

# 軟弱地層を伝わる爆破地震動

久保寺 章・太田 裕\*

## EXPLOSIVE SEISMIC WAVES IN THE FIELD COVERED WITH ALLUVIUM

*Akira KUBOTERA & Yutaka OHTA*

### Synopsis

The problem related to seismic waves generated by small dynamite charged explosions in the field covered with alluvial deposits has been investigated based upon the experiments carried out by the Exploration Group of Japan in 1956 and 1965.

There are four different types of wave groups: namely, wave groups of I, II, III, and IV.

The comparative investigations on the wave groups III and IV were made both theoretically and experimentally by several authors and it is concluded that they are dispersive Rayleigh waves ( $M_{21}$ ,  $M_{11}$ ) guided in the layered media. Consequently, in the present paper, characteristics of the wave groups I and II have been mainly treated.

The wave group I is concluded to be composed of various kinds of converted waves generated from the interfaces under the surface. While, in the wave group II, three different kinds of waves are found; a kind of surface waves having the longest wave length among the wave groups, a wavelet of direct P-wave and refracted SV-waves. Among these three kinds of waves, the main part of the wave group II having a surface wave type is more interesting.

From the investigation of the main part of the wave group II it is concluded that the characteristics of this type of waves are just equivalent to those of the normal mode waves in the liquid-liquid layers.

On the other hand, the Poisson's ratios of our experimental field are almost 0.5 and observed seismic records from the explosions can be divided into two, that is, P- and S-zone before and after the train of refracted S-waves.

The computations of the amplitudes of the converted SV-waves derived from the incident P-waves show that in the P-zone the converted SV-waves have a negligible small amplitude compared with the P-waves when the Poisson's ratio of the medium is almost 0.5. Thus in the P-zone it resembles closely to the liquid state.

The surface waves in the P-zone (wave group II) can be considered as the normal mode waves in the liquid-liquid layers. In the S-zone both P- and S-waves are coexisting. Then the surface waves in this zone (wave groups III and IV) belong to the usual elastic waves in solid. In short, the media similar to our experimental fields as composed of thick alluvial layers behave as liquid in the P-zone and as solid in the

\*東大地震研究所

S-zone in connection with the phenomena of the propagation of the seismic waves.

## 1. 序

小規模の火薬を爆発させたときに発生する地震波群の観測・研究は、1953年以降、引続いて、地震探鉱実験グループ\*のメンバーによって実施されている。この種の実験は、主として、秋田・山形・新潟県の石油産出地域で行なわれている。これは、石油開発公団（前の石油資源開発株式会社）との共同実験として行なわれた関係上、実験場として、油田地域が選ばれたわけである。実験場は、毎年変っているが、その大部分は水田地帯であって、粘土・砂等の軟弱な地層である。従って、この様な地層を伝わる地震波群は、通常自然地震の観測から得られる地震波と同一のものも当然含まれるが、又、この様な地層で発生する特殊な波群も観測される。本論は、筆者等が分担した課題のうちで、特に、軟弱な地層に固有の地震波について考察を行なったことについて述べる。

小規模の火薬を爆発させたときに発生する波群の研究は、地震探鉱実験グループのメンバーによって主として為されており<sup>1)2)3)4)5)6)</sup>、発生する波群は、I, II, III, IV, の4つの波群に大別されている。このうちI群は、実体波に属する波群であって、II, III, IV群は表面波の特性を持つ波群であるとされている。III・IV群については、これが成層構造で導波された、分散性 Rayleigh 波であることが、実験記録の解析結果が示しており、又、理論的な計算結果の裏付けもすでに多くの研究者によって為されていて、見解の一致を見ている。しかし、表面波の特性を持つII群については、種々の考えが出されていた。すなわち、分散性 Rayleigh 波の高次のものである ( $M_2$ -波) とするもの、或いは、表面波ではなく、Convert したS-波による一種の波群とする<sup>4)</sup>。むしろ、実体波的な波と見做す考え方、更には Leaking mode の1種であるとするもの<sup>5)</sup>等がある。分散性 Rayleigh 波の高次のものとする考え方は、田治米<sup>6)</sup>は1/4波長則から又、久保寺<sup>7)</sup>は鉛直方向の振巾分布から見た振動モードから結論した。II群については種々の解釈が為されて来たが、未だ一致した見解は得られていない。

一方最近の地震探鉱実験グループの協同実験では、実験場の地下物性の情報として、P-波の伝播速度のみならず、SH-波の観測を独立に行なうことにより、S-波の伝播速度も同時に得られるようになって来た<sup>7)8)9)</sup>。SH-波の伝播速度が知られてみると、われわれが行なって来た実験場では、SH-波の伝播速度は、P-波のそれに比べて非常におそく、媒質の Poisson 比は、0.5に非常に近い値をとることがわかって来た。III・IV群の波動特性は、P-波、SH-波の伝播速度を用いて数値計算をした分散性 Rayleigh-波の結論とよい一致を示している。

ここで、佐藤<sup>10)</sup>が提出した、表面波の分類方法に従って、II・III・IV群を見てみることにする。佐藤の分類方式と云うのは、水平2層構造のときを例にとれば、波の変位振巾にかかる係数は

上の層で

$$A \exp(r'z) + B \exp(-r'z) + C \exp(s'z) + D \exp(-s'z)$$

下の層で

$$E \exp(-rz) + F \exp(-sz)$$

とかける。

この式で、 $z$ は鉛直下方にとり、 $A, B, C, D, E, F$ は常数であって、 $r, r', s, s'$ はそれぞれ、

$$r' = \sqrt{1 - (C/v_p')^2} \cdot 2\pi z/L$$

$$s' = \sqrt{1 - (C/v_s')^2} \cdot 2\pi z/L$$

$$r = \sqrt{1 - (C/v_p)^2} \cdot 2\pi z/L$$

$$s = \sqrt{1 - (C/v_s)^2} \cdot 2\pi z/L$$

ここで、 $v_p', v_s'$ は上の層のP-波、S-波の伝播速度、 $v_p, v_s$ は下の層の伝播速度、 $C$ は、表面波の位相

\* 総合研究による研究班の名称であって、代表者は、佐々憲三から飯田淑事に引きつがれている。

速度を示している。

佐藤は、 $r, s, r', s'$  が実数のとき、“E” とかき、虚数のとき“S” とかき、層の境界を“-” で表現した。

2層構造で可能な分散性 Rayleigh波の形は、

$$\begin{bmatrix} EE \\ EE \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} ES \\ EE \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} SS \\ EE \end{bmatrix}$$

である。

一方、II, III, IV群の位相速度と媒質のP波S波の伝播速度との間には

$$v_p > C_I \geq v_p' \gg v_s > C_{II} > C_{IV} \geq v_s'$$

の関係が大部分の実験現場で成り立っている<sup>11)</sup>。

この場合、大部分の実験現場が近似的に2層構造と見做し得るので、2層構造について考えた。

III・IV群は $\begin{bmatrix} EE \\ EE \end{bmatrix}$ 又は $\begin{bmatrix} ES \\ EE \end{bmatrix}$ の何れかになるので分散性 Rayleigh 波の条件を充しているが、II群は、 $\begin{bmatrix} SS \\ ES \end{bmatrix}$ の形をとり、分散性 Rayleigh 波の形をとらない。更に、この $\begin{bmatrix} SS \\ ES \end{bmatrix}$ の形は、弾性体で生成される表面波の形も充していないことになる。従って、II群が分散性 Rayleigh 波であるとの考え方は、誤であることがわかる。むしろ、左半分 $\begin{bmatrix} S \\ E \end{bmatrix}$ を考えると、これは、流体-流体層中での表面波の形をとっている。先に述べた如く、われわれの実験現場の媒質は Poisson 比が0.5に非常に近いもので、通常の弾性体と見做している物質よりも、むしろ流体に近い性質を持っている故に、液体-液体層中で成生される表面波に類似のものが、II群であるとも考えられる。又、 $\begin{bmatrix} SS \\ ES \end{bmatrix}$ の形は Leaking mode の1種である。故にII群が Leaking mode であるとする考えも成り立つ。

他方、単純な火薬の爆発震源からもSV-波が発生し、記録の中には屈折SV-波が観測されることが、畠山によって指摘され<sup>12)</sup>、この屈折SV-波は、丁度II群の出現する時間帯に含まれている。以上の様な事柄から、II群を見直す必要が生じた。波群の特性を知る実験方法として、II群の分離よくするために、従来迄実施されていた、測線長が、高々 200 m 程度のを 1000 m 迄延長して実験をする方式を選んだ。本論では、この実験結果から得られた事柄を中心にして、II群の性質を考察し、その成因を考えてみることにする。

## 2. 爆破地震動生成の実験とこれによって得られた波群の特性

火薬の爆発によって生成する地震波群の特性を調べる実験を、地震探鉱実験グループの協同実験の1つと

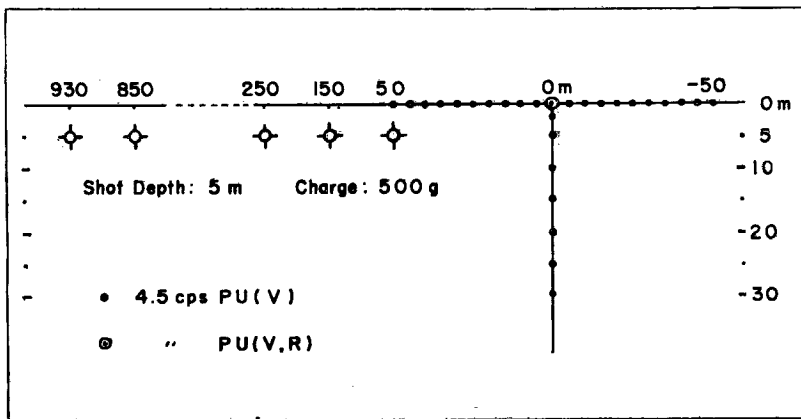


Fig. 1 Spreads of the seismometers and shooting points.

して実施した。この実験を行った場所は、新潟県白根市近郊の水田で、1965年夏、石油開発公団との共同作業で行なった<sup>19)</sup>。

実験に使用した計測器は、通常の屈折用地震探鉱器であって、北海道大学及び秋田大学のE・T・L探鉱器が用いられた。地震計は、固有週期 4.5c/s の上下動と水平動である。地震計の配置図は、Fig. 1に示す様な、水平展開と垂直展開とを組合わせたものであって、水平展開は、5 m おきに地震計を測線上に配列し、又、垂直展開は、0 m, 2 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m の深さのボーリング孔を作り、その底部に夫々地震計(上下動)を設置した。設置地点は、測線の中央部に集め、又、中央部の地上には、水平動の測線方向の記録を得るために、固有週期 4.5 c/s の水平動の地震計を置いた。

爆破点は、深度 5 m で、夫々 50 m, 150 m, 250 m, 350 m, 450 m, 550 m, 650 m, 750 m, 850 m, 930 m, の距離に作り、爆破震源は常に 500 gr のダイナマイトを用いた。この方式は、爆破点移動方式であるが、後の地下構造 (Fig. 2) よりわかる様に、地下構造は、水平構造をしているので、結果的には測線

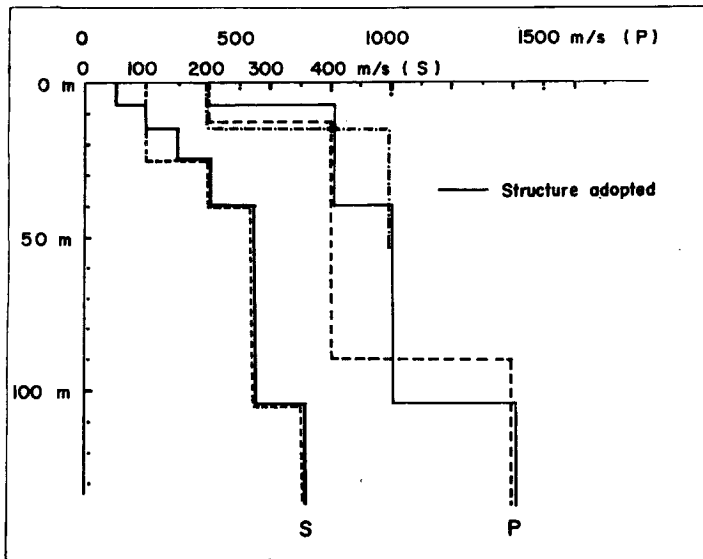


Fig. 2 Seismic profiles of P and S waves at 1965's experimental site.

を 1000 m 近く迄延長したことになり、従来迄の実験で行なわれていた、測線長が 200 m 位のものと比べて、やや長いスパンになったわけである。地下構造は、別にこの実験場で行なわれた、P-屈折及びSH-屈折による実験結果から求めたものを Fig. 2 に示してある。Fig. 2 からわかる様に、P-波の伝播速度に比べて、S-波のそれは非常に小さく、Poisson 比にすれば、0.5に非常に近い値をとることになる。従って、この実験場は、軟弱な地層と云うことが出来る。地下構造は、100 m 以深迄求められているが、波群のうちで、表面波的なものが関係して来る層は、20 m 以浅である。

得られた波群は各トレースの山谷の走時を読みとって作った走時図から、従来通り、I, II, III, IVの4つの波群に分離することができる。今回は特に波群の様子をわかり易くするために、Fig. 3, Fig. 4, に示す様な図形を画いてみた。これは、各トレースを、整流波形に直し、震源から距離の順に並べたものであって、図では、代表的に 100 m 毎のトレースを選び出して画いてある。Fig. 3 は上下動成分、Fig. 4 は水平動成分の測線の方向のものである。これ等の図を一見して、位相速度・振幅及び週期が各波群毎に変っていることがわかる。位相速度・振幅・週期等が急に変わる線を Fig. 3 に引き夫々 A, B, C, D 線と名付け

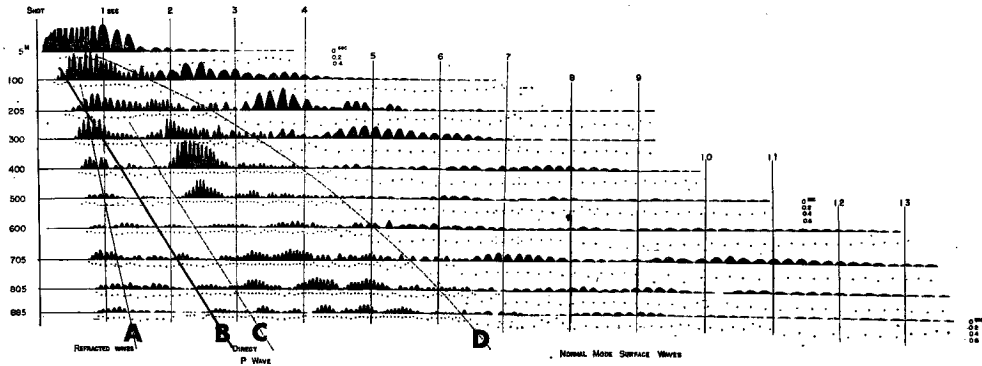


Fig. 3 Rectified wave forms of the vertical component.

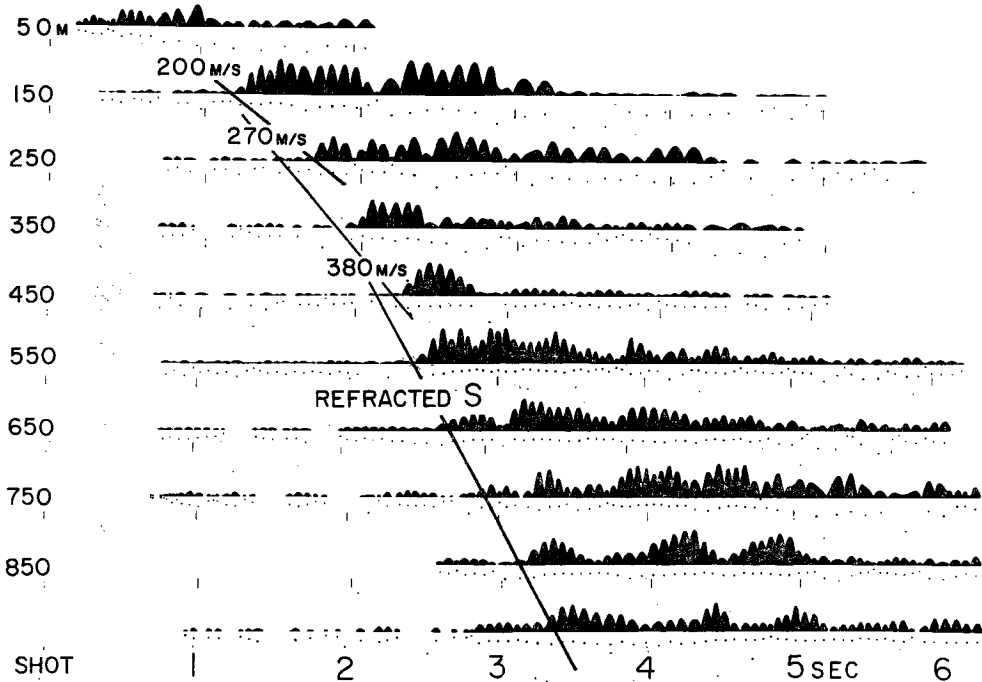


Fig. 4 Rectified wave forms of the horizontal component.

ることとする。

先づD線を境にして、振巾・週期は夫々大振巾・長週期へと急変している。D線より前の波群が、I、II群であり、D線以降の波群がIII、IV群である。一方地震探鉱の反射法では、D線以前を Signal zone、D線以降を Noise zone と呼んでいる。このことは、反射法の記録でも明らかに2つの zone に分離出来ることを示している。畠山<sup>12)</sup>は、火薬爆発の震源から直接出たSV-波が、屈折波として signal zone と noise zone の境界に出ることを示している。このことは、signal zone では震源から直接出た波はP-波だけであり noise zone に至って初めて、震源を出たSV-波が出現することを意味している。

従って、われわれは、SV-屈折波を境にしてそれ以前を P-zone、以降を S-zone と名付けることにす

る。P-zone に於いては、震源を出たSV-波は含まれていないが、層の境界等で、P-波から Convert したSV-波が生成される筈である。

しかし、この種の波は、あとの議論からわかる様に、Poisson 比が0.5に近い様な軟弱な地層では、振巾は非常に小さくて、観測上はP-波の振巾に比して無視出来る。従って、P-zone では、P-波だけが存在しS-zone に於いて始めて、P, Sの両方の波が存在することになる。P-zone, S-zone と名付けたのは、この理由からである。

D線以前の、A, B, C については、A線が、I群とII群との境界になる。I群は従来からわかっている様に、P-波を含む実体波群である。A線とD線との間を従来迄II群と称していた。これは、Fig. 3 に於いても震源距離が200mより近い所では、A線とD線との間に幾つかの波群があることがわからなかったが、震源距離が200m以遠になると、A, D線の間には2~3の波群があることが明瞭となる。それが、B, C線で区別される。B線の位置では、1つの波群が或る位相速度で伝播していることがわかる。この波群の位相速度は、直接P-波の伝播速度と一致していて、震源から出た直接P-波が出ていることになる。

A線とB線の間には、位相速度の大きいII群の中では週期の最も長い波群が見出せる。この波群が、従来迄の200m程度の測線ではII群の主成分を為して、これが表面波的特性を持っているとされていた。本論では、この波群の成因を考えてみる。

次に、C線の所で、振巾が急増する波群が見られる。この波群は、屈折SV-波に相当するものであって、このことは、Fig. 4の水平成分を集めた図からよくわかる。Fig. 4では、顕著な波群は、C線以降に見られ、C線以前には、上下成分を集めたFig. 3に見られる如き波群は見出せない。Fig. 4に於いて、顕著な波群の始まりの位置を結んで、線を引いてみると、折れまがった線が求まり、その伝播速度は、Fig. 2の地下構造に対応するS-波の伝播速度に一致する。従って、これは、signal zone と noise zone の境界に出現する震源から出たSV-波の屈折波に外ならない。水平動成分で、屈折SV-波以降が顕著な波群の出る領域となることも、これ以降にS-波が卓越していることを意味している。Fig. 4では、P-zone では、顕著な波群はなく、S-zone に於いて顕著な波群が見出される。

測線の長さを1000m迄延長したことによって、従来II群と総称されていた波群の中には、この波群の主力をなす。比較的大きな位相速度を持つ、われわれが、火薬の爆発で観測される波群の中では最も長波長の波と直接P-波、及び屈折S-波が少くとも含まれていることがわかった。

### 3. III・IV群の特性

Fig. 3のD線以降は、III・IV波群であるが、この波群が、成層構造で導波された分散性のRayleigh波であって、III群が $M_{21}$ 、IV群が $M_{11}$ に相当するとの従来迄の結論と今回も全く同じ結果が得られている。本論では、Fig. 2に得られた、地層構造と、各層のP, S-波の伝播速度を与えてやって、 $M_{11}$ 及び $M_{21}$ の位相速度、群速度及び各波の波長(週期)に対する振巾の相対的な大きさを理論的に計算から求めた。その結果はFig. 5に図示してある。一方観測から得られたIII, IV波群の位相速度と波長をFig. 5にプロットしておいた。このFig. 5においては、観測から得られるIII, IV波群の位相速度は、夫々1点ずつであるが、これは、軟弱地層に特有な現象であってプロットされた位相速度を示す波長の場所が夫々振巾の極大の位置に相当している。この様に極大振巾を示す波長の波だけが、記録上は卓越して現はれ、通常地震波の表面波の如き分散性は記録の上では明瞭でない場合が多い。この様に記録から読みとれるのは、卓越週期とその近傍だけであるが、理論曲線との一致はよい。

分散性Rayleigh波の鉛直方向の振巾分布は、この実験記録からも画くことができるが、次節に別の実験場での詳しい記録があるので省略することにする。次節Fig. 7には、分散性Rayleigh波の振巾の鉛直分布がよくわかる記録が出ていて、この後半の長週期の波がこれに相当していて、振巾は地表を離れるに従って急激に減少して行くことがよくわかる。

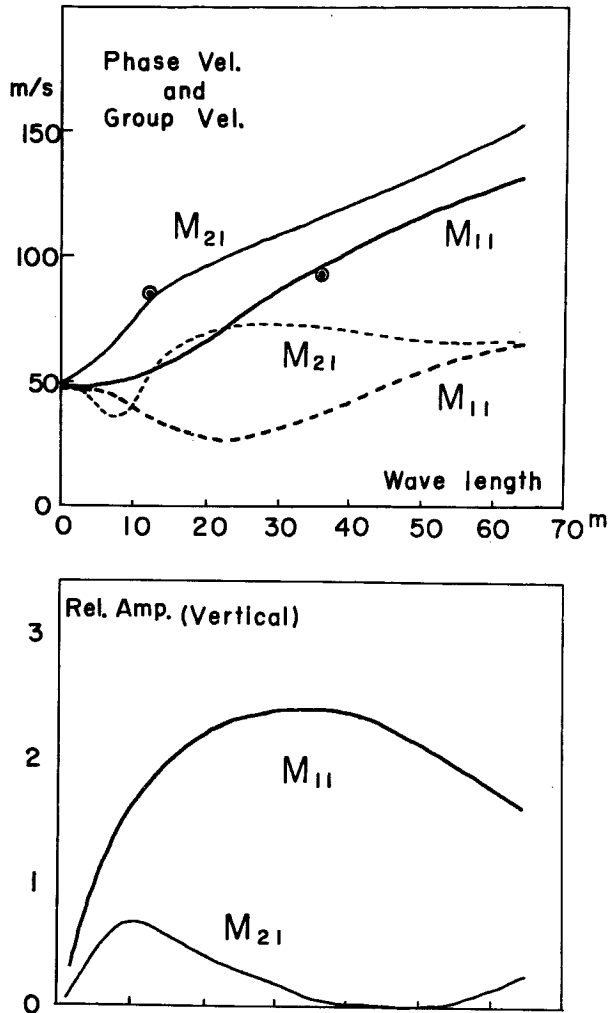


Fig. 5 Theoretical dispersion curves and amplitude-period relations: their comparison to the observation.

#### 4. II群の波動特性

II群と総称されている波群は前述の如く、表面波動的な波群、直接P-波、屈折SV-波から構成されているが、ここで、特にII群の中でI群と直接P-波との間に出現する比較的長週期・大振幅の波群に着目してみる。この波群は、地震探鉱実験グループが実施した多くの観測現場で何時も出現していて、或る位相速度を持って伝播している。位相速度は大きく、従って、観測される波群の中では最も長波長のものである。波長は、III、IV群と比べて5~10倍の長さになっている。II群の位相速度とP、S-波の伝播速度との間には、II群が関係を持つ層を近似的に2層構造を考えてやると次の関係が、多くの実験現場で得られている。

$$v_p > C_1 \geq v_p' \gg v_s, v_s'$$

一方垂直展開の記録から、鉛直方向の振幅分布を求めてやると、このII群が表面波動的な特性を持っている

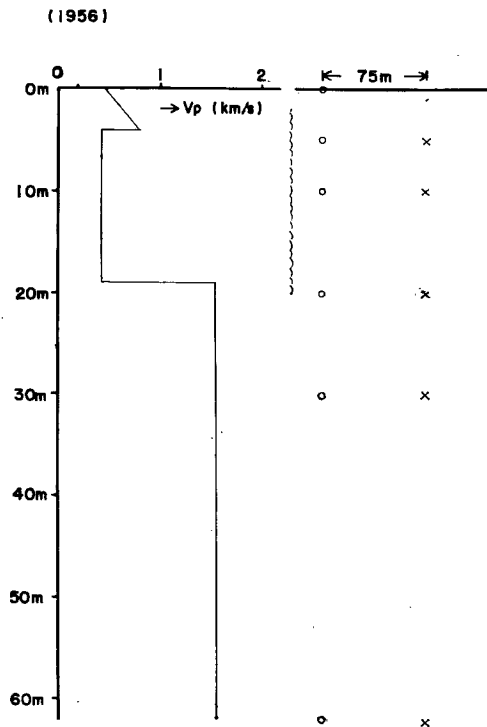


Fig. 6 Spread of the seismometers and shooting points, and seismic profiles of P- and S-waves at 1956's experimental site.

ことがわかる。その1例として、1956年酒田市で行った実験<sup>14)</sup>をとり上げよう。この実験では、垂直展開に用いた、振子の数も多く又、記録も数多くとった。Fig. 6には、このときの地震計の展開及び爆発点の配置の一部と、地下構造を示してある。

この実験で得られたII群の様子は、Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9に示してある。Fig. 7には、波群全体の記録が観測点の深度順(0m, 5m, 10m, 20m, 30m, 60m)に並べてある。前半の比較的短週期の波が問題のII群の主成分であり、後半の長週期の波が前節で述べた分散性のRayleigh波である。両方の波群は共に、観測点深度が大きくなるに従って振幅は減少して行く、表面波的な特性がよくわかる。次にFig. 8では、種々の爆破深度(S.D)のものを全部集め、観測点の深度の順に並べてある。II群と呼ばれる波群は、S.D. 20m以浅の場合に出現しているが、S.D. 30m及び60mでは明瞭ではない。(この実験では、各爆発時の薬量及び地震計の感度を一定にしてある)。

地下構造(Fig. 6)を見ると、深度19mで不連続面があって、爆破点がこの不連続面以下では、II群があらわれ難いことがよくわかる。又、観測点の深度別に振幅を比較すると振幅は、深度と共に減少して行くことがわかる。Fig. 9では、観測点深度が変わるに従って位相が逆転することがよくわかる様に図示した。すなわち深度10m附近で位相の逆転が見られる。これ等のことを総合すると、振幅は深さと共に減少し、上層の中間で位相の反転がある様な、表面波的なモードを持っている。

Fig. 10は、II群の振幅と観測点深度の関係を図示してあり、層の中でこのようなモードを持つことを示している。

結局、II群は、位相速度が、上層と下層のP-波の伝播速度の中間の値をとり、地表にloopを持ち層の



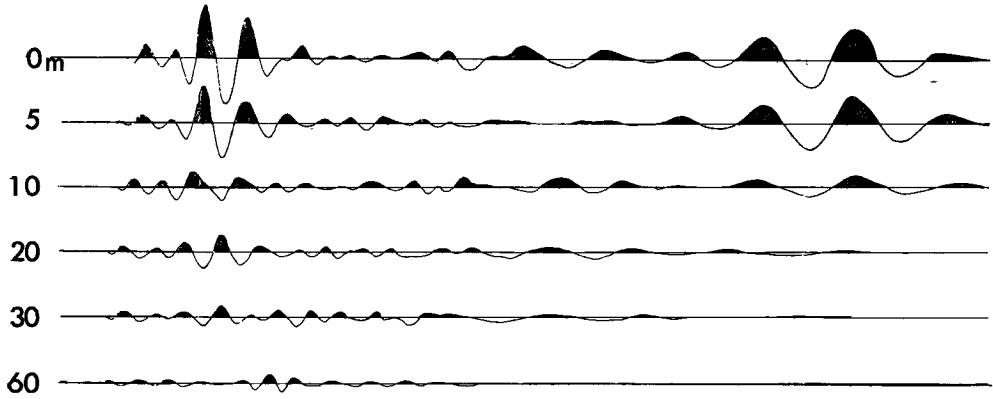


Fig. 7 Seismic record of 1956's experiment at various depth.

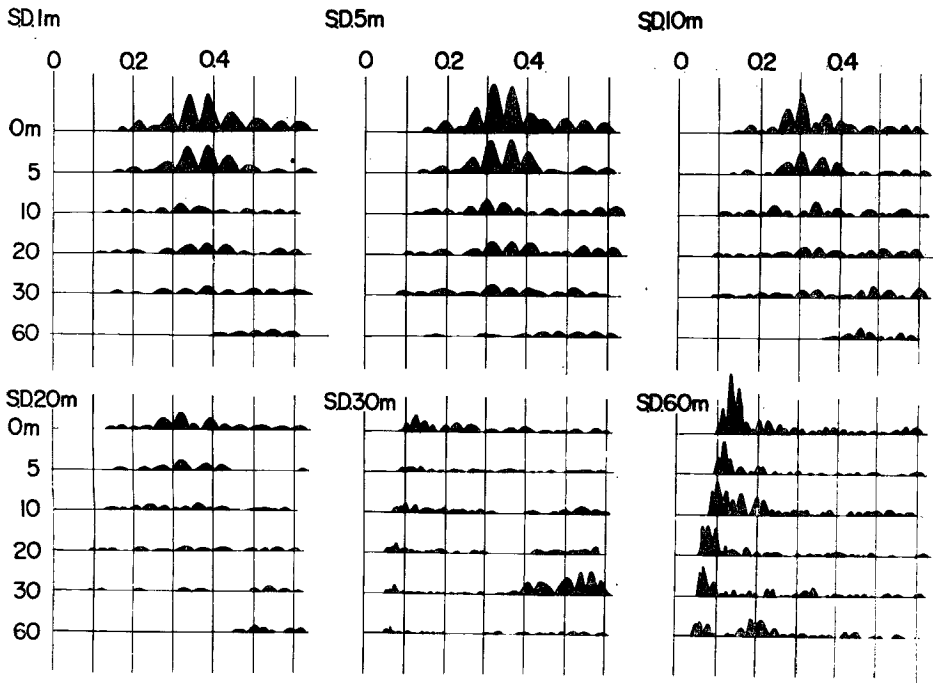


Fig. 8 Seismic records (rectified wave forms) of the wave group II in the case of various shot depth at 1956's experiment.

中に1つの node を持つて、振幅が深さと共に exponential に減少して行く様な表面波の特徴を持つと共に、Fig. 3 Fig. 4 に見られる様に、上下成分が卓越し、水平成分が殆んど見られない波動である。

この様な特性を持つ波動は、液体-液体層で発生する normal mode 波 (P-P mode) の性質と非常によく似ている。更にわれわれが観測を行った場所の Poisson 比が0.5に近い値をとって、液体に近い性質を持つこと等から考えて、II群は、P-P mode 類似の波すなわち佐藤の notation<sup>10)</sup>では  $\left[\frac{S}{E}\right]$  の波であろうと推定される。

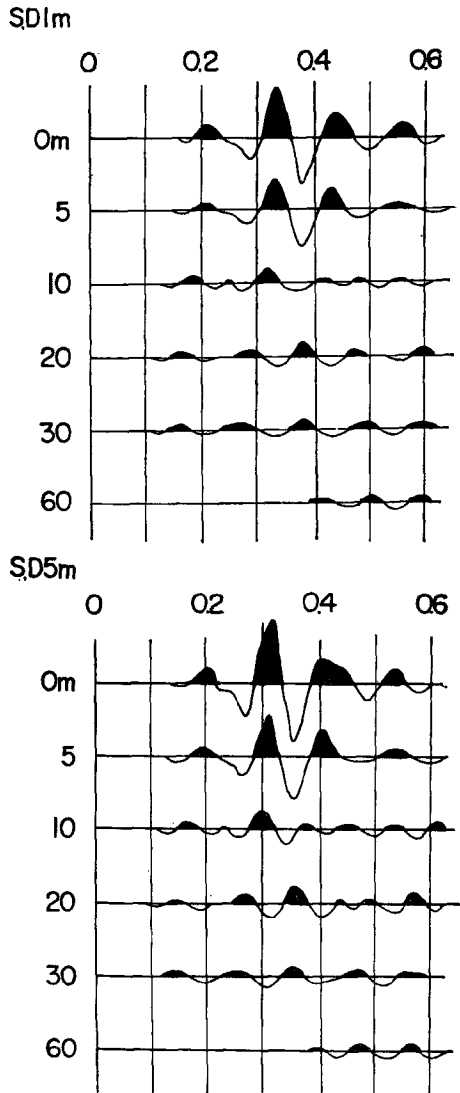


Fig. 9 Seismic records of the wave group II at 1956's experiment.

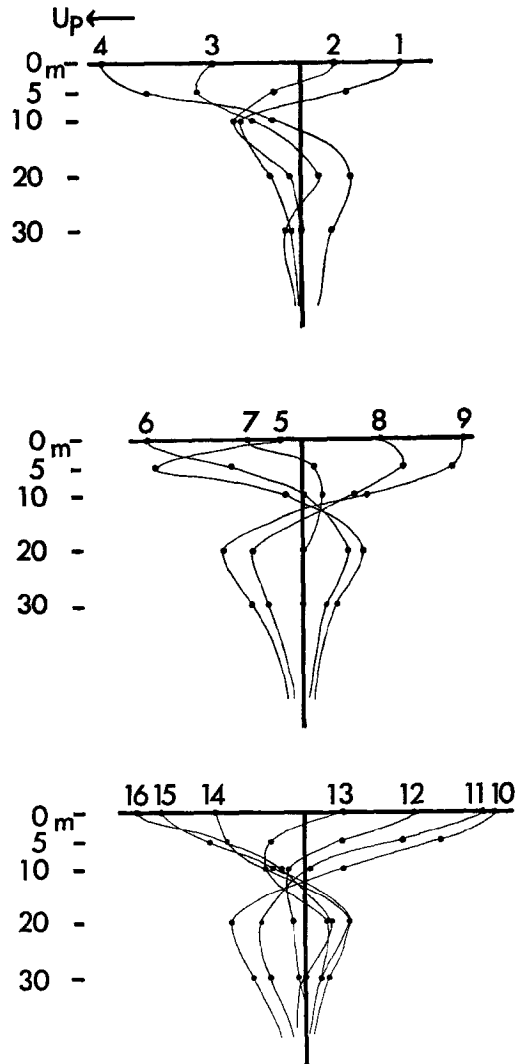


Fig. 10 Amplitude distributions of the wave group II with depth.

P-P mode の位相・群一速度及び層内での振巾の分布の様子は、各層でのP-波の伝播速度を与えることにより、Fig. 11 の如く計算することが出来る。ここでは、実際に現はれるP-波の速度に近い値を選んで次の2つの場合の計算を行った。

$$\begin{array}{ll} V_{P'} & 500\text{m/s} & 500\text{m/s} \\ V_P & 750\text{m/s} & 1500\text{m/s} \end{array}$$

計算結果を見ると、われわれの観測したII群の特性と一致していることがよくわかる。

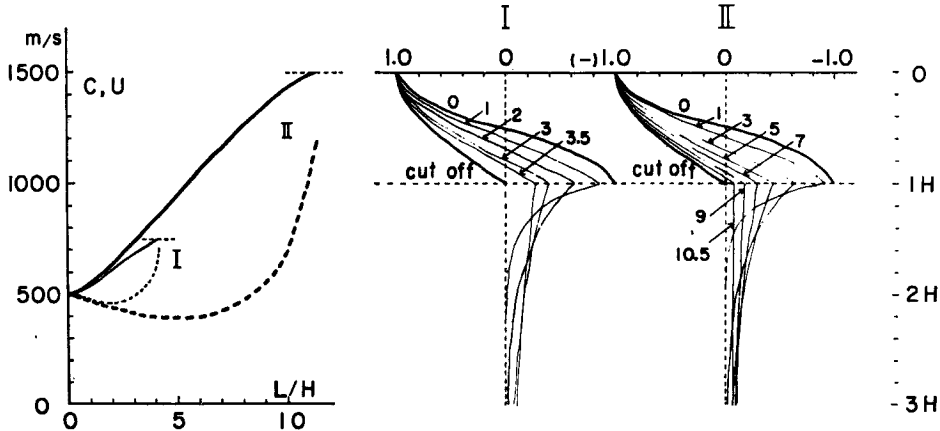


Fig. 11 Theoretical dispersion curves and amplitude distributions with depth in the case of the normal mode wave in the liquid-liquid layers.

### 5. II群を液体—液体層中で生成する normal mode (P-P mode)と見做す理由

II群を液体—液体層中で生成する normal mode (P-P mode) と見做すためには、波の生成する媒質が液体でなくてはならない。すなわち、S-波は存在しない媒質であって欲しい。われわれが観測を行った現場のP-波及びS-波の伝播速度からは、P-波に比べてS-波のそれは非常に小さいので、S-波を無視することも近似的には可能である。しかし、優勢な波群でその源をS-波に求めねばならないIII・IV群(分散性 Rayleigh 波)が観測されている。従って、一方では媒質を液体と考え、他方では弾性体と考える一見矛盾した考え方を成立させなければならない。しかし、P-zone, S-zone の考え方を持ち出し、P-zone では convert したSV-波の振巾が非常に小さくエネルギー的にはP-波に比べて無視し得る様な状態であればP-zone ではP-波が主体をなすために、P-P mode が現はれ、一方、S-zone では、P-波、S-波が共に存在するため、通常の弾性体に於ける波動が出現すると考えられる。

そこで、境界面等で入射P-波がどのような割合でSV-波に convert するかについての計算を試みた。計算を実施するに当り、各層のP-或いはS-波の伝播速度やその比等が、実際に観測された値に近いものを選んだ。境界をはさんだ両層のP-波の速度比を1:3として、(S-波についても同じ)、下層のP-波の伝播速度を1500m/sとしてS-波の伝播速度については、Poisson 比が種々に変わる様に幾つかの場合を選んだ。Case 1 はほぼ  $\lambda = \mu$  の条件に近く ( $\sigma = 0.2188$ ) 又 Case 5 は、Poisson 比が、0.5に近い値 ( $\sigma = 0.4987$ ) をとり、われわれの観測現場の物性に一致する様な条件である。計算結果は、P-波入射の場合が示してある。Fig. 12 は下層からP-波が入射したときに、反射・屈折P-或いはSV-波の振巾を、入射P-波の振巾を単位にとって画いてある。上層からP-或いはS-波が入射した場合、或いは境界が地表面の場合も Fig. 12 と似た様な図が得られる。実線はP-波、点線はS-波の振巾である。これ等の図を見て、P-波入射の場合、Case 1 のときは、convert したSV-波は相当量のエネルギーがあるが、Case 5 になると、convert したSV-波は非常に小さな振巾であって、エネルギー的にはP-波に比べると無視し得る量である。S-波入射の場合にも同様なことが云える。

今日迄、反射・屈折の計算は多数行はれているが、大部分  $\lambda = \mu$  かこれに近い条件の場合の計算例であって、Case 5 或いは Case 4 の如く poisson 比が0.5に非常に近接した条件での計算例はなかった。この様な計算をしてみて、poisson 比が0.5にごく近いあたりの、弾性体では、P-波、S-波が、夫々独立に伝播して、互に、convert する量が非常に少いことがわかった。従って、この様な媒質では、震源を出たSV-波が到達する迄の時間帯では、媒質の中を伝はる弾性波はP-波だけであって、波動の伝播に関しては、液

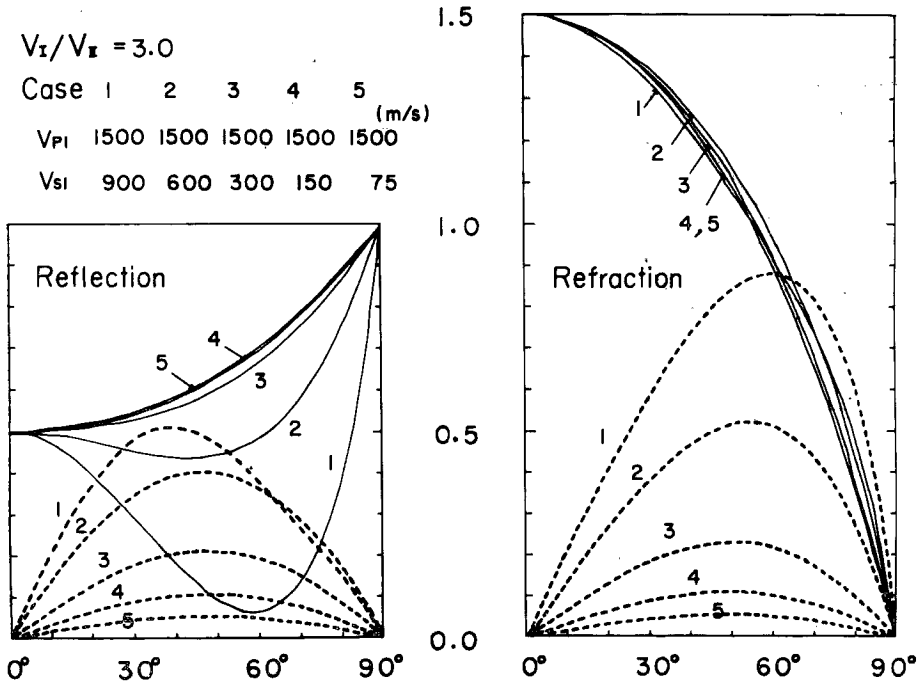


Fig. 12 Reflection and refraction coefficients at the boundary surface in the case of incident P waves.

体と同等の取扱いができるわけである。Poisson 比が 0.5 に近い媒質である軟弱層では、このような地震波の伝播に関して特徴的な性質のあることが見出された。

### 6. 結 語

粘土・砂等で構成されている、いわゆる軟弱地層での火薬の爆発で発生する地震波群の実験を基にして、地震波の軟弱層での挙動を研究した。その結果

(1) 火薬爆発で発生する地震波群は、I, II, III, IV の 4 つの波群に大別されているがそのうち特に II 群を構成している波群には、表面波的特性を持つ、観測される波群の中で最も長い波長の波 (この波が II 群の主要素である) 直接 P-波及び屈折 SV-波で少くとも構成されている。

(2) II 群の主要素である表面波的特性は液体-液体層中で発生する Normal mode 波 (P-P mode) に類似の性質を持ち、媒質を伝はる波が P-波だけと仮定した場合の mode 波の計算結果ともよき一致を示している。

(3) 実験を実施した場所、すなわち、軟弱地層では、媒質の Poisson 比は 0.5 に近い値をとり、ここで観測される波群は屈折 SV-波を境にして、P-zone と S-zone に大別されて、P-波、S-波は夫々独立に伝はることが Converted wave の計算結果からわかった。この計算結果では P から S、S から P に変換する割合が非常に小さいことが求めた。従って、P-zone では、弾性波は P-波のみとなり、P-zone で生成される表面波は、P-P mode であると結論された。

(4) Poisson 比が、0.5 に近い弾性体では、生成される短波長の表面波は弾性体のそれであり (III・IV 群  $M_{21}$ ,  $M_{11}$ -波) 長波長の表面波 (II 群 P-P mode) は液体中の表面波と同じものが出て来る。従って、この様な媒質、すなわち、軟弱な地層は、爆破地震動の伝播に際して、弾性体、液体の 2 つの面を持つこと

がわかる。

(5) 現在のわれわれの知識では、特殊な工夫をほどこさない、単純な火薬の爆発を軟弱地層の中でやった場合には、P-波だけでなく、SV-波SH-波も、ともに震源で発生することがわかっており、それに関連を持つ表面波は夫々 P-P mode,  $M_{21}$ ,  $M_{11}$ -波, Love 波であり、これ等の波が、実際に観測されることがわかった。

この研究を実施するに当り、地震探鉱実験グループの各位及び石油開発公団の御協力を戴いたことを厚く感謝致します。又記録の読みとり等の労を成瀬富紀子さんにわずらわした。又、この研究には、文部省科学研究費の一部を使用した。あわせて感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) A. Kubotera: Stoneley-waves generated by explosions. J. Phys. Earth, 3 1955  
A. Kubotera: Rayleigh and Sezawa waves generated by explosions. J. Phys. Earth, 5 1957  
久保寺章：地層構造と表面波群，防災研年報 5 A, 1962.  
A. Kubotera & Y. Ohta: On seismic waves generated by small explosions. Special Cont. Geophy. Inst. Kyoto Univ. No.6, 1966
- 2) K. Tazime: Wave groups generated by a very small explosion. J. Phys. Earth, 4 1956  
K. Tazime: Relations between charge amounts and periods in resulting seismic wave groups. J. Phys. Earth, 5 1957
- 3) H. Sima: On the surface waves generated by small explosions. Part I, Part II. Geophys. Mag. 31 1963
- 4) H. Okada: Analyses of seismic waves generated by small explosions—Experiment at Wakinomachi, Niigata Prefecture. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser VII 2. 1963  
H. Okada: Analyses of seismic waves generated by small explosions—Experiment at Ima-machi, Niigata Prefecture. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser VII 2. 1965
- 5) 飯田没事・太田裕・成瀬聖慈：火薬爆発に伴う表面波。地震 2輯, 19, 1966.
- 6) 小柳敏郎：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。北大，地球物理報告，15号 1966
- 7) 小林直太：SH波をつかって地下構造をきめる一方法，地震 2輯, 12, 1959.
- 8) 田治米鏡二・岡田広：地表附近のS波速度の測定。物理探鉱 11, 1958.
- 9) 小柳敏郎：SH-波実験資料の整理。北大地物報告 12号, 1964.
- 10) 佐藤泰夫：表面波について。地震 2輯, 6, 1953
- 11) 久保寺章：火薬爆発によって発生する表面波群について，地震探鉱実験グループ会報 37号, 1965.
- 12) 畠山勉：地震探鉱記録におけるS屈折波。物理探鉱 19, 1966.
- 13) 地震探鉱実験グループ：地震探鉱実験グループ協同実験報告。地震探鉱実験グループ会報 39号, 1965.
- 14) 同上：同上（於酒田市1956年7月）同上 10号, 1956.