



Title	9. 高田市郊外で行なわれた小爆破実験の際に観測された地震波群
Author(s)	小柳, 敏郎; KOYANAGI, Toshiro
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 15, 111-128
Issue Date	1966-03-14
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.15.111
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13911
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p111-128.pdf



9. 高田市郊外で行なわれた小爆破実験 の際に観測された地震波群

小 柳 敏 郎

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 40 年 10 月受理 —

I. ま え が き

過去 10 年来、地震探鉱実験グループの研究者達が小規模なダイナマイトの爆発によって生じる種々の地震波群に関する研究を続けて来た¹⁾。このような小爆破によって生じる波群は、大局的にみると、毎回、ほぼ似たような波群であった。その間、数人のグループ員が、これらの波群をいろいろな観点から理論的な波群に対応をつけることを試みている^{2)~4)}。それらの結果として、初動以上の波群の大部分は表面波群であるという点でほぼ一致しているものの、こまかな点でくいちがっているのが現状である。しかし、これらの実験場がそれぞれ異なるという事実を考えれば、そこで発生する波群の性質に多少のくいちがいがあることも当然と考えられる。逆に、これらの地下構造のちがいと、発生する波群のちがいをうまく対応づければ、これらの波群のより詳しい性質や、理論的な波との対応も容易に解明出来るであろう。

- 1) 地震探鉱実験グループ会報, 1 (1954)~39 (1965).
- 2) K. TAZIME; Wave Groups Generated by a Very Small Explosion, Journ. Phys. Earth, 4 (1956), 113.
- 3) K. TAZIME; Relations between Charge Amounts and Periods in Resulting Seismic Wave Groups, Journ. Phys. Earth, 5 (1957), 51.
- 4) A. KUBOTERA; Rayleigh and Sezawa Waves Generated by Explosions, Journ. Phys. Earth, 5 (1957), 33.
- 5) A. KUBOTERA; Stoneley-waves Generated by Explosions, Journ. Phys. Earth, 3 (1955), 23.
- 6) 島 垣; 1961 年三条市郊外で行なった表面波の実験, 地震探鉱実験グループ会報, 25 (1962), 9.
- 7) H. SHIMA; On the Surface Waves Generated by Small Explosion, Part I, II, Geophys. Mag., 31 (1963), 457.
- 8) 岡田 広; 1958 年度島松に於ける小スパン実験, 地震探鉱実験グループ会報, 18 (1959), 71.
- 9) K. TAZIME and H. OKADA; Comparison of Wave Groups Observed on Short and Long Spans at the Same Locality, Geophys. Paper Dedicated to Prof. K. SASSA, (1963), 523.
- 10) H. OKADA; Analyses of Seismic Waves Generated by Small Explosions—Experiment at Wakino-machi, Niigata Prefecture—, Journ. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII, 1 (1962), 459.
- 11) H. OKADA; Analyses of Seismic Waves Generated by Small Explosions—Experiment at Wakino-machi, Niigata Prefecture—(Continued), Journ. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII, 2 (1963), 79.
- 12) H. OKADA; Analyses of Seismic Waves Generated by small Explosions—Experiment at Imamachi, Niigata Prefecture—, Journ. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser. VII, 2 (1964), 197.
- 13) 飯田汲事・太田 裕・成瀬聖慈; 火薬爆発に伴う表面波, 地震探鉱実験グループ会報, 34 (1964), 1.
- 14) 飯田汲事・太田 裕・成瀬聖慈・服部定育; 火薬爆発に伴う表面波, Part II, 地震探鉱実験グループ会報, 38 (1965), 44.

今回の実験も、得られた波群の性質をしらべて、それを理論的な波群と対応づけるために行なわれた。同様な実験が太田等¹⁵⁾によって、主として波群の分散とその所属 mode に重点をおいて解析されている。

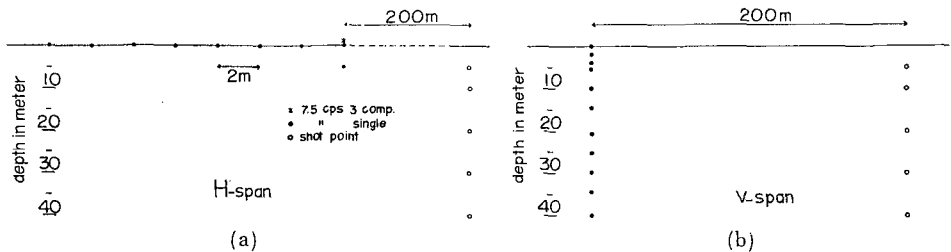
しかし、著者は、解析にあたっては、まず、波群の性質をなるべく詳しく調べることを主な目的とし、波群の対応については定性的な推察のみにとどめた。

II. 実験の概略

実験場は新潟県高田市郊外の水田地帯の農道であり、実験はグループの他の実験と合わせて、1963年8月初旬に行なわれた。実験場の選択にあたっては、前以って屈折法によって地下構造をしらべ、この実験に都合のよい場所を選んだ。

今回の実験の目的は震央距離と geophone の位置を固定し、発破深度のみを変化させ、地中および地表で観測し、得られた波群の性質をしらべることにあった。

実験に関する細かなことは会報¹⁶⁾に詳しいのでここでは概略を述べる。



第1図 測線の位置 (a) H測線 (b) V測線

Fig. 1. Disposition of geophones and shot holes
(a) horizontal span (b) vertical span.

測線の様子は第1図に示してある。震央距離 200 m の地点を基点とし、geophone を鉛直に並べた測線と水平に並べた測線を設置し、白丸で示してあるごとく、発破深度を 5, 10, 20, 30, 40 m と変化させて記録をとった。

鉛直測線 (V 測線) では、黒丸で示してあるごとく、geophone を 0, 2, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m の各深さに設置し、vertical 成分を測定した。geophone の固有周波数はすべて 7.5 cps である。

水平測線 (H 測線) では 7.5 cps 3 成分を基点に置き、基点の下約 5 m に 1 個、それに基点から、地表上 2 m 間隔で 8 個の geophone が設置されている。基点以外は vertical 成分の測定しか行なわれなかった。

それぞれの geophone が捕えた地動は北大所有の地震探鉱用アンプ (E. T. L. PRA 2 型) を通って、固有周波数 125 cps のガルバノメーターを持つオシログラフ (E. T. L. ER 64 型) で記

15) 前出, 13).

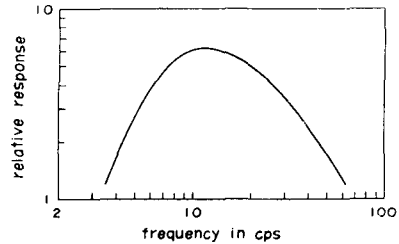
16) 地震探鉱実験グループ会報, 31 (1963), 15.

録される。計器の総合特性は第2図に示されている。

実験を通じてアンプの gain は一定とし、薬量も 150 g と一定である。但し V 測線の発破深度 40 m の記録のみは、アンプの gain を多少あげてとられている。

各々の geophone 及びアンプの感度テスト等は行なわれていないが、解析にさしさわりのあるほどのばらつきはないと考えている。

なお、今後場合によっては次の様な記号を用いる。 Δ : 震央距離, E : 発破深度, Z : 観測深度。



第2図 観測器機の総合特性

Fig. 2. Frequency-response curve for the overall system, including geophone, amplifier and galvanometer.

III. 観測された波群

前章の様な手順によって 10 枚の記録を得たが、それを第3図に示した。(a)は H 測線, (b)は V 測線である。

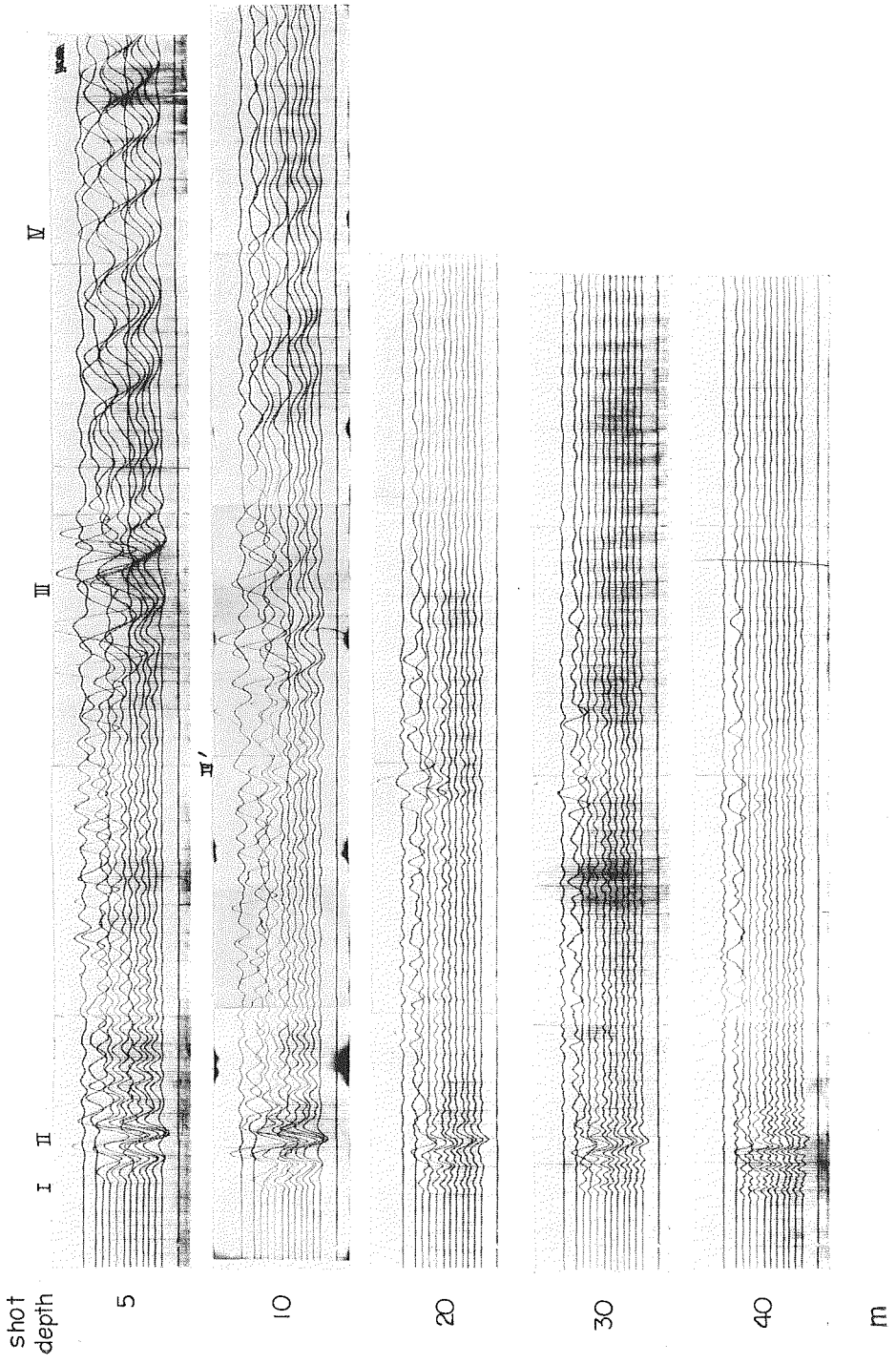
H 測線では trace の上から, $\Delta=200$ m における 3 成分 (transversal, radial, vertical の順), 4 番目が $\Delta=200$ m, $Z=5.2$ m, 5 番目以下が $\Delta=200$ m から 214 m 迄 2 m 間隔に地表におかれた geophone の記録である。

V 測線では、上から地表より浅い順に 11 の trace を示している。具体的な測定状況は第1図によって判断していただきたい。なお、H 測線の発破深度 5 m における記録は実験の不手際によって、途中で切れてしまっている。

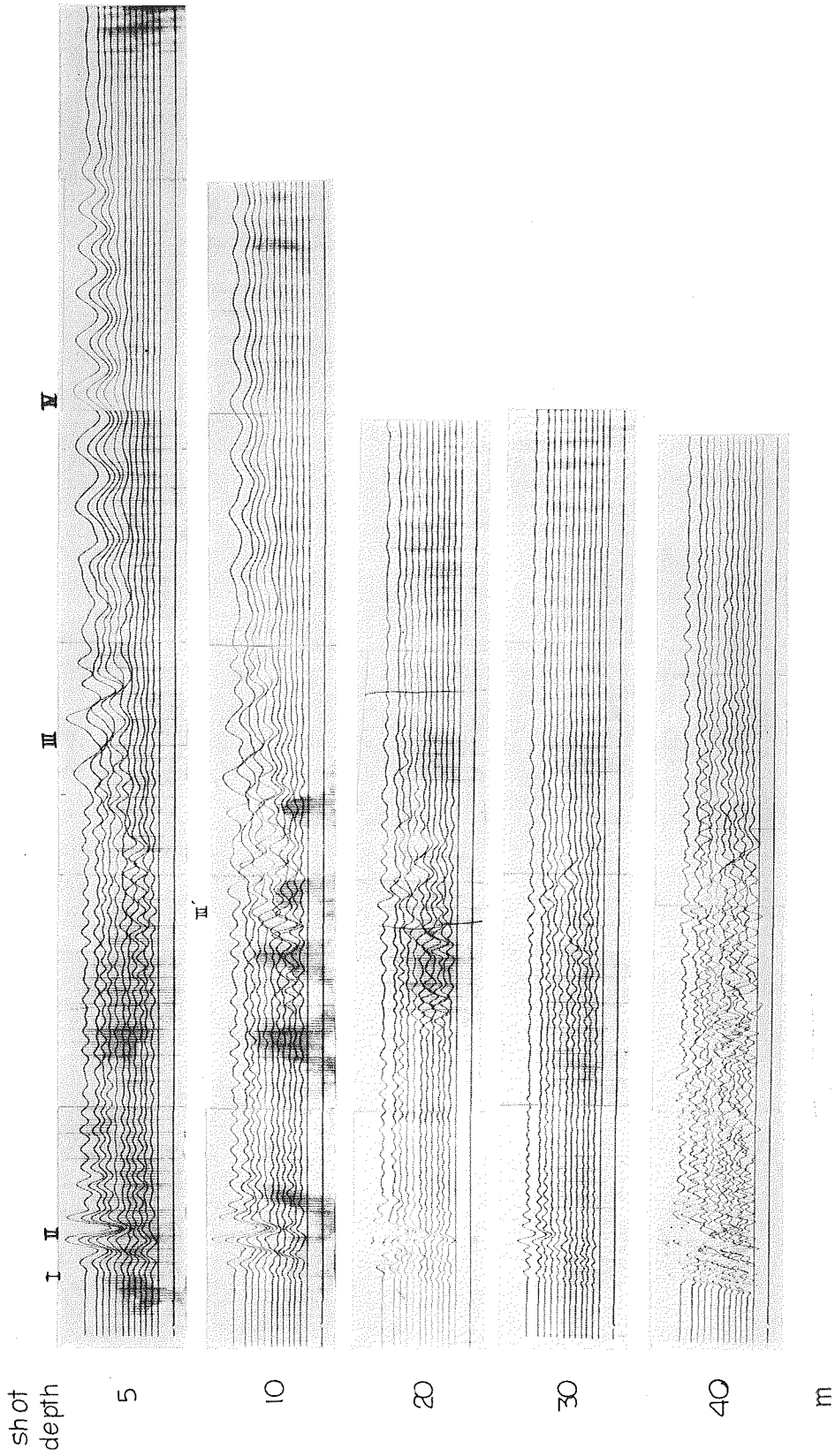
これらの記録を見ると、発破深度が異なると得られる記録も大分異なっているということがわかる。

今、第3図(a)の発破深度 5 m の記録と 3 成分による地表の動きを参照して、大ざっぱに波群を分類すれば、主に以前に得られていた波群とよく似た 4 つの波群が観測されている。すなわち、以前より使われている波群の名前に対応づければ、初動部分の位相速度 1500 m/s, 周期 $5\sim 6\times 10^{-2}$ s の I 群。その直後に続く大きな振幅で I 群とほぼ同じ位相速度を持ち、周期 0.9×10^{-2} s くらいの II 群。shot time から 1.8~2.8 s あたりに見られる位相速度 150~170 m/s, 周期 0.21 s の III 群。そして III 群にひき続いて、分散性の明らかな位相速度 100 m/s くらいで周期 0.14~0.20 s の IV 群である。但し震央距離が 200 m に限られ、かつ水平方向に 14 m しか測線がはられていないので、走時曲線が不充分であるために、上述の位相速度の精度は良くない。

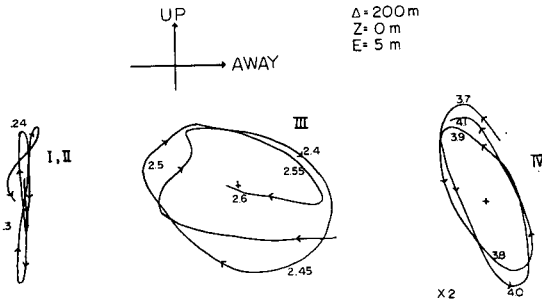
第3図(b)を見ても、発破深度が浅い場合には I, II 群の区別がはっきりしないが、発破深度が深くなると、II 群は波数を増し、振幅を減じる。又、V 測線の trace 6 と 7 の間で位相の逆転が見られる。III, IV 群は発破深度が 20 m になるとほとんど観測されず、又、発破深度にかかわらず、深いところに設置された geophone は地表にくらべてほとんどゆれていないのが



第3図 (a) H測線で得られた記録
Fig. 3. (a) Seismic records by various shot depth in horizontal span.



第3図 (b) V測線で得られた記録
Fig. 3. (b) Seismic records by various shot depth in vertical span.



第4図 各波群の地表でのうごき

Fig. 4. Particle motion for each wave groups, shot depth being 5 m.

第1表 各波群の位相速度と周期 (E=5 m)

Table 1. Phase velocity and period for each wave group, shot depth being 5 m.

wave group	phase velocity (m/s)	period (sec)
I	1500~1600	$5\sim6 \times 10^{-2}$
II	"	9×10^{-2}
III*	(150~170)	(10×10^{-2})
III	150~170	20×10^{-2}
IV	100~130	$14\sim22 \times 10^{-2}$

特徴である。

以上名づけた波群の他にも、いくつかの波群が見られる。今回は III 群の直前に見られる波群に注目した。この波群は発破深度が深くなるにつれて出現時刻が早くなり、特に 15 m の深さあたりの時に最も優勢で、かなり深くなっても観測されている。この波群は前にあげた III 群と密接な関係があると考え、これを III* 群と名づける。以上 5 つの波群は第 3 図に夫々の記号を付けて示されている。

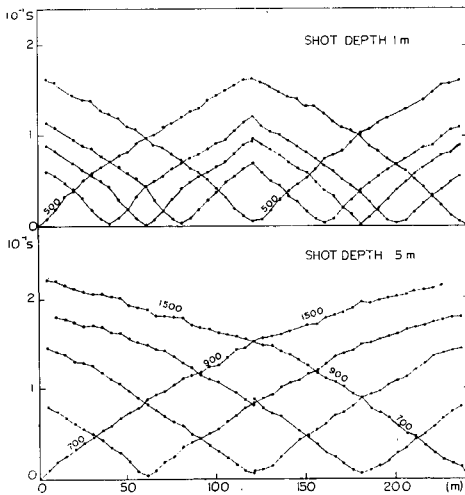
各波群に対する地表の動きは第 4 図に示されている。又、5 つの波群を表にまとめると第 1 表のごとくである。発破深度が変わると、周期も変わるの、ここでは E=5 m のものに限った。なお、III* 群に関しては後に詳しく検討される。

IV. 地下構造

前にも述べたごとく、共同実験に先立って実験場の地下構造のあらましが岡田や著者等によって求められた¹⁷⁾。

測線の長さは 240 m であり、測定器機は E.T.L. FR1 型を使用した。7cps の geophone を 24 個それぞれ single で展開し、geophone の間隔は 5 m にした。又、発破点の間隔は発破深度 5 m の時は 60 m、1 m のときは 20 m あるいは 40 m であった。

得られた初動の走時曲線は第 5 図



第5図 走時曲線

Fig. 5. Time-distance plots.

17) 地震探鉱実験グループ会報, 31 (1963), 3.

に示した。この走時曲線は一見して左右対称なので、地下構造はほぼ平行層からなっているとみなせる。

実験当時は日程もつまっており、早急に地下構造を出すということもあって、詳しい検討も出来ず、大ざっぱにしか求めなかったが、その結果は、

$$v_{p1} = 500 \text{ m/s}, \quad v_{p2} = 800 \text{ m/s}, \quad v_{p3} = 1600 \text{ m/s}$$

$$H_1 = 9 \text{ m}, \quad H_2 = 24 \text{ m}$$

であった。但し、 $v_{p1}, v_{p2} \dots$ は添字のついた層のP波の速度を、 H_1, H_2 は対応する層の厚さをあらわす。

太田等¹⁸⁾は $\Delta=100 \text{ m}$ の同様の実験を解析する際、この結果を参考にしている。太田等はい小林等¹⁹⁾がSH波を用いて求めた地下構造と比較し、両者の間の違いを指摘し、表面波を考察するに際しては、SH波による地下構造を採用している。

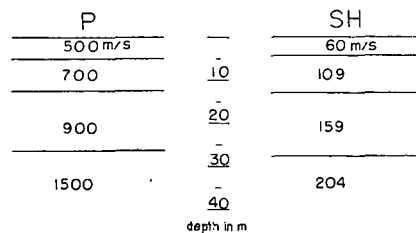
著者は後日改めて次の様な結果を得た。第5図の発破深度5mの方の走時曲線を見ると、各層の速度のちがいがあまりないために折れ曲り点のはっきりしないが、図に記入した3種の速度に分類される。すなわち、700 m/s, 900 m/sそして1500 m/sである。しかし、700 m/sと900 m/sの間にははっきりとした折れ曲り点がないので、ここでは700 m/sから900 m/sへと速度が次第に変わっているのかも知れない。(以前の解析には、この2つの速度層を800 m/sという1つの速度層にしてしまっていた。)

一方、発破深度1mの方には、表層に500 m/sの速度層が存在していることがわかる。だが、相変わらず、700 m/s, 900 m/sの速度層も存在している。

以上のごとく考えると、実験場の地下は、 $v_{p1}=500 \text{ m/s}, v_{p2}=700 \text{ m/s}, v_{p3}=900 \text{ m/s}, v_{p4}=1500 \text{ m/s}$ の4つの層から構成されていることになる。この4つの速度層を平行とみなし、発破深度を考慮に入れて各層の厚さを求めると

$$H_1 = 5.0 \text{ m}, \quad H_2 = 7.3 \text{ m}, \quad H_3 = 14.4 \text{ m}$$

であり、図示すると第6図の左図になる。この図の右には、小林等が同じ実験場で求めたSH屈折法から求めた地下構造も描いておいた。両者を見くらべると、互いによく一致しており、くいちがいはほとんどない。SH波とP波による不連続面は、必ずしも一致させる必要はないが、ここでは、第6図のごとく、700 m/sと900 m/sの2つの層を考えたことの方が妥当である様に思われる。



第6図 推定地下構造
 Fig. 6. Subsurface structures obtained from P-and SH-refraction.

18) 前出, 13).

19) 地震探鉱実験グループ会報, 32 (1963), 17.

SH波の資料を合わせて、地下の様子を表にすると第2表となる。表中にはポアソン比(σ)も求めている。ポアソン比は、水田地帯で行なわれた実験において例年みられる値である。

第III章において名づけたII群で、深さ15mと20mの間に位相の逆転がみられたが、この間には地層の不連続面は存在していない。

第2表 各層のP波, S波の速度, 厚さとポアソン比
Table 2. Velocities of P and SH wave, thickness and POISSON'S ratio (σ) for each layer.

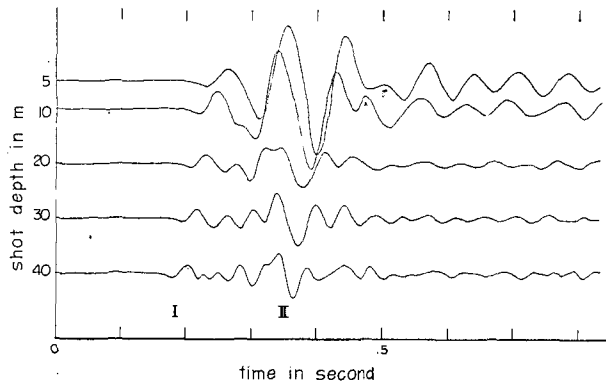
n	P wave		SH wave		σ
	v_{pn} (m/s)	H_{pn} (m)	v_{sn} (m/s)	H_{sn} (m)	
1	500	5.0	60	4.6	0.49
2	700	7.3	109	8.6	0.49
3	900	14.4	159	14.5	0.48
4	1500		204		0.49

V. 観測された波群の性質

第III章で観測された波群を一応5つに分けて名称をつけた。この章では、より詳しくこれらの波群の性質を調べてみる。

1. I群

まず、第3図から $A=200$ m, $Z=0$ m における trace を発破深度毎にぬきだして、I, II群に相当する部分を第7図に示した。これらはすべて vertical 成分である。この様にしてみると、I, II群の波形が発破深度の変化に伴ってどう変っていくかが見やすくなる。発破深度5mと10mではI群とII群をはっきり区別されないが、II群は発破深度が大きくなると振幅が小さくなって両波群の分離が見やすくなる。しかし、それと共に、波数が増して来るので、いくつかの位相が出現しており、そう簡単には取扱えない。そこで、ここではI群は初動の1山とし



第7図 発破深度に対するI, II群の波形の変化

Fig. 7. Variation of wave forms of wave groups I and II for each shot depth.

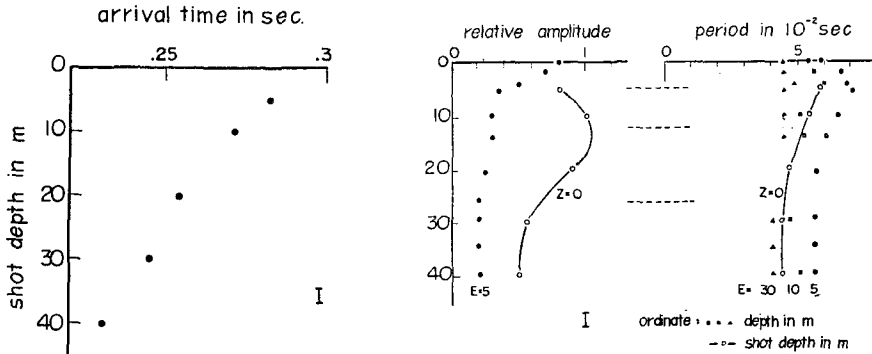
て考えることにした。

地表の動きは第4図のごとく、vertical成分が卓越しており、この傾向は発破深度にかかわらず同じである。

H測線から位相速度を求めると1500~1600 m/sであり、4層目のP波の速度に等しく、又、第5図の走時曲線においても、 $\Delta=200$ mでは4層目の屈折波が観測されている。

第8図に発破深度とI群の出現時刻との関係を示した。深度が大きくなると時刻は早くなっていることを考えても、初動部分は4層目を伝播して来た屈折P波と考えられる。

一方、記録の直読による振幅と周期が、発破深度と観測深度でどうなるかを第9図に示した。発破深度を変えた場合に $Z=0$ で観測された振幅および周期を白丸で記入し、便宜上曲線で結んだ。観測深度を変えた場合には、黒丸で示したごとく、 $E=5$ m に対して、それぞれを求めてあるが、周期の方は $E=10$ m と 30 m の結果も合わせ描いてある。



第8図 発破深度とI群の出現時刻

Fig. 8. Arrival time of wave group I for various shot depths.

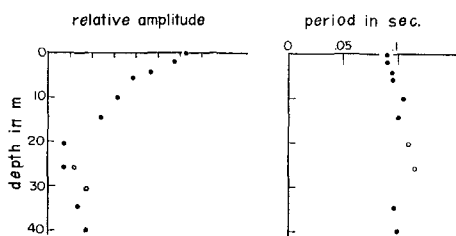
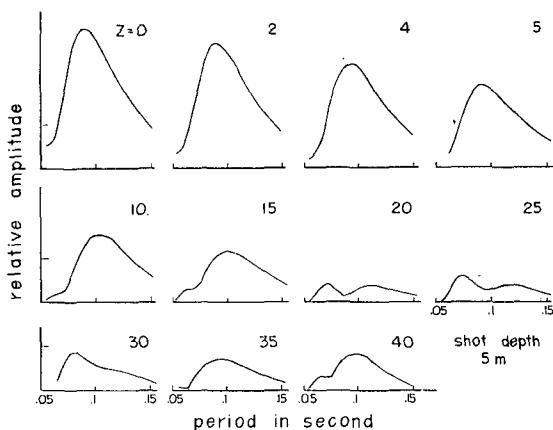
第9図 I群の振幅および周期

Fig. 9. Amplitudes and periods of wave group I for various shot depths and various observation depths.

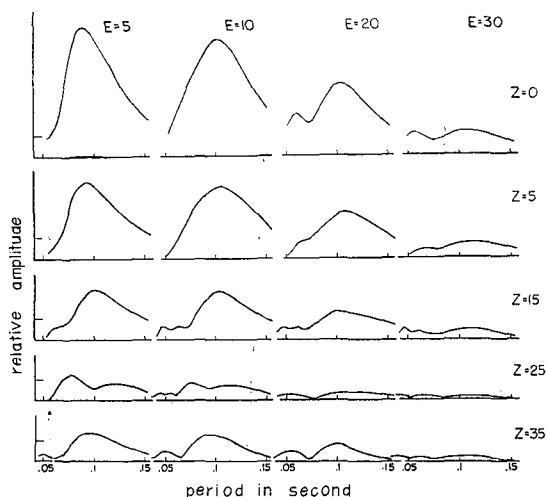
I群の振幅は発破深度の変化に対して極大値を持つ。周期は発破深度が増すにつれて単調に小さくなり、 $Z=30$ m以下では一定になる。一方、観測深度を変化させても、周期はあまり変わらず、振幅は地表付近で急激に変化し $Z=5$ m以下ではほとんど一定になる。図には、点線で地下構造を書き入れてあるが、層の数に比して観測点も少ないので、しいて対応はつけない。第9図に見られる最も著しい事実、振幅分布が発破深度を変えた時と観測深度を変えた時とは全く異なっていることである。すなわち、発破点と観測点とは非可逆的である。

2. II群

II群の地表の動きおよび位相速度はI群とほとんど変りがないが、周期はI群より大きく、第7図を見れば明らかな様に発破深度が大きくなるとII群が目立って来る。又、 $Z=15$ mと20 mの間で位相の逆転が見られること、発破深度が変わっても出現時刻はさほど変らないことなども特徴である。しかしながら、I, II群は発破深度が小さい場合は分離されていない。そこでI,



第10図 V測線におけるI, II群の周期特性 (E=5 m)
 Fig. 10. Spectra for wave groups I and II in V-span, shot depth being 5 m.



第11図 V測線における発破深度とI, II群の周期特性
 Fig. 11. Spectra for wave groups I and II for various shot depths in V-span.

II群をまとめてフーリエ解析を行なうことにより、I, II群の特性が分かれるか否かを見ることにした。解析区間は初動から約0.3sとし、区間は一定にしてある。

まずV測線のうち、発破深度が5mの時の各観測深度におけるスペクトラムを第10図に示した。

スペクトラムの形は至極単調であるが、Z=0~15mでは約0.1sに唯一のpeakを持つのにに対し、Z=20~30mでは0.07sにもpeakがあらわれている。しかし、Z=35mでは、再び1つのpeakをもつ。第3図における逆転した位相の影響がスペクトラムの形にあらわれたと考えられる。

下方の図には、約0.1sのpeakに対する振幅と周期が描かれている。白丸は周期0.07sのもう1つのpeakに対応している。これを見ると、振幅は観測深度と共に単調に減じている。第9図によれば、初動部分の周期は0.05~0.07sであり、又、振幅はII群の方が優勢であるから、約0.1sにあるpeakはII群に対応していると考えられる。

同様に、今度は発破深度と共にこのII群のスペクトラムがどのように変わっていくかを見た。V測線のZ=0, 5, 15, 25, 35mと、H測線のΔ=200, 206, 212mの記録を選び解析した結果が第11図と第12図である。

第12図には、発破深度が大きくなった場合のスペクトラムの形を見やすくするためにスケールをかえて点線で

示してある。振幅は発破深度の増大とともに減少し、かつ peak が2つになる。しかし、主な peak の周期はやはり 0.1 s に保存されている。

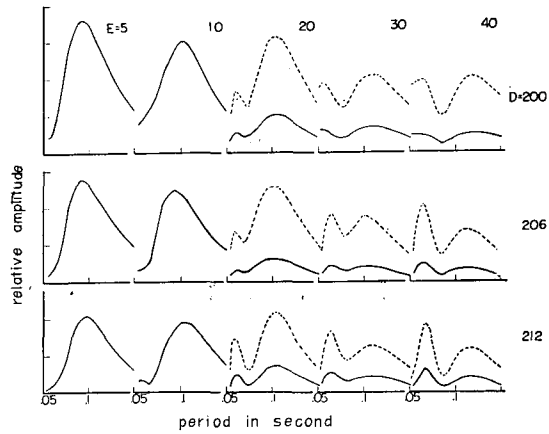
周期の大きい peak を II 群、小さい方を I 群と考えると、発破深度が大きくなるにつれて II 群は早く減少する。それに比して I 群はそれ程甚しく減少しない。ゆえに深度が大きくなるにつれて相対的に I 群が目立ってくる。こう考えると、I 群と II 群との違いを考えやすい。

0.1 s に peak を持つ波群は、距離や観測深度が変わっても発破深度の変化

に対する傾向は変わらない。もう一方の peak の振幅が発破深度の増大と共にやや増大しているが、これは I 群に関係があるいろいろの位相が目立ってくるからと考えられる。

II 群の解析は I 群との関係もあってかなり複雑であり、今回もこれ以上調べることはやめにした。この波群は過去数回の実験でも問題になった波群であって、未だ解決はついていない。分散の様子はよくわからぬが、発破深度の増大に対する振幅の減少の仕方を見ると表面波に似ている、一方、I, II 群の間には密接な関係がありそうなことを考えあわせれば、定性的には次の様な波群と考えられる：すなわち、P 波で 4 層目を伝わって来たものが表面の影響で表面波的な要素を生みだして、その結果形成された波群である。発破深度が大きくなると、I, II 群の間にいくつかの位相が目立ってくるので、数種の反射波の寄せ集りとも考えられる。要するに、この II 群は、屈折波と反射波の合わさったものと考えるのが妥当と思われる。

最近、自然地震や模型実験等で、特性方程式の複素根に帰因する表面波と思われる波群が観測されている^{20)~25)}。この II 群も mode 解的にはそれらの波群に対応するのかも知れない。しかし、この複素根に帰因する表面波は理論的にもはっきりと確立されていず、又、系統立った研究もなされていないので、今のところこれ以上言及できない。いずれにせよ、この波群を



第12図 H 測線における発破深度と I, II 群の周期特性

Fig. 12. Spectra for wave groups I and II for various shot depths in H-span.

20) J. OLIVER and M. MAJOR; Leaking Modes and PL Phase, Bull. Seism. Soc. Am., 50 (1960), 165.

21) J. OLIVER; On the Long Period Character of Shear Waves, Bull. Seism. Soc. Am., 51 (1961), 1.

22) J. OLIVER; Propagation of PL Waves across the United States, Bull. Seism. Soc. Am., 54 (1964), 151.

23) R. A. PHINNY; Leaking Modes in the Crustal Waveguide, Jour. Geophys. Res., 66 (1961), 1445.

24) F. GILBERT and S. J. LASTER; Experimental Investigation of PL Modes in a Single Layer, Bull. Seism. Soc. Am., 52 (1962), 59.

25) 浜田和郎; 固体-固体波の周期特性に関する模型実験, 地震, 16 (1963), 133.

明らかにするためには、より正確な実験及び解析上のテクニックと、それに伴う理論的な解明が必要である。

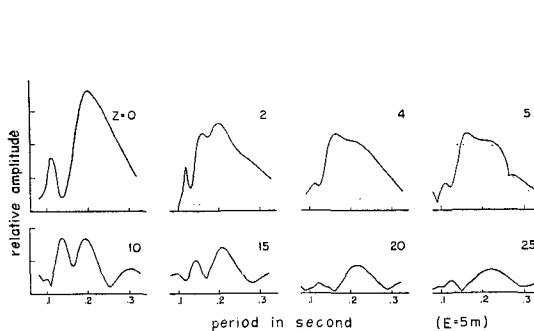
3. III 群

III 群はきれいに整った IV 群の少し前に出現する 2, 3 周期の波群である。発破深度および観測深度の増大と共に急激に振幅を減じ、各々 20 m の深さになるとほとんど観測されていないので表面波と考えられる。

位相速度は約 160 m/s で 3 層目の S 波の速度に等しく、周期は 0.2 s であり、地表の動きは progressive ではほぼ円型である。しかし、波形はあまり整っていない、分散は調べられなかった。

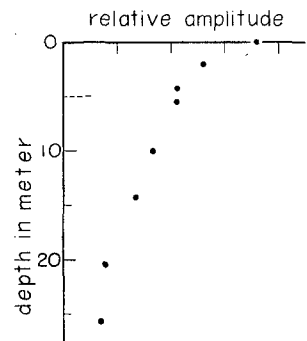
III 群と VI 群もその境目ははっきりしないが、記録および地表の動きから解析区間を定めて III 群に対するフーリエ解析を行なった。これが第 13 図であって、 $E=5$ m の記録が用いられている。

スペクトラムの形は I, II 群に比較して複雑になっており、2 あるいは 3 の peak を持つ。しかし、最も卓越した振幅をもつ peak に対応する周期はほぼ 0.2 s であって、記録上に見られる周期に近く、全体としての形は観測深度が変わってもさほど変化しない。



第 13 図 III 群の観測深度に対する周期特性
($E=5$ m)

Fig. 13. Spectra of wave group III at various observation depths, shot depth being 5 m.

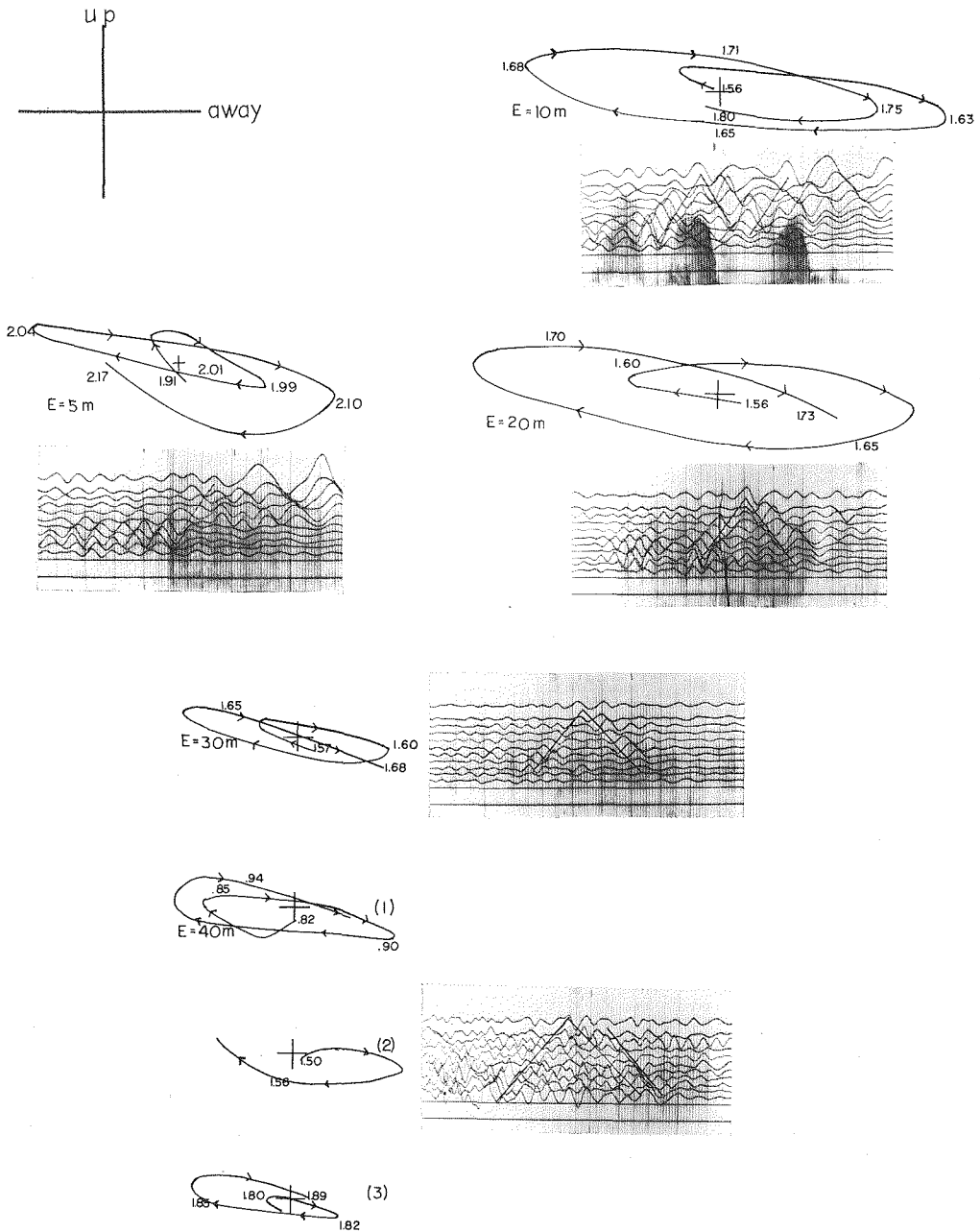


第 14 図 III 群の 0.2 s に対する振幅分布

Fig. 14. Amplitude distribution of wave group III for period of 0.2 s.

第 14 図は周期 0.2 s 近傍に peak を持つ振幅を観測深度に対してプロットしたものであって、III 群が表面波とすれば、この波群が伝播してゆく際の振幅分布を示すことになる。III 群のスペクトラムの複雑さは、この波群が地下構造に左右されやすいことを暗示しているように思われる。後に見る IV 群に比し、振幅分布も深度と共に単調に減少せず、層構造に影響されているかのごとくに見える。

一方、これも後に述べるごとく、III 群ははじめの部分は完全に表面波になりきっていない、実体波の影響を多分に受けている様子である。地表の動きを見ても、始めの部分はさほど円形を示さず、radial 成分が vertical 成分より優っている。



第15図 III* 群とその地表の動き

Fig. 15. Seismic records and particle motions of wave group III* for each shot depth.

過去の実験結果や、今回の太田等²⁶⁾の解析によれば、III群は M_{21} mode に属する表面波群であると報告されている。今回、分散の様子は調べられなかったが、いろいろの特徴は過去の結果と矛盾していない。ただ、今回の実験で III* 群が観測されたということを考えれば、ここで取りだした III 群はすべてが表面波になりきっているとはいえないと考えられる。このことは、後に再び触れる。

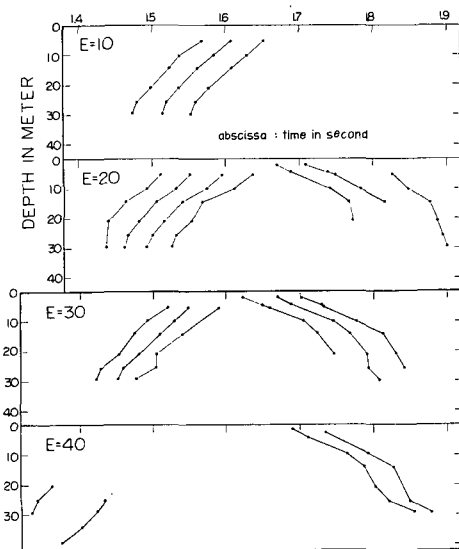
4. III* 群

III 群の前に、特に地中で優勢な波が観測された。地表では vertical 成分の振幅が小さくなってしまふので、H 測線の測定から位相速度を推定することは困難であるが、それはほぼ III 群の位相速度に等しいものと思われる。

各々の発破深度における III* 群の記録と、その際の地表での動きを第 15 図に示す。図を見ると特に $E=20$ m 以下の深度ではこれらの波群は一度地表で反射されている様に見える。そして、その時の地表の動きは発破深度がかわっても、すべて radial 成分が卓越しており、progressive な動きを示している。vertical 成分の観測がほとんどで radial 成分は地表だけでしか観測されていないが、地中でも同様な動きをしているものと想像される。

特に、 $E=40$ m の記録では、地表で数回反射している様に見え、回を増す毎に振幅が減少しているが、その度毎の地表のうごきは同じ形を示している。

この III* 群は位相速度が III 群とはほぼ等しいと同時に、この波の到達直後から III 群が始まることを見ても、III 群の生成に寄与する波群であると推定される。



第 16 図 III* 群の走時曲線

Fig. 16. Time-depth plots of wave group III*.

他方、地表に到達する III* 群の前に、地中においてのみ観測されている波群が見られる。これが III* 群と同じであるか否かはここでは断言できないが、 $E=20$ m の記録によれば、多分に別の波群の様であつて、境界近くを通る波群とみる方がよいのかも知れない。今回は一応、地表に達している波群のみに注目することにした。

III* 群の地中での走時を発破深度別にプロットしたのが第 16 図である。30 m より深い観測点では位相を追えない。III* 群は波形が整っていないので、きれいな走時曲線にならず、地表の影響のためか山谷が地表付近では追えなくなってしまう。しかし、 $E=30$ m では比較的きれいに描けた。 $E=40$ m の時は記録上での波形

26) 前出, 13).

は一見きれいに揃っているが、走時はばらついてしまう。

この図から見かけの速度を求めると、大ざっぱに次の3つに分けられる。

- (1) 80~90 m/s, (2) 140~200 m/s, (3) 230~300 m/s.

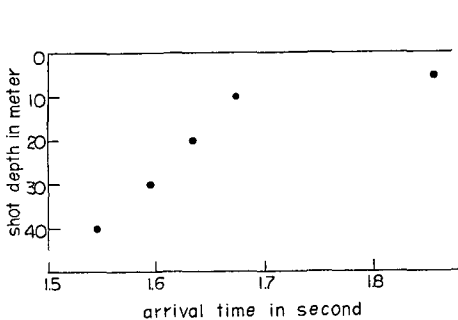
そして、(1)と(2)の間には約5 m, (2)と(3)の間には10~15 mの深度に不連続面が存在する様に見える。

上の速度を見ると各層内のS波の速度に近いが、震源からの走時を計算すると、第2表の4層目のS波の屈折波は、この波群が存在する時刻よりも大分以前に出現しなければならない。それ故、単なる屈折波ではなく、地表と4層目の間でS波の反射が繰り返えされているらしい。観測深度が40 mになるともはやこのIII*群の位相は追えなくなるが、4層目の上限の深度30 m近傍で振幅が大きくなっている。発破深度が10 mの際の地中の振幅は第18図に白丸で示されている。

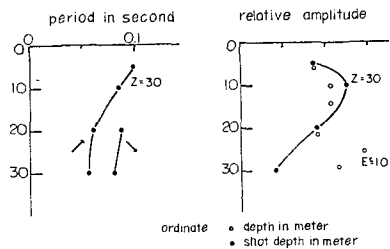
III*群が $\Delta=200$ mの地表に現われる時刻を第17図に示したが、これはradial成分の卓越する時刻をIII*群の到達と考えた。これをみると発破深度が大きくなると出現時刻が早くなることがわかる。

又、発破深度と振幅および周期の関係を、観測深度を30 mと限って調べたものが第18図である。振幅は $E=10$ mに極大値を持っている。これは下方から地表に向っていくpathであって、I群の傾向と一致している。周期の方は、地表に向う場合と戻る場合とでは、周期が異なるのでそれを矢印で表わした。発破深度が増すにつれて周期は小さくなって来る。又、下に戻る際の方が周期が大きくなっているのも全体的な特徴であり、周期に関してもI群と似ている。これと、出現時刻を考え合わせると、III*群は実体波の可能性の方が強い。

太田等²⁷⁾の報告に於いても、同様な波群が観測されている。その結果でも、振幅は観測深度20~30 mで最大であり、地表の動きも今回の結果と同じである。もし、この波群が境界を



第17図 発破深度とIII*群の地表への到達時刻
Fig. 17. Arrival time at surface of wave group III* for each shot depth.



第18図 III*群の振幅と周期 (Z=30 m)
(○: E=10 mにおける観測深度と振幅)

Fig. 18. Amplitude and period of wave group III* for each shot depth observation depth being 5 m.

(○: Amplitude of wave group III* for each observation depth, shot depth being 10 m.)

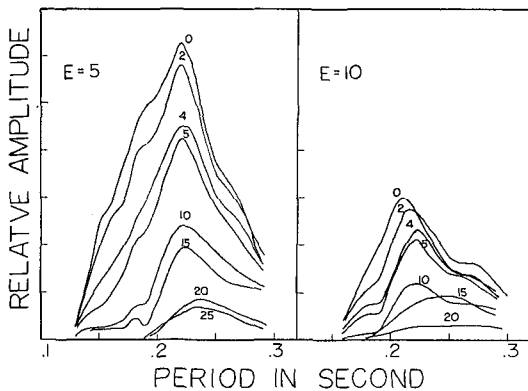
27) 前出, 13).

伝わって来るものとすれば、 $\Delta=100$ m と $\Delta=200$ m での出現時刻の差は約 1 s であるから、この波群の速度は 100 m/s である。 $\Delta=100$ m における記録は同じ観点から解析していないが、少なくとも III 群に寄与していることが想像されるので、今後、この波群をより詳しく調べることによって、III 群の生成のメカニズムも明らかにされるであろう。

今迄の実験では、地中発破と地中観測が同時に行なわれた例が少ないので、このような波群は指摘されなかった。今後の同様な実験では、この波群に注目することが望まれ、特に地中での波の性質を明らかにするための観測技術も要求される。

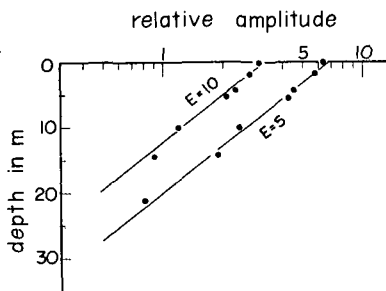
5. IV 群

IV 群は観測された波群の中では一番優勢で、かつきれいに整った波数の多い波群である。発破深度又は観測深度が 20 m になると観測されないで、表面波と考えられる。周期は約 0.15 ~ 0.22 s で分散が見られ、位相速度は約 100 m/s である。III 群と似た周期、位相速度、群速度を持つが、地表での動きは全く異なっており、IV 群は縦長のきれいな楕円であって retrograde



第 19 図 IV 群の周期特性 (数字は観測深度)

Fig. 19. Spectra of wave group IV for various observation depths. Number indicates observation depth in meter.



第 20 図 IV 群の観測深度に対する振幅

Fig. 20. Amplitude of wave group IV for each observation depth.

である。

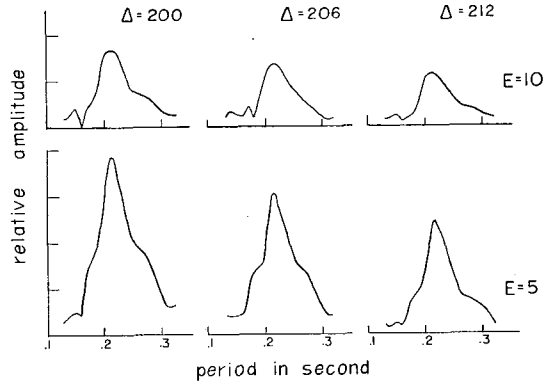
観測深度によるスペクトラムのちがいは第 19 図に示すとおりであって、III 群に較べて単純な形をしている。スペクトラムの peak に対応する周期は 0.22 s で深度の差によるちがいはほとんどないが、観測深度が増すにつれてやや大きくなっている。

第 19 図の peak の振幅と観測深度との関係を見ると第 20 図のごとくなる。この図には発破深度が 5 m と 10 m の両方が描かれている。対数目盛でほぼ直線にのるということは、地中における振幅が指数的に減衰することを示しているので、層構造の影響をあまり受けていないと考えられる。発破深度が異なってもこの直線の傾斜は変わらない。両直線の差は表面波を生成する際のエネルギーの差を示しているであろう。

又、震央距離のちがいによるスペクトラムの変化は第 21 図の様になり、形はほとんど変わらない。

この波群は波形が一番ととのっている

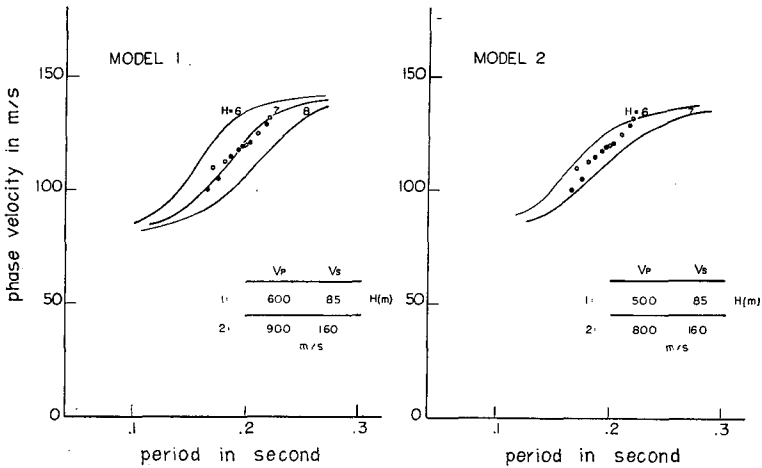
せいもあって、過去の研究においても一番つっこんだ研究がなされている。今回の結果もそれらと同じであって、 M_{11} mode の表面波と考えられる。IV 群の分散を調べてみたのが第22図である。図中の白丸はスペクトラムから求めた位相速度で、黒丸は直接読みとった位相速度である。図中の曲線は2層内の M_{11} 波の理論曲線であって、地層のモデルは図に示してあるごとく、2つ考えられている。パラメーターは表層の厚さをメートルで表わしてある。



第21図 H 測線における IV 群の周期特性

Fig. 21. Spectra of wave group IV for various distances at surface.

モデルを考える際には第2表を参照した。モデルの速度を変えると分散曲線も少し変わる。これらの図はその中の2例にすぎぬが、種々のモデルを作っても、表層の厚さは6~7mになる。第22図のモデルの表層は第6図の第1, 第2層を平均化して一層にまとめたつもりであったが、表層の厚さは第6図の不連続面の深度12mよりずっと小さくなってしまった。IV群は第6図の最表層のみに起因し、深度の構造にはほとんど影響されぬものと思われる。



第22図 IV 群の分散と理論的分散曲線

Fig. 22. Dispersion of wave group IV and theoretical dispersion curves. H indicates thickness of superficial layer.

VI. あとがき

I 群と III* 群は実体波の、II, III, IV 群は表面波の性質を持っている。表面波のうち II 群は I 群の、III 群は III* 群の影響をそれぞれ受けていて、これらの性質も含んでいる。

実体波のうちI群はP波, III*群はS波と考えられ, それぞれII群とIII群の生成に寄与している。以上をまとめると次の様になる。これには前章で考察した波群のmodeをも合わせて書いてある。

(1) I (P波) → II (leaking mode) (2) III* (S波) → III (M_{21}) (3) IV (M_{11})

上の矢印は与える影響を示しており, 左側は実体波, 右側は表面波である。

この研究に多くの実験資料を利用させていただいたことに対し, 地震探鉱実験グループの各位及び石油資源開発 K. K. の実験担当者と花田氏に感謝する。この研究は田治米鏡二教授の指導で行なわれ, 岡田広博士から多くの助言を得た。

9. Seismic Waves by Small Explosions Carried Out at the Vicinity of Takada City, in Niigata Prefecture

By Toshiro KOYANAGI

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

We had two spans: one was named H-span in which geophones were disposed horizontally and other was V-span in which geophones were disposed vertically. Vertical component was mainly observed by each geophone. Three components were observed at one point on earth where was taken as the base point in the present experiment.

Shot depths were changed from 5 m to 40 m, but observation depths from the surface to 40 m.

Five types of wave groups were observed. They are characterized by different periods, phase velocities and particle orbits, and are designated respectively wave groups I, II, III*, III and IV in the order of their arrivals.

Wave groups I, II, III and IV had been often observed in the previous experiments, but wave group III* is a new one.

Wave groups I and III* seem to have natures as that of bodily waves. On the other hand, wave groups II, III and IV may be corresponded to various kinds of surface waves.

Wave group I must be refracted P wave. Wave group II has the same velocity as the velocity of wave group I, but the other properties are different from each other. Amplitudes of wave group II are rapidly diminished with increase of depth. This may be similar to a property of surface waves. Therefore this wave group will be considered a "leaking mode", being generated from wave group I.

Wave group III* has a property of refracted S wave on one hand, but its appearance time is considerably larger than that expected for a simple refracted wave. Multiple reflections of S wave would occur in the superficial layer overlying the half space in the present experiment.

Wave group III is to be surface waves M_{21} which were effected by wave group III*.

Wave group IV has the most predominant amplitude and regular wave form among all wave groups and it showed characteristics of surface waves M_{11} .