

B. f. I.

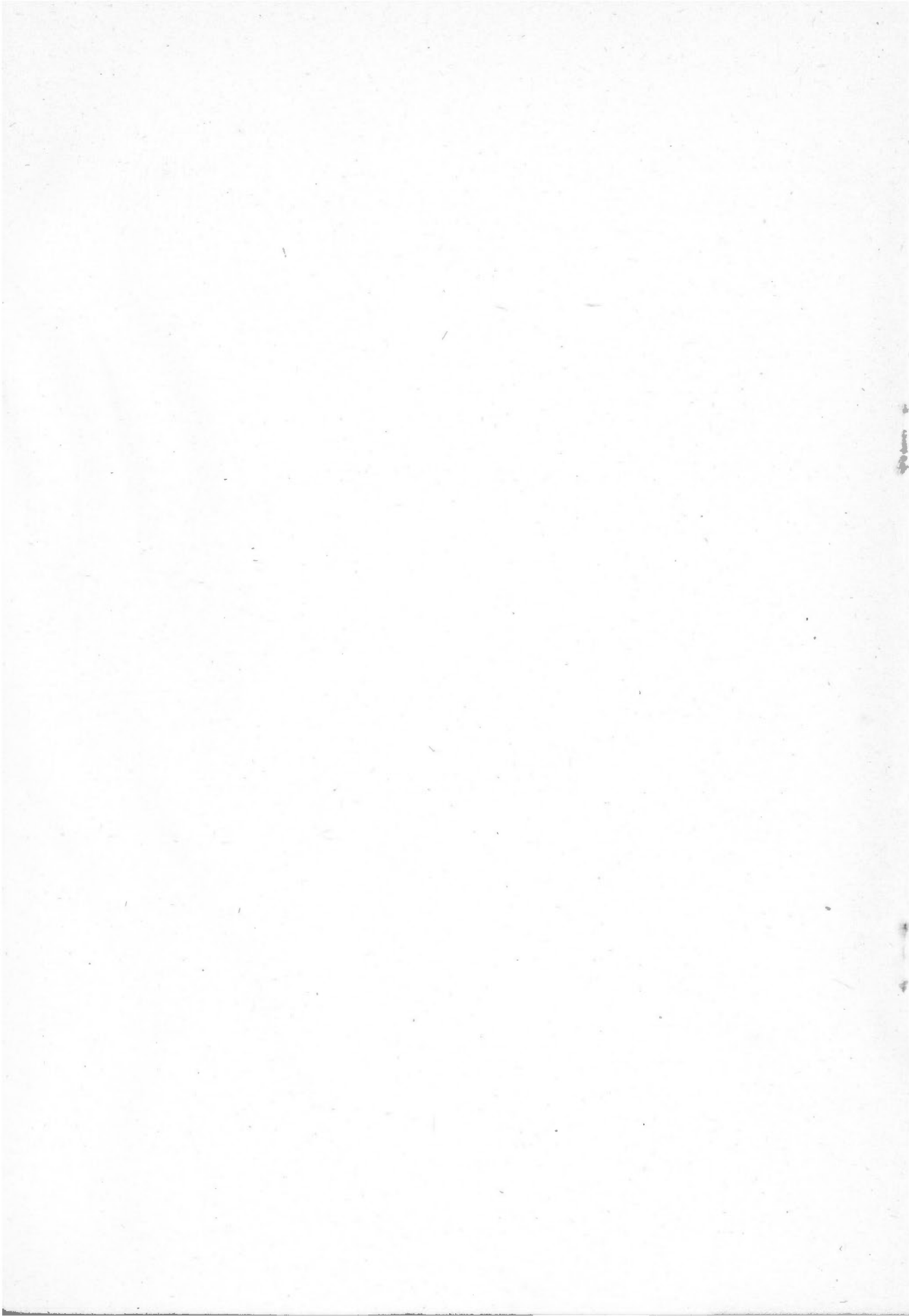
地質調査所報告第137號

地震探鑛に關する研究

早川正巳

地質調査所

昭和26年3月



550, 834

# 地質調査所報告

所長 三土知芳

## 地震探鑛に関する研究

通商産業技官 早川 正巳



## 目 次

I 序 論	1
II 電気地震計の性質	2
1) 目的	2
2) 電気地震計の構成	2
3) 電気地震計の実験並びに理論的研究	4
4) 結 語	18
III 地震探鉱に於ける爆発の問題	18
1) 目的	18
2) 発震機構	19
3) S波の発生条件	20
4) 雷管の爆発	22
5) 爆発の方向性	23
6) 海底に於ける爆発	25
7) 結 語	28
IV 地震探鉱の波形振幅の問題	28
1) 目的	28
2) 共鳴振動による表土層の厚さ決定	29
3) 表面波の利用 (表土層の速度決定, 表土層の厚さ決定, 海底の表面波)	32
4) 音波の利用 (音波の振幅比較による初動の振幅比較)	34
5) 相を明瞭にさせる条件	39
6) 結 語	40
V 反射波について	41
1) 目的	41
2) 反射波理論	41
(a) 媒体が弾性体なる場合	41
(b) 媒体が空気, 弾性体なる場合	42
(c) 媒体が海水, 弾性体なる場合	43
3) 反射波計算結果	45
4) 反射波の解釈, 反射波記録の器械的條件	46
5) 低速度層の問題	48
6) 結 語	49

VI 解析法及び速度及び微細構造の問題に関して	49
1) 目的	49
2) Contour method について	50
3) 地震波傳播速度の問題 (水平方向による速度の相違)	55
4) 微細構造に関する問題	56
5) 結語	56
VII 結語	57
Résumé (in English)	1

# 地震探鉱に関する研究

通商産業技官 早川正己

## I 序 論

現在地震探鉱法は既に実用の域に達し、僅かの誤差範囲に於て、地殻上層の構造を推定し得るが、更に詳細正確且つ敏速にこれを求める爲には、爆発方法並びに器械の改良はもとより、記録の波形吟味、測線配置及び走時曲線解析方法の研究等を遂行しなければならない。

地震探鉱の今後の進み方には二つの相異なる行き方がある様である。その一つは火薬爆発による地面の振動を出来るだけ大きく記録しようという方法である。他の一つは勿論振動記録は大きく書かせ度いが、而も與えられた波形を出来るだけ忠実に記録させようという行き方である。前者は初動を明瞭に記録する代り波形吟味を行う様な場合には、困難を感じる。後者は波の性質その他は検討出来るが、初動を正確に読取り得ない場合の起る憂はある。

それで今迄は初動の到着時間を用いて走時曲線を作る關係上、専ら前者が盛に利用されていた。反射を取ろうという目的の爲にも前者に主力が注がれていた。然し乍ら、若し初動も正確に読取り得る状態にあり、且つ波の問題迄議論できるような場合には、地震探鉱の利用も増大することである。筆者はこの後者の問題について専ら研究した。

即ち II においては、筆者等の使用して来た電気地震計の性質について研究した結果を記し、どの程度まで波形の吟味などに利用できるかを検討した。III においては、火薬爆発の機構について種々の考察を行つた。IV においては、II, III において得た結果を利用して、波形や振幅などを議論し、それによつて表土層の厚さ、振幅による地下構造の推定などの研究を行い關係のある諸問題について述べた。V・VI は以上とは多少趣を異にするが、反射波の振幅などに関する問題解析方法・微細構造に関する問題について研究した結果を述べた。

以上は筆者が7年間に研究した結果であるが、実用に関しては今後になお研究すべき点もあり、諸先輩の御指導をお願いする次第である。

本研究をなすに当り種々御指導・御検討をいたゞいた淵田隆門・飯田波事両博士に感謝の意を表すると共に、種々有益な意見を與えられた佐藤光之助・金子徹一・栗原重利の諸氏、各種実験計算等に盡力された地質調査所物理探鉱部の諸氏、特に立石哲夫・森喜義・小尾中丸・小島整志の諸君に併せて感謝の意を捧げる。

なお類似の研究は、筆者とは独立に京都大学佐々・西村両博士等によつてもなされており、こゝに敬意を表すると共に、この種研究の発展を期待して止まない。

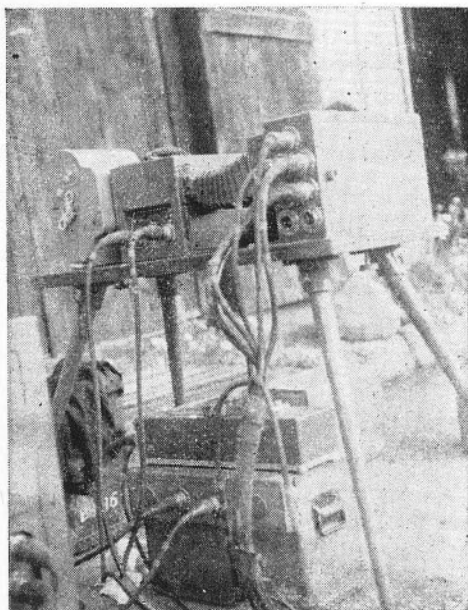
## II 電気地震計の性質

### 1) 目的

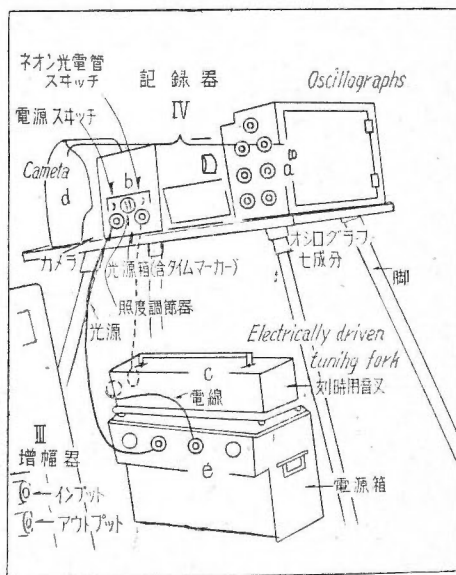
最近迄筆者等が使用してきた地震計は、故波江野清藏技師が研究設計された電気式地震計で、器械の細部については度々報じられているが、要するに地面の振動を一旦起電力の大小に変じ、これを増幅して oscillograph を働かせ、再び器械的振動に戻して film 上に記録させるもので、これらの経路をとるため、最後に得られた記録は、最初に與えられた振動とは別の性質を示す。地震波初動の到着時刻のみならず、振幅・週期・波形等を議論する際にはこの両者の関係を是非とも明確にしておく必要がある。この関係をしらべその結果を利用して、この電気地震計によつて得られた記録を、従来以上に活用させようというのが、本研究の主目的である。順序として、最初にごく簡単に地震計の構成についてしるす。

### 2) 電気地震計の構成

この地震計は pick up, amplifier, oscillograph の3部分から出来ている。これら相互の接続関係を第1図(A)(B)に簡単に示した。



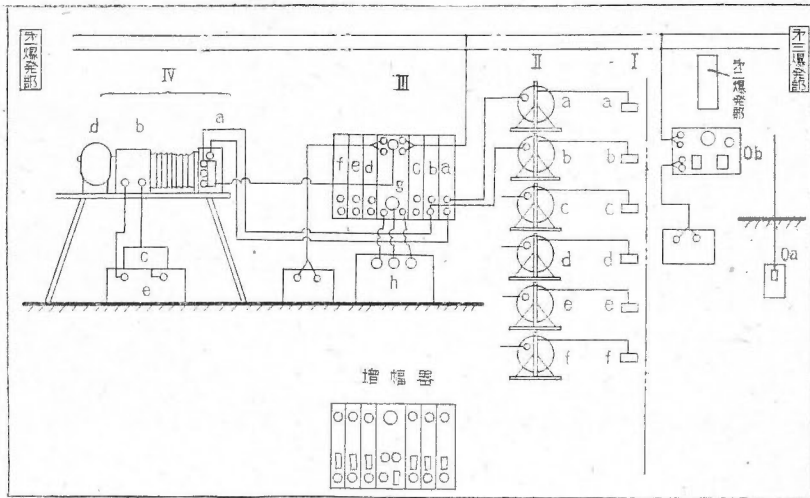
第1図(A)



第1図(A)説明図

- 1) 例えば、波江野：地下探査用地震計（地震8巻，6号，299-308）……総合的なもの。  
古い処では、波江野：ラヂオ地震計（地震2巻，7号）  
" The Radio-Seismograph（天文地球物理学輯報，8巻，2号）1930  
" 地震学に於けるラヂオの應用（地震1巻）  
器械の歴史的記述，機械地震計と電気地震計の比較等に就いては  
波江野：地震探鉱の発達に就いて（石油技術協会誌，8巻，6号）1940





第1図(B) 全体の構成

Oa, 爆薬或は同時に爆発する雷管; Ob, 発火器; I, 受振器 6 個; II, ケーブル 7 個; III, 増幅器 6 成分 1 個, g 較正装置, a-f, 増幅器, h, 電池, A 電池として 1.5 V 乾電池 2 個, B 電池として 45 V 乾電池 2 個, C 電池として 4.5 V 乾電池 1 個; IV, 記録器, a, オシログラフ 7 成分, b, タイムマーカ-及び光源, c, 電磁音叉 50 サイクル/秒, d, カメラ, e, 電池 1.5 V 乾電池 4 個

a) pick up

土地の振動に依り起電力を発生する装置<sup>2), 3)</sup> で内部写真を第 2 図に示す。導磁率の高い 2 個の超 permaloi の鉄心の廻りに電線を捲きつけ、これを慣性重錘を兼ねる U 字型の永久磁石の間に置き、磁極に対し鉄心が変位すると、鉄心を通過する磁束が一方は増大し他は減少することにより、強大な起電力を発生させるようにしてある。制振は逆起電力を利用している。発生電圧は振動週期の逆数に直線的に比例するよう即ち微分式に設計してある。

b) amplifier

pick up に発生した起電力を増幅して oscillograph を働かせるに充分な電力を生じさせる役目をする装置で、6 組の amplifier を 1 個の箱に組込んである。その 1 単位の配線を第 3 図に示した。

c) oscillograph

amplifier により増幅された電力を再び器械的振動に戻す装置で、その外観及び内部構造<sup>4)</sup>を

- 2) 波江野: 高速度回転機用振動計 (地震 8 卷, 4 号, 1936)
- " 振幅指示型航空機用振動計 (航空研究所彙報, 142 号, 1936)
- " 地下探査用地震計 (地震 8 卷, 6 号)
- 3) 波江野: 電磁型変位地震計の考察 (地震 7 卷, 10 号, 1935)
- " 航空機用振動計の試作 (航空研究所彙報, 138 号, 1936)
- U 字型の現在我々が使用して居るのは 3) に属する。
- 4) 波江野: 振動計オシログラフの研究 (地震 7 卷, 340-358, 425-437 頁)

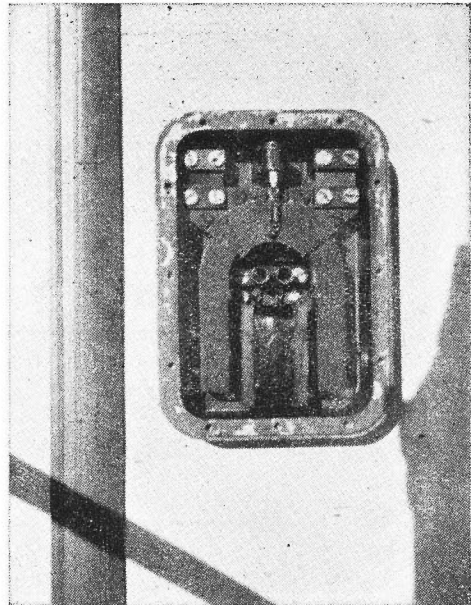
第4図及び第5図に示した。馬蹄型永久磁石(M)による定常磁界と測定電流の通る coil (C<sub>1</sub>) を有する超 permaloi 鉄心(C<sub>2</sub>)による磁界とを直交させ、その中央に上下一本宛の線で緊張した金属枠を引張つた誘導型(積分式)である。制振な逆起電力を利用している。

### 3) 電気地震計の実験並びに理論的研究

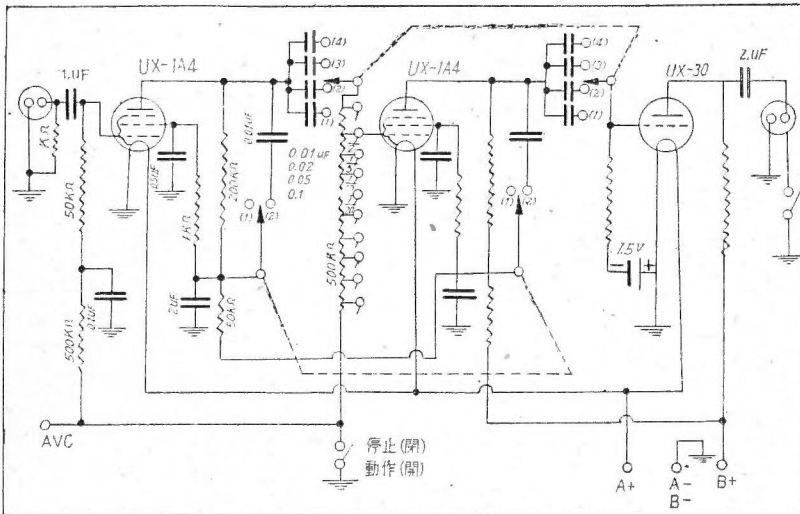
最初に実験的研究について述べ、而る後理論的研究を行つた。実験的研究の内容は次の如くである。

#### a) pick up の特性

pick up の場合には上述の如く起電力一週期の関係、個有振動週期、制振度(減衰)の3つの問題がある。



第 2 図

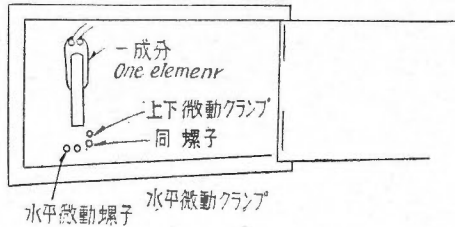
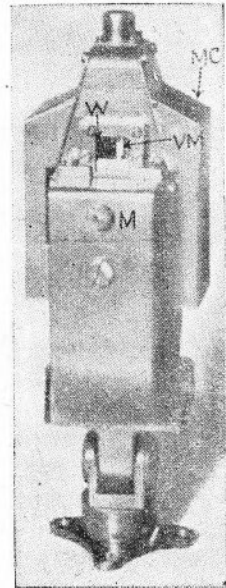
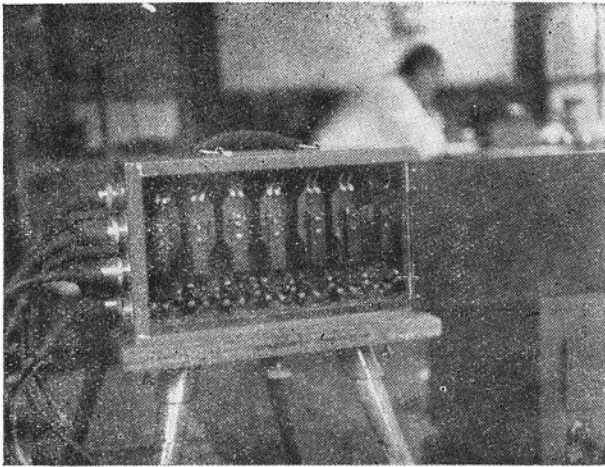


第 3 図 地震計増幅器 (38<sub>42</sub> 及び 39<sub>43</sub>) 一成分接続図

最初の起電力一週期の関係を測定するには第6図の様な装置を用いた。はじめに実験装置について簡単に説明し、而る後実験法について述べる。

上下発振用の振動台は重量約 30 kg で、金属のバネ (K) を取替えることにより、振動台の振動週期を変えることが出来る。

振動を起す eccentric motor は  $\frac{1}{12}$  H.P. で、motor の中心軸には tacometer を取付け、

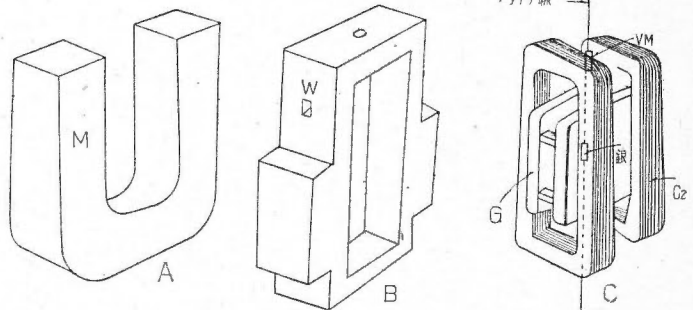


第 4 図

M=永久磁石, MC=カバー, この中に超 Permaloi の鉄心及び Coil があり電流により磁界が與えられる。 VM=金属棒より成る振動子につけた反射鏡  
W=メニスカス度無しレンズよりなる窓

回転速度を測定しようようにした。又, stroboscope も使用した。振動週期は回転速度により変更せられ, 回転速度は slidax により調節される。voltmeter V により単位振幅に対する誘起電圧を測るようにした。

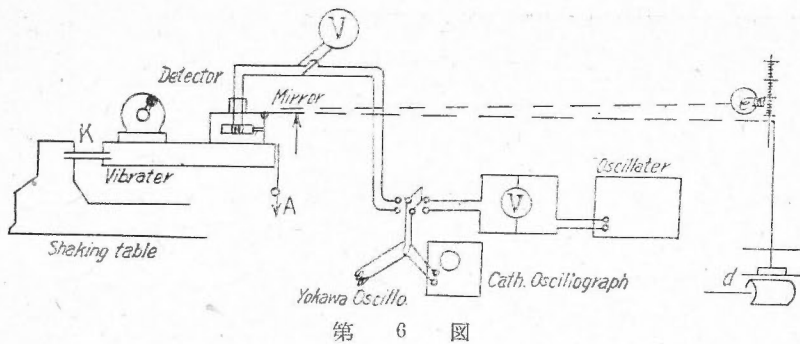
持続振動のみを試験するなら, cathod ray oscillograph でよいが, 個立振動



第 5 図

を問題とする時にはこれでは具合が悪いので, 横河製の oscillograph を用いた。この oscillograph の element の特性曲線<sup>5)</sup>は現在我々の目的とする範囲では週期には無関係という特徴

5) 例えば三繩秀松: 試験及び測定用機器, p. 431 (山海堂)

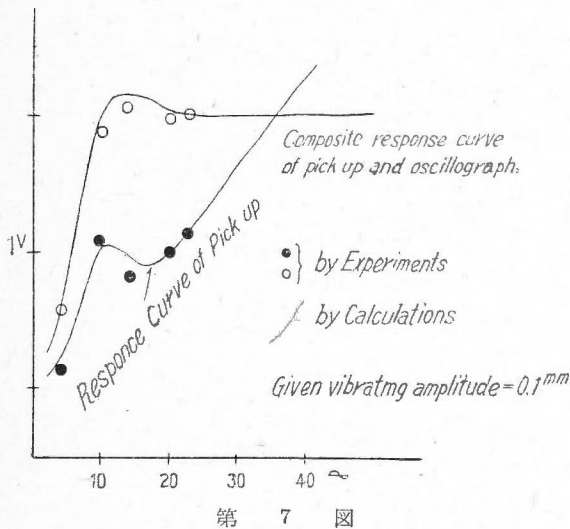


第 6 図

がある。

以上の様な装置を用いて測定を行つた。

即ち motor を回轉させ weight の eccentricity により上下動振動を與え振動台を振動させ、この振動により pick up の振動を誘起させ、磁場を切ることにより coil に發生する起電力の変化を oscillograph で読取り、又は撮影する。一方 drum d には pick up に與えられた振動自身を記録させ、與えた振幅・週期を知ることが出来る。これらと voltmeter の値により單位振幅に対する誘起電圧を測ることが出来る。従つて起電力一週期の關係が明かとなる。



第 7 図

この様にして測定して得た結果の一例を第 7 図に示す。(●印)これを見ると pick up に發生する電圧は殆んど振動週期の逆数に直線的に比例して居ることが分る。この關係は前に波江野技師が空氣制振器の場合に得た結果<sup>2)</sup>とよく類似している。

以上の測定方法では、振動を與えるのに外力を一定とする必要がないという利点はあるが、非常に高い週期を出させることの出来ないのが欠点である。

第 7 図を見れば非常に低周波 (10 cycle) のところに大きい發生起電力のあることが分る。即ちこれが動作状態における共鳴振動点で、pick up の個有振動週期を現わしている。

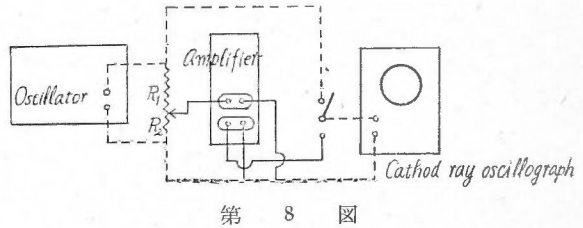
最後に制振度についてのべる。

測定装置の主要部分は殆んど起電力一週期の実験の場合と同じであるが、前と異なるところは、持続振動を個立振動に置換えた点にある。即ち、motor を外し、その代わりに第 6 図の A の様な仕組み (糸で引張り焼切つて放す) により、振動台を傾けておく。

測定の方法はAの糸を焼き切ることにより個立減衰振動が振動台に起り、従つてpick upにも、一つの減衰振動があらわれ oscillograph によりそれを知ることが出来る。この際、振動台自身の減衰振動は drum (d) の上の記録により知ることが出来、又、横河製 oscillograph 自身の減衰振動も分っているから pick up 自身の動作状態における減衰程度を計算することが出来る。その結果  $\frac{2}{3} \sim 1$  Critical damping の状態にあることがわかつた。

b) amplifier の特性

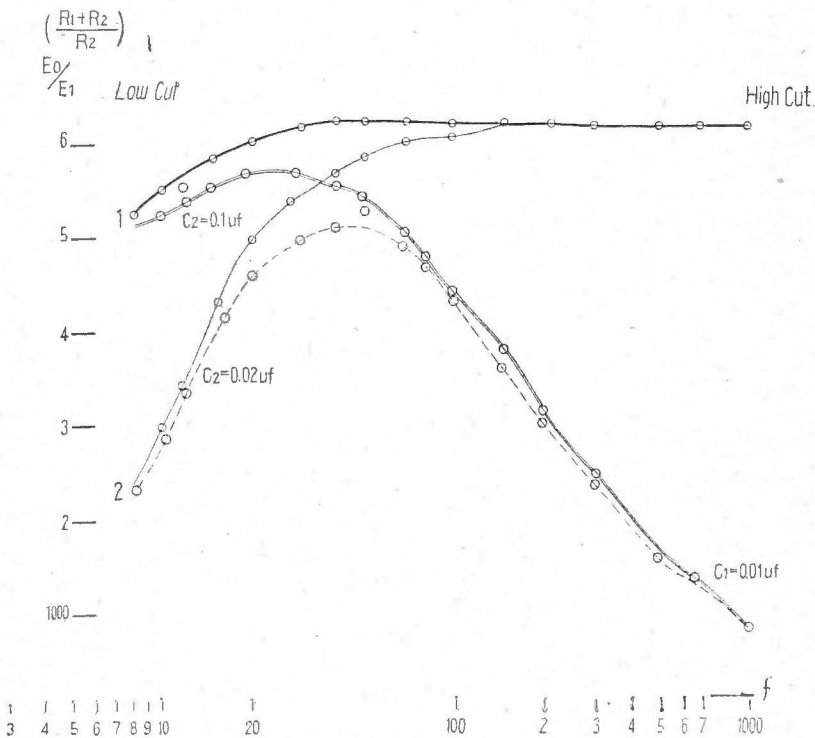
最初測定装置について簡単に述べる。amplifier の増幅度一週期の関係をしらべる装置を第8図に示した。



i) 発振器は土橋式 RC 発振器で 8 cycle から 4 KC 迄の周波数の電気振動を発生することが出来る。

ii) cathod ray oscillograph はマツダ BT-75 V 型。

iii) 実験に供した amplifier element は前に配線図(第3図)に示したもので filter は Low cut, High cut 1, 2 の 4 段切替になつている。



iv) rheostat  $R_1$  はリケノーム (Max 11 k $\Omega$ ) で実験中は 10 k $\Omega$  に固定, 又  $R_2$  は Y.E.W. (Max. 1.11 k $\Omega$ ) で今の場合には variable として使用した。

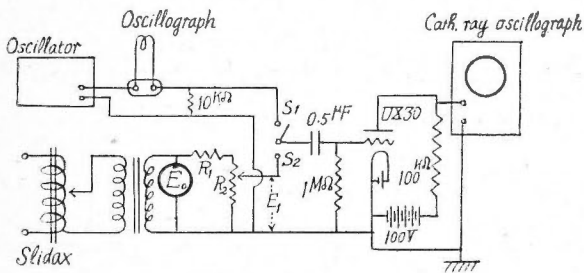
v) amplifier を通過する場合 (R. C. Oscillator-ampl.-cath. ray oscillograph) と通過しない場合 (R. C. oscillator-cath. ray oscillograph) の切替は switch S により行う。

測定の方法は最初 switch  $S_1$  の位置で発振器を働かせある周波数の波を出させ、直接発振器の振幅が cathod ray oscillograph 上にあらわれる様にする。この oscillograph 上にあらわれた振幅の大きさを A としておく。次に switch  $S_2$  の位置で発振器を働かせ、前と同じ周波数の波を出させると、今度は発振器の振幅は amplifier により増幅されて後 cathod ray oscillograph 上にあらわれる。この際  $R_1, R_2$  の適当な調節により oscillograph 上にあらわれる振幅を A になる様に合せる。この様な  $R_1, R_2$  の分割関係により  $R_1+R_2/R_2$  から増幅度  $E_0/E_1$  が測定出来る。

この様にして測定し得た結果の 1 例を、第 9 図に示す。これを見ると、filter の切替えにより種々の特性をあらわしていることが分る。

### c) oscillograph の特性

この場合には、a) pick up の時と同じ様に、感度・個有振動週期・制振度の三つの場合がある。測定装置を第 10 図に示した。



第 10 図

最初 switch  $S_1$  の位置である周波数について発振器を作用させた時の cathod ray oscillograph の振幅を A とする。次に  $S_2$  の位置で slidax に 100 V. A. C. (50  $\sim$ ) を作用させ、cathod ray oscillograph にあらわれる振幅を A にする様  $R_1, R_2$  を調節し、 $R_1, R_2$  と共に  $E_0$  を読取る。以上の製作を色々な周波数について繰返す。こうすることにより  $V_i=10 \text{ k}\Omega/E_1, E_1=E_0R_2/R_1+R_2$  から電流感度を測定することが出来る。

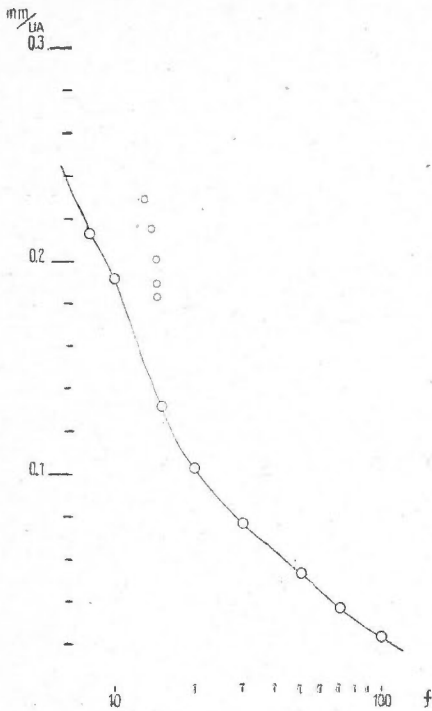
この様にして測定した結果の一例を第 11 図に示す。これを見ると週期と感度との関係は pick up の場合の逆になつて居ることが分るが、詳細については、後に総合実験理論の処で議論する。

第 11 図 (及びあとにでてくる第 13 図) を見れば、10 cycle 程度のところに振幅の山が見える。これは増幅された同じ電圧に対して一番よく振れるところ、即ち動作状態に於ける共鳴振

i RC 発振器 cathod ray oscillograph 及び rheostat などは、amplifier の特性の時のと、又 slidax は pick up の特性を測る時のと同じものである。

ii T は低周波トランスで radio trans.

iii O はオシログラフ。



第 11 図 Sensitivity of current (Oscillograph)

np と oscillograph との組合せ結果とよく一致している。なお amplifier—oscillograph の電圧感度の場合は測定装置及び結果の一例を第 12 図、第 13 図に示した。この場合も夫々の組合せ結果とよく一致している。

以上の実験結果を充分活用させるためには、是非ともその理論的裏付けをしておく必要がある。pick up と oscillograph については、既に波江野技師の計算されたものもあり、ごく簡単にし、ここでは特に amplifier に重点をおいて理論的考察を行った。

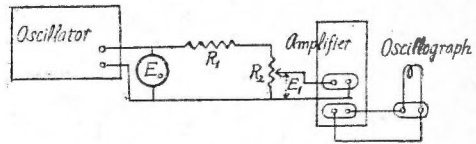
この amplifier は第 3 図に示す様な抵抗—静電容量結合方式のものである。結合容量  $C_2$  (以下第 14 図参照) は連動 switch によりその容量値を変化しうる。又陽極回路に挿入された静電容量  $C_1$  は一種の bei pass 容量でその容量も可変である。

動点で、oscillograph の個有振動週期をあらわしている。

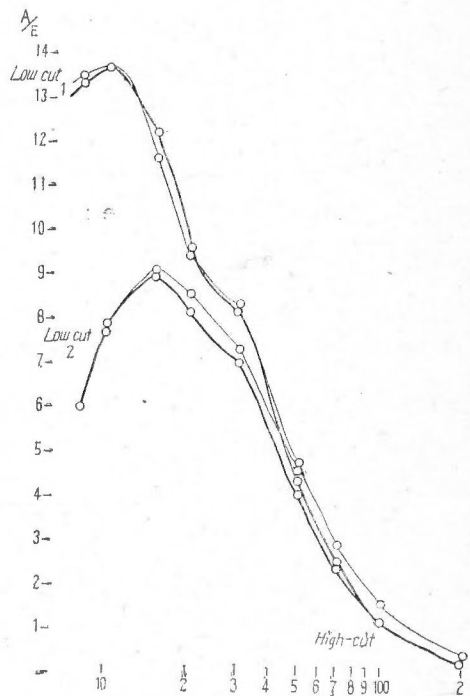
制振度の測定を行うには、oscillograph の一つの element に微弱電流を断続させればよい。この結果、critical damping の状態にあることがわかった。

d) 組合せ実験

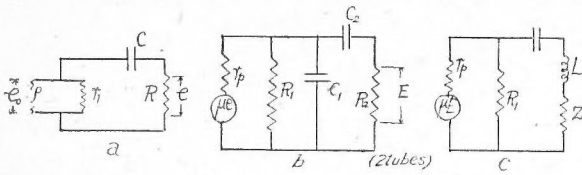
以上で器械各部の特性測定の外、pick up—oscillograph, amplifier—oscillograph の組合せ測定も行つた。pick up—oscillograph の結果の一例を、第 7 図に示した。これは前にえた pick



第 12 図



第 13 図 Sensitivity of Voltage (Ampf.+Oscillo)



第 14 図

$C_1$  回路を断つならば、普通用いられる抵抗—静電容量結合方式となる。

従つて、例えば radio 受信機の様  
に取扱う周波数が比較的高いものでは、結合 condenser  $C_2$  は殆んど短

結状態にあるものと見做して大差ないから、回路には周波数の函数がなく、grid と cathod の間の浮遊容量が影響を與える程高い周波数でない限り、この程度の周波数でこの程度の容量値なら周波数と増幅度あるいは出力電圧の関係は略々一定であろう。

然し地震探鉱において取扱われる周波数、即ち 50 cycle 前後の比較的低い周波数においては、結合容量中の電圧降下を無視することは出来ず、有限の値として計算されねばならない(即ち  $f$  が低い程  $C_2$  中の電圧降下は大となり、出力電圧は低下する)。又 bei pass 容量  $C_2$  の回路が含まれて来れば、勿論周波数に対する出力電圧あるいは増幅度の関係が又別な変化をする筈である。

これらの模様を計算により調べて見よう。簡單の爲三極管と見做せば、増幅器一段当の配線図の等價回路は第 14 図の様になる。

第 14 図を見れば明かな様に、この増幅器の回路は 3 つの部分に大分け出来る。a (最初) の部分は pick up に発生した起電力の変化部分を grid に伝える迄の回路である。次の b の部分は電圧増幅の役目をする。たゞ増幅するだけでなく、 $C_1$ 、 $C_2$  等を用いる filter によつて高域除去と低域除去の二つの目的をも果している。最後に c の部分で電力増幅を行う。

電圧増幅 (b) の部分について計算する。

- |   |                    |                     |                  |
|---|--------------------|---------------------|------------------|
| { | $I$ : 陽極回路の主電流     | $e$ : 入力電圧          | $\mu$ : 真空管の増幅率  |
|   | $R_1$ : 負荷抵抗       | $E_0$ : 負荷抵抗間の電圧    | {                |
|   | $R_2$ : 漏洩 //      | $E$ : 出力電圧 = 次段入力電圧 |                  |
|   | $C_1$ : Beypass 容量 | $i_2$ : $R_2$ 回路の電流 | $r_p$ : 真空管の内部抵抗 |
|   | $C_2$ : 結合容量       | $f$ : 周波数           |                  |

であらわせば

$$\left\{ Z_1 = \frac{1}{\omega C_1}, Z_2 = \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_2}\right)^2} \right\} \dots \dots \dots (1) \quad \text{とすると,}$$

$$I = \frac{\mu e}{r_p + \frac{R_1 Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1}} = \mu e \frac{Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1}{r_p (Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1) + R_1 Z_1 Z_2} \quad \text{従つて,}$$

$$E_0 = \mu e - I r_p = \mu e \left[ \frac{R_1 Z_1 Z_2}{r_p (Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1) + R_1 Z_1 Z_2} \right] \quad \text{故に}$$

$$i_2 = \frac{E_0}{Z_2} = \frac{\mu e R_1 Z_1}{r_p (Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1) + R_1 Z_1 Z_2} \quad \text{ohm の法則により}$$

$$E = i_2 R_2 = \frac{\mu e R_1 Z_1 R_2}{r_p (Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1) + R_1 Z_1 Z_2}$$



故に、増幅度をKとすれば

$$K = \frac{E}{e} = \frac{\mu Z_1 R_1 R_2}{r_p (Z_1 Z_2 + R_1 Z_2 + R_1 Z_1) + R_1 Z_1 Z_2} = \frac{\mu R_1 R_2}{Z_2 (R_1 + r_p) + R_1 r_p \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right)} \dots (2)$$

(2) 式に (1) 式を代入して

$$K = \frac{\mu R_1 R_2}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_2}\right)^2} (R_1 + r_p) + R_1 r_p \left[1 + \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C_2}\right)^2}, \omega C_1\right]} \dots (3)$$

となる。2段増幅の時はこの2乗になり、3段増幅の時はこの3乗になる。

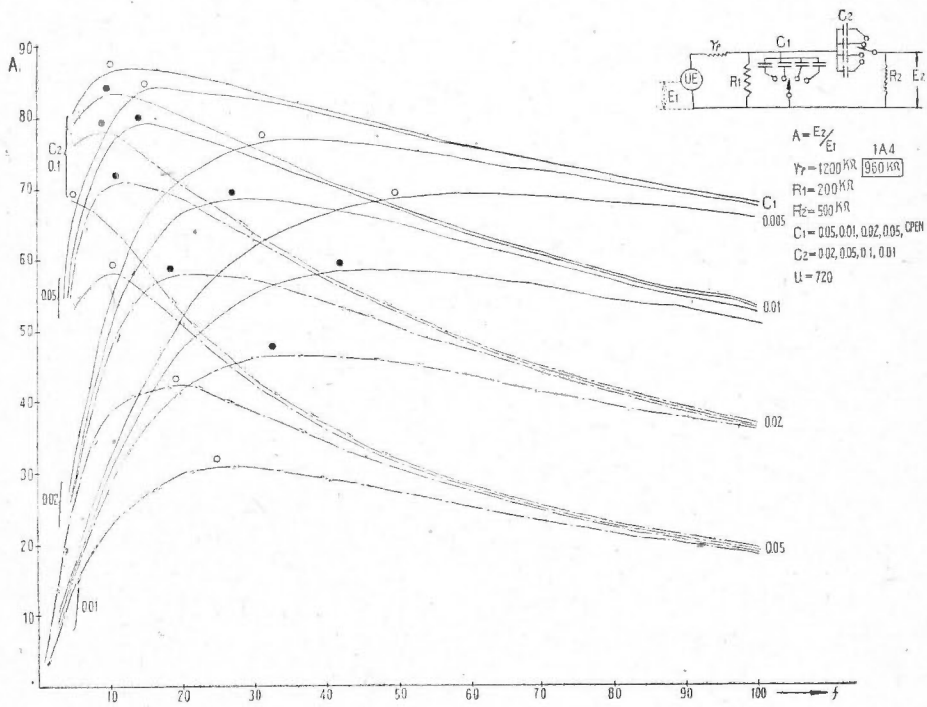
今の場合は

$$\begin{cases} R_1 = 200 \text{ k}\Omega \\ R_2 = 500 \text{ } \Omega \\ r_p = 960 \text{ } \Omega \text{ (1A4)} \\ \mu = 720 \text{ ( // )} \end{cases}$$

$C_1, C_2$  は

$$\begin{cases} C_1 = 0 \rightarrow 0.005 \rightarrow 0.01 \rightarrow 0.02 \rightarrow 0.05 \mu\text{f} \\ C_2 = 0.01 \rightarrow 0.02 \rightarrow 0.05 \rightarrow 0.1 \mu\text{f} \end{cases}$$

の様に変化するから、各々の組合せについて (3) 式により計算すると第 15 図の様な曲線を得る。



第 15 図

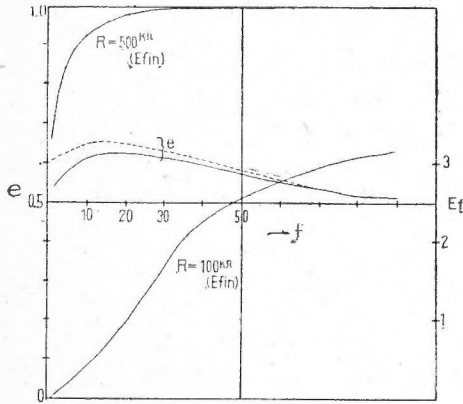
同じ様に考えて (a), (c) の部分を計算すると、次の様な結果になる。即ち

(a).....

(c).....

$$e = \frac{r_1 Re'}{(r_1 + \rho) \sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_1}\right)^2 + R^2}} \left( \begin{matrix} r_1 = 25 \text{ k}\Omega \\ R = 100, 500 \text{ k}\Omega \end{matrix} \right), \quad E_{fin} = \frac{\mu' E^2 R_A R_B}{Z_2' (R_A + r_p') + R_A r_p' \left(1 + \frac{Z_2'}{Z_1'}\right)}$$

但しここに  $Z_1' = \frac{1}{\omega C_1}, \quad Z_2' = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2}$



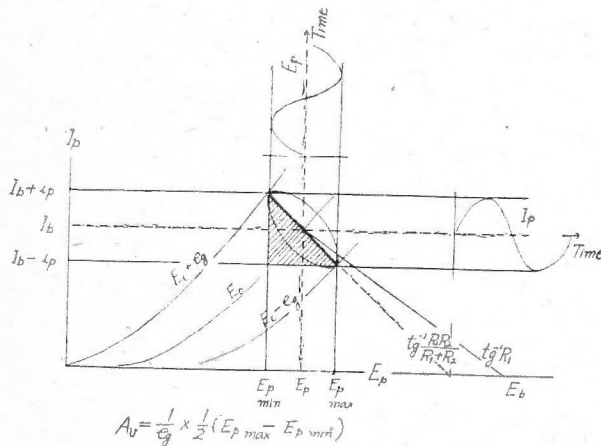
第 16 図

従つて amplifier 全体としての増幅度はこれらの組合せとなる。(a), (c) の計算結果を第 16 図に示した。

第 15 図を見ても分る様に、 $C_1$  の方は高域、 $C_2$  の方は低域除去の役割を果している。低域除去の部分は微分回路に当り、高域除去の部分は積分回路に当る。微分回路と云つても、低い周波数に対してそうなるのであつて、高い周波数に対しては変位に比例した増幅電圧を生ずること、第 15 図、第 16 図の示す通りである。従つて真空管の個数、換言すれば condenser の個数

次第で色々の特性を生ずる。これ等の結果を実験測定結果と比較するとかなりよく一致している。

amplifier 電圧増幅度のみを計算するだけならば、graphical にも出来る。それは真空管の特性曲線(第 17 図参照)から  $L$  や  $C$  が入つた場合は、楕円部分も考えにいれることにより求められるので、これらの組合せにより amplifier の電圧増幅度が求められる。



第 17 図

oscillograph は電流により働く

のであるが、amplifier-oscillograph の接続関係は次の様に考えれば分りよい。即ち  $E_p - I_p$  曲線(第 17 図参照)からも分る様に、電圧増幅の球では  $\Delta$  が寝ており、電力増幅の場合は立つてくる。従つて電圧増幅・電力増幅といつても、根本的の相異はなく、たゞ電圧に主力をおくか、電流に主力をおくかだけの違いである。それ故最後の電力増幅の部分から取出すものは、電流としても、あるいは電圧と考へても差支えないのである。

実際計算においては

pick up → (直結) oscillograph の場合

$$\theta_g = G \cdot P \cdot B \cdot \frac{p^2}{p^2 + 2p\varepsilon + n^2} \cdot \frac{p^2}{p^2 + 2\varepsilon_g p + n_g^2} x$$

となるが、この係数Bの中に電圧→電流への変換の意味が含まれているのである。

以上実験的な研究について述べたが、実際にこれらの結果を利用する際には、その裏付けとなる理論的研究が必要となってくる。それは結局どんな波が地震計に入つて来た時に、どのような性質の波を記録するかを、計算しておくことに他ならない。これは非常に大切なことなので、例えば最後に得られた記録が、変位か加速度かにより、既に初動の向きは違う。また波形も違う。振幅も異なる。

増幅器を抜きにした綜合理論については、既に地震誌上(前出)に波江野技師の研究が掲載されているが、実用的には増幅器が重要な役割を果しているので、これを考慮に入れた計算を行った。

まず振子と地面の相対運動により起される電動力は、地震計の振子自身が変位計である場合には、運動の速度に比例する。逆に oscillograph に働く廻轉能率は、電流の速度に比例する。この点が普通の oscillograph と異なる点で、例えば横河製の oscillograph においては廻轉能率は電流に比例する。従つて地動振子 (pick up), 増幅器 (amplifier) 及び oscillograph の間の動作関係を図示すると Tab I の様になる。

以下にこの表の内容について少しく詳細に説明する。

pick up: 運動の方程式は、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{d\theta}{dt} + n^2\theta = P \frac{d^2x}{dt^2}, \quad e = \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(1) \quad \text{で}$$

出力電圧 e は定常部分では  $\frac{\omega^3}{\sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2\omega^2}}$  に比例することになる。一方、

oscillograph: 運動の方程式は、

$$\frac{d^2\theta_g}{dt^2} + 2\varepsilon_g \frac{d\theta_g}{dt} + n_g^2\theta_g = G \frac{di}{dt}, \quad i = B \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(2)$$

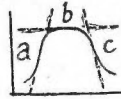
電流感度は定常部分では  $\frac{\omega}{\sqrt{(n_g^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon_g^2\omega^2}}$  は比例することになる。これらの結果を

図示すると第 7 図の様になる。これを見ると実験とよく一致して居ることが分る。

この訳は次の様にして説明できる。

誘導型の oscillograph は馬蹄型永久磁石による一定磁場 ( $H_0$ ) と測定電流 (i) の通る coil を有する超 permaloi 鉄心による磁場 (h) を直交させ、その中央に一本の線で張つた金属棒をおいたものであつて、H と  $H_0$  とのなす角を  $\Psi$  とすれば、

Tab. I pick up—amplifier—oscillograph の動作関係



振子の固有週期 地面の振動週期 (地動の変位=xとする)	pick up の 起電力 E	Oscillograph の固有週期 電流の週期	Oscillograph の運動	得られる記録	横河 Oscillo- graph をつ ないた場合		
$\gg 1$ $\left( \begin{array}{l} a=b \times \frac{d^2 E}{dt^2} \\ c=b \times \iint E dt dt \end{array} \right)$	$K_1 \frac{dx}{dt}$	b	$\gg 1$ .....	$k_1 \int idt \dots$	$K_1 k_1 x \dots$	$K_1 k_1 \int x dt$	
			$\approx 1$ .....	$k_2 i \dots$	$K_1 k_2 \frac{dx}{dt} \dots$	$K_1 k_2 x$	
			$\ll 1$ .....	$k_3 \frac{di}{dt} \dots$	$K_1 k_3 \frac{d^2 x}{dt^2} \dots$	$K_1 k_3 \frac{dx}{dt}$	
		a	$\gg 1$ .....		$a K_1 k_1 \frac{d^2 x}{dt^2}$	(p は $\frac{d}{dt}$ の略)	
			$\approx 1$ .....	同 上	$\beta K_1 k_2 p^3$		$\gamma K_1 k_3 p^3$
			$\ll 1$ .....		$\gamma K_1 k_3 p^4$		
	c	$\gg 1$ .....		$a' K_1 k_1 \iint x dt dt$	$\iint$		
		$\approx 1$ .....	同 上	$\beta' K_1 k_2 \int x dt$	$\int$		
		$\ll 1$ .....		$\gamma' K_1 k_3 x$	$\int$		
	$\approx 1$	$K_2 \frac{d^2 x}{dt^2}$	b	$\gg 1$ .....		$K_2 k_1 \frac{dx}{dt}$	
				$\approx 1$ .....	同 上	$K_2 k_2 \frac{d^2 x}{dt^2}$	$p^1$
				$\ll 1$ .....		$K_2 k_3 p^3$	$p^2$
a			$\gg 1$ .....		$a K_2 k_1 p^3$		
			$\approx 1$ .....	同 上	$\beta K_2 k_2 p^4$		
			$\ll 1$ .....		$\gamma K_2 k_3 p^5$	$p^4$	
c		$\gg 1$ .....		$a' K_2 k_1 \int x dt$	$\int$		
		$\approx 1$ .....	同 上	$\beta' K_2 k_2 x$	$\int$		
		$\ll 1$ .....		$\gamma' K_2 k_3 \frac{dx}{dt}$	$x$		
$\ll 1$		$K_3 \frac{d^3 x}{dt^3}$	b	$\gg 1$ .....		$K_3 k_1 \frac{d^2 x}{dt^2}$	
				$\approx 1$ .....	同 上	$K_3 k_2 p^3$	$p^2$
				$\ll 1$ .....		$K_3 k_3 p^4$	$p^3$
	a		$\gg 1$ .....		$a K_3 k_1 p^4$		
			$\approx 1$ .....	同 上	$\beta K_3 k_2 p^5$		
			$\ll 1$ .....		$\gamma K_3 k_3 p^6$	$p^5$	
	c	$\gg 1$ .....		$a' K_3 k_1 x$	$\int$		
		$\approx 1$ .....	同 上	$\beta' K_3 k_2 \frac{dx}{dt}$	$x$		
		$\ll 1$ .....		$\gamma' K_3 k_3 \frac{d^2 x}{dt^2}$	$\frac{dx}{dt}$		

$$\psi = t_s^{-1} \frac{h}{H_0} \approx \frac{h}{H_0} = C_1 \frac{i}{H_0}, \quad H = \sqrt{H_0^2 + h^2} \approx H_0, \quad \text{金属棒の受ける回轉能率は } C_1 H_0^2 \frac{d}{dt}$$

( $\psi - \theta_g$ ) 従つて,  $K \frac{d^2 \theta_g}{dt^2} + k \theta_g = C_1 H_0^2 \frac{d}{dt} (\psi - \theta_g) \rightarrow \frac{d^2 \theta_g}{dt^2} + 2\varepsilon_g \frac{d\theta_g}{dt} + n_g^2 \theta_g = G \frac{di}{dt}$   
 棒の回轉角

ここで例えば  $n_g^2 \ll 1, \varepsilon_g \ll 1$  とすれば,

$$\frac{d^2 \theta_g}{dt^2} = G \frac{di}{dt}, \quad \text{即ち } \theta_g \approx G \int idt \text{ となり表に示した様になる。}$$

若しこれが普通の電磁型 oscillograph 例えば横河製の oscillograph の場合などでは,

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{d\theta}{dt} + n^2 \theta = Ci, \quad \text{今 } i = i_m \sin pt \text{ とすれば,}$$

$$\left. \begin{array}{l} p \gg n \text{ ならば } \varepsilon \text{ を小として } \theta \approx c \int dt \int idt, \\ \varepsilon \text{ を大きくして } p \approx n \text{ ならば } \theta \approx \frac{c}{2\varepsilon} \int idt, \\ p \ll n \text{ ならば } \theta \approx \frac{c}{n^2} i, \end{array} \right\} \text{ となる。}$$

次に amplifier の a, b, c について説明する。実験及び増幅器の理論でも明かな様に増幅器の倍率曲線を見ると、週期と共に増幅度の増す部分—a と、週期に無関係な部分—b と、週期と共に増幅度が減少する部分—c の三つの部分のあることが分る。勿論 a とも b とも c ともつかぬ部分がそれらの間にあるが、大分けすればこの3部分となる。第14図において、

- e ..... この部分への入力電圧
- E ..... 出力電圧
- $R_1$  ..... 負荷抵抗
- $r_p$  ..... 真空管内部抵抗
- $R_2$  ..... リーク

今  $C_1$  を考えないで  $C_2$  のみある場合を考える。その場合はこれら常数は次の微分方程式を満足する。

$$\frac{dE}{dt} + \frac{1}{C_2 R_a} E = \mu_1 \frac{de}{dt}; \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{但し, } R_a = R_2 + \frac{r_p R_1}{r_p + R_1}, \quad \mu_1 = \mu \frac{R_1 R_2}{r_p R_1 + r_p R_2 + R_1 R_2}.$$

$$\text{さて方程式 (1) の一般解は } E = \Gamma e^{-\frac{t}{C_2 R_a}} + \mu_1 e^{-\frac{t}{C_2 R_a}} \int e^{-\frac{t}{C_2 R_a}} \frac{de}{dt} dt.$$

今,  $e = \sin \omega t$  とすれば

$$\frac{de}{dt} = \omega \sin(\omega t + 90^\circ), \quad \text{従つて } E = \mu_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega C_2 R_a}\right)^2}} \sin(\omega t + 90^\circ - \delta)$$

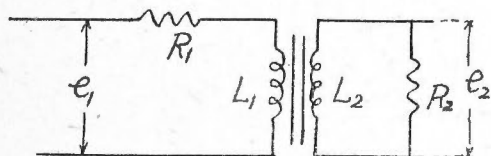
ここにおいて、今仮りに 但し  $\delta = t_g^{-1} \omega C_2 R_a$  となる。

$$C_2 R_a \text{ を大とすれば (又は } C_2 R_a \omega \text{ を大とすれば) } E_2 \approx \mu_1 e \text{ となるし, } \dots\dots\dots(2)$$

$$C_2 R_a \text{ を小とすれば (又は } C_2 R_a \omega \text{ を小とすれば) } E_2 \approx \mu_1 \frac{de}{dt} \text{ となる。} \dots (3)$$

こう考えると a, b の出来る理由がよく分る。同様に  $C_2$  を考えれば c の積分回路も納得する事が出来る。

今 3 球式の場合を考えると微分回路は 4 つある故、a の部分を使用する場合は b の場合の  $\frac{d^4 E}{dt^4}$  だけ倍率(出力電圧)がかかっているかの如く見えるが、 $C_2$  の大きさは実験・理論何れで見ても、ある範囲以上では周波数に対して e.  $E_{in}$  の積 = const と見られる。それで残るのは  $\frac{d^2 E}{dt^2}$  となる。同様に (Tab. I) c の部分では  $\int \int idtdt$  となる。



$$R_1 \ll L_1, \quad e_2 \propto e_1$$

第 18 図

又、電磁型 oscillograph では trans が入るので、一寸複雑になるが、然し第 18 図にも見られる様に、 $R_1 \ll L_1$  の場合は  $e_2 \propto e_1$  となるので、この場合についての結果を Tab. I の最も右の欄に記した。

この表を見ると、最初地震計に入つて来た記録に比べ、最後に得られる記録は器械の常数次第で色々の状態を示すということが分るであろう。実用化の際の参考迄に先程実験並びに理論により得た値を一括して Tab II に示した。

Tab. II

	Proper period	Sensitivity	Damping
Detector	10/100 sec.	See Fig VII	$\frac{2}{3} \sim 1$ Critical
Oscillograph	10/100 sec.	0.1~0.2mm/ $\mu$ A (0.05)	Critical

$$\begin{array}{l}
 3 \sim 5/100 \text{ sec.} \dots\dots\dots \\
 8 \sim 9 \sim 13/100 \text{ sec. (Surface wave)} \dots\dots \\
 5 \sim 6/100 \text{ sec. (Sound wave)} \dots\dots\dots \\
 2 \sim 3/100 \text{ sec. (Watersound wave)} \dots\dots
 \end{array}
 \left( \frac{\text{Proper Period}}{\text{of oscillograph}} \right) = \left( \frac{\text{Proper Period}}{\text{of Detector}} \right) = \left( \frac{\text{Proper Period}}{\text{of Current}} \right) = \left( \frac{\text{Incident Period of wave}}{\text{Incident Period of wave}} \right) = \left. \begin{array}{l} > 1 \\ \approx 1 \\ > 1 \\ \gg 1 \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} > 1 \\ \approx 1 \\ > 1 \\ \gg 1 \end{array} \right.$$

Amplifier	Domain
a	$20 \sim >$
b	$20 \sim 10 \sim > 20 \sim$
c	$> 50 \sim$

この表をみると、たとえば海底音波の場合などは殆んど完全な変位を書いている。又、普通の振動や空中の音波などの場合は、大体変位を書いていると見て差支えなからう。但し普通の振動といつても色々で、爆発点に近いものは純粹の意味で変位に近いものを書いているが、爆発点からかなり離れた処では振動週期ものろくなつて、幾分か速度のはいつた変位を示してい

る。音波は空中から地面を叩く訳で、従つて今の場合、変位となつているから、普通の振動の初動と逆の phase を示してよい筈で、実際の記録を見てもそうなつていることが分る。ところが電磁型 oscillograph をつないだ場合は、速度乃至は加速度を書いていることになり、(Tab. I 参照) 振動初動と同じ向きの音波が出て差支えない。このことは我々の調査所の佐藤(光)技官が花岡鉱山でやつた調査の記録にも出ている。更に表面波となるとこれは速度の場合あり、加速度の場合ありである。

この様に種々の場合があるから、振幅・週期等を問題とする際は、余程の注意を要する。

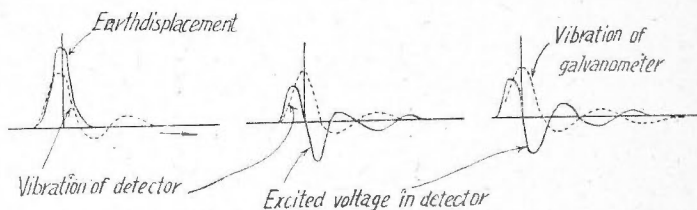
以上は専ら持続振動についての研究であつたが、実際問題としては孤立振動 (transient motion) も調べておく必要がある。

火薬爆発に関する 鈴木武夫氏の研究<sup>2)</sup>を見ても分る様に、火薬爆発によつて発生する振動は震源附近では非常に簡単な衝撃型のものであると考えられる。然らば衝撃型の孤立波が来た場合に何んな記録を描く

かしらべて見よう。こゝ

には理論的に簡単な場合を考えてみる。興える可き衝撃型の式であるが第

19 図に於て、



第 19 図

$$\begin{aligned}
 t < 0 & \quad x = 0 \\
 0 < pt < 2\pi & \quad x = \frac{3}{2} - 2 \cos pt + \frac{1}{2} \cos 2pt \\
 pt > 2\pi & \quad x = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

の様な式ならば  
 $pt = 0, 2\pi$  に於て、  
 $x$  の 2 次微係数迄連続となるから好都合である。

そこでこの様な振動が来た時、仮りに  $\frac{\text{振子の個有週期}}{\text{地面の振動週期}} \approx 10$  位の場合を考えて見ると、結果は次の如くなる (amplifier を通さない直結の時、 $h = 0.6$  同図参照)。

まず振子は地面と同じ様な変位を描く (勿論向きは逆であるが)。たゞ少し尾を引くだけである。誘起電圧はこれを微分したものであり、oscillograph で積分して元に戻すから、同図の様になる。尾を引くということは致し方のないことで、例えば萩原博士の振動測定<sup>3)</sup>にも、たとえ一つの孤立波が来ても、最も簡単な地震計でも記録は (如何に damping を利かせても) 一往復半の振動を書くことが示されている。

増幅器の入つた場合は少しく複雑にはなるが、過度現象を当つて見ると、色々の組合せでのおくれの極大は約  $\frac{1}{100}$  sec 程度となる。

波形としては殆んど変らない。実験的にも殆んどこの程度である。

2) 鈴木武夫: 大発破による地盤震動波形 (地震, 第 16 卷, 第 7 号, 昭和 19. 7) 1—9.

3) 萩原尊礼: 振動測定

今ここに一つの実例を示す(第 20 図参照)。これは非常に爆発点の近くで撮つたものである。これを見ると非常によく第 19 図と似ている。だゝ初動が小さく第二動が大きい点は異なるが、これは damping と復原力の関係で説明出来る。

以上で大体の総合特性(理論)を述べたが、心配になりそうなことの一、二を吟味しておく。

1°) pick up の週期と oscillograph の週期の値が非常に近いので、唸りの様な現象を起すことはないであろうか。それは  $\left. \begin{array}{l} \text{pick up の週期} = 10/100 \\ \text{oscillograph の週期} = 13/100 \end{array} \right\}$  とすると、

$$\frac{1}{10} \sim \frac{1}{13} = \frac{13-10}{180} = \frac{1}{43} \quad \text{約 } 2 \sim \text{程度} \text{の低周波(唸り)が出て来ることになる。}$$

ところが増幅器の特性曲線を見れば分る様に、これ位の低周波になると、high cut, low cut 何れの組合せにしても倍率が非常に低くなつており、従つて記録にはこの心配はいらないことになる。

2°) 増幅器の内部発振はないであろうか。

例えば増幅器の特性曲線の第 14 図 (a) 部について考えて見るのに、この回路に発振が起るかどうか、それぞれの常数を入れて見ると、結局  $R^2 > \frac{4L}{C}$  の条件を満しているので発振は起らないことが分つた。他の部分も同様調べて見たが、この心配はなかつた。

以上を要するに理論的結果 Tab. II と今迄に得た実験結果とは、ある場合は多少の違いもあるが、全体的に見て殆んど傾向といい、大きさといい、満足す可き結果ということが出来る。

#### 4) 結 語

以上の最初に 1°) の処で述べた目的に対して波江野式電気地震計の特性を実験並びに理論の両方面から調べた。そしてこの地震計の特性、常数等を知ると同時に、この地震計により得られた記録結果を利用して、はじめに述べた様な意味の地球物理学的研究を行い得る可能性のあることが分つた。

### III 地震探鉱における爆発の問題

#### 1) 目 的

地震探鉱において爆発方法の大切なことは今更言を要しない。記録の良否の原因の半分が爆発によるといつても、過言ではあるまい。然らば如何にすれば、又如何なる条件の下では良好な爆発が行われるであろうか。又爆発エネルギーに方向性を與えうか何うかの問題等、種々考える可き要素が未知の儘残されている。

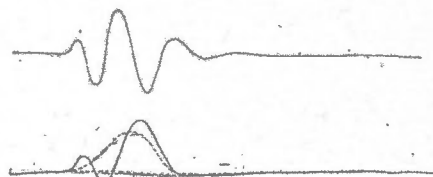
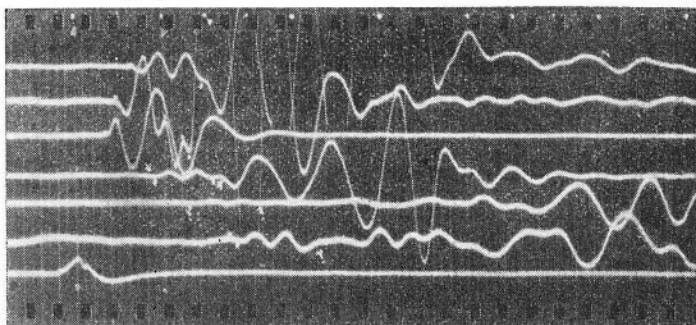
この様な問題を解決する爲には色々の状態における爆発現象を観測又は実験する必要がある。こういう意味においてここには種々の基礎的な爆発の問題を扱つて見た。



## 2) 発震機構

まず普通の状態における爆発による記録を見るのに、反射・屈折・直接・表面・音、それによつては疎密に対する捩れ等の各種の波、これに加うるにこれらの持続又は器械の個有振動等による波の相が現われているが、実際の爆発点では爆発瞬間に果して如何なる種類の波が起つているのであろうか。これは発震機構を論ずる上にも、従つて又自然の地震と人工の地震を比較して色々考えをめぐらせる場合にも必要な事柄である。勿論これは爆発点の地質・火薬の分量・火薬の総合外形・雷管の位置・本数等により多少の変化はあるが〔3 以下参照〕、根本的内容は左程違つたものではない。

一例として II に示した例であるが、樺太小沼における一つの爆発点附近の記録を示す(第 20 図参照)。爆発孔は手掘りで作り、火薬は集團形を爲している。火薬深度は 2~2.60 m, 薬量は 1 kg 以下程度である。この記録を見てまず気の付くことは爆発点に近い程、波の形、持続状態等が簡単なことで、これは色々な理由から考え得られる事



第 20 図

柄である。爆発点が一番近い ( $r=15\sim 20$  m) のを見ると、記録は至極簡単である。前の章でも述べたことであるが、この記録は爆発機構の単純であることを物語っている様である。この一番爆発点に近い記録には、まだ表面波の発生は見えない様である。

今 II に於て得た種々の器械常数を使い、この記録から元の波形を積分法により計算し平滑化して見た。

この結果を同図に点線で書き入れて見た。これは眞の地動(振幅)曲線とでも称す可きものであつて、これを見ると顕著な一方的変位の存在することがわかる。これは極く単純な衝撃性(型)の変位であることを示している。

この事は前の章でも引用した大発破の場合の鈴木博士<sup>8)</sup>の得た結論が、我々の今の場合の様

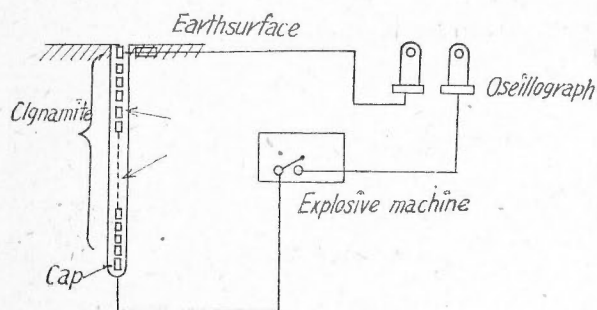
8) 前出

な小発破の場合にも適用出来ることを物語っている。

即ち、震源においては  $t=0$  にたゞ一回の衝撃が地面に與えられるもの様で、 $t \geq 0$  以後では大した反復振動を與えるものとは考えられない（この簡単な衝撃の記録は同時に爆風と爆音とを含んでいると考えられる）。

何れにしても自然の地震に見られるよりは、更に簡単な発震機構で地震波が発生するものと思われる。そして爆発点から離れるに従い、土地の粘弾性により衝撃性変位は距離と共に急激に減衰し、且つ波形が変化し、代りに本章の始めに述べた様な色々の波が重なり合わさつて漸次振動性変位が現われて来るのであろう。

次に、爆発の際、雷管発火から爆発が行われる迄の時間が問題である。これに余り長い時間



第 21 図

を要すると、発震の機構が複雑となるからである。この爲、次の様な実験を行つた（実験場処は濁西油田）。即ち第 21 図に示す様な装置——細長く連ねた火薬の一端を oscillograph に、他端に 6 号の電気雷管を挿入しこれを発火器を経て他の oscillograph に接続——を用い、雷管発火から火薬の他端迄爆発現象が及ぶに

要する時間を測定した。実験測定結果は次の如くである。

爆薬全長 = 20 m

雷管発火から火薬が全部爆発する迄の所要時間 =  $\frac{2}{1000}$  sec.

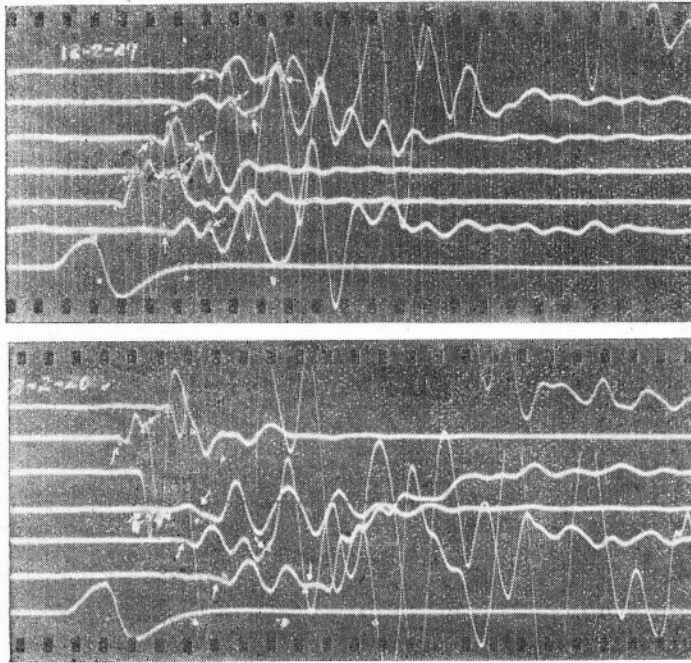
従つて記録されている振動週期  $\frac{2}{100}$  sec. 程度の運動に比べればこの時間は問題にならない。

なお雷管の白金線が切れてから、雷管が爆発する迄の時間は、最近私共の地質調査所で調べたところ  $\frac{1}{100}$  以下であることが判つた。

### 3) S 波の発生条件

実際の地震においては、疎密波の他に振れ波も記録され、それによつて地球内部の剛性を推定することが出来る。人工地震においてもこれが出来ればうまいものであるが、人工地震における実際の記録では爆発の際に元々振れ波も発震しなかつたのか、それとも発震しても途中で消滅したのか、兎も角一般には左程明瞭には現われていない様である。然しある場合には明かに振れ波 (S 波) らしきものが見受けられる。この一例として樺太小沼において得た記録を挙げることにしよう。第 22 図にこれを示す。

今、図において初動の次の相に mark を入れ爆発瞬間からそれぞれの相に到着するに要した時間  $t_{(p-a)}$ ,  $t_{(p-b)}$  並びにそれらの比を讀取り書入れ、Tab. III にこれを示した。  $t_{(p-a)}$ ,  $t_{(p-b)}$



第 22 図

えて見ることにする。今、poisson's ratio  $\delta=1/4$  とすれば、この比は $\sqrt{3}=1.732$  になる筈である。今の場合に  $\delta$  を出して見ると、 $\delta=1.80$  となり、これは今期待されているこの附近の表土の物質の値に近いものと考えることが出来る。

又、振幅の比について見ても、第2の相をS波と考えると差支えはない様である。なおこの場合これをS波と考えないでは他の原因で記録の上でこの相の時間に相当する波は考えられない。又、これはIIの結果からも分る様に器械の個有振動でもない。して見ればこの第2相はS波と断定してよいであろう。層の境で更めて生ずる所謂2次的なS波でなしに、若しこの最初に発生したS波が無事遠方迄傳われれば、非常に役立つであろうが、吸収その他なお研究す可き余地が今後に残されている様に思われる。

では如何なる場合にS波を発生するか、その条件について考えて見ることにしよう。

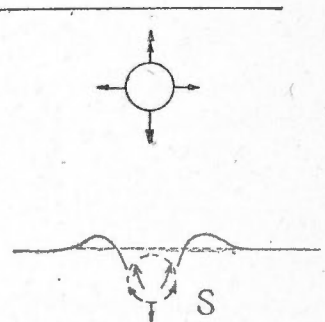
元来、火薬の爆発の如きは最初各方向に殆んど一様に圧力のみを興えるのであるから、若し爆発点が地中深くあれば、最初殆んど各方向に一様に押し波のみを興え、従つて振れ波を発生し得ない状態にあると考えられる。然し爆発点が地表近くであれば、事柄は大分異なる。例えば第23図において見られるSの様な歪力も働き得るであろう。

而も振れ波はこの様な条件のみによつて起る物ではなさそうである。秋田・山形・新潟等の油

Tab. 5 III

$T_p-a$	$T_p-b$	$V_p/V_s$
2.0	4.0	(2.00)
5.5	10.0	1.82
9.0	17.5	1.94
13.0	23.5	1.81
4.0	7.4	1.85
6.0	11.0	1.83
7.4	12.6	1.70
9.0	15.5	1.72
12.7	21.5	1.70

の比は、いいかえれば、速度の比に他ならない。ところでこの比の値を見ると不揃いではなく、大体において一定の値をとっている。従つて仮りにこの両者をP波・S波と考



第 23 図

田には見られず、樺太等の所謂炭田地方において多く見られるのは如何なる理由に基くのであろうか。これについては土の剛性を考え得るのでは無かろうか。一般に疎密波は  $V_t = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$ , 振れ波は  $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$  なる速度で傳播することが知られているが、疎密波・振れ波の発生条件にも類似の関係が存在するのではあるまいか。即ち、軟柔な土地においては  $\mu \rightarrow 0$ , 従つて  $V_s \rightarrow 0$ , 振れ波が発生し難いと考えられる。若し、仮りに一旦S波の発生した場合でも  $\mu \rightarrow 0$ , の土地では傳播し得ない訳である。

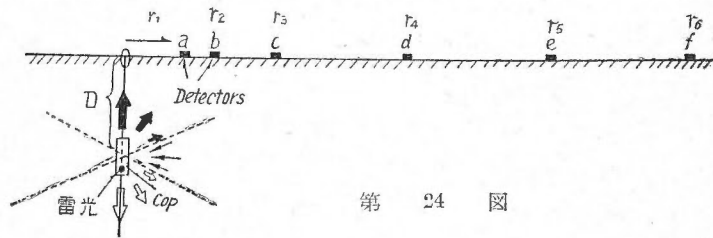
それにしても前にも述べた様な機構の現在の爆発方法では、大した振れ波を出すことは難しい。従つて地下深部・遠距離迄減衰せず届かせる様な振れ波を出すには、発震方法に一段の工夫を要する。

#### 4) 雷管の爆発

地震探鉞の爆発現象は以上述べた様に割合に簡単な機構により行われるのであろうか、更に一段と進んで自然の地震において行われる類似の機構が若し起されるならば、振れ波の発生(従つて引き波も起り得る)は元より energy の集中(爆発 energy に方向性を與えうる)その他の事柄が可能となり、地震探鉞の範囲も亦拡大される訳である。爆発 energy に方向性を與える事の可能性については、本間学士が最近理論的に研究された。

以上の様な問題解決の

第1段階として、次の様な実験を行つた。今雷管を第24図の如くこれを地下の浅所に埋める。同図は雷管を縦に埋めた場合を示している。横の場合もやつてみた(図は縦の場合のみをしるす)。



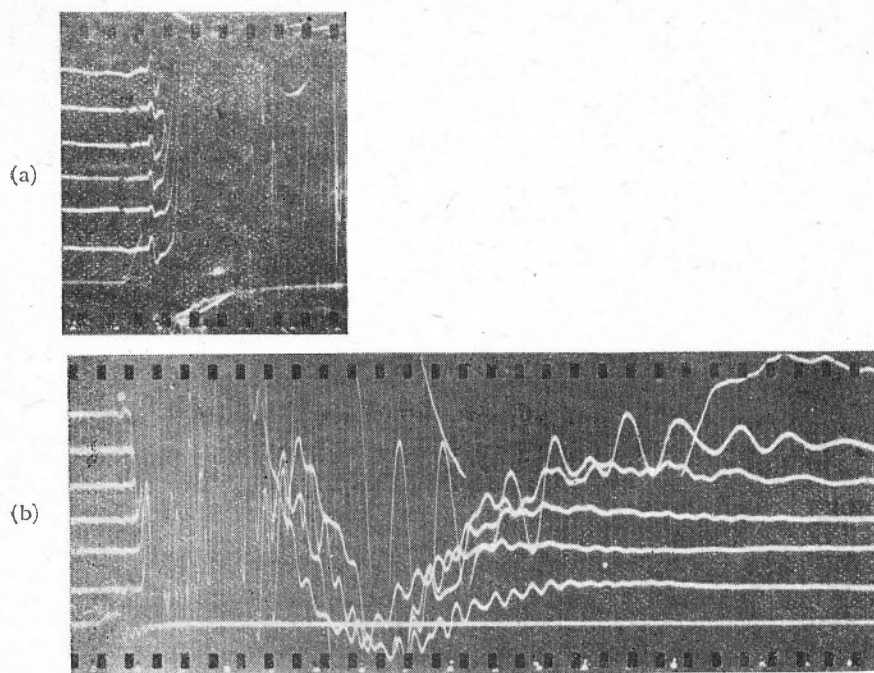
第 24 図

雷管の中心深度  $D=30$  cm

受振点 a と雷管眞上の地面の点 O との間隔  $r_1=20$  cm, bO間の距離  $r_2=30$  cm

cO... $r_3=50$  cm, dO... $r_4=100$  cm, eO... $r_5=150$  cm, fO... $r_6=200$  cm

この様な条件下で得られた記録がそれぞれ第25図(a), (b)である(aは雷管を縦, bは横にした場合である)。これを見るとまず初動の向きが、何れの場合共、半分づゝ逆になっていることに気が付く。IIの結果からも分る様に、この6つの記録の週期の変位位では、何れも殆んど完全な変位を書いていることと思われる。従つて初動の向きの変ることは器械のせいではない。且つ最初器械の振幅は揃えてあり(週期-振幅関係から振幅を出して見ると)、向きの変る処では何れの場合も皆振幅が小さく、離れるに従い大きくなつていくことも分る。これらの事から必然的に全図に示した様な爆発機構が考えられる。即ちこれは押しと引き, energy



第 25 図

の方向性等の意味を含んでいる。なお振動尾部は地表面の変形を意味するものの如く、これで見てもその傾向に誤りのないことが分る。

この実験の結果は原理的には地震探鉱においても自然の地震と類似の発震機構を起し得、又爆発 energy に方向性を與え得ることを裏書きしている。たゞ大規模にこれを行う場合にはなお研究を要する。たゞ今は可能性を強調するにとどめる。

### 5) 爆発の方向性

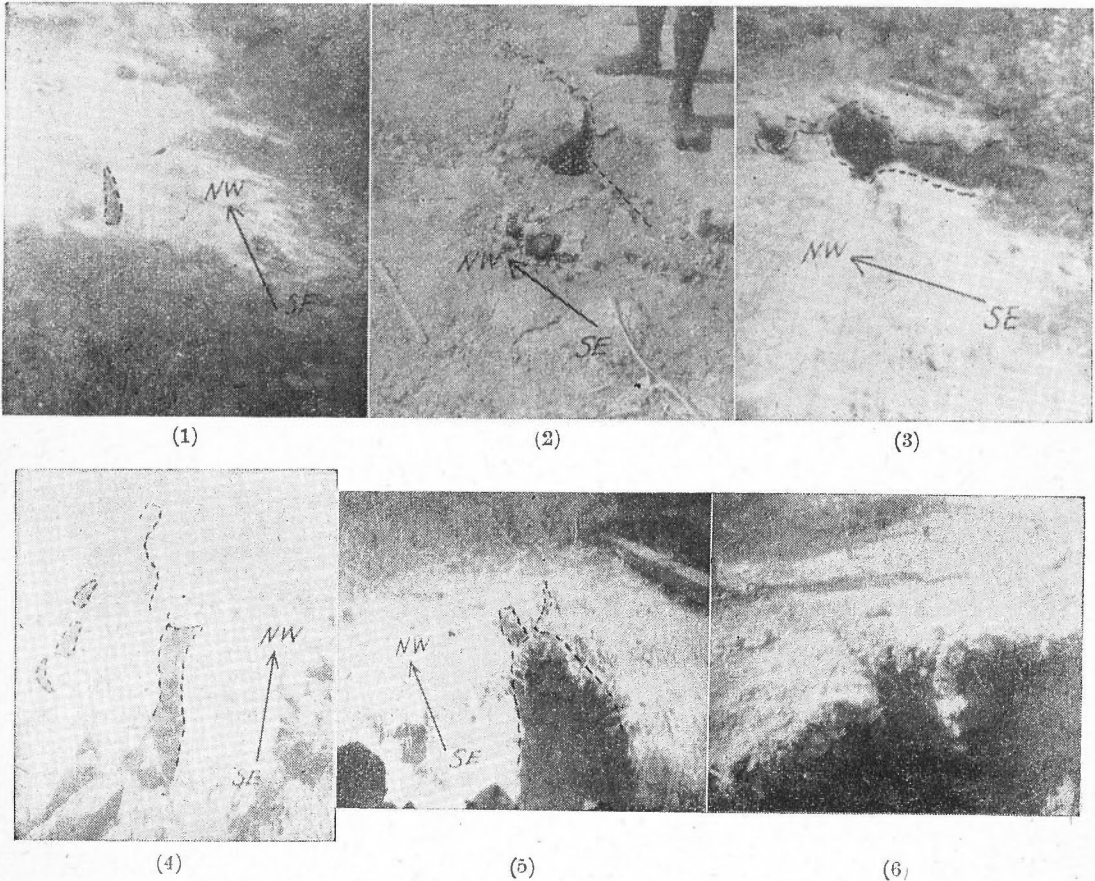
これは爆発の際の energy の分散方向性の問題で、4) と関係のあることであるが、4) においては人為的な実験を行つたのに対し、今度は自然の儘の状態における問題を扱つた点が異なる。

等方等質の地地下浅部で爆発を行つた場合に、爆発の energy が各方向に一樣に傳わることは前に述べたが、爆発点附近に不連続面のある場合は非常に事情が異なる。今からそれについて述べる。その一つの例として濁西油田のある爆発点において得られた材料を吟味することにした。

爆発点附近に不連続面の存在することは、後から分つたことで、同点は全く偶然にこのような好条件におかれていたのであつた。爆発孔の深さは平均 10 m (幾回も爆発を実施した) 爆薬は筒状とし、長さ平均 6 m 位、薬量は 2~10 kg 程度である。さてこの爆発による地表面の変化(変位)の状態を第 26 図(写真)に示す。

同じ場処で幾回も爆発を行つたが、この写真を時間の順にそれぞれ第1回、第2回……と上段左から右へ、更に下段左から右へと並べて見た。ところでこれらの写真を見ると非常に面白い現象があることに気が付く。即ち初期の爆発において小さな細長い割れ目の穴が出来、爆発を続けるに従い次第に全体の大きさを増し、割れ目を成長させてゆく。

普通の場合ならば爆発点を中心として周囲に対称に cone を逆伏せにした形か、單なる円筒形の穴が出来ただけであるから、この様な割れ目を生ずるのは他に何か原因がある筈だと思ひ



第 26 図 Growth of a hole by successive explosions

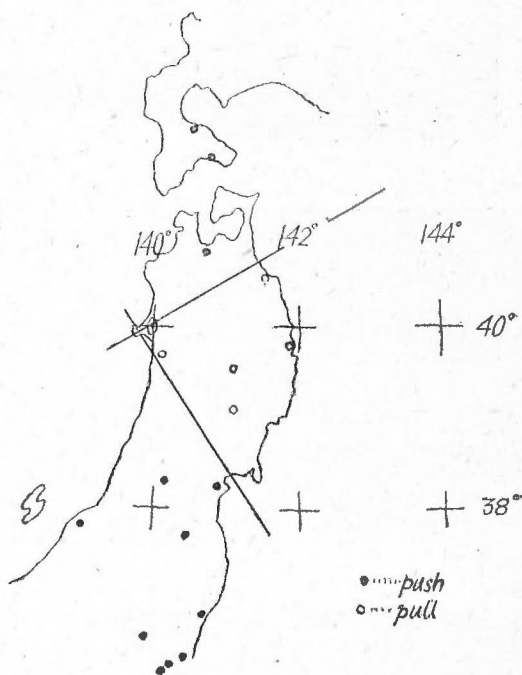
調べて見たところ爆発点の側(間隔2m)にNW—SE方向に不連続面(小さな断層様のもの)のあることが分つた。且つこの附近の地層もこれに平行していることが分つた。而も今の場合、割れ目の方向と不連続面とは殆んど平行している。又爆薬の利き具合(振幅)から見ても、不連続面の方向がこれに直角の場合よりよく利いていることが判明した。これと類似のことは少々意味は異なるが、筆者<sup>9)</sup>が以前に説明したことがある。即ち爆発点の附近に不連続面があれば、

9) 早川正巳: 断層の発現機構に就て, (海と空), 20卷12号(昭15.12)

爆発の際の容積膨脹はその方向に平行に行われる。この際、爆発 energy は容積膨脹の方向即ち不連続面に平行する方向に多く與えられる。以上のことは自然の地質を利用しての爆発 energy の方向性利用の一指準になるう。

ところでこゝに一つ面白いことがある。それは人工地震のみならず、この地方に起つた自然の地震においても同じ様な現象の存在することが分つた。

昭和14年5月1日の男鹿地震の初動分布、並びにそれから期待される発震機構<sup>10)</sup>を第27図に示す。一方同地の地質図<sup>11)</sup>(図面省略)を見ると、地震の起る前から既に北西—南東(これは偶然かも知れないが、上に述べた不連続面と平行している)方向に一大断層が存在している。ところがこれと発震機構とを比較すると、発震機構の節線の一つは断層と平行していることが分る。これは今先程も述べた様に不連続面の側で破壊が起れば、割れ目はその面に平行に出来易いということの一つの裏付けとなる(勿論自然地震の場合と火薬による破壊の場合と発震の機構は異なるけれども)。以上を要するに人工地震においても実際の自然地震と類似の機構乃至は爆発 energy の指向性



第 7 図

は必ずしも起し得ないことはないと思われるし、又規模経費の点で若し実用には程遠いとしても、自然の地質学を利用し energy を充分活用し得ることは考えられる。

## 6) 海底における爆発

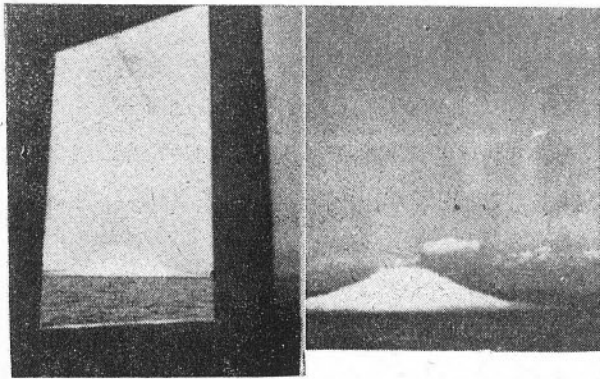
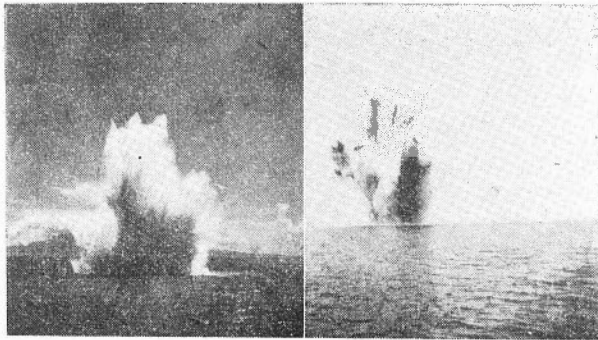
以上述べたことは何れも陸上の場合の事柄であつたが、海底における爆発の場合は、陸上と全然条件が異なる故に種々異つた現象が見られる。

尤も陸上と類似の共通の事柄もある。即ち水の厚さ(深さ)が余り厚くては爆発し難く、又余り浅過ぎては地面を叩くより水柱を上げるに energy が消費される率が多くなる等の現象である。然し火薬自身を海底に安置した儘爆発を実施するので、土の代りに水の圧がかかっている。

10) 飯田汲事：地震初動方向分布と津浪初動方向分布とに關する一考察(地震12巻, 1940) 6

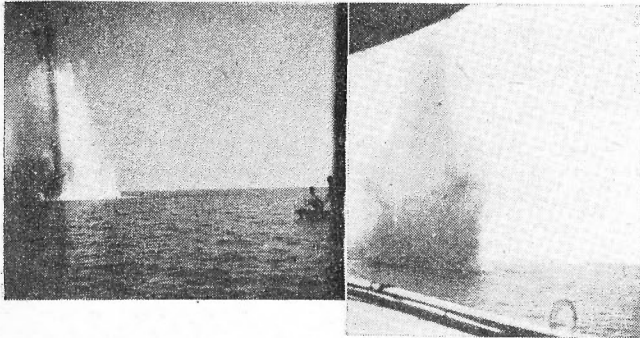
萩原尊礼：昭和14年5月男鹿地震の余震分布(地震12巻, 1940) 15

11) 地質調査所報告(遠藤六郎)

(a)  $\frac{5}{10}$  sec(b)  $\frac{8}{10}$  sec

(c) 2.5 sec

(d) 3.0 sec



(e) 4 sec

(f) 5 sec

第 28 図 after explosion

という訳であるから爆発点の条件は陸の場合と大分異なる。然し、S波の発生や方向性を與え得ないという条件は別がない。又発震機構も前程簡單ではない。

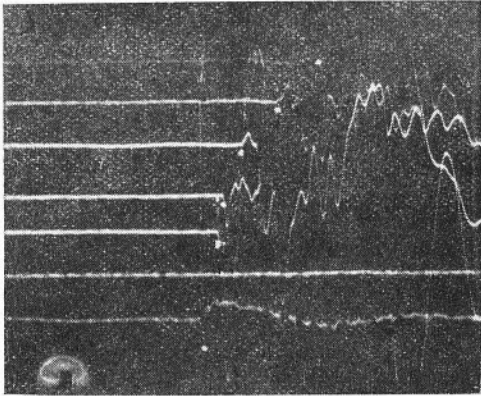
まず爆発の状況について述べる。薬量・深さ等により種々違つた形を呈するが、今一例として(深さ 10m, 薬量 10 kg.) の場合を示し、それから一般の場合を述べる事にする。第 28 図に爆発の際の種々の時刻における写真を時間の順序に左から右へ並べた。最初発火した瞬間、一瞬閃光の如き漣の一群とでもいう可きものが水の上を走る様に見える(この時半径 5~60 m 以内の小魚は一時しびれた様な状態を呈するが、これは後で生き返る)。これと殆んど同時に水面の形は同図(a), (b)の如き小丘状になる(小爆発又は深い場合はこの形だけで終る)。次にこれが出来終る頃に(c), (d)の如き水柱の群が吹き上げて来る。以上火薬爆発からこれらの現象が起る迄

3 秒とは要しない。そして後は次第に e の如く滝の流れとなつて落ちて来る。そしてこれらの水が押し寄せて半径 150 m 位の処迄津浪の如く波が立ち、後はその範囲の水面内が暫く白く濁つている。(c), (d) が始まつて間もなく猛烈な火薬のにおいがする。海が深い場合は精々(a)又は(b)の形で終る。

一方、受振点観測所(船)では続いて二度 shock を受ける。これは一度は地下を通つて来た



振動であろうし、もう一度は水中音波による衝撃であろう（この何れが先に来るかは、すぐ後に述べるが、条件次第で異なる）。又この三度の shock を受けて暫くすると、空中音波が到達する。以上爆発の状況を記した。

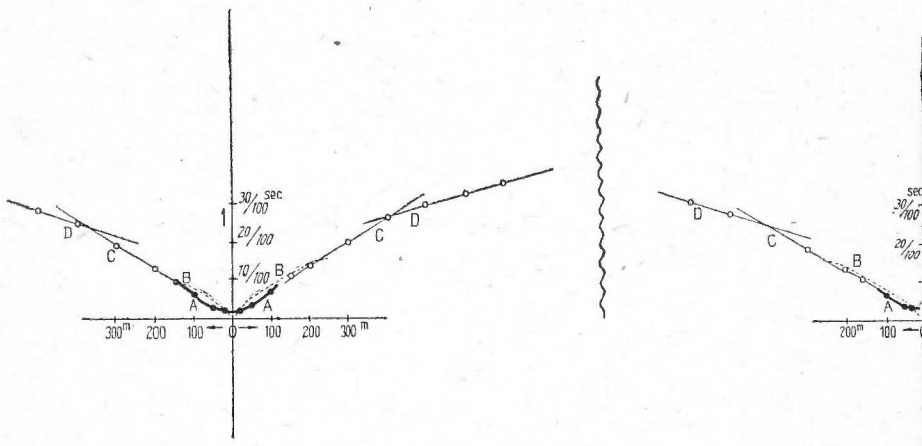


第 29 図 (a)

さて次に記録の方を調べて見る。

爆発点附近の記録の一例を第 29 図 (a) に、走時の一例を第 29 図 (b) に示す。

この際記録を見ると初動の向きがある処を境にして変つてゐる。この向きの変つてゐることは先程雷管の時にも述べたと同じ理由で、器械のせいではない。第 29 図 (b) を見ると、最初の中は非常に速度の大きい処が出ているのに気がつく。これらの事柄は陸上の爆発点で一寸気のつかなくつたことである。これらの現象を説明するのに最も妥当と思わ



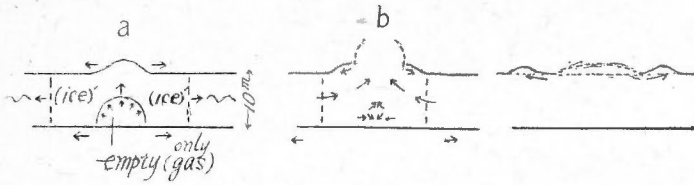
第 29 図 (b)

れる解釈を考えて見よう。

まず火薬が最初周囲に対して一様に破裂したとすると、初動の向きの変化を押し波、又は引き波と解釈することは難点がある様に思われる。結局最初の中は pick up の上の方から波がやつて来、暫くすると下の方からやつて来たと解釈するのが無難な様である。而も波の速度が海水よりも弾性体よりも大きいということは、結局は最初に来たのは火薬爆発の際の衝撃波であつたということになる（これは遠くなると消滅する）。

従つて結論として次の様な発震機構が考えられる（第 30 図参照）。

始め a 図の如く爆発瞬間には、水は固体の性質（氷の様に）を以て弾性体の上を走り（この時は下の弾性体を傳わる衝撃波より速度大）、次に弾性体中を傳わる衝撃波が来（b の様に）、



第 30 図

その後普通の弾性波が来た（海水中の音波も来るもの）と解釈出来るのである。尤もこれらは爆発点近くの話であつて、離れば段々様子の変わる

こと勿論である。

又海水と土との界に爆発点のあることから普通の表面波とは別箇の境界波も発生し得る条件にある（このことは後で詳述）。

この様に海底では simple な波ではあるが、陸上とは大分異なつた発震機構をもっている。

## 7) 結 語

II に於ては機械の性質を調べたが、一方記録の良否を左右するものは、地質と爆発条件であるので、本篇においてはこの爆発の問題について種々述べた。そして主に爆発の機巧について調べ、爆発のやり方次第で如何に結果に利くかということを書いた。

なお将来爆発の方向性の問題等への発展を期する爲種々の研究を試みた。

勿論以上述べたことは必ずしもすぐ実際に種々と應用が利く訳ではないが、種々の条件を考える際には役に立つであらう。

## IV 地震探鉱の波形・振幅の問題

### 1) 目 的

前二章に依り波江野式電気地震計の特性及び爆発の機巧について可成りの程度詳細に知ることが出来た。従つて我々はこの地震計によつて又、一般に使用されている爆発方法によつて得られる記録がどんな性質を持つているか判別出来る様になつた。ここで始めて波の形や振幅等を議論し、その利用についても考える時が到来した。本章にはそういう意味での種々の問題に触れ、地震探鉱のこの方面への利用に寄與すべく研究を行つた。

即ちまず地震計を用いて得られた記録の中、処々に定常振動と覚しきものが現われているが、これがどんな性質を持つものであるかを吟味した結果、表土層における個有振動であることを確め得た。従つてこれから表土層の厚さを推定することが出来た。

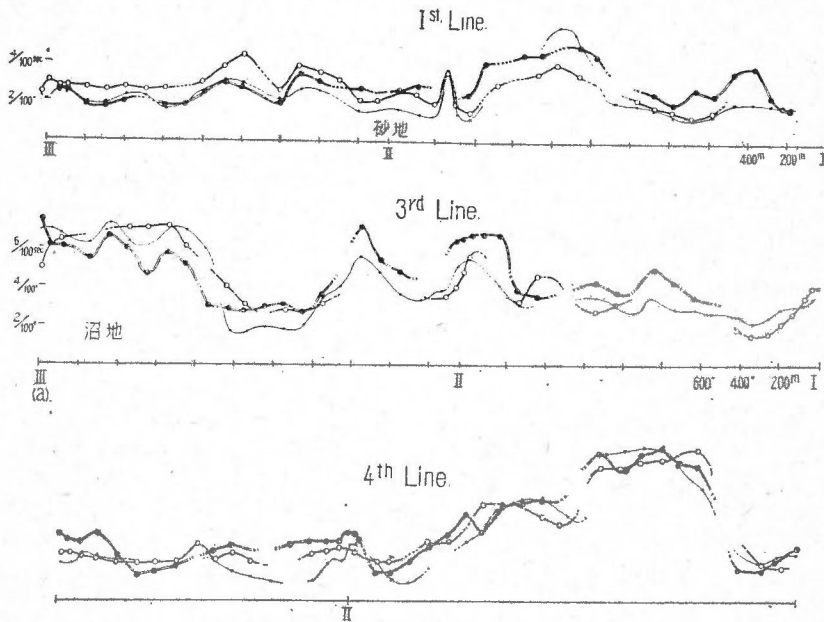
次に同じく記録に現われた表面波についてその速度を出し、それに依つて各点の表土層の速度を決定し、一方において (Love, Rayleigh) 波の性質を利用して表土層の厚さを求める法を考えた。又海底において得られる表面波にも言及した。

更に記録によく音波の現われる場処があるが、その場合これを利用してその速度から爆発点——受振点間の距離を出して見た。又音波の energy は距離の自乗に逆比例して減少するものと考えて、振動記録に現われている音波の振幅から器械全体の総合倍率を推定し、これによつて各初動の振幅を出し、それが爆発点からの距離と共に、又変化のある処ではどの様に変るかを調べて見た。なお水中音波と類似速度を持つ表土層の速度についても言及した。

最後に以上の様な種々の問題の吟味が出来るのは damping のよい記録が得られたからであつて、この様ないい記録はどの様な条件の下に得られるかということ吟味し、ツンドラ・海底の場合等についてそれらの様子を考究したのである。

## 2) 共鳴振動による表土層の厚さ決定

波江野式電気地震計により得られた振動記録を見ると、屈折波・反射波等種々の種類の波動が出ていますが、その様な相ではなくそれらによつて誘起されたと思われる或種の持続振動が屢々見られる。これは一体どういう性質のものか当つて見た。



第 31 図

まず種々の週期のあることから考えて、器械の個有振動週期でないことは分る。第一節の結果から考えても、このことは分る。又爆発点から出る波は非常に簡単なもので、持続振動でないことも既に分つている。器械の damping の方から考えて見ても、そんなに各個の振動が続くとは思えない。

そうするとこの様な定常振動はどうしても受振器に到達する迄の途中の地面の下の或種の持

続振動と考えざるを得ないであろう。然らばこの振動の原因は地面の下のどの部分に相当するのでしょうか。これを調べる爲に次の様な方法をとつた。

まずこの種の振動は初動の直ぐ後とか、場合によつては別の相の後とかに現われているが、今は始めの方だけに着目することにして、同じ様な週期の波が3つ以上あるものについて読取つた。それらの平均値Sを出しておく(誤差の範囲は0.1/100 sec)。そして横軸に測線の切断図(各爆発点・受振点を盛込んだ)を、縦軸に各爆発点からの記録によるそれぞれのSを書込む。これらの結果を第31図に示した。ここに示したのは、先程爆発の方向性のところで述べた濁西油田の一例である(図面省略)。

第31図を見ると非常に興味あることが分る。即ちこれらの週期はそれぞれの場所毎に異つた値を示している。而も各々の場所においては、各爆発点からの記録は殆んど同じ値となつている。この二つの現象から今問題となつている持続振動は、例えば観測点の爆発点からの距離による週期の伸びといった様なものではなく、それぞれの場所固有のものと考えられる。

さてそうだとすれば、地面の下から来た shock により excite されて最表土層が自己振動を起したという場合も、有力な一つの解釈として成立つ。この様な仮定が正しいかどうかを検定する一つの方法として、最も簡単な条件の下における表土層の深さを推算することにしよう。

第32図において

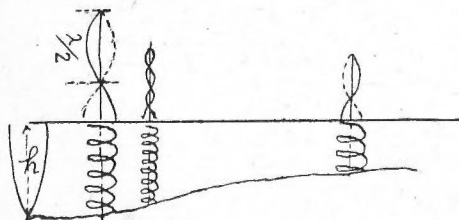
- h …… 表土層の厚さ
- λ …… 波長
- v …… 表土層媒質中の地震波の速度
- T …… 週期

とし仮にこれが主振動とすれば、

$$\lambda = vT, \quad \frac{\lambda}{4} = h = \frac{vT}{4}$$

v = 0.6 km/sec.	T = 0.05 sec.
0.8    "	" 0.05   "
"   "	" 0.0   "

とすれば	h = $\frac{0.03}{4} = 0.0075$ km
	$\frac{0.04}{4} = 0.0100$ "
	0.0200 "



第 32 図

今の場合 v = 0.7 km/sec 位と推定され、従つてこれによつて算出した地下の表土層の深さをこれらは同図 a 点における試掘結果及び各爆発点附近の補助爆発による表土層厚さの結果と比較して見ると妥当な値を示している。従つてこの持続振動は表土層の個有振動と解して大した誤はあるまい。勿論これの断定の爲には、更に後に述べる様な種々の吟味が必要ではあるが。

さてここに表土層の厚さということ(実用上は表土補正に利用する)が問題になつて来たので、このことに一寸触れておく。普通に表土補正をやるには、例えば America などで行つて

いる方法では、地震計の間隔を狭め爆発点同志の間隔をも狭めた屈折法によりその目的を達しており、これの解析についても色々な法が考案されている。然しこれが爲には態々この様な屈折法を施さねばならぬ。これが面倒だからといつて、仮に表土補正を省略した場合も考えて見れば、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{表土層の速度 } 0.6 \text{ km/sec.} \quad \text{表土層の厚さ } 20 \text{ m} \\ \text{第1層の速度 } 2 \text{ km/sec} \end{array} \right\}$$
 として走時に 0.05 sec. の誤差を生ずる。従つて表土層を第1

層と同一物より成るとして解析すれば、第1層の厚さを 100 m も深く誤算することになる。とも角表土層の個有振動（即ち共鳴振動）からこの厚さが求められることになれば、現在の一般の屈折法をその儘利用して結果が出せる訳であるから、無駄がない。

次に種々吟味をしておく。

(a)  $V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}$ ,  $V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$  であるから、地震波の速度は地質（弾性率密度）によつて異なる筈である。例えば今の結果においてはこれをこの附近の地質図（図面省略）と比較することにより週期の長い処は沼地に、短い処は砂地に多いことが分る。この事は別に damping の方からもいえる。従つて振動週期は深さと地質と両方に関係して来るので、今後この方面の研究が必要と思われる。同じ種類の問題が自然地震の場合には、高橋博士<sup>12)</sup>等によつて研究されている。

(b) 次に今迄述べて来た処は、総て上下振動が起るとの仮定の下に出発しているのであるが、実際には水平方向の振動も起る可能性がある。自然地震の場合に地殻表層の個有振動が起るか否か、又起るとして色々な条件等の問題については妹沢博士<sup>13)</sup>等により研究されているが、今の場合には次の様な試みによつてある程度水平方向の振動の有無を確かめることが出来るであろう。それにはもし純粹の上下振動のみであつたなら、ある点における各爆発点からの励起振動の週期は同一になる筈である。処がそこに幾らかずつの差があるということは、水平振動も混つているという一つの理由にはなると思う。但しその量（差）に至つては全体の 1~2割程度でしかない。

(c) 一方これらの振動は殆んど主振動と覚しきものであるが、陪振動は起り得ないものであろうか。筆者は以前に湾内に起る静振の問題を研究したこと<sup>14)</sup>があるが、その際主振動と陪振動の起る条件について湾口の状態が非常に利くことを述べたが、今の場合にも同じ様なことが考えられる。即ち地形の影響から見ても、地表面においては上下動は loop, 地下表層の底面においては node になる可能性は多分に考えられる。水平動においては地表面においても地下表層の底面においても同じ状態が考えられる。従つて後は只入波の波長（又は周波数）次第で、

12) 高橋竜太郎, 平能金太郎: 軟弱地盤に於ける地震動, 218—227. (石本教授記念論文集)

13) 妹沢克惟: Possibility of the Free Oscillation of the Surface-layer excited by the Seismic Waves (震研彙報, 8 [1930] pp. 1—11) 他

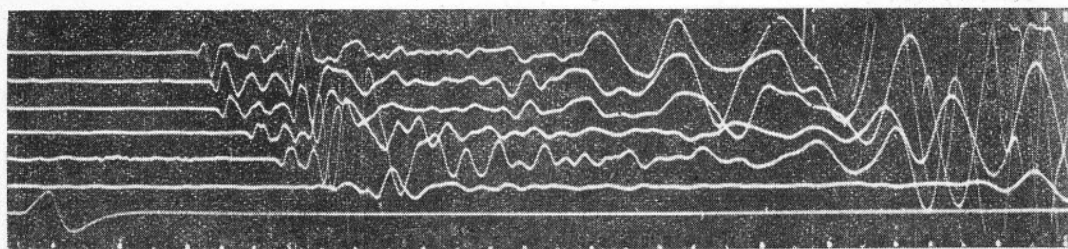
14) 早川正巳: 津浪の研究, 第1報 (海と空, 21巻7号, 昭和16年7月) 他

主振動・陪振動が決められるものの様である。

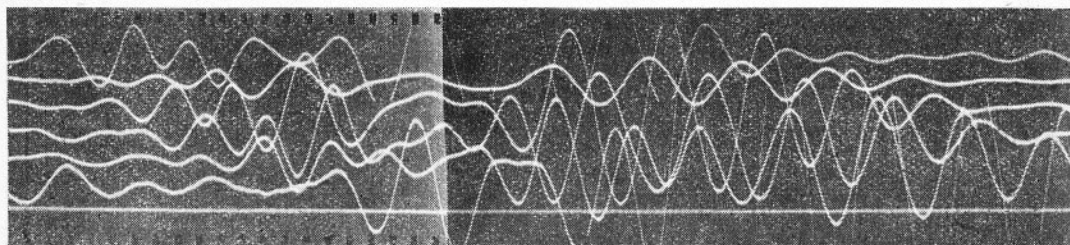
この種の研究は京大の佐々博士<sup>15)</sup>西村博士<sup>16)</sup>等によつても行われそれぞれ面白い結果を得ておられる。その結果は大體、筆者が以上得たものと原理的には同一である。

### 3) 表面波の利用 (表土層の速度決定・表土層の厚さ決定・海底の表面波)

自然の地震の表面波については、妹沢博士を始め多くの学者<sup>17)</sup>により研究されているが、地震探鉱においてはまだ余り利用されていない様である。然し火薬爆発により2次的に生ずる表面波は、10 Cycle程度のものである故、よく記録されている(第33図参照)。この値は器械の綜合個有振動週期に近いが、それではないことが分る。従つて役に立つものならば、これを利



Dynamite charge 8 kgr. Shot. detector distance 440 m, 480. 500. 600. 700. 800.  
Depth of shot 2 m. The shot hole of No. 42 is same to that of No. 21.



Dynamite Charge 7 kgr, Shot. detector distance, 1500 m, 1600. 1620. 1660.  
Depth of shot 2 m. 1720. 1800.

第 33 図

用したい。然し受振点が爆発点に近い場合などには、表面波は却つて邪魔になる。尤も非常に爆発点に近い場所では表面波は発生しないが<sup>18)</sup>。又海底の地震探鉱をやつて気のついたことであるが、海底などでは非常に表面波が現われ難い現象もある様である。これらの問題に就て以下検討して行く。

まず自然界には表面波に類似のものは色々あるが、ここに表面波の利用として扱うのは専ら

15) 佐々憲三：地震探鉱の問題(物理探鉱, 2巻1号, 昭和24年3月, 1—5頁)

16) 西村英一：人工地震波の週期に就て(物理探鉱, 1巻1号, 昭和23年6月, 32頁)

17) 妹沢克惟：(震研彙報), 中野広(中央気象台英文報告)1(1928)255—307, (地物文献抄, 第3巻, 236—289, H. Lamb. (地物文献抄, 第1巻, 115—151), そのた

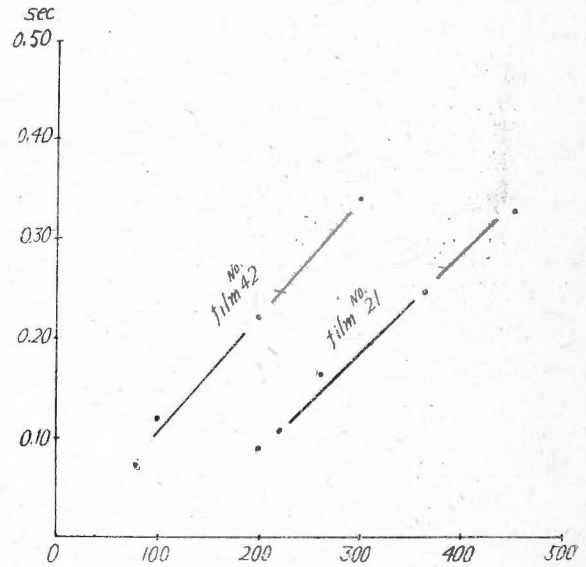
18) (前出), 第20図

Rayleigh wave と Love wave だけである。表面波の性質・発生条件等については上に述べた様に色々研究が行われている。こゝにはまず表面波の速度を利用して表土層の速度を決定すること、続いて表土層の厚さを決定すること、第2層上部の速度決定等について述べる。

第33図に見られる記録を読み取り、走時曲線に盛り込むと第34図のようになる。この走時曲線から読取れる表面波の速度及び週期はそれぞれ  $V_{R_0}=850-1000$  m/sec.  $T_{R_0}=10$  sec. となるが、第33図に現われている記録が果して Rayleigh-wave なりや Love wave なりやにより、これから表土層の速度を決定する場

合の利用のされ方が違つて来る。

使用している地震計が上下動であるから、一寸考えれば Rayleigh wave のみであるかの如き感じを興えるが、水平動を興えることによつても地震計の上下動が誘起されることはあり得る<sup>19)</sup>し、又表土層が薄く且つ表土層と第2層とに可成りの速度差のあること、表面波 (Love wave) の周期と地震計の周期の近いことなどは多分に Love wave も記録される可能性のあることを物語っている。且つ地震計が完全に水平に置かれてなければ、なお更のことである。



第 34 図

そこで仮りに両方共起つているものと考え、一つづつについて考えてみることにした。まず Rayleigh-wave として前に S 波の発生の際で得た S 波の速度を用いて仮りに  $\lambda=\mu$  として表面波の速度  $V_R$  を出すと、 $V_R=0.9194 V_s=0.7\sim 0.8$  km/sec. となる。これは先程得た  $V_R$  にも近く、又補助爆発を用いて走時曲線から出した表土層の速度  $V_{R_1}=0.7\sim 0.9$  km/sec. とも近い値を示している。

一方、Love wave と考えれば、どういうことになるであろうか。理論の教える処に従えば、この場合は所謂分散 (dispersion) の現象を示す。即ち Love wave の速度  $V_Q$  は

$$V_Q = V_s \sqrt{1 + \frac{s^2}{f^2}} = V_s \sqrt{1 + \frac{s^2 L^2}{4\pi^2}}, \quad sT; \quad 0 \rightarrow \frac{\pi}{2}, \quad f \rightarrow \text{増加} \rightarrow \infty$$

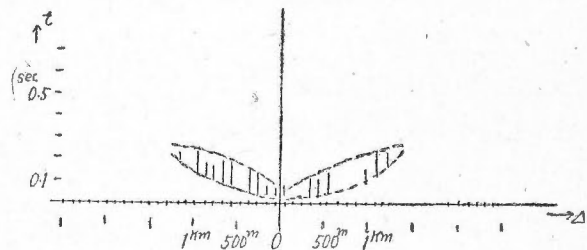
$$fT; \quad 0 \rightarrow \infty, \quad s/f \rightarrow \text{減少} \rightarrow 0, \quad V_Q \rightarrow V_s$$

波長が極めて短くなつた極限において、Love wave の速度は表層の S-wave の速度に等しく

19) 松沢武雄, 佐藤光之助, 福永三郎: 地震計の運動 (地震 10 卷, 1938, 157—165)

なる。又  $\frac{f \rightarrow 0, s^2}{s \rightarrow 0, f^2} \rightarrow \left( \frac{Vs'^2}{Vs^2} - 1 \right) \rightarrow VQ \rightarrow Vs'$ , 即ち波長が極めて長くなると, Love wave の速度は下層の S-wave の速度に等しくなる。なお Love wave の発生には  $Vs < Vs'$  で且つ, 表層の厚さに対し波長の小なることが必要条件となつている。従つて条件が揃わなければ Love wave は発生しない訳である。この様な目で記録を見ると, 非常に速い phase も見え (これは遠くに行くと消える……週期 15 sec 位), あるいは Love wave とも考えられるが, Rayleigh wave の後に出ていることを考えると, 一寸おかしい。又週期を大体  $1/15$  sec 位とすれば,  $\lambda = vT$ , 仮りに  $v = 0.8$  km/sec として  $\lambda = 50$  m, 従つて表土層の厚さがこれ以上の所でなければ, Love wave は出ない筈である。この附近での表土層の厚さが未だはつきりしないので, 確かなことはいえないが, 必ずしも Love wave が出ないということはいえない。結論としてなお今後の表面波の研究の必要性が痛感される。

次には海底を傳わる表面波について一言する。西戸崎又は大牟田沖の海底に置かれた地震計で記録された結果を比較して見ると, 爆発点から受振点が遠ざかるに従い表面波の振幅が急激に減少していることに気がつく。この有様を第 35 図に示した。陸上においてはこの様なことは起ら



第 35 図

なかつた。これは如何なる理由に基くものであろうか。この原因としては次の様な事柄が考えられる。即ち,

- 1° 一應表面波は発生するには発生するのであろうが, 発生後は傳播の途中で海水の圧の下にある故に, 吸収又は damp する。
- 2° 海水の深さ D に相当する地下にある故に, 表面波として発達しない。
- 3° これは普通の表面波ではなく, 境界面に起る特殊の波——それは海水同志の不連続面に起る中間波と弾性体同志の不連続面に起る stoneley wave との間の性質を持つ様な波——ではなからうか。

現在の処まだこの何れであるかを明かにし得ない。

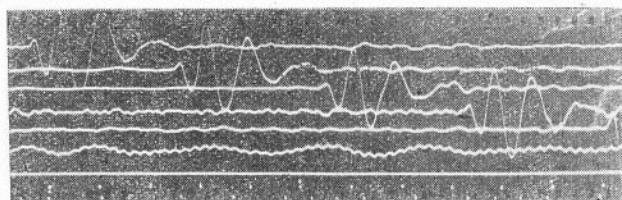
#### 4) 音波の利用 (音波の振幅比較による初動の振幅比較)

地震波が地下の構造を教えて呉れるのと同様, 音波は昇り得ない上空の状態を明かにして呉れる。即ち地震波の経路と音波の経路とは地表面に対して対称の関係にある。但し音波の経路の彎曲度は地震波の場合のそれに比べて非常に小である。従つて地震探鉱の如き, 仮りに測線延長 4~8 km 位の場合には, 音波の経路を直線と見做しても差支えないことになる。この様な場合に若し地震探鉱の記録に音波が明瞭に記録されるものならば, 音波の利用も考えられ好都

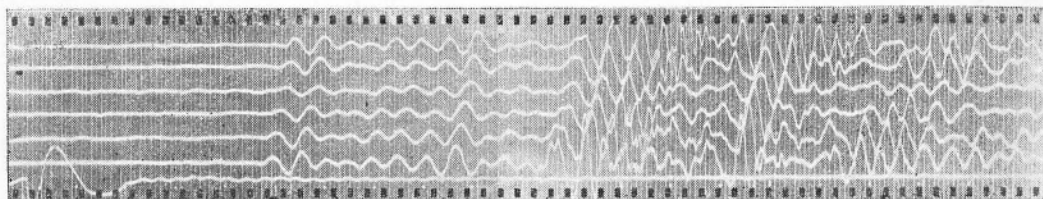


合である。

現に平地において得られた音波(及び水中音波)の記録を第36図に示す。これを見ると可成り明瞭に記録されることが分る。なおこの記録が音波であることは、爆発点からの時間により確かめることが出来る。又音波の初動の向きが地震波のそれと逆であること(この記録に見られる程度の周波数ならばIIにも示した様に二つの向きは逆になる筈)でも分る。距離による音波



空中の音波 A record of sound waves (medium=air)



水中音波 A record of sound waves (medium=sea water)

第 36 図

の周波数の変化は第38図に示すが、大した変化ではない。然し後に述べる様に振幅を出す場合にはこれによる影響はIIの結果を利用して補正した。

以下に音波の利用方法について研究を進める。筆者は音波の利用として二つの方法を挙げる。その一つは既に利用されているが、音波による爆発点——受振点間の距離決定であり、他は筆者の考案になる音波の振幅比較による地震波初動の振幅比較の問題である。本研究においては始めの問題には余り深く触れず、専ら後者について研究結果を詳述する。

爆破点——受振間の距離決定について。

この場合音波は陸上においては大した利用価値はないが<sup>2)</sup>、海底震探の場合等には非常に有益である。例えば関門の海底地盤調査<sup>20)</sup>とか、目的は異なるが水深を測る目的で水路部<sup>21)</sup>等では既に echosounding 等を採用している。

さて、ここで問題となるのはたゞ音源(爆発点)附近で著しく速い傳播速度の存在することであろう。これは音源が爆薬でない場合は勿論問題はない訳であるが、陸上の場合の超音速については例えば Angerer と Ladenburg の測定<sup>22)</sup>があり、同種の実験は H. Robinson W. C.

20) 那須信治: 地震波(地下質源探査), 誠文堂, 新光社 267—272

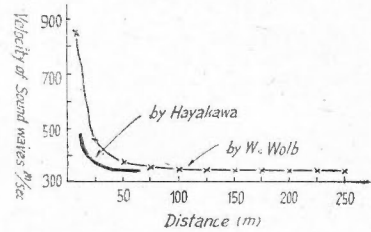
21) 昭和21年南海大地震調査報告 海底地形篇(水路要報, 増刊号, 昭23.10.31)等

22) E. v. Angerer, R. Ladenburg: Ann. d. Phys., 66, 293, 298 (1921, 2)

F. Shepherd<sup>23)</sup>, F. Ritter<sup>24)</sup> 等により行われている。超音速で進む距離は音源の強さにより異なり、

1 kg. (爆薬)—3 m, 3 kg.—30 m, 200 kg.—200 m.> となつている。W. Wolf<sup>25)</sup> は超音速より普通の音速への移りの実験を行つている。その一例を第 37 図に示す。なお海底の爆発についても同様なことのあるのは、筆者も指摘した処である。

実際、地震探鉱に利用する場合は、記録より逆に超音速で進む距離及び超音速より普通の音速の移り(変化)を測定すればよい。筆者の行つた研究の一例を第 37 図に一緒に書き入れた(陸上、火薬 20~30 kgr)。



第 37 図

なお爆発点附近においては地震波と音波が重なり判別し難いので、なるべく地震波を記録せず、音波を書かせる様な装置の考案が望ましい。又水中音波の速度は 1.4~1.5 km/sec. であるから、地面の表土層の速度がこれより遅い場合は、所謂低速度層の問題となる。又同じかあるいは少し位早い時は、周期で見分けるより他、方法がない。

#### 音波の振幅比較による地震波初動の振幅比較について

従来、地震探鉱においては(地震波初動の)到着時刻を問題にし、振幅の方は余り考えられなかつた。尤も京大の佐々博士<sup>26)</sup>等の如く、各受振点での振幅比を抜つておられる研究もあるが、電気地震計では一般に常数を常に揃えておくことが難しく、従つて問題が複雑である。

電気地震計においては受振器・増幅器・oscillograph の三段階(場合によつては A.V.C. Compander 等の操作も)を経る爲、又 circuits の接触・電源の僅かな drop による波形の歪み等もあり、器械地震計の如き簡単な倍率曲線のみでは処理出来ないのでは無いかと思う。この目的の爲には II で述べた総合実験結果と比較して決めるのも一つの方法であるが、それだけではなお上述の心配事も完全に除き去る訳には行かず、今これから述べようとする音波の振幅と比較する方法をも併用す可きであらう。

非常に理想的な機巧を考えれば、爆発点より球面音波(現在の場合は半球面)が出る時は幾何学的に面積が広がるから、単位面積に対する energy は距離の自乗に逆比例して減少するものと考えられる(第 38 図)。然し気象条件により理想的に上の様に行かない場合のあることは正野博士<sup>27)</sup>の気象音響学に述べられてある通りで、例えば粘性摩擦の研究 [Stokes=理論 = x 方向への一次傳播 = 振幅は波長が長い程減少率が小さい  $a = 8860 \lambda^2 \left( \begin{matrix} 1 \text{ cm の波は } 88 \text{ m に} \\ 10 \text{ // } 8800 \text{ //} \end{matrix} \right)$

23) H. Robinson, W.C.F. Shepherd: Safety of Mines Research Board, Papers. Nos. 18, 19(1926)

24) F. Ritter: Beitr. z. Phys. d. fr. Atoms., 12, 1 (1926)

25) W. Wolf: Ann. d. Phys., 69, 329 (1899)

26) 佐々憲三: 前出 15)

27) 正野重方: 気象音響学(岩波講座, 物理学)

おいて振幅が  $1/e$  に減少) 〕 輻射の研究 (Stokes = 傳播速度は影響を受けない), 熱傳導及び粘性摩擦に関する Kirchhoff の研究, E. Schrödinger の研究 (高く = 上空 = になる程, 粘性及び傳導の影響が地上より大きく利く) [以上はすべて振幅小としての議論], 一樣でない大気中における音波傳播の理論 (Fermat 式考え方 = 円形軌道, 外聽域の問題, 成層大気の問題 = 異常傳播), 風のある大気中の傳播 (成層大気 Emden の模型), 近距離異常傳播等考慮す可き幾多の問題がある。又海底の場合にも種々の問題があることは明かなところである。

然し乍ら風のない日に而も近距離での相対的な比較を問題とする現在の場合には, 心配ごとは非常に減少する。今から実例について述べる。

陸上の音波の記録を見ると初動 (屈折波) と音の波の初動とは向きが逆になつてゐることが分る。地震波と音波相互の波長による向きの影響は今の場合問題にならぬことは II

の結果により明かである。これによつて音波が一旦地面を叩き, それにより振動の誘起されたことが分る。

音波が爆発点と受振点との間の障碍物で遮られる様な場合には, 綜合實驗結果を利用するより他に方法がない。

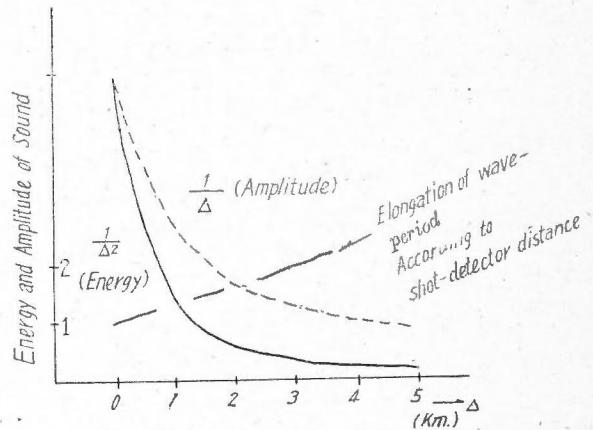
次は周期と振幅の問題で, 爆発点からの距離が遠ざかるに従い, 周期が幾分延びることが分るが (第 38 図参照), II で出した結果を利用して補正を加えた。これを考慮に入れて音波振幅の距離による減少の関係を調べなければならない。

記録された音波振幅を第 38 図と比較することにより, 測定瞬間の器械の各 element の綜合倍率を知ることが出来る。従つてこれを用いて地震波 (初動) 記録から初動の各振幅を推算することが出来る (初動の場合も II の結果により周期 - 振幅調整を爲すことは勿論である)。この様にして得た一つの結果を第 39 図に示す。

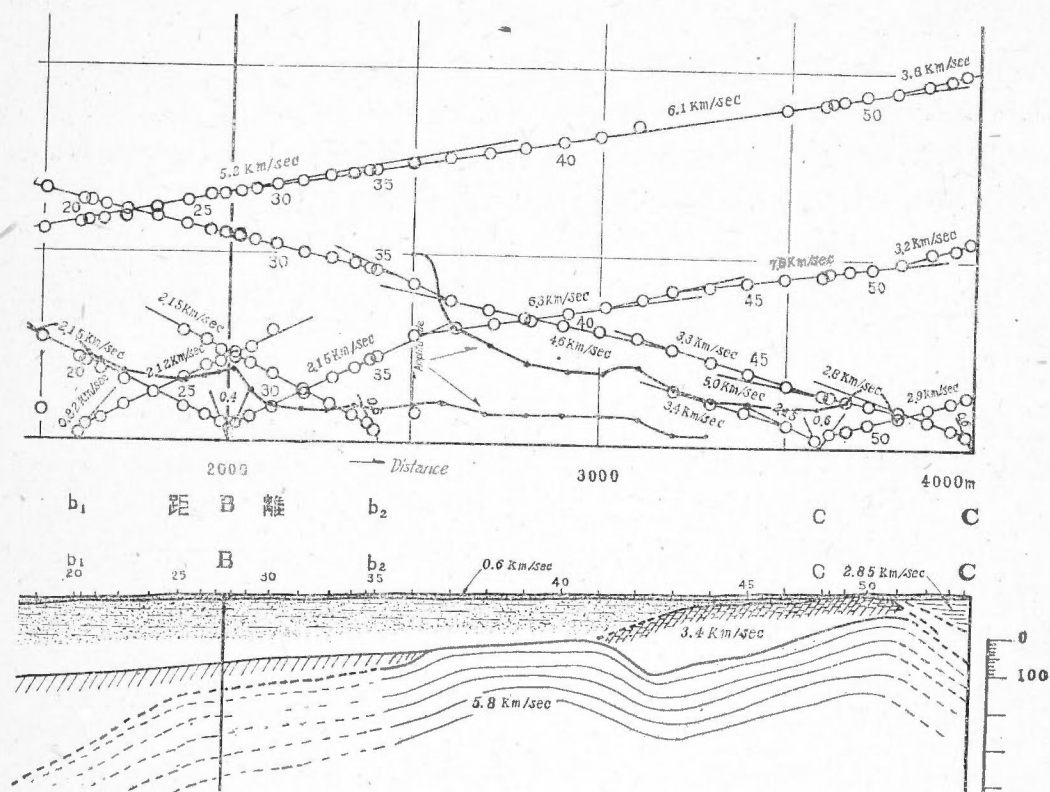
この結果を見て気のつくことを列記すると, 次の様になる。

- 1° 距離による連続的な振幅の減少が見られる。
- 2° 場処により振幅の減少率が異なる。
- 3° 処々に不連続的な振幅の減少が見られる。
- 4° 3° の場処では何れも振幅が大となつてゐる等。

走時曲線の解析結果を吟味した処, これらの解釈として次の様な理由が考えられるに至つ



第 33 図



第 39 図

た。即ち振幅変化の主要素として、

- 1°) 同一媒質内における距離による地震波 energy の減少 (吸収)。
- 2°) 局所的な吸収率の違い。
- 3°) 地震波の経過する各層の吸収度による減少率の違い。
- 4°) 両層から地震波の来る処では波が重複し、そこでは振幅が大となる。等が挙げられる。

以上の中、1°) は自然の地震においても距離の逆自乗比等の減少率で振幅の減少することなど論ぜられているが、今の場合もそれに対応するものと考えられる。2°) は場所によりその場所を構成する物質の吸収率の異なることなどから生ずるのであろう。次に3°) は、例えば第39図においての差は、第2層・第3層の構成物質の吸収度の差及び第2層を経過する部分の吸収に原因する。これは走時曲線の折れ目で振幅が不連続的に減少することでも明かである。又断層の場合にも同様の意味の差を生ずることは明かであろう。

従つて種々の場処において、各地下層構成物質の地震波吸収度を調査しておくことにより、地下構造を今迄の初動の走時曲線のみ (つまり速度のみ) から知れるものより遙かに詳細に知

ることが出来るのであろう。

最後に4)の事柄は走時曲線の折れ目の処と振幅の大きい処と一致することで分るが、たゞ兩種の地震波の振幅の和のみでなく、第1の波に第2の波が来て excite して振幅が大きくなることは考えられる処である。なお使用している地震計は上下動であるが、入射角によつても(換言すれば水平動のはいる割合によつても)振幅も変化する訳であるが、これは解析結果図を参照すれば分る。只注意すべきは、地震計の置き方である。

なお断層のある場合についても振幅の変化することが同様の方法により分つた(ここには省略する)。

### 5) 相を明瞭にさせる条件

地震探鉱の記録において初動のみならず、反射波その他色々の波の相を明瞭にさせることは、最も重要問題である。A. V. C. 又は compander 等の目的とする処も実はこの点にある。然し乍らこれらは結局目的とする相の処で、振幅を大にさせるのであつて、前の波が消えた訳ではない。従つて各相の初動を必ずしも非常に明瞭に見極めるといふ訳には行かない。各相の初動を明瞭にさせる爲には、どうしても前の波を早く damp させることが必要である。この目的には二つの方法が考えられる。その一つは土地の条件によるものであり、他は器械の条件によるものである。これらについて述べる。

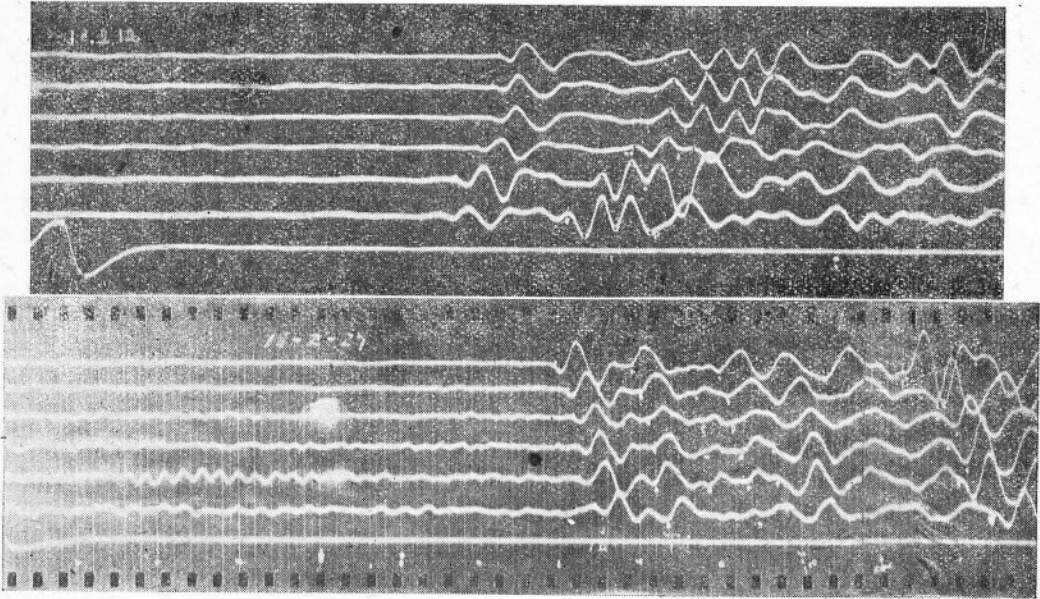
#### 土地の条件について

種々の場処における記録を見るのに、ある場処では持続振動が続き、又ある場処では減衰が速い。今仮りに瀉西油田又は庄内油田あたりの記録と樺太小沼における場合とを比較して見ると、樺太の場合には非常に減衰が速い。このことは共振現象を利用して表土層の厚さを調べるといふ様な場合には宜しくないけれども、次々に起る各種振動の初動を見る時には非常にうまい。又記録は見易く綺麗である。一つの例を第40図に示す。この理由を考えて見る。

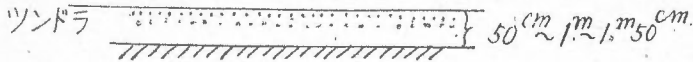
器械の性質もさること乍ら、樺太の場合には表土に数10 cm乃至1 m程度のツンドラがあることが主な原因であろう。即ち一旦表土層で励起された共鳴振動(表土層の個有振動)も、ツンドラの部分にはいつて吸収され、(第41図参照)上記の如き記録を得るものと思われる。但しこの場合大切な注意を要することは持続振動は除ける代りに、初動の鋭敏の度は可成り減少する。弾性波の吸収に関しては宇部の山本教授の研究<sup>28)</sup>があり、実験室においてもこの事柄は確められている。九州の西戸崎又は大牟田沖において得られた記録にもこれと類似の点がある。西戸崎・大牟田の場合には勿論海底という条件(海水が damp の役をつとめる。海底では記録が大きくなる。)がある訳であるが、海底下の表土層を蔽う水を含んだ砂乃至は泥土が重要な役割を果していることは拒めない。

#### 器械的な条件について

28) 山本武夫: 弾性波の吸収に関する実験(海と空, 第20巻, 12号, 317—320, 1940)



第 40 図



第 41 図

これはIIに述べた総合 damping によるもので、一應 critical damping にはなつていないもの、外部からはいる振動の周期により、減衰率が異なることを考慮すれば、器械的な条件も亦大切なことが分る。critical damping になつていても、器械の総合個有週期に近ければ、共鳴振動を起すことも考えられる。

### 6) 結 語

II 及び III において得た器械の性質・爆発の条件等を参考にして、本篇においては地震探鉱により得られた記録の地球物理学的解釈への拡張を試みた。

即ち波形（振幅・週期）は勿論のこと、表面波の問題等も取りあげて吟味・検討してみた。その結果種々面白い問題が出て来た。そして自然地震において研究されていると同じ様な研究方針を以て、今後地震探鉱を進めて行けば、今迄の様に單に初動の到着時刻を使った走時曲線の解析のみでなく、この速度の他に更に別の地球物理学的要素で地殻上層の地下構造も吟味出来るのではないかということが判つて来た。

併し現在においては未だ精度の点その他において、従来の走時曲線解析を第一にし、それをやり乍ら、この種の研究を促進すべきものと思われる。

## V 反射波について

### 1) 目的

地質探鉱法において得られる記録中に見られる反射波を厳密に調べる際には、反射波の初動の位置・振幅・位相などが問題となる。まず位置を調べておかすに徒らに反射波を記録しようとしても、地質的條件では反射波の出るべき場処でも、もし地震計設置の位置が初めから反射波の出ない場処であれば、徒勞に帰することになる。この様な意味で種々の條件における反射波の計算を遂行した。

最後に表土に速い速度層があつて、その下に低速度層の来る場合の問題について検討を加えた。

### 2) 反射波 (I) 理論

弾性波の反射・屈折に関する理論的研究は、C. G. Knott<sup>29)</sup> を以て嚆矢とする。その後、E. Wiechert<sup>30)</sup>、K. Zöppritz<sup>31)</sup> を始め、妹沢・松沢・河角・西村・金井<sup>32)</sup> 等の諸氏により、種々の場合における計算が遂行されているが、基礎理論は同じである。地震探鉱においては、境界面の両側の媒質の速度比・密度比・入射角を種々変えて見て、それらに対応する屈折波・反射波の振幅・位相等を知る必要があり、その目的に添う様に根本式の置換えを行つて計算して見た。簡單の爲に Poisson 比を  $1/4$  とした。

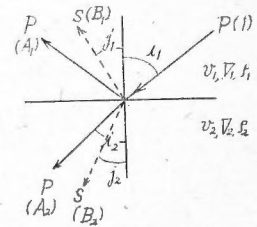
媒体が弾性体と弾性体、次に空気と弾性体、最後に海水と弾性体との場合について行い、そのそれぞれについて P 波で入射した場合（現在の地震探鉱では SV, SH 波で入射した場合は直ぐには大して必要もないので）を取扱つたのである。今回の研究も一部は前記諸氏の研究と重なる処もあるが、海水弾性体の場合などでは未だ具体的な演算はやづていない様である。

#### a) 媒体が弾性体なる場合

最短時間到達の法則に従えば、必然的に次の幾何学的な関係が出る(第 42 図参照)。

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad \frac{\sin i_1}{\sin j_1} = \frac{v_1}{V_1} = \sqrt{3}, \quad \frac{\sin i_1}{\sin j_2} = \frac{v_1}{V_2}$$

境界面において変位及び stress の合成値がそれぞれ等しいという



第 42 図

29) C. G. Knott: "Reflection and Refraction of Elastic Waves, with Seismological Application" Phil. Mag. 48 (1899) pp. 61—97.

30) E. Wiechert: Über Erdbebenwellen I// Gött. Nachr. (1907) s. 415—529.

31) K. Zöppritz: Über Erdbebenwellen VII B// Gött. Nachr. (1919) s. 57—84.

32) 松沢武雄: 平面波の表面反射の一例 (地震 4 (1932), 125—139 頁)

33) 河角広・鈴木武雄: 地殻表層における地震波の反射及び屈折 (地震 4 (1932), : 27—307 頁)

条件を弾性体の基礎方程式に入れることにより、一般に知られている次式を出すことが出来る。

$$\begin{cases} \sin i_1 + A_1 \sin i_1 + B_1 \cos j_1 - A_2 \sin i_2 + B_2 \cos j_2 = 0. \\ \cos i_1 - A_1 \cos i_1 + B_1 \sin j_1 - A_2 \cos i_2 - B_2 \sin j_2 = 0. \\ -\sin 2i_1 + A_1 \sin 2i_1 + B_1 \frac{V_1}{V_1} \cos 2j_1 + A_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \frac{V_1}{V_2} \sin 2i_2 - B_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \frac{V_1}{V_2} \cos 2j_2 = 0. \\ -\cos 2j_1 - A_1 \cos 2j_1 + B_1 \frac{V_1}{V_1} \sin 2j_1 + A_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{V_2}{V_1} \cos 2j_2 + B_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{V_2}{V_1} \sin 2j_2 = 0. \end{cases}$$

以上を変換することにより容易に次式を得る。

$$\begin{cases} 1 + A_1 + \frac{1}{\beta} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}} B_1 - \frac{1}{a} A_2 + \frac{1}{\beta} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3a^2}} B_2 = 0. & \text{但し } \gamma \text{ に} \\ 1 - A_1 + \frac{\beta}{\sqrt{3} r} B_1 - \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}} A_2 - \frac{\beta}{\sqrt{3} a r} B_2 = 0. & \frac{v_1}{v_2} = a, \sin i_1 = \beta. \\ -1 + A_1 + \frac{\sqrt{3} (1 - \frac{2}{3} \beta^2)}{2\beta r} B_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a^2} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}} A_2 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a} \frac{1 - \frac{2}{3} \beta^2}{2\beta r} B_2 = 0. & \sqrt{1 - \beta^2} = \cos i_1 = r. \\ -1 - A_1 + \frac{2}{3} \beta \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}}}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} B_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a} \frac{1 - \frac{2}{3} \beta^2}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} A_2 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{2}{3a^2} \frac{\beta \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3a^2}}}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} B_2 = 0. \end{cases}$$

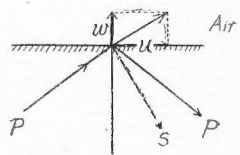
上式を組合せることにより次式の如くなる。

$$\begin{cases} \left( \frac{1}{\beta} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}} + \frac{2}{3} \beta \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}}}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} \right) B_1 + \left( -\frac{1}{a} + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a} \frac{1 - \frac{2}{3} \beta^2}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} \right) A_2 \\ + \left( \frac{1}{\beta} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3a^2}} + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{2}{3a^2} \beta \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3a^2}}}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} \right) B_2 = 0. \\ \left( \frac{\beta}{\sqrt{3} r} + \frac{\sqrt{3} (1 - \frac{2}{3} \beta^2)}{2\beta r} \right) B_1 + \left( -\frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}}}{r} + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a^2} \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}}}{r} \right) A_2 \\ + \left( -\frac{\beta}{\sqrt{3} a r} - \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a} \frac{1 - \frac{2}{3} \beta^2}{2\beta r} \right) B_2 = 0. \\ \left( \frac{1}{\beta} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}} + \frac{\beta}{\sqrt{3} r} \right) B_1 + \left( -\frac{1}{a} - \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}}}{r} \right) A_2 + \left( \frac{1}{\beta} \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3a^2}} - \frac{\beta}{\sqrt{3} a r} \right) B_2 = -2; \end{cases}$$

と置けば上式は  $\begin{cases} a_1x + a_2y + a_3z = a_1 \\ b_1x + b_2y + b_3z = b_1 \\ c_1x + c_2y + c_3z = c_1 \end{cases}$  なる形の方程式となり x, y, z を求めればよいことになる。

b) 媒体が空気弾性体なる場合

この場合は  $z=0$  において(第43図参照)歪力の合成値が0となり、



第43図



$$\begin{cases} \sin 2i_1 - A_1 \sin 2i_1 - B_1 \frac{v_1}{V_1} \cos 2j_1 = 0. \\ \cos 2j_1 + A_1 \cos 2j_1 - B_1 \frac{v_1}{V_1} \sin 2j_1 = 0. \end{cases} \quad \text{あるいは} \begin{cases} -1 + A_1 + \sqrt{\frac{x}{\beta}} \frac{\cos 2j_1}{\sin 2i_1} B_1 = 0. \\ -1 - A_1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{x}{\beta}}} \frac{\sin 2j_1}{\cos 2i_1} B_1 = 0. \end{cases} \quad (x < 2)$$

更に

$$\begin{cases} -1 + A_1 + \frac{\sqrt{\frac{x}{\beta}} (1 - \frac{2}{x} \beta^2)}{2\beta\gamma} B_1 = 0. \\ -1 - A_1 + \frac{2}{x} \beta \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{x}}}{1 - \frac{2}{x} \beta^2} B_1 = 0. \end{cases} \quad B_1 \text{ の係数を夫々 } (\tau)'', (\varepsilon)'' \text{ と置き,}$$

$$\{(\tau)'' + (\varepsilon)''\} B_1 = 2.$$

$$B_1 = \frac{2}{(\tau)'' + (\varepsilon)''}, \quad \begin{cases} A_1 = 1 - (\tau)'' B_1 \\ A_1 = (\varepsilon)'' B_1 - 1 \end{cases}$$

$$\text{故に} \begin{cases} W = \gamma - A_1 \gamma + \frac{\beta}{\sqrt{\frac{x}{\beta}}} B_1. \\ u = \beta + A_1 \beta + \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{x}} B_1. \end{cases}$$

c) 媒体が海水弾性体なる場合

この場合は  $V_2 = 0$ . (第 44 図参照)

$$\begin{cases} 1 - A_1 + B_1 \frac{\sin j_1}{\cos i_1} - A_2 \frac{\cos i_2}{\cos i_1} = 0. \\ -1 + A_1 + B_1 \frac{v_1}{V_1} \frac{\cos 2j_1}{\sin 2i_1} = 0. \\ -1 - A_1 + B_1 \frac{V_1 \sin 2j_1}{v_1 \cos 2i_1} + A_2 \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} \frac{1}{\cos 2j_1} = 0. \end{cases}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = a, \quad \sin i_1 = \beta.$$

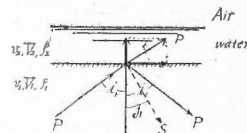
$$\sqrt{1 - \beta^2} = \cos i_1 = r, \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{3}$$

と置くことにより

$$1 - A_1 + \frac{\beta}{\sqrt{3} \gamma} B_1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}}}{r} A_2 = 0.$$

$$-1 + A_1 + \frac{\sqrt{3} (1 - \frac{2}{3} \beta^2)}{2\beta\gamma} B_1 = 0.$$

$$-1 - A_1 + \frac{2}{3} \beta \frac{\sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}}}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} B_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{a} \frac{1}{1 - \frac{2}{3} \beta^2} A_2 = 0. \quad \text{これを解き,}$$



第 44 図

$$B_1 = \frac{2 \times (\text{ホ})}{(\text{ル}') \{(\text{ニ}) + (\text{ト})\} + (\text{ホ}) \{(\text{ト}) + (\text{エ})\}}, \quad \begin{cases} A_1 = 1 - (\text{ト}) B_1 \text{ 又は} \\ A_1 = 1 + (\text{ニ}) B_1 - (\text{ホ}) A_2. \end{cases}$$

$$A_2 = \frac{2 \{(\text{ニ}) + (\text{ト})\}}{(\text{ル}') \{(\text{ニ}) + (\text{ト})\} + (\text{ホ}) \{(\text{ト}) + (\text{エ})\}}$$

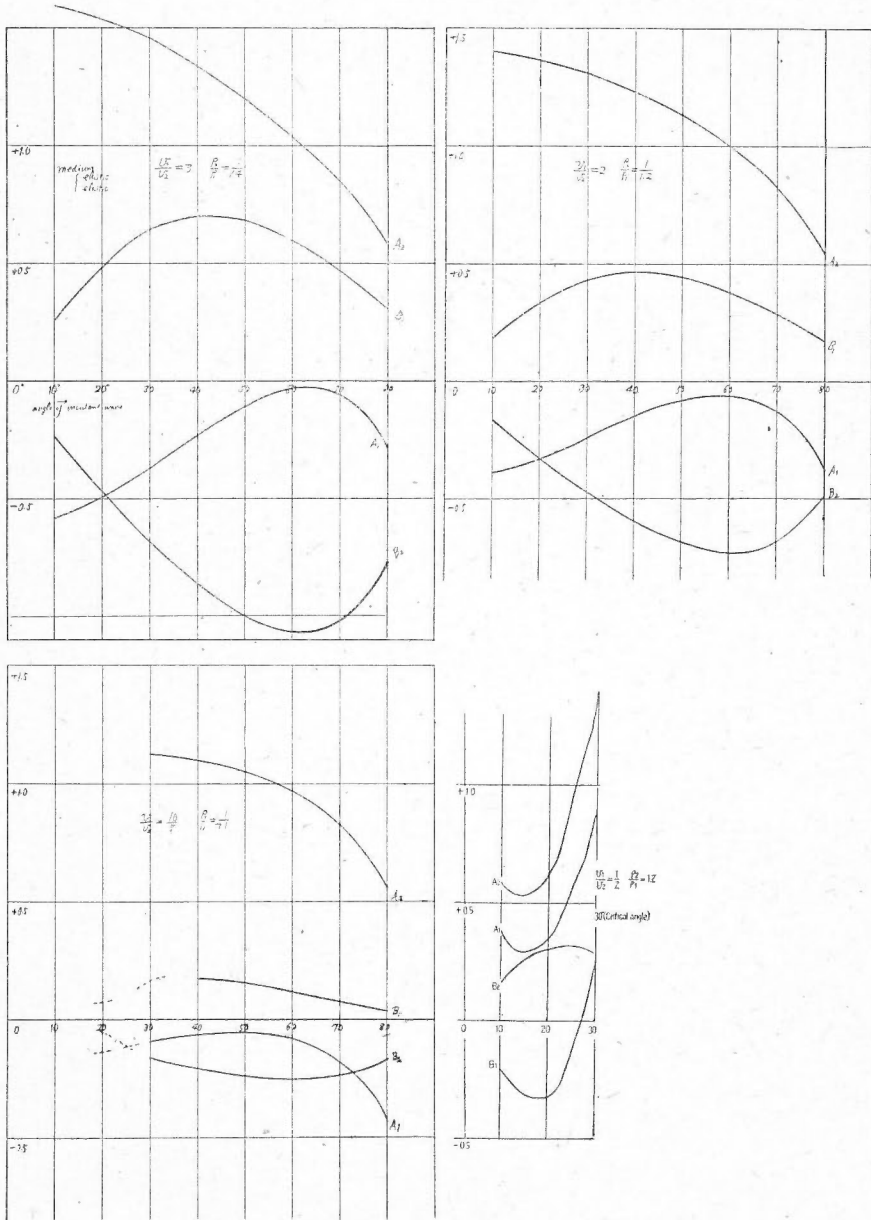
さて海底地震計の上下動は

$$\begin{cases} W = \cos i_1 - A_1 \cos i_1 + B_1 \sin j_1 + A_2 \cos i_2 \text{ 又は} \\ = \gamma - A_1 \gamma + \frac{\beta}{\sqrt{3}} B_1 + \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{a^2}} A_2 \end{cases}$$

水平動の方は

$$\begin{cases} U = \sin i_1 + A_1 \sin i_1 + B_1 \cos j_1 + A_2 \sin i_2 & \text{又は} \\ = \beta + A_1 \beta + \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{3}} B_1 + \frac{\beta}{\alpha} A_2 \end{cases}$$

これに上述の各結果を入れればよいのである。



第 45 図

## 3) 反射波 (II) 計算結果

2) の理論結果に考え得可き具体的な数値を入れて計算した結果をこゝに示す。まず

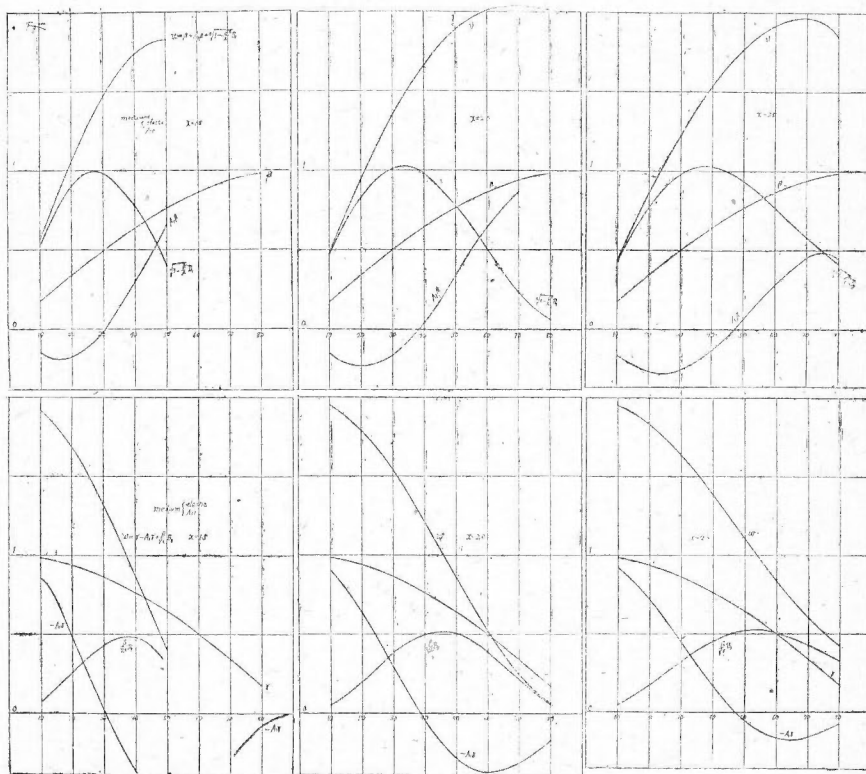
a) においては

$$\frac{v_1}{v_2} = 3, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1.4, \quad \frac{v_1}{v_2} = 2, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1.2; \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{10}{8}, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = 0.9091 \equiv \frac{1}{1.1};$$

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{1}{2}, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1.2 \quad \text{の各場合について得た結果を第 45 図に示した。}$$

b) においては

$x=1.5, 2.0, 2.5$  のそれぞれの場合における  $U, W$  の結果を第 46 図に示した。

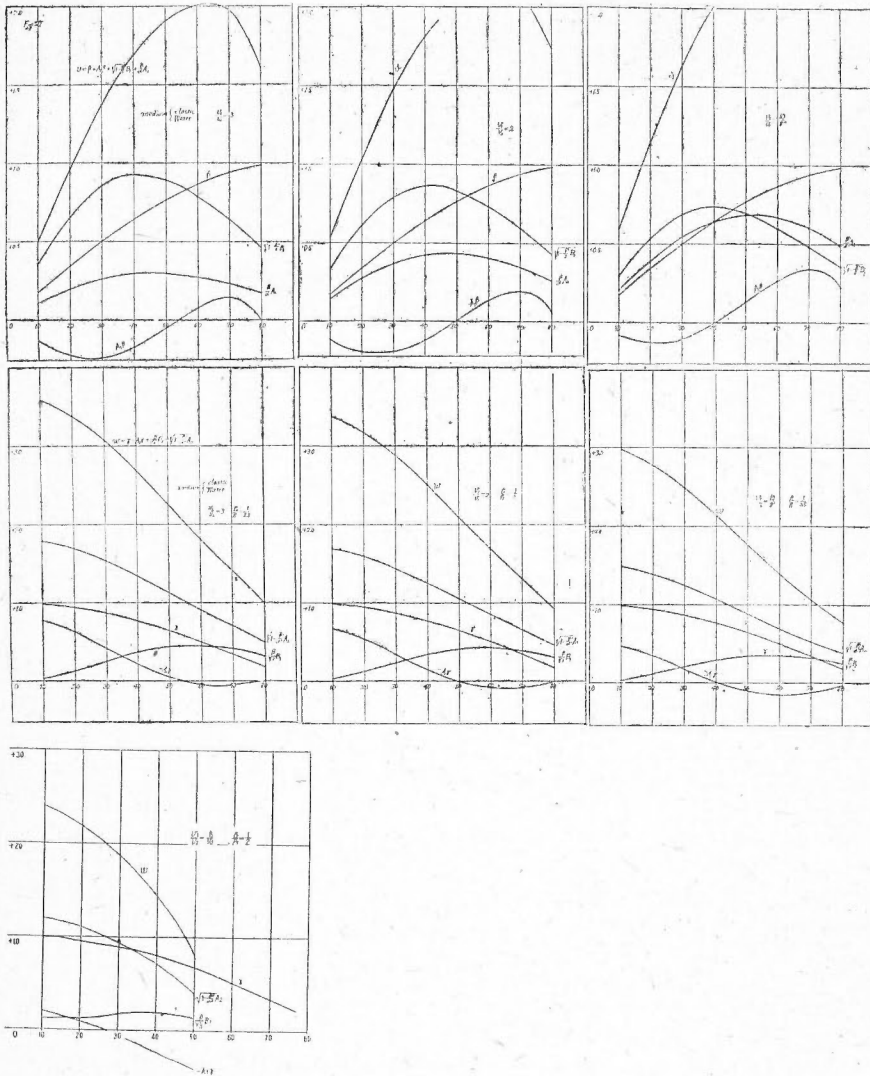


第 46 図

c) においては  $\rho_2=1.03$  として,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_1}{v_2} = 3. \\ \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{3.5} \end{array} \right\}; \quad \left\{ \begin{array}{l} 2. \\ \frac{1}{8} \end{array} \right\}; \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{10}{8.} \\ \frac{1}{2.5} \end{array} \right\}; \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{8}{10.} \\ \frac{1}{2} \end{array} \right\};$$

の各場合について得た  $U, W$  の結果を第 47 図に示した。



第 47 図

4) 反射波 (III) 以上の解釋及び反射波記録の器械的條件

3) において得た第 45, 46 及び 47 図により種々の條件における反射の状態を窺い知ることが出来る。ここにそれらの結果を纏めて列記すれば次の如くなる。

i) まず速度比乃至は密度比が大なる程、反射波の振幅が大きくなる。これは定性的にはある程度常識を以て想像することが出来る。

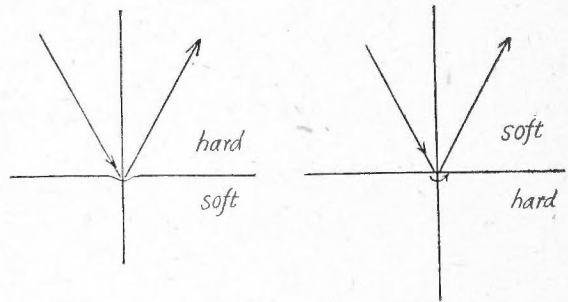
ii) 次に弾性体と弾性体の場合にはある入射角に対しては反射波の振幅が極端に小さくなる処が出て来る。

iii) 空気と弾性体及び海水と弾性体の場合には、 $w$ については爆発点から遠ざかるに従い、振幅が減するが、 $u$ については爆発点からある距離迄は次第に振幅を増すが、ある距離を過ぎると、又振幅が減する。

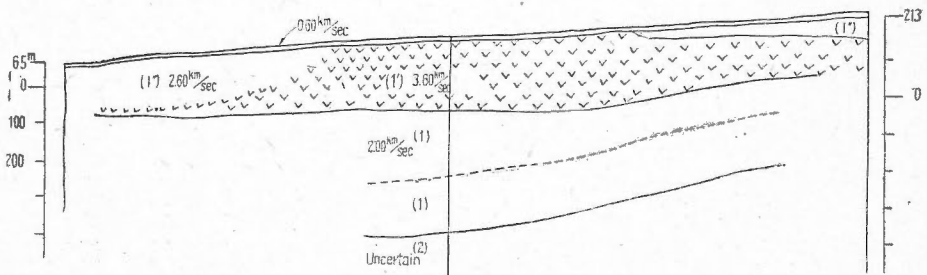
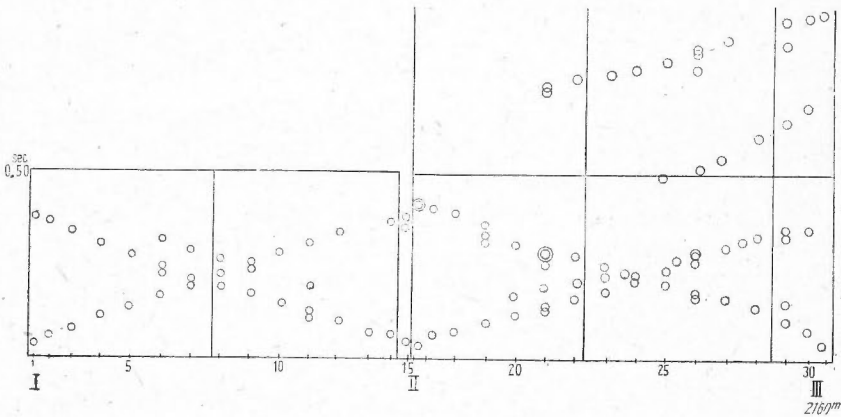
iv) 海底の場合は陸上の場合に比べて反射波の振幅が大きく現われる可能性がある。

v) 更に反射波初動の向きについてであるが、これには2通りの結果が出ている。即ち、まず硬い媒質中を通過して来た波が、軟い媒質に突き当たった場合は入射波と反射波の向きが逆になつている。これに反して軟い方から波が来て硬い方に突き当たった場合は、入射波と反射波の向きは同じになつている。

この現象に対しては割合妥当な解釈が下せる様である。即ち前者の場合においては反射波が発生するのは入射波が境界面に突き当たりそこで始めて反射波が発生するので、入射波と反射波の向きが反対になるのは理窟の上からも当然と考えられる(第48図)。次に反射の場合、即ち軟い

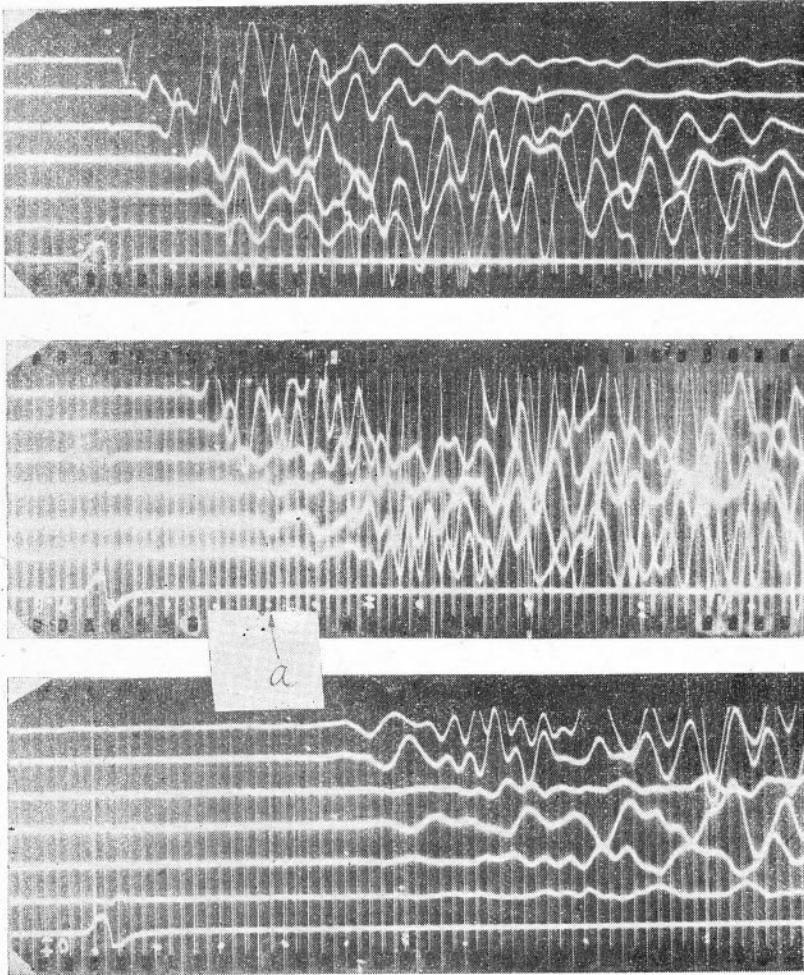


第 48 図



第 49 図

媒質から硬い媒質に突き当たる場合には、同図の如く非常に短区間だけの屈折(勿論臨界屈折)が起ると考えるのである。硬軟入れ替つた場合には、この様な屈折現象は起らないから当然差支えなからう。



第 50 図

### 5) 低速度層の問題

反射層の問題に關聯して、表土に速い速度層があつてその下に低速度層の来る場合について検討して見よう。

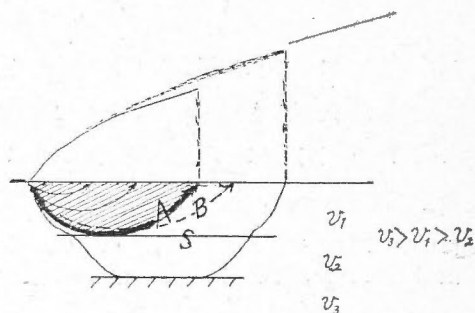
低速度層の問題について

この問題については既に理論的(幾何学的)に詳しく論じられている<sup>34)</sup>が、一例として本所

34) 那須信治: 低速度層が介在する場合の彈性波の傳播 (震研彙報, Vol. 20, No. 2 (1942) 273—283)

の栗原技師が小滝油田<sup>35)</sup>において得た記録の走時曲線及び解析結果を示す(第49図参照)。この場合は速度の大きいものが最上層に来ており、解析は mirrage 現象を應用して出したもので、一種の反射現象を考へても差支えあるまい。この記録を第50図に示す。

ここに問題となるのは第51図に見えるSの部分の存在することである。第50図の記録を讀取つて走時曲線と比較して見ると、勿論直接波・表面波・音波等はあらわれているが、a点から非常に綺麗に今迄の波は大体消えている。即ちAという path を通る波は存在しても、Bという path を通る波は存在するとしてもその割合は非常に小さいということである。いいかえれば最短 path, 最大 energy という一つのあらわれと見ることが出来よう。



第 51 図

## 6) 結 語

反射波をとることは地震探鉱における一つの大きな問題である。その爲に A. V. C. や Com-pander を付けた器械が作成されている。

ところで筆者は器械的よりも、この際寧ろ地質的な問題について少し吟味して見たのである。問題は非常に多く元より完全なものではないが、反射波の諸性質については少しく明かにし得たことと思われる。なお低速層の問題にもふれたが、始めはもつとつき進んで挟み層その他の問題も研究したかつたのであるが、今回はそこ迄手が伸びなかつた。

## VI 解析法及び速度及び微細構造の問題に關して

### 1) 目 的

地震探鉱において得られた記録から走時を讀取り、走時曲線の解析を行う場合に非常に簡単な model を假定して time-path の計算を行い、これと実際の場合とを比較することにより地下構造を推定するのを普通とする。

然しこの場合、具体的には色々の問題に逢着する。例えば実際の地震波の path は爆発点一観測点を連ねる鉛直面内にあるとは限らないが、計算を行う場合には同鉛直面内にあるものとしている。又弾性媒質内の速度分布は鉛直方向のは、例えば mirrage 現象として知られているが、実際には水平方向にも速度変化がある場合がある。その他解析に關しては色々の問題がある。これらを一括してこゝに一編とした。

35) 地質調査所速報

最初に contour method の解析法について述べた。これは fan method の拡張とでもい  
可きもので、幾多の特徴を有している。次には波の傳播速度という題目で、上述の水平方向の  
速度分布について説明し、最後に微細構造の問題について一言した。

## 2) Contour method について

地震探鉱法において器械爆発点の吟味をやり、得られる記録の波形吟味などの問題もある程  
度解決して来たが、まだ重要問題として測点の配置方法が残っている。地震探鉱においては反  
射にしても屈折にしても、測点配置(場合によつては測線配置)方法が解析の場合に如何に重  
要な役割をするかは、例えば反射法においてL型、T型等配置方法が考案され、又地震計の配  
列についても種々の方法が実施されていること、一方屈折法においても断面法・円弧法・放射  
状配置等があり、それぞれの場合に應じて適宜利用されていることから考えて見ても明かであ  
る。

さて、筆者は屈折法における問題として円弧法の拡張とも称す可き方法を考案し、仮りにこ  
れを contour method と名付けた。

a) 爆発点としては同一直線上にない三つ以上の点をとる(成可く正三角形又は正四角形な  
どの等間隔なのが理想的である)。

b) 観測点は任意の場処に数十乃至数百カ所に成可く全体に行き亘らせる様に配置させる。

c) 以上は爆発点並びに観測点の配置方法であるが、次に一つの爆発点について、爆発点か  
ら各観測点迄地震波の到着するに要した時間を各観測点に書込み、これら地震波到着時刻の等  
しい点(毎 $10/100$  sec)を結ぶ曲線 contour を作る。

d) c) で作った contour 図面を各爆発点について作る。

e) 一方全部の走時を使用して平均走時曲線を作り、これにより読取られる各平均等震波到  
着時刻線(平均等震時線)図( $10/100$  sec 毎=これは円となる)を作り記入する。

f) これ(e)と前に得た contour (d)=実在線図とを比較する時は、場処により可成りの差  
異が認められる。

これ即ち地下構造の一樣ならざることを物語るもので、平均線より速く波の到着した処は概  
して地下の隆起部、平均線より遅く波の到着した処は地下の凹部と解してもよいであろう。勿  
論それぞれの場合に應じて条件次第で必ずしも然らざることは当然のことであるが、又波線の  
極度に密集あるいは疎らな処は断層の算が大である。ところで次に実例及び解析方法に進む前  
に、この方法の長所・短所について考えて見よう。

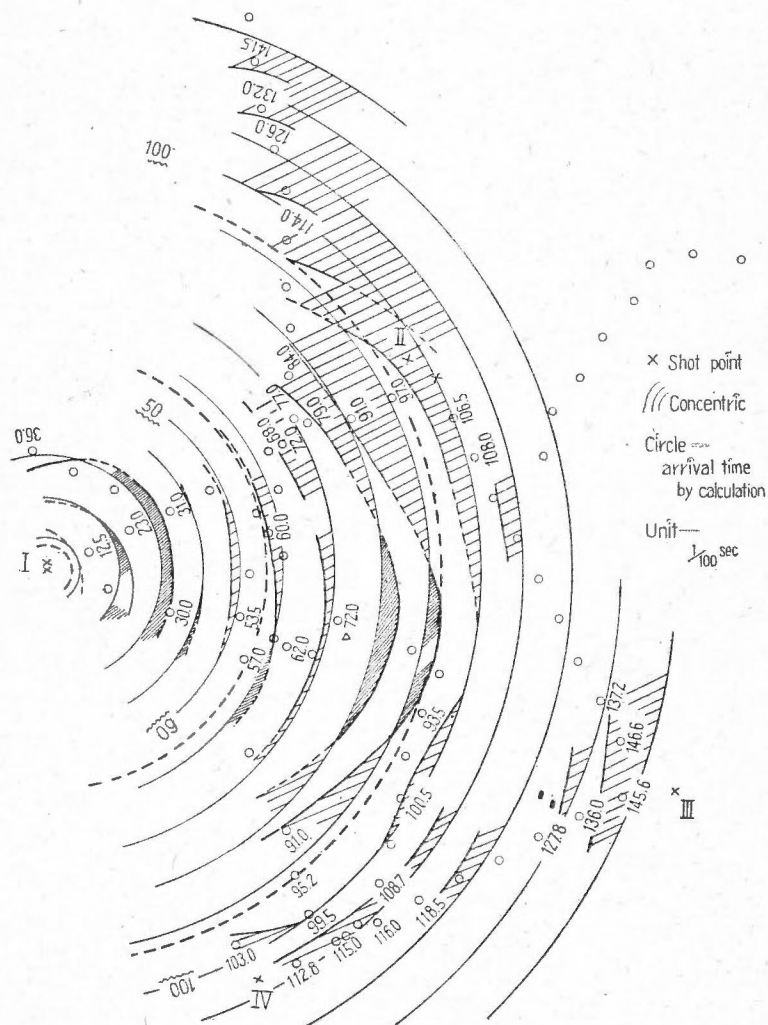
長所と見られるものには、

1° 地下構造が断面のみならず、全面積に亘ること(各深さについていえる)。

2° 断面法の場合は、震波線はその断面内に在る(断面との error が小として行つてい  
た)ものとするも、事實は必ずしも然らず、contour 式ではその心配が無くなること。



- 3° 方向による速度の変化のある場合はそれが知れること。
- 4° 断面法の場合は測点が一直線上に乗る関係上、例えば畑や田圃の中などに來ることもあり、作業に困難を來す場合がある。然し contour 式では、畑や田圃の中を除けて at random に道路の上でも何処でも点を置いてよいのであるから、こういう心配もない。



第 52 図

- 5° 爆発点が少なくて済む。測点数も大して多くならぬこと。
- 6° 解析が楽である。
- 等である。

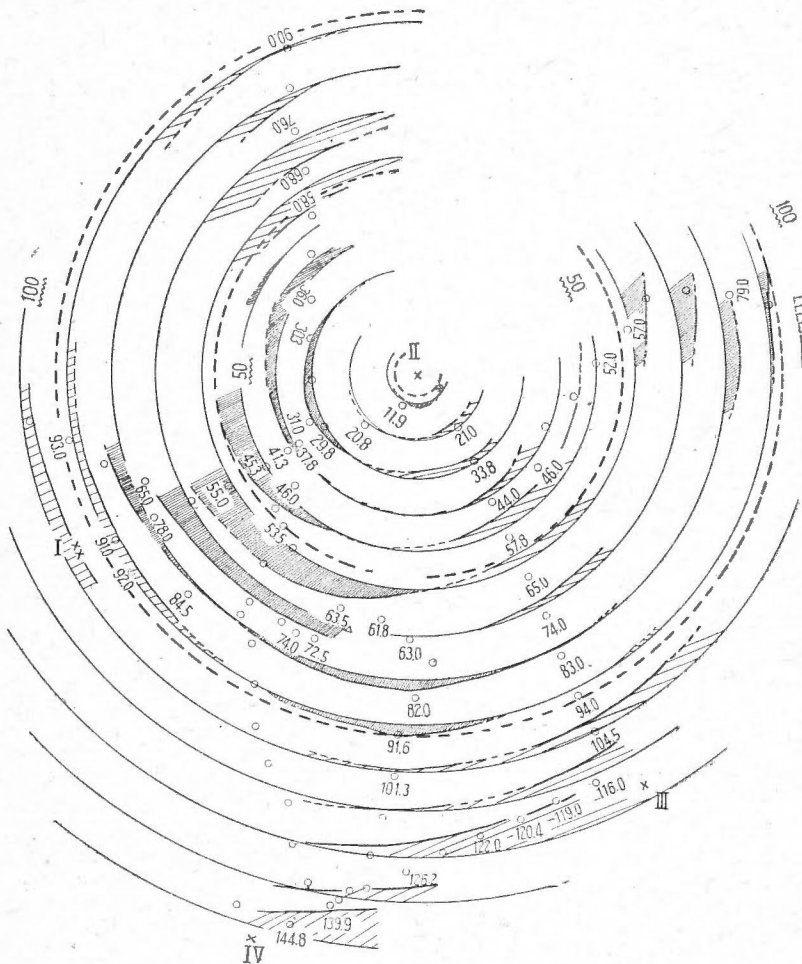
一方短所と見られるものとしては、

- 1° 一度に余り広い面積を蔽われぬこと。

2° 爆発点間隔の関係で差程深部迄は構造を知り得ぬこと  
等である。

さて実例として筆者が山形縣飽海郡の石名坂油田において行つた結果について記し、後その解析を試みることにする(地図は省略する)。

従来地震探鉱法においては、地質構造線の走向を略々直角に横断する様に数條の測線を探り、更に構造に並走する少数の測線を選定するのを常としている。筆者の行つた試みは略々正



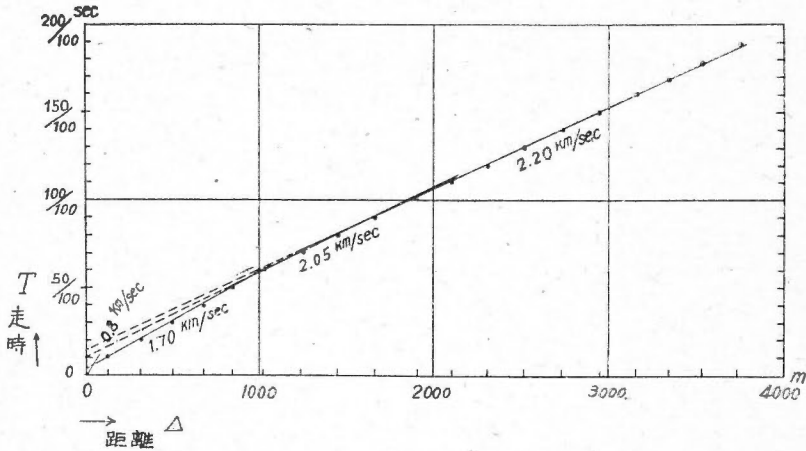
第 53 図 Mean time distance curve

四角形の測線を探り、その各頂点附近に爆発点を設けた。一辺の長さ平均 2 km 各边上及び附近道路上等に任意に大体 200 m 間隔で以て受振点を設けた。

各受振点において地震波動(初動)到着時刻を記入し、各爆発点よりの等発震時線図を作れば、第 52、第 53 図の様になる。ここに第 52、53 図はそれぞれ第 I、第 II 爆発点の場合を示し

ている(紙面の経済上第 III. 第 IV 爆発点の場合を省略した)。

且つこれら 4 枚の図面により得られる毎  $1/100$  sec 毎の平均等発震時線図による走時曲線を第 54 図に示す。これは円となるが、これを作成第 52, 53 図に記入し、先に得られた対応する実在所要時間(第 52, 53 図)と比較する時は、場処により可成りの差異が認められる。これは地下構造の一樣ならざることによるものである。次に解析法について述べよう。



第 54 図

今迄普通に屈折法で行っているのは、まず記録から初動の時刻を読み取り、それによつて走時曲線を作成し、これを trial and error の方法で解析するので、これらの計算には相当な時間を要する。今回筆者の行つたのはこれとは多少趣を異にしている。その概要を以下に述べる。

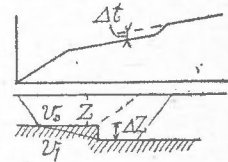
1° 平均走時曲線から得られる  $1/100$  sec 毎の平均等発震時線図(円)と、それぞれの対応 contour (等発震時線図)と比較する際、仮りに平均より速く波の到着した処、遅く到着した処を斜線で区別した。なお第 54 図による走時曲線の折れ目に相当する時間(円)も第 52, 53 図に記入する。即ちこれにより深さが限定される。これに対応する深さを出して見ると、境界の平均深度が出る。

2° 次にこの各平均深度毎に一枚ずつの平面を考え、それに対してそれぞれの場処の凹凸が如何になるか考えて見れば、各深さの地下構造が推定出来る訳である。まず地表面下 50 m における凹凸は例えば第 55 図の如き地下構造の場合においては、

$$\Delta Z = \frac{V_1 V_2}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \Delta T. \quad \text{なる関係のあることに着目し}(x \text{ なる場処は後から考えると}),$$

深さだけについて考えれば、直接第一円内(各爆発点共)の表土層(第 1 層)の厚さは直ぐ求めることが出来る。この様にして第 1 層の結果を出すことが出来る(図面は省略した)。

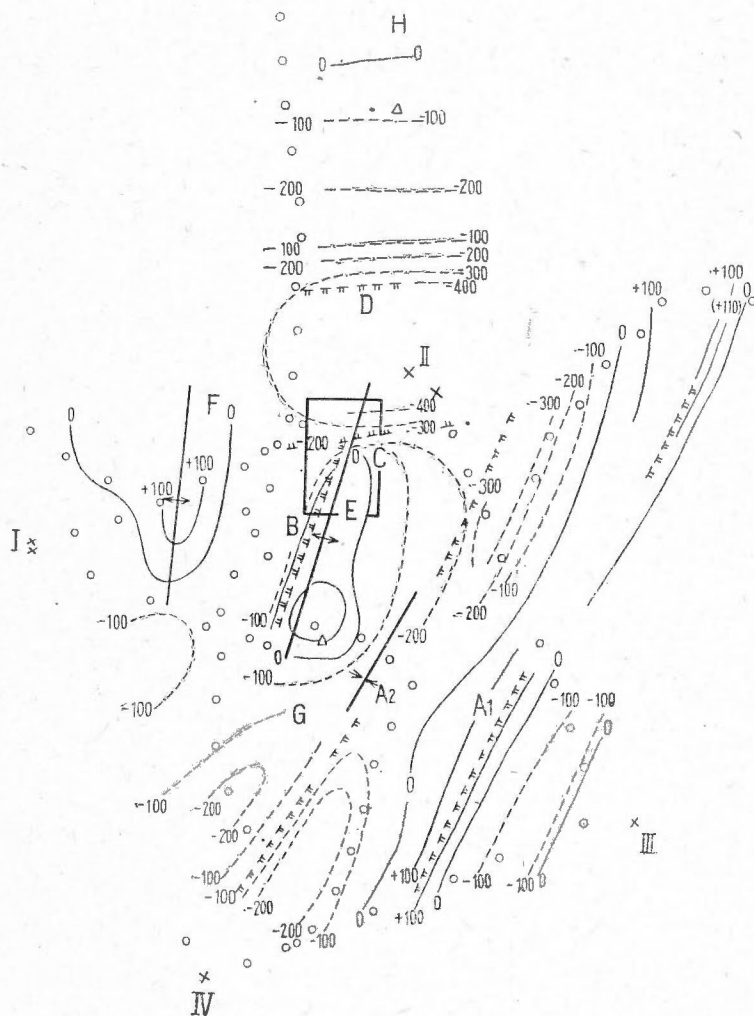
3° 第 1 層の構造が上述の如く判明すれば、次は第 2 層の構造を求めることになる。第 1 層



$$\Delta Z = \frac{v_0 v_1}{\sqrt{v_1^2 - v_0^2}} \Delta t$$

第 55 図

の結果によつて各地点の第1層の地下の深さの異なることが分る。この点は一應おあづけの形にしておいて、第2層と第3層との境界面の凹凸を $2^{\circ}$ の場合と同様にして出す。たゞこの場合に4つの円、又は3つの円等の重なる場所が方々に出来るが、これらの平均を出すことによつて自然xの意味合いも含まれることになる。さてこの様にして出した結果に第1層の厚さの大小による補正を入れる。この様にして出した結果(地下150mの面の凹凸状態)が第56図である。



第 56 図

$4^{\circ}$   $3^{\circ}$ と同じ様にして、而も第1層、第2層の影響を考慮に入れて、地下240mの面の凹凸状態の結果を出すことが出来る(図面省略)。

以上野外作業調査後10日間余りで解析を終了した。これらの結果は地質層序と比較はしなかつたけれども、調査後採油している場所の試錐結果と比較すれば、解析結果も可成りの精度

を持っていることが分つた（図面省略）。

勿論まだ種々の問題、例えば平均走時曲線の意味合い等が残っているので、決してこの方法で満足している訳ではない。たゞ今後考える可き種々の問題を提供していると思われる。

一方地下の構造を仮定して、逆にこういう意味の contour 図面を沢山作つておき、実際に現地を得たものをこれと比較するというやり方も望ましい。

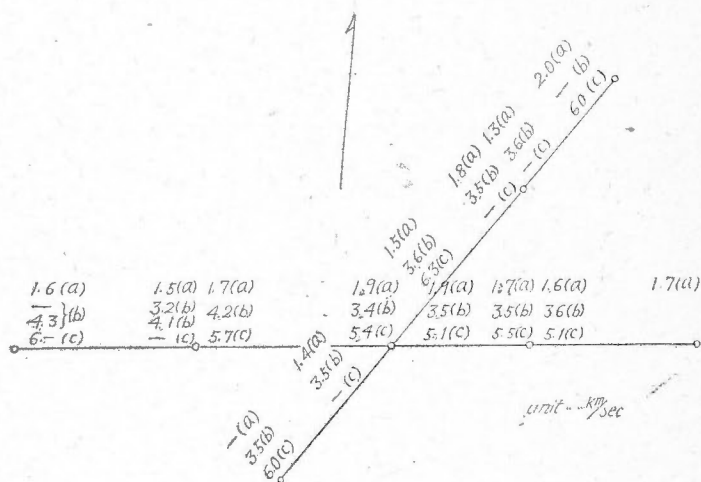
勿論 contour method にも種々まだ問題はあろうが、今後とも改良して地下構造の解析に役立つようにして行きたい。

### 3) 地震波傳播速度の問題（水平方向による速度の相異）

地震探鉱において記録結果を書入れた走時曲線の解析を行う場合に、元となるものは速度である。従つて速度は大切な要素であるが、これの地理的分布はそう簡単なものではない。

垂直方向の速度変化は常に問題とされているが、水平方向にも勿論ある筈である。そこでここには水平方向に速度の変化し得る問題を一例を挙げて述べる。

筆者が三池沖合の地震探鉱を行つた際、得た走時曲線を見ると（第57図）面白いことが分つた。即ちこの際速度の分布は地理的に左程不規則ではなく、大体において第I、III線（仮りにこれを東西線と呼ぶことにする）と第II線（これは南



第 57 図

西—東北方向であるが、便宜上南北線と呼ぶことにする）の2種に分類出来る様である。

尤もこれは第3層についてのことで、第1、第2層は殆んど場所により変化はない。

これを見ると、第3層においては東西線に比べて南北線の方が1割方速度が大であることが分る。一方東西方向については以前この附近の地震探鉱を実施した萩原・表両博士<sup>36)</sup>の結果と速度は一致している。

これらのことは一体何を物語つているのであろうか。次に述べる三つの考え方は解釈としては割合自然なものと考えられる。

36) 萩原尊礼, 表俊一郎: Seismic Prospecting on a Sea Bottom (震研彙報, Vol. 13, No. 2 (1940) 305—317)

i) 第3層を形成している物質の構成の仕方により、東西と南北などの様に、方向による速度の方向性がある。

ii) 第3層を形成する物質として、略々東西線以北においては結晶片岩、それ以南は花崗岩が挙げられる。

iii) 地下の傾斜等による見掛けの速度が出ているのではあるまいか。

さてこれらの中、地下の構造に大した傾斜の考えられないこと、且つ各爆発点から両方の方向に速度の値が出ており、これらの爲に以上のような速度の水平方向の変化が考えられない等のことから iii) でないことは分る。

次に現在知られている材料、即ち黒崎において結晶片岩の露頭が現われていること、峯の州ボーリングの結果、その基盤は花崗岩であることなどから見れば、ii) の現象もある様に思われる。然し例えば両測線の交点第 III 爆発点において東西線のは何れも 5.5 km/sec 程度であるのに比べ、南北線のは 6.0 km/sec 程度となつていることより見れば、方向性 i) を考える方がより妥当な様である。

地質的に見ても第3層は構造的な意味を含んでいるかも知れない。要するに結論として i) が一番考え易いということになつた。

他の地方においても類似の結果が出たのを最近きいた。以上のことは、走時曲線の解析にも影響を及ぼすことは勿論である。

#### 4) 微細構造に関する問題

最後に微細構造の問題について一言しておく。現在の地震探鉱では一体どの程度の微細構造迄知り得るものであろうか。この問題については爆破波長などの問題もあるが、佐々博士<sup>37)</sup>は石炭層が走時のジグザグから判ることを述べておられる。又最近 Geophysics にはカリフォルニアの坑井内で吊り線を震波が傳わることを述べている。又筆者はある所で数 m の厚さの薄層を走時曲線の上から知りうることを試錐結果から確めることができた。更に最近当調査所の金子徹一技官は坑内爆破を行つた際、附近に施設してあつたレールを震波が傳わることを確めた。これらの事柄は今後微細構造の探査の可能なることを物語つている。併しその爲には更に爆破方法の改良・受震器・電流計などの改良を行わなければならないことと思われる。

#### 5) 結語

本章においては最初 contour method について述べ、地下構造の contour map をつくるについての一つの方向を示した。今後こういう方法の発展をのぞんで止まない。

次に速度の問題について述べた。即ち水平方向の速度分布の問題で、これも今後垂直方向の場合同様研究を進めたいものである。

最後に微細構造に関する問題について一言した。

37) 佐々憲三：物理探鉱，2巻2号，地震探鉱の問題

## VII 結 語

本研究最初にも述べた様に、従来の地震探鉱から一步を進める爲記録の波形吟味等を行い爆発方法の研究・反射波や速度の問題も吟味し、地下構造の解釈に役立つ様に研究を行つて来た。その結果を要約すれば次の様になる。

II では我々の使用して来た波江野式電気地震計の諸性質を實驗及び理論的に研究し、その結果器械の種々の常数を知り、特性を知ることが出来た。それによればこの地震計は電気地震計であるから、外部からはいつて来た振動と最後に記録で得られる波とは勿論同じものではなく、種々複雑な要素を含んではいらぬが、ある場合には記録の波形吟味等に使えることが分つた。

III においては地震探鉱をやる際に、火薬を無駄に使わずに振動に方向性を與える可能性のあることや爆発点では至つて簡単な波の出ることや、振れ波その他の波の發生機巧を知ることが出来た。

なお距離と波長、その他調べたい問題も残つているが、今回はそこ迄は手が届かなかつた。

以上器械の性質や爆発点の様子が分つたので、IV においてはこれらの性質を頭において、波形吟味を行つた。即ち今迄利用されなかつた表面波・音波・週期等を考えに入れて、地下構造の解析に手助けになる様な結果を出すことが出来た。

なお良い記録を得る爲には、器械・爆発・地質の三條件が必要で、これらが如何にして結果に利くかということを書いた。

V においては以上と多少趣を異にするが、現在の地震探鉱においては欠くことの出来ない反射波について、反射面両側の媒質を種々変えた際に、どの様に反射が出るかということについてしらべ、種々面白い結果を得た。又地表面附近に地下より傳播速度の大きい層の存在する場合の energy のことについて多少意見を述べた。

最後に VI においては一つの解析法 (contour method) について述べ、更に速度の水平方向の変化の問題を例をあげて説明した。それから微細構造の問題について述べた。

以上今回の研究のあらましの結果について述べた。本研究の最初に述べた様に地震探鉱の行き方として振幅を大きくするという行き方に対し、波形をしらべたり、その他幾分地球物理学的なしらべ方をするという行き方があるが、本研究は後者の場合について幾らかの解答を興え得たものと思われる。

研究方法も未熟であり、必ずしも種々好條件に許り恵まれたという訳ではないので、充分立派な結果を出すことも出来ず、残念であつた。然しこういう行き方が如何なる結果を導くかという目安はついたことと思われる。始めにも述べた様に同じ様な方向の研究をされている学者の方々もあり、今後のこの方面の研究の発展を望んで止まない次第である。

終りに臨み、研究未熟の点、諸先輩の研究に触れた点については、お詫びする次第である。





## Résumé

### Some Problems of Seismic Exploration

by Masami Hayakawa

#### Chap. 1. General introduction.

Seismic exploration has been applied practically for the determination of geologic structure by many geophysicists. Usually, we utilize the reflection and refraction waves. In the refraction case, only first arrivals have been usually considered. A time distance curve can be constructed by observing first arrivals for a variety of shot detector distances. First arrivals are the fastest travelling waves, therefore refraction method is concerned with longitudinal waves.

Now, if we can use not only first arrivals, but also wave forms such as amplitude, period, damping ratio, etc., the utilization of seismic prospecting may increase evidently. In this meaning, the writer attempts to apply this geophysical interpretation to seismic prospecting. For this purpose, we must find at first the characters of our seismographs. Then the writer describes the characters of Haeno seismograph which has been utilized in the Geological Survey of Japan, and he also describes the kind of waves which this seismograph draws in Chap. 2.

The writer describes mechanisms of dynamite explosions in Chap. 3. He discusses wave forms such as amplitude, period, damping, etc, in Chap. 4. by applying above described results. And, he also discusses subsurface structures calculated from corresponding wave amplitude, depths of weathering layers by using corresponding periods.

Next, in Chap. 5. he studies the nature of the reflection waves, and at the same time, he discusses low velocity layers and the energy of seismic waves.

Finally, somewhat different from the foregoing study, an improved analytical method and some problems on velocity are described in Chap. 6. And, he also discusses the detectable possibility of underground small structures by means of seismic method.

#### Chap. 2. On the characters of Haeno seismograph.

##### ( a ) Introduction and object.

We have utilized Haeno seismograph as above described. This seismograph consists of detectors, amplifiers, and oscillographs like other electrical seismographs, although there is some variation in detail. Then, wave forms pictured on a record are not the same as incident waves. It is very necessary to explain these relations between the natures of incident and recorded wave forms in seismic prospectings.

At first, he explains the construction of Haeno seismograph, then some experi-

ments of each parts of apparatus and also the combination of them. Finally he investigates their theories.

(b) Construction of Haeno seismograph.

As described above, this seismograph consists of three parts, namely: detectors, amplifiers and oscillographs.

These aspects are shown in Fig. 1-5. Besides them, shooting machine (electrical blasting machine) and telephones are used. Radio apparatus and hydrophones are also added to them in the case of seismic prospecting on the sea bottom.

He explains here some details of them in the following paragraph. Detectors, (pick-up, vibration receiver)—respond to resulting ground motions of elastic wave propagated through mediums from shot points. We have a series of six detectors. When catching the resulting ground motions, there will appear electro-motive forces simultaneously. The self period of the weight is about 1/10 sec. (critical damping) in the case of attaching magnetic coil. Foucault currents are applied as a damper. Voltages produced in a detector are proportional inversely to vibration periods by external forces.

Amplifier-oscillograph-recorder system.

Magnitudes of earth movements measured in seismic prospecting are extremely small. Detectors together with their associated amplifiers, are usually made so sensitive that they can show micro impulses. The small electrical impulse from each detector (or detector group) is transmitted by a cable to an amplifier-filter. We have six elements amplifiers cased in a box. The details of the electrical system for the amplifier-filter vary among different apparatus. However, the amplifier is nearly always an arrangement of vacuum tubes, condensers, transformers, and resistors which are quite similar to the corresponding parts of the audiofrequency amplifier system of an ordinary radio receiver. The component parts from which the amplifiers are built are nearly all obtained from the radio trade. The maximum voltage gain of the amplifiers is sufficient to give a slight output from normal ground unrest or micro impulses. We use vacuum tubes such 1A4, 1A4, 30 or 6C6, 6C6, 76, etc. The overall amplification of this system (i. e. the ratio of the amplitude of the response on the record to the amplitude of the ground motion) is in the range  $10^3$  to  $10^7$ . This amplifier is combined with a filter. This filter system is so made as to pass the most favorable frequencies for each field condition. The overall frequency characteristics of this system are in the range 20 to 60 cycles per second. The output of each amplifier is connected with an oscillograph (or galvanometer) unit. We have six elements oscillographs in a box. The self period of the permanent magnet is about 1/10 sec., and the current sensitivity is about  $10^{-6}$  amp. The current sensitivity is proportional to the vibration period from the amplifier.

The "camera" is the mechanism for passing the sensitive (photographic paper or) bromide under the light beams from the oscillograph elements.

Since the travel time of the seismic wave is the fundamental quantity measured

in seismic prospecting, it is necessary to provide a reliable timing mechanism. The timing mechanism in our case is a carefully calibrated, electrically driven tuning fork which record accurately 1/100 sec. time mark.

(c) Experiments (detectors, amplifiers, oscillographs, and their combinations).

The writer has made experiments on detectors, amplifiers and oscillographs. Here, he will explain some details of them as follows:

At first, he makes experiments on detectors. He tests detectors on three problems. One of them is to obtain normalized frequency responses of detectors. The second problem is to examine self periods of detectors and the last one is to examine damping ratios (decrement).

For the first two, he uses the arrangement for experiment as shown in Fig. 6, and he obtains the results as drawn in Fig. 7. The vibrator is excited by the movements of excentric motor. And, about the last problem, he uses the arrangement for experiments as shown in Fig. 6, and he finds out that the damping was in critical condition. Then he makes experiments on amplifiers. In this case, it is sufficient only to obtain composite filter curves of each amplifiers. For this purpose, he uses arrangements for experiments as shown in Fig. 8 and he obtains results as drawn in Fig. 9.

Finally he makes experiments of oscillographs. In this case, as was already described in the detector's experiment, there are three problems, — namely: sensitivity, self vibration, and the decrement. For this purpose, in the first two problems, he uses the arrangement for the experiment as shown in Fig. 10. As for the result of this problem, he obtains the normalized frequency responses of each galvanometers as drawn in Fig. 11. For the last problem, he finds out that the damping was in critical condition.

Now the characters of each part of seismograph have been cleared, then the writer attempts here to make experiments on the composed parts of seismograph. He will explain some details of them in the following paragraph.

He makes a composed experiment on pick-up-oscillograph elements and amplifier-oscillograph elements by using the arrangements as described above in the case of a detector, and the arrangements as shown in Fig. 12, you will see a result of the latter case in Fig. 13. And this result agrees with the combined value of experiments of each element.

(d) Theories. — (detector, amplifier, oscillograph and their combinations)

As already has been described above, the writer knew the characters of Haeno seismograph by some fundamental experiments. And yet, in using this seismograph practically, it is very necessary to study the theories of the instrument strictly for proving the reliability of these experiments. At first, he inquires into each part of the apparatus, and then into the combinations of them, as in the case of experiments.

Now the writer explains the results in detail in the following paragraph. Mr.

Haeno, however, already investigated detectors and oscillographs in general, therefore the writer leaves a brief explanation of these two parts till later on, and he describes only an amplifier.

Amplifier. — A schematic arrangement of an amplifier element is shown in a diagram. (Fig. 14)

The writer does not explain "A. V. C." or compander in this paper. As will be explained in Fig. 14, this arrangement consists of three parts, namely, a, b and c.

In (a), a small electrical impulse from the detector is transmitted by a cable to the grid of the first tube. Then in (b), the response (voltage) of this small electrical impulse is amplified (by the first and second tubes) and at the same time, some selected responses are filtrated (according to their necessary ranges) by the filters  $c_1$  (high cut) and  $c_2$  (low cut) respectively. Finally, in (c), the amplified voltage response through the second tube is amplified (with current and voltage) by the third tube (power tube) and this amplified current is transmitted to the oscillograph through the output.

The process in (b) is manifested by the equations from (1) to (3) At first the amplification of b parts (i. e., the ratio of the amplitude of the response at the output of a tube to the one at the input of the same tube) is calculated. A calculated curve of b parts by applying constants of utilized elements is shown in a diagram. (Fig. 15)

The process in (a) and (c) is also drawn in another diagram. (Fig. 16) Then, the overall amplification of this amplifier i. e., the ratio of the amplitude of the response at the output of an amplifier to the input of the same one is calculated. By comparing these results with those of experiments, you will see that these two results resemble each other, although there exist fair differences.

Next, the writer explains detectors and oscillographs. The process of detector-oscillograph system is manifested by the eq. (p. 13), and a calculated curve from this equation by applying the constants of our elements is shown in a diagram. (Fig. 7) Comparing the results with those of experiments in this case, you will see that these two results resemble each other.

Finally, the writer explains the synthesized theory of the detector-amplifier-oscillograph. The process from detector to oscillograph is shown in a Table. (Tab. I) (p. 14). Output voltages in the case of a stationary vibration is proportional to their corresponding frequencies in respect to the detector. As for the oscillograph, the current sensitivity in the same condition is proportional to the reverse of their corresponding frequencies. With respect to the characteristics of (a), (b), (c) parts of the amplifier, (Tab. I) you will see by the equation in p. 15 that they correspond to the differential, constant, and integral meanings, respectively. It is recognized by considering these effects that the nature of the pictured waves differs from incident waves. The writer makes a diagram to examine these relations as will be seen in Tab. II (p. 16). You will find their relations from this table. For example, their

perfect displacements are pictured in the case of sound waves through the seawater, and displacement-like figures are pictured of the first kicks of refraction waves.

The description in the foregoing paragraphs is only applicable to the cases of a continuous vibration, so the writer will explain here concerning the case of a transient motion. The vibrations transmitted from a dynamite charge are thought to be a simple shock type wave near the shot. Then he calculates what type of a wave will be pictured, when a simple shock type wave reaches the detectors.

The shock type equation is supposed to be as equation (1) (p. 17). The result from calculations is drawn in a diagram (Fig. 19). An example of practical records near the shot is shown in Fig. 20. From these two figures, you will see that the results of calculation resemble to those of experiment.

(e) Summary and conclusion.

In the explanation described above the writer knew the characters of the apparatus "Haeno seismograph". Summarizing the facts, it becomes possible to discuss wave forms, such as amplitude, period, and damping ratio etc, according to this acknowledgement. You will see the explanation of these practical applications in the following two chapters.

Chap. 3. Some problems of explosions of seismic prospecting.

(a) Introduction and object.

Needless to say, it is very important to investigate the shooting mechanism in seismic prospecting. It is no exaggeration to say that qualities (good or bad) of records are dependent on a method of explosion, on sensitivities of seismographs and on geological condition in shooting spots together with recording points. Then the writer studies some fundamental problems of explosion in seismic prospecting. You will see the results of these investigations in the following paragraph.

(b) Shooting mechanism.

There may be many outstanding pulses on each record — such as direct waves, reflection waves, sound waves and surface waves, if the record is perfect enough to utilize. However, these records are only obtained in case of long shot-detector distance, while records obtained in near shot must be investigated with respect to wave forms. The writer points out a record (Fig. 20) as an example, a shot-detector's distance of which is only about 15 meters. As will be seen from this record, the wave form appeared at the shot point is a simple shock type kick. It can be said from this fact that a shooting mechanism is very simple.

(c) Outbreak of transverse wave.

The theory of elasticity shows that a homogeneous isotropic medium can transmit two types of waves which have different speeds of propagation according to elastic constants. These are longitudinal (compressional) and transverse (shear) waves. In natural earthquakes, both longitudinal and transverse waves are recorded, and the constitution of the earth is disclosed by means of its calculation of these

propagating waves. On the other hand, only longitudinal waves can ordinarily be recognizable on its record in seismic prospecting. Sometimes, however transverse waves are found on records. The writer points out a record (Fig. 22) as an example, a shot-detector distance of which is very short. Much discussions have been done in order to examine whether the record shows transverse waves or not, i. e., about ratios of amplitudes between initial and second waves (in question), ratios of arriving times between them, etc. Tab. III. (p. 21) The writer decided these phases as S waves from these examinations. In what conditions may S waves appear, then? After many discussions, he obtains some trustworthy results (necessary conditions) as follows:

1. The media around the shot point is very hard.
2. The shot point is not far from the surface.
3. The shape of dynamite is not round (Fig. 23).

(d) Explosion of a cap.

The mechanism of explosion is ordinarily very simple seen from the results described above. The writer obtains some special type of waves, such as transverse waves in special conditions. Here he accounts for the mechanism of explosion of a cap. Using such an arrangement of experiment as seen in Fig. 24, he obtains an important result, which illustrates that shooting mechanism of a cap resembles to that of natural earthquakes. This phenomenon gives us some hints on the improvement of shooting method.

(e) Distribution of explosive energy at the shot point.

In (d), the writer has made a artificial experiment, and obtained several interesting results. Now he studies a subject, having found a discontinuous plane passing through the shot point. Here, you will see some sheets of photographs which show a process of explosion in the condition described above (Fig. 26). The space distribution of explosive energy is known from these photographs. There may be possibilities of concentrating energy on one direction by applying these phenomena to a practical field operation.

(f) Explosion on the seabottom.

The foregoing explosions are adaptable for seismic prospectings on land. Now, the writer describes the explosion on the seabottom in the following paragraph. Conditions in this case are very different from the case of land. Here are several photographs which show the process of explosion on the seabottom (Fig. 28). Fig. 29 illustrates the records of the arrival of a seismic wave. From these data, the writer studies the mechanism of explosion on the seabottom in detail. Fig. 30 shows a schematic diagram of the results, which is signified as follows. The sound wave of a shock type transmits through the seawater faster than the shock wave propagated in the earthcrust; in this case, the media (seawater) show the nature of a solid like ice. The usual seismic wave propagates in the earthcrust, and a

sound wave etc. arrive later on. Moreover, there are still more problems, such as so called surface waves etc. in the case of seabottom. At any rate, the mechanism of explosion on the seabottoms is very different from the case on land.

(g) Summary and Conclusion.

The nature of explosion has been disclosed in this chapter, viz., many phenomena, such as shooting mechanism, process of transverse wave etc., have been brought to light. It is very interesting that the wave form appeared at the shot point is a simple shock type kick. Moreover, the possibility of concentrating energy on one direction was found by applying several phenomena obtained in this chapter to practical explosions. Of course, application of this is not yet realized practically at present, but it is very desirable to perform these methods in a field operation in the near future.

Chap. 4. Geophysical interpretation of the records in seismic prospecting.

(by the application of wave form, such as amplitude and period)

(a) Introduction and object.

In this chapter, the writer will discuss and investigate wave forms, viz., amplitude, period, damping, and their applications.

(b) Calculation of the depth of surface layers by applying periods obtained from the records of seismic observation.

A stationary vibration appears frequently on seismic records, superposing refraction waves fairly later than the initial kicks. This wave might be excited by other original waves, which would originate from a proper motion in surface layers. After inspecting the seismic record, the writer plots the periods as ordinates and he treats the shot-detector distances as abscissa in order to disclose the relation (Fig. 31.) Thus he tries to examine the relation at each shot point simultaneously. At an observation point, values of period from a certain shot point agree with the values of period from other shot points. This fact may show that these stationary waves are produced from the proper motion in surface layers. Boring data proved that the depth of surface layers gained by means of calculation shows reliability. But precaution must be paid in calculating the depth of layers, when substances of surface layers vary horizontally, because velocity has relation to rigidity.

(c) Application of surface waves.

Investigations have already been performed as to surface waves in natural earthquakes, but surface waves have not yet been applied so much to seismic prospecting. The writer treats this problem as below: several records suggestive of surface waves are found in Fig. 33. After a close inspection, he points out possibilities that there may appear not only Rayleigh waves, but also Love type waves.

(d) Application of sound waves.

The writer studies the application of sound waves. Fig. 36 shows an examples

of record of sound waves. And a record in seawater is also shown in the same figure. The writer describes two applications as to sound waves. One is the application to the decision of shot-detector distance, and the other is the application to the decision of amplitude at initial kicks by comparing it with the decrement ratio of sound waves according to shot-detector distance. The writer will explain there only the latter problem without explaining the former case. Until now, only few applications of amplitude have been done in seismic prospecting, because the quality of records obtained in seismic prospecting is very different from an incidence wave. Now, the writer makes a decrement diagram of energy in sound waves and amplitude of sound wave according to the shot-detector distances (Fig. 38). The total amplification of seismographs in each record can be calculated from this diagram. Applying this amplification, he calculates the amplitudes of initial kicks in each record. Some of these records are shown in Fig. 39. These discontinuities of amplitude seem to correspond to inflection points of time distance curves. And if you use this method, it would possibly be affirmed that not only velocity difference, but also other physical properties of subsurface substances can be known by collecting many data experimentally. Moreover, the writer has succeeded in detecting a fault by this method.

(e) Summary and conclusion.

In this chapter the writer studies and discusses the wave form by applying the characters of seismograph and the nature of explosion which are obtained in the preceding chapters. A method has been established which calculates depth of surface layer by utilizing periods in seismic records and which decides the amplitude of initial kick by studying the decrement ratio of sound wave. He also studies conditions to disclose each phase on seismic records. It is desirable to extend these methods to seismic prospecting operations in the near future.

Chap. 5. On reflecting waves.

(a) Introduction and object.

As described in the preceding chapter, the damping factor is a necessary condition of obtaining good records, but practically it is very difficult to decrease each wave phase quickly, without using the method such as A. V. C. or Componder. On the other hand, geology is also an important factor, then the writer studies here the nature of reflection waves in this chapter, and at the same time he also studies the low velocity layer and the energy of seismic wave.

(b) On the reflection wave. (Theory)

In an unbounded isotropic homogeneous medium, energy radiates uniformly in all directions from the source. When a longitudinal wave is incident upon a boundary separating media of different elastic constants or density, the energy of this wave is generally distributed among four new waves, a longitudinal and a transverse wave in each of media. The writer calculates only the case of longitudinal



incident wave. He studies some cases, that is between elastic and elastic media (a)  
 „ air and elastic media (b)  
 „ sea water and elastic media (c)

(c) Results of calculation.

The results of calculation are shown in Fig. 45, 46 & 47.

(d) On reflection wave. (Interpretations).

Summarizing the results of the foregoing study, the writer collects their points, and tries their interpretation as follows:

1. The amplitude of reflection wave increases according to the increase of the velocity ratio between the upper and lower layers.

2. There exists minimum amplitude of reflection wave for specific incident angle.

3. An amplitude decreases with respect to the vertical displacements in the case of elastic and air media or water and elastic media, according as the shot-detector distance elongates. On the contrary, an amplitude increases according as the shot-detector distance elongates, with respect to the horizontal displacement, but when the shot-detector distance becomes far, its amplitude decreases. The phase of the amplitude changes owing to the velocity ratio of the two media.

4. The amplitude appears greater in case of waterbottom than in case of land.

5. When a longitudinal wave is incident upon a boundary from hard to soft media, the phase of a reflection wave varies  $180^\circ$  as compared with a incident wave. On the contrary, in case of being incident from soft to hard media, the phase of a reflection wave does not vary. (Fig. 48) The writer studies a practical example later on.

(e) On the low velocity layers and the energy of seismic waves. Here the writer investigates the case, when there is a quick velocity layer near the earth surface. An example is shown in Fig. 49 & 50 from which the writer has found the fact that the greater part of seismic energy concentrates along the shortest time path. (Fig. 51)

(f) Summary and conclusion.

The writer discusses and studies several phenomena concerning reflecting waves. Many factors should be considered in order to obtain reflecting records of the best quality. On the last part of this chapter, the writer has studied the low velocity layers.

Chap. 6. Some problems on analytical method, velocity and detectable possibility of underground small structures.

(a) Introduction and object.

In this chapter, the writer investigates some problems about the analytical method, somewhat different from foregoing studies. That is to say, he studies the

improved fan method in the first half part of this chapter, and he studies problems of velocity, etc., in the rest part of this chapter.

(b) On the contour method.

The writer meets many such difficulties, that wave velocity varies according to directions or even that a path of seismic wave does not fall on a plane, etc., in analysing the time distance curve. To avoid these troubles, he thought of an improved analytical method, which is the development of fan shooting. Now the schematic diagram of this method is shown in Fig. 52 & 53. He names this method "contour method". Subsurface constructions can be easily brought to light to calculation, if these sheets of contour arriving cards are superposed. This contour method has many excellent points as follow :

1. The velocity layers of subsurface are shown by a contour map.
2. It is not necessary that the path of seismic transmitting waves is in a vertical plane.
3. There are no troubles in the case of velocity which varies according to directions.
4. It is not necessary to put detectors location on one line.
5. It is very easy to analyse a time distance curve.

(c) The variation of wave velocity according to directions.

It is possible to presume that wave velocity varies according to directions. An example is shown in Fig. 57; there are 10% variations between E-W and SSW-NNE. In this case crystalline schist is the constructing material. The 10% variations is thought to be produced from the constructing material. It is desirable to study also other examples.

(d) Detectable possibility of underground structure.

It is generally said that small structures can not be detected by means of seismic prospecting. In spite of this scientific commonsense, the writer has met a few examples, in which he could calculate thin layers of two or three meters thick by comparing the analytical results of time distance curves with boring data. Dr. Sassa has also succeeded in detecting thin coal layers by means of analyzing time distance curves. Moreover, there are another datum to prove this phenomenon. The writer wishes to develop this method and apply this phenomenon to practical field work after precise experiments.

(e) Summary and conclusion.

In this chapter, the writer studies some problems by analytical method, and has succeeded in accomplishing the contour method. In the last part of this chapter, he discusses the detectable possibility of small structure. It is highly desirable to study such problems.

#### Chap. 7. Summary and conclusion.

The writer has discussed and investigated records obtained in seismic prospec-

tings as described in preceding chapters, and he has been able to develop the interpretation obtained from a seismic record further than before. It is highly desirable to investigate still more velocity problems in question or explosion phenomena, etc. In conclusion, the writer<sup>4</sup> wishes to express his sincere thanks to Dr. T. Fuchida and Dr. K. Iida for their advices and encouragements in the course of this study. He also extends his hearty thanks to the members of the Geophysical Department of the Geological Survey of Japan.

---



The Geological Survey of Japan has published in the past several kinds of reports such as the Memoirs, the Bulletin, and the Reports of the Geological Survey.

Hereafter all reports will be published exclusively in the Reports of the Geological Survey of Japan. The currently published Report will be consecutive with the numbers of the Report of the Imperial Geological Survey of Japan hitherto published. As a general rule each issue of the Report will have one number, and for convenience's sake, the following classification according to the field of interest will be indicated on each Report.

- |                              |   |  |
|------------------------------|---|--|
| A. Geology & allied sciences | } | a. Geology.<br>b. Petrology and Mineralogy.<br>c. Palaeontology.<br>d. Volcanology and Hot spring.<br>e. Geophysics.<br>f. Geochemistry.   |
| B. Applied geology           | } | a. Ore deposits.<br>b. Coal.<br>c. Petroleum and Natural Gas.<br>d. Underground water.<br>e. Agricultural geology.<br>Engineering geology.<br>f. Physical prospecting.<br>Chemical prospecting & Boring. |
| C. Miscellaneous             |   |  |
| D. Annual Report of Progress |   |  |

Note: Besides the regularly printed Reports, the Geological Survey is newly going to circulate "Bulletin of the Geological Survey of Japan." which will be published monthly commencing in July 1950

本所刊行の報文類の種目には従来地質要報、地質調査所報告等があつたが今後はすべて刊行する報文は地質調査所報告に改めることとし、その番號は従来地質調査所報告を追つて附けることにする、そして報告は一報文につき報告1冊を原則とし、その分類の便宜の爲に次の如くアルファベットによる略號を附けることにする。

- A 地質及びその基礎科學に關するもの
  - a. 地質
  - b. 岩石、礦物
  - c. 古生物
  - d. 火山、溫泉
  - e. 地球物理
  - f. 地球化學
- B 應用地質に關するもの
  - a. 鑛床
  - b. 石炭
  - c. 石油、天然瓦斯
  - d. 地下水
  - e. 農林地質、土木地質
  - f. 物理探鑛、化學探鑛及び試錐
- C その他
- D 事業報告

おな刊行する報文以外に當分の間報文を謄寫して配布したものに地下資源調査所速報があつたが今後は地質調査所月報として第1号より刊行する。

昭和 26 年 3 月 10 日印刷

昭和 26 年 3 月 15 日發行

著作権所有 工業技術廳  
地質調査所

---

印刷者 向 喜 久 雄

印刷所 一ツ橋印刷株式會社

東京都品川區上大崎 3 / 300

REPORT No. 137

GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN  
Tomofusa Mitsuchi, Director

SOME PROBLEMS OF SEISMIC  
EXPLORATION

BY

MASAMI HAYAKAWA

GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Hisamoto-cho, Kawasaki-shi, Japan

1 9 5 1