

屈折法における多層構造の  
簡単な解析法

金子 徹一\* 田村 芳雄\*\*

A Simple Method of Seismic Refraction Investigation  
in Case of Multiple Velocity layers

by

Tetsuichi Kaneko & Yoshio Tamura

Abstract

The simple method for the determination of depth to refractors in case of three layers was presented in the previous paper. In this paper, the writers developed this method in case of four and more layers, and described its routine procedure and field practice.

In case of four layers, zero distance-time or time-depth  $T_D$  is

$$T_D = \frac{2\delta_1}{V_1} \cos \theta + \frac{2(\delta_2 - \delta_1)}{V_2} \cos \varphi + \frac{2(\delta_3 - \delta_2)}{V_3} \cos i,$$

where  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  are depths of the first, second and third refractors and  $\theta, \varphi, i$  are angles shown in Fig. 2.

If the average velocity of the first, second and third layers is taken as

$$\frac{\delta_3}{V_3'} = \frac{\delta_1}{V_1} + \frac{\delta_2 - \delta_1}{V_2} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{V_3},$$

then the depth  $\delta_3'$  can be determined assuming two layer structures which consist of velocity  $V_3'$  and  $V_4$ . Thus, the evaluation of  $\delta_3'$  can be given by

$$\frac{\delta_3}{\delta_3'} = \frac{\sqrt{(q - nq + s + \frac{nq - sq}{p})^2 - m^2}}{q\sqrt{1 - m^2} + (\frac{q}{p} - q)\sqrt{n^2 - m^2} + (1 - \frac{q}{p})\sqrt{s^2 - m^2}}$$

where  $n = V_1/V_2, \quad s = V_1/V_3, \quad m = V_1/V_4,$   
 $p = \delta_1/\delta_2, \quad q = \delta_1/\delta_3.$

Fig. 4 demonstrates the ratio  $\delta_3/\delta_3'$  for some suitable values  $n, s, m, p$  and  $q$ . Then, it is found that this method can be generally used except that the third layer's velocity  $V_3$  is near the forth's  $V_4$ .

Examples of routine procedure are shown in Table 1 and Table 2 and their refractor's cross-section obtained is demonstrated in Fig. 6. As shown in these Tables, the procedures of calculations can be performed with only a slide-rule.

要 旨

零走時を用いて3層構造を2層構造に置きかえて行なう方法を前に発表した。ここではそれを4層構造以上に拡張して用いることができること、3層構造の場合の計算手順および実例について述べた。4層構造のときは3層構造の結果を利用すれば、これもまた簡単に求められ

る。4層構造以上の多層構造の場合にも、まったく同様の手順が用いられる。なお付録として3層構造の場合の誤差計算チャートを付した。これにより誤差の大きいときには補正することができる。

1. はじめに

屈折法の解析法につき、多くの教科書を通読するとき、その方法に大別して2種類あることに気付かれると

\* 元所員  
\*\* 物理探査部

思う。その1つは走時曲線の折点距離、あるいは原点走時を利用する方法である。この方法では、まず水平2層から水平多層構造に、また傾斜2層から傾斜多層構造にと多くの教科書は順を追って説明している(たとえば、物理探鉱, Vol. 11, No. 4 (十周年特別号), I. 地震探鉱 2.2 屈折法の理論参照)。しかし、読者の多くは経験されたと思うが、水平多層(たとえば4層, 5層)の場合でも、その計算はかなり手数を要するものであり、もし傾斜多層になると3層ぐらいでも大変になる。この理由から、この種の方法は、どの教科書にも必ずといってよいぐらい載つてはいるが、ほとんど実用に供せられないようである。

萩原の方法といわれる方法は、受振点の下で屈折波の波線 PA, PB と AB で作られる三角形で特徴づけられる量により決定される  $T_p = t_1 + t_2 - t_0$  に着目した解析法である。 $t_1, t_2$  は S.P.1 および S.P.2 からの P 点における走時,  $t_0$  は S.P.1, S.P.2 間の走時である。したがって上記の方法とは異なるカテゴリーに属する方法と考えてよい。最近まったく同じ方法は reciprocal method (Hawkins, 1961) として知られている。この方法を多層の場合に拡張し  $T_p$  を零走時として一般化することを栗原 (1959) が発表している。この場合にも零

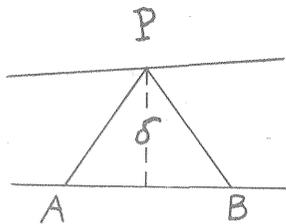
ものにおきかえて計算すること、そのとき一般には誤差はあまり大きくなく、しかも計算手数は驚くほど簡単にできることを発表した。本論文では、その続編として、4層構造およびそれ以上の多層構造の場合にも同様に非常に簡単な計算によつて解析ができることを述べる。

この前の論文では誤差に関する説明が多く、実際計算する手順についての説明が不十分で理解しにくいとの御批判を受けたので、3層構造の場合について、その手順と実例をあげて前論文を補うとともに、この前紙面の都合で省いた誤差曲線を付加することにした。

電力技術研究所の増田秀夫博士は、この方法を実際に利用され、計算手順や多層への拡張についていろいろ御助言を頂いた。厚く感謝するとともに、今後広く同様の御批判や御助言をお願いする。また4層の誤差曲線の計算については宇部興産 K. K. の電子計算機を使用させて頂いた。同社および栗原重利課長の厚情に感謝する次第である。

## 2. 4層構造の場合

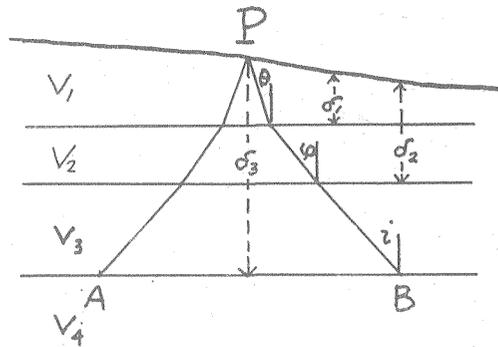
水平な4層構造を第2図のように考えると P 点で観測される零走時  $T_p$  は



第 1 図

走時  $T_p$  は最深層からの屈折波の波線と屈折点によつて作られる三角形(正確には多角形であるが)だけに支配される量であることに変わりない。このことは  $T_p$  が P 点下の速度構造の特性を現わすことを意味する。この際、この三角形の位置は波線 PA, PB の方向によつて決まるものであるから、これは P 点における見掛けの速度(これは走時曲線の微係数である)から決定される。すなわち P 点における走時  $t_1, t_2$  からは決まらないのであるが、萩原はこれを深さ  $\delta$  の長さの半径で各受振点で円を描き、その包絡線を引くことによつて第2層の形を決定する方法をとつた。これは見掛けの速度を考えて三角形の位置を決めることと原理的には同一のことで、手続きの相違にすぎない。

さて、筆者の一人はこの方法の優れた方法であることに着目し、多層構造の場合の零走時  $T_p$  から深度  $\delta$  を求める方法として、まず3層構造の三角形を2層構造の



第 2 図

$$T_p = \frac{2\delta_1}{V_1} \cos \theta + \frac{2(\delta_2 - \delta_1)}{V_2} \cos \varphi + \frac{2(\delta_3 - \delta_2)}{V_3} \cos i \quad (1)$$

で与えられる。 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  はそれぞれ第2, 第3, 第4層までの深さであり、 $\theta, \varphi, i$  では

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \left\{ 1 - (V_1/V_2)^2 \right\}^{1/2}, \\ \cos \varphi &= \left\{ 1 - (V_2/V_3)^2 \right\}^{1/2}, \\ \cos i &= \left\{ 1 - (V_3/V_4)^2 \right\}^{1/2} \end{aligned}$$

である。そこで第1, 2, 3層の平均速度を  $V_3'$  とし、3層構造の場合と同じように次式で表わすことにする

$$\frac{\delta_3}{V_3'} = \frac{\delta_1}{V_1} + \frac{\delta_2 - \delta_1}{V_2} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{V_3} \quad (2)$$

したがって、第1層と第2層との平均速度  $V_2'$  を用いると

$$\frac{\delta_3}{V_3'} = \frac{\delta_2}{V_2'} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{V_3} \quad (3)$$

となる。

次に、この平均速度  $V_3'$  を用いて第3図のように2層構造と仮定して同じ零走時  $T_p$  から第4層の深さを求め、これを  $\delta_3'$  とし、これと真の深さ  $\delta_3$  との比を求めると

$$\frac{\delta_3}{\delta_3'} = \frac{\sqrt{(q-nq+s+\frac{nq-sq}{p})^2 - m^2}}{q\sqrt{1-m^2} + (\frac{q}{p}-q)\sqrt{n^2-m^2} + (1-\frac{q}{p})\sqrt{\delta_3^2 - m^2}} \quad (4)$$

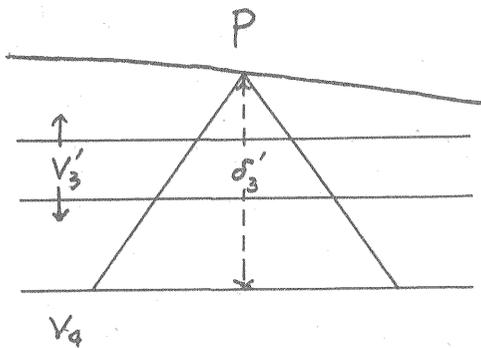
である。ただし

$$n = V_1/V_2, \quad s = V_1/V_3, \quad m = V_1/V_4, \quad p = \delta_1/\delta_2, \\ q = \delta_1/\delta_3 \quad (5)$$

である。

この(4)式を計算することにより、どのような場合には4層構造を2層構造として計算してもよしいかがわかるわけであり、逆にどのような場合にこの方法がそのまま用いられないかが明確になるわけである。

3層構造の場合には層が傾斜している場合についても  $\delta_1/\delta_2$  の値を計算したのであるが(付録第9図参照)、その経験によれば傾斜角があまり大きくない(10度以内)場合には、水平構造の場合とあまり相違がないことが知られている。したがって、今度は計算の手数も大変なので傾斜した場合は省略して水平のときだけを計算した。

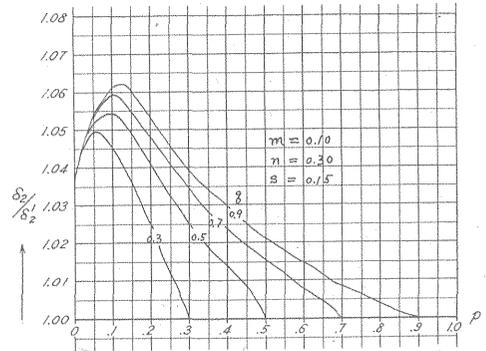


第3図

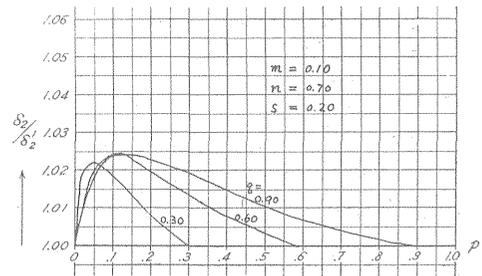
ここに念のために注意しておかなければならないことは、水平という意味は各速度層の境界面が平行である場合をいうのであって、必ずしも速度層全部が水平である必要はない。すなわち第2図で地表面が傾いていても、前記の計算に影響がないのである。また三角形 PAB のことを考えているから、この外でどんな複雑の形をして

いるかは関係のないことである。(5)式から  $V_4 > V_3 > V_2 > V_1$  のときは  $n < s < m$  であるし、また  $1.0 > p > q$  の関係があるので、その範囲で(4)式の計算を行なつた、低速度層が中間層にある場合についても、この方法は用いられると思うが、この問題は次の機会にゆずることにする。

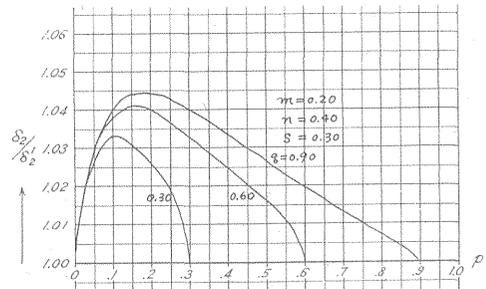
この計算は3層構造の場合に較べて変数の数が多いので数倍の手数を要するわけである。その数例を第4図に示す。このように  $(n, s, m, p, q)$  の組によりそれぞれ誤差曲線が計算できるのであるが、これらを全部掲載するには多大な紙面を要するので、3層構造のときと同じように誤差5%、10%をめやすにした分布図を作ることにした。この際第4図で見られるように、 $q$  の値の



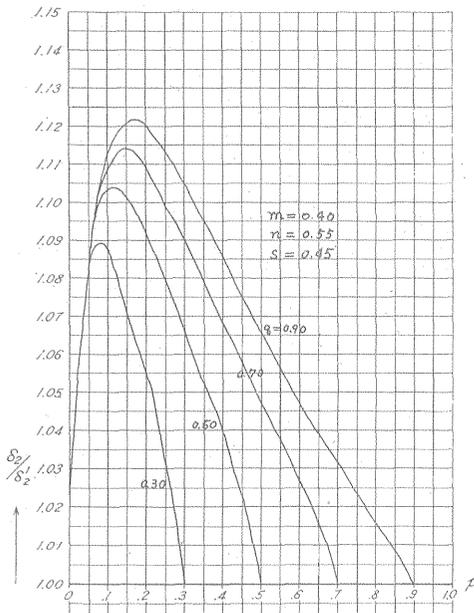
第4a図



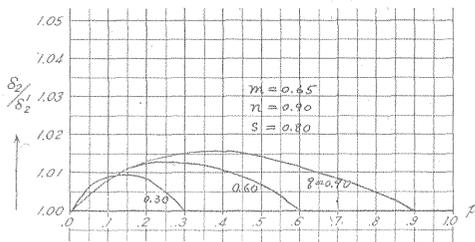
第4b図



第4c図



第 4 d 図



第 4 e 図

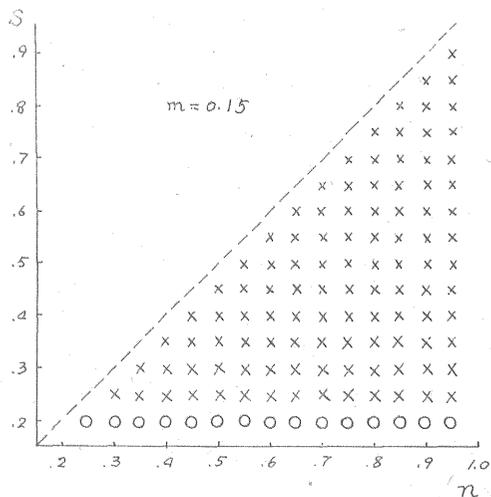
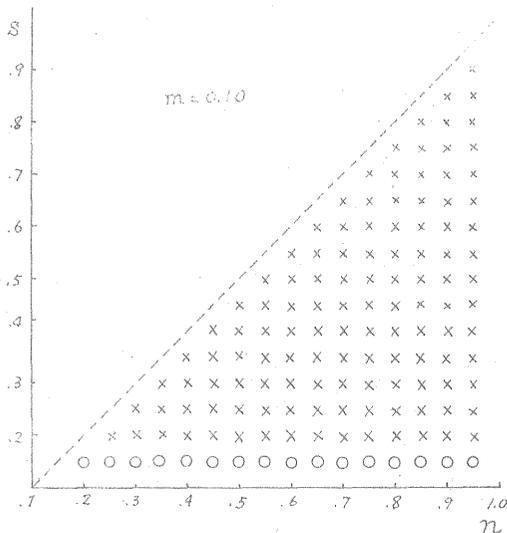
違いにより誤差の最大値はそれほど変化なく、一般に  $q=0.90$  のときの曲線が他のものより大きいことが知られる。そこで、一応変数  $p, q$  を通じて最大誤差値だけを考へてその分布図を作成すると第 5 図のようになる。この値の見方は 3 層構造の場合と同じである。すなわち、 $\times$  印の場合には平均速度を用いて計算した深さ  $\delta_2'$  が真のものに対してすべての場合に誤差 5% 以下である。したがつて、この場合にはあとに述べる手順によつて計算してもよいわけである。 $\circ$  印の場合には  $\delta_2'$  が真の深さ  $\delta_2$  に対して 5~10% だけ小さいことがありうる場合である。第 4 a 図のような場合であるから必ずしもすべての場合に 5% 以上の誤差があるわけではないことは注意して頂きたい。 $\odot$  印は第 4 d 図のような場合を示しているから  $\delta_2'$  の値は  $\delta_2$  に対して一部の  $p, q$  の値に 10% 以上の誤差が起こりうるわけである。第 5 図を通覧してわかることは  $s$  の値が  $m$  の値に近いときには誤差が大きいわけである。このことは第 3 層の速度  $V_3$  と第 4 層の速度  $V_4$  との値が接近していることであり、臨界角  $i$  の値が直角に近く、したがつて第 2 図の PAB の三角形の底辺の  $\overline{AB}$  の長さが非常に大きくなる場合に当るので当然のことと思われる。他方このような場合には  $V_3$  の層からの屈折波はなかなか観測されにくいので実際にはあまり起こらないであろう。

### 3. 3層構造の計算手順と実例

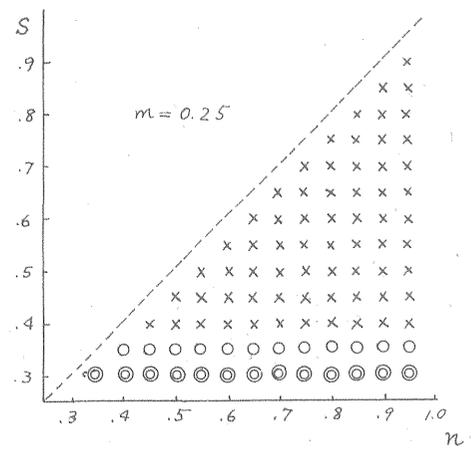
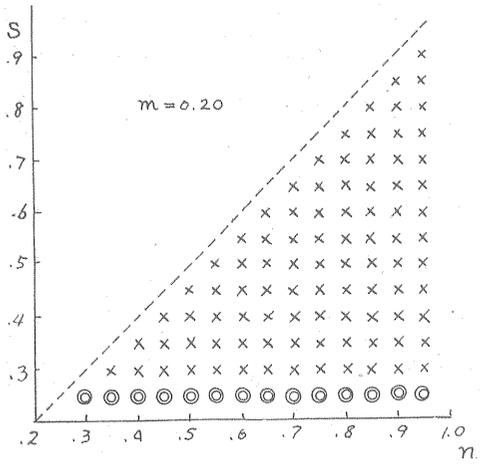
#### 3.1 手 順

##### 手順 1

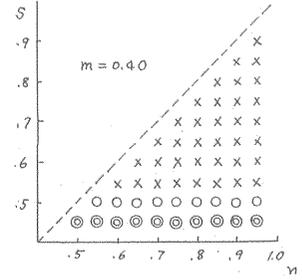
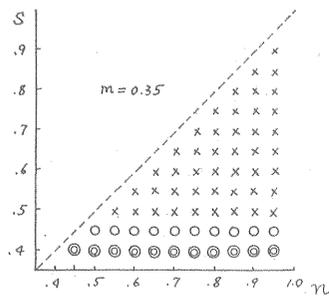
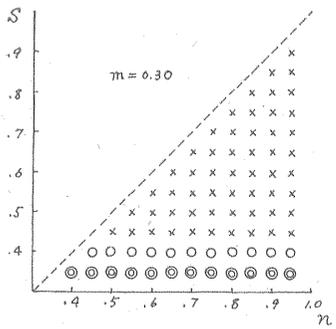
受振点 P における屈折走時を  $t_1, t_2$ , S.P. 1 から S.P. 2



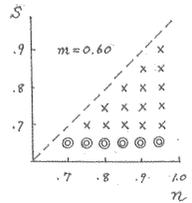
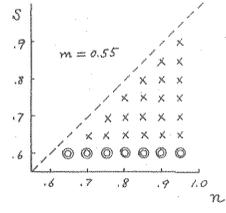
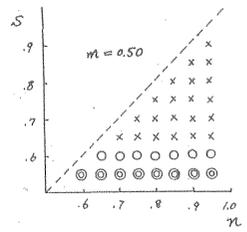
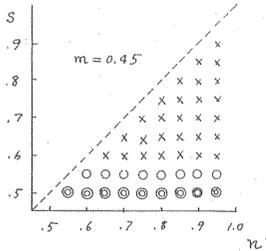
第 5 a, b 図



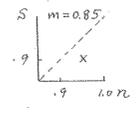
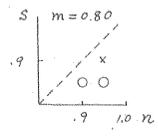
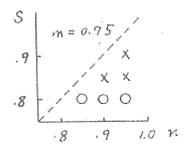
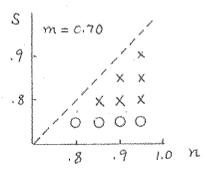
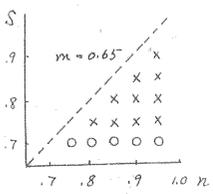
第 5 c, d 図



第 5 e, f, g 図



第 5 h, i, j, k 図



第 5 l, m, n, o, p 図

に至る走時を  $t_0$  とすると零走時  $T_p$  の  $\frac{1}{2}$  は

$$\frac{T_p}{2} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2 - t_0)$$

であるから、これを計算しておく。

**手順 2**

P 点の下の速度  $V_1, V_2, V_3$  はわかっているから  $n=V_1/V_2, s=V_1/V_3$  を計算する。また P 点の下の第 2 層までの深度  $\delta_1$  (垂線の長さ) を測つておく。

**手順 3**

第 8 b 図において、 $n, s$  の値について×印に当るかどうかが検討する。もし○印、◎印に当るときは第 9 図の  $\delta/\delta'$  の値を利用して手順 13 により補正する。

**手順 4**

第 3 層までの深度  $\delta_2'$  を仮定し、これを用いて  $\delta_1/\delta_2'$  を計算する。

**手順 5**

手順 2, 4 で求められている  $n$  と  $p$  から  $P=p+(1-p)n$  を計算する。

**手順 6**

$V_1$  を P で割つて平均速度  $V_2'$  を求める。

$$(V_2' = V_1/P)$$

**手順 7**

$V_2'/V_3$  を計算するとこれは  $\sin i_2'$  であるから三角函数表から  $\cos i_2'$  を求める。

**手順 8**

手順 6 で求めた  $V_2'$  を  $\cos i_2'$  で割る。

**手順 9**

手順 1 で求めておいた  $T_p/2$  に  $V_2'/\cos i_2'$  をかけると深度  $\delta_2$  が求められる。

**手順 10**

こうして求めた  $\delta_2$  の値と手順 4 で仮定した  $\delta_2'$  とを比較して一致すれば、これが求める第 3 層の深度である。もし、仮定した  $\delta_2'$  よりも大きい場合には第 2 次近似値として  $\delta_2$  より多少大きめの値を、また小さいときは多少小さめの値を仮定して  $\delta_2''$  とする。

**手順 11**

手順 4 の  $\delta_2'$  の代りに  $\delta_2''$  をおいて  $\delta_1/\delta_2''$  を計算し、以下手順 5, 6, 7, 8, 9 により新しい  $\delta_2$  を求める。

**手順 12**

求めた新しい  $\delta_2$  を  $\delta_2''$  と比較して一致すれば、その値が第 3 層の深度である。もし相違があれば手順 10 により同様の操作を繰り返して行く。

**手順 13**

手順 2 で  $n, s$  の値の位置が第 8 b 図の○印、◎印に当たっているときは、上に求めた  $\delta_2$  の値に第 9 図の  $n, s, p$  の位置に当る値を掛ければそれが求める値である。

こうして求められた  $\delta_2$  の長さで円を描き、その包らぐ線により地下構造を決定することは萩原の方法と同じである。

これらの計算は計算尺と三角函数表だけあれば充分である点の特徴である。

**3.2 実例**

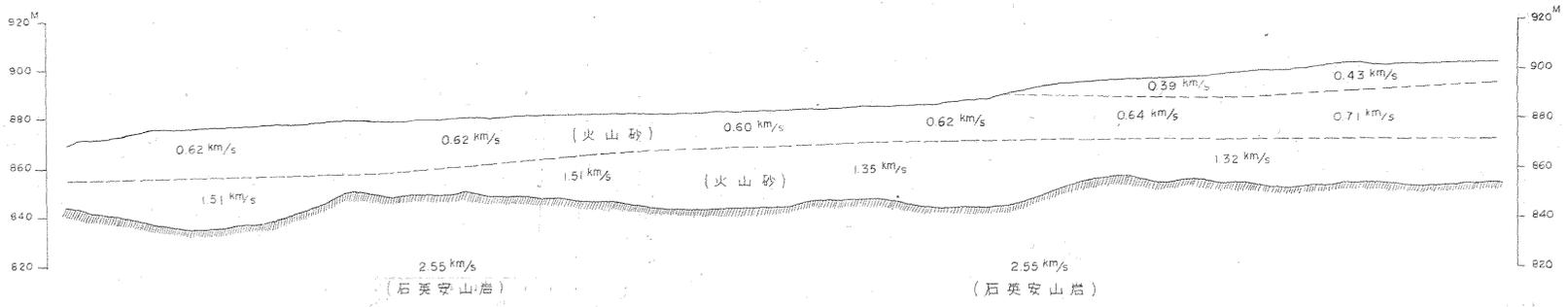
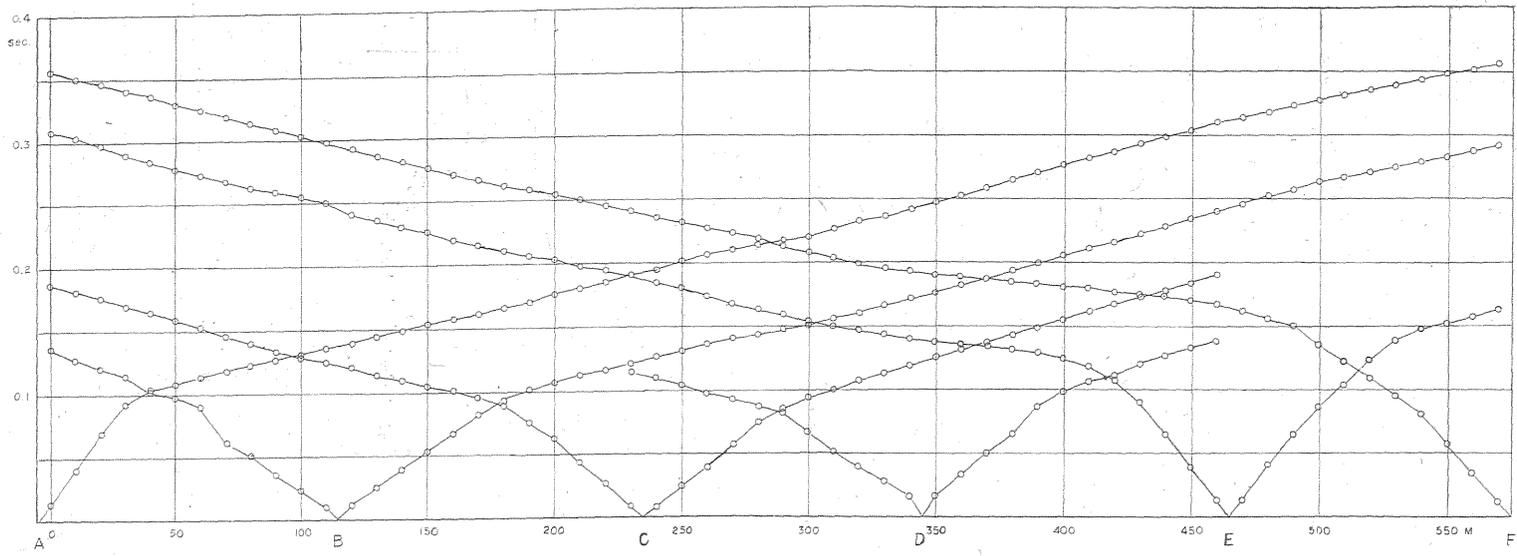
この実例は北海道の某ダム地点において行なわれた地震探査の結果を増田秀夫博士がこの方法を用いて解析したものである。第 1 表は上記の手順により計算したものであるが、 $T_p/2$  の値を求めるのは萩原が古く発表している便利な計算シートがあるので、それをそのまま使用した。これにより、いわゆる「はぎとり走時曲線」として第 3 層の速度が求められる。第 1 表の第 1 列は受振点番号、第 2 列は第 1 層の深さ、第 3 列は手順 1, 第 4, 5 列は手順 4, 第 7 列は手順 5, 第 8 列は手順 6, 第 9, 10 列は手順 7, 第 11 列は手順 8, 第 12 列は手順 9 である。

実際の数字について説明すると計算に共通する  $V_1, V_2, V_3, n, s$  の値がはじめに記入してある。そこで  $n, s$  の値から第 8 b 図により×印に当ることが確かめられる。次に受振点番号 115 についてみるに、まず深さ  $\delta_2'$  を 45.0m に仮定して手順を進めて行くと 36.5m と算出された。すなわち 10m も浅く出たわけである。そこで手順 10 に従つて  $\delta_2''$  を 35.0m と仮定して同様の操作を進めて行き 32.1m が得られた。そこでさらに  $\delta_2'''$  を 30.0m とすると 29.5m となり、 $\delta_2''''$  を 29.0m とすると 28.9m になる。すなわち僅かな誤差を考慮すれば 28.9m が求める深度である。

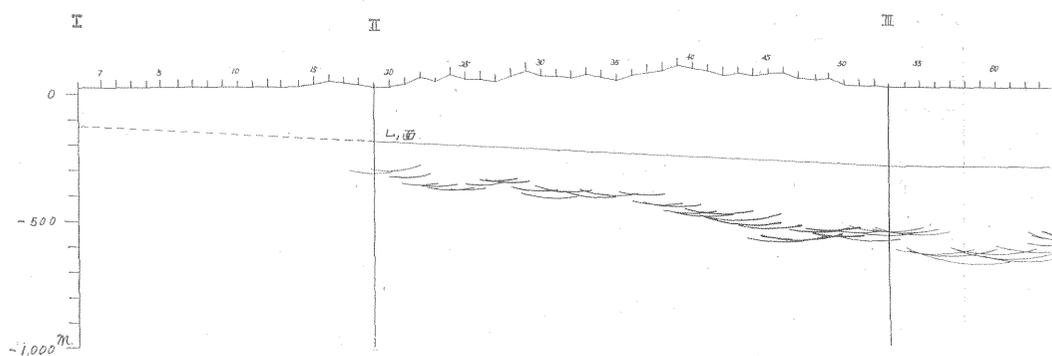
以上のように、はじめに仮定する深度が真のものより相当はずれているときには数回の繰り返し操作が必要であるが、この表からもわかるように、次の受振点からは初めから真の深度に相当近い値を仮定することができるので、大体 2 回ぐらいの操作で目的は達せられる。解析された結果を第 6 図に示す。

もう 1 つの実例として常磐地区 (石城南部) における炭田調査について述べる。この地域はよく知られているように (物理探鉱, Vol. 11, No. 4 (十周年特別号), 石炭の探鉱の章参照), 3 層として解析されているが、第 7 b 図に見られるように第 2 層の速度  $V_2$  は一般に走時曲線の上に現われないことが多い。したがつて第 1 層と第 2 層の境界面 (屈折面)  $L_1$  は走時に現われないための条件とこの境界面が坑井内速度測定から石城層の上部に相当することから、調査測線付近の試錐結果とを考慮して推定する方法とがとられている。この際屈折面  $L_1$  の形は基盤の形  $L_2$  に相当支配されているのが普通で、あまり不自然な形は避けるべきである。

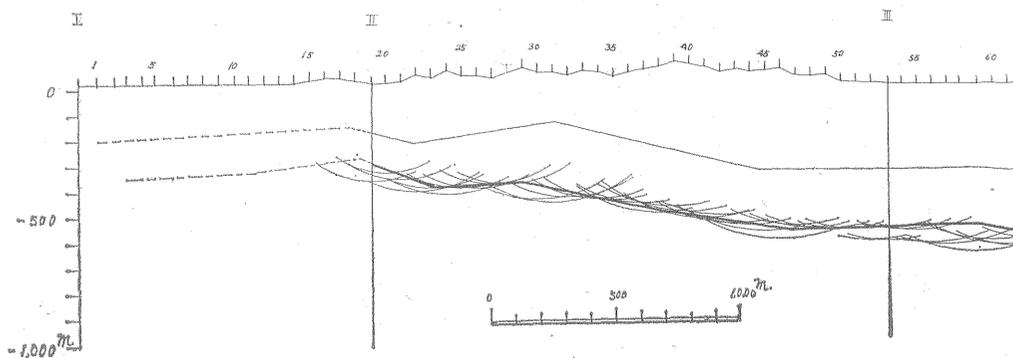
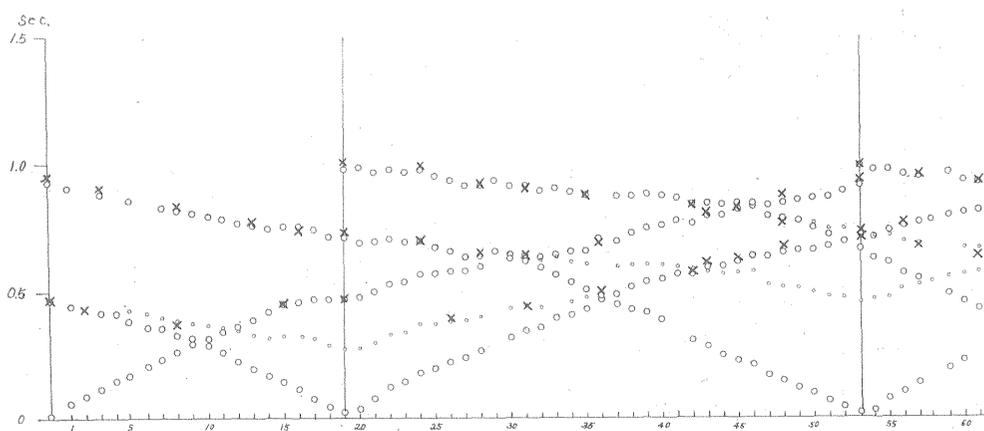
7-(7)



第 6 図



第 7



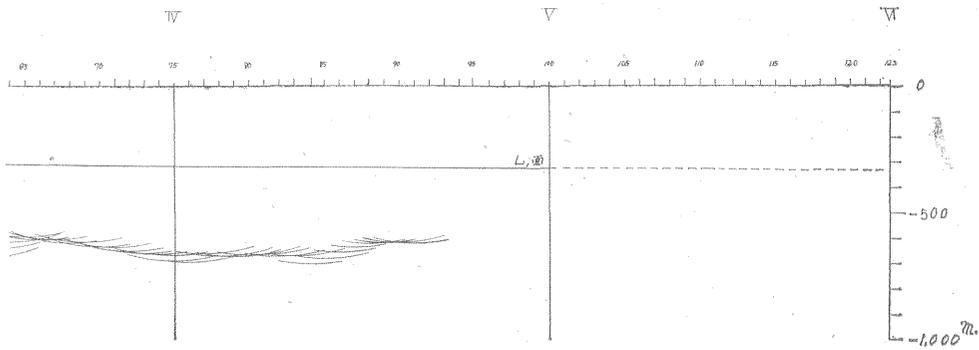
第 7

そこで解析にあたってはまず第1に  $L_1$  面を第7a図のように仮定した。この際走時曲線からも基盤深度は大体西から東に向かって増すこと、第2層の速度  $V_2$  が走時曲線に現われていないこと、この測線付近にある2つの試錐地点の資料が考慮されている。また第2層の速度  $V_2$  は坑井内速度測定の結果が用いられている。

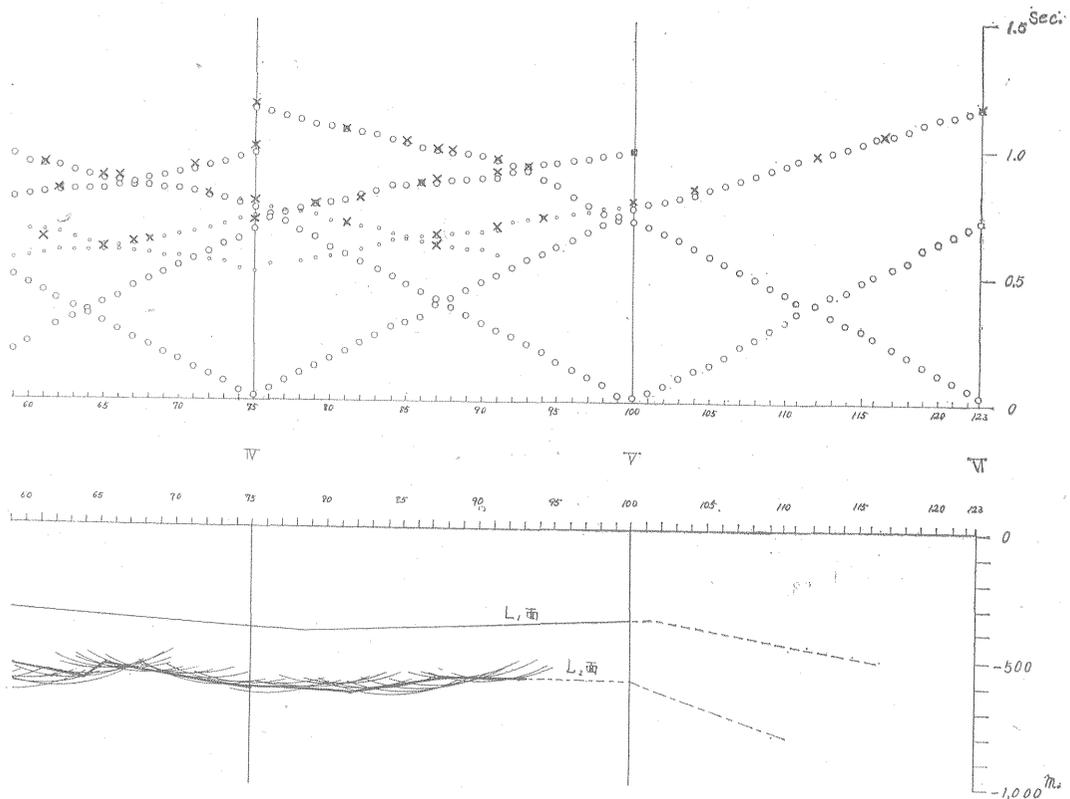
これにより  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  がわかるので、基盤の深度  $\delta_0$  は前記の手續により計算される。その結果

が第7a図に示されている。この結果 S. P. III 付近はかなり複雑な構造になっており、これは他の資料からも断層帯であることが知られている。この結果をもとにして一応基盤面を描き、さらにその基盤面を基準にして  $L_1$  面の補正して計算しなおした結果が第7b図である。参考のために図式計算により求めた走時を走時曲線の上に×印として記入した。

この実例のように屈折法において不確実な屈折面が存



a 図



b 図

在する場合は少なくない。ほとんど第2層の屈折走時が観測されない場合もあるし、観測されても非常に短い区域だけに限られることが多い。したがって、このようなときは  $L_1$  面のある部分は適当に推定しなければならない。そして、 $L_1$  面の形を変えるごとに  $L_2$  面が変わるので、従来の計算方式では3層以上になるところの場合には非常に手数を要する。この方法では、この例でもわかるようにあまり手数を要しないし、機械的に計算することができるので、種々のモデルを比較しながら速度

構造を決定することができる。

#### 4. 4層構造の計算手順と実例

##### 4. 1 手順

##### 手順 1

測点 P における第4層の屈折走時  $t_1$ 、 $t_2$  および往復走時  $t_0$  を用いて零走時の  $\frac{1}{2}$  を求めることは前と同じ。

$$\frac{T_0}{2} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2 - t_0)$$

第 1 表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
受振点 番 号	$\delta_1$	$T_D/2$	$\delta_2'$	$p$	$(1-p)n$	P	$V_2'$	$V_2'/V_3$	$\cos i_2'$	$V_2'/\cos i_2'$	$\delta_2$
		$V_1=0.618 \text{ km/s}$		$V_2=1.51 \text{ km/s}$		$V_3=2.17 \text{ km/s}$					
		$n=V_1/V_2=0.618/1.51=0.409$		$s=0.618/2.17=0.285$							
115	21.2	3.7	45.0 35.0 30.0 29.0	.471 606 707 731	.217 161 120 110	.688 767 827 841	.899 805 747 734	.414 371 344 338	.910 929 939 941	.987 867 796 780	36.5 32.1 29.5 28.9
120	20.5	3.65	28.0 29	733 707	109 120	842 827	734 747	338 344	941 939	780 796	28.5 29.0
130	19.4	3.6	28.0 30	693 647	126 145	819 792	758 781	349 360	937 933	808 837	29.1 30.1
140	19.0	3.55	30.0	634	150	784	790	364	932	847	30.0
150	18.7	3.55	30.0 30.5	624 614	154 158	778 772	795 800	366 369	931 929	854 863	30.3 30.6
160	18.2	3.45	30.0	607	161	768	804	370	929	863	29.8
170	16.8	3.4	28.0 31	600 542	164 188	764 730	810 847	373 390	928 921	873 920	29.7 31.3
180	17.0	3.4	31.0	549	184	733	843	388	922	915	31.1
190	16.3	3.45	32.0 33.5	510 487	201 210	711 697	870 887	400 409	916 912	950 973	32.7 33.5
200	15.6	3.6	35.0 38	446 411	227 241	673 652	918 948	423 436	906 900	1012 1052	36.5 37.9

第 2 表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
受振点 番 号	$\delta_1, \delta_2$	$T_D/2$	$\delta_2', \delta_3'$	$p, q$	$(1-p)n$	P	$V_2', V_3'$	$V_3'/V_4$	$\cos i_3'$	$V_3'/\cos i_3'$	$\delta_3$
490	10.4		28.0	372	386	758	571				
		$V_1=0.43$	$V_2=0.71$	$V_2'=0.571 \text{ km/s}$	$V_3=1.32 \text{ km/s}$	$V_4=2.55 \text{ km/s}$					
		$n'=V_2'/V_3=0.571/1.32=0.433$	$n=0.61$	$s=0.33$	$m=0.17$						
	28.0	6.1	40.0 46.0 47.5	700 609 590	130 169 177	830 778 767	687 734 754	270 288 292	963 958 956	714 767 780	43.5 46.8 47.6
500	10.8		29.2	370	387	757	572				
		$V_2'=0.572 \text{ km/s}$	$V_3=1.32 \text{ km/s}$	$V_4=2.55 \text{ km/s}$							
		$n'=V_2'/V_3=0.572/1.32=0.433$									
	29.2	6.2	49.5 47.5	590 615	177 167	767 782	745 732	292 287	956 958	780 765	48.4 47.4
510	11.2		30.0	374	385	759	570				
		$V_2'=0.570 \text{ km/s}$	$V_3=1.32 \text{ km/s}$	$V_4=2.55 \text{ km/s}$							
		$n'=V_2'/V_3=0.570/1.32=0.432$									
	30.0	6.25	48.0 46	625 652	162 150	787 802	724 710	284 279	959 960	955 740	47.2 46.2

手順 2

P 点の下の速度  $V_1, V_2, V_3, V_4$  から  $n=V_1/V_2, s=V_1/V_3, m=V_1/V_4, p=\delta_1/\delta_2$  を求めておく。  $n, s, m$  の値の位置が第 4 図の × 印に当るかどうかが検討し、 × 印に当れば以下の計算で誤差はない。

手順 3

$\delta_3'$  を仮定して  $q=\delta_1/\delta_3'$  を計算する。

手順 4

$V_1$  と  $V_2$  との平均速度は一般には 3 層構造の計算のとき求めてあるはずであるが、もし求めてなければ計算する。この計算は 3 層構造のときの手順によるとよい。

これにより  $V_1/V_2'=n'$  を求める。

手順 5

$q$  と  $n'$  が求められると第 1 層と第 2 層をまとめて第 1 層と考えた 3 層構造になるので、以下の手順は  $q \rightarrow p, n' \rightarrow n$  とおいた 3 層構造の場合の手順 5 以下とまったく同様になる。なぜならば (2), (3) 式を見れば容易に了解されよう。

手順 2 において第 5 図の ○ 印, ◎ 印に当る場合には 3 層構造のときと同様に第 4 図から補正することができる。この図は全部作成され筆者の手もとにあるが紙面の都合上今回は割愛した。

4.2 実例

第 6 図の受振点番号 450 ~ 550 の間では 4 層構造になっている。第 2 表はこの部分の 4 層構造の解析の実例である。計算シートとしては第 3 層の場合とまったく同じである。受振点番号 490 について説明すると第 1 行は上の 3 層構造の場合で、ここでは第 1 層と第 2 層との平均速度  $V_2'$  を求めるための計算である。ただし、この受振点で第 3 層の計算がすでに行なわれておれば  $V_2'$  の値はすでに計算済みのはずである。これにより  $V_2'=0.571$  km/sec の値が求められる。第 2 行には手順 2 に必要な  $V_1, V_2, V_3, V_4, n, s, m$  などの値が記入してある。この ( $n, s, m$ ) の値から第 5 図の位置は × 印に当ることが確かめられるので計算結果には補正は要しない。

この下の行は 3 層構造の場合とまったく同じで第 2 列に  $\delta_1$  の代りに  $\delta_2$  を、第 4 列に  $\delta_2'$  の代りに  $\delta_3'$  を、第 5 列は  $p$  を  $q$  におきかえて、 $n=V_1/V_2$  の代りに  $n'=V_2'/V_3$  を計算すればよい。これは手順 3, 4 に当る。この実例では  $\delta_3'$  を 40.0 m に仮定すると 43.5 m と計算されたので、今度は 46.0 m に仮定したところ 46.8 m になった。そこで 47.5 m と仮定したところ 47.6 m となったので 47.6 m が解である。

この場合には受振点により、その下の第 2 層、第 3 層の深度が少しずつ変わっているので  $V_2'$  の値は少しずつ変わる。したがって受振点番号 500, 510 のように計算を進めて行くわけである。このようにして得られた速

度層構造は第 6 図に示されている。

5. 5 層構造以上の多層構造の解析

今回は一応 4 層構造までの平均速度を用いる場合の誤差計算をしたのであるが、この手法を 5 層構造あるいはそれ以上に拡張することはさしつかえないものと思われる。もちろん 5 層構造以上の場合についても第 5 図のようなものを作成しておけば安心してこの方法を用いることができるのであるが、3 層および 4 層構造のこれまでの結果から、最下層とその上の層との速度の値が非常に接近していなければ、誤差はあまり大きくないことが推定される。

実際の計算手法は 3 層構造を 4 層構造にしたとき  $V_2' \rightarrow V_3', V_3 \rightarrow V_4, \delta_1 \rightarrow \delta_2, \delta_2' \rightarrow \delta_3'$  とおきかえたと同じように、5 層構造の場合には  $V_3' \rightarrow V_4', V_4 \rightarrow V_5, \delta_2 \rightarrow S_3, \delta_3' \rightarrow \delta_4'$  にすれば、まったく同じ手順で 5 層構造を決定できるわけである。

これは (2), (3) 式を  $n$  層に拡張すれば

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{n-1}}{V_{n-1}'} &= \frac{\delta_1}{V_1} + \frac{\delta_2 - \delta_1}{V_2} + \frac{\delta_3 - \delta_2}{V_3} + \dots + \frac{\delta_n - \delta_{n-1}}{V_n} \\ &= \frac{\delta_{n-1}}{V_{n-1}'} + \frac{\delta_n - \delta_{n-1}}{V_n} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、3 層構造の場合とまったく同じ関係があるからである。

6. あとがき

屈折法の解析は、その原理は簡単であるが案外に手数に要するので、実際計算をする人にとつては重荷である。このため図式計算に便利な数表や器具が多くの人々によつて発表されている。

計算手数を簡単にすることは確かにそれだけ能率をあげることであるが、実はそれだけではない。それは、多くの屈折法の調査において各速度層をきめるに充分なだけ受振点と爆発点とがとられることはない。これは要求する調査精度や調査経費の立場からも起こりうることであるが、他方しばしば初動として屈折波が走時に現われない場合からも生ずる。

このような場合には解としての地下速度層にある範囲の任意性が生ずる。そして、この決定には他の資料、たとえば地表地質調査の情報、あるいは他の測線による情報などが用いられるのが常である。たとえば第 7 b 図のように第 1 層と第 2 層との境界は大體平行に近い関係にあることは地質的推定である。こうした情報を利用するとき、解析手数が繁雑であれば、ともすればある 1 つの解に固定させてしまうようになるであろう。この意味から解析手数を簡単にして、これに投ずる時間の能率をよくすることは調査結果の精度を向上させるためにも役立つ

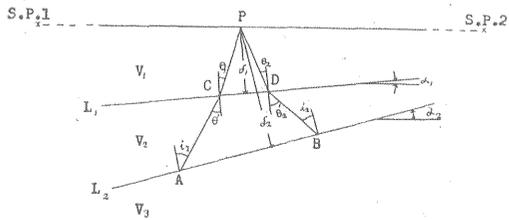
つものと考える。

前記のように低速の『はさみ層』のある場合、ミラーシ層のある場合にも同じような手法が利用できる。今後この点について調べてみたいと考えている。

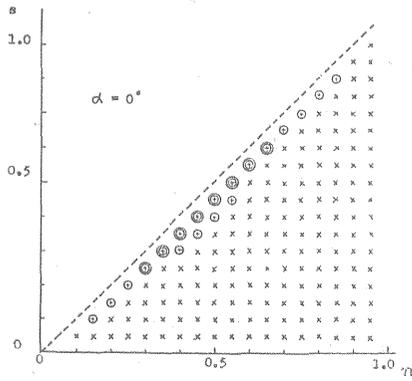
(昭和37年3月稿)

文献

- 1) 金子徹一：屈折法における3層構造の簡単な解析法，物理探鉱，Vol. 14, No. 2, p. 26~32, 1961
- 2) Hawkins, L. V. : The Reciprocal Method of



第8a図



第8b図

Routine Shallow Seismic Refraction Investigations, Geophysics, Vol. 26, No. 6, p. 806~819, 1961

附録 3層構造の場合の誤差曲線

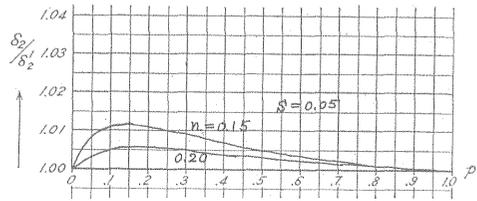
第9図 (1-1) より図 (1-17) までは  $\alpha=0$  のとき  $\alpha=\alpha_1-\alpha_2$  (第8図参照)

第9図 (2-1) より図 (2-17) までは  $\alpha=10^\circ$  のとき

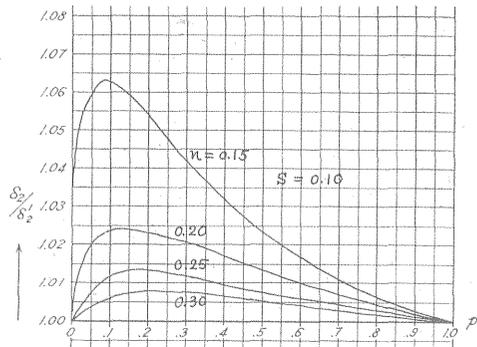
第9図 (3-1) より図 (3-16) までは  $\alpha=20^\circ$  のとき

第9図 (4-1) より図 (4-15) までは  $\alpha=30^\circ$  のとき

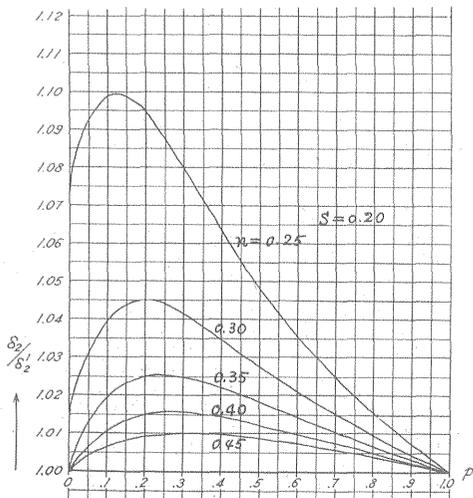
第9図 (5-1) より図 (5-13) までは  $\alpha=40^\circ$  のとき



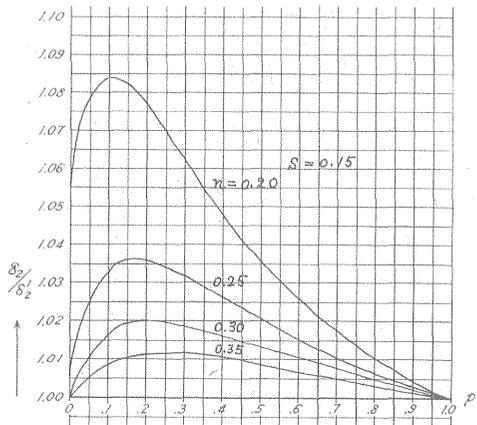
第9-1-1図



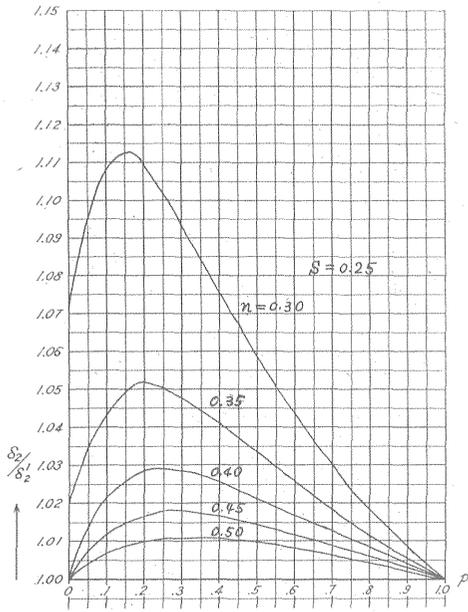
第9-1-2図



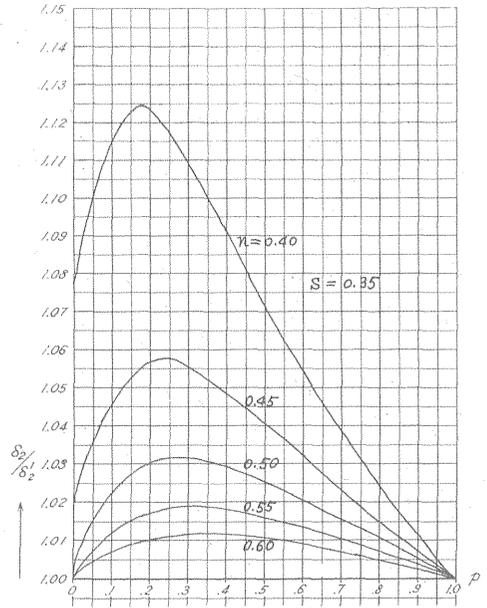
第9-1-4図



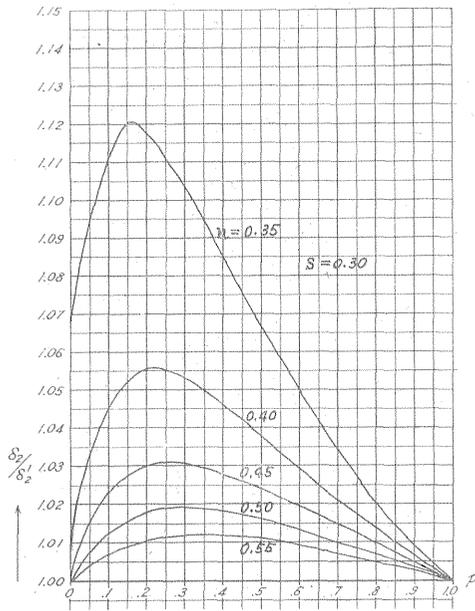
第9-1-3図



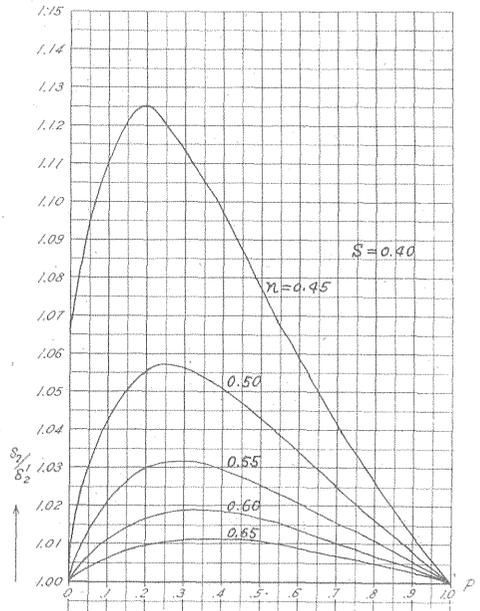
第 9-1-5 図



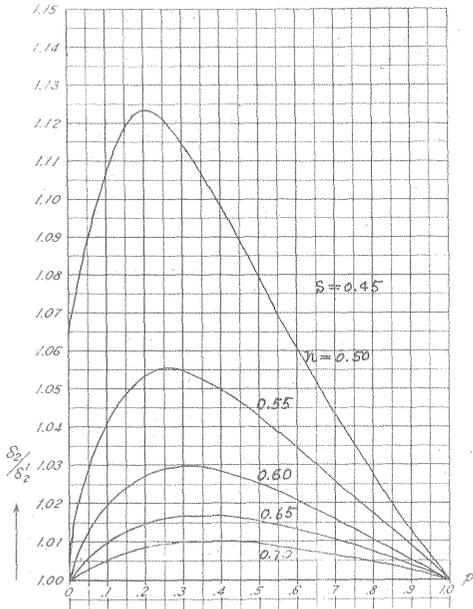
第 9-1-7 図



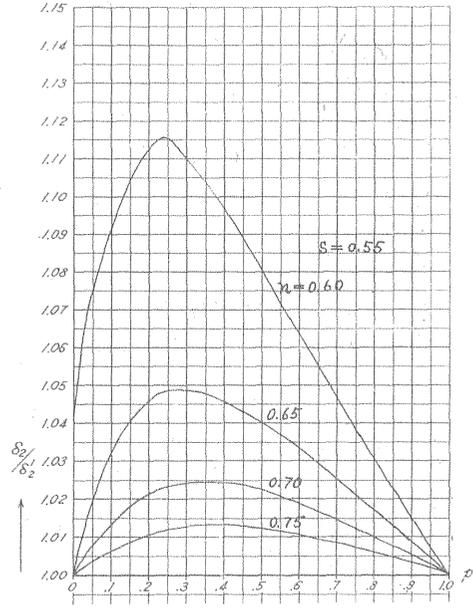
第 9-1-6 図



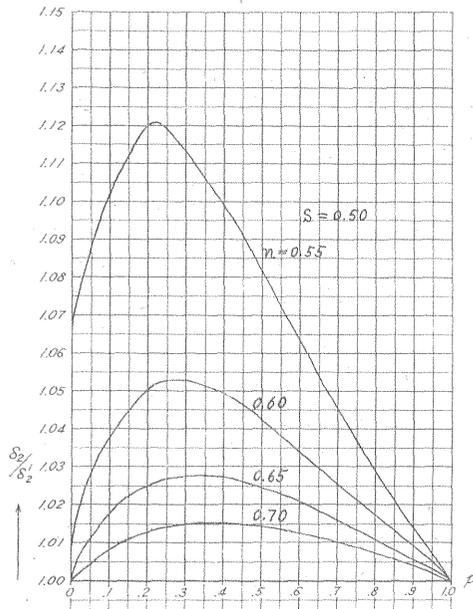
第 9-1-8 図



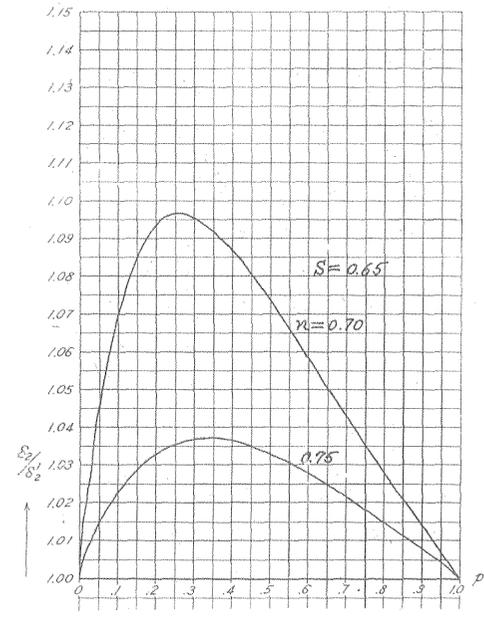
第 9-1-9 图



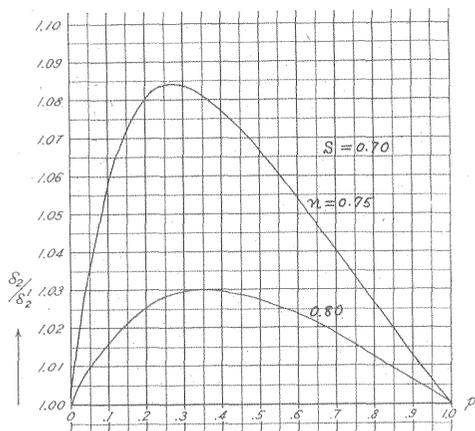
第 9-1-11 图



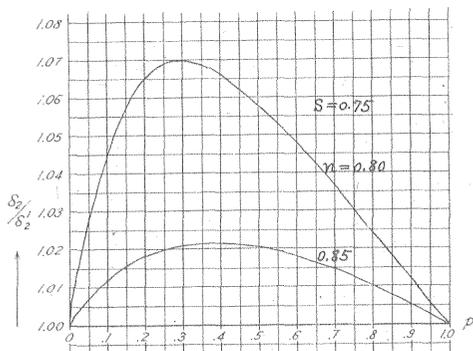
第 9-1-10 图



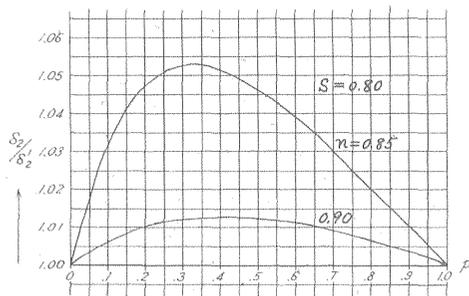
第 9-1-12 图



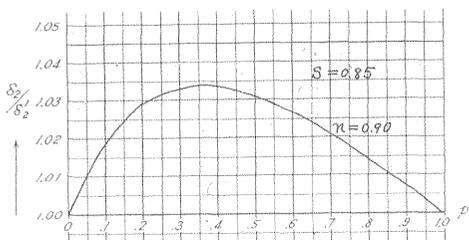
第 9-1-13 図



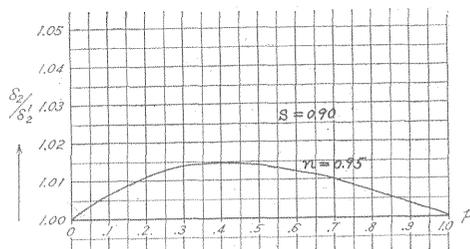
第 9-1-14 図



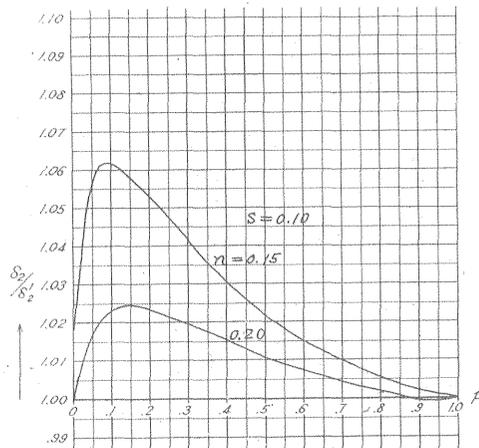
第 9-1-15 図



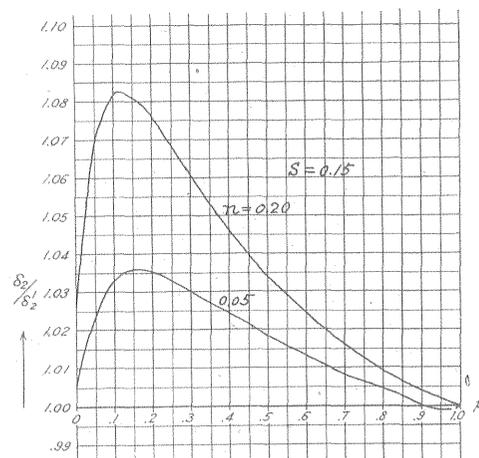
第 9-1-16 図



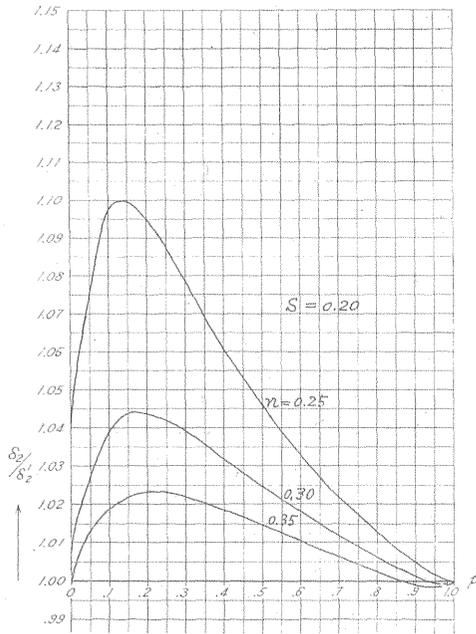
第 9-1-17 図



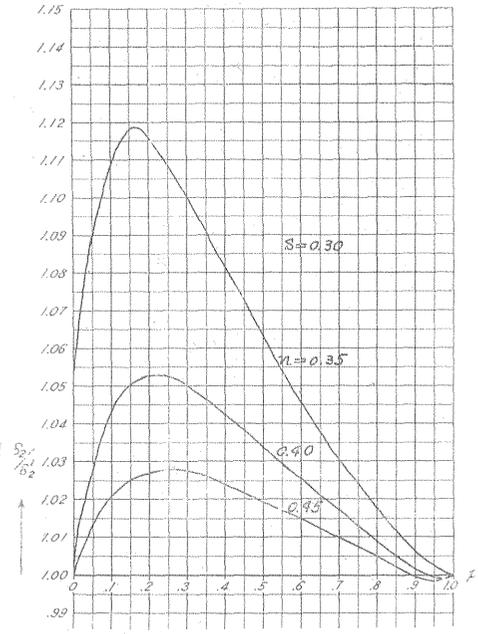
第 9-2-1 図



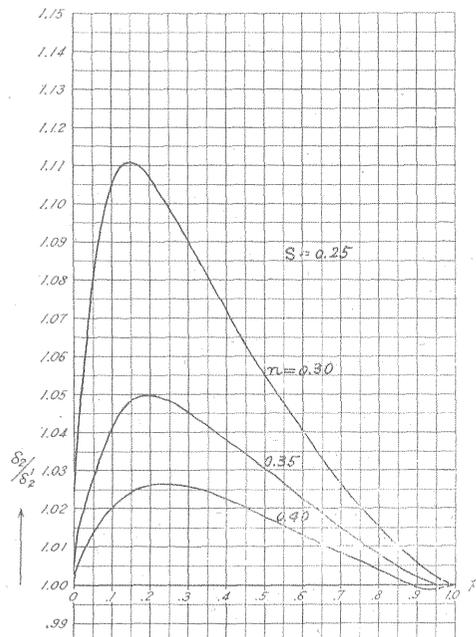
第 9-2-2 図



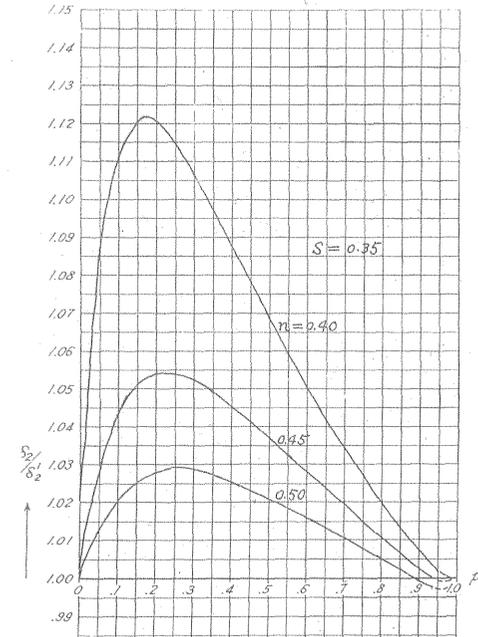
第 9-2-3 圖



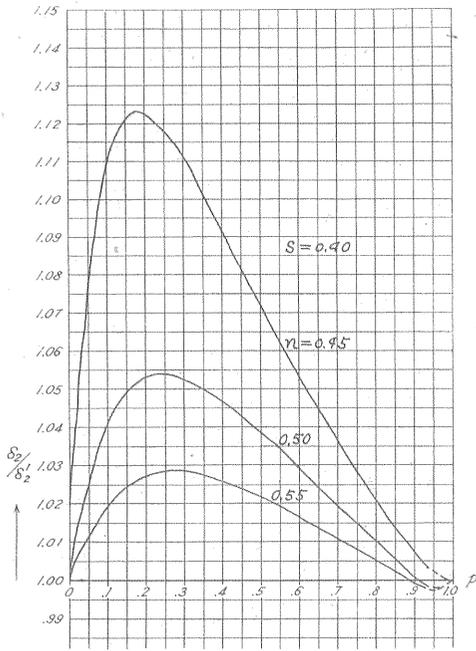
第 9-2-5 圖



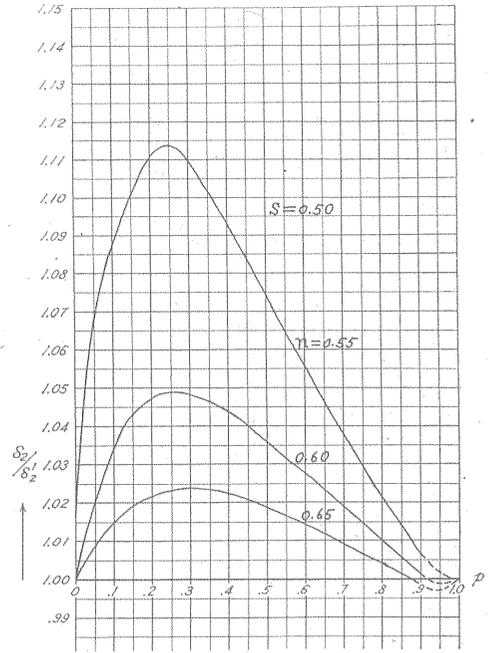
第 9-2-4 圖



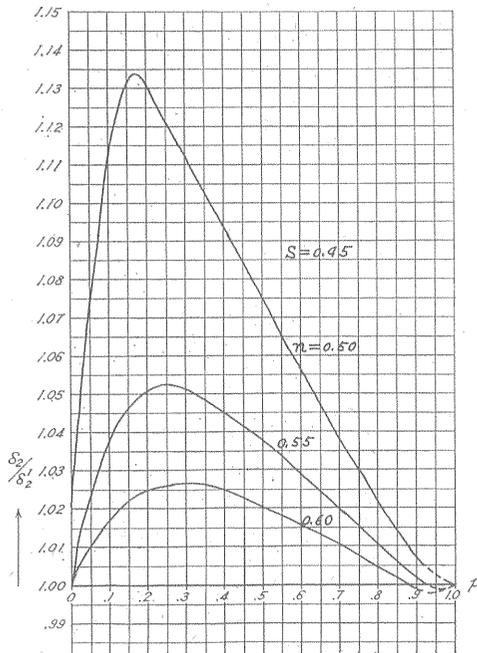
第 9-2-6 圖



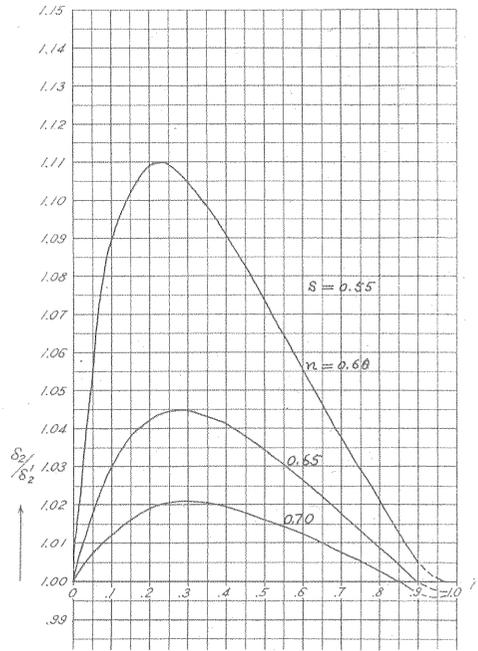
第 9-2-7 図



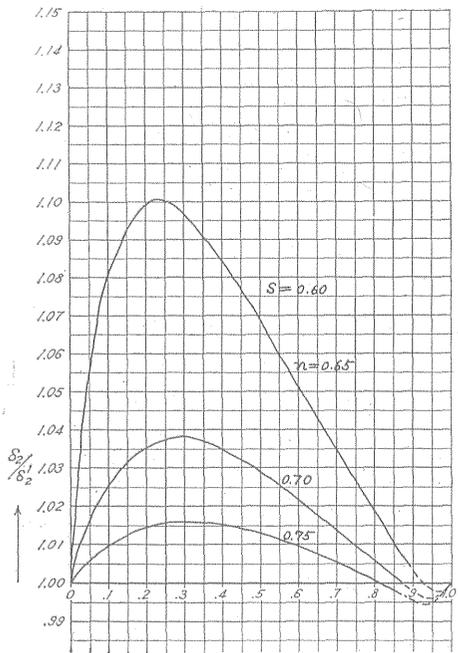
第 9-2-9 図



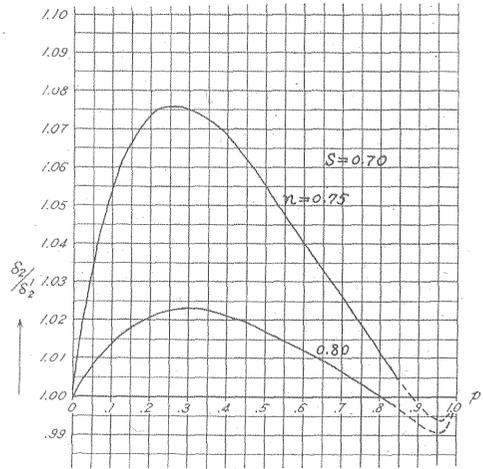
第 9-2-8 図



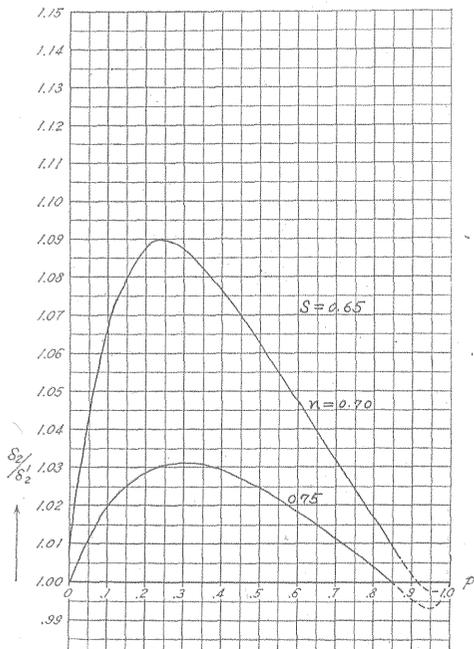
第 9-2-10 図



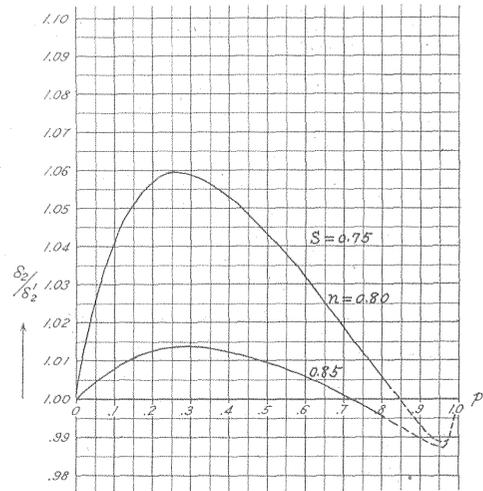
第 9-2-11 图



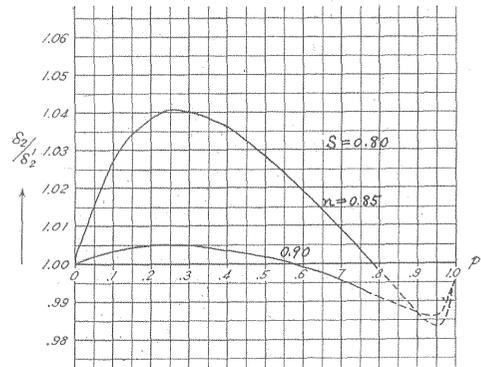
第 9-2-13 图



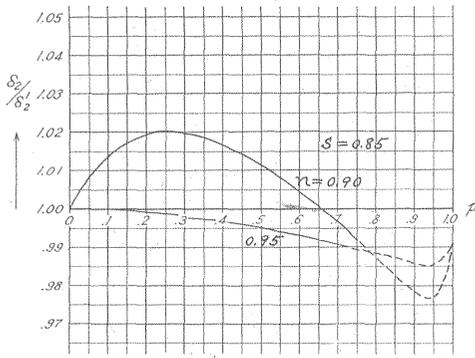
第 9-2-12 图



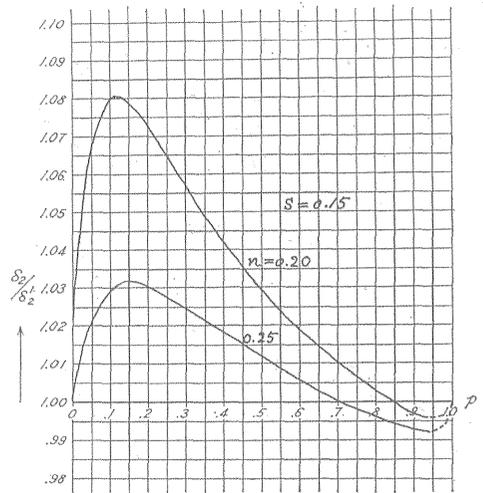
第 9-2-14 图



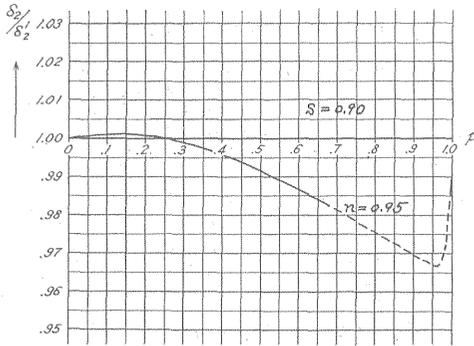
第 9-2-15 图



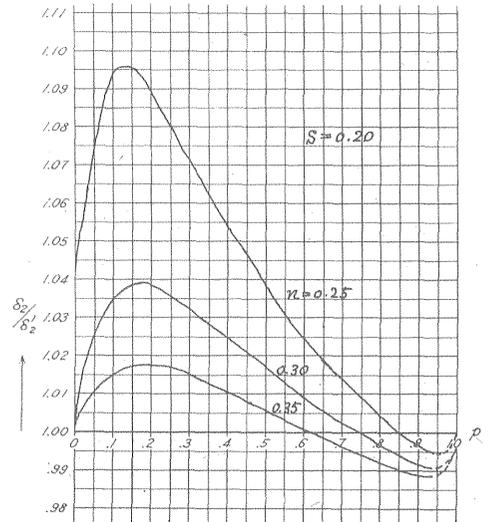
第 9-2-16 図



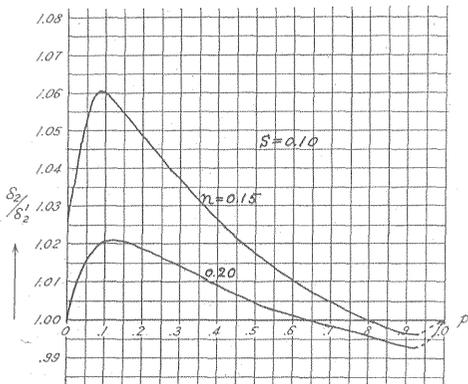
第 9-3-2 図



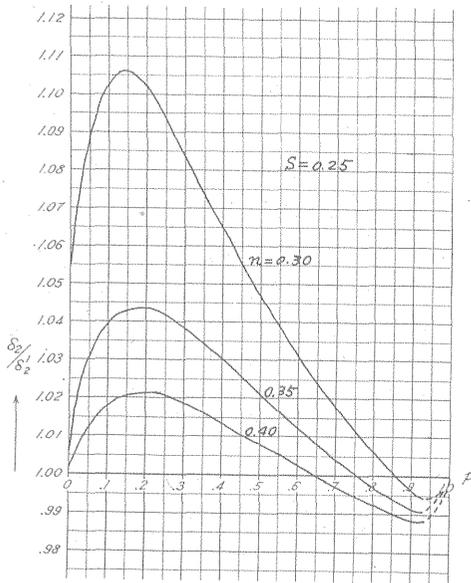
第 9-2-17 図



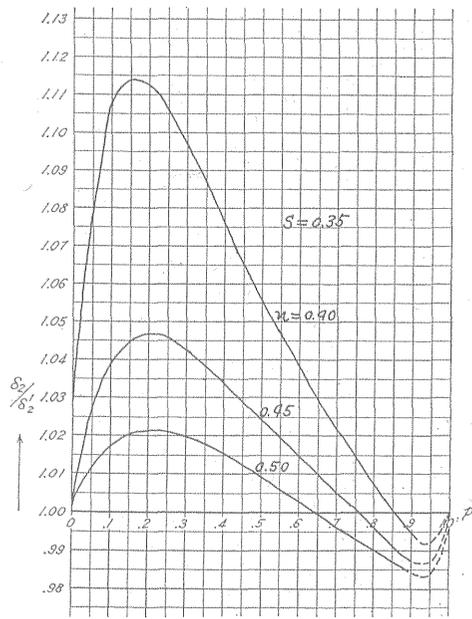
第 9-3-3 図



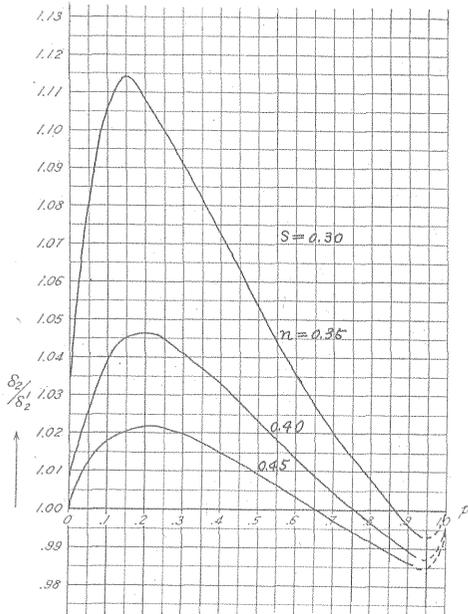
第 9-3-1 図



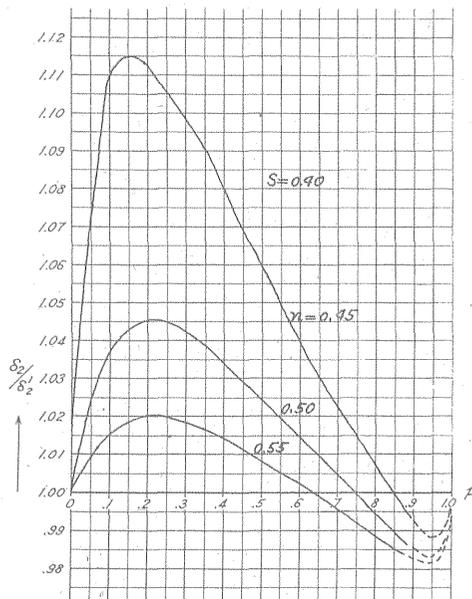
第 9-3-4 图



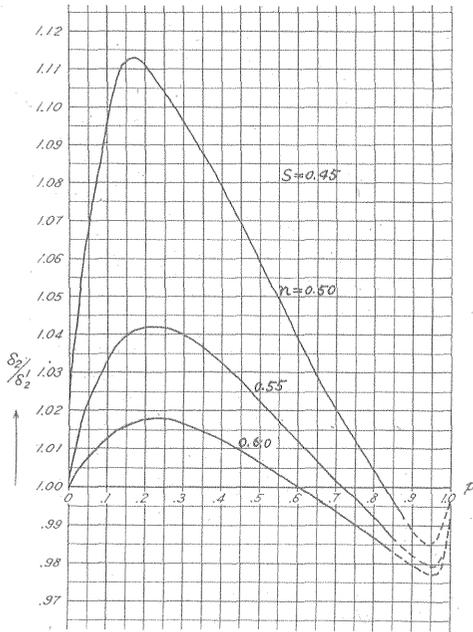
第 9-3-6 图



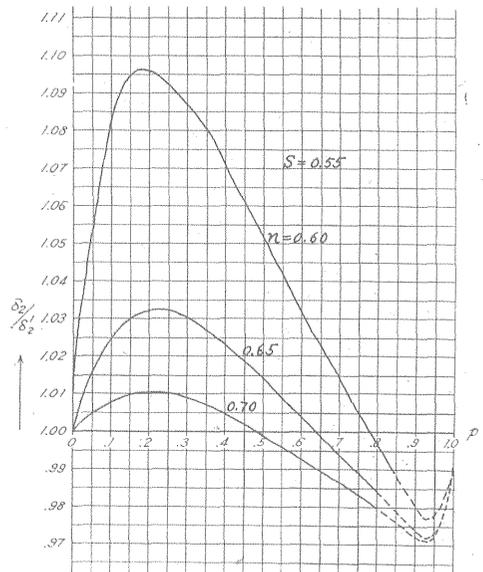
第 9-3-5 图



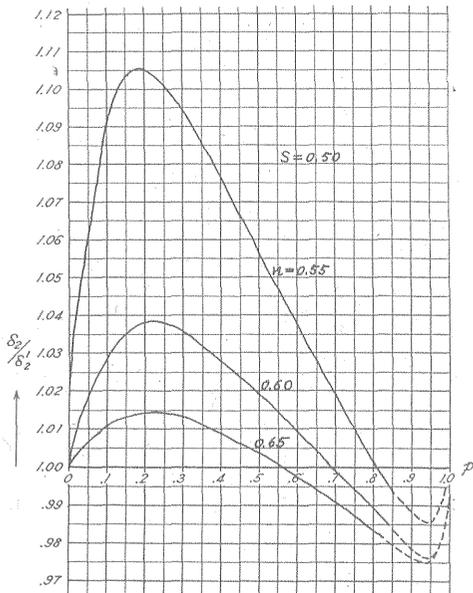
第 9-3-7 图



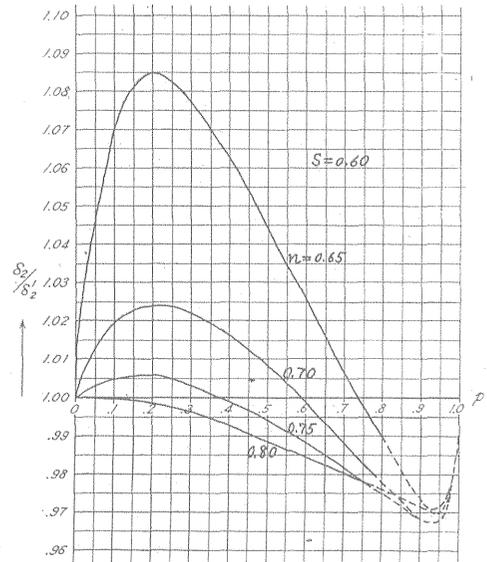
第 9-3-8 図



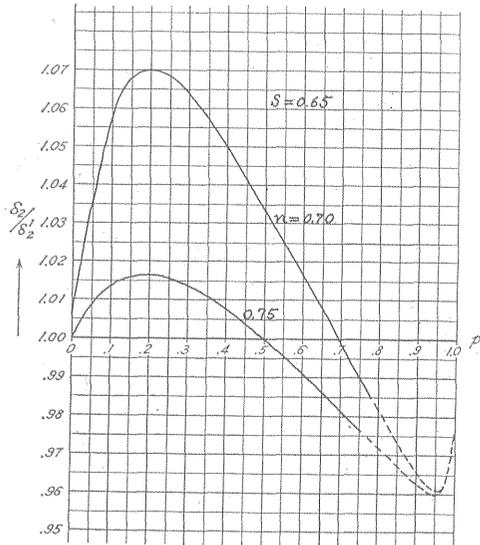
第 9-3-10 図



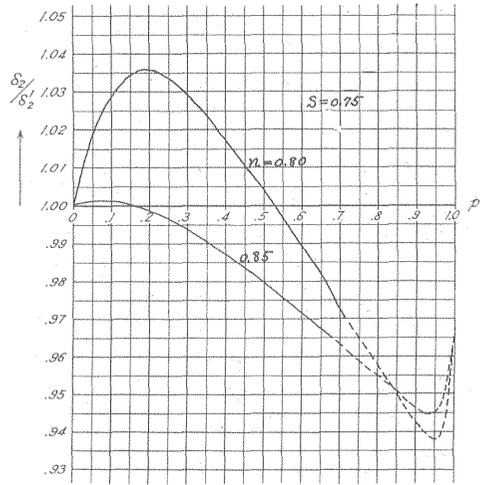
第 9-3-9 図



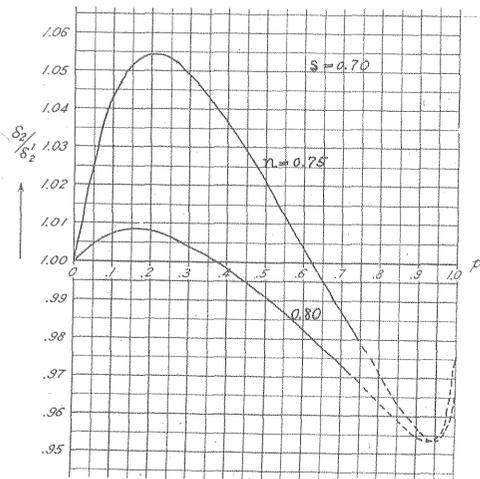
第 9-3-11 図



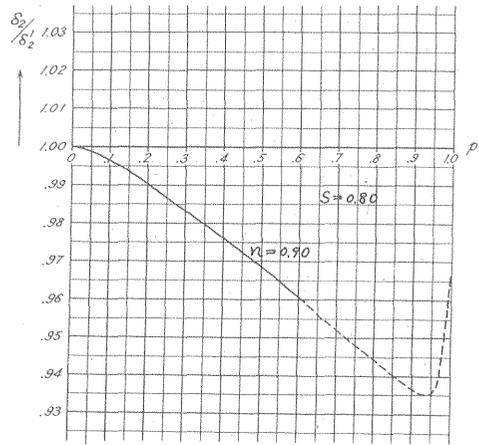
第 9-3-12 图



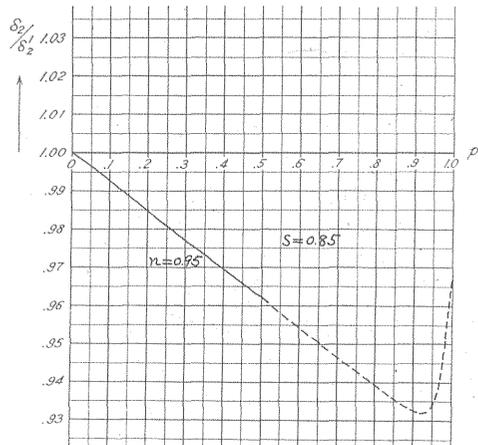
第 9-3-14 图



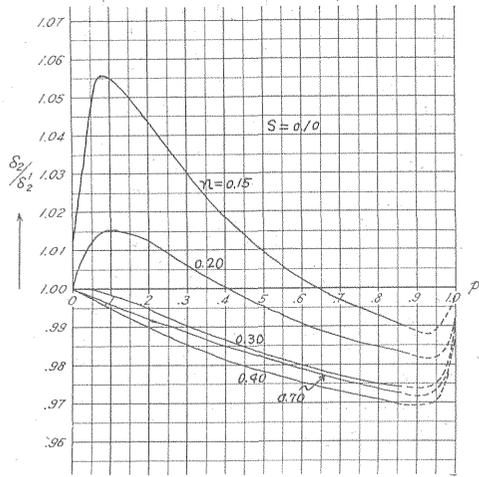
第 9-3-13 图



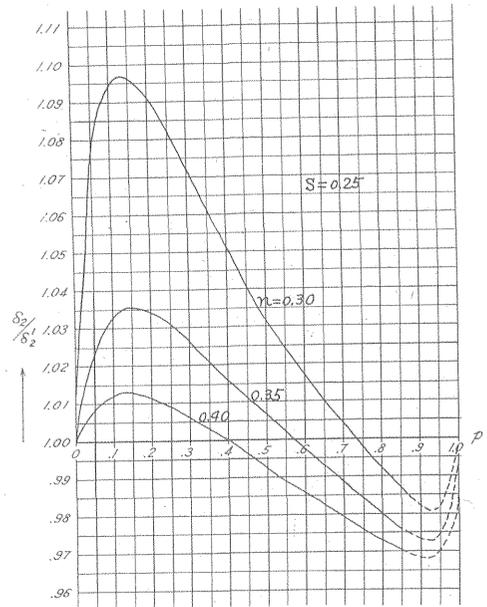
第 9-3-15 图



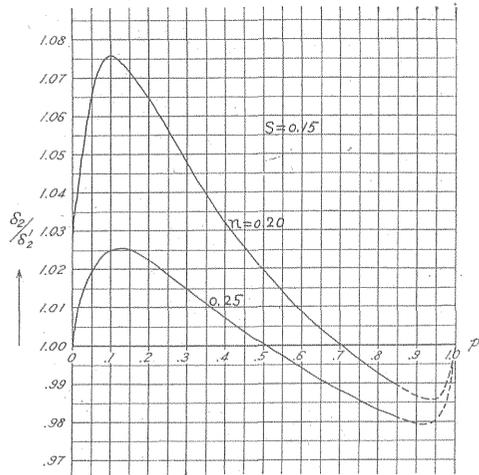
第 9-3-16 图



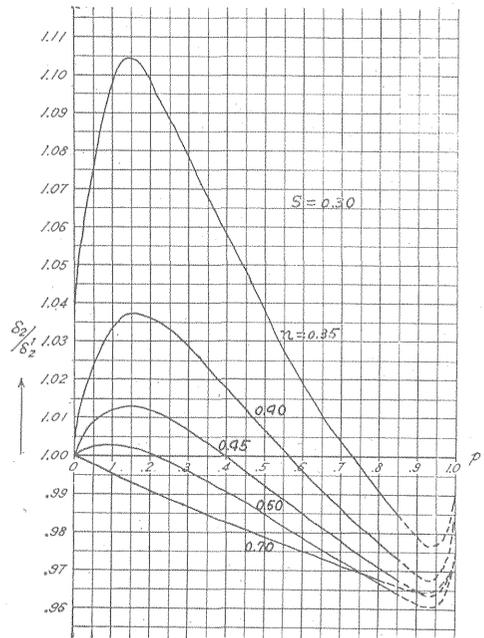
第 9-4-1 図



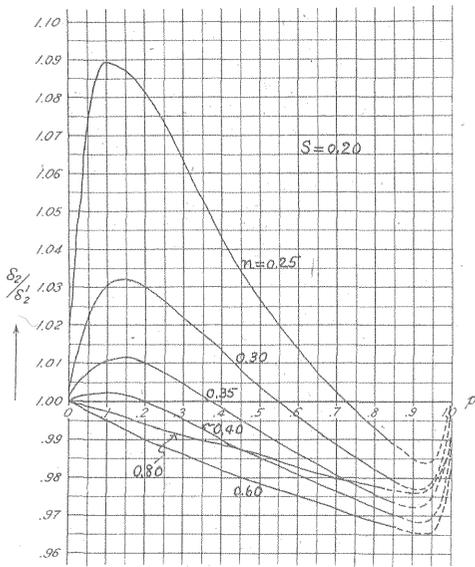
第 9-4-4 図



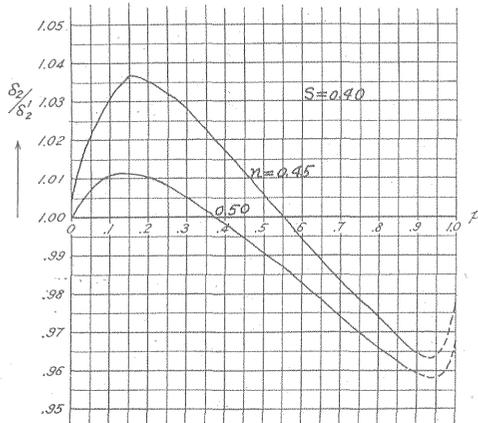
第 9-4-2 図



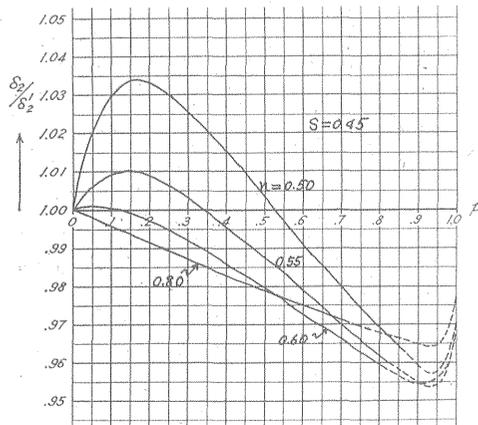
第 9-4-5 図



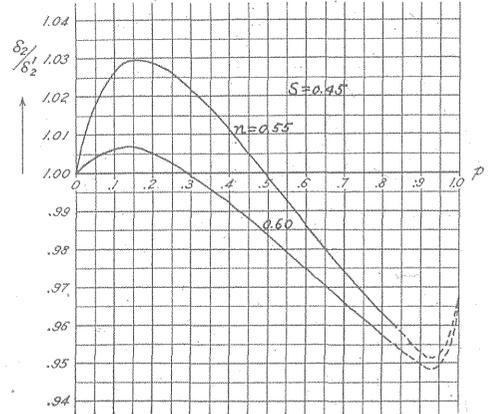
第 9-4-3 图



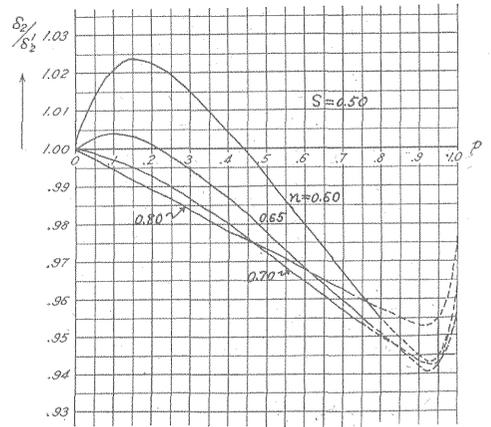
第 9-4-6 图



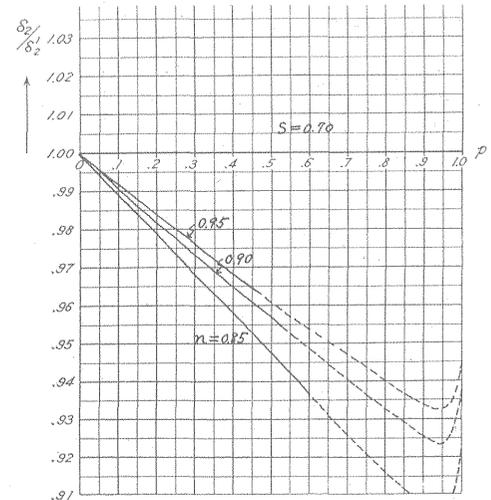
第 9-4-7 图



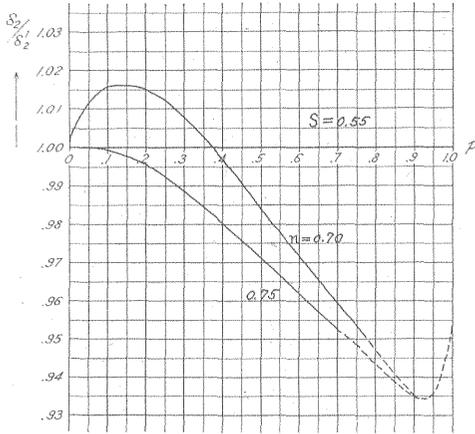
第 9-4-8 图



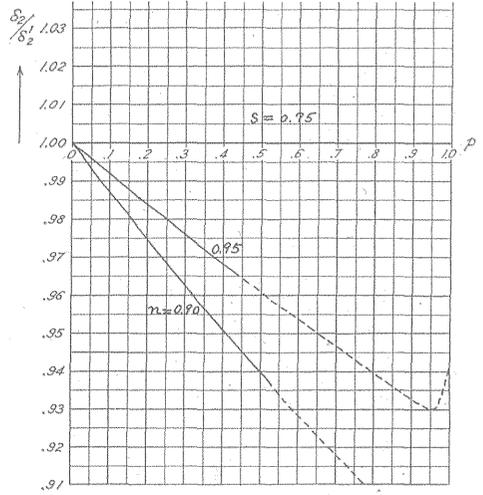
第 9-4-9 图



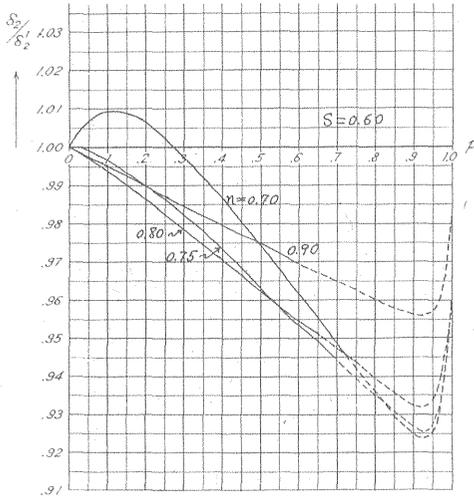
第 9-4-13 图



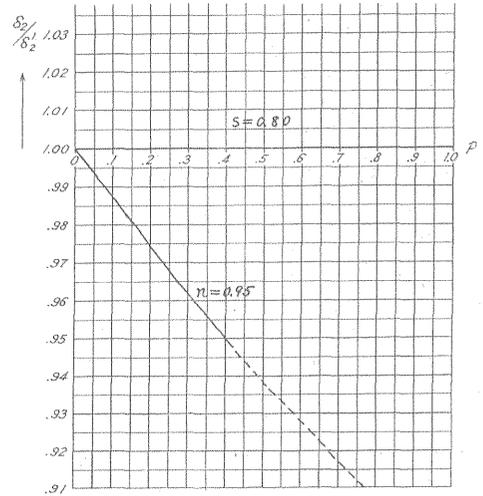
第 9-4-10 図



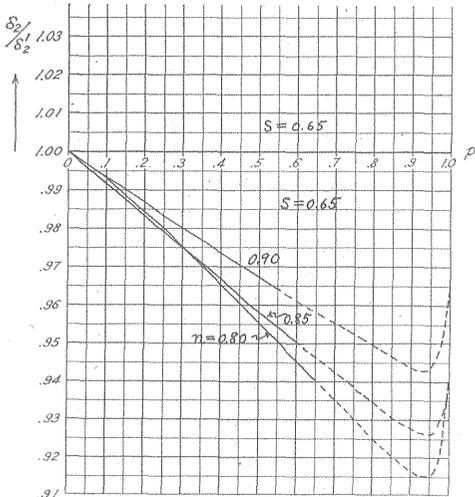
第 9-4-14 図



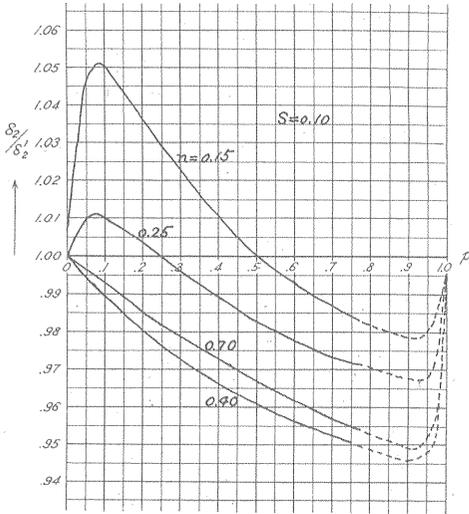
第 9-4-11 図



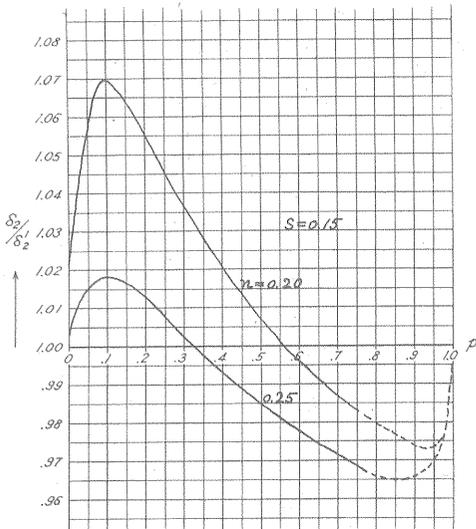
第 9-4-15 図



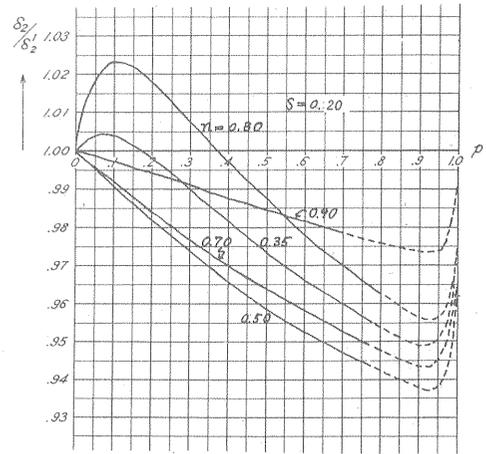
第 9-4-12 図



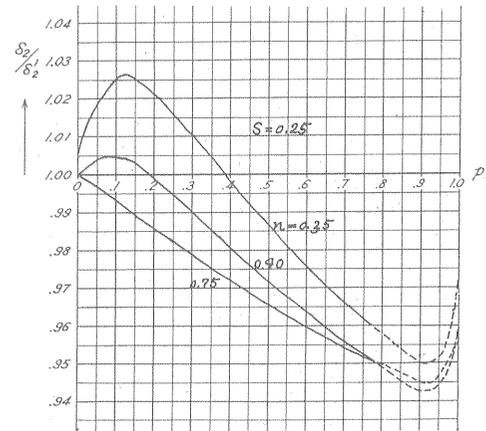
第 9-5-1 图



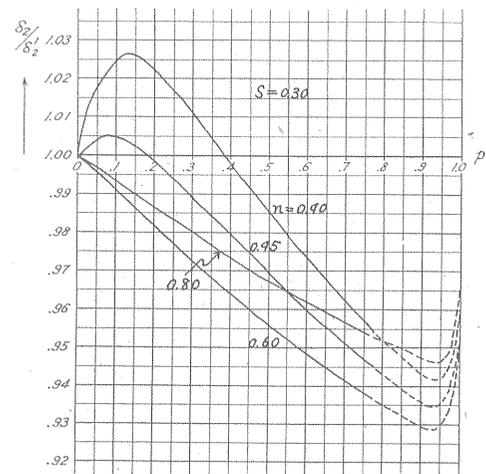
第 9-5-2 图



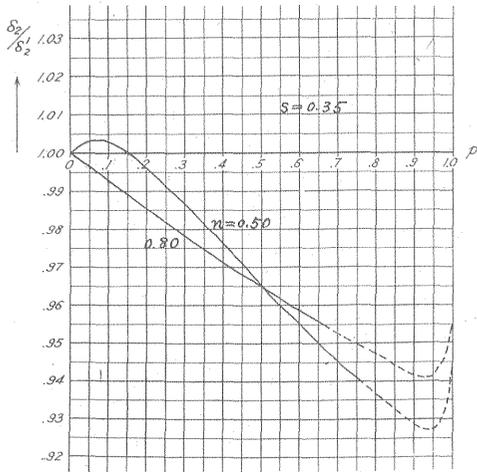
第 9-5-3 图



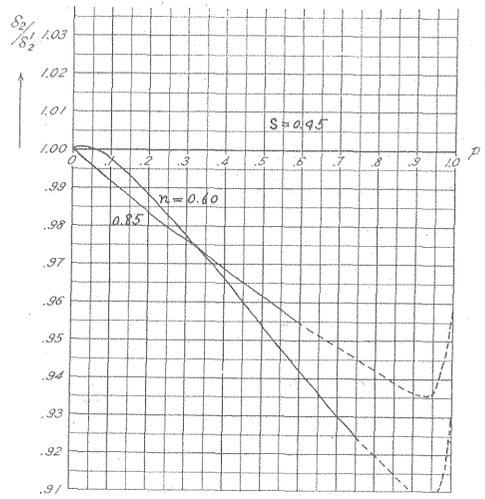
第 9-5-4 图



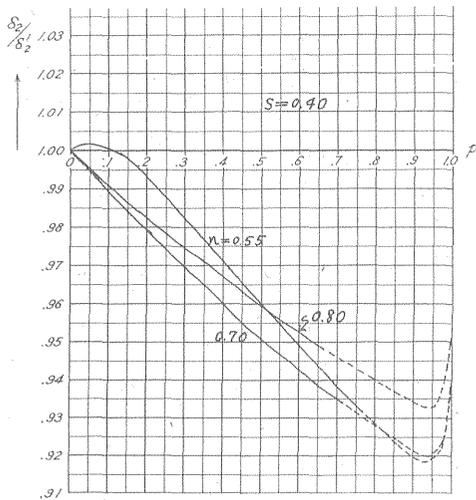
第 9-5-5 图



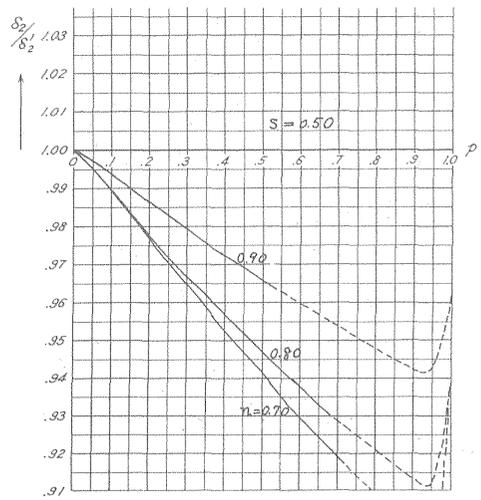
第 9-5-6 図



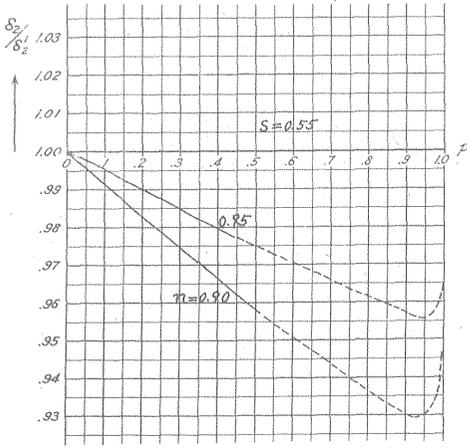
第 9-5-8 図



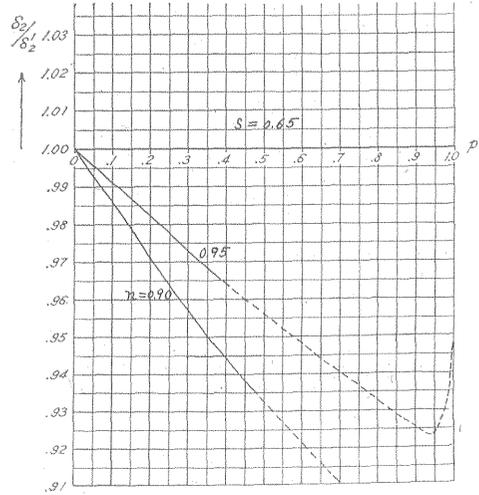
第 9-5-7 図



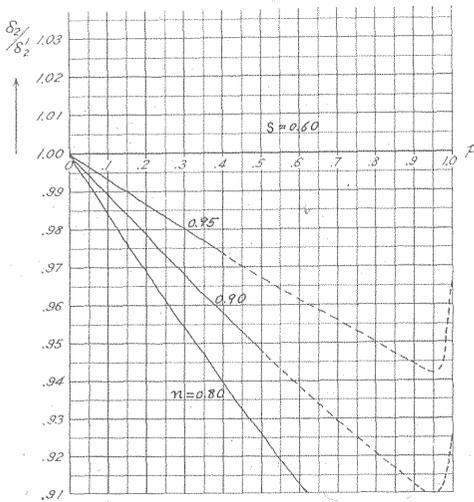
第 9-5-9 図



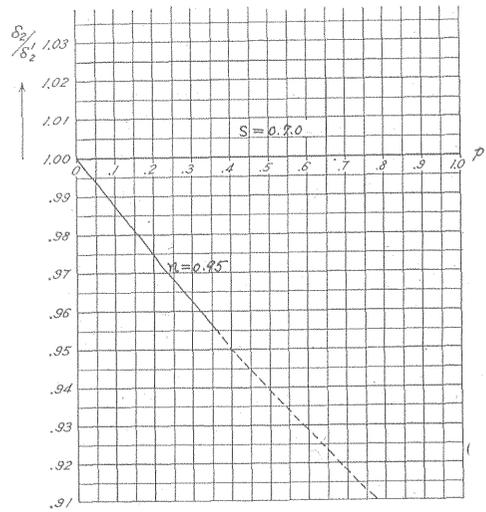
第 9-5-10 图



第 9-5-12 图



第 9-5-11 图



第 9-5-13 图