



Title	13. 新潟県見附市郊外の小発破実験場で行った屈折法による地下探査
Author(s)	田治米, 鏡二; TAZIME, Kyozi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 11, 113-168
Issue Date	1964-02-15
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.11.113
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13868
Type	departmental bulletin paper
File Information	11_p113-168.pdf



13. 新潟県見附市郊外の小発破実験場で行った 屈折法による地下探査

田 治 米 鏡 二
(北海道大学理学部地球物理学教室)
— 昭和 38 年 6 月受理 —

I. 地下の階段構造を暗示する初動の波形

既にかなり多くの研究が行われているにも拘らず、屈折法の走時解析には依然として多くの困難が残されている。調査を行う度毎に、又新しい困難にぶつかると云っても過言ではない。

走時解析の際の最大の難点は、着目している phase 例えば初動が、いかなる経路を辿って来たかの判定がつけられにくいところにある。この困難を打開するためには、予め種々な地下構造を予想し、走時がどんな性質を示すかを調べておくことが大切である。

なるほど、この線に沿っても多くの努力が払われて来た。然し反面では「実際の現象は極めて複雑である故に、余り詳しく種々な地下構造を予想しておいても無駄である」と云う気運も伺われる。

私見によれば、もっと地震波に親しみ、一層の努力をすることによって、屈折法の声価を更に高めうる余地があるものと思う。服部保正の総合報告¹⁾はこの種のものとしてはかなり詳しいが、更に 2, 3 の考察を加えたい。

1. 震源が地中にある場合の初動の走時

1.1 Fig. 1(a) の E を震源とし、D を地表の受震点とすると、A 点から始まる初動の走時は Fig. 1(b)

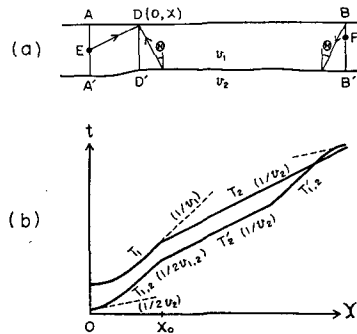
の T_1 及び T_2 曲線の如くなる。更に F を震源として初動を観測すると、

$$T_{EB} = (H_A + H_B - E) \cos \theta / v_1 + AB / v_2,$$

$$T_{FA} = (H_A + H_B - F) \cos \theta / v_1 + AB / v_2,$$

但し、

$$H_A = AA', \quad H_B = BB', \quad E = AE, \quad F = BF, \quad \theta = \sin^{-1}(v_1/v_2). \quad (1.1)$$



第1図 発破点が地中にある場合の method of differences

Fig. 1. Method of differences for shots below the surface of the ground.

1) 服部保正; 屈折法走時曲線の解析法についての研究, 地質工学, 第2輯 (日本物探 KK), (1962), 5-68.

$$\therefore T_{AB} \equiv \frac{1}{2}(T_{EB} + T_{FA}) = \left(H_A + H_B - \frac{E+F}{2}\right) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{AB}{v_2}.$$

1. 2 $x < x_0$ では :

$$T_{ED} = (E^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}/v_1, \quad T_{FD} = (H_B - F + H) \cos \theta / v_1 + (AB - x)/v_2.$$

$$\therefore (e) \equiv \frac{1}{2}(T_{ED} + T_{FD} - T_{AB}) = \left(H - H_A + \frac{E-F}{2}\right) \frac{\cos \theta}{2v_1} + \frac{(E^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}}{2v_1} - \frac{x}{2v_2},$$

$$T'_{ED} \equiv T_{ED} - (e) = \left(H_A - H + \frac{F-E}{2}\right) \frac{\cos \theta}{2v_1} + \frac{(E^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}}{2v_1} + \frac{x}{2v_2},$$

$$T'_{FD} \equiv T_{FD} - (e) = \left(H_A + 2H_B + H - \frac{E+3F}{2}\right) \frac{\cos \theta}{2v_1} - \frac{(E^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}}{2v_1} + \frac{x^*}{2v_2} + \frac{AB}{2v_2},$$

但し,

$$H = DD', \quad x^* = AB - x.$$

故に $x \ll E$ とすれば, T'_{ED} 及び T'_{FD} は何れも直線で, それらの傾斜は $\pm 1/(2v_2)$ である。

次に $x \gg E$ とすれば, T'_{ED} 及び T'_{FD} は再び直線になり, それらの傾斜は $\pm 1/(2v_{1,2})$ である。但し,

$$1/v_{1,2} = 1/v_1 + 1/v_2. \quad (1. 2)$$

1. 3 $x > x_0, \quad x^* < x_0^*$ では :

$$T_{ED} = (H_A - E + H) \cos \theta / v_1 + x/v_2.$$

$$\therefore (e) \equiv \frac{1}{2}(T_{ED} + T_{FD} - T_{AB}) = \left(H - \frac{E+F}{4}\right) \frac{\cos \theta}{v_1}, \quad (1. 3)$$

$$\left. \begin{aligned} T'_{ED} &\equiv T_{ED} - (e) = \left(H_A - E + \frac{E+F}{4}\right) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{x}{v_2}, \\ T'_{FD} &\equiv T_{FD} - (e) = \left(H_B - F + \frac{E+F}{4}\right) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{x^*}{v_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1. 4)$$

故に, T'_{ED} 及び T'_{FD} は何れも直線で, それらの傾斜は $\pm 1/v_2$ である。

今 1. 2 の後半及び 1. 3 で述べてきた事は, 既に田治米等²⁾ が指摘している。それに今回の考察を加えて, T' 曲線を完成させると, Fig. 1 (b) の如くなる。() 内の文字は直線部の傾斜を示している。

1. 4 (1. 3) の代わりに,

$$(e') \equiv (e) + (E+F) \cos \theta / (4v_1) = H \cos \theta / v_1 \quad (1. 5)$$

とおき, (1. 4) の代わりに

$$\left. \begin{aligned} T'_{AD} &\equiv T_{ED} - (e') = (H_A - E) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{x}{v_2}, \\ T'_{BD} &\equiv T_{FD} - (e') = (H_B - F) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{x^*}{v_2}, \end{aligned} \right\} \quad (1. 6)$$

2) 田治米鏡二・武内俊昭; 屈折法の解析に対する萩原の方法の拡張, 物理探鉱, 11 (1958), 44-46.

とおきなおした方が、 H を算出しやすい。

更に一層追加した場合に、(1.5)及び(1.6)に対応する表現は次の如くにして得られる。

$$\begin{aligned} T_{3ED} &= (H_{1A} - E + H_1) \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + (H_{2A} + H_2) \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{AD}{v_3}, \\ T_{3FD} &= (H_{1B} - F + H_1) \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + (H_{2B} + H_2) \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{BD}{v_3}. \\ \therefore T_{3AB} &\equiv \frac{1}{2}(T_{3EB} + T_{3FA}) \\ &= \left(H_{1A} + H_{1B} - \frac{E+F}{2} \right) \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + (H_{2A} + H_{2B}) \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{AB}{v_3}, \\ (e_3) &\equiv \frac{1}{2}(T_{3ED} + T_{3FD} - T_{3AB}) = \left(H_1 - \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + H_2 \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2}. \end{aligned}$$

ここで、(1.5)と同じおき方を採用すると、

$$(e'_3) \equiv (e_3) + \frac{E+F}{4} \cdot \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} = H_1 \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + H_2 \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2}. \quad (1.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \therefore T'_{3AD} &\equiv T_{3ED} - (e'_3) = (H_{1A} - E) \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + H_{2A} \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{AD}{v_3}, \\ T'_{3BD} &\equiv T_{3FD} - (e'_3) = (H_{1B} - F) \frac{\cos \theta_{1,3}}{v_1} + H_{2B} \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{BD}{v_3}. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

2. 震源が下層にある場合の初動の走時

2.1 Fig. 2(a)において、Eを震源とし、Dを受震点とすると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{d \cos \omega} &= \cos \omega \left\{ \frac{Z}{d} \tan i_1 + \tan i_2 - \left(1 + \frac{Z}{d} \right) \tan \omega \right\}, \\ \frac{T v_2}{d \cos \omega} &= \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{Z}{d} \cdot \frac{1}{\cos i_1} + \frac{1}{\cos i_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

然るに、 Z は x の函数、

$$Z = Z_A - x \tan \omega,$$

なので、(2.1)から Z を消去すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{x}{d} &= \left\{ \frac{Z_A}{d} \tan i_1 + \tan i_2 - \left(1 + \frac{Z_A}{d} \right) \tan \omega \right\} (1 + \tan \omega \tan i_1)^{-1}, \\ \frac{T v_2}{d \cos \omega} &= \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{Z_A}{d} \cdot \frac{1}{\cos i_1} + \frac{1}{\cos i_2} - \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{\tan \omega}{\cos i_1} \cdot \frac{x}{d}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

(2.2)はFig. 2(a)の如き昇り傾斜層に対する式である。降り傾斜層に対しては、単に ω の符号を変えるだけで、直ちに結果が得られる。

2.2 (2.1)に $\omega=0$ を代入し、 Z を H 、 d を h に書き換えると、

$$\frac{x}{h} = \frac{H}{h} \tan i_1 + \tan i_2, \quad \frac{T v_2}{h} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{H}{h} \cdot \frac{1}{\cos i_1} + \frac{1}{\cos i_2}. \quad (2.3)$$

(2.3) の両式と

$$\sin i_1/v_1 = \sin i_2/v_2 \quad (2.4)$$

とから i_1 と i_2 とを消去すれば、 T と x との関係式が得られる筈である。然しその途中で4次方程式の根を求めねばならぬので、この方法で T と x との関係を求めるのは案外に厄介である。

そこで、(2.3) に於いて $\sin i_1 \ll 1$ と考へ、

$$i_1 = 0 \quad (2.5)$$

とおいてみると、

$$\frac{x}{h} = \tan i_2', \quad \frac{T'v_1}{H} = 1 + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \cdot \frac{1}{\cos i_2'} \quad (2.6)$$

(2.6) は曾って田治米等³⁾ 及び音田功⁴⁾ が用いた (2.3) の近似式に他ならぬ。この近似による走時の誤差は、

$$\Delta T \cdot \frac{v_1}{H} \equiv (T - T') \frac{v_1}{H} = \left(\frac{1}{\cos i_1} - 1 \right) + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \left(\frac{1}{\cos i_2} - \frac{1}{\cos i_2'} \right), \quad (2.7)$$

但し、

$$\tan i_2' = \tan i_2 + (H/h) \tan i_1.$$

故に、 $0 < i_2 < i_2' < \pi/2$ である。従つて、(2.7) の右辺の第1カッコ内は正、第2カッコ内は負である。

故に、(2.3) の代わりに(2.6)を用いたために生じる誤差は、上下両層内で互いに打ち消し合う向きに作用し、あまり大きくならぬものと予想される。

2.3 走時の誤差を量的に調べてみる。

$\tan i_2 < \tan i_2' = x/h < 1$ の場合：

$$\tan i_1 < \tan i_2 < 1$$

である。

$$\therefore \sec i_1 - 1 = (1 + \tan^2 i_1)^{1/2} - 1 \doteq \frac{1}{2} \tan^2 i_1 \ll 1,$$

$$\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \left(\frac{1}{\cos i_2} - \frac{1}{\cos i_2'} \right) \doteq \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} (\tan^2 i_2 - \tan^2 i_2') \doteq - \frac{v_1}{v_2} \tan i_1 \tan i_2' \ll 1.$$

$$\therefore \Delta(Tv_1/H) \ll 1.$$

$\tan i_2' = x/h = 1$ の場合：

$$\tan i_1 < x(H+h)^{-1} = h(H+h)^{-1} < 1$$

である。

3) 田治米鏡二・音田 功；初動の走時図に現れる震源の深さの影響 (3), 物理探鉱, **11** (1958), 1-3.

4) 音田 功；震源が下層にある場合の走時解析 (補遺), 物理探鉱, **14** (1961), 136-137.

$$\therefore \sec i_1 - 1 \doteq \frac{1}{2} \tan^2 i_1 \ll 1,$$

$$\begin{aligned} \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \left(\frac{1}{\cos i_2} - \frac{1}{\cos i_2'} \right) &= \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \left\{ (1 + \tan^2 i_2)^{\frac{1}{2}} - (1 + \tan^2 i_2')^{\frac{1}{2}} \right\} \\ &= \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \left[\left\{ 1 + \left(\tan i_2' - \frac{H}{h} \tan i_1 \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \sqrt{2} \right] \doteq -(v_1/v_2) \tan i_1 < 1. \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta(Tv_1/H) = \tan i_1 \left(\frac{1}{2} \tan i_1 - v_1/v_2 \right) \ll 1.$$

$\tan i_2' > \tan i_2 \gg 1$ の場合 :

$$i_1 \doteq \theta = \sin^{-1}(v_1/v_2)$$

である。

$$\therefore \sec i_1 - 1 = \sec \theta - 1,$$

$$\frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h}{H} \left(\frac{1}{\cos i_2} - \frac{1}{\cos i_2'} \right) \doteq -\sin \theta \tan \theta.$$

$$\therefore \Delta(Tv_1/H) \doteq \cos \theta - 1 \doteq -\frac{1}{2} (v_1/v_2)^2 \ll 1.$$

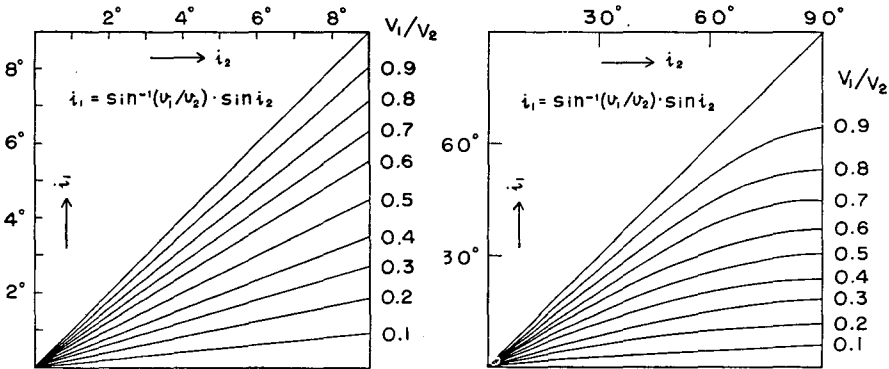
以上3つの場合の走時誤差を比較すると、 $x/h < 1$ の場合が最も小さく、 $x/h \gg 1$ の場合が最も大きい。その原因は(2.6)の近似には(2.5)の近似が内容的に含まれているためである。最後の場合は(2.6)を用いるよりも、

$$T' = \frac{H \cos \theta}{v_1} + \frac{x}{v_2} \tag{2.8}$$

を用いた方が誤差は少くなる。然し田治米等³⁾のFig. 3の如く、精度のみを見る場合には、 $x/h \gg 1$ の場合でも(2.6)の精度はかなり良いと云える。

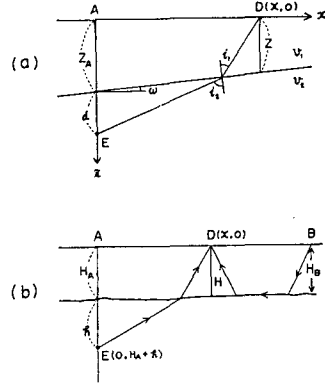
(2.3)に見た如く、 T と x との関係は厳密には

$$Tv_1/H = F(x/h; v_1/v_2, h/H) \tag{2.9}$$



第3図 入射角の関係

Fig. 3. The relation of incident angles.



第2図 震源が下層にある場合の波線

Fig. 2. A ray comes from the source within a lower layer.

として表現されるべきである。然し、

$$\alpha = (v_1/v_2)(h/H)$$

ではなくて、 (v_1/v_2) と (h/H) とを別々に変化させた場合の図表を用意するのは繁雑である。然も、余り繁雑な図表は実用上は却って無価値に等しい。

T と x との関係を(2.9)の形ではなくて、

$$Tv_1/H = f(x/h; \alpha)$$

の形で近似的に表わし得た点に(2.6)の意義があったのである。

2.4 Fig. 2(b)に示した2つのrayについてmethod of differences(脚註6)の計算を行ってみる。

$x/h \gg 1$ の場合:

(2.8)の近似を用いると、

$$T_{ED} \doteq H \cos \theta / v_1 + AD / v_2. \quad (2.10)$$

T_{EB} はいつもこの条件を満していると考えられるので、

$$T_{EB} \doteq H_B \cos \theta / v_1 + AB / v_2. \quad (2.11)$$

一方、

$$\left. \begin{aligned} T_{BD} &= (H_B + H) \cos \theta / v_1 + BD / v_2, \\ T_{BA} &= (H_B + H_A) \cos \theta / v_1 + AB / v_2. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

$$\left. \begin{aligned} \therefore (e) &\equiv \frac{1}{2} \left\{ T_{ED} + T_{BD} - \frac{1}{2} (T_{EB} + T_{BA}) \right\} = -\frac{H_A \cos \theta}{4v_1} + \frac{H \cos \theta}{v_1}, \\ T'_{ED} &\equiv T_{ED} - (e) = \frac{H_A \cos \theta}{4v_1} + \frac{x}{v_2}, \\ T'_{BD} &\equiv T_{BD} - (e) = \left(H_B + \frac{H_A}{4} \right) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{BD}{v_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

$x/h \leq 1$ の場合:

(2.6)の近似を用いると、

$$T_{ED} \doteq H/v_1 + (h^2 + x^2)^{1/2} / v_2. \quad (2.14)$$

これと(2.11)及び(2.12)とから、

$$\left. \begin{aligned} (e) &= -\frac{H_A \cos \theta}{4v_1} + \frac{H(1 + \cos \theta)}{2v_1} + \frac{(h^2 + x^2)^{1/2} - x}{2v_2}, \\ T'_{ED} &= \frac{H_A \cos \theta}{4v_1} + \frac{H(1 - \cos \theta)}{2v_1} + \frac{(h^2 + x^2)^{1/2} + x}{2v_1}, \\ T'_{BD} &= \left(H_B + \frac{H_A}{4} \right) \frac{\cos \theta}{v_1} - \frac{H(1 - \cos \theta)}{2v_1} + \frac{AB + BD - (h^2 + x^2)^{1/2}}{2v_2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

故に、 $x \ll h$ では T'_{ED} は $1/(2v_2)$ の傾斜をした直線になる。 $x \approx h$ では T'_{ED} は再び直線で、

その傾斜は $(\sqrt{2}+1)/(2v_2) > 1/v_2$ である。更に $x \gg h, BD \gg 2H_B \tan \theta$ であれば、 T'_{ED} は $1/v_2$ の傾斜を持った直線になる。

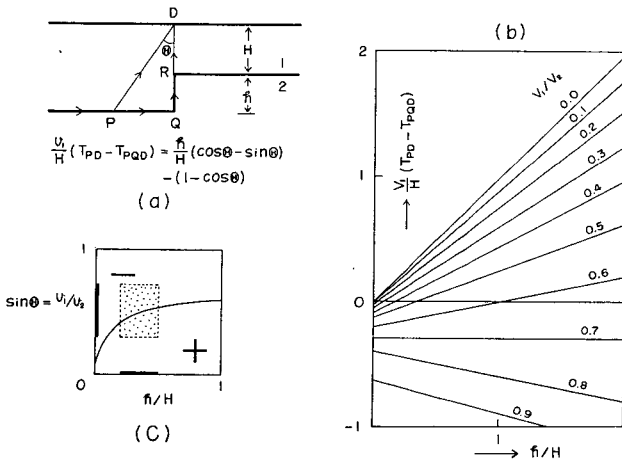
3. 階段構造における走時

3.1 この問題も既に多くの書物に取り上げられているし、LEDOUX⁵⁾ の詳しい研究もある。然し今回は測定結果の整理上、今迄よりも一層詳しく考察してみる必要が生じた。

構造に角がある場合の波動論は未知の面が多い。どんな条件で、どんな波が卓越するかは殆んど判っていない。故にここでは、初動及びその直後に観測される可能性のあるすべての ray path の走時を考察してみる。

表層内の波の速度を v_1 とし、下層内の波の速度 v_2 は v_1 よりも大きいとする。今後の数値計算に屢々使わねばならぬので、先ず入射角の関係(2.4)を Fig. 3 に示しておく。

3.2 Fig. 4(a) の \overrightarrow{PQ} 面に沿って進んで来た ray を考える。地表で観測される波として先ず挙げられるのは、 θ を臨界角とすると、 \overrightarrow{PD} に平行に進む conical wave 群である。次に P 及び Q 点を夫々 2 次的な震源とする多くの廻折波群が考えられる。



第 4 図 昇り階段に対する走時差の一例

Fig. 4. An example of the difference of travel times for an upward step.

以上の波群の中で、図の D 点で初動として観測される可能性のある ray は \overrightarrow{PD} と \overrightarrow{PQRD} とであって、夫々の走時は次の如くである。

$$T_{PD} = PD/v_1, \quad T_{PQRD} = (PQ+QR)/v_2 + RD/v_1. \quad (3.1)$$

両者の差は Fig. 4(a) の下に書いてある式、

$$\frac{v_1}{H} (T_{PD} - T_{PQRD}) = \frac{h}{H} (\cos \theta - \sin \theta) - (1 - \cos \theta), \quad (3.2)$$

5) Y. LEDOUX; Quelques exemples de diffractions en sismique-refractions et leur application a la determination des vitesses verticales, Geophysical Prospecting, 5 (1957), 392-406.

で表現されて、これは Fig. 4 (b) の如き値をとる。すなわち、Fig. 4 (c) の - 部分では \overrightarrow{PD} が初動となるに反し、+ 部分では \overrightarrow{PQRD} が初動になる。この図の蔭を施してある部分は実際の地下構造として考えられやすい v_1/v_2 と h/H との範囲である。これによれば、実際にも \overrightarrow{PD} が初動になるか、或は \overrightarrow{PQRD} が初動になるか、その可能性は半々である。

3. 3 Fig. 5 (a) の D 点で初動或はその直後の波として観測される ray は \overrightarrow{QCD} と \overrightarrow{QRD} とであって、夫々の走時は次の如くである。

$$T_{QCD} = \frac{QC}{v_2} + \frac{CD}{v_1}, \quad T_{QRD} = \frac{QR}{v_2} + \frac{RD}{v_1}. \quad (3. 3)$$

このまゝでは取り扱いが面倒なので、(2. 6) にならって、(3. 3) を次の如く書き換える。

$$\frac{v_1}{H} T_{QCD} \doteq 1 + \alpha \sqrt{1 + (x'/h)^2}, \quad \frac{v_1}{H} T_{QRD} = \alpha + \sqrt{1 + (x'/h)^2}, \quad (3. 4)$$

但し、

$$\alpha = (v_1/v_2)(h/H).$$

T_{QCD} の近似による誤差は既に 1. 3 で調べてある。この誤差は多くの場合極めて小さい。 $x'/h < 1$, $x'/H < 1$ の場合:

$$\frac{v_1}{H} (T_{QRD} - T_{QCD}) \doteq \frac{1}{2} \left(\frac{x'}{h} \right)^2 \left(\frac{h}{H} \right) \left(\frac{h}{H} - \frac{v_1}{v_2} \right)$$

である。故に左辺の正負は $(h/H - v_1/v_2)$ の正負による。但し、 $h/H \gg 1$ でない限り、左辺の絶対値は 1 よりも極めて小さい。

$x'/h > 1$, $x'/H > 1$ の場合:

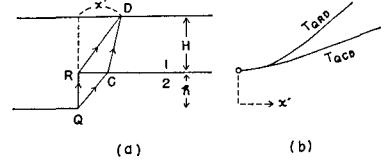
$$\frac{v_1}{H} (T_{QRD} - T_{QCD}) \doteq \alpha - 1 + \frac{x'}{H} \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right)$$

である。故に、 $\alpha \geq 1$ ならば x'/H の如何に拘らず正。 $\alpha < 1$ でも、 $x'/H \gg 1$ ならば正になる。

上述の 2 つの場合を総合すると、 T_{QCD} と T_{QRD} とのおよその関係は Fig. 5 (b) で示される。

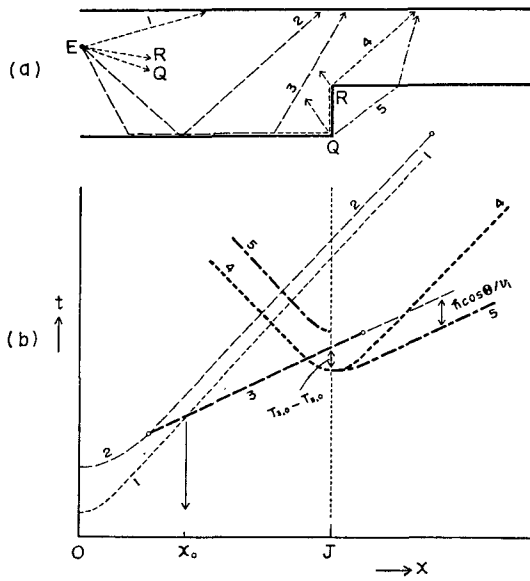
3. 4 Fig. 6 (a) は Fig. 4 (a) と Fig. 5 (a) との一般化である。E 点は震源であって、地表で初動として観測される可能性のある ray の経路を全部示したつもりである。ray 1 は直接波、2 は反射波、3 は conical wave であって、その他はいずれも廻折波である。ray 4 及び 5 は夫々第 4 (a) 図の \overrightarrow{QRD} 及び \overrightarrow{QCD} に他ならぬ。数字を記してない ray は初動よりもはるかに遅れて地表に到達するので、ここでは問題にしない。

今考えたいくつかの ray の震源から地表迄の走時は Fig. 6 (b) の如くである。これらの走



第 5 図 昇り階段に対する走時差の他の例

Fig. 5. Another example of the difference of travel times for an upward step.



第 6 図 昇り階段に対する ray の経路及び走時の総合

Fig. 6. The time-distance relation in general for an upward step.

時曲線の中、ray 1, 2 及び 3 の走時曲線の相対的な位置は地下構造の如何に拘らず変わらない。ray 4 と 5 同志も常にこの図の如き関係にある。

然るに Fig. 4 での考察によれば、

$$T_{3,0} - T_{5,0} = T_{PD} - T_{PQRD}$$

であって、この値は正負何れにもなりうる。すなわち、ray 4, 5 の組合せは ray 1, 2, 3 の組合せに対し、地下構造次第で上下に動かうる。

Fig. 6 (b) の白丸は夫々の ray の存在限界を示している。

限界点を越えた ray 3 の走時は Fig. 7 の如き経路を仮想して、

$$T_3 = T_3(x'=0) + x'/v_2.$$

一方 ray 5 の方は、

$$T_5 \doteq T_5(x'=0) + (\sqrt{h^2 + x'^2} - h)/v_2 \xrightarrow{x' > h} T_5(x'=0) + (x' - h)/v_2.$$

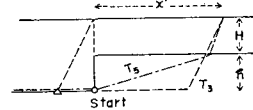
故に

$$h/v_2 \doteq (T_3 - T_5)_{x' > h} - (T_{3,0} - T_{5,0}). \tag{3.5}$$

昇り階段の高さ h はこの関係からも推定される。

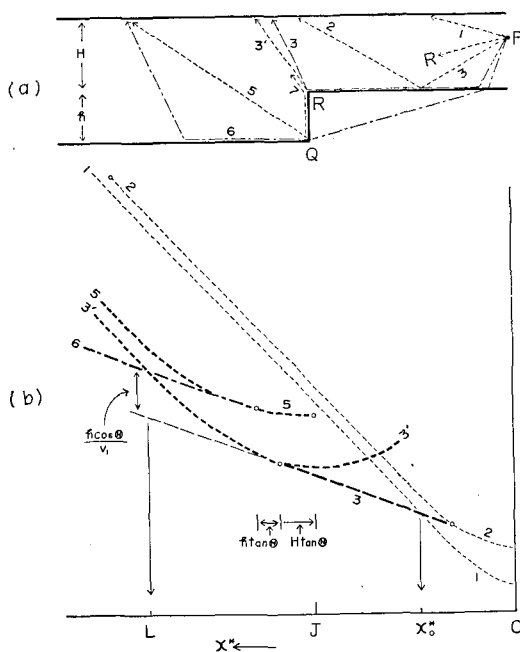
3.5 Fig. 6(a) とは逆に、震源が階段の上部にある場合に、地表で初動として観測される可能性のあるすべての ray を Fig. 8(a) に示す。

次に今挙げた多くの ray の中に一部ずつをとり出して、走時の比較をしてみよう。

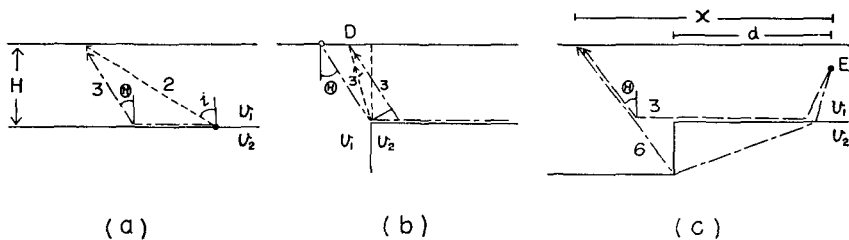


第 7 図 仮想的な ray 3 の経路

Fig. 7. A path of ray 3 imagined.



第 8 図 降り階段に対する ray の経路及び走時の総合
 Fig. 8. The time-distance relation in general for a downward step.



第 9 図 波線 3 と波線 2, 3' 及び 6 の走時差
 Fig. 9. Differences of travel times between ray 3 and rays 2, 3' and 6.

Fig. 9(a) について :

$$T_2 v_1 / H = \sec i, \quad T_3 v_1 / H = \sin \theta \tan i + \cos \theta$$

である。

$$\therefore (T_2 - T_3) v_1 / H = \{1 - \cos(i - \theta)\} \sec i \geq 0.$$

Fig. 9(b) について :

図から直ちに,

$$T_3' - T_3 \geq 0$$

であることが判る。

エネルギーは既にほんの僅かしか残っていない筈である。初動とは、エネルギー的には、かくも衰れな波である。

先に述べた理由で、Fig. 10(a)の NG 間は蔭になる。そこで Fig. 10(b)の如く、ray 5 の幾何学的存在限界を越えた ray 5' を仮想してみると、(2.6) にならって、

$$\frac{v_1 T_{5'}}{h_1 + h_2} \doteq 1 + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h_3}{h_1 + h_2} \left\{ 1 + \left(\frac{x}{h_3} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

一方、

$$\frac{v_1 T_{5x}}{h_1} \doteq 1 + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{h_2 + h_3}{h_1} \left\{ 1 + \left(\frac{x}{h_2 + h_3} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{v_1}{h_1} (T_{5'} - T_{5x}) &= \frac{h_2}{h_1} + \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{x}{h_1} \left[\left\{ 1 + \left(\frac{h_3}{x} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. - \left\{ 1 + \left(\frac{h_2 + h_3}{x} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \xrightarrow{h_2 + h_3 < x} \frac{h_2}{h_1} \left\{ 1 - \frac{v_1}{2v_2} \left(\frac{h_3}{x} + \frac{h_2 + h_3}{x} \right) \right\} > 0, \end{aligned}$$

或いは、

$$\frac{v_1}{h_2} (T_{5'} - T_5) \xrightarrow{h_2 - h_3 < x} \left\{ 1 - \frac{v_1}{2v_2} \left(\frac{h_3}{x} + \frac{h_2 + h_3}{x} \right) \right\} \xrightarrow{h_2 - h_3 < x} 1. \quad (3.7)$$

例えば、

$$x = 100 \text{ m}, \quad h_2 = 10 \text{ m}, \quad h_3 = 20 \text{ m}, \quad v_1/v_2 = 0.70 \quad (3.8)$$

とすれば、(3.7) = 0.82.

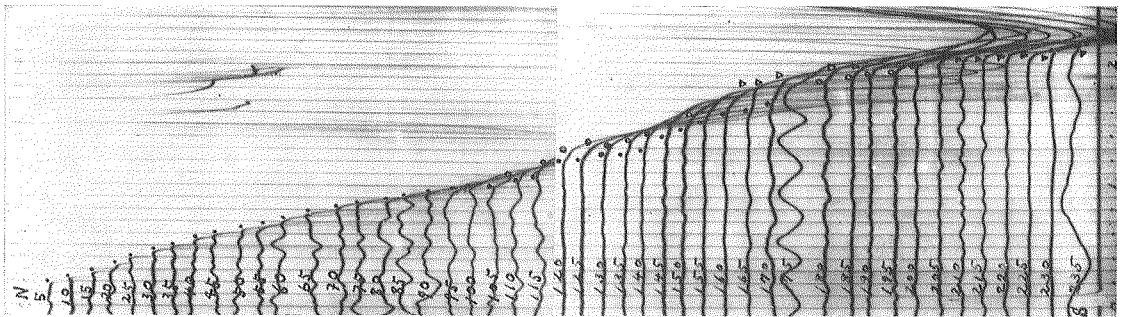
(3.7) は h_2 の見当をつけるのに役立つこともある。

又 Fig. 10(a) の M, N 及び G 点の位置が判れば、

$$h_2/h_3 = GN/NM \quad (3.9)$$

を推定することもできる。

3.7 Fig. 10(c) に示してあるのは、この実験場で得た seismic records の一部である。こ



第10c図 この実験場で得た地震記録の一部

Fig. 10 c. Seismic records obtained on span NS 0→240 at the present experimental field.

の図の ●, ○ 及び ▽ で示した立ち上りの走時 plots は Fig. 10 (d) の如くなる。

Fig. 10 (c) の NS 120-170 間では、初動の立ち上りは少々あいまいで、現地での整理の際にも議論になった。一時は ● を捨てて、遅れている方の plot ○ を初動として採用してみたこともある。

その後 3 の考察により、これらの両位相は地下の階段構造に帰因するものではないかと思うに至り、●印の位相を初動として採用することにした。Fig. 10 (d) と Fig. 6 (b) とを見較べると、●は鎖線で示した ray 5 の走時に対応し、○は点線で示した ray 4 の走時に対応する様に思われる。

3. 8 Fig. 10 (d) の ● 印が NS 170-220 間で欠けているのは Fig. 10 (a) の考察に対応するものと思われる。

以上の如き眼で見ると、Fig. 10 (c) は N から S に向って昇り階段が地下に 2 つあることを暗示しているものと解釈される。

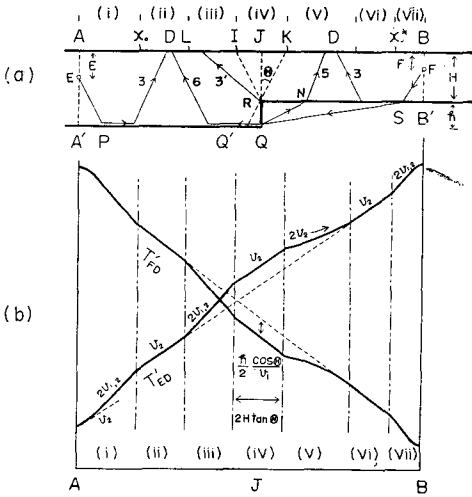
尤も、かくの如き見方が Figs. 10 (c) 及び (d) に対する唯一の解釈であると断定はできぬ。

余りにも器用な解釈に走ると、却って大局を誤りやすい。但し、Fig. 10 (c) の NS 0-120 及び 180-240 間の初動と比較して、120-180 間の初動の立ち上りが鈍いと云う観測事実は地下構造の複雑性を示しているに違いない。

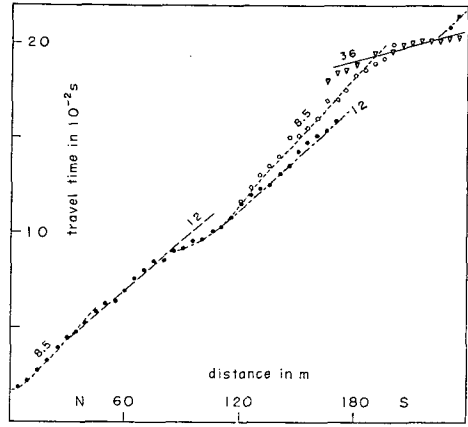
この場合の初動の立ち上りの鈍さは、媒質自身の性質に帰因するのではなくて、むしろ構造の方に原因がある。

4. 階段構造に対する method of differences⁶⁾

4. 1 階段構造の下部及び上部で発破をかけた場合に、夫々初動となりうる ray だけを Fig. 6 及び Fig. 8 から拾い出すと、Fig. 11 (a) の如く整理される。



第 11 図 両端発破の際に初動になりうる波線
Fig. 11. Rays for the first break by normal and reverse shots.



第 10 (d) 図 前図から得られる走時 plots
Fig. 10 (d). Time-distance plots for breaks indicated with ●, ○ and △ in Fig. 10 (c). The number means velocity in 10²m/s.

6) HEILAND, C. A. 1946, Geophysical Exploration, Prentice-Hall, Inc. の第 548 頁に出ている言葉である。日本では“萩原尊礼の方法”或は“ハギトリ法”の呼び名で親しまれている。萩原尊礼；基盤面の傾斜が一様でない場合の走時曲線解析法，地震，10，第 1 輯 (1938)，463。

震源 E について：

$$\text{ray 3; } T_{ED} = \frac{(EA' + H + h) \cos \theta}{v_1} + \frac{AD}{v_2} \quad \text{for } AD \leq AK.$$

$$\begin{aligned} \text{ray 5; } T_{ED} &\equiv \frac{EP}{v_1} + \frac{PQ}{v_2} + \frac{QN}{v_2} + \frac{ND}{v_1} \\ &\doteq \begin{cases} \frac{EA' \cos \theta}{v_1} + \frac{AJ}{v_2} + \frac{H}{v_1} + \frac{(h^2 + \overline{JD}^2)^{\frac{1}{2}}}{v_2} & \text{for } JD \gg h, \\ \frac{EA' \cos \theta}{v_1} + \frac{AJ}{v_2} + \frac{H \cos \theta}{v_1} + \frac{JD}{v_2} & \text{for } JD \gg h. \end{cases} \end{aligned}$$

震源 F について：

$$\text{ray 3; } T_{FD} = \frac{(FB' + H) \cos \theta}{v_1} + \frac{BD}{v_2} \quad \text{for } BD \leq BI.$$

$$\begin{aligned} \text{ray 3'; } T_{FD} &\equiv \frac{FS}{v_1} + \frac{SR}{v_2} + \frac{RD}{v_1} \\ &= \frac{FB' \cos \theta}{v_1} + \frac{BJ}{v_2} + \frac{(H^2 + \overline{JD}^2)^{\frac{1}{2}}}{v_1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ray 6; } T_{FD} &\equiv \frac{FS}{v_1} + \frac{SQ}{v_2} + \frac{QQ'}{v_2} + \frac{Q'D}{v_1} \\ &\doteq \begin{cases} \frac{(H+h) \cos \theta}{v_1} + \frac{JD}{v_2} + \frac{FB'}{v_1} + \frac{(h^2 + \overline{BJ}^2)^{\frac{1}{2}}}{v_2} & \text{for } BJ \leq h, \\ \frac{(H+h) \cos \theta}{v_1} + \frac{JD}{v_2} + \frac{FB' \cos \theta}{v_1} + \frac{BJ}{v_2} & \text{for } BJ \gg h. \end{cases} \end{aligned}$$

故に、 T_{ED} と T_{FD} とを用いて、器械的に method of differences の計算を行うと、これから述べるような結果になる。その際の便宜上、Fig. 6 (b) 及び Fig. 8 (b) の矢印をつけた地点 x_0 、L 及び x_0^* をも考慮して、Fig. 11 (a) の AB 間を次の 7 区に分けておく。

- (i) $0 \leq AD \leq x_0$,
- (ii) $x_0 \leq AD \leq AL$,
- (iii) $AL \leq AD \leq AI$,
- (iv) $AI \leq AD \leq AK$,
- (v) $AK \leq AD \leq AB - x_0^*$, $JD \gg h$,
- (vi) $AK \leq AD \leq AB - x_0^*$, $JD \gg h$,
- (vii) $x_0^* \leq AD \leq AB$.

4. 2 $JB \gg h$ の場合：

$$T_{AB} \equiv \frac{1}{2} (T_{sEB} + T_{sFA}) \doteq \frac{(AA' + BB') \cos \theta}{v_1} - \frac{E+F}{2} \cdot \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{AB}{v_2}$$

である。

(ii) では、

$$(e) \equiv \frac{1}{2}(T_{3ED} + T_{6FD} - T_{AB}) = \frac{(H+h) \cos \Theta}{v_1} - \frac{E+F}{4} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1}.$$

$$\therefore T'_{ED} \equiv T_{3ED} - (e) = \frac{(EA') \cos \Theta}{v_1} + \frac{E+F}{4} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{AD}{v_2},$$

$$T'_{FD} \equiv T_{6FD} - (e) = \frac{(FB') \cos \Theta}{v_1} + \frac{E+F}{4} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{BD}{v_2}.$$

故に T' は直線で、その傾斜は $1/v_2$ である。

(iii) では、

$$(e) \equiv \frac{1}{2}(T_{3ED} + T_{3'FD} - T_{AB}) = \frac{H+h}{2} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1} - \frac{E+F}{4} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1} \\ + \frac{AD-AJ}{v_2} + \frac{(H^2 + \overline{JD}^2)^{\frac{1}{2}}}{v_1} \xrightarrow{JD > H} \left(\frac{H+h}{2} - \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} \\ + \frac{AJ-AD}{2} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right).$$

$$\therefore T'_{ED} \equiv T_{3ED} - (e) = \left(EA' + \frac{H+h}{2} + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} \\ - \frac{AJ}{2} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) + \frac{AD}{2} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right),$$

$$T'_{FD} \equiv T_{3'FD} - (e) = \left(FB' - \frac{H+h}{2} + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} \\ - \frac{BJ}{2} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) + \frac{BD}{2} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} \right).$$

D 点が観測点で、これだけが動きうるのであるから、 T' は直線で、その傾斜は $1/(2v_{1,2})$ である。但し、

$$1/v_{1,2} = 1/v_1 + 1/v_2, \quad 2v_{1,2} < v_2. \quad (1. 2)$$

(iv) では、

$$(e) \equiv \frac{1}{2}(T_{3ED} + T_{3FD} - T_{AB}) = \left(H + \frac{h}{2} - \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1}.$$

$$\therefore T'_{ED} \equiv T_{3ED} - (e) = \left(EA' + \frac{h}{2} + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{AD}{v_2},$$

$$T'_{FD} \equiv T_{3FD} - (e) = \left(FB' - \frac{h}{2} + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{BD}{v_2}.$$

故に、 T' は直線で、その傾斜は $1/v_2$ である。

(v) では、

$$(e) \equiv \frac{1}{2}(T_{5ED} + T_{3FD} - T_{AB}) = \left(\frac{H}{2} - \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{H}{2v_1} + \frac{(h^2 + \overline{JD}^2)^{\frac{1}{2}} - JD}{2v_2}.$$

$$\therefore T'_{ED} \equiv T_{5ED} - (e) = \left(EA' - \frac{H}{2} + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} \\ + \frac{H}{2v_1} + \frac{AD + AJ + \{h^2 + (AD - AJ)^2\}^{\frac{1}{2}}}{2v_2},$$

$$T'_{FD} \equiv T_{3FD} - (e) = \left(FB' + \frac{H}{2} + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} - \frac{H}{2v_1} + \frac{BD + BJ + \{h^2 + (BJ - BD)^2\}^{\frac{1}{2}}}{2v_2}$$

然るに、

$$AD + AJ + \{h^2 + (AD - AJ)^2\}^{\frac{1}{2}} \rightarrow \begin{cases} AD + AJ + h \\ 2AD \end{cases} \text{ for } JD \leq h.$$

故にこの区間では、 T' の傾斜が $1/(2v_2)$ から $1/v_2$ に変化する。

(vi) では、

$$(e) \equiv \frac{1}{2}(T_{5ED} + T_{3FD} - T_{AB}) = \frac{H \cos \Theta}{v_1} - \frac{E+F}{4} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1}.$$

$$\therefore T'_{ED} \equiv T_{5ED} - (e) = \left(EA' + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{AD}{v_2},$$

$$T'_{FD} \equiv T_{3FD} - (e) = \left(FB' + \frac{E+F}{4} \right) \frac{\cos \Theta}{v_1} + \frac{BD}{v_2}.$$

故に、 T' は直線で、その傾斜は $1/v_2$ である。

(i) 及び (vii) では、**1** で考察したのと大体同じである。故に T' は Fig. 1 (b) と似ている。

4. 3 以上の考察によれば、区間 (ii), (iv) 及び (vi) では、 T' の直線性が良く、直線の傾斜はいずれも $1/v_2$ である。そこで、お互いのずれを調べてみると、

$$T'_{ED}(\text{ii}) - T'_{ED}(\text{iv}) = -\{T'_{ED}(\text{iv}) - T'_{ED}(\text{vi})\} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1},$$

$$T'_{FD}(\text{ii}) - T'_{FD}(\text{iv}) = -\{T'_{FD}(\text{iv}) - T'_{FD}(\text{vi})\} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\cos \Theta}{v_1}.$$

これ迄に得た結果を総合すると、Fig. 11 (b) の如くなる。

Fig. 11 (a) の A'Q 面及び RB' 面に凹凸があると、 $H+h$ 及び H は夫々 $x=AD$ の函数になる。この場合は区間 (iii) の T' の直線性は悪くなり、(v) の T' はばらつく。然しその場合でも、敢て利用する気になれば、

$$(e) \equiv T_{ED} - T'_{ED} = T_{FD} - T'_{FD}$$

は $H+h$ 及び H を求めるのに役立つ。

階段の位置が震源 E 又は F に近いと、今行っている仮定 $JB \gg h$ その他の条件が満たされない。然し今回整理しようとしている測定資料に関しては、これ以上詳しい考察は不必要と思われるので、他の条件に対する考察は省略する。

II. 傾斜層に対する method of differences

5. 境界面の凹凸が激しくない3層構造に対する T' 直線の成り立ち

5. 1 Fig. 12 の AB 間では T_{3AD} と T_{3BD} とが重複して測定されている区間がない。故

に普通の method of differences では AB 間に T'_3 直線を見ることができぬ。 T'_3 は隠されているが、 T_3 の見えている区間があるからには、AB 間にも実は T'_3 直線が存在している筈である。

若しも AB の外側 B' に更に発破点があるものとするれば、 T_{3AD} と $T_{3B'D}$ とが重複して測定される区間がある。今度は普通の method of differences により、 T'_{3AD} と $T'_{3B'D}$ とを求めることができ。これらの直線の傾斜は $1/v_3$ であり、これらの交点 P'_3 の時間座標は $T_{AB'}/2$ 、距離座標は T_{3AD} と $T_{3B'D}$ の交点 C_3 の座標と一致する。

さて AB 間でも AB' 間でも T_{3AD} の一部は共通である。故に AB' 間で今求めた T'_{3AD} 直線は AB 間の T'_{3AD} 直線と同一である筈である。

一方 AB 間で T_{3BD} が測定されている区間では、次の関係が満たされねばならぬ。

$$T_{3B'D} - T'_{3B'D} = T_{3BD} - T'_{3BD}. \quad (5.1)$$

然るに、

$$T_{3B'D} - T_{3BD} = T_{3AB'} - T_{3AB}, \quad T'_{3B'D} + T'_{3AD} = T_{3AB'}. \quad (5.2)$$

故に、(5.1) と (5.2) とから、

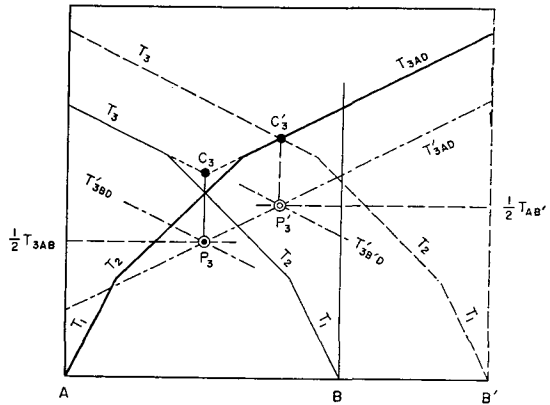
$$T'_{3AD} + T'_{3BD} = T_{3AB} \quad (5.3)$$

すなわち、 T'_{3AD} と T'_{3BD} の交点 P_3 の時間座標は $T_{3AB}/2$ である。

AB の中央部で T_3 が later phase として測定されている状態を想像すれば、点線で示した如く、交点 C_3 の距離座標と P_3 の距離座標とは一致すべきである。このことは Fig. 12 の幾何学的関係からも明らかである。

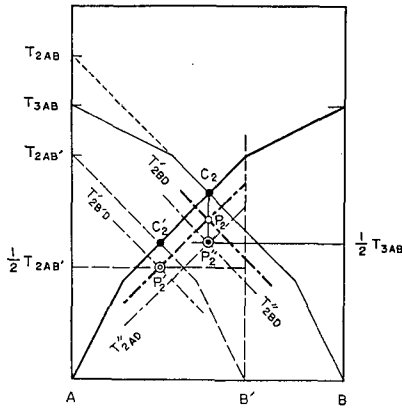
以上の思考経過を逆にたどれば、 B' 点からの走時の測定がなくとも、AB 間の測定だけで T'_3 直線を求めうる。 T'_3 直線の交点 P_3 の縦座標は $T_{3AB}/2$ 、横座標は T_{3AD} と T_{3BD} の交点 C_3 の横座標と一致する。これで P_3 の位置が定まったので、次に P_3 を通り $1/v_3$ なる傾斜の直線を描けば、これが T'_{3AD} 及び T'_{3BD} である。故に、 $T_{3AD} - T'_{3AD}$ 及び $T_{3BD} - T'_{3BD}$ によって、少くとも T_3 が測定されている部分については、 v_3 層迄の深さを推定することができる。

5.2 Fig. 12 と同じ走時 plot T_{AD} と T_{BD} とから、 v_2 層迄の深さを推定するためには、 T'_2 直線を求めねばならぬ。測定されているのは T_{3AB} であって、 T_{2AB} ではないことに注目すると、普通の method of differences を用いることはできぬ。



第12図 3層構造に対する T'_3 直線の成り立ち

Fig. 12. Formations of T'_3 -lines for stratified three layers having smooth boundaries.



第 13 図 3 層構造に対する T_2' 直線の成り立ち

Fig. 13. Formations of T_2' -lines for stratified three layers having smooth boundaries.

Fig. 13 に示した如く、AB の中間 B' に若しも発破点があって、 AB' 間では T_3 は測定されていないものとするれば、普通の方法により、簡単に T_{2AD}' 及び $T_{2B'D}'$ が求まる。これらの傾斜は $1/v_2$ であり、交点 P_2' の縦座標は $T_{2AB'}/2$ 、横座標は T_{2AD} と $T_{2B'D}$ の交点 C_2' の横座標と同じである。

AB 間の測定と AB' 間の測定とでは、 T_{2AD} の一部は共通である。故に AB' 間の測定により決められた T_{2AD}' は AB 間の測定にも共通していなければならぬ。すなわち T_{2AD}' と T_{2BD}' との交点 P_2' は、既に決っている T_{2AD} 直線上にある筈である。

一方、

$$T_{2AD} - T_{2AD}' = T_{2BD} - T_{2BD}'$$

であるべき故、 P_2' の横座標は T_{2AD} と T_{2BD} との交点 C_2 の横座標と一致しなければならぬ。

P_2' の縦座標は、

$$T_{2AD}' = \frac{1}{2}(T_{2AB} + T_{2AD} - T_{2BD}) \tag{5.4}$$

AB 間で、若しも T_{2AB} の代わりに T_{3AB} を用いて method of differences を行つたとすれば、 T_2' 直線の交点 P_2'' の縦座標は、

$$T_{2AD}'' = \frac{1}{2}(T_{3AB} + T_{2AD} - T_{2BD}) \tag{5.5}$$

故に、(5.4) と (5.5) とから、

$$P_2 - P_2'' = \frac{1}{2}(T_{2AB} - T_{3AB}) \tag{5.6}$$

以上の思考経過を逆にたどれば、 B' 点からの走時の測定がなくとも、AB 間の測定だけで、 T_2' 直線を求めうる。AB 間で測定された走時に対し、器械的に method of differences を行くと、 T_2' 直線の交点は P_2'' の位置になる。Fig. 13 では今求めたみかけの T_2' 直線を T_2'' の符号で、真の T_2' と区別している。真の T_2' 直線の交点 P_2' の縦座標は、 P_2'' よりも (5.6) の右辺の量だけ上にある。横座標は T_2 の交点 C_2 の横座標と同じである。これで P_2' の位置が定まったので、 P_2' をとおり、 $1/v_2$ なる傾斜の直線を描けば、 T_{2AD}' 及び T_{2BD}' が得られる。

今 5 で述べた事柄は境界面が傾斜していても通用する。但し下層に夾み層があったり、境界面が凹型であったりすると通用しない。通用する、しないと云つても、勿論それは程度問題で、実はその程度を知ることが一番大切である。これについては次節で、改めて考えてみたい。

6. method of differences の適用条件

6. 1 この条件は次の如く考えられている：

- i) 屈折波は境界面に沿って進む。
- ii) 境界面の凹凸は余り激しくない。

波動理論では屈折波の性質は未だ判っていない面が多い。境界面に凹凸がある場合の屈折波については、理論的には実は何も判っていない。但し、境界面の凹凸が波長に比し小であれば、多分境界面に沿って進む屈折波を考えても、大きな誤りは犯さぬであろう。この見地よりすれば、条件 i) には条件 ii) も必ず含まれていなければならぬ。

然し屈折法では実用が理論よりも先行している。理論の完成を待っている訳にもゆかぬ。そこで原理的な条件 i) をまず仮定し、計算誤差が大きくなりすぎる場合を条件 ii) で防ぐ方針が採られている。

走時解析の際には ray の経路だけが問題になる。波長と云った物理量は関係しない。故に“凹凸の激しさ”も波長とは関係ない。では何と較べて激しいかと云うと、実は甚だあいまいである。境界面と地表面となす角度を ω とするとき、 $\cos \omega \approx 1$ とみなせる程度を以って、“激しくない”の目やすにしている場合が多い。然し、pick up の間隔とか展開の長さと言った“長さ”の次元に対し、無次元の角度だけでは、実は“激しさ”を表わし得ないのである。

条件 ii) のみに限って云えば、計算の仕方によって、誤差を小さくすることができる。故に条件 i) を仮定すれば、条件 ii) の方は制限をかなりゆるくする。

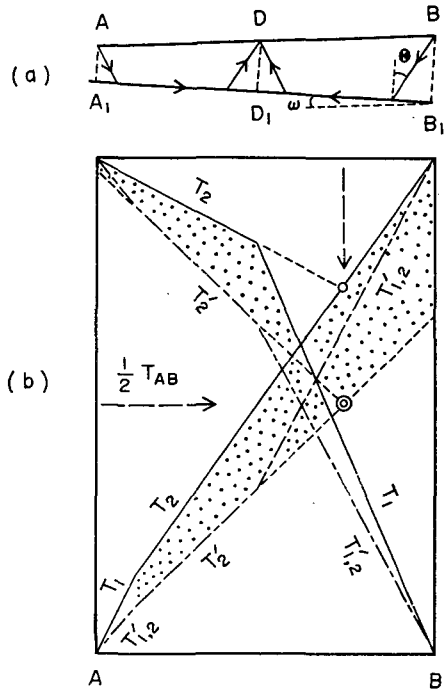
6. 2 Fig. 14(a) の如く、一様な傾斜 ω を持った境界面があるものとする。

屈折波の走時のみをとる扱うことにすれば、

$$T_{AD} = (AA_1 + DD_1) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 D_1}{v_2}, \tag{6.1}$$

$$T_{BD} = (BB_1 + DD_1) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{B_1 D_1}{v_2}. \tag{6.2}$$

一方、



第14図 一様な傾斜をしている境界面
Fig. 14. A boundary plane having uniform inclination ω .

$$DD_1 = AA_1 + AD \sin \omega = BB_1 - BD \sin \omega. \tag{6.3}$$

故に、(6.3)を(6.1)及び(6.2)に代入すると、

$$T_{AD} = 2 AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{AD}{v_1} \sin(\theta + \omega), \tag{6.4}$$

$$T_{BD} = 2 BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{BD}{v_1} \sin(\theta - \omega). \tag{6.5}$$

method of differences を行うために、(6.1)及び(6.2)に戻ると、

$$T_{AB} = (AA_1 + BB_1) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 B_1}{v_2}.$$

$$\therefore (e) \equiv \frac{1}{2}(T_{AD} + T_{BD} - T_{AB}) = DD_1 \frac{\cos \theta}{v_1}, \tag{6.6}$$

$$\left. \begin{aligned} T'_{AD} &\equiv T_{AD} - (e) = AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + AD \frac{\cos \omega}{v_2}, \\ T'_{BD} &\equiv T_{BD} - (e) = BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + BD \frac{\cos \omega}{v_2}. \end{aligned} \right\} \tag{6.7}$$

(6.7)の右辺で、変数は AD と BD とだけである。故に両式は何れも直線で、その傾斜は $\cos \omega / v_2$ である。Fig. 14(b)の T'_2 がこれらの直線に当たっている。

次に、(6.4)或は(6.5)と(6.7)とから、(6.6)の右辺の大きさを知ることができる。Fig. 14(b)の陰を施した部分がこれである。

ここ迄は近似計算を全然行っていない。若しも、(6.4)及び(6.5)の関係等から θ が知られ

るならば、 ω の大小に拘らず、正しい DD_1 を求めることができる。

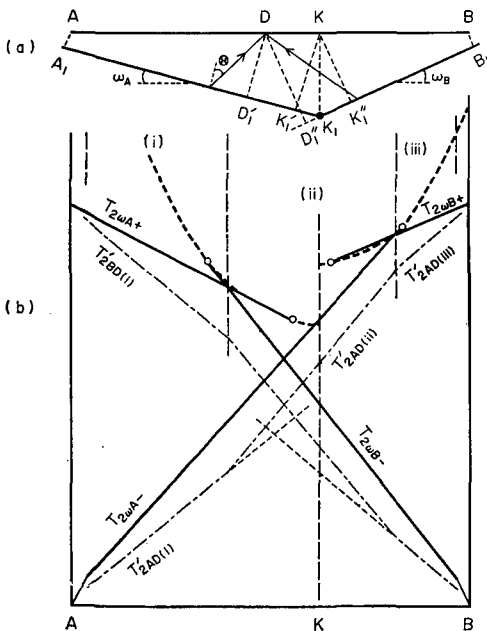
いくら傾斜が大きくても、その傾斜が一樣であれば、method of differences には何等の支障もない。

念のために A 及び B 点付近の T' 直線を調べてみると、次の如くである。

$$\left. \begin{aligned} T'_{1,2AD} &= AD \{1 + \sin(\theta - \omega)\} / (2v_1), \\ T'_{1,2BD} &= BD \{1 + \sin(\theta + \omega)\} / (2v_1). \end{aligned} \right\} \tag{6.8}$$

6.3 Fig. 15(a)の如き構造を考えると、6.2での考察により、屈折波の走時は Fig. 15(b)の太い実線の如くなる。○印は屈折波の存在限界を示している。太い点線は K_1 を 2 次的震源とする ray の走時である。

この図の屈折波の折れ曲り地点に着目し、



第15図 凹形の傾斜面

Fig. 15. Boundaries forming a concave surface.

AB 間を図に示した如き 3 区間に分けて、初動の走時の組合せを考えることにする。

AB 間の走時は、6.1 の仮定 i) により、

$$T_{AB} = (AA_1 + BB_1) \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 K_1 + K_1 B_1}{v_2}. \quad (6.9)$$

$$(i) \quad T_{AD} = AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 D'_1}{v_2} + DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1},$$

$$T_{BD} = BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{B_1 K_1 + K_1 D'_1}{v_2} + DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1}.$$

$$\therefore (e) \equiv \frac{1}{2}(T_{AD} + T_{BD} - T_{AB}) = DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1},$$

$$T'_{AD} \equiv T_{AD} - (e) = AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + AD \frac{\cos \omega_A}{v_2},$$

$$\begin{aligned} T'_{BD} \equiv T_{BD} - (e) &= BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{B_1 K_1 + K_1 D'_1}{v_2} \\ &= BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + KK_1 \frac{\sin \omega_A + \sin \omega_B}{v_2} + BK \frac{\cos \omega_B}{v_2} + KD \frac{\cos \omega_A}{v_2}. \end{aligned}$$

T'_{AD} 及び T'_{BD} の表現に含まれる諸量の中で、変動量は夫々 AD 及び KD だけである。故に T'_{AD} も T'_{BD} も直線で、それらの傾斜は同じく $\cos \omega_A / v_2$ である。

$$(ii) \quad T_{AD} = AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 D'_1}{v_2} + DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1},$$

$$T_{BD} = BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{B_1 D'_1}{v_2} + DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1}.$$

$$\therefore (e) = (DD'_1 + DD'_1) \frac{\cos \theta}{2v_1} - \frac{K_1 D'_1 - K_1 D'_1}{2v_2},$$

$$T'_{AD} = \text{constant} + (AD/2v_1) \{ \sin(\theta + \omega_A) + \sin(\theta + \omega_B) \},$$

$$T'_{BD} = \text{constant} + (BD/2v_1) \{ \sin(\theta + \omega_A) + \sin(\theta + \omega_B) \}.$$

T'_{AD} 及び T'_{BD} はやはり直線である。然し (e) の表現は複雑で、実用的でない。

$$(iii) \quad T_{AD} = AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 K_1 + K_1 D'_1}{v_2} + DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1},$$

$$T_{BD} = BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{B_1 D'_1}{v_2} + DD'_1 \frac{\cos \theta}{v_1}.$$

$$\therefore (e) = DD'_1 \cos \theta / v_1,$$

$$\begin{aligned} T'_{AD} &= AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{A_1 K_1 + K_1 D'_1}{v_2} \\ &= AA_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + KK_1 \frac{\sin \omega_A + \sin \omega_B}{v_2} + AK \frac{\cos \omega_A}{v_2} + KD \frac{\cos \omega_B}{v_2}, \end{aligned}$$

$$T'_{BD} = BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + \frac{B_1 D'_1}{v_2} = BB_1 \frac{\cos \theta}{v_1} + BD \frac{\cos \omega_B}{v_2}.$$

T'_{AD} も T'_{BD} も $\cos \omega_B / v_2$ なる傾斜を持った直線である。

以上の結果から、

(i) では

$$T_{AD} - T'_{AD} = T_{BD} - T'_{BD} = DD'_i \cos \theta / v_1,$$

(iii) では

$$T_{AD} - T'_{AD} = T_{BD} - T'_{BD} = DD'_i \cos \theta / v_1$$

により、 DD'_i 及び DD'_i を求めることができる。

これに反し、(ii) ではこの区間同志の $T - T'$ は極めて複雑な表現になり、実用価値がない。

然し、

$$T_{AD} \text{ (ii)} = T_{AD} \text{ (i)}, \quad T_{BD} \text{ (ii)} = T_{BD} \text{ (iii)}$$

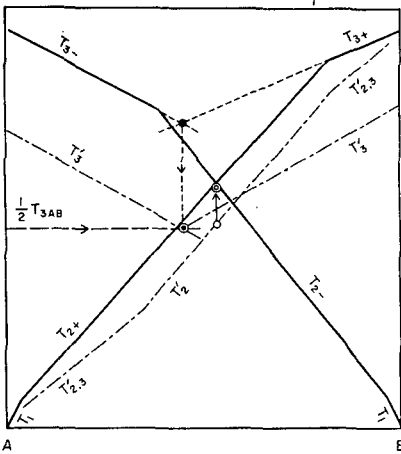
なる関係があるので、次の如き組合せにより、区間(ii)でも DD'_i 及び DD'_i を算出しよう。

$$T_{AD} \text{ (ii)} - T'_{AD} \text{ (i)} = DD'_i \cos \theta / v_1,$$

$$T_{BD} \text{ (ii)} - T'_{BD} \text{ (iii)} = DD'_i \cos \theta / v_1.$$

DD'_i は D 点から $A_i K_i$ 面におろした垂線の長さであり、 DD'_i は D 点から $B_i K_i$ 面におろした垂線の長さである。

以上の計算では近似は全然行っていない。この点だけについて云えば、6.1 の条件 ii) は不要である。然し T' 直線の使い分け方が複雑である点に、上述の解析法の難点がある。



第 16 図 前図(b)とは違った走時 plots の解釈

Fig. 16. Another interpretation of the time-distance plots shown in Fig. 15 (b).

かない。(7.2) の如く見誤るのはむしろ当然であろう。

(7.2) の如く見誤れば、 T'_2 直線の傾斜から $1/v_2$ を推定し、 $T_{2,3}$ 直線から $1/(2v_{2,3})$ を推定する結果になる。

7. 2 層か 3 層か ?

7.1 Fig. 15 (b) の初動の走時だけを抜き出して、Fig. 16 に示してみると、これは Fig. 15 (a) の構造によるものではなくて、大体は水平な 3 層構造を示している如くにも見える。実際には、図に示した如く、

$$\left. \begin{aligned} T_{2\omega A-} &\rightarrow T_{2+}, & T_{2\omega B-} &\rightarrow T_{2-}, \\ T_{2\omega A+} &\rightarrow T_{3-}, & T_{2\omega B+} &\rightarrow T_{3+}. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

のように見誤りやすい。

すると、 T' 直線の解釈も次の如く変る。

$$T'_{2AD} \text{ (ii)} \rightarrow T'_2, \quad T'_{2AD} \text{ (i)} \approx T'_{2AD} \text{ (iii)} \rightarrow T'_{2,3}. \quad (7.2)$$

ω_A と ω_B との差が小さいと、 $T'_{2AD} \text{ (i)}$ の傾斜と $T'_{2AD} \text{ (iii)}$ の傾斜との違いは、実質上は全く区別がつかない。

Fig. 15 では v_1/v_2 を実は $1/2$ と仮定して図が描かれている。然し、(7.2) の如き誤った解釈では、Fig. 16 から次の結果をうる。

$$v_1 = 5, \quad v_2 = 9$$

の他に、

$$2v_{2,3} = 12.$$

$$\therefore 1/v_3 = 1/6 - 1/9 = 1/18$$

すなわち

$$v_3 = 18.$$

故に本来は v_1 及び v_2 層だけしかなかったにも拘らず、(7.2) の解釈では $v_1:v_2:v_3=5:9:18$ の3層が存在してしまうことになる。

7.2 若しも (7.1) の如き解釈をすれば、この線に沿って、 v_2 層の厚さを算出することができる。

Fig. 16 の T'_2 直線の交点 \odot は、 T_{AB} の定義にさかのぼって考えれば、 $\{(T_{2AB} - T_{3AB}) + (T_{2BA} - T_{3AB})\}/4$ だけ上方に移動し、 \odot 印の位置に来るべきである。この点については、後に実例について詳述する。今の計算例では、これは T_2 の交点と殆んど一致している。

v_1 層の厚さは $T_2 - T'_2$ に比例するので、今の例では、 v_1 層の厚さは 0 に近い。

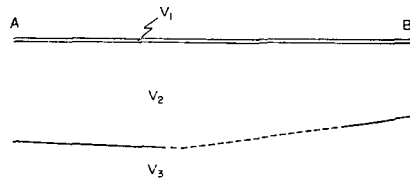
v_2 層の厚さを求めるためには、図に示した作図により、 T'_3 直線の交点 \odot を求める。この点を通して $1/v_3$ の傾斜を持つ直線を描けば、これが T'_3 直線である筈である。この論法は、5 で述べた如く、 v_3 層の上面が大体は水平とみなせないと通用せぬが、(7.1) の解釈は既にその仮定を許している。 T'_3 直線の位置が確定すれば、Fig. 16 の $T_{3-} - T'_3$ 及び $T_{3+} - T'_3$ が $H_2 \cos \theta_{2,3}/v_2$ を与える。

Fig. 15 (a) と同じ数値を用いて、(7.2) の解釈による地下構造を算出し、同じ目盛で示すと Fig. 17 の実線の如くなる。これは元の地下構造である Fig. 15 (a) とは全然違っている。

全く同じ初動の走時 plot から出発しても、解析結果はかくの如く甚だしく違ふことがありうる。極めておそろしいことである。

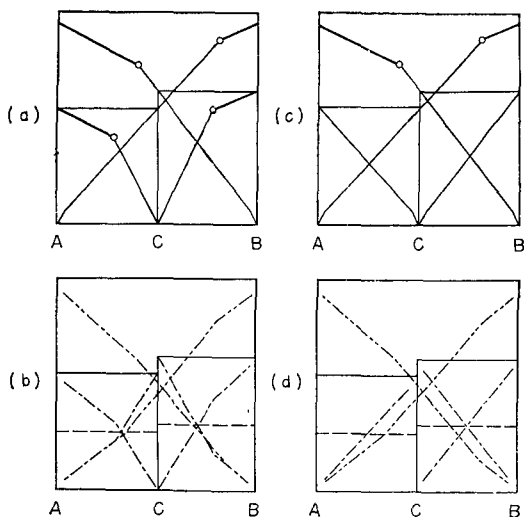
7.3 Fig. 15 (b) に示した如き初動の走時だけでは、Fig. 15 (a) 又は Fig. 17 のいずれが正しい地下構造であるかの判定はつかぬ。

初動以後の phase も読み取れたと仮定してみよう。Fig. 15 (a) の地下構造に対しては、太い点線で示した phase があるに反し、Fig. 17 の地下構造に対しては、この phase はない。然し後者では前者と違って、 T_2 の存在領域に制限がない。故に T_3 の後に来る走時 plot の傾斜



第17図 前図の解釈により逆算した地下構造

Fig. 17. Subsurface constructions deduced from Fig. 16.



第18図 走時曲線の比較

Fig. 18. Comparison of time-distance plots from C for Fig. 15 (a) to that for Fig. 17.

が $1/v_1$ か $1/v_2$ かの区別ができぬと, Fig. 15 (a) が正しいか Fig. 17 が正しいかの判定はつかぬ。
 実際問題としては, Fig. 15 (a) か Fig. 17 かの判定を, 今述べた $1/v_1$ か $1/v_2$ かの区別のみを期待するのは甚だ危険である。
 若しも発破点 A, B の他に, その中間に更に発破点 C があれば, Fig. 15 (a) の構造に対しては, C から始まる走時は Fig. 18 (a) の $T_{C \rightarrow A}$ 及び $T_{C \rightarrow B}$ の如くなる。これに対し, Fig. 17 の構造に対しては Fig. 18 (c) の $T_{C \rightarrow A}$ 及び $T_{C \rightarrow B}$ の如くなる。

Fig. 18 (a) では, 折れ曲り点 O の距離座標は, 新しい発破点 C から始まる走時についても, 元の距離座標と大きな変りはない。

これに反し Fig. 18 (c) では, C 点から始まる走時の折れ曲り点は, 元の折れ曲り点の位置とは全然はずれてしまう。Fig. 18 (c) では図の外に出てしまう。Fig. 18 の (a) と (c) とが最も異なるのは今述べた点についてである。

このことは, C 点が AB の中間ではなくて, AB の外側にあっても, 今の場合と同じ事情である。

こまかく見れば, Fig. 18 (a) では C 点から折れ曲り点 O 迄 T_1 が長くつゞくのに対し, Fig. 18 (c) では C 点から始まる T_1 は A 及び B から始まる T_1 の長さと大体同じで長くない。

A 及び B 点から始まる走時 plot の他に, C 点から始まる走時 plot があれば, Fig. 15 (a) と Fig. 17 との区別を予めつけることができる。

7.4 走時解析の見地から最も大切なのは, 然し, 今述べた両者の見分け方でもなければ, 況んや 6.3 で述べた Fig. 15 (a) の算出方法でもない。

何等の先入感なしに, 器械的に method of differences を行った場合に, いかなる危険がどの様に存在するかを知っていることが最も大切である。

実際問題としては, Fig. 15 (b) の T'_{AD} (ii) 部分が T'_{AD} (i) 及び T'_{AD} (iii) 部分に較べて短かければ, 厄介な問題は起らぬ。実測値では T'_{AD} (i) の傾斜と T'_{AD} (iii) の傾斜とは区別できぬ場合が多いであろう。然し敢えて見分ける必要もない。

上述の事柄を量的に調べるために, 折れ曲り点と K 点との間の距離を, $T_{2\omega B}$ 及び $T_{2\omega A}$ の存在限界 O と K 点との間の距離,

$$KK_1 \tan(\theta + \omega_A) \text{ 及び } KK_1 \tan(\theta + \omega_B)$$

で近似する。但し、

$$\begin{aligned}
 KK_1 &= AA_1 \sec \omega_A + AK \tan \omega_A \\
 &= BB_1 \sec \omega_B + BK \tan \omega_B.
 \end{aligned}$$

故に T'_{AD} (ii) が短く見えるための条件は

$$KK_1 \{ \tan(\theta + \omega_A) + \tan(\theta + \omega_B) \} \ll AB.$$

若しも

$$\omega = \omega_A \approx \omega_B$$

とすれば、この不等式は次の如く書かれる。

$$(AA_1 + BB_1) \sec \omega \ll AB \{ \cot(\theta + \omega) - \tan \omega \}.$$

右辺の係数は Fig. 19 の如き数値である。この係数が 0.5 よりも大きく、且つ $(AA_1 + BB_1) \sec \omega < 20 AB$ であれば、 T'_{AD} (ii) の現われる区間の長さは (i)+(ii) 区間の長さの約 1/10 になる。かくの如き場合には、区間 (ii) を無視して普通の method of differences を行っても、解析結果の大勢に影響はない。

8. 傾斜した 3 層構造

8.1 前の 2 節で傾斜層を扱ったついでに、傾斜した 3 層構造に対する走時にちよっと触れておく。

$$\begin{aligned}
 \sin \theta_{1,2} &= v_1/v_2, & \sin \theta_{1,3} &= v_1/v_3, \\
 \sin \theta_{2,3} &= v_2/v_3 & & (8.1)
 \end{aligned}$$

及び

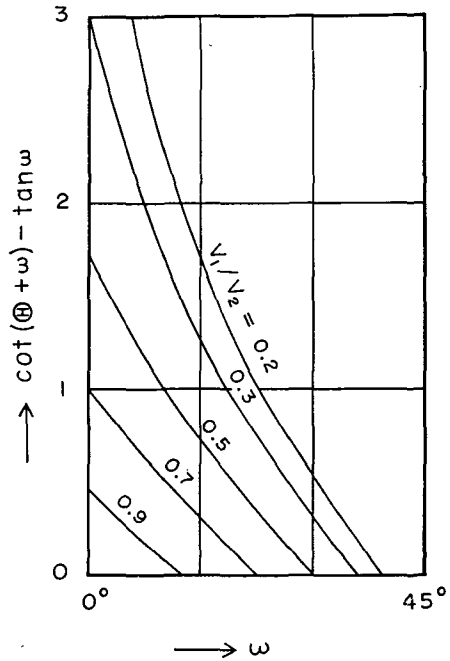
$$\sin i_1^-/v_1 = \sin(\theta_{2,3} - \omega_2)/v_2, \quad \sin i_1^+/v_1 = \sin(\theta_{2,3} + \omega_2)/v_2 \quad (8.2)$$

とおくと、Fig. 20 において、

$$\begin{aligned}
 T_{AA_1A_2''} &= AA_1 \frac{\cos i_1^-}{v_1} + A_1 A_1' \frac{\sin i_1^-}{v_1} + A_1' A_2' \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{A_2' A_2''}{v_3} \\
 &= AA_1 \frac{\cos i_1^-}{v_1} + A_1 A_2 \frac{\cos \theta_{2,3}}{v_2} + \frac{A_2 A_2''}{v_3}.
 \end{aligned}$$

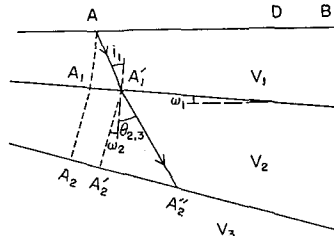
これは v_3 層の上面に沿って進む屈折波の delay time である。delay time を用いれば、簡単に次式が得られる。

$$T_{3AD} = (AA_1 \cos i_1^- + DD_1 \cos i_1^+)/v_1 + (A_1 A_2 + D_1 D_2) \cos \theta_{2,3}/v_2 + A_2 D_2/v_3,$$



第 19 図 数値図

Fig. 19. $\cot(\theta + \omega) - \tan \omega$, θ being $\sin^{-1}(v_1/v_2)$.



第 20 図 半無限媒質の上に傾斜した 2 層がのっている場合

Fig. 20. Two inclined layers overlying a half space.

$$T_{3BD} = (BB_1 \cos i_1^+ + DD_1 \cos i_1^-)/v_1 + (B_1B_2 + D_1D_2) \cos \theta_{2,3}/v_2 + B_2D_2/v_3,$$

$$T_{3AB} = (AA_1 \cos i_1^- + BB_1 \cos i_1^+)/v_1 + (A_1A_2 + B_1B_2) \cos \theta_{2,3}/v_2 + A_2B_2/v_3.$$

T_3 の傾斜を求めるために、 T_{3AD} について更に計算を進めると次の如くなる。

$$\begin{aligned} T_{3AD} &= \{AA_1 \cos i_1^- + (AA_1 + AD \sin \omega_1) \cos i_1^+\}/v_1 \\ &\quad + (2AA_1 + A_1D_1 \sin \omega_2) \cos \theta_{2,3}/v_2 + A_1D_1 \cos \omega_2/v_3 \\ &= AA_1 (\cos i_1^- + \cos i_1^+)/v_1 + 2A_1A_2 \cos \theta_{2,3}/v_2 \\ &\quad + AD \sin \omega_1 \cos i_1^+/v_1 + A_1D_1 \sin (\theta_{2,3} + \omega_2)/v_2 \\ &= AA_1 (\cos i_1^- + \cos i_1^+)/v_1 + 2A_1A_2 \cos \theta_{2,3}/v_2 \\ &\quad + AD \sin (i_1^+ + \omega_1)/v_1 \end{aligned}$$

同様にして、

$$T_{3BD} = BB_1 (\cos i_1^- + \cos i_1^+)/v_1 + 2B_1B_2 \cos \theta_{2,3}/v_2 + BD \sin (i_1^- - \omega_1)/v_1.$$

T_{3AD} も T_{3BD} も直線で、傾斜は夫々 $\sin (i_1^+ + \omega_1)/v_1$ 及び $\sin (i_1^- - \omega_1)/v_1$ である。

若しも地層の傾斜が Fig. 20 とは逆の場合は上式の ω_1 又は ω_2 の符号を逆にすればよい。

8. 2 method of differences では、

$$(e_3) \equiv \frac{1}{2}(T_{3AD} + T_{3BD} - T_{3AB}) = DD_1 (\cos i_1^+ + \cos i_1^-)/(2v_1) + D_1D_2 \cos \theta_{2,3}/v_2.$$

又

$$\begin{aligned} T'_{3AD} &= AA_1 \cos i_1^-/v_1 + A_1A_2 \cos \theta_{2,3}/v_2 \\ &\quad + DD_1 (\cos i_1^+ - \cos i_1^-)/(2v_1) + AD \cos \omega_1 \cos \omega_2/v_3. \end{aligned}$$

然るに、(8.2) から次の関係が得られる。

$$\frac{1}{v_1} = \frac{\sin (\theta_{2,3} + \omega_2)}{v_2 \sin i_1^+} = \frac{\sin (\theta_{2,3} - \omega_2)}{v_2 \sin i_1^-} = \frac{2 \sin \theta_{2,3} \cos \omega_2}{v_2 (\sin i_1^+ + \sin i_1^-)}.$$

$$\therefore \frac{1}{2v_1} = \frac{\cos \omega_2}{v_3 (\sin i_1^+ + \sin i_1^-)}. \quad (8.3)$$

これと、

$$DD_1 = AA_1 + AD \sin \omega_1 = BB_1 - BD \sin \omega_1$$

とを用いると、

$$\begin{aligned} T'_{3AD} &= AA_1 (\cos i_1^+ + \cos i_1^-)/(2v_1) + A_1A_2 \cos \theta_{2,3}/v_2 \\ &\quad + AD \cos \omega_2 \{[\sin (i_1^+ + \omega_1) + \sin (i_1^- - \omega_1)]/(\sin i_1^+ + \sin i_1^-)\}/v_3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T'_{3BD} &= BB_1 (\cos i_1^+ + \cos i_1^-)/(2v_1) + B_1B_2 \cos \theta_{2,3}/v_2 \\ &\quad + BD \cos \omega_2 \{[\sin (i_1^+ + \omega_1) + \sin (i_1^- - \omega_1)]/(\sin i_1^+ + \sin i_1^-)\}/v_3. \end{aligned}$$

ここで求めた (e_3) 及び T_3 の表現式は余り実用的でない。然し method of differences を使いつこなすためには、この程度の知識を準備しておくことが必要である。

III. T' 直線の飛び

既に I で指摘した如く、生の走時 plot である T 曲線に比し、 T' 曲線は著しく平坦化される。その結果、地下構造の微細な情報は T' 曲線からは得られぬ。method of differences は恰も low pass filter の如き作用をする。

元来、 T' 曲線は走時解析のための単なる補助曲線に過ぎなかった。然し、low pass filter の見地に立てば、走時解析の初期においては、 T 曲線よりもむしろ T' 曲線の方が主役になりうる。走時解析の第 1 段階では、地下構造の微細な変化に捕われることなく、測定区域の大局的な構造モデルを推定することが最も大切であるからである。

但し、 T' 曲線の用途をそこ迄引き上げるためには、filter としての T' 曲線の特徴を十分に心得ておく必要がある。予想されるあらゆる input 波形 (T 曲線) に対する response を調べておくのは無理である。

今回の測定結果を処理するために是非必要であった考察は I に述べてある。その際に判った最も顕著な事柄の 1 つは、Fig. 11 (b) では T'_m 直線は jump せず、Fig. 15 (b) では T' 直線が jump することである。服部保正¹⁾はこの事柄を“ T' 直線が復元する、しない”と述べている。 T'_m 直線が復元する場合は、 T' 曲線は全般的には単純な形になる。このことこそ T' 曲線の最も著しい性質である。 T'_m 直線が復元しない場合は、 T' 曲線は全般的にも複雑な形になる。

T' 曲線が単純か複雑かの岐れ路の 1 つは、 T'_m 直線が復元する地下構造か否かである。 T'_m 直線が復元しない地下構造に対しては、method of differences の用い方がむずかしい。

T'_m 直線の jump と云う点で、I で考察し残したことを、ここでいくつか補っておく。

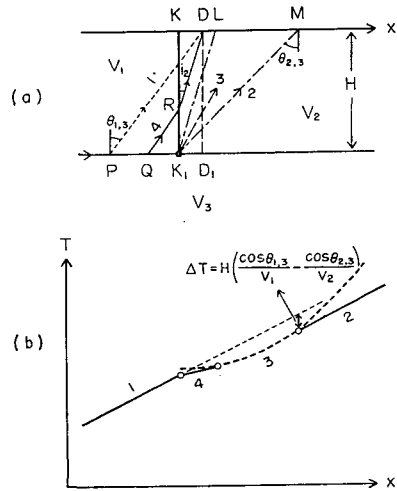
9. 最表層にある夾み層: $v_1 < v_2 < v_3$

9.1 Fig. 21 (a) に示した構造で、左端の矢印で示した conical wave から期待される種々の波線を考える。

v_2 層がなければ、期待される波線は ray 1 だけである。図の如く、 KK_1 に境界があると、初動になりうる ray として、ray 1 の他に rays 2, 3 及び 4 を考えねばならぬ。

これらの波線の方向は、次式で与えられる角度によって決まる。

$$\sin \theta_{1,3}/v_1 = \sin \theta_{2,3}/v_2 = 1/v_3 \text{ 及び } \cos \theta_{1,3}/v_1 = \cos \theta_{2,3}/v_2 .$$



第 21 図 表層が水平方向に不連続な場合 その 1

Fig. 21. The time-distance relation (b) of several rays indicated in (a). $v_1 < v_2 < v_3$.

これらの関係を用いて、種々の ray の走時 T の比較を試みる。

$$\begin{aligned}
 \text{i) } T_{PQRD} &\equiv \overline{PK_1}/v_3 + \overline{K_1R} \cos \theta_{1,3}/v_1 + \overline{RK} \cos i_2/v_2 + \overline{KD} \sin i_2/v_2 \\
 &= \overline{PK_1}/v_3 + H \cos \theta_{1,3}/v_1 + \overline{KD} \sin i_2/v_2, \\
 T_{PD} &\equiv \overline{PD}/v_1 = \overline{PD_1}/v_3 + H \cos \theta_{1,3}/v_1. \\
 \therefore T_{PD} - T_{PQRD} &= \overline{KD} (\sin \theta_{2,3} - \sin i_2)/v_2.
 \end{aligned}$$

$D \rightarrow K$ になれば、 $T_1 \equiv T_{PD}$ と $T_4 \equiv T_{PQRD}$ とは等しい。

T_4 は \overline{KD} の増加と共に直線的に増す。 T_4 直線の傾斜は $\sin i_2/v_2 > 0$ であって、負にはならぬ。

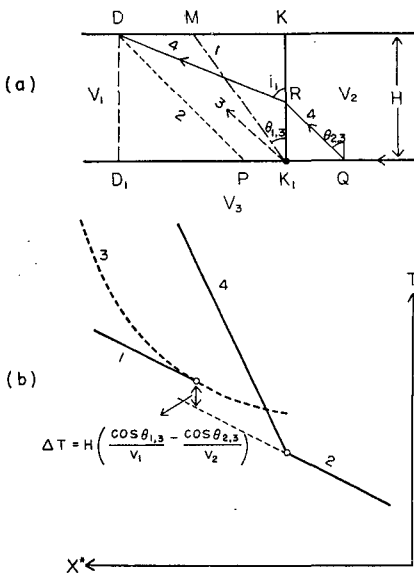
ii) ray 4 が地表で観測されるのは、KL 区間だけであって、Q 点が K_1 に到着すると ray 4 は消え、その代りに K_1 を 2 次震源とする球面波の一部 ray 3 が生じる。ray 3 の走時は $1/v_2$ なる傾斜を有する直線を漸近線とする双曲線である。但し、 $T_3(x=L) = T_4(x=L)$ であって、この双曲線の頂点は $x=K$ の位置にある。

iii) M 点より右方では ray 2 が加わる。ray 2 の傾斜は $1/v_3$ であって、ray 1 の傾斜に等しい。又 $T_2(x=M) = T_3(x=M)$ である。

T_1 を右方に延長し、 T_2 との差を計算すると、

$$T_1(x=M) - T_2(x=M) = H(\cos \theta_{1,3}/v_1 - \cos \theta_{2,3}/v_2) = H(\cos i_2 - \cos \theta_{2,3})/v_2 > 0.$$

以上の考察結果を図にまとめると、Fig. 21 (b) になる。



第 22 図 表層が水平方向に不連続な場合 その 2

Fig. 22. The time-distance relation (b) of several rays indicated in (a). $v_1 < v_2 < v_3$.

$T_2(x=M)$ は必ず $T_1(x=K)$ よりも大きい。この点、多くの教科書の図も服部保正 (Fig. 2. 6)¹⁾ の図も間違っている。

9. 2 Fig. 21 (a) と同じ地下構造であるが、conical wave が前とは逆に Fig. 22 (a) の右端の矢印の方向から来た場合を考える。

v_1 層がなければ、期待される波線は ray 2 だけである。図の如く境界 KK_1 があると、初動になりうる ray として、ray 2 の他に rays 1, 3 及び 4 を考えねばならぬ。

これらの波線の方法は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \sin \theta_{1,3}/v_1 &= \sin \theta_{2,3}/v_2 = 1/v_3 \text{ 及び} \\
 \cos i_1/v_1 &= \cos \theta_{2,3}/v_2.
 \end{aligned}$$

$$\text{i) } T_{QRD} \equiv \overline{QK_1}/v_3 + H \cos \theta_{2,3}/v_2 + \overline{KD} \sin i_1/v_1.$$

右辺の諸量の中で、測定点 D を動かした場合に変化するのは \overline{KD} だけである。故に T_{QRD} は

x^* に対して直線で、その傾斜は $\sin i_1/v_1$ である。

$x^*=K$ では T_2 と $T_4 \equiv T_{QRD}$ とは一致する。ray 4 には存在限界があるが、限界はこの図でははるか左方である。

ii) Q 点が K_1 点迄来ると、 K_1 点を 2 次的震源とする球面波が生まれる。その一部が ray 3 であって、これの走時は $1/v_1$ の傾斜をもつ直線を漸近線とする双曲線である。その頂点の位置は $x^*=K$ にある。

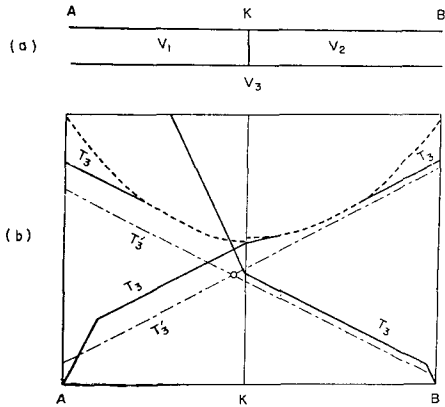
iii) M 点より左方では ray 1 が加わる。これの走時は $1/v_3$ なる傾斜の直線である。

$x^*=M$ では T_1 と T_3 とは一致し、

$$\begin{aligned} T_1(x^*=M) - T_2(x^*=M) &= H(\cos \theta_{1,3}/v_1 - \cos \theta_{2,3}/v_2) \\ &= H(\cos \theta_{1,3} - \cos i_1)/v_1 > 0. \end{aligned}$$

この走時差は Fig. 21 の場合の走時差に等しい。

9.3 Fig. 21 と Fig. 22 とを 1 枚の図にまとめると、Fig. 23 の如くなる。添字の用法は前の図とは変えてある。



第 23 図 前 2 図 の 総 合

Fig. 23. The time-distance relation compiled from Figs. 21 and 22. $v_1 < v_2 < v_3$.

Fig. 23 の T_2 部の走時だけを計算すると、次の如くなる。

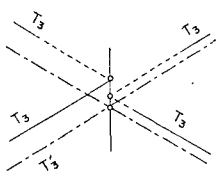
$$T_{3AD} = \frac{H_A \cos \theta_{1,3}}{v_1} + H \cdot \frac{\cos \theta_{1,3}/v_1 + x/v_3}{\cos \theta_{2,3}/v_2} \text{ for } x \leq \overline{AK},$$

$$T_{3BD} = \frac{H_B \cos \theta_{2,3}}{v_2} + H \cdot \frac{\cos \theta_{1,3}/v_1 + x^*/v_3}{\cos \theta_{2,3}/v_2} \text{ for } x^* \geq \overline{BK}.$$

$$\therefore T_{3AD} - T'_{3AD} = H \cdot \frac{\cos \theta_{1,3}/v_1}{\cos \theta_{2,3}/v_2} \text{ for } x \leq \overline{AK},$$

$$T'_{3AD} = H_A \cos \theta_{1,3}/v_1 + x/v_3 \text{ for } x \leq \overline{AK}.$$

すなわち、 T'_{3AD} 直線は、図に鎖線で示してある如く、jump しない。



第 24 図 T_3 直線の交点と T'_3 直線の交点との関係

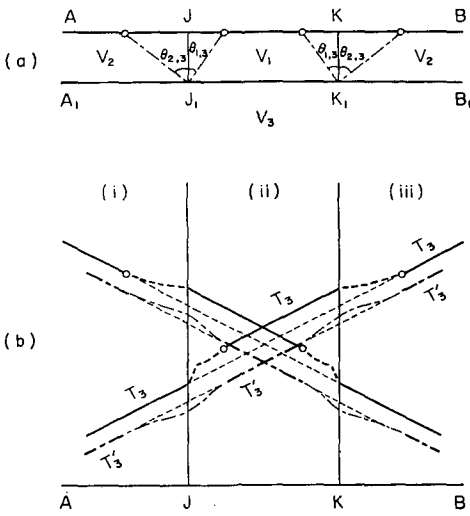
Fig. 24. Points of intersection for T_3 and for T'_3 .

T_3 直線の交点の位置と、 T'_3 直線の交点の位置との関係は Fig. 24 の如くである。

Fig. 25 に示した如く、Fig. 23 (a) の v_1 層の左側に再び v_2 層があっても、前の場合と同じ事情で、 T'_3 は依然として jump しない。

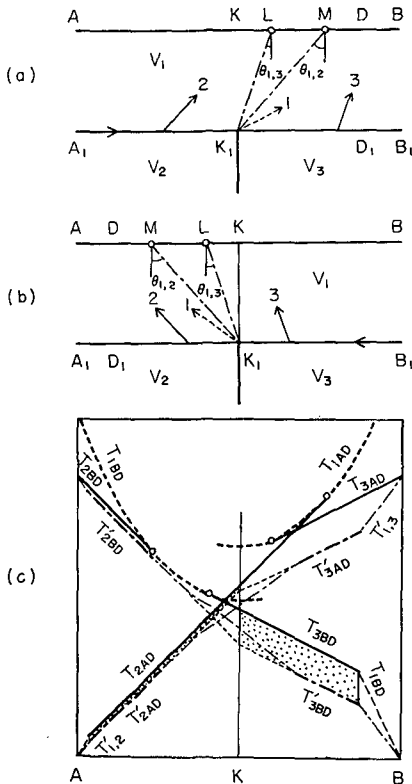
10. 下層にある夾み層: $v_1 < v_2 < v_3$.

10.1 Fig. 26 (a) の地表 AB 上の任意の観測点 D で、初動近くに観測される可能性のある ray を考える。conical waves である rays 2 及び 3 の他に、 K_1 点を 2 次的震源とする球面波の一部である ray 1 が考えられる。



第 25 図 表層に夾み層がある場合

Fig. 25. An inserted layer in the most superficial layer. $v_1 < v_2 < v_3$.



第 26 図 下層が水平方向に不連続な場合

Fig. 26. The time-distance relation (c) of several rays indicated in (a) and (b). $v_1 < v_2 < v_3$.

$$\sin \theta_{1,2} = v_1/v_2, \quad \sin \theta_{1,3} = v_1/v_3$$

とおくと、M 点より右方には ray 2 は存在せず、L 点より左方には ray 3 は存在しない。

各 ray の走時は次の如くである。

$$\text{ray 1: } T_{1AD} = \overline{AA_1} \cos \theta_{1,2}/v_1 + \overline{A_1K_1}/v_2 + (\overline{KK_1}^2 + \overline{KD}^2)^{1/2}/v_1,$$

$$\text{ray 2: } T_{2AD} = \overline{AA_1} \cos \theta_{1,2}/v_1 + \overline{A_1D_1}/v_2 + \overline{DD_1} \cos \theta_{1,2}/v_1,$$

$$\text{ray 3: } T_{3AD} = \overline{AA_1} \cos \theta_{1,2}/v_1 + \overline{A_1K_1}/v_2 + \overline{K_1D_1}/v_3 + \overline{DD_1} \cos \theta_{1,3}/v_1.$$

$$\overline{AD} = \overline{AM} \text{ では,}$$

$$(T_{1AD} - T_{2AD})_M = 0,$$

$$\overline{AD} = \overline{AL} \text{ では,}$$

$$(T_{1AD} - T_{3AD})_L = 0,$$

$$\overline{AD} = \overline{AK} \text{ では,}$$

$$(T_{1AD} - T_{2AD})_K = \overline{KK_1} (1 - \cos \theta_{1,2})/v_1 > 0,$$

$$(T_{1AD} - T_{3AD})_K = \overline{KK_1} (1 - \cos \theta_{1,3})/v_1 > 0.$$

以上の結果を図にすると、Fig. 26 (c) の T_{AD} の如くなる。

Fig. 26 (b) についても、(a) 図と同様な考察を繰返すと (c) 図の T_{BD} が得られる。

method of differences では、

$$T_{AB} = \overline{AA_1} \cos \theta_{1,2}/v_1 + \overline{BB_1} \cos \theta_{1,3}/v_1 + \overline{AK}/v_2 + \overline{BK}/v_3,$$

$$(e_2) \equiv \frac{1}{2} (T_{2AD} + T_{2BD} - T_{AB}) = \overline{DD_1} \cos \theta_{1,2}/v_1,$$

$$(e_3) \equiv \frac{1}{2} (T_{3AD} + T_{3BD} - T_{AB}) = \overline{DD_1} \cos \theta_{1,3}/v_1.$$

$$T'_{2AD} \equiv T_{2AD} - (e_2) = \overline{AA_1} \cos \theta_{1,2}/v_1 + \overline{AD}/v_2,$$

$$T'_{3AD} \equiv T_{3AD} - (e_3) = \overline{AA_1} \cos \theta_{1,2}/v_1 + \overline{AK}/v_2 + \overline{KD}/v_3.$$

Fig. 26 (c) の鎖線が T' 曲線であって、蔭を施

した部分は夫々(e_2)及び(e_3)である。

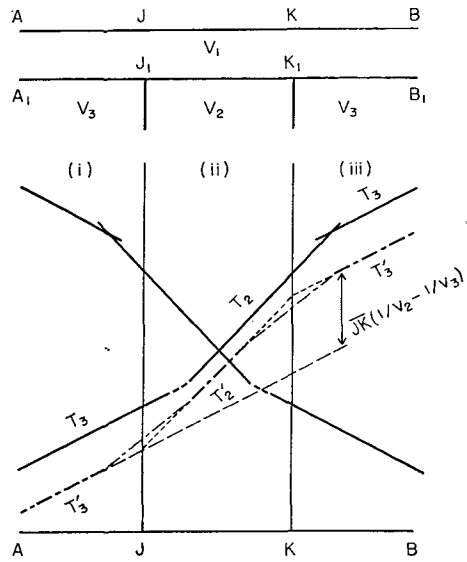
T の図では (a) 及び (b) 図の K 点の位置は全然判らぬのに反し, T' の図では T'_2 直線と T'_3 直線との交点が K 点の位置になっている。

10.2 Fig. 27 (a) の如く, 下層に速度の小さい夾み層がある場合を考える。

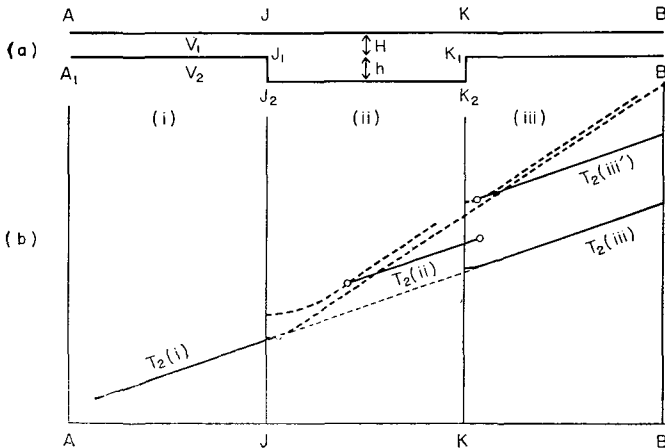
v_2 層と v_3 層との境界面の 1 つ 1 つについて, Fig. 26 に対して行った考察を繰返せば, Fig. 27(b) が得られる。

この図の T'_3 直線が jump している点に注目すべきである。Fig. 11 では $T'(ii)$ と $T'(vi)$ とは jump しなかった。両者の違いを明らかにするために, Fig. 28(a) について調べてみる。

再び (2.6) の近似を用いると, conical wave として地表に到着する ray の走時は次の如く書ける。



第 27 図 下層に低速の夾み層がある場合
Fig. 27. A low velocity layer inserted in a lower half space. $v_1 < v_2 < v_3$.



第 28 図 溝がある場合の走時図

Fig. 28. The time-distance relation for a ditch.

$$T_{2AD}(i) \equiv \overline{AA_1} + H \cos \theta / v_1 + \overline{AD} / v_2,$$

$$T_{2AD}(ii) \equiv \overline{AA_1} / v_1 + (H+h) \cos \theta / v_1 + \overline{A_1J_2} / v_2 + \overline{J_2D_1} / v_2,$$

$$T_{2AD}(iii) \equiv \overline{AA_1} / v_1 + H / v_1 + \overline{A_1J_2} / v_2 + \overline{J_2K_2} / v_2 + \overline{K_2D_1} / v_2.$$

曾って 2.3 で行った考察によれば,

$$T_{2AD}(i) - T_{3AD}(iii) \approx 0, \quad T_{2AD}(ii) - T_{2AD}(iii) \approx h \cos \theta / v_1.$$

Fig. 28(a) の構造では, 以上の ray の他に, J_1 及び J_2 を 2 次的震源, 又 K_1 を 3 次的震源

として発生する ray が考えられる。

$$\begin{aligned} T_{JD}; J_1 &\equiv (\overline{JD}^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}/v_1, \\ T_{JD}; J_2 &\equiv \{\overline{JD}^2 + (H+h)^2\}^{\frac{1}{2}}/v_1, \\ T_{1KD}; K_1 &\equiv (\overline{KD}^2 + H^2)^{\frac{1}{2}}/v_1, \\ T_{2KD}; K_1 &\equiv \overline{KD}/v_2 + H \cos \theta/v_1. \end{aligned}$$

これらの中で最後の走時は再び conical wave の走時になっていて、A 点からの走時になおすと、

$$T_{2AD} \text{ (iii')} \equiv (\overline{AA}_1 + H) \cos \theta/v_1 + \overline{JK}/v_1 + (\overline{AJ} + \overline{KD})/v_2.$$

J 点及び K 点における走時差は次の如く計算される。

$$\begin{aligned} (T_{1KD}; K_1 - T_{JD}; J_1)_{JK} &= \{\overline{JK}_1 + \overline{KK}_1 - (\overline{JK}_1^2 + \overline{KK}_1^2)^{\frac{1}{2}}\} v_1^{-1} \\ &\approx \{\overline{JK} \cdot H / (\overline{JK} + H)\} v_1^{-1}, \end{aligned}$$

$$\{T_{JD}; J_1 - T_{2AD} \text{ (i)}\}_J = \{T_{1KD}; K_1 - T_{2AD} \text{ (iii')} \}_K = H(1 - \cos \theta)/v_1.$$

以上の結果を図にまとめると、Fig. 28 (b) の如くなる。

T_{BD} の方は今調べた T_{AD} の種々な表現の中で、A と B 及び J と K を入れ代えればよい。

Fig. 28 (b) の $T_2 \text{ (i)} \rightarrow T_2 \text{ (iii)}$ は Fig. 11 (b) の $T_2 \text{ (ii)} \rightarrow T_2 \text{ (vi)}$ に対応していて、 $T_2' \text{ (i)}$ 直線と $T_2 \text{ (iii)}$ 直線とは一致する。これに反し、Fig. 28 (b) の $T_2 \text{ (i)} \rightarrow T_2 \text{ (iii')}$ は Fig. 27 (b) の $T_3 \text{ (i)} \rightarrow T_3 \text{ (iii)}$ に対応していて、 $T_2' \text{ (i)}$ 直線と $T_2' \text{ (iii')}$ 直線とは平行ではあるがずれる。

Fig. 28 (a) で、若しも $h \gg \overline{JK}$ であれば $T_{2AD} \text{ (iii)}$ は測定されず、Fig. 27 の $T_3' \text{ (iii)}$ に対応する $T_{2AD} \text{ (iii')}$ が測定されるだけである。

10.3 初動の走時 plot から夾み層の存在が確認されるか否かが屢々問題になる。

Fig. 27 に戻って、このことを調べてみる。

$$\begin{aligned} T_{3AD} \text{ (i)} &\equiv \overline{AA}_1 \cos \theta_{1,3}/v_1 + \overline{AD}/v_3 + H \cos \theta_{1,3}/v_1, \\ T_{2AD} \text{ (ii)} &\equiv \overline{AA}_1 \cos \theta_{1,3}/v_1 + \overline{AJ}/v_3 + \overline{JD}/v_2 + H \cos \theta_{1,2}/v_1, \\ T_{3AD} \text{ (iii)} &\equiv \overline{AA}_1 \cos \theta_{1,3}/v_1 + (\overline{AJ} + \overline{KD})/v_3 + \overline{JK}/v_2 + H \cos \theta_{1,3}/v_1. \end{aligned}$$

T_{BD} についても、これらと同様の表現が得られる。

$T_{3AD} \text{ (i)}$ 及び $T_{3AD}' \text{ (i)}$ を領域 (iii) 迄このまま延長すると、

$$(e_3) = H \cos \theta_{1,3}/v_1, \quad (e_2) = H \cos \theta_{1,2}/v_1$$

であって、

$$T_{3AD}' \text{ (iii)} - T_{3AD}' \text{ (i)} = T_{3AD} \text{ (iii)} - T_{3AD} \text{ (i)} = \overline{JK} (1/v_2 - 1/v_3).$$

T と較べると、 T' のばらつきは小さいので、上式の左辺の測定精度は 2×10^{-3} s はあるものと考えられる。

故に、

$$\overline{JK} (1/v_2 - 1/v_3) \xrightarrow{v_2 \ll v_3} \overline{JK}/v_2 > 2 \times 10^{-3} \text{ s}$$

ならば、 v_2 層が検出される。すなわち

$$v_2 = 10 \times 10^2 \text{ m/s} \text{ ならば } \overline{JK} > 2 \text{ m}$$

$$v_2 = 5 \times 10^2 \text{ m/s} \text{ ならば } \overline{JK} > 1 \text{ m}$$

でなければならぬ。破碎帯等の実際問題に対しては、これらの数値は少々苦しい。然し実際にあり得ぬ数値ではない。

$T'_{3AD}(\text{iii}) - T'_{3AD}(\text{i})$ の精度を良くするためには、 $T_3(\text{i})$ 部及び $T_3(\text{iii})$ 部が夫々十分に長い区間にわたって測定されていなければならぬ。破碎帯等では、又次の夾み層に邪魔されて、長い区間にわたって $T_3(\text{i})$ 部及び $T_3(\text{iii})$ 部の測定を見ることが困難である。

この様なきわどい問題になると、測定及び走時解析の経験の多少が問題解決の極め手になる。実際の地下構造を走時計算例の模型とどの程度迄対応させるかが大切なところである。若しも走時 plot を見る以前の先入観によって、先ず模型を選んでしまうならば、それに合せた走時 plot の説明は大抵の場合可能である。然し、その模型が実際の地下構造に近いか否かは全く別問題となる。

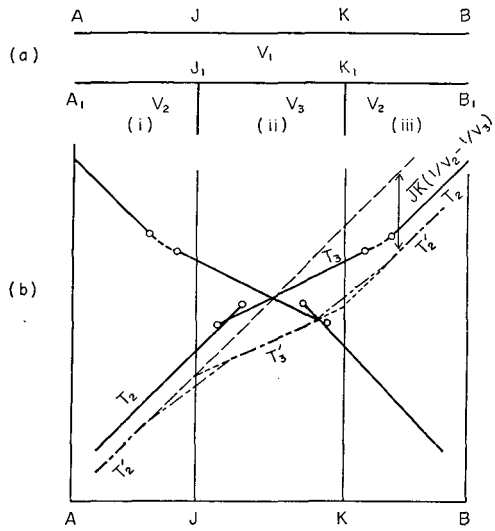
Fig. 29 (a) は、夾み層の見地よりすれば、Fig. 27 (a) の逆である。この構造に対する T 及び T' 図は (b) 図の如くなる。

$$T'_2(\text{i}) - T'_2(\text{iii}) = \overline{JK} (1/v_2 - 1/v_3)$$

だけ、 T'_2 直線は jump する。Fig. 29 (a) の v_3 層が検出されるか否かは、Fig. 27 (a) の v_2 層が検出されるか否かの条件と全く同じである。

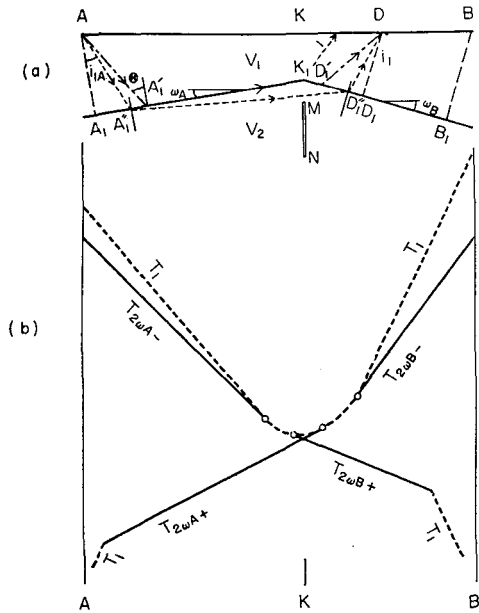
11. 下層が凸形地形の場合

Fig. 30 (a) の下層の形は Fig. 15 (a) の逆である。Fig. 30 (a) に対しても 6 の条件 i) を仮定すれば、Fig. 15 (b) に対応する走時図 Fig. 30 (b) が得られる。但し、Fig. 30 (a) に対しては、Fig. 15 (a) と違って、6 の条件 i) に従わぬ conical wave ではない屈折波が初動になりうる。(a) 図に点線で示したのがその ray path である。



第29図 下層に高速の夾み層がある場合

Fig. 29. A high velocity layer inserted in a lower half space. $v_1 < v_2 < v_3$.



第30図 凸形の境界面

Fig. 30. Boundaries forming a convex surface.

$\overline{AD} > \overline{AK}$ に於いて, conical wave と屈折波との走時差を計算すると次の如くなる。

$$T(AA_1K_1D_1D) - T(AA_1D_1D) = \overline{AA_1}(\cos i_{1A} - \cos \theta) + \overline{DD_1}(\cos i_1 - \cos \theta)/v_1 - \overline{A_1A_1''}(1 - \sin i_{2A})/v_2 - \overline{D_1D_1''}(1 - \sin i_2)/v_2 + (\overline{A_1''K_1} + \overline{K_1D_1''} - \overline{A_1''D_1''})/v_2.$$

上式の右辺の括弧内は何れも正であるが, ω_A 及び ω_B が小さいと, 何れも 0 に近い。

故に $\omega_A + \omega_B$ が小さいと, $T(AA_1K_1D_1D)$ と $T(AA_1D_1D)$ とは区別されぬ。逆に云えば, 初動の実際の経路がどうであろうとも, $T(AA_1K_1D_1D)$ について解析を進めればよい。この様な経路を通して来る ray が実在するか否かを調べるためには, Fig. 30(a) の MN 間に溝を掘って,

$T(AA_1D_1D)$ の測定を妨げてみればよい。

若しも,

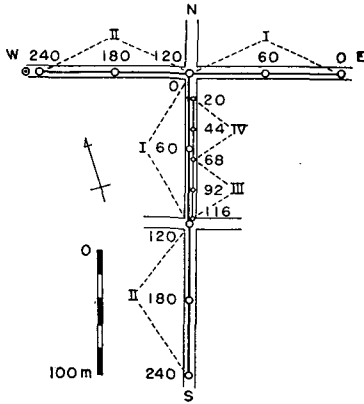
$$\theta + \omega_A, \quad \theta + \omega_B > \pi/2$$

であれば, $T(AA_1K_1D_1D)$ は測定されぬ。

IV. 測定結果の整理

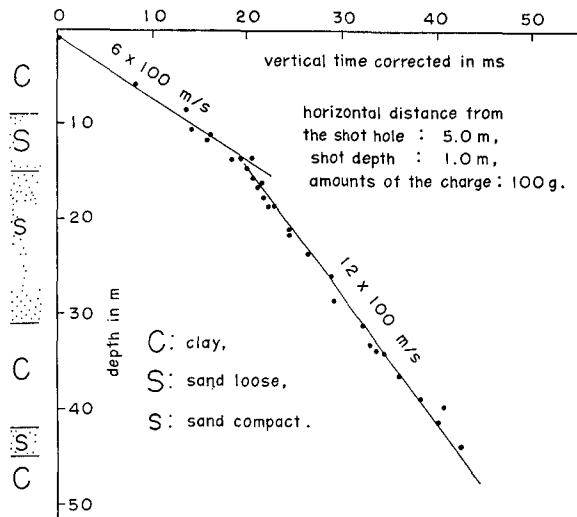
12. 測定の概況

地震探鉱実験グループの 1962 年度の協同実験が, 11 月上旬に, 見附市郊外今町中之島で行われた。実験場は広い水田地帯の一部である。協同実験の大体の様子は既に震探グループ員が述べている⁷⁾。



第 31 図 測線配置図

Fig. 31. Seismic spans observed.



第 32 図 測線付近のボーリング資料

Fig. 32. Data of the boring marked by \odot in Fig. 31.

7) 1962 年度協同実験報告, 震探グループ会報 no. 27 (1962), 1-46.

その際に、型の如く、先ず屈折法による地下探査を行った。

測線の配置は、Fig. 31 に示してある如く、水田内の農道上に設けられている。ローマ数字は pick up の展開番号である。○印は発破孔で、この印の傍の数字は測点位置を meter で表わしている。石油資源開発 KK から知らされた ●印の孔の資料を Fig. 32 に挙げておく。

使用器械は、NS 測線は北大所有 E.T.L. PRA 型 24 成分で、EW 測線は石油資源開発 KK

Table 1. The process for the observation.

number recorded	spread	position of the shot point	depth of the shot (m)	amount of charges (kg)	number recorded	spread	position of the shot point	depth of the shot (m)	amount of charges (kg)
2	NS I	120	6	1	1	EW I	120	6	1
3	I	240	8	2.25	2	I	0	8	1
4	I	0	8	1	3	I	60	1	0.1
5	I	60	1	0.1	4	I	240	8	2.25
7	II	120	6	1.25	5	II	120	6	1
8	II	0	8	2.25	6	II	180	1	0.1
9	II	240	8	1.25	7	II	240	8	1
10	NS II	180	1	0.1	8	EW II	0	8	2.25

Table 2. The process for the supplementary observation.

number recorded	spread	position of the shot point	depth of the shot (m)	amount of charges (g)	number recorded	spread	position of the shot point	depth of the shot (m)	amount of charges (g)
13	NS III	92	1.2	50	21	NS IV	20	1.3	50
14	III	68	1.2	50	22	IV	44	1.2	50
15	III	20	1.1	50	23	IV	68	1.3	50
16	NS III	116	1.3	100	24	NS IV	122	1.1	100

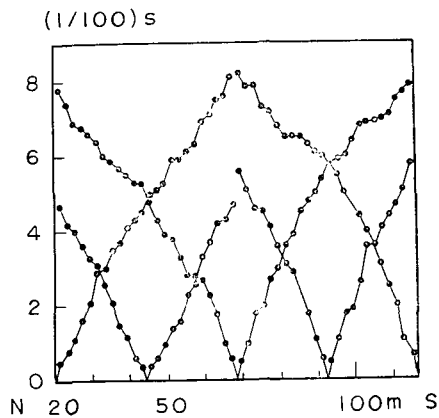
所有 E.T.L. M 3 型 24 成分である。PRA 型の filter position は F 5 であった。pick up は上下動 7.5 cps を用いた。

測定の手順は Table 1 にまとめてある。NS 測線では、この他に表面波実験用の補助測定も行っている。その手順は Table 2 にまとめてある。

Table 1 の測線の全長は夫々 240 m であって、pick up の間隔は双方共 5 m である。Table 2 の補助測線の全長は 96 m であって、pick up の間隔は 2 m である。

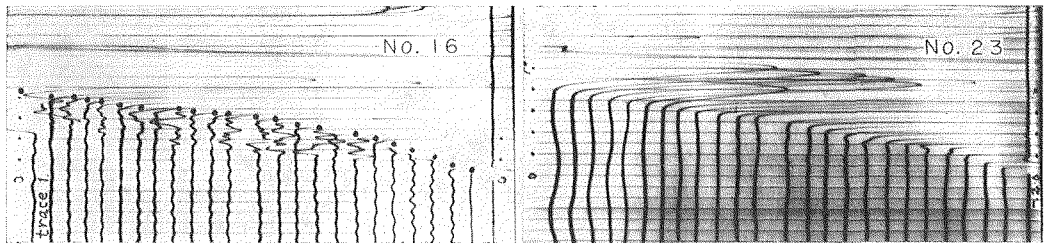
13. 補助測線の走時解析

13.1 測定された初動の走時 plot を Fig. 33



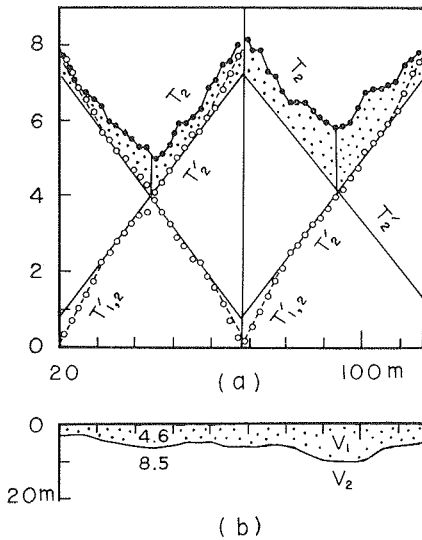
第 33 図 補助測線の初動の走時

Fig. 33. Time-distance plots of the first break for the supplementary span.



第34図 間縄の影響

Fig. 34. (a) Record no. 16 is disturbed by a measuring strip stretched along the span. (b) Record no. 23 is not disturbed by the strip.



第35図 補助測線の地下構造

Fig. 35. Calculation of subsurface structures for the supplementary span.

た。結果は Fig. 35 (a) の白丸である。

まず Fig. 33 から直接

$$v_1 = 4 \sim 5 \times 10^2 \text{ m/s}, \quad v_2 = 7 \sim 9 \times 10^2 \text{ m/s} \tag{13.1}$$

と読み取られる。

一方 Fig. 35 (a) では

$$\left. \begin{aligned} T_2'; v_2 &= 8.5 \times 10^2 \text{ m/s}, \\ T_{1,2}'; 1/v_1 &= 1/3 - 1/8.5 = 1/(4.6 \times 10^2 \text{ m/s}). \end{aligned} \right\} \tag{13.2}$$

$$\therefore \theta_{1,2} = \sin^{-1}(v_1/v_2) = 33^\circ. \tag{13.3}$$

(13.1) の方では v_1 及び v_2 の値を確定させにくいので、(13.2) の値を採用することにする。第1層の厚さ H_1 は Fig. 35 (a) の蔭を施した部分から、次式により算出される。

に示す。得られた seismic records は Fig. 34 に示してある如きものであった。Fig. 34 (a) は複雑な波形をした trace が多い。Fig. 33 に plot してあるのは、Fig. 34 (a) に ● 印で示した如く、振幅が振り切れている位相の走時である。これよりも以前の小振幅の波形は、pick up に沿ってピンと張ってあった間縄の影響である。特に Fig. 34 (a) の trace 1 の pick up の頭はピンと張った間縄に接触していたのである。間縄を除いた後に得られた seismic records は Fig. 34 (b) の如く単純な波形になった。屈折波にくらべれば、間縄の如き小紐でも、かなりのエネルギーを伝えるるので、油断できぬ。

Fig. 33 は浅い2層構造の走時 plot らしいので、直ちに method of differences の計算を行っ

$$H_1 = (T_2 - T'_2)(v_1/\cos \theta_{1,2}). \quad (13.4)$$

Fig. 35 (b) の v_1 層の厚さがこれである。

13.2 然し Fig. (b) については気になる点がある。表層の厚さが展開 III の両端で薄く、中央で厚くなった解析結果である。

若しも展開 III の両端近くの走時が T_2 ではなくて T_3 であるとすれば、 $v_3 > v_2$ の場合は T_3 の傾斜 $1/v_3$ は T_2 の傾斜 $1/v_2$ よりも小さい。故に $T_3 - T'_2$ は展開の両端で必ず小さくなる傾向を持っている。逆に云えば、展開の両端に近づく程、 $T - T'$ が小さくなる場合は、 $T_m - T'_m$ の計算をしているのではなくて、実は $T_{m+1} - T'_m$ の計算を行っている危険が告げられているのである。

若しも展開 III の両端附近の走時が T_2 ではなくて、 T_3 であるとすれば、**13.1** の解析は全部間違いである。

(1.5) 及び (1.6) の T に 2 なる添字を付けて書き直すと、

$$(e'_2) \equiv (e_2) + (E + F) \cos \theta_{1,2} / (4v_1) = H_1 \cos \theta_{1,2} / v_1, \quad (13.5)$$

但し、

$$(e_2) \equiv \frac{1}{2}(T_{2ED} + T_{2FD} - T_{2AB}). \quad (13.6)$$

及び、

$$T'_{2AD} \equiv T_{2ED} - (e'_2) = (H_{1A} - E) \cos \theta_{1,2} / v_1 + x/v_2. \quad (13.7)$$

若しも、A 及び B 点近くでの走時が何れも T_2 ではなくて、夫々 T_3 であるとすれば、 T_{2AB} は実は測定されておらず、判るのは T_{3AB} である、

$$T_{3AB} \equiv \frac{1}{2}(T_{3EB} + T_{3FA}).$$

故に (13.6) の計算に T_{2AB} の代りに誤って T_{3AB} を使ったとすると、間違った計算では

$$(e)^\times \equiv \frac{1}{2}(T_{2ED} + T_{2FD} - T_{3AB}) = (e_2) + \frac{1}{2}(T_{2AB} - T_{3AB}),$$

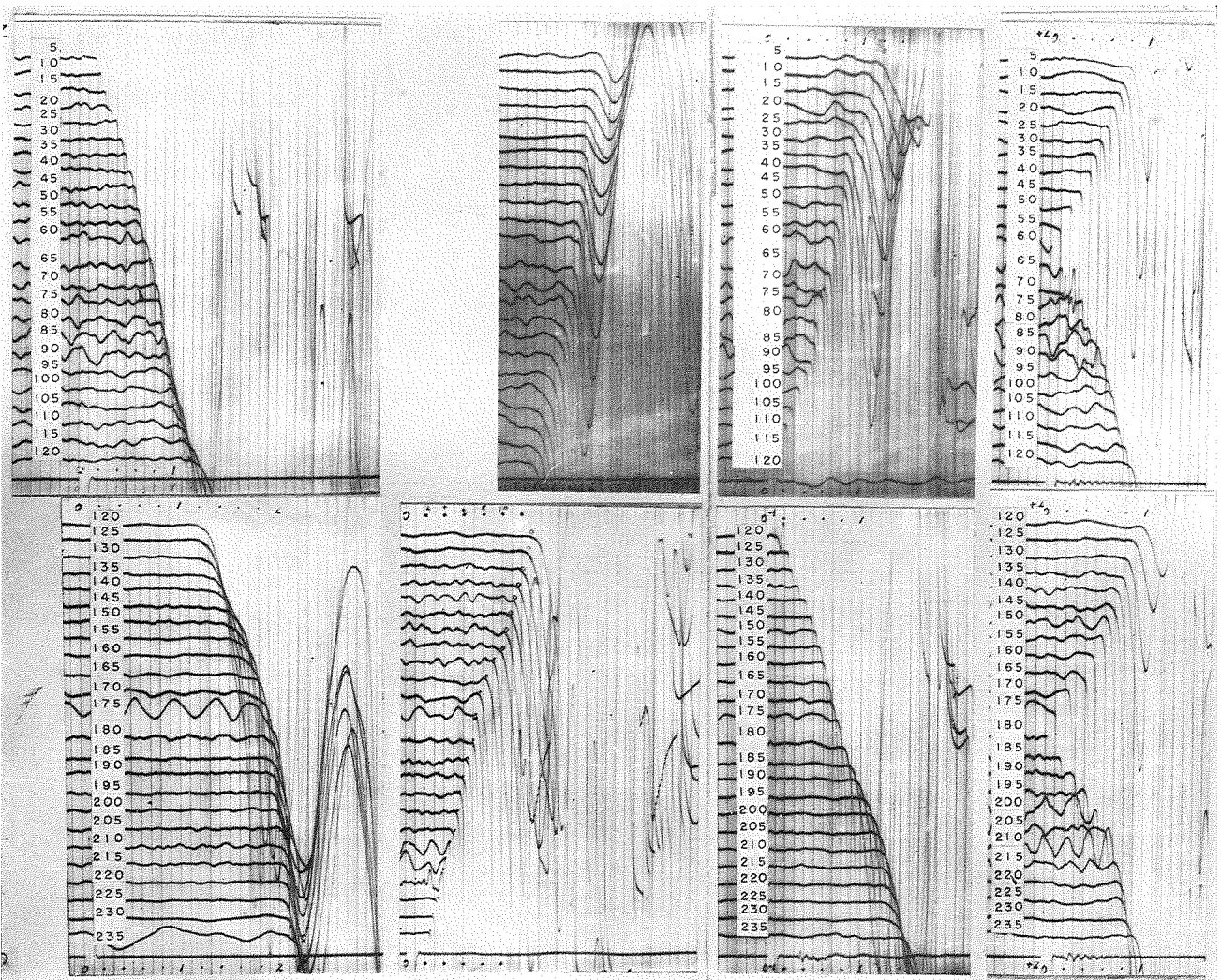
$$(T'_{AD})^\times \equiv T_{2FD} - (e)^\times = T'_{2AD} - \frac{1}{2}(T_{2AB} - T_{3AB}).$$

すなわち、正しい値は次の如くでなければならぬ。

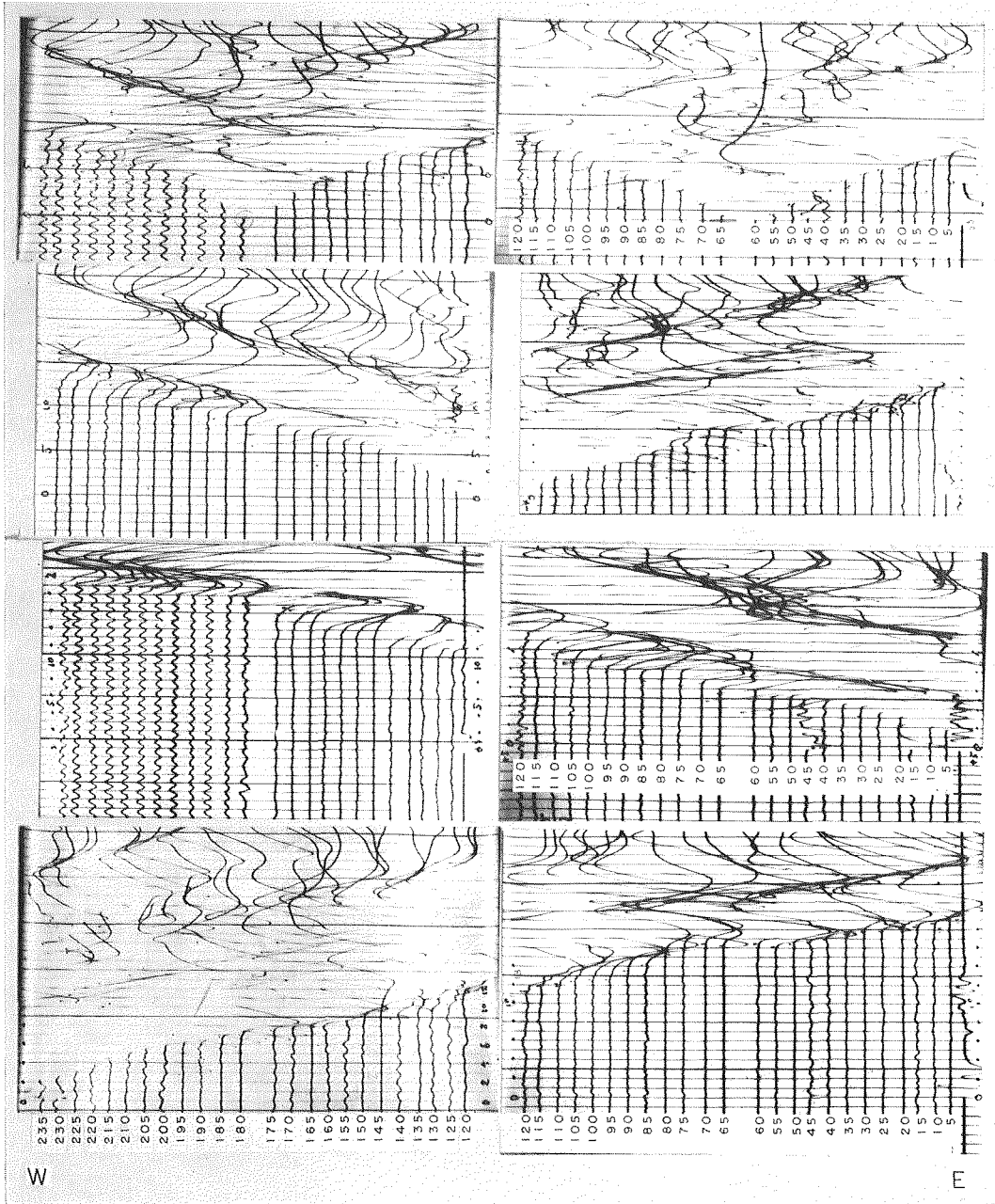
$$(e_2) = (e)^\times - \frac{1}{2}(T_{2AB} - T_{3AB}),$$

$$T'_{2AD} = (T'_{AD})^\times + \frac{1}{2}(T_{2AB} - T_{3AB}). \quad (13.8)$$

故に正しい T'_{2AD} 直線は、5 で考察した如く、間違った T' 直線よりも $(T_{2AB} - T_{3AB})/2 > 0$ だけ上方に平行移動させねばならぬ。その結果、(13.5) から算出される展開 III の中央部の H_1 も実は正しい値は間違った値よりも小さくならねばならぬ。



第36図 NS 測線の地震記録
Fig. 36. Seismic records obtained on span NS.
The time-mark indicates 1/100 s.



第 37 図 EW 測線の地震記録

Fig. 37. Seismic records obtained on span EW.
The time-mark indicates 1/100 s.

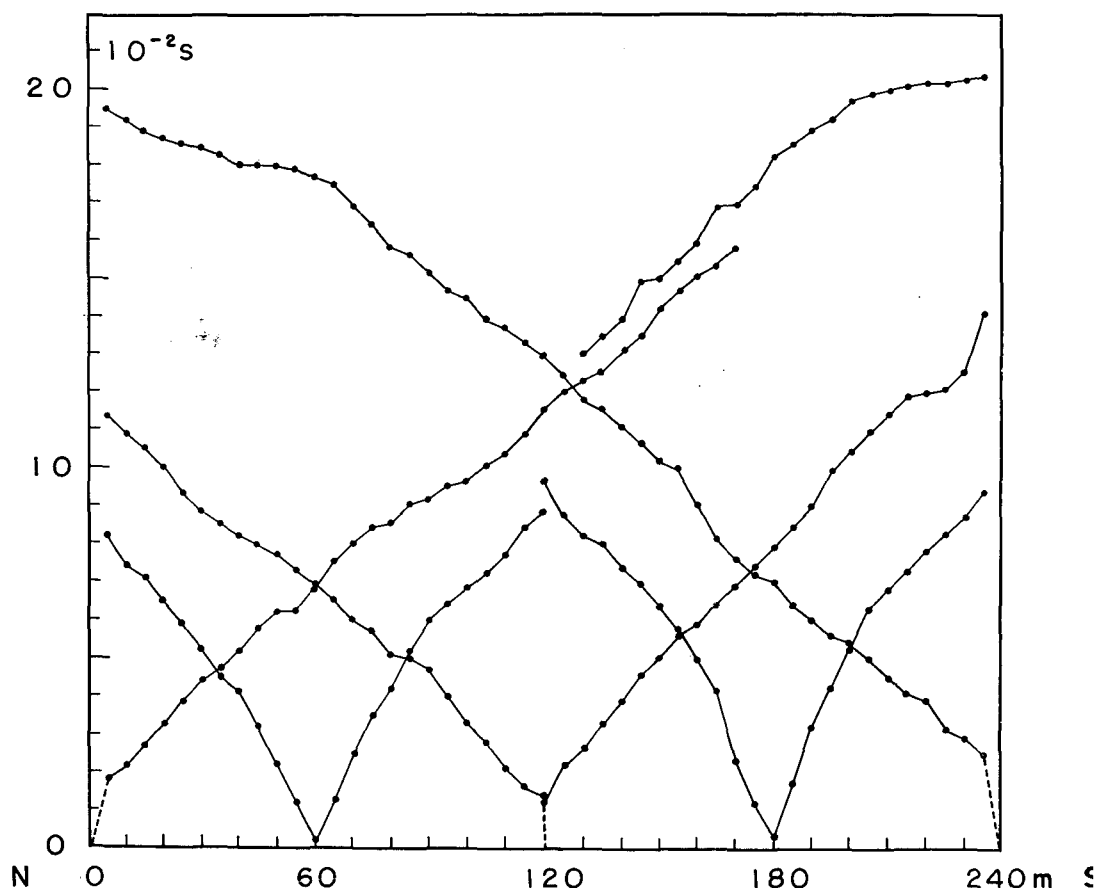
13.3 実は v_2 層の厚さが判明せぬと、補正量

$$(e_{2,3}) \equiv \frac{1}{2}(T_{2AB} - T_{3AB}) > 0 \quad (13.9)$$

は算出されぬ。然し、これが決らぬと、結局展開 III の全域にわたって v_1 層の厚さを算出する手がかりを失ってしまう。敢えて $(e_{2,3})$ を知るためには、 T_{2ED} 及び T_{2FD} とと思われる走時部分を夫々 B 及び A 点迄延長して、 T_{2EB} 及び T_{2FA} を求め、これから T_{2AB} を推定するより致し方ない。

Fig. 33 の展開 III の両端附近の走時が若しも T_2 ではなくて T_3 であるとすると、今述べた手段により $(e_{2,3}) \approx 0.5 \times 10^{-2} \text{ s}$ と推定される。故に、この場合は、Fig. 35 (a) の T_2 直線は $0.5 \times 10^{-2} \text{ s}$ だけ上方に移動させねばならぬ。

然るに、Fig. 35 (a) の T_2 直線は展開 III と展開 IV とに対し、測点 68 では同一の時刻から始まらねばならぬ。既に Fig. 35 (a) で見た如く、 $(e_{2,3})$ の補正を行わない前の T_2 直線は測



第38図 NS 測線の初動の走時図

Fig. 38. Time-distance plots of the first break for span NS.

点 68 で展開 IV から III に連続していた。若しも、展開 III の T_2 直線のみを $(e_{2,3})$ だけ上方に移動させると、却って連続の条件からはずれる。故に、展開 III の両端附近の走時を T_3 とみなすことは、明らかに間違いである。元のとおり T_2 と考えるべきである。

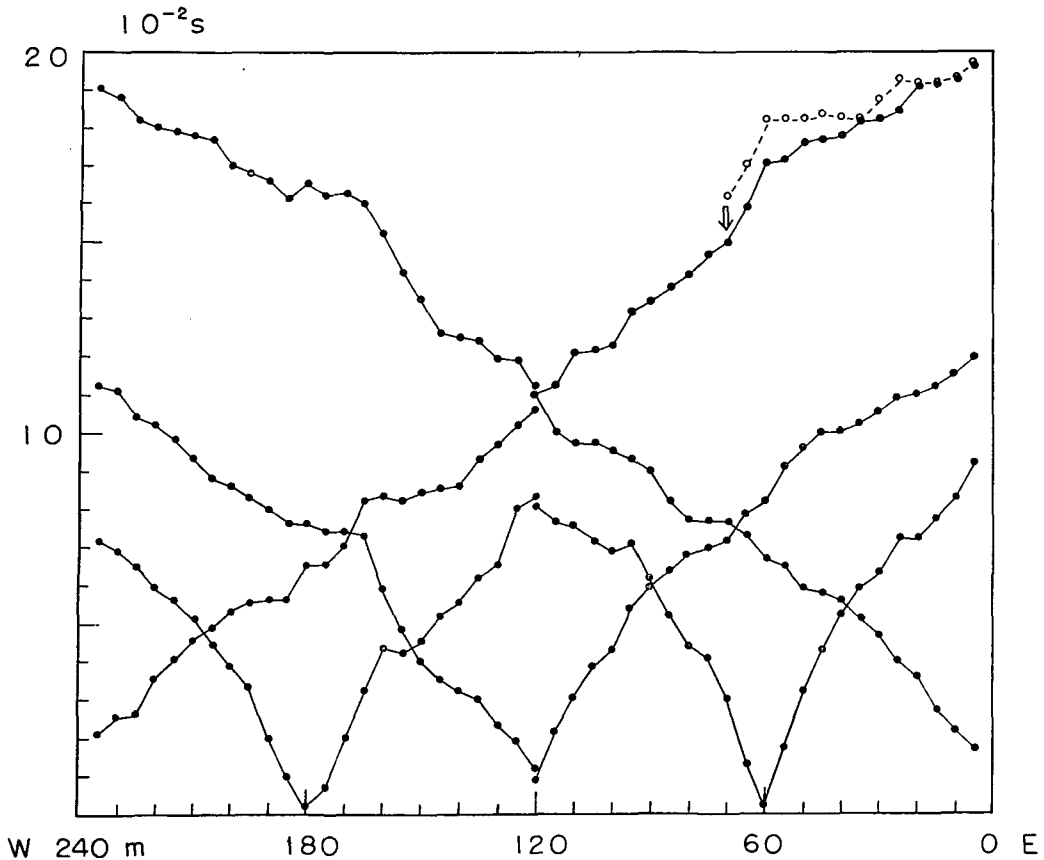
14. NS 及び EW 測線の走時図

14.1 完全な測定を期するためには、Table 1 に挙げた発破の他に、少なくとも 0, 120 及び 240 の 3 地点で、両側線共、夫々深さ 1 m の発破を加えるべきであった。何となれば、これら 3 地点での発破の深さは、第 1 層の厚さよりも大きいことが予想されていたからである。

測定時間の制約もあった。又 1 での考察により、Table 1 の測定だけで、何とか第 1 層を剥ぎうるのではないかとの気持もあった。これらの理由で、不完全な測定しか行わなかったのである。

得られた seismic records を Figs. 36 及び 37 に示しておく。

初動の走時 plots は Figs. 38 及び 39 の如くなる。これらの図の一部には、先に示した Fig. 10(d) 部の如く、既にいくらかの主観が入っている。Fig. 39 の 240→0 の走時 plots で 55-0 間



第 39 図 EW 測線の初動の走時図

Fig. 39. Time-distance plots of the first break for span EW.

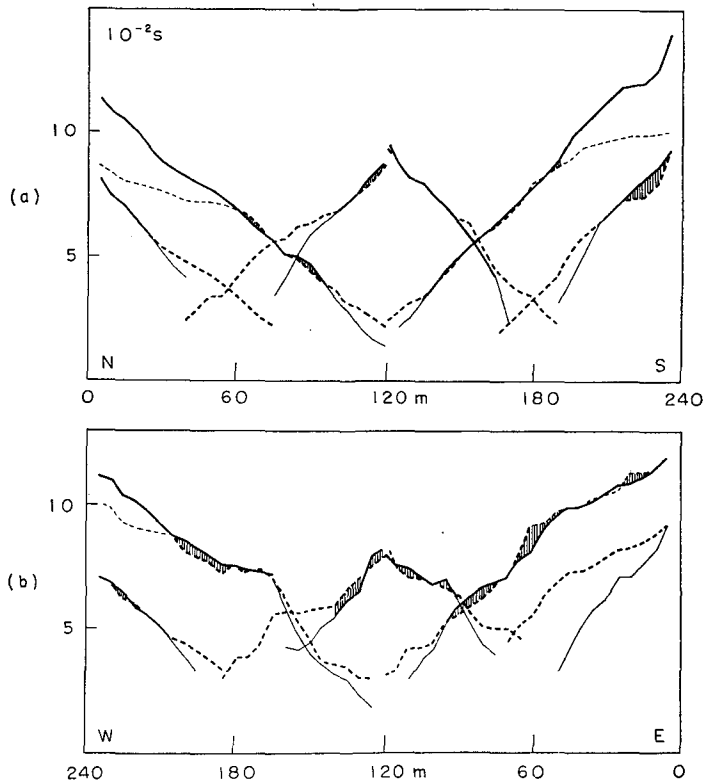
の初動は読みずらかった。止むを得ず、白丸で示した波形の山を読み、矢印で示した如く平行移動させて、55-0間の初動を作図したこともある。その後再三 seismic record を見直した結果が黒丸で示した plots になったのである。

初動の走時 plots 自体に主観が入ることは先ず避けたい。然しこれは単に発破の利き方の良否だけでは解決されぬ問題である。地下構造の方に不規則性があれば、波動伝播の本質上、止むを得ぬ事柄である。

ともかく、Figs. 38 及び 39 は全般的にかなり複雑で、これらの図から直接地下構造を推定することは困難である。これらの図を眺めているだけでは、速度別の層の分類すら行えぬ。

14.2 先ず観測されている層の数を知らるために、Figs. 38 及び 39 の 0↔240間の plots を下方に平行移動させて、0↔120 及び 120↔240間の plots に重ねた。Fig. 40 の点線が 0↔240間の plots であり、実線が 0↔120 及び 120↔240間の plots である。実線と点線とが重なっている区間では同一の層を伝わって来た conical waves を測定しているものと解せられる。蔭を施した部分は、境界面の形が平坦でないために生じた喰い違いであろう。

Figs. 38 及び 39 の 0↔120 及び 120↔140間の plots を下方に平行移動させて、0↔60, 60↔



第40図 同一測点間での走時曲線の傾斜の比較

Fig. 40. Comparison of the inclination of time-distance plots between the same observation points.

120, 120↔180及び180↔240間の plots に夫々重ねた。これらも Fig. 40 に点線及び実線で示してある。

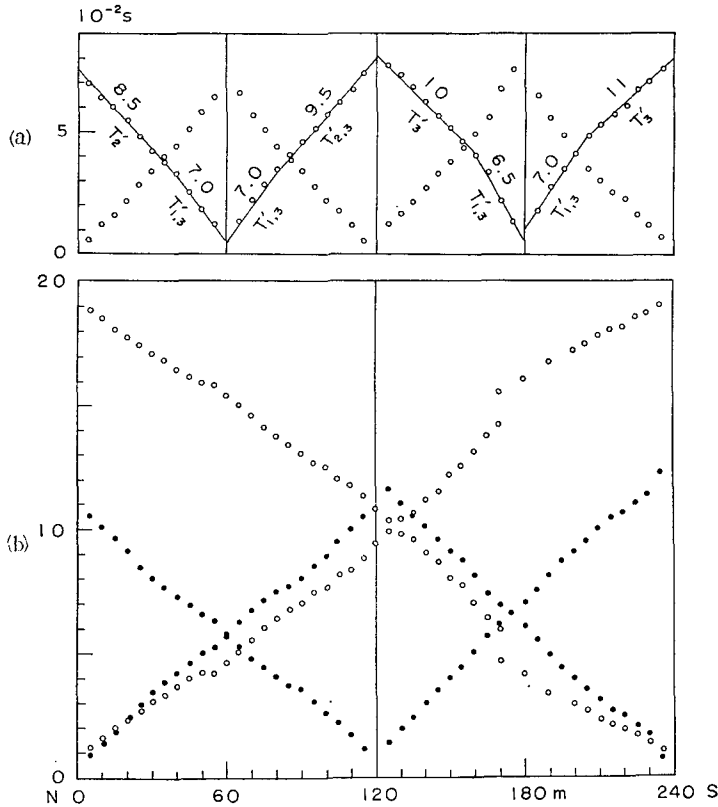
(13.2)と Fig. 40 とを合せ考えると、この図の太い実線及び太い点線は v_3 層の上面を伝わる conical waves の走時、すなわち T_3 に相当するものと思われる。

Fig. 40 (a) の細い点線部は T_3 との分離が明瞭で、 T_4 と解されやすいのに反し、(b) 図の細い点線部は T_3 との分離が明瞭でない。然し、(b) 図の細い点線部も一応 T_4 とみなすべきであろう。

以上の如き考察によれば、Figs. 36 及び 37 で観測されている層の数は夫々4である。

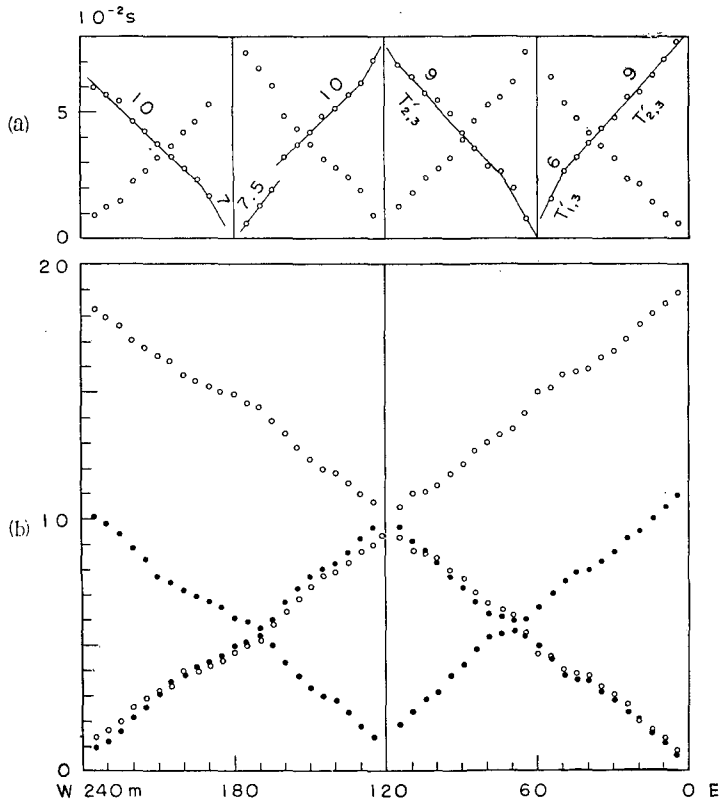
14.3 次に速度別の層の分類を行うために、method of differences における T'_{FD} 及び T'_{FD} を、何等の先入観なしに、Figs. 38 及び 39 から求めた。Figs. 41 及び 42 にその結果を示す。

不幸にして、 T' の plot は Figs. 38 及び 39 に示した T の plot に比し、あまり単純になつたと云えぬ。地下構造が不規則性に富んでいるためである。



第41図 NS測線の T'

Fig. 41. T' obtained by the method of differences for span NS.



第42図 EW 測線の T'

Fig. 42. T' obtained by the method of differences for span EW.

15. NS 測線の v_2 層及び v_3 層

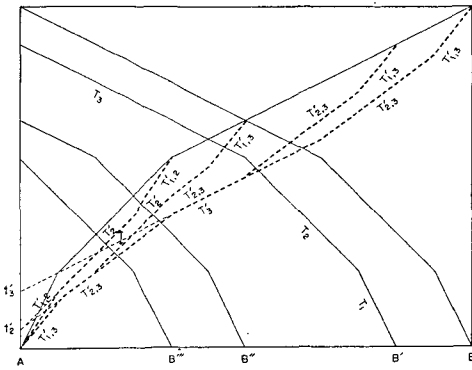
15.1 水平3層構造で、発破点が地表にある場合の初動の走時 plot T は Fig. 43 の細い実線の如くなる。これらの走時 plot に対する T' は太い点線で示してある。

T_1 , T_2 及び T_3 部が測定されていれば、 T' は5本の折線から成る。但し、折線の区間が短かかったり、折線の傾斜が互いに似ていると、折線と直線との区別が困難になる。

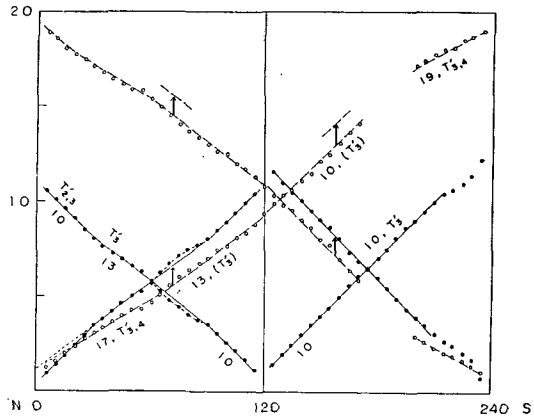
Fig. 41 (b) の白丸と Fig. 43 とを比較して見ると、前者の NS 0→120 は後者の AB' 間の T' の左半部に対応している如くである。Fig. 41 (b) の NS 240→120 の白丸は Fig. 43 の AB' 間の T' と対応せぬ様にも見える。然し NS 240 付近の表層が極めて薄ければ、Fig. 43 の $T'_{1,3}$ は現われぬこともありうる。以上の見地に立って、Fig. 41 (b) の黒丸及び白丸を夫々 Fig. 44 に示した如く分類した。 T' の添字は Fig. 40 を参照しながら決めてある。折線の傍の数字は折線の傾斜を 10^2 m/s を単位にとった速度で示している。

T'_3 の傾斜が 0-120 間と 120-240 間とで異なっているのは、第3層の速度が夫々の区間で実際に異なっているからであろう。

Fig. 44 の点線部の黒丸は T'_3 直線からはずれている。 $T_{3AD} - T'_{AD}(\cdot) = T_{3BD} - T'_{BD}(\cdot)$ で



第43図 水平3層構造に対する T'
 Fig. 43. T' for three horizontal layers.



第44図 NS測線における T' の分類
 Fig. 44. Classification of T' for span NS.

あるから、今の場合は $T_{3AD} - T'_{3AD} > T_{3BD} - T'_{3BD}$ になる。第3層迄の厚さを算出する際に、黒丸の代りに T'_3 直線のみに頼ると、誤りを犯しそうに思える。 $T'(\cdot)$ が直線からはずれてばらつく度に、非常に神経質にならなくてはならないようでは、 T' は大局的な地下構造を示す指針になりがたい。

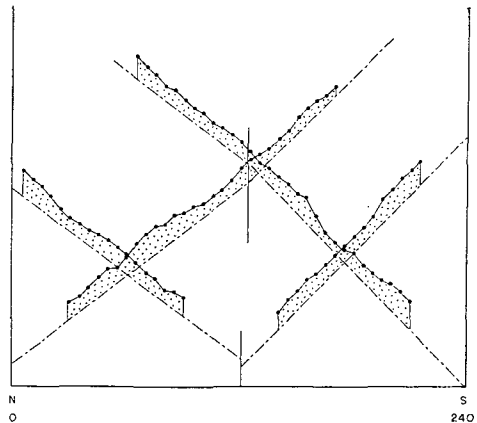
若しも、Fig. 44 の点線部が Fig. 11 (b) の T'_2 部に対応させられるならば、実線部と同様に点線部に於ても、

$$T_3 - T'_3 = \frac{1}{2} \{ (T_{3AD} - T'_{3AD}) + (T_{3BD} - T'_{3BD}) \}. \quad (15.1)$$

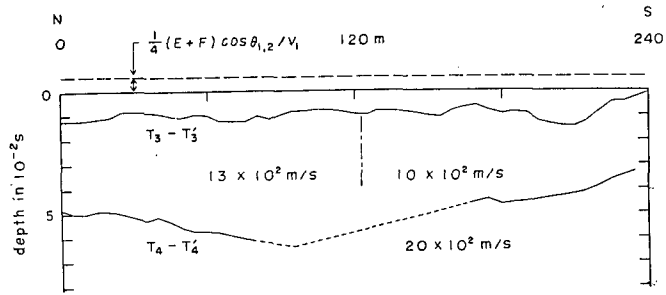
故に、Fig. 11 (b) の原因から生じた如き T' のばらつきには余り神経質にならず、大胆に T' 直線を描き、後になって (15.1) を利用すればよい。

15.2 Fig. 44 の (T'_3) 部は真の T'_3 直線ではない。5.2 で述べた如く、 $T_3 - T'_3$ を用いて v_3 層迄の厚さを算出するためには、 (T'_3) 部を T'_3 迄平行移動させねばならぬ。その移動量は矢印の長さで示されていて、これは Fig. 13 の $\overline{P_2P'_2}$ に相当している。

Fig. 40 を参照しつつ、Fig. 38 から T_3 部だけをとり出し、Fig. 44 から求めた T'_3 直線図と重ね合わせると、Fig. 45 が得られる。蔭を施した部分は $T_3 - T'_3$ である。境界面が平坦な場合は、同一測点に対しては $T_3 - T'_3$ はいずれも等しい筈である。Fig. 45 では同一測点に対し、 $T_3 - T'_3$ が2又は3ヶ読みとれる。それらの値は必ずしも互いに等しくない。測点70及び150付近では特に一

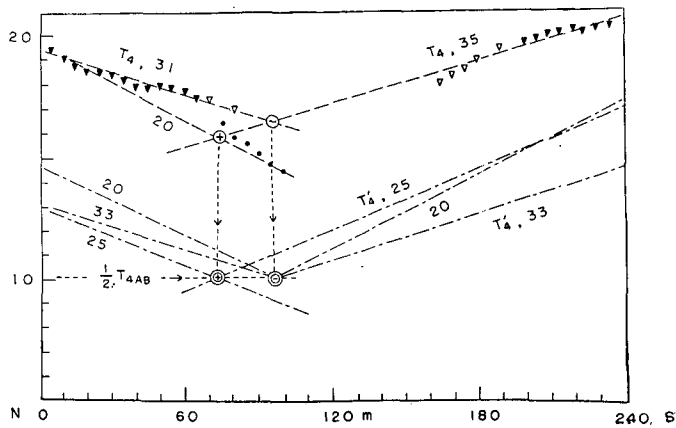


第45図 NS測線の $T_3 - T'_3$
 Fig. 45. $T_3 - T'_3$ for span NS.



第 46 図 $T-T'$ で表わした各層迄の深さ

Fig. 46. Thickness of each layer shown by $T-T'$ for span NS.



第 47 図 NS 測線の T_4-T_4'

Fig. 47. T_4-T_4' for span NS.

致が悪い。この原因は、これらの付近では v_3 層上面の形が実際に平坦でない故と察せられる。この様な場合には各値の平均値を以って v_3 層迄の厚さとみなし、Fig. 46 にそれを示した。

15.3 Figs. 40 及び 44 で指摘したところによれば、少ないながら T_4 部が測定されている。Fig. 38 から T_4 だけを取り出し、Fig. 47 に ▼ 印で示した。▽ 印は Fig. 36 を読み直して求めた later phase である。

(i) v_4 層の上面が N から S へ向って、一様な昇り傾斜であると仮定すれば、

$$v_{4+} = 35 \times 10^2 \text{ m/s}, \quad v_{4-} = 31 \times 10^2 \text{ m/s}. \tag{15. 2}$$

Fig. 46 によれば、 v_3 層の上面は N から S にかけて目立った傾斜はしていない。故に 8 によらず、単に 2 層構造の計算で $v_3 = 12 \times 10^2 \text{ m/s}$ と仮定して v_4 を求めると、

$$v_4 = 33 \times 10^2 \text{ m/s}. \tag{15. 3}$$

然るにこの値は、見附市付近の地下 100 m 以内の層の持つ速度にしては大きすぎる。

(ii) 今迄は、Fig. 47 の黒丸を T_3 と考えていたが、仮りにここに示した黒丸迄を T_4 とみなすと、

$$v_{4+} = 35 \times 10^2 \text{ m/s}, \quad v_{4-} = 20 \times 10^2 \text{ m/s}. \quad (15.4)$$

この結果, (15.3) の代わりに次の値が得られる。

$$v_4 = 25 \times 10^2 \text{ m/s}. \quad (15.5)$$

この値は Fig. 44 の左半部に示した $T'_{3,4}$ の傾斜と矛盾しない。何となれば, (1.2) と同等な関係,

$$2/17 \approx 1/13 + 1/25$$

が満されるからである。

もしも (ii) の仮定でよいものとすれば, 5 で述べた方法により, これに対する T'_4 直線を簡単に作図することができる。すなわち Fig. 47 に示した如く, T_{4+} と T_{4-} の交点を \oplus 印で表わし, この点を通り縦軸に平行な直線と $T = T_{4AB}/2$ との交点を \ominus とする。次に \ominus を通り (15.5) の傾斜をもつ直線を描けば, これが T'_4 直線である。

然し (ii) の仮定には, 2, 3 の難点がある。

(ii-1): (15.5) は (15.3) よりはましであるが, この付近の地層の値としては, まだ大きすぎる気がする。

(ii-2): EW 測線では, Fig. 39 に見る如く, $20 \times 10^2 \text{ m/s}$ よりも大きな値が見られない。

(ii-3): Fig. 44 の右半部に現われている $T'_{3,4}$ の傾斜を説明することがむずかしい。

(ii-4): Fig. 47 の黒丸を取って T'_4 と見なした点にも無理がある。

(iii) NS 0 から 240 迄, v_4 層の上面が一様な傾斜をしているものと考え, 上述の如き救われがたい困難に直面する。そこで, v_4 層の上面がこの span 内で凹型に傾斜しているものと仮定してみる。この場合には,

$$v_{4+} = 31 \times 10^2 \text{ m/s} \text{ 及び } 35 \times 10^2 \text{ m/s} \quad (15.6)$$

であって, v_{4-} は不明である。

若しも, EW 測線の方の走時 plot に見られる

$$v_4 = 20 \times 10^2 \text{ m/s} \quad (15.7)$$

をここでも採用することにすれば, span NS の中央から両端へ向って, 夫々かなり大きな昇り傾斜を考えねばならぬ。(6.5) によれば,

$$v_+ = v \sin \theta / \sin (\theta - \omega). \quad (15.8)$$

故に, (15.6) に対応して,

$$\omega = 13^\circ \text{ 及び } 15^\circ \quad (15.9)$$

になる。これらの値は実在の傾斜としては少々大きすぎる気もする。然し, (15.6) に挙げた見掛けの速度が実在するにも拘らず, 地層の速度を (15.7) 程度に制御するためには, これ位の傾斜を考えざるをえぬ。

T'_i 直線の交点の位置は Fig. 47 に示した手順で求まるので、 \ominus を通り (15.7) の傾斜をもった直線を描けば、これらが T'_i 直線である。(15.7) を仮定した場合の $T'_i - T'_i$ を Fig. 46 に示しておいた。

15.4 T 及び T' の分類が全部できている場合には、最表層から順次剥ぎとってゆくのが method of differences の常識になっている。然し一般には、最表層を丹念に剥ぎとれる程丁寧な測定は行っていない。今回の例で言えば、最表層を丁寧に剥ぐためには、6 の補助測定と同じ位こまかな測定を NS 及び EW 測線の全域にわたって行わねばならぬ。屈折法の走時解析ではいつもこの困難につきまといわれる。

又或る程度深い処に予想される境界面を問題にする場合などには、最表層から剥いでゆくことに余り神経を使いすぎると、却って大局観を失う恐れがある。

(1.7) 及び (1.8) を更に多層構造へ拡張すると、

$$(e'_n) \equiv T_{nED} - T'_{nED} = \sum_{m=1}^{n-1} (H_m/v_m) \cos \theta_{m,n}. \quad (15.10)$$

$$\therefore (e'_n) - (e'_{n-1}) = (H_{n-1}/v_{n-1}) \cos \theta_{n-1,n} + \sum_{m=1}^{n-2} (H_m/v_m) (\cos \theta_{m,n} - \cos \theta_{m,n-1}). \quad (15.11)$$

今回の如く、下層程速度が大きい場合は、 H_m/v_m の係数はすべて正である。又その絶対値は $\cos \theta_{n-1,n}$ に比し、一般にはかなり小さいことが予想される。

特に、

$$\theta_{m,n} < \theta_{m,n-1} < 1 \quad (15.12)$$

の場合には、

$$\cos \theta_{m,n} - \cos \theta_{m,n-1} \doteq \frac{1}{2} (\theta_{m,n} + \theta_{m,n-1}) (\theta_{m,n} - \theta_{m,n-1}) \ll 1.$$

故に、この場合には、(15.11) は次の如く近似される。

$$(e'_n) - (e'_{n-1}) \doteq (H_{n-1}/v_{n-1}) \cos \theta_{n-1,n}. \quad (15.13)$$

この近似が厳密には使えぬ場合でも、第1近似としては便利な関係である。

15.5 今迄に得た実測値を整理すると、先ず Table 3 が得られる。次にこれらの数値を用

Table 3. Seismic data for span NS.

n	v_n	$\theta_{m,n}$			$\cos \theta_{m,n}$			m
		1	2	3	1	2	3	
1	4.6	—	—	—	—	—	—	
2	8.5	33°	—	—	0.84	—	—	
3	10	27°	58°	—	0.89	0.53	—	
	13	21°	41°	—	0.94	0.76	—	
4	20	13°	25°	30°	0.97	0.90	0.87	
				40°				0.76

$\sin \theta_{m,n} = v_m/v_n$, a unit of velocity is 10^2 m/s.

Table 4. Estimations of $(\cos \theta_{m,n} - \cos \theta_{m,n-1})$.

n	$\cos \theta_{n-1,n}$	$\cos \theta_{m,n} - \cos \theta_{m,n-1}$		m
		1	2	
2	0.84	—	—	
3	0.53	0.05	—	
	0.76	0.10	—	
4	0.87	0.08	0.37	
	0.76	0.03	0.14	

いて, (15.11) の H_m/v_m の係数を求めると Table 4 の如くなる。

これらの数値を (15.11) に代入すると, 次の如き連立方程式が得られる。 (e'_m) の単位は 10^{-2} s であり, H_m の単位は m である。

$$(e'_2) = 0.18 H_1,$$

$$(e'_3) - (e'_2) = (H_2/v_2) \cos \theta_{2,3} + (H_1/v_1) (\cos \theta_{1,2} - \cos \theta_{1,2})$$

$$= \begin{cases} 0.053 H_2 + 0.01 H_1 & \text{for } v_3 = 10 \times 10^2 \text{ m/s} \\ 0.058 H_2 + 0.02 H_1 & \text{for } v_3 = 13 \times 10^2 \text{ m/s}, \end{cases}$$

$$\therefore (e'_3) = \begin{cases} 0.19 H_1 + 0.053 H_2 \\ 0.20 H_1 + 0.058 H_2. \end{cases}$$

又

$$(e'_4) - (e'_3) = \begin{cases} 0.087 H_3 + 0.044 H_2 + 0.017 H_1 & \text{for } v_3 = 10 \times 10^2 \text{ m/s} \\ 0.058 H_3 + 0.016 H_2 + 0.007 H_1 & \text{for } v_3 = 13 \times 10^2 \text{ m/s}. \end{cases}$$

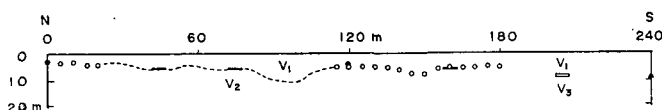
先に述べた如く, NS 測線の測定では (e'_3) は詳しくは判らない。これに反し, (e'_2) 及び (e'_4) は既に Fig. 46 に求めてある。一方, Table 3 の $\theta_{m,n}$ は (15.12) の条件を満足しているので, (15.13) の近似式が使える。故に v_3 層の上面を基準面に選べば, H_3 は近似的に算出される。探査目的によっては, これ迄述べた程度に v_3 層と v_4 層とを調べれば, それで解析を終ってよい場合もある。

今迄の段階では $T_3 - T'_3$ にも $T_4 - T'_4$ にも, 1.4 で述べた震源の深さ (E 及び F) に対する補正が施されていない。Fig. 40 に対し, ここでその補正 $(E+F) \cos \theta_{1,2}/(4 v_1)$ を加えることにし, 破線でそれを示した。破線の位置が云わば真の地表である。

16. NS 測線の地下構造

16.1 Fig. 41 (a) で T'_2 直線が算出されているのは NS 0-60 の区間だけである。1.4 の記号を用いて述べれば, Fig. 41 (a) の T'_2 には $E > H_A$, $F < H_B$ なる事情と, $T_{EB} \equiv T_{3EB}$, $T_{FA} \equiv T_{2FA}$ と云う複雑な事情とが重なっている。Fig. 41 (a) に出ているのは見かけの T'_2 であって, これを使っていきなり H_1 を算出することはできぬ。

幸いにして, NS 20-115 の区間では Fig. 35 (a) に正しい $T_2 - T'_2$ が求められている。故に Fig. 38 の走時 plots 60→0 及び 60→120 の T_2 部に対しては, 夫々の区間の $T_2 - T'_2$ が Fig. 35

第 48 図 NS 測線の v_1 層の厚さFig. 48. Thickness of layer v_1 for span NS.

(a) の $T_2 - T'_2$ と一致するように T'_2 直線を作図することができる。一旦 T'_2 直線の正しい位置が 0-120 間で決れば, Fig. 35 (a) に求めてある区間 20-115 を両側に延ばし, Fig. 38 の区間 0-20 及び 115-120 についても $T_2 - T'_2$ を知ることができる。

更に測点 120 で判った $T_2 - T'_2$ の値を使えば, 区間 120→180 の T_2 部に対し, T'_2 直線を新しく作図することができる。

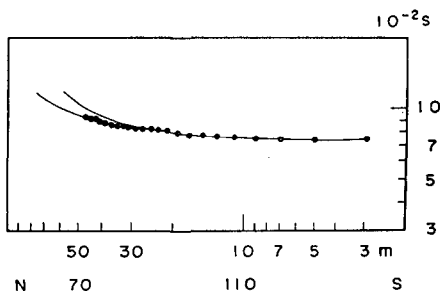
このような手段で求めた $T_2 - T'_2$ を (13.4) によって meter に換算したのが Fig. 48 の白丸である。点線は Fig. 35 (b) の転載に過ぎぬ。

16.2 水平に一樣な構造を仮定し, Fig. 38 の測点 60 及び 180 から始まる走時 plot の折れ曲り点の位置から v_1 層の厚さを算出すると, Fig. 48 の太い実線分の位置になる。白く抜いて

ある線分は v_1 層の下が v_2 層ではなくて, v_3 層であることを示している。

測点 0, 120 及び 240 から始まる走時 plots に対しては田治米・音田の方法³⁾ により v_1 層の厚さを推定した。Fig. 48 の ● 及び ▲ がそれである。

展開 III に対しては種々の距離から off set 発破も行っている。測点 120 から東へ 50 m 離れた発破 (深さ 1 m) による初動の走時 plots は Fig. 49 の如くなった。この走時 plots を田治米の標準曲線³⁾ に写してみると, 測点 100 を境にして別々の曲線にのる。波の進行方向と測線の方法とが傾



第 49 図 off set 発破の初動の走時図

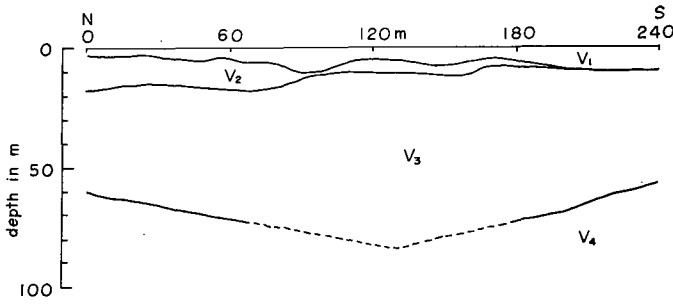
Fig. 49. Time-distance plots of the first break for spread III, being off set. Point NS 120 is distant vertically from the shot hole whose depth was 1 m.

斜しているための影響を考えると, このことは Fig. 48 の 100-110 間に示されている階段構造によく対応している。

種々の手段で求めた v_1 層の厚さ H_1 の数値及び形が, 突拍子もなく喰い違っていないこと, これが最も大切である。ただ 1 つだけの方法に余りこまかく立入り過ぎると, 却って大局を失う恐れがある。NS 測線の v_1 層に対する測定は甚だ不完全であった。然し, Fig. 48 が得られたからには, Tables 1 及び 2 の測定だけで満足せねばならぬであろう。

16.3 Fig. 48 に得られた H_1 と, Fig. 46 の $T_3 - T'_3$ 及び $T_4 - T'_4$ を (15.14) に代入して, H_2 及び H_3 を算出すると, NS 測線の地下構造は Fig. 50 の如くなる。協同実験の他のテーマ

8) 田治米鏡二; 初動の赤時図に現れる震源の深さの影響 (2), 物理探鉱, 10 (1957), 179-183.



第50図 NS 測線の地下構造

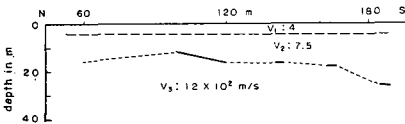
Fig. 50. Subsurface structures for span NS.

で岡田⁹⁾が求めた NS 60-180 間の地下構造は Fig. 51 の如くである。

これと Fig. 50 との一致はよいとは云えぬかも知れぬ。然し、測定方法が異なっているので、この程度の喰い違いは止むを得ぬ。

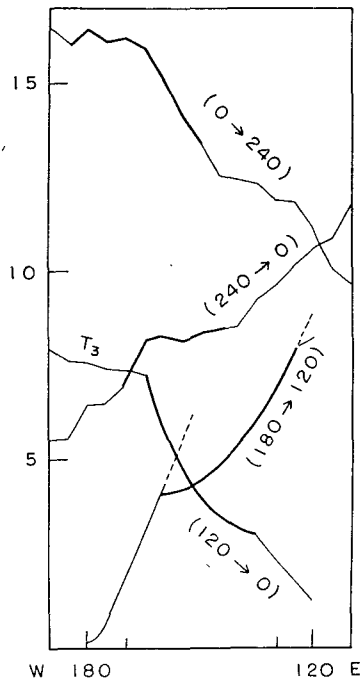
Fig. 32 に示した速度検層の結果も、Fig. 50 に余りよく対応していない。然し、浅い地下構造は水平方向にも均質性がよくない。従って、場所が少し違うだけでもこの程度の対応しかつけれなくなることは大いにありうる。

S 波の測定から見た地下構造には、この論文では全然触れていない。S 波の測定も今回の協同実験のテーマに入っているので、いずれ報告されるであろう。



第51図 岡田氏が別の測定から推定した NS 測線の地下構造

Fig. 51. Subsurface structures between NS 60 and 180, being obtained by the other method after H. OKADA.



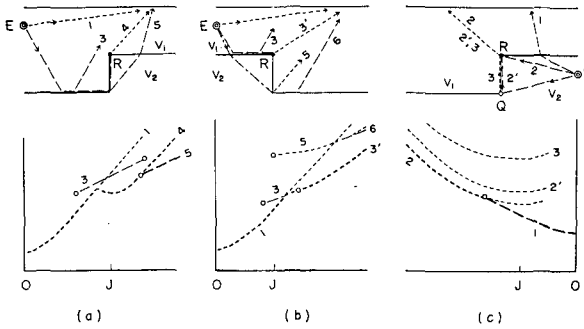
第52図 測定された特異な形の走時曲線

Fig. 52. The distinctive shape of time-distance plots pointed out from Fig. 39.

17. EW 測線の v_1 層

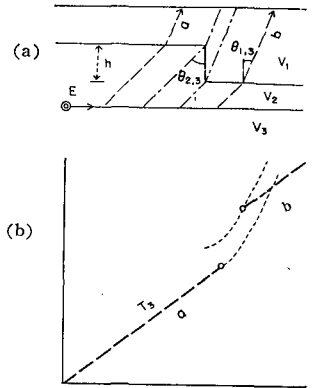
17.1 Fig. 40 (b) を参照すると、Fig. 39 の測点 60 及び 180 から始まる走時 plots 上で、 $v_1=5 \times 10^2$ m/s 及び $v_2=8.5 \times 10^2$ m/s に対応する T_1 及び T_2 部を指摘することができる。それにも拘らず、Fig. 42 (a) には T_2 直線が見られぬ。この主な原因は、NS 測線におけると同様に、測点 240, 120 及び 0 における発破の深さが v_1 層の厚さよりも大きいからである。

9) 岡田 広; J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. 印刷予定.



第 53 図 2, 3 の模型構造に対する走時曲線

Fig. 53. Time-distance curves for various models of the subsurface.



第 54 図 降り階段に対する T_3 の走時差

Fig. 54. Difference of travel times T_3 for a down step.

一方では、Fig. 39 の 180→120, 120→240 及び 240→0, 0→240 の初動の走時 plots は夫々 160-130 間及び 180-150 間で水平構造の不規則性を暗示する異常な形をしている。今述べた区間の走時 plots は、いずれも下に凸な双曲線型であって、2 次的震源から生じた ray の走時 plots を思わせる。

17.2 今問題にしている区間の走時 plots だけを Fig. 39 から抜き出して Fig. 52 に示す。

一方 Figs. 6 及び 8 の \overline{OJ} を小にすれば、Fig. 53 の (a) 及び (b) 図が得られる。Fig. 52 の (180→120) 曲線の形はこれら (a) 又は (b) 図の初動の走時に対応するものと考えられる。いずれの方に対応させるべきかの判別は、実測曲線の形が唯一的には確定せぬので、一概に決めかねる。然し、どちらかと云えば、(b) 図の方が尤もらしい。

Fig. 52 の T_3 部を除いた (120→0) 曲線の形は Fig. 53(c) の初動の走時曲線に対応させられる。(180→120) 及び (120→0) 曲線の形を合せ考えると、180-130 間で v_2 層の上面が急激に凹んでいるものと推定される。

次に Fig. 54(a) に示した rays a 及び b を考えると、両者の走時差は

$$T_b - T_a = h (\tan \theta_{2,3}/v_2 + \sec \theta_{1,3}/v_1 - \sec \theta_{2,3}/v_2) \doteq h (1/v_1 + 1/v_3 - 1/v_2)$$

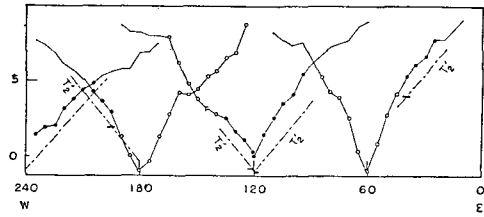
故に、夫々の ray の走時 plots は (b) 図の a 及び b 曲線の如くなる。

Fig. 52 の (240→0) 及び (0→240) 曲線の太線で示した凸形部は Fig. 54 (b) の b 部に対応するものと解せられる。

以上の如き統一的理解を行うためには、Fig. 53 の (a) と (c) の組合せは考えにくい。結果的にも、(b) と (c) を組合せていてよかった。

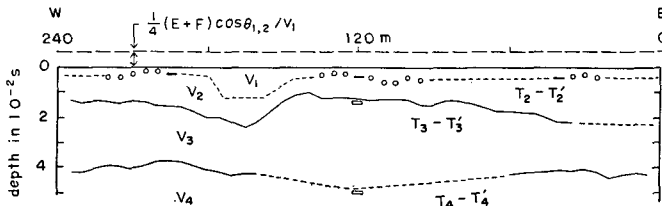
17.3 上述の考察と Fig. 40 (b) とを考え合せると、Fig. 39 の中で T_2 とみなされる走時 plots は Fig. 55 の黒丸だけである。白丸は T_1 である。

先ず、平行2層構造に対する走時曲線の折れ曲り点の位置を使う解析法を採用し、(13.2)の数値を用いて、測点60及び180付近の v_1 層の厚さ H_1 を推算した。又EW120はNS0と同一測点であるので、Fig. 48を参照して測点120の H_1 を決めた。これらの H_1 を(13.4)によって $T_2 - T'_2$ に換算し、 v_1 層と v_2 層の境界面の位置を示したのが、Fig. 56の太い実線分である。



第55図 T_1 及び T_2 の分岐

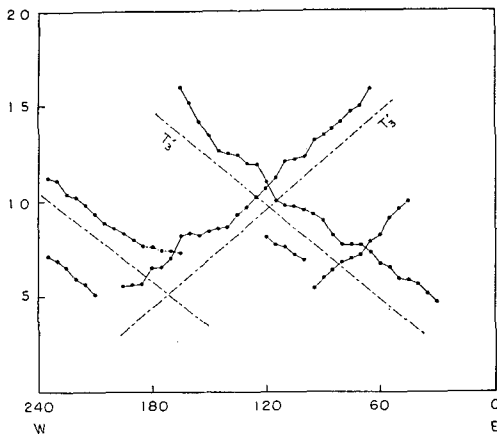
Fig. 55. T_1 is shown by \circ and T_2 by \bullet among various time-distance plots in Fig. 39.



第56図 $T - T'$ で表わした各層迄の深さ

Fig. 56. Thickness of each layer shown by $T - T'$ for span EW.

次に、Fig. 55の測点60、120及び180付近の値が今求めた太い実線分迄の深さの値と一致する如く、 T'_2 直線を作図し、鎖線で示した。この方法によって、太い実線分で示した以外の測点の $T_2 - T'_2$ を知ることができた。Fig. 56に白丸で示したのがそれである。



第57図 T_3 の選出

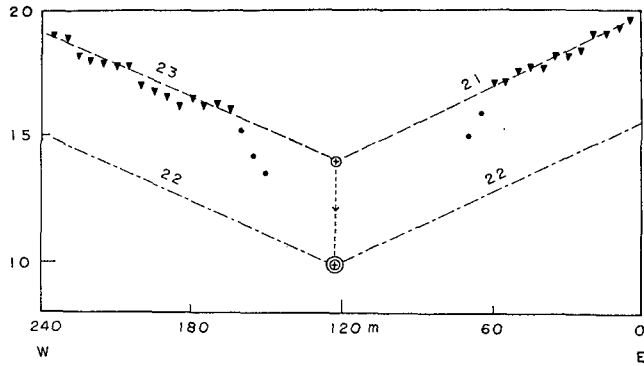
Fig. 57. T_3 picked up from Fig. 39.

掛けの T'_3 直線は、真の T_3 直線とみなしても差し支えないものと思われる。この様にして決めた T'_3 直線をFig. 57に鎖線で描き入れた。Fig. 56の $T_3 - T'_3$ はこの結果を描き移したに過ぎない。

18. EW測線の v_2 層及び v_3 層

18.1 Fig. 40(b)を参照しながら、Fig. 39の T_3 部と思われる plots だけを拾い上げてFig. 57に示す。

一方Fig. 42に於ては、地下構造が水平方向にも変化しているためと思われるが、 T'_3 直線が確定しにくい。Fig. 42の1つの特長はFig. 41と違って、 $240 \leftrightarrow 0$ の T' が夫々 $240 \leftrightarrow 120$ 及び $120 \leftrightarrow 0$ の T' と殆んど一致していることである。Fig. 39を見れば判るとおり、 $T_{3EB} \approx T_{4EB}$ 及び $T_{3EA} \approx T_{4EA}$ であるからであろう。この理由で、 $240 \leftrightarrow 0$ 間で得られた見



第58図 EW 測線の T_4-T_4'
 Fig. 58. T_4-T_4' for span EW.

18.2 Fig. 40 (b)を参照して、Fig. 39で T_4 と判断された plots だけを Fig. 58 に ▼ で示した。この結果から、EW 測線では $v_4=22 \times 10^2$ m/s を採用することにした。NS 測線では $v_4=20 \times 10^2$ m/s と考えたが、両者の違いに意味はない。 v_4 に関しては、両測線とも、甚だしく測定資料を欠いているので、どうせ正確な解析結果は得られぬのである。

Fig. 47 に於けると同様にして、Fig. 58 にも T_4' 直線を作図し、鎖線でそれを示した。その後、この T_4-T_4' を Fig. 56 に描き入れた。

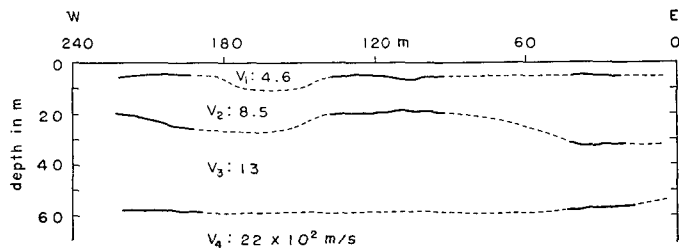
Fig. 56 の測点 120 に於ける白線分は NS 0 で求まっている v_3 層及び v_4 層上面の位置である。幸いにして、両測線の交点で、解析結果のひどい喰い違いはない。

19. EW 測線の地下構造

19.1 Figs. 39 及び 42 の 190-130 間、80 及び 40 付近は走時 plots も T' も極めて乱れていて、地下構造の複雑性を思わせる。190-130 間は Fig. 53 (c) を対応させて Fig. 56 の白丸の間を点線でつないだ。測点 80 及び 40 付近はこれ程大きな異常ではないので、白丸の間を単に点直線で結んだ。

然る後に、15.5 の終りに挙げた式を使って、 $(\ell_{m+1})-(\ell_m)$ を H_m に換算した。

最後に、各 H_m による円弧の包絡線を作図し、その結果、Fig. 59 に示した地下構造が得られた。



第59図 EW 測線の地下構造
 Fig. 59. Subsurface structures for span EW.

19.2 既に **15.3** で述べたのと全く同じ事情により、 v_4 の数値にはかなりの任意性がある。極端な試みとしては、**7** での考察により、NS 及び EW 測線共 v_4 層を消すこともできよう。 T_4 と考えて来た plots をすべて T_3 とみなすこともできるからである。但し、このようにみなした T_3 の傾斜は v_3 層上面の急な昇り勾配によって説明されねばならぬ。

今回は later phase の読み取りを参照し、余り大きな勾配の変化を与えることも不自然と考えたので、 v_4 層を消してみる計算は省略した。およその見当としては、NS 測線では、 v_3 層の上面が 30° 位の傾斜で両端から中央へ落ちこんでいれば、 T_4 を T_3 に考え直すための説明はつく。

このような不確定さを避けるためには、測線長をもっと長くとりねばならぬ。

今回の測定では T_3 が最も長い区間にわたって測定された。頼りになるのは、実は v_3 層上面迄の深さだけでも云える。然し、これとても、上述の如く、 v_4 層を消す試みを行えば、勿論大規模な変更を余儀なくされる。

19.3 初動の走時 plots において、spread のつぎめで走時の喰い違いを生じることが多い。又 T_{EB} と T_{FA} とが一致せぬことも多い。これらの原因として、先ず挙げられるのは発破点の深さの違いである。然し、この補正を施しても、なお一致せぬことが屢々ある。解析者にとっては気になる点なので、その処理に苦しんでいる。

然し、Fig. 40 の蔭を施した喰い違い部分を見れば判るとおり、地震波の path は毎回必しも同じとは限らないものと思われる。すると、発破点の深さが同じでも、spread のつぎめで走時の喰い違いが生じることがあるのは、むしろ当然である。この喰い違いの大小は、逆用すれば、境界面の凹凸の激しさを知る目安にもなる。

19.4 測定報告として得た結果は、単に Figs. 50 及び 59 に過ぎぬ。実は、これらも余り自信のもてる結論ではない。I, II 及び III での考察は“労多くして功少なし”の感がする。

局所的な考察を実際の局部構造の算出に役立てる迄にはゆかなかった。然し、屈折法の解析で最も大切なのは、走時 plots の成り立ちを判読することである。これをおろそかにしては、後にいくら精密な計算を行っても、正しい結果は得られぬ。境界面の凹凸が激しいと、2次的震源から発生する ray が初動として測定されることがある。これは無論 conical waves ではない。故に、このような ray に対しては method of differences による層厚の計算を行うことができない。

想定した ray path が違えば、解析結果も全然違ったものになる。屈折法の解析に対しては、今述べた意味で、未だに基礎的考察が欠けているものと思われる。

謝 辞 この測定報告を書く機会を与えられた地震探鉱実験グループ(代表者飯田汲事)の各位、及びこの測定に御協力下さった石油資源開発 KK の方々特に鳥羽武文氏に感謝する。

この論文の図面は吾々の室の斎藤良子嬢に製図して貰った。

この研究には昭和 37 年度文部省科学研究費の一部を用いた。

13. Refraction Shooting on the Experimental Field for Small Explosions in the Neighbourhood of the City of Mitsuke, Niigata Prefecture

By Kyozi TAZIME

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

Preliminary considerations are given for the purpose of analysing time-distance plots obtained. Since some parts of those plots showed steplike structures under the surface of the ground, the relation between time and distance for steps is discussed ray-theoretically from various points of view. Main results are collected in Figs. 6 to 11 where a lot of explanations must be required. All calculations contained are very primitive but they must be piled up carefully.

Some remarks are delivered to the treatment of T' -line which is in danger of mis-interpretation in case of more layers than two. Several conditions applicable to the method of differences are considered. Wholly different results of analyses, Figs. 15 (a) and 17, may be obtained from the same set of time-distance plots, Fig. 15 (b).

Jumps of T' -line are investigated which suggest discontinuities of medium in horizontal direction.

At last, treatments of the seismic data obtained are discussed, resulting in Figs. 50 and 59 which give seismic models of the subsurface structure in the present experimental field.