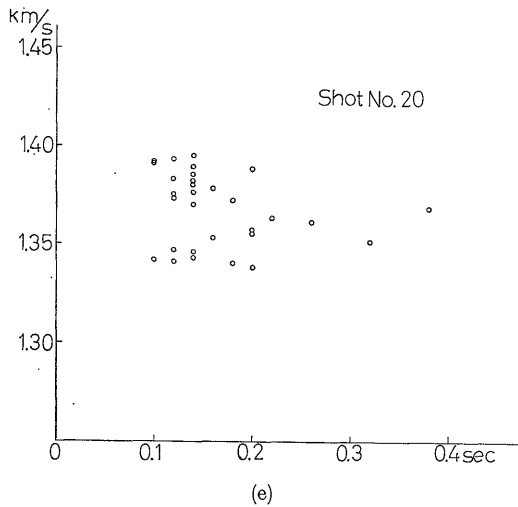
(c)



(b)



(d)



第7図 C波群の分散性 (群速度と周期との関係)
Dispersion of wave group C.

だ記録は, shot No. 15, 17, 18, 19, 20 の5例で, 第6図にそれを示す。

第7図(a)~(e)は, 群速度と周期との関係をプロットしたものである。shot No. 15に, 周期が長くなると群速度がおおくなる傾向がみられる以外には, はっきりとした分散性はみとめ難い。そして, ほとんどの点が周期0.1~0.2秒の間におちる。

この波群の特徴は, 上にも述べたが, 群速度が1300~1400m/secと, 水中音波1500m/secよりもおそいことである。

一般に, 分散性 Rayleigh 波は, 自然地震ではおもに Airy-Phase を与える周期よりも長周期の波が, 人工地震では Airy-Phase 付近が観測され, さらにモデル実験では Airy-Phase を与える周期よりも短周期の波が観測されるといわれている (久保寺, 1960)¹¹⁾。

このような経験的事実と, 先に述べたとおり顕著な分散性を示さないこと, 群速度が水中音波の速度よりもおそいことなどから, C波群は Airy-Phase 付近の波に相当すると考えてよいだろう (Ewing et al., 1957)¹²⁾。この点については, 今後さらにデータをふやし検討したいと考えている。

3.4 走時曲線について

走時曲線を参考のために第8図にかかげる。大ざっぱにみて, 地下構造は3層からなり, 上からみかけ速度5.7 km/secの第1層, 6.4 km/secの第2層, 7.8 km/secの第3層となっている。5.8 km/sec第2層の下り勾配のみかけ速度を表わすものと解釈しておく。また, 第3層は, モホロビッチ不連続面直下の速度と考えられる。

4. 結 語

今回の実験は, はじめての試みであり, きわめて不十分であるが, 今後の研究の基礎資料を得ることができた。

1) 海中爆破の場合, 観測点のノイズレベルが充分低ければ, 火薬量50 kgでも数10~100 kmの震央距離で精度の高い記録を得ることができる。

2) 「小発破」の実験の場合と同様に, 火薬量が50 kg, 100 kgの場合にも, 観測される地震波動はいくつかの波群に分類することができる。すなわち, A波群は主として実体波からなり, C波群は表面波, B波群もまた表面波の可能性が強い。今回の実験では, これらの波群がどういう波に相当するかを充分明らかにすることはできなかった。とくにA波群の解明は, 今後に残された重要な問題点である。

3) 初動部分の卓越周期は, 火薬量50 kg, 100 kgいずれの場合も約0.2秒で, 震央距離による変化はほとんどみとめられない。

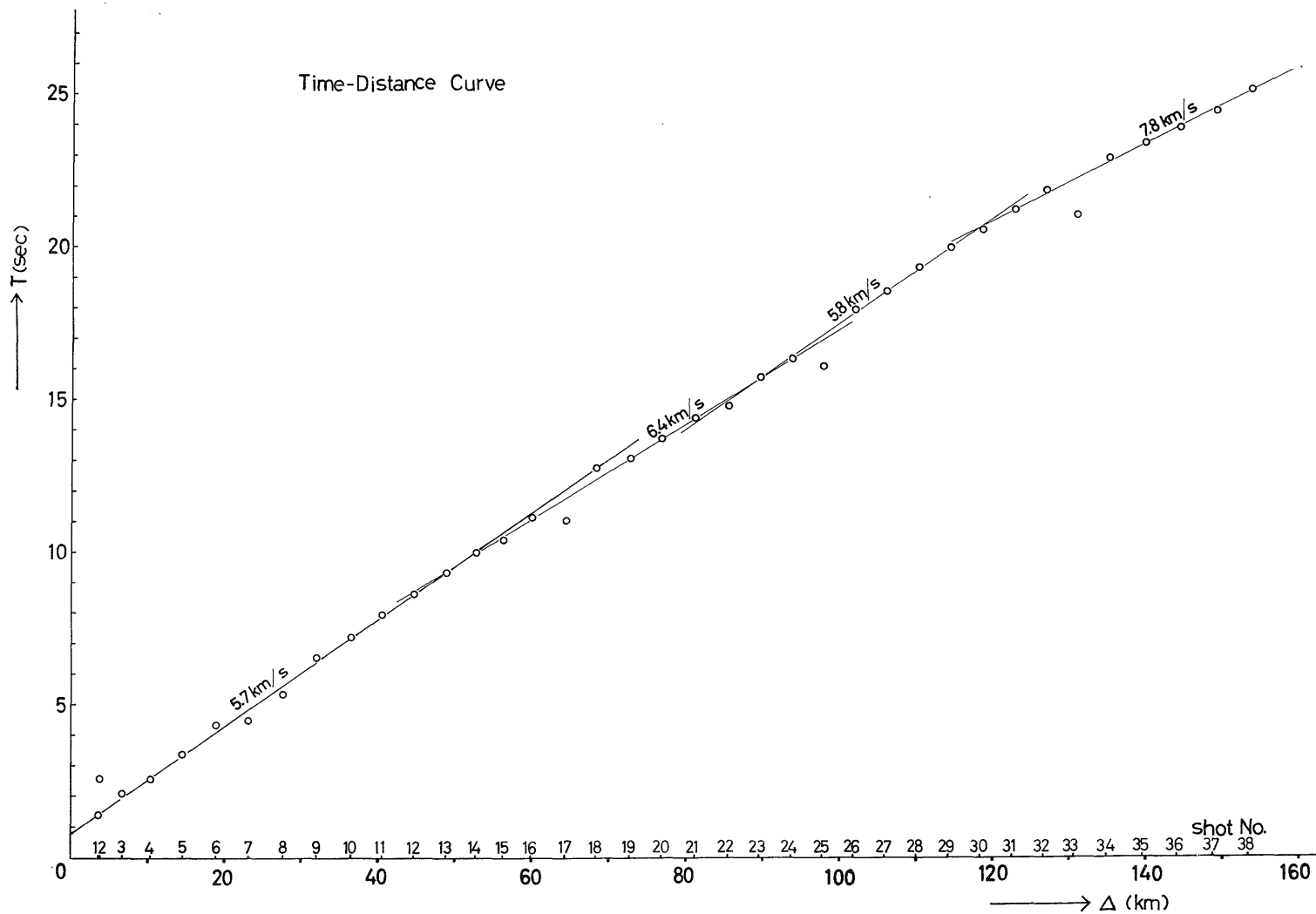
4) 表面波と考えられるC波群は, 震央距離30 kmあたりからA波群より分離して1個の独立した波群を形成し, 85 km以上になると消滅する。分散性に乏しく, 大部分の点が周期0.1~0.2秒の範囲におちること, 群速度波が水中音の速度よりもおそいことなどから, Airy-Phaseに相当する可能性が強い。

5) この地域の地下構造は, 3層からなるものと推定される。

文 献

- 1) 市川金徳(1966): 四国大步危周辺地震探査について (深層試錐の位置選定のための先行調査), 昭和41年秋季地震学会にて発表。
- 2) EISLER, J. D. (1966): Investigation of a method for determining stress accumulation at depth. Earth Science Group Stanford Research Institute.
- 3) 爆破地震動研究グループ会報: 第1号 (1950年) 一第25号 (1966年) (爆破地震動研究グループの研究成果は, 地震学会誌, 東大地震研究所彙報などにも発表されている。)
- 4) 地震探鉱実験グループ会報: 第1号 (1954年) 一第43号 (1966年)
- 5) MOLOTOVA, L. V. (1964): The relationship between the frequency spectra of seismic vibrations and explosion conditions. I. Results of experimental investigations.

55—(841)



第8圖 走時曲線
Time-distance curve.

火薬爆発によって生ずる地震波動について (飯塚 進)

- II. Comparison of the experimental results with the theory. *Bull. (Izvestiya). Acad. Sci. USSR, Gephys. Ser.*, no. 12, p. 1059~1072.
- 6) TAZIME, K. (1956): Wave groups generated by a very small explosion. *Jour. Phys. Earth.*, vol. 4, p. 113~126.
- 7) 飯田波事・太田裕・成瀬聖慈 (1966) : 火薬爆発に伴う表面波, 地震, 第 2 輯, 第 19 卷, p. 81~95
- 8) KASAHARA, K. (1957): The nature of seismic origins as inferred from seismological and geodetic observations. (1). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 35, p. 473~532.
- 9) 友田好文 (1955) : 飛び石函数を使って Fourier 分析に関する計算を簡単化する方法, 地震, 第 2 輯, 第 7 卷, p. 201~208
- 10) TAZIME, K. (1957): Relations between charge amounts and periods in resulting seismic wave groups. *Jour. Phys. Earth.*, vol. 5, p. 51~59.
- 11) 久保寺章 (1960) : 分散性 Love 波の minimum group velocity と maximum amplitude について, 地震探鉱実験グループ会報, 第 21 号, p. 117~121
- 12) EWING, M., W. JARDETZKY & F. PRESS (1957) : *Elastic waves in layered media.* 380, p. McGRAW-HILL.