

B. f. IV.

地質調査所報告第156號
地震探鑛反射法の研究

——茨城縣稻敷郡における研究調査を中心として——

金子徹一

地質調査所

昭和28年3月

地質相談所

550.834.5(521.22) : 553.981

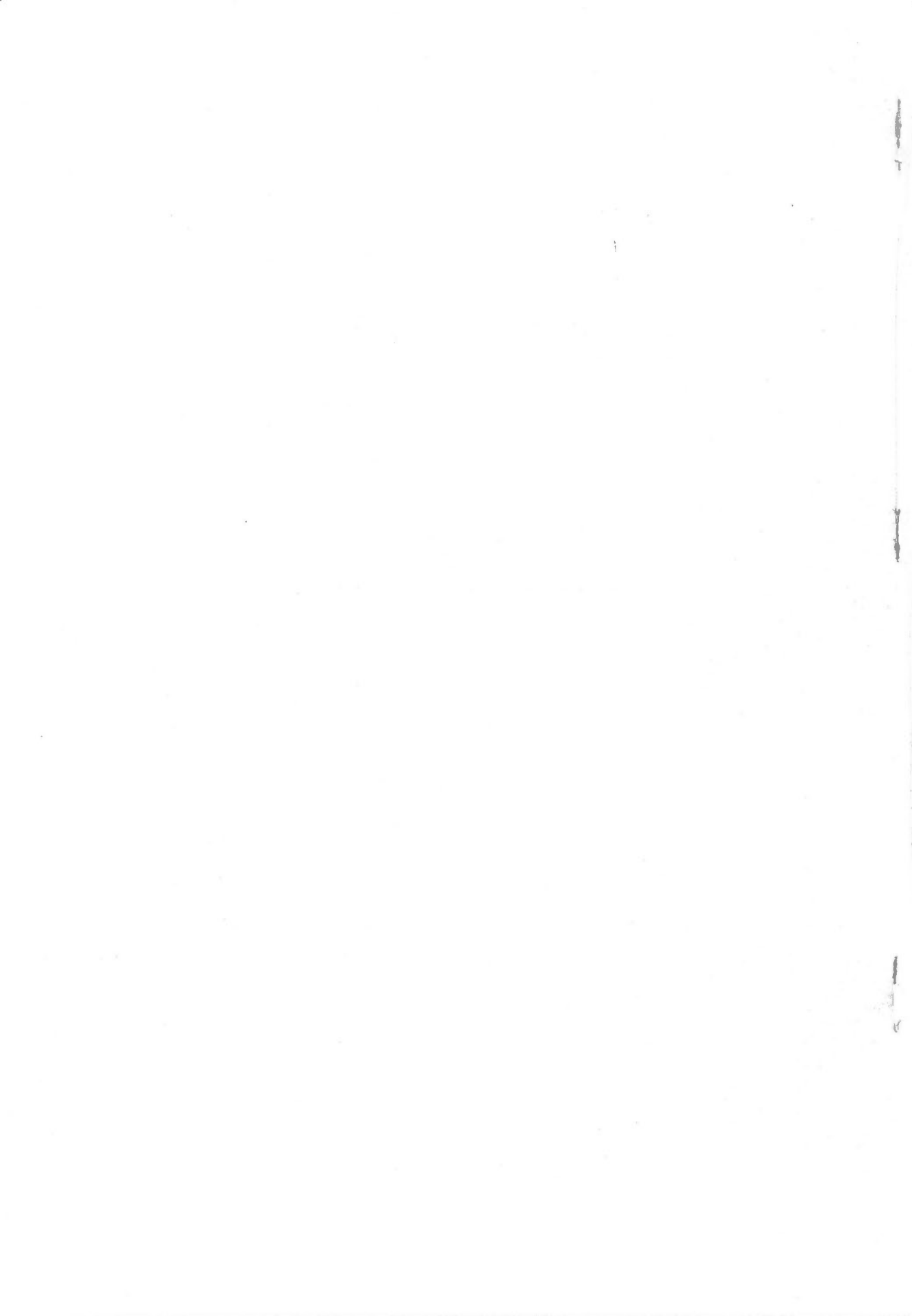
地質調査所報告

所長 三 土 知 芳

地震探鑛反射法の研究

——茨城縣稻敷郡における研究調査を中心として——

通商産業技官 金 子 徹 一



目 次

I. 序 論	1
I.1 研究の目的および計画	1
I.2 反射法の分析	3
II. 現地作業	5
II.1 期間および調査員	5
II.2 地形および地質	5
II.3 測線および爆発点	6
III. 反射法の研究	6
III.1 観測器械	6
III.2 地表面近く of 速度分布と推定された地下構造	9
III.2.1 地表面近く of 速度分布の概要	9
III.2.2 推定された地下構造	9
III.3 爆発条件と反射波との関係	11
III.3.1 火薬量による反射波顯出程度の変化	11
III.3.2 爆発深度と反射波との関係	12
III.4 受振器の配置と反射波および雑振動との関係	15
III.4.1 爆発点に対する Spread の位置	15
III.4.2 受振器の間隔	19
III.4.3 雑振動の問題	21
III.4.3.1 一般的なことから	21
III.4.3.2 8方向の実験	21
III.4.3.3 3角形の実験	22
III.4.4 群 設 置	27
III.4.4.1 一般的な説明	27
III.4.4.2 受振器間隔と方向性	28
III.4.4.3 群設置の実験	30
III.4.4.4 群設置における受振器の間隔	33
III.4.4.5 群設置の結合法について	34
III.5 解析法について	36
III.5.1 一般的なことから	36
III.5.2 遠隔配置の場合のチャート	37

IV. 結語39

Résumé (in English) 1

地震探鉱反射法の研究

— 茨城縣稻敷郡における研究調査を中心として —

通商産業技官 金子 徹 一

I. 序 論

I.1 研究の目的および計画

米國をはじめ諸外國で、反射法が油田の地質構造調査において大きな成果をあげていることは、今日では一般によく知られている。わが國では、昭和14年日本鉱業株式会社がハイランド型反射用地震探鉱器を輸入して以来、すでに14年になる。ことに戦後は國內産の反射用地震探鉱器も製作され、反射法が石油調査に広く利用されるようになった。しかし、その成果についてみると、諸外國の如く著しいものは今日までみられていないのが実情である。その何よりの原因としては、まず第1に、わが國の地形および地質構造が大陸にくらべて複雑であり、その規模も小さいことがあげられている。反射法はその性質上、記録紙上での各成分の位相の揃いをもととして反射波の顯出をさがすのであるから、地形・地質が複雑であることは、たしかに適應性の点で不利な条件である。しかし、諸外國でも、かならずしも条件のよいところばかりあるわけでもなく、たとえば地層の傾斜の急なところなどでは受振器の配置を工夫などし、いろいろ研究されている。

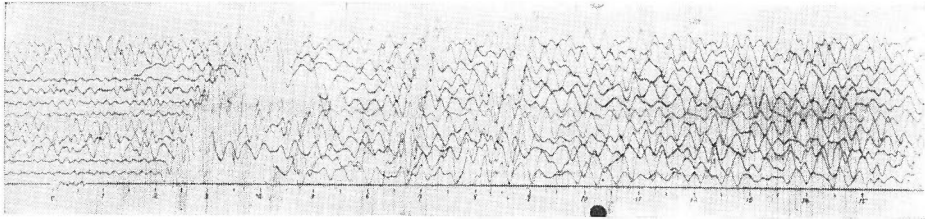
上記のような困難はあるにしても、この困難は克服しなければならない。そのためにまず何よりも反射波の顯出できる記録をとることが第1である。記録の上で反射波かどうかという判定に当つては、かなり記録を読む人の主観がはいるのが常である。第1図の上の記録は誰がみても反射波であると認められるものであるが、下の記録では反射波の判定は困難であり、記録を読む人の熟練を要するとともに、その人の主観がかなりは入り、誤りをおかす場合がしばしば起る。この場合に、次のことは重要である。すなわち、反射波の顯出のよくない場合、一般に、精度が悪くなるのであるが、この場合の精度は、反射層の深さの誤差、あるいは傾斜の角度の誤差としてあらわれるばかりでなく、反射層の存在に対する信頼性の問題に關することがらなのである。

したがつて、反射波の存在が記録上で客觀的に認められるような記録をとること、これが今日、反射法の研究における根本問題である。

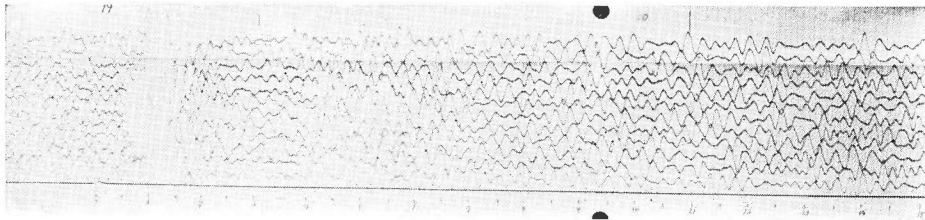
反射法における個々の研究テーマについては、次節にのべるように非常に多方面のことがら

を含んでいるのであるが、このたびの研究調査に当つては、費用・期間・使用する器械、研究者の能力などを考え合わせて、次のように研究の計画をたてた。

1. よい記録（反射波の存在が客観的に認められるような記録）をうるために、どのような研究テーマをまず第1にとりあげ、今後どのように進めて行けばよいか、この第1歩として広



よい記録



悪い記録

第 1 図

い範囲の問題にふれることにした。したがつて、つつこみ方の足りない点が多い結果となつたが、その点は今後引き続き行ひ予定である。

2. 問題の分析を簡単にするため、反射波のでやすい、地下構造の比較的簡単と考えられる場所である茨城縣稲敷郡を調査地として選んだ。この地域は昭和18年帝國石油株式会社で天然ガス調査のために、ハイランド型反射用地震探鉱器を用いて屈折法を実施したが、その際、反射波が非常に著しく顯出された。しかも、北部の洪積台地附近では良好であるのに、南部の沖積地(水田および濕地帯)に行くに従ひ、反射波の顯出が不良になることが知られていた^{註1)}。

3. 多くの研究テーマの中で、受振器の配置、とくに群設置法(Group-set)と、反射波の顯出をさまたげる雜振動の性質については、特に力を注ぐことにした。また研究調査の進行中測線の南部では、爆発点に対するSpread(展開)の位置が反射波の顯出に深い関係のあることがわかつてきたので、この点にかなりの時間をさいた。

註1) 當時の記録は紛失してみられなかつたが、調査擔當者帝國石油株式会社技師兵頭盛也氏の話による。

I. 2 反射法の分析

われわれが反射法を研究するとき、まず今日の反射法の作業の分析、地質学・地球物理学その他、関連する科学・技術との関係について、考え方がよく整理されていることが必要である。ここに、反射法の分析について簡単にのべておこう。

作業は大別して次の3つに分れる。

1. 爆発作業
2. 地震波の受振(捕捉)
3. 解析

これら作業について研究テーマをあげると

1. 爆発作業

1.1 爆発孔作成(試錐作業)

1.2 発火作業

1.3 地震波の発生

1.3.1 爆発の仕方

1.3.1.1 単1孔爆発

1.3.1.2 多孔爆発(同時・段発)

2. 地震波の受振

2.1 受振の方法(受振器の配置)

2.1.1 爆発点に対する Spread の位置

2.1.2 受振器の間隔

2.1.3 単設置(Single-set)と群設置(Group-set)

2.1.4 混合(Mixing)

2.1.5 地面と受振器との関係

2.1.5.1 受振器を地面上におく

2.1.5.2 受振器を地面下におく

2.1.5.3 受振器を振り棒上におく

2.2 受振装置

2.2.1 受振器

2.2.2 増幅器

2.2.2.1 増幅作用

2.2.2.2 フィルター

2.2.2.3 自動制御作用その他

2.2.3 記録装置

2.2.3.1 オッシログラフ

2.2.3.2 刻時装置

2.2.3.3 写真装置

2.2.3.4 その他

3. 解析

3.1 媒体（地層）形式

3.1.1 $V = \text{const}$ ただし V は地震波の速度

3.1.2 $V = f(z)$ あるいは $V = f(t)$ z は深さ, t は走時

$V = a + bz$ その他

3.1.3 中点法その他

3.2 計算図および計算器械

以上作業の分析過程で捉えられる研究テーマについて項目だけをあげてみた。このほかに、基礎的な、従つて、ほとんど地球物理学の研究テーマとして、波の傳播に関する問題がある。

1. 媒体の力学的性質

1.1 完全弾性体と粘弾性体

1.2 均質性と不均質性

1.3 等方性と不等方性

1.4 粒子性

2. 媒体の地質学的性質

2.1 水成岩（頁岩・砂岩・礫岩など）、

火成岩（変成岩）

2.2 表土層（低速度層）

基盤

3. 媒体の力学的性質と地質学的性質との関係

以上非常に形式的に反射法に関するテーマをのべてみた。項目のみを記述してあるので、ことに専門外の人には理解されにくいと思うのであるが、筆者が反射法の研究をどのように考えているか、その骨組みだけは理解していただけたらと思う。後日機会があればさらに総括的なものを発表したいと思つている。

ここで、特に最後の項について一言のべておきたい。すなわち、それは反射層の地質学的性質のことである。この種のことがらは、物理探鉱一般についていえることで——たとえば、岩石の比重（重力探鉱）、磁性（磁力探鉱）、電気抵抗および起電力（電気探鉱）など——岩石の物理性と地質学的性質との関係の問題の1つである。現在、石油・石炭の探鉱技術が地質学的知識を基としている限り、反射層の地質学的性質との関係をしらべる研究は、反射法が探鉱技術であるための根本問題である。

II. 現地作業

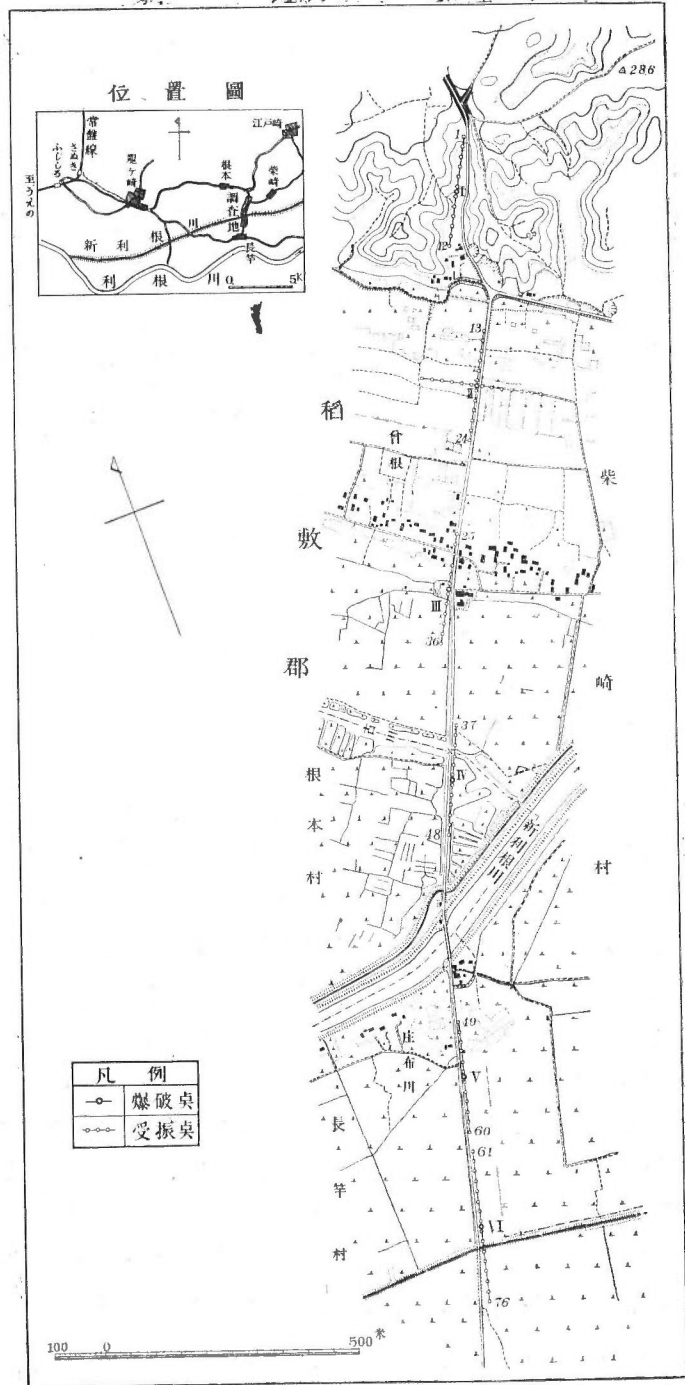
II.1 期間および調査員

作業は前後2回に分けて実施した。すなわち、昭和26年11月15日より12月4日、および翌27年2月26日より3月22日までである。

作業の大半以上参加した者は筆者のほか、に村岡秀記、南雲昭三郎、細野武男、前後いずれかに参加したものは森喜義・小尾中丸・小尾五明・坪井清吉・須田芳朗で、爆発孔の作成作業は技術部試すい課山崎満壽雄ほか、測量は同測量課福吉長雄が担当した。

II.2 地形および地質

調査地は前にも述べた如く茨城縣稻敷郡で、常磐線佐貫の東方15 km の位置にあり、利根川の北岸にある長竿村から柴崎村に向う南北に走るバス道路に沿った地域である(第2図参照)。この地域の



第2図 茨城縣稻敷地方地震探鉱研究調査地形図

大部分は利根川の沖積地で、水田および濕地であるが、北部には東西に洪積台地が横たわり、主として砂からなり、泥の薄層を挟みロームで被われているが測線の1部はその台地上にもとられている。従つて、地形はほとんど平坦で、北部でわずかに 20~30 m の台地になつており、また中央を東西に新利根川が流れている。

II. 3 測線および爆発点

測線は第2図でわかるように、ほとんど南北に走る道路に沿つており、北から南に I~VI, 6ヶの爆発点がとられた。各爆発点間の距離はまちまちで最長 580 m, 最短 300 m, 測線の方向も地形上とりやすいように多少南北方向からふれている。

受振点間の間隔は、特別の場合を除き 20 m にとり、群設置以外では振子棒^{註2)}を用いた。

III. 反射法の研究

III. 1 観測器械

この研究調査に用いた観測装置は、昭和24年6月、当部が Seismograph Service Corporation (S. S. C.) から購入した12成分反射用地震探鉱器1式である。この器械についての詳しい性能・常数などについては、目下研究中のものも多く、後日それぞれの担当者から報告されるであろう。次に、後の記述のために必要な程度に要点を記しておこう。

受振器 動線輪型のもつとも普通の型の受振器である。感度は 50 \sim で 0.4 ボルト/カイン、自己振動周期は 30 \sim 、減衰常数 $h=0.55$ ^{註3)}である。

増幅装置 増幅器の1成分の配線図は第3図に示してある。図から判るように増幅・フィルター・自動制御 (A.V.C.)・混合 (Mixing) の4つの性能を持つている。

受振器は第3図の左側の入力端子に接続され、これは入力トランスを経て真空管 1273 により増幅される。次に低周波濾波器で低周波は阻止され、さらに同じく真空管 1273 で2段目の増幅が行われる。これは高周波濾波器につながれ、高い周波数の波は阻止され、次いで 7N7 で3段目の増幅が行われ、ふたたび 7N7 で終段の増幅を受け、出力トランスを経て記録器中のオシログラフに接続される。

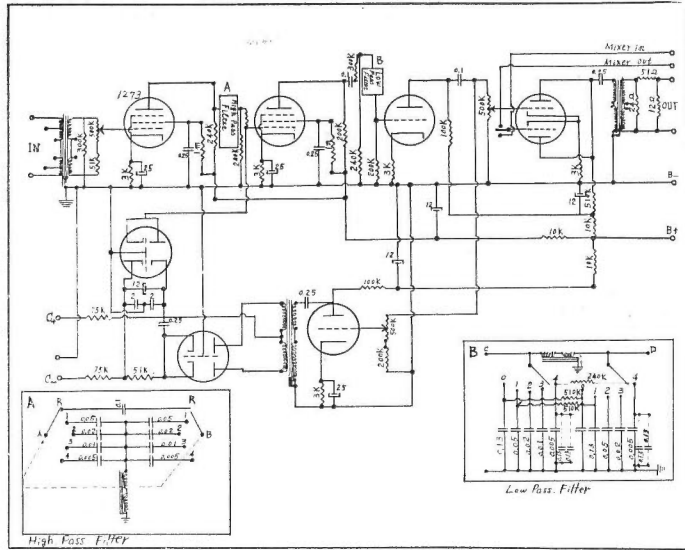
低周波濾波器および高周波濾波器は第3図に示すように、ともに L-C 型で、その総合特性 (周波数変化に対する入力電圧と出力電圧との関係)は、第4図に示すようなものである。

自動制御^{註4)}は Diode Shunting System と呼ばれるもので、一定の値の定常波の特性は第5図に示す通りである。すなわち、その働きを簡単に説明すると 7A6 (中央にあるもの) の2つの2極管の陽極・陰極に、それぞれ反対の電圧 (3~7 V 程度) が加えられており、したが

註2) 振子棒: 濕地・水田などのように受振器のすわりの悪い所では地中に鉄棒を打ちこみ、その頭に皿形の台をおいて、その上に受振器をおく。こうしたものを振子棒と呼んでいる。ここで用いた鉄棒の長さは 50 cm である。

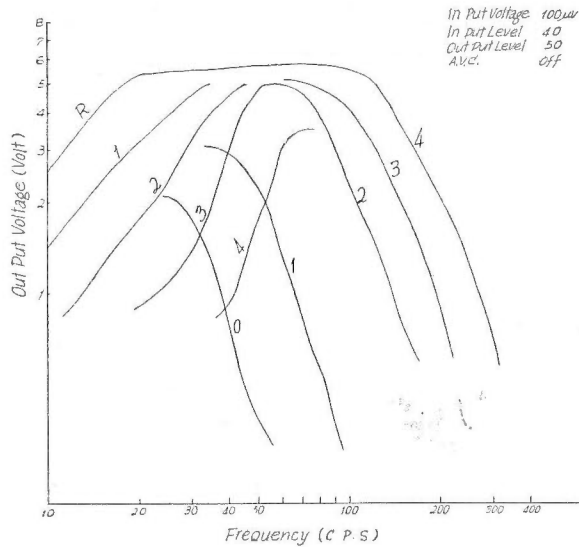
註3) これらの常数は當部試験研究課第3試験係の測定による。

註4) 自動制御を通常 A.V.C. あるいは A.G.C. といっている。



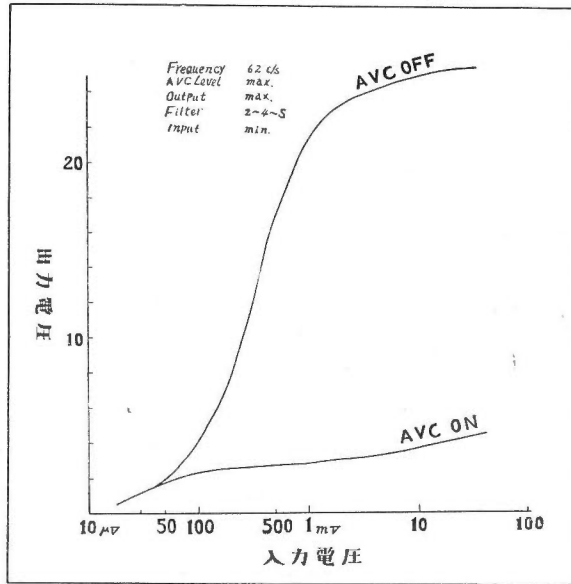
第3図 増幅器配線図

つて、この状態では2段目の増幅管 1273 のグリッド，リークとして 7A6 を考えると，そのインピーダンスは，ほとんど無限大である。



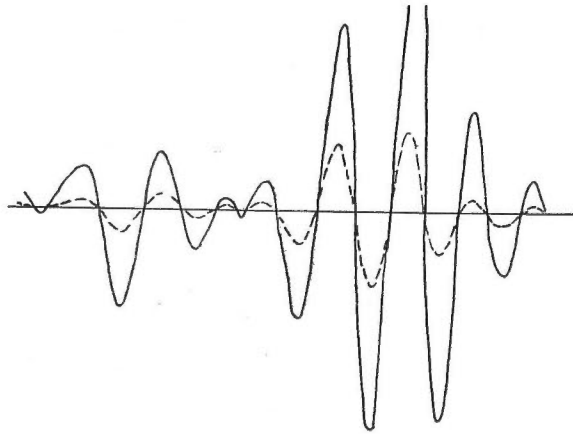
第4図 フィルターの特性

ある一定以上の入力電圧がはいると，自動制御部門にはいつた電圧は，増幅・整流されて上記の 7A6 の陽極・陰極にかかっている反対の電圧を打ち消すように働き，グリッド，リークのインピーダンスは数百 kΩ に低下し，従つて，全体としての増幅度は自動的に低下するわけである。



第5図 自動制御の特性

反射波は1種の衝撃波と考えられるので、当然時定数が問題になるわけである。この値は、上記の逆向きに加える電圧により変化するものであり、実験の結果によれば3Vの場合0.25 sec. 7.5Vの場合1.00 sec. である。このことは、浅い層からの反射波をとるためには時定数



第6図 自動制御 on と off との比較
 実線が on, 點線が off である。

は小さい必要があり、したがって、加える電圧も小さくしなくてはならない。このほか、自動制御装置については研究すべきことは多いが、担当者より後日発表される予定である。なお、参考のために自動制御したものと、しないものと比較した図を第6図にかかげておく。

混合装置は並列に接続されている2ヶの最終段の7N7が、スイッチの切り換えによつて、その1つの7N7に隣りの成分の出力の半分が加えられて一緒になつて、出力トランスを経てオッシログラフに描かれるようになってゐる。その関係を模式的にかけば第7図の如くである。すなわち、このような混合形式では、たとえば、第3の成分の出力では第2の $\frac{1}{2}$ と第3の $\frac{1}{2}$ との和であつて、第2と第3を除く第1, 4, 5, …の如き成分には全然関係しないわけである。この点は抵抗接続式のものとは異なる点である。

記録器械その他 記録装置はオッシログラフ12成分・時刻線用音叉・光源・カメラ装置などからなつてゐる。オッシログラフの常数は、感度 $3.5 \times 10^{-5} \text{A/mm}$ (50 \sim)、内部抵抗 14Ω 、減衰常数 $h=0.47$ ^{註5)}である。

以上のほか、電源・通信・発火器など附属した装置があるが、次からのべることがらに直接関係がないので省略する。

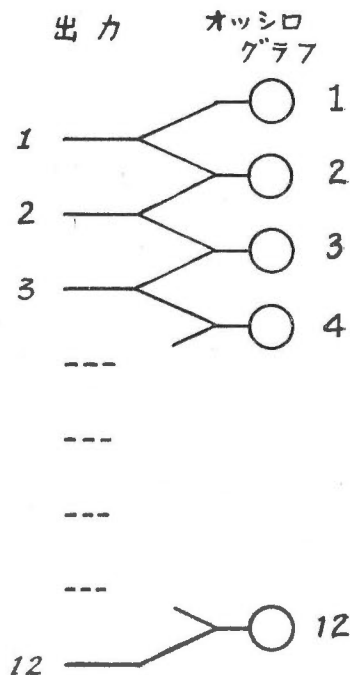
III. 2 地表面近くの速度分布と推定された地下構造

III.2.1 地表面近くの速度分布の概要

反射記録から読みとられる初動時刻、および表層補正用の小屈折観測から求められた地表近くの速度分布は次のようである。s.p. I^{註6)}からs.p. IVの間では、極く薄い(s.p. IIIでは0.8m, s.p. VIでは2m)速度300m/s内外の表土の下は、1,600m/s \sim 1,700m/sの地層がかなり厚く分布している。この層は周囲の地質から推定して恐らくは洪積層であろう。s.p. Vおよびs.p. VIでも、表面2 \sim 3mに300m/sの層が存在することは、前の地域と同様であるが、その下は1,300m/s内外の値を示し、その下に1,700m/sの層の存在が予想されるが、確認することはできなかつた。1,300m/sと1,700m/sの層の地質的の区別については、もちろん明確なことはわからないが、沖積層と洪積層の差異によるものと推定される。

III.2.2 推定された地下構造

反射走時および時刻差(Step-out)^{註7)}から解析された結果によると、第8図の如き地下構造が推定される。すなわち、深度700m附近にもつとも顕著な反射層があり(今後、 L_1 層と呼

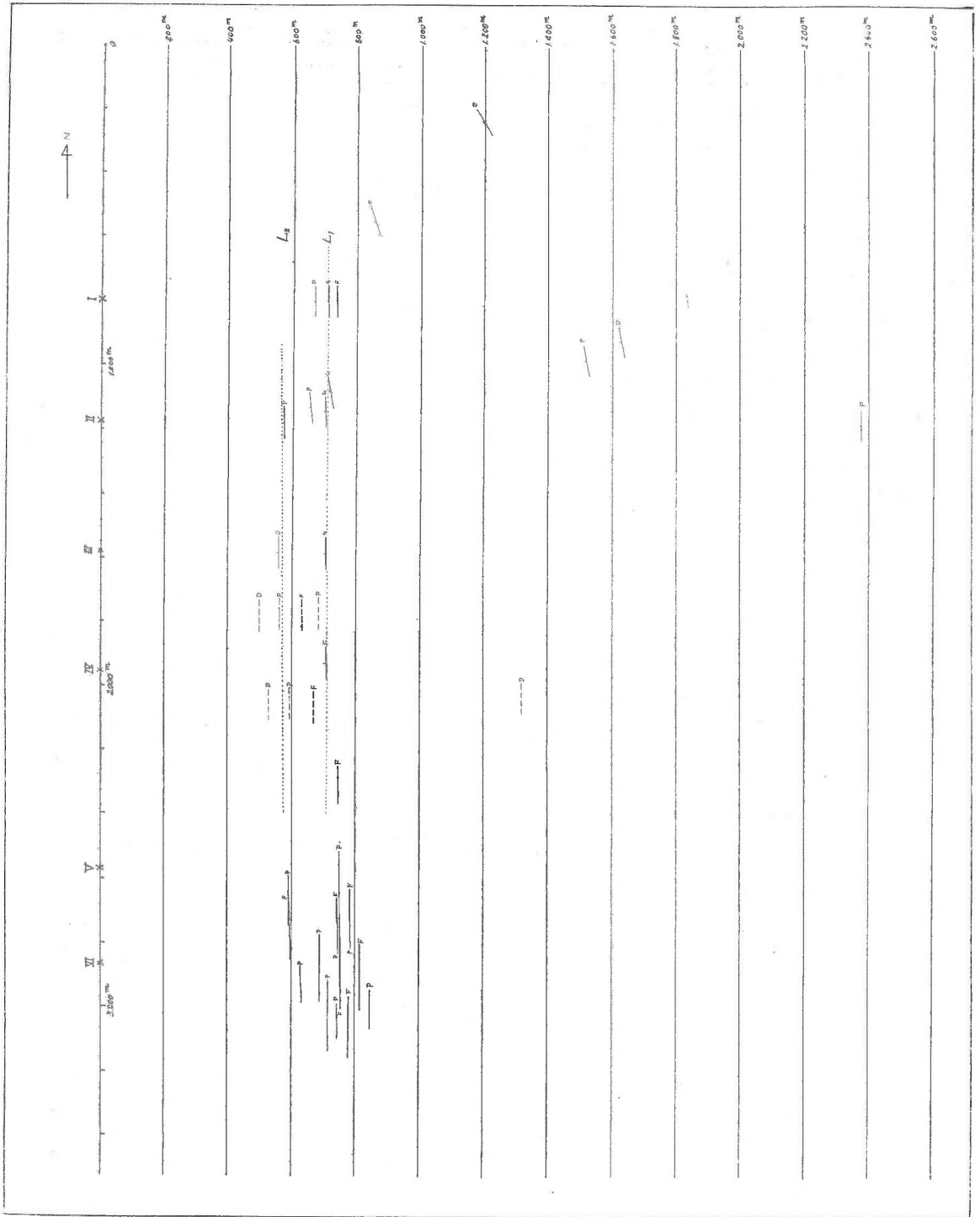


第7図 混合の関係図

註5) 前と同様當時第3試験係の測定による。

註6) S.P. は Shot Point (爆撃点) の略。

註7) 時刻差(Step-out)とは、ある距離において、ある受振器における反射波の位相差の示す時間で、通常「T」の符號であらわす。



第 8 图 地下構造断面图

ぶことにする), それよりも少し浅く 600 m 附近にもかなりはつきりした反射層がある(L_2 とする)。

L_1 層より深い所の反射波は, s.p. I および s.p. II において, L_1 層下に北から南への傾斜で深度 800 m・1,200 m・1,600 m・2,400 m 附近に反射層がみられる。もちろん, これだけの結果から断定することはできないが(顯出の程度が P.D. であるから), L_1 層が不整合面であるように思われる。なお, L_1 層が地質学的にも相当大きな層の不連続面であろうという予想は, フィルター (R-O) の記録 (第 15 図) で, L_1 層の反射波がことに著しいことから推察される。

III.3 爆発条件と反射波との関係

III.3.1 火薬量による反射波顯出程度の変化

火薬量により発生する波のエネルギーに変化があることはもちろんであるが, 反射波の周波数頻度分布も薬量に関係し, 一般に薬量の大きい方が周期が短かい²⁾といわれている。しかし, 結論的には, これらの総合したものが反射波の顯出とどのような関係にあるかという点が問題である。

第 1 表

s.p. 番号 薬量	I	II	III	IV	V	VI
225 gr		P			NR	
450	F	G	NR	NR		
900	F	G	P	P	NR	NR
1,350	G		F	F	P	NR
2,700					P	NR

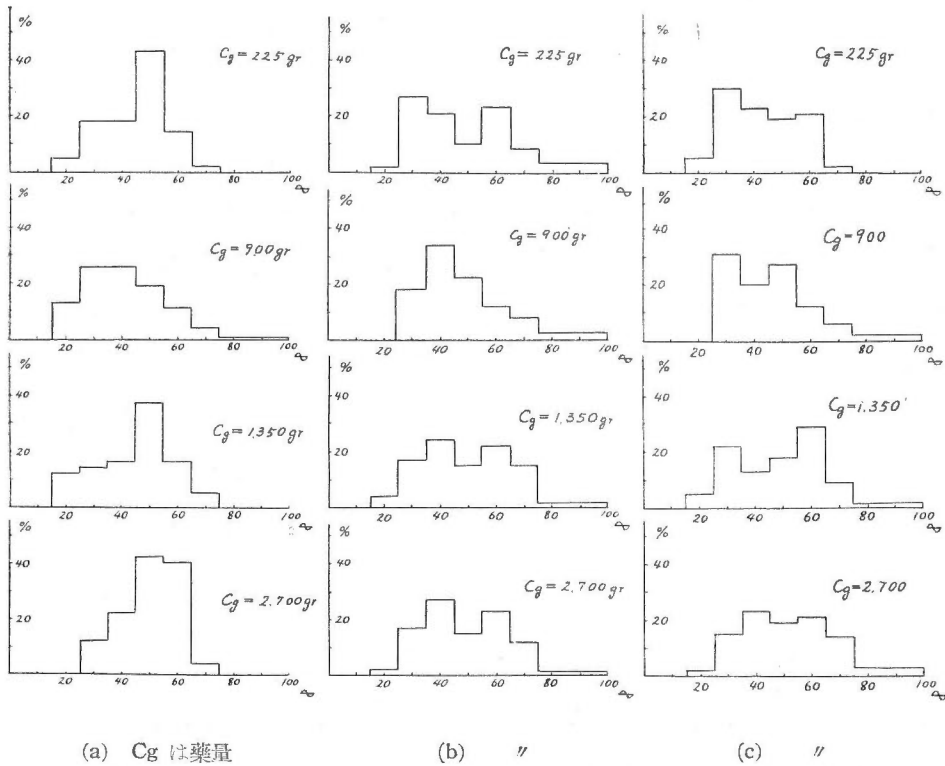
註) 爆発孔深度はいずれも約 30m。

G.F.P. は反射波の顯出程度を示したもので, 優・良・可の程度をあらわす。NR は反射波が認められなかったものである。比較された記録はみな両側配置のもののみである。

L_1 層について火薬の量による反射波顯出程度を総合的に示したものが第 1 表である。表で見られるように, 両側配置^{註8)}では一般に測線の南に行くほど (s.p. I→s.p. VI) 反射波の顯出が悪くなるが, また同時に薬量が 200~1,350 gr の範囲の量では薬量が多いほど顯出は良好である。南に行くほど反射波がとりにくい原因としては, 前にものべたように一般に低速度層が厚くなるとともに, 1,300 m/s の層があらわれてくることと関係があるものと考えられる。すなわち, この場合, 波の発生と地質条件との関係および反射層から反射した後, 地下より地表に至る間の反射波のエネルギーの減衰との 2 つの問題とに分けて考えることができる。しかし, そのいずれであるかは今回の実験ではわからない。そのいずれに原因があるにしても, 火薬の量が大きくなるに従つて, よい反射波が顯出される場合のあることが確認された。第 9)

註8) III.5.1 の項参照 (P. 36)

図は爆発薬量による周波数分布を示した1例である。記録は s.p. V の両側配置で、(a) 測点番号 55, (b) 測点番号 57, (c) 測点番号 59 の各成分の記録について初動より 0.6~1.6 sec. の1秒間の範囲について計算した^{註9)}。この例では、2-3のフィルターを用いているので、火薬の量と発生する波の周波数頻度分布との関係を厳密に求めることはできないが、もし両者の間に著しい関係があるとすれば一定の傾向が、こうした記録にもあらわれるであろうと推察される。しかし、第9図の(a), (b), (c)の3つの場合については、傾向を認めることはできなかった。以上のことから、少なくとも今回の実験では、一般にいわれているように、薬量の



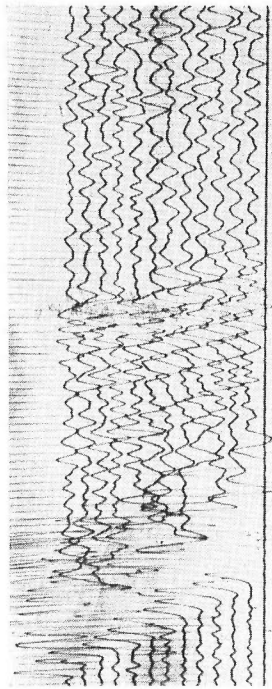
第9図 爆発薬量変化と地震波周期との関係

大きい時、周波数が小さい波が観測される結果を認めることはできなかった。

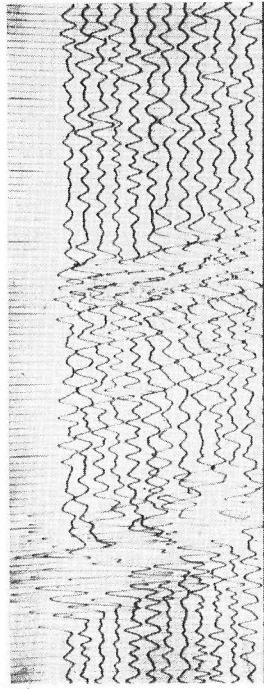
III.3.2 爆発深度と反射波との関係

一般には爆発深度が大きい場合の方が小さいときよりも、発生する波の周波数は高いといわれている。しかし、爆発深度が変わることは、爆発点の周囲の地質が変わることなので^{註10)}複雑である。従つて地面という自由表面から爆発点までの距離(深さ)と、反射波の顕出との関係を実験的に確かめることはむづかしい。

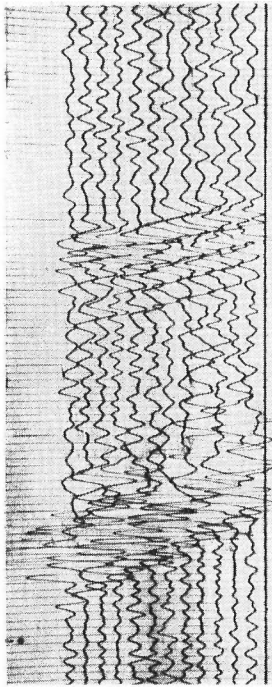
註9) 頻度を求める方法は1つ1つの波の周期をはかる原始的な方法である。
 註10) 同じ地質でも深くなれば、弾性的には変化があることが考えられる。



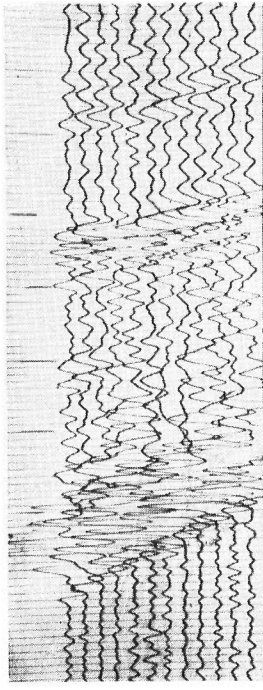
(1) 深さ 20 m



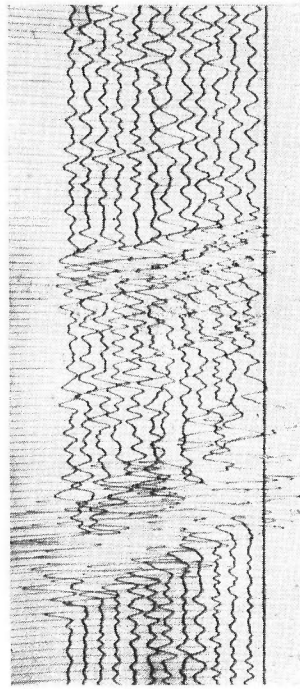
(2) 深さ 12 m



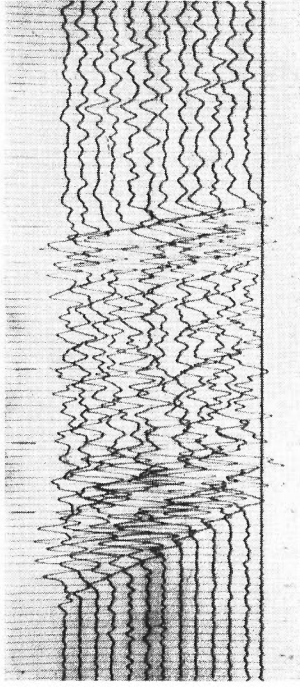
(4) 深さ 11 m



(5) 深さ 8 m



(3) 深さ 14 m



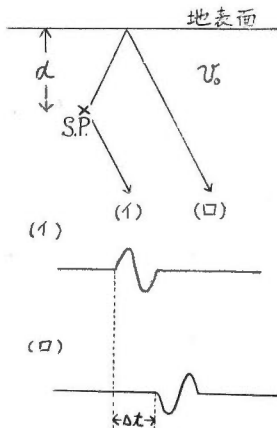
(6) 深さ 5 m

II

I

第10図 爆発深度と反射波との関係(記録)
爆発点 V 薬量 1,575 gr ファイルター 2-3-5 爆発點 Spread の中心の距離 600m

爆発深度と反射波との関係をしらべるために、爆発孔Vを利用し、Spread は s.p. V より南方約 800 m にとり、爆発深度 20 m より 5 m まで 3m 間隔で記録をとつた。地質は砂質粘土でほとんど一様である。第10図はその記録である。爆発点の深さが 20 m から 11 m までの記録にはほとんど差異は認められないが、8 m では僅かに変わり、5 m になると高い周期の波の重なり合わせがみられる。しかし、いずれの記録でも、 L_1 層の反射波の顕出は良好である。



第 11 図

る。

次に深さ 20~11 m までの 4 枚の記録が、ほとんど同一であるということについて少しく考えてみよう。爆発点の深さを d 、表面近くを一定として v_0 とする。爆発点より出た波は、(イ) 直接下方に向うものと、(ロ) 上方に向い地表面で反射して下方に向うもの、との 2 種類が考えられる。この場合、(イ)と(ロ)とに逆の位相を示し、時刻差 $4t$ は $2d/v_0$ である(第11図参照)。いま、 $v_0=300$ m/s、 $d=15$ m とすると時刻差 $4t$ は 0.1 sec. 程度になる。したがって、地表で反射する(ロ)のエネルギーが、(イ)のエネルギーに対して問題になる程度であるならば、当然受振点での記録の上に干渉がみられるはずである。このことは、水中爆発の場合、水面での反射につ

いては記録がとられている例もある³⁾。また、地表附近の速度が一定で完全弾性体であるとするれば、地表面での反射エネルギーは入射面が非常に小さい場合には位相が反轉し、ほとんど全反射になり、したがって、(ロ)のエネルギーは(イ)のそれとほとんど同じになるわけである⁴⁾。

第10図の 4 枚の記録(深さ 20~11 m) がほとんど同一であることは、(イ)のエネルギーに対して(ロ)のエネルギーが、ほとんど問題にならない程度に小さいことを示すものと考えられる。なぜなら、もし(ロ)のエネルギーが相当大きいならば、記録上で(イ)と(ロ)との干渉が起るはずである。爆発点深度 d が変るにしたがい、 $4t$ が変り、もし、 d が 3 m ずつ変るとすると $4t$ も 0.02 sec. 程度変ることになるから、当然干渉の様相が変り、記録に変化がなくてはならないからである。

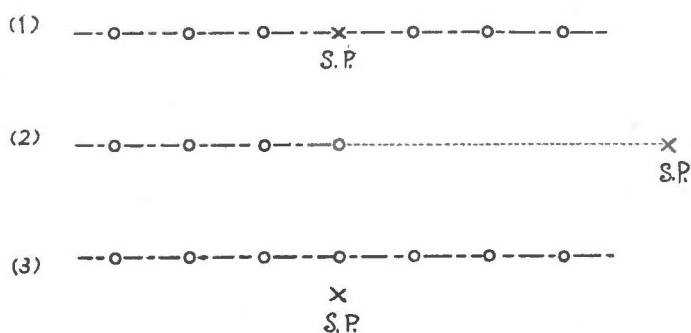
以上の考えから、(ロ)に当る地表面での反射エネルギーは、(イ)のような直接下方に向うエネルギーに対して、問題にならないほど小さいものということが推論できる。これは、地表附近の地層の垂直速度分布が実際には複雑であること、また地層が粘性を有することなどに原因するものと考えられる。

終りに、この実験は 1 カ所において行つたものであり、したがって、上のことがらの一般性については今後の研究に俟つことにする。

III.4 受振器の配置と反射波および雑振動との関係

III.4.1 爆発点に対する Spread の位置

爆発点に対する Spread の相対的位置は、反射層の傾斜・連続性・表土層（低速度層）の状態・表面波その他妨害波の発生状況など、いろいろの要素に関係するものと考えられる。受振器の配置の形式は、大別して3つに分けて考えると便利のようである。(1) 両側配置 (Split Spread)^{註11)}、(2) 遠隔配置 (Distance Spread)、(3) off-set 配置。両側配置は第12図(1)の如く爆発点の両側に受振点を配置したもので、作業上もつとも能率もあがり、計算の場合に



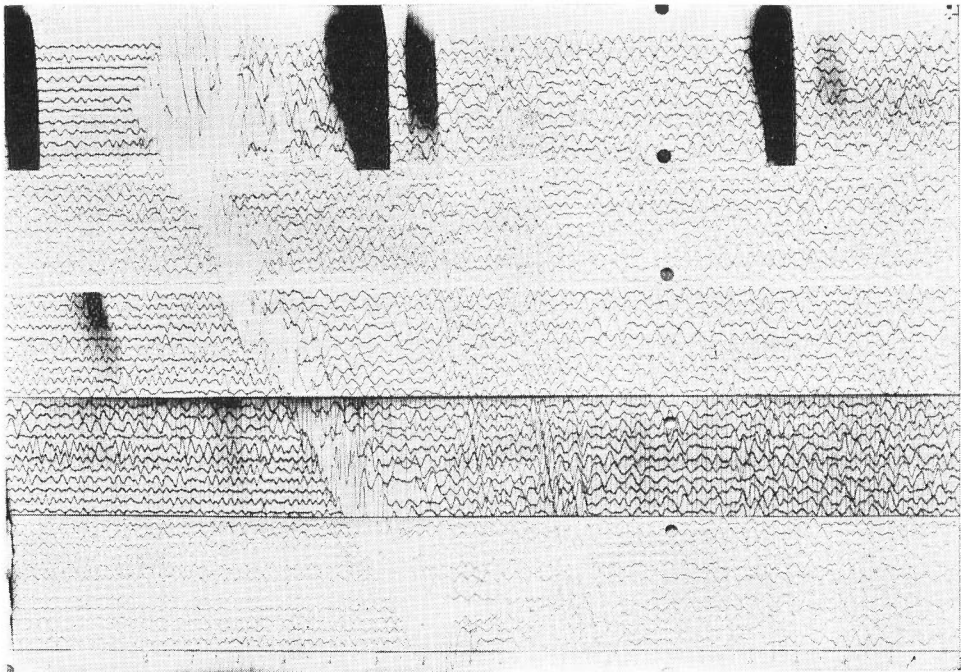
第12図 Spread の分類

も簡単であるので、もつとも広く用いられている。遠隔配置は Spread の延長上、ある距離の点に爆発点をとるもので、その距離は任意に変えることができる。off-set 配置は Spread の直線上からはずれた所に爆発点を設ける場合である。したがって、両側配置に相当する off-set の場合も、遠隔配置に当る off-set の場合もありうることは、第12図から容易に想像されるであろう。

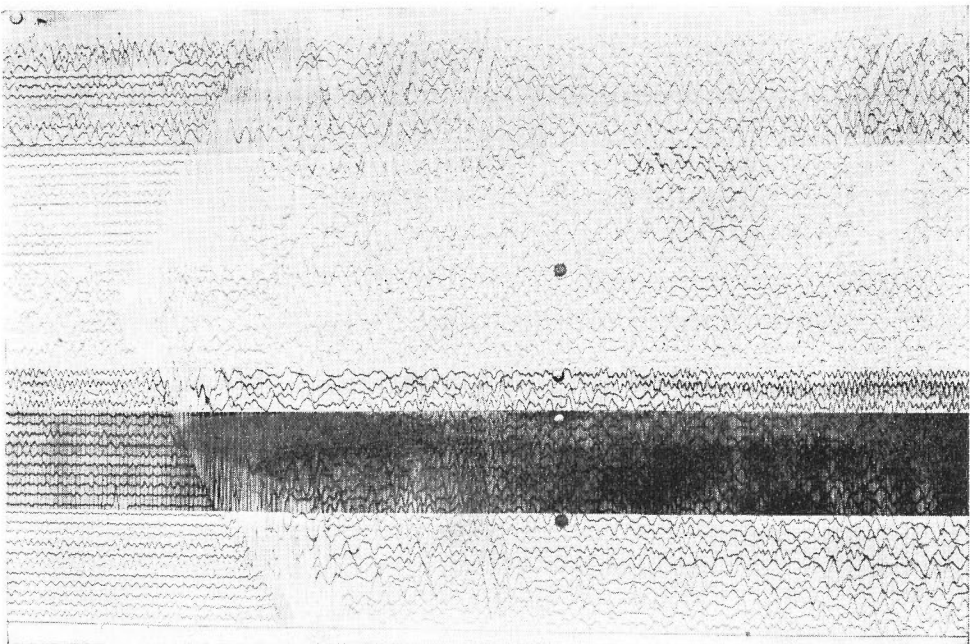
これらの配置形式の相違による利害得失については、教科書⁹⁾などにも述べられていることであるが、この度の実験では、まず良好な反射波をうることを目的として、両側配置と遠隔配置とを比較することにした。なお、off-set 配置についての実験は行わなかつた。

第13・14・15図は s.p. V および s.p. VI の両側配置・遠隔配置の記録を、爆発点を中心にしてつなぎ合わせたものである。第13図の記録を見ると、s.p. V の両側配置(12成分)の範囲では、反射波の顯出は不良であるが、s.p. V から 300 m ぐらい離れた所からは、かなり良好な反射波が認められる。また、第14図の記録では、s.p. VI 附近(両側配置)反射波はまったく認められないにかかわらず、200 m 以上の遠隔配置ではかなり良好な反射波が現われている。第15図は第13図の南半分と同じ位置の記録である。すなわち、前2者がフィルター

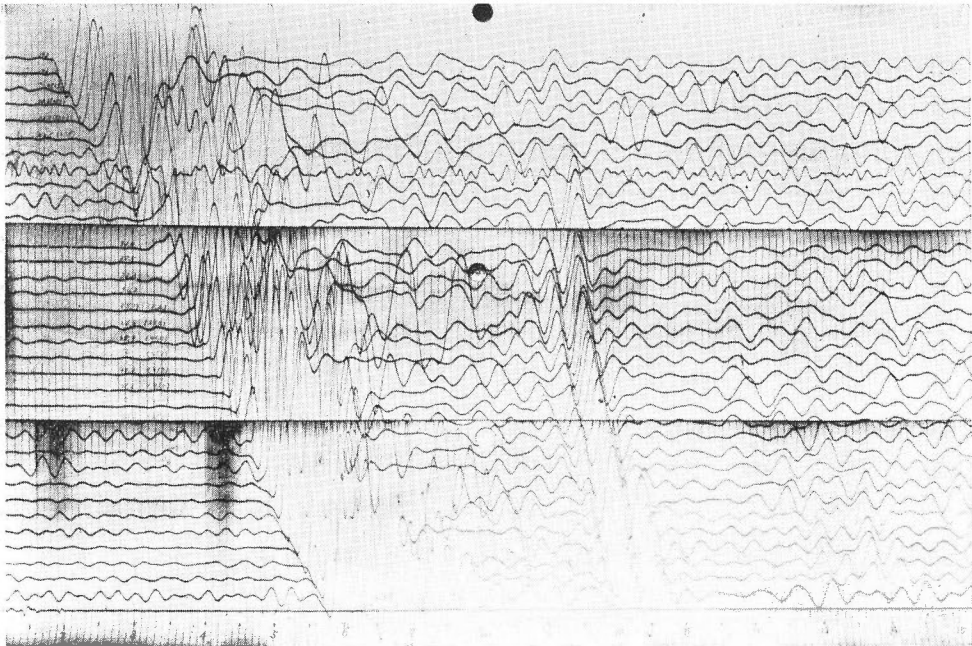
註11) Spread を展開と譯す人もいるが、ここでは配置とした。しかし、單獨に用いる場合には、通常そのまま Spread と呼ぶ人が多い。



第 13 図 記録 S. P. V



第 14 図 記録 S. P. VI



第 15 図 記録 S. P. V

2-3 に対して、R-O (18 \sim 23) を用いたものであるが、爆発点より 400 m 附近以遠で急に著しい反射波が見られ、その境が非常に明確であるのが特徴的である。以上の結果は要するに、爆発点と Spread の相対的距離が（したがって、Spread の形式により）反射波の顯出に対して、著しい関係を持つていることを示していることを物語っている。

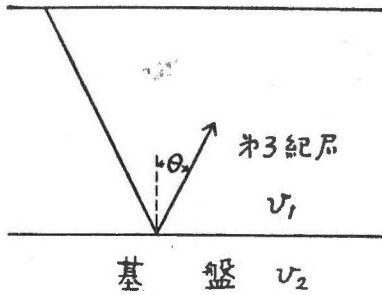
この原因について考えてみよう。第 1 に反射層の不連続による問題、第 2 に地表浅部の地層の影響、第 3 に反射波の入射および反射角の問題、第 4 に雑振動（妨害波）の問題に分類して考察してみよう。

s.p. V および s.p. VI の両側配置の記録の不良なことから、第 1 に考えられることは、丁度各爆発点下の反射層の反射条件の不良、たとえば、断層などが存在することである。しかし、s.p. V の直下の反射層については、s.p. VI の遠隔配置により、また逆に s.p. VI の直下の反射層については、s.p. V の遠隔配置により確めることができる（第 8 図）。この結果、s.p. V・VI の直下にも、他の地域と同様、良好な反射層の存在が確認された。

測線の北部、すなわち、s.p. I \sim s.p. III にくらべると南部は水田・濕地帯で低速度層も厚くなり、また低速度層の下の地層の速度も、1,600 \sim 1,700 m/s から 1,300 m/s に変化しており、一般に反射波をとる条件としては悪くなっていることは前にものべた通りである。この条件は、しかし、受振器の配置に関しては両側配置・遠隔配置のいずれについてもいえることがらである。たまたま、特に s.p. V および s.p. VI 附近の浅い地層の条件が悪いわけではないことは、s.p. V の爆発で s.p. VI の両側配置の記録をみても、逆に s.p. VI の爆発で s.p.

V の両側配置の記録をみても、わかることがらである (第 13・14 図)。すなわち、表面地層の条件の悪いことは南部一般についていえることで、それは爆発点に対する Spread の位置に関係しないことが結論される。

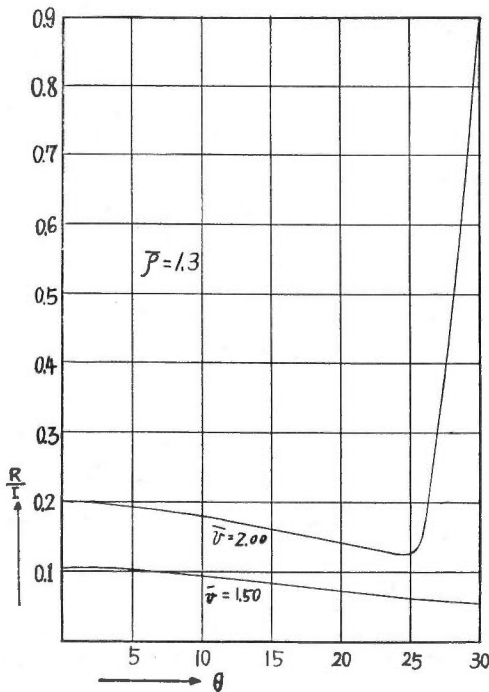
次に (3) の問題について考えよう。爆発点に対して Spread の位置が遠くなればなるほど、



第 16 図

反射面での波の入射・出射の角度は大きくなる。これは当然反射波と屈折波のエネルギーの分配に関する。いま、反射が基盤 (先第三紀層) から起ると考えて、その速度を v_2 、上の第三紀層を v_1 、また地層の比重をそれぞれ ρ_2 、 ρ_1 とする (第 16 図参照)。また $\bar{v} = v_2/v_1$ 、 $\bar{\rho} = \rho_2/\rho_1$ とすると \bar{v} は 1.3 km/s、 $\bar{\rho}$ は 1.5~2.0 の見当に考えてよかろう。入射波 (縦波として) の振幅を I、反射波 (縦波のみ考えて、

横波は考えない) の振幅を R とすると、その比 R/I は反射角 θ の函数である。第 17 図は



第 17 図 反射係数と θ との関係

$\bar{v} = 1.3$ $\bar{\rho} = 1.5; 2.0$ の場合の R/I と θ との関係を示す¹²⁾。この図で判るように、反射面が基盤であるような、弾性的に変化の著しい場合でも、 θ に対する R/I の変化はそう大きなものではない。ただ $\bar{v} = 2.00$ 、 $\theta = 25^\circ$ 付近でおこる顕著な変化は、全反射によるものである。第 8 図および第 13・14・15 図からわかるように、反射の顕出のできる、できないの境と思われる所での反射角は、大体 10° 以内であるので、全反射のことがらに関係しているとは考えられない。またもし、反射が第三紀層中でおこり、上の基盤の場合にくらべて弾性的の相違のより小さいときには、全反射になる角 (臨界角) はより大きくなり、また θ が大きくなるとともに R/I が小さくなる傾向は変わらないから、いずれの場合でも、反射波の入射および反射角に直接関

係があるという考え方は否定的である 註12)。

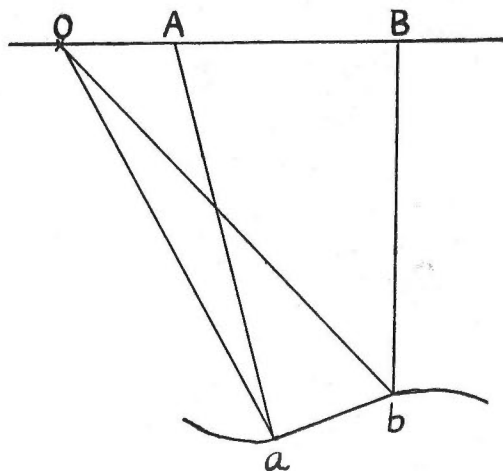
註12) 最近薄い高速度あるいは低速度の層の存在する場合の反射・屈折に関する研究が進められている。たとえば、宇佐美謙夫：高速度層がある場合の弾性波の反射・屈折について、地震、第 2 輯、第 5 巻、第 3 号、1952；イー・エス・ビエールゲン、アール・エム・エビナー・チエフ：地震波のさえぎり作用について (О СЕЙСМНУЕСКОМ ЭКРАНИРОВАНИИ) ソ同盟學士院報告、地理學地球物理學編第 14 巻、第 6 号、1950 に見られる。これらの結果によれば、上記のことは考えなおす必要があると思われるが、この點に関しては後日の機会にゆずりたい。

現在、筆者の考え方は、今回の実験で示された反射波の顯出と、爆発点に対する Spread の位置に関し、もつとも関係の深いことは、雑振動の問題である。しかしながら、雑振動の本質的なことがらについては、ほとんどわかっていない。従来、一般に反射波に対する妨害波として、各種の表面波・屈折波・乱反射波などが考えられている。そして、表面波の大きく発生するところでは、表面波の速度が非常に遅いので、爆発点に対して Spread を遠くするとよいといわれている。第 14 図で s.p. VI をはさんだ 100 m 以内の成分では、表面波らしいものが認められるが、その走時が早すぎるので表面波かどうかは確認されない。しかし、このような波が反射波の顯出を妨げていることだけは確かである。

以上のことを要約すれば、今回の実験で s.p. V. VI について爆発点附近の Spread では、反射波の顯出が非常に悪いが、爆発点から 200~300 m 以遠になると、ずつとよくなる事実があつたこと、その原因として、大体表面波等による雑振動の条件が変ることによるという考え方が 1 番有力である。

III.4.2 受振器の間隔

受振器の間隔として、単一設置 (Single-Set)^{註13)} の場合には、20. 30. 40 m の間隔がとられるのが普通である。この間隔をいかにえらぶかは地下構造の規模の大きさ、その傾斜の度合いが関係する。わが國のように (北海道地方は除いて) 地下構造の複雑なところでは、20~30 m 程度が望ましいようである。規模の大きな所では、1 つの Spread で長い測線がとれるという主として経済的理由から、40 m 以上が有利のようである。また、地層の傾斜の小さい所で傾斜法 (Dip Method) を用いる場合、受振器の間隔が小さいと、時刻差 Δt が小さいので、計算される傾斜角が誤差の範囲にはいつてしまう恐れがある。しかし、こうした場合には傾斜法でなく相関法^{註14)} (Correlation Method) が用いられるのが普通である。

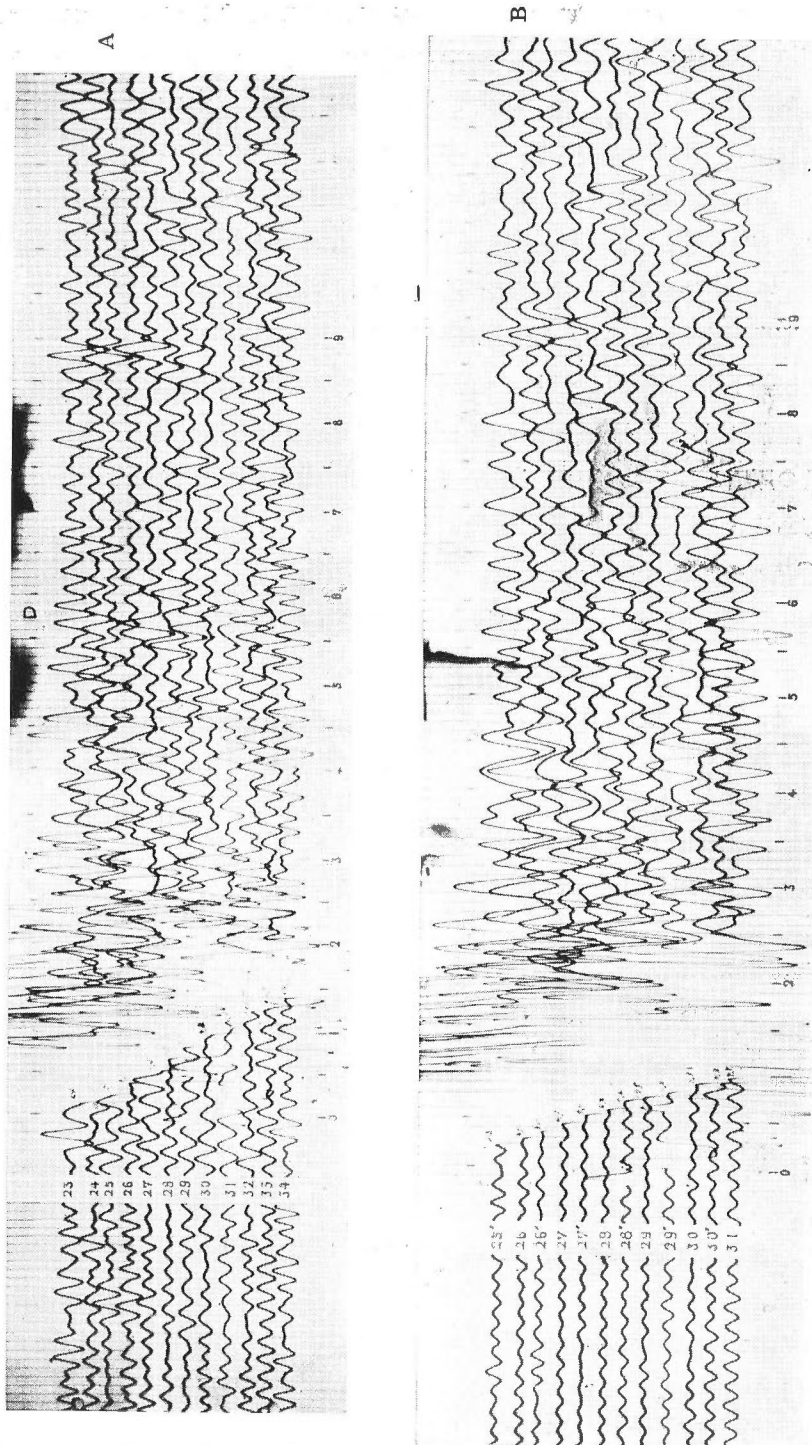


第 18 図

反射層が第 18 図のように、Spread の長さにくらべて小さい場合、すなわち、A. B の間隔が 1 Spread の半分ぐらいにしか当たらない場合には 1 Spread の長さを半分ぐらい、したがつ

註13) 總幅 1 成分に 1 個の受振器を結ぶ場合を単一設置 (Single-Set)、複数の受振計をむすぶ場合を群設置 (group-Set) ということにする。group-Set を Multiple Detection ということもある。

註14) Correlation Method は相関法と譯すより、對比法といった方がよいかも知れない。



第19図 別山地区調査における記録
左の数字は測量番号を示し、B のは中間の測點を示す。D は不確かな反射波の位置を示す。

て、受振器間隔も半分ぐらいに短かくしておく必要も考えられる（もつとも、地層の縮曲の1部の傾斜を知ることの意味があるかどうかは別であるが）。以上のことだけを考えると、受振器の間隔を充分短かくすれば、反射波の顯出が非常によくするように考えられるし、実際にはよくなる例もあるが、ほとんどよくなる場合もある。それは受振器のおいてある位置の土地の振動特性や、土地と受振器との相互の結合関係が複雑で、一様でないことから起るものと思われる。第19図はその1例である。この記録は昭和25年新潟縣別山地区で行われた調査のもので、記録Aの受振器間隔は20mである。Aにおいて0.55sec. 附近に不確実な反射波を認めたので、これを確めるために、受振器間隔をAの $\frac{1}{2}$ 、すなわち10mにとつて、測点番号25'から31の間にSpreadをとつたのがBである。そして、BではAで認められていた不確実な反射波は、ほとんどみられなくなつた。これは、記録Aで認められた反射波が実際は反射波でないものか、あるいは、反射波のエネルギーが、受振器を置いた土地の振動特性の不揃いなどから乱されたものであろう。この問題をもう少し立ち入つて考えるために、受振器の間隔と雑振動との関係をしらべてみよう。

III.4.3 雑振動の問題

III.4.3.1 一般的なことがら

地表における雑振動（Ground Noise）は、反射波の顯出の上に悪い影響を興えるおもな要因であることは、前にものべた所であるが、これに対する対策を考えるためには、まずその性質を知ることが第1の問題である。今まで地表の雑振動に対しては、いろいろの想像、たとえば表面波・屈折波・乱反射波など考えられているが、これらを確める実験はほとんど行われていない。もちろん、その性質を知るとは、その本質、すなわち、それがどのような法則性を持つか、つまり地表を往来する波であるとか、地下から入射する波であるとかといったことから、それが表面波とすれば、今日知られているレーリー、ラブ、M-2波などの性質を持っているかどうかである。

目標は以上のような本質的なことであるが、まず手はじめとして、現象的なことを整理することから出発しよう。

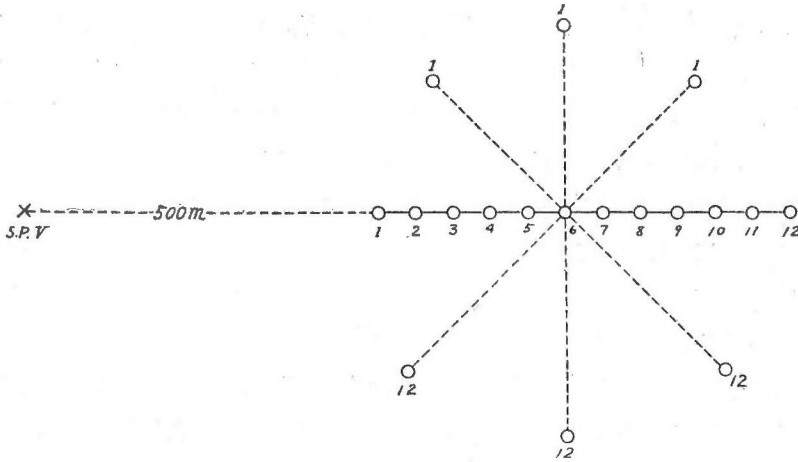
III.4.3.2 8方向の実験

爆発点とSpreadとの関係は第20図に示すようにとられた。爆発点はs.p. Vを使用し、薬量は450gr、フィルターは2—3、8方向の中心までの距離は500m、受振器の間隔50cm、Spreadの場所は水田で、冬期であるので水はなかつたがかなり濕つた状態であつた。実験は8方向について行つたのであるが、ここにはs.p. Vと1直線方向のもの（第21図A）と、直角方向のもの（第21図B）とを示した。

2つの記録を観察すると、ともに次のようなことが判る。爆発後0.5sec. までは各成分ともその位相が揃つて振動し、走時曲線をかくことも容易である。その後は、次第に各成分の位相がずれて振動し、走時曲線をかくこともできない。0.65sec. になると急に位相が揃い、またす

ぐくずれて行き、0.80~0.86 sec. の間でふたたび位相が揃い、またくずれて1.00 sec. で全位相が合っている。この後には位相のよく合うところに見い出されない。すなわち、現象的には地表の振動を2種類に分けることができる。

1. 6 m 以上の拡がりに、ほとんど同時に到達する波
 2. 極めて小さな(1 m 以下の)局所的因子による不規則な振動
- 1.は反射波(乱反射波を含めて)、分散した表面波・廻折波・屈折波などによると思われる



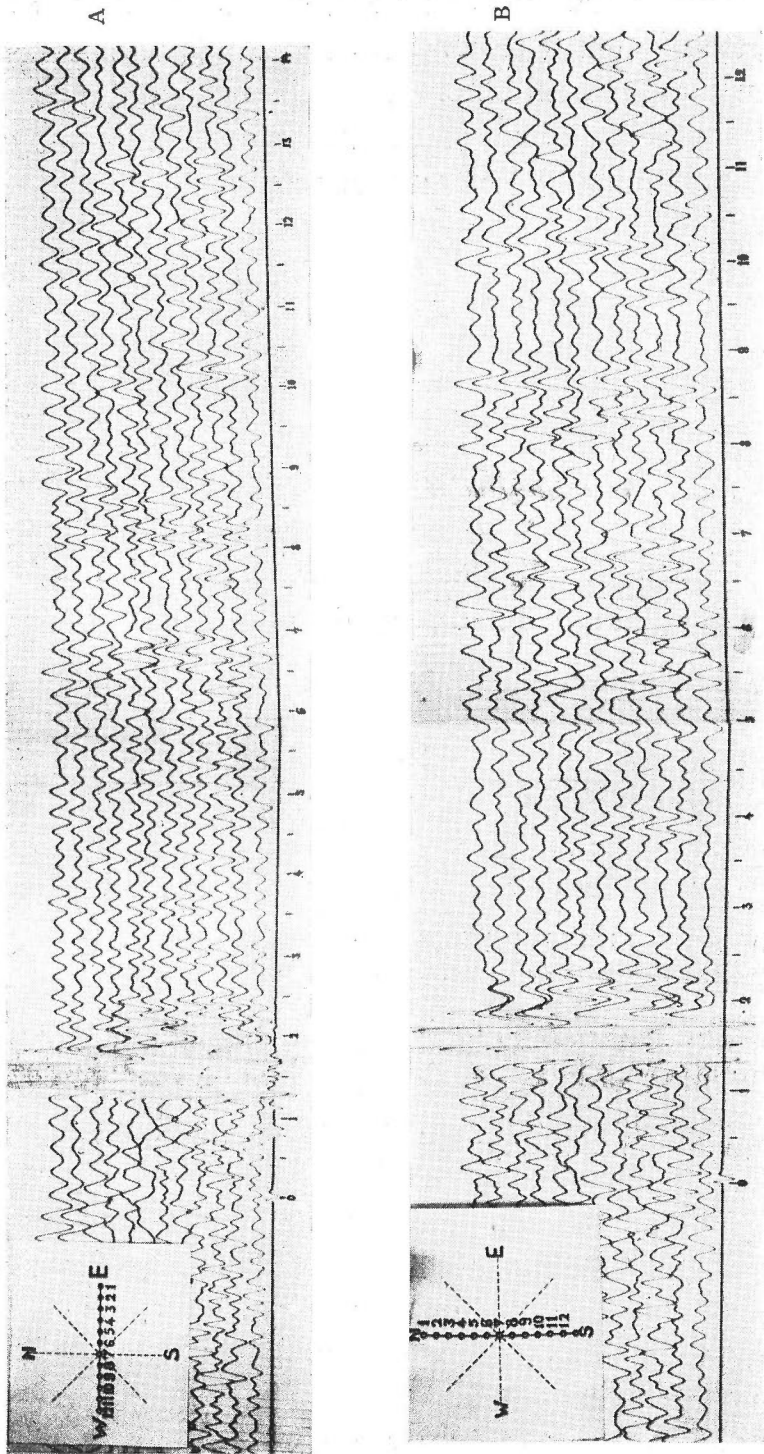
第 20 図 8 方向の実験における爆発点と Spread との関係

し、2.は地表面の不均一性・不規則性によるものと思われる。1.の種類の波の走時曲線を作ってみると、その速度は少なくとも 1,200 m/s 以上で、地表附近のごく浅い層(2 m 内外)の速度が 300 m/s 内外であることから、低速度層の内部を往來するものでないことは確である。すなわち、地表面に低速度層の下層(1,300 m/s)から入射する種類と考えられる。しかし、それが何であるかは今後研究すべき問題である。

III.4.3.3 3 角形の実験

1) 水田の中での実験: この実験を行つた場所は、8 方向の実験を行つた場所と同一である。受振器の位置と爆発点 V との相対的関係は、第 22 図の左側の関係である。第 23 図は $d=20$ cm のときの記録であるが、 $d=20$ cm というと、受振器はほとんど隣り同志くつき合っているといつてもよい状態である。にもかかわらず、0.55~0.65 sec 附近の各成分の位相にはかなり不揃いがみられることは、こうした水田の中ではきわめて小さい局所的因子による不規則な振動がおこることを示している。また、土地自体ばかりでなく、土地と受振器との相対的関係の不揃いにも原因があろう。

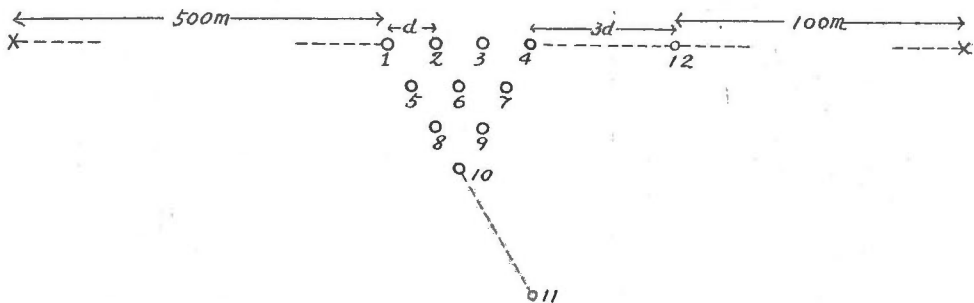
念のために、0.600 sec. から 0.680 sec. の間、3 角形の土地がどのように動くか(厳密には、3 角形におかれた受振器の運動であるが)をしらべてみよう。第 24 図は第 23 図の記録から 3



第21図 8方向の実験記録

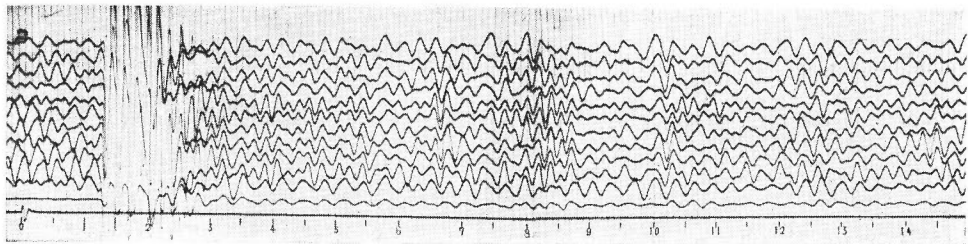
爆発点 V と受振点番號 7 (中心點) との距離は 21 m, 深度は 450 ft, 震度は 21 m, フィルター 2-3, 受振計間隔 50 cm である。

角形におかれた成分の振幅を図上におとし、形式的に等高線を入れたものである。この図の中で3角形全体が正(実線)・負(破線)になつている所は、記録の上でも位相のかなり揃つた所である。この図でわかることは(記録が A.V.C. を用いたことを考慮に入れても)位相のばらばらな波には一定の方向からくるとか、といった1つの傾向は見られないことである。この事実は、次の実験および群設置の問題のときに、再度考えてみよう。



第22図 受振器配置(3角形)と爆発点との相対的位置

S.P.V に対しては水田中の配置, S.P.III に対しては畑中に対する配置

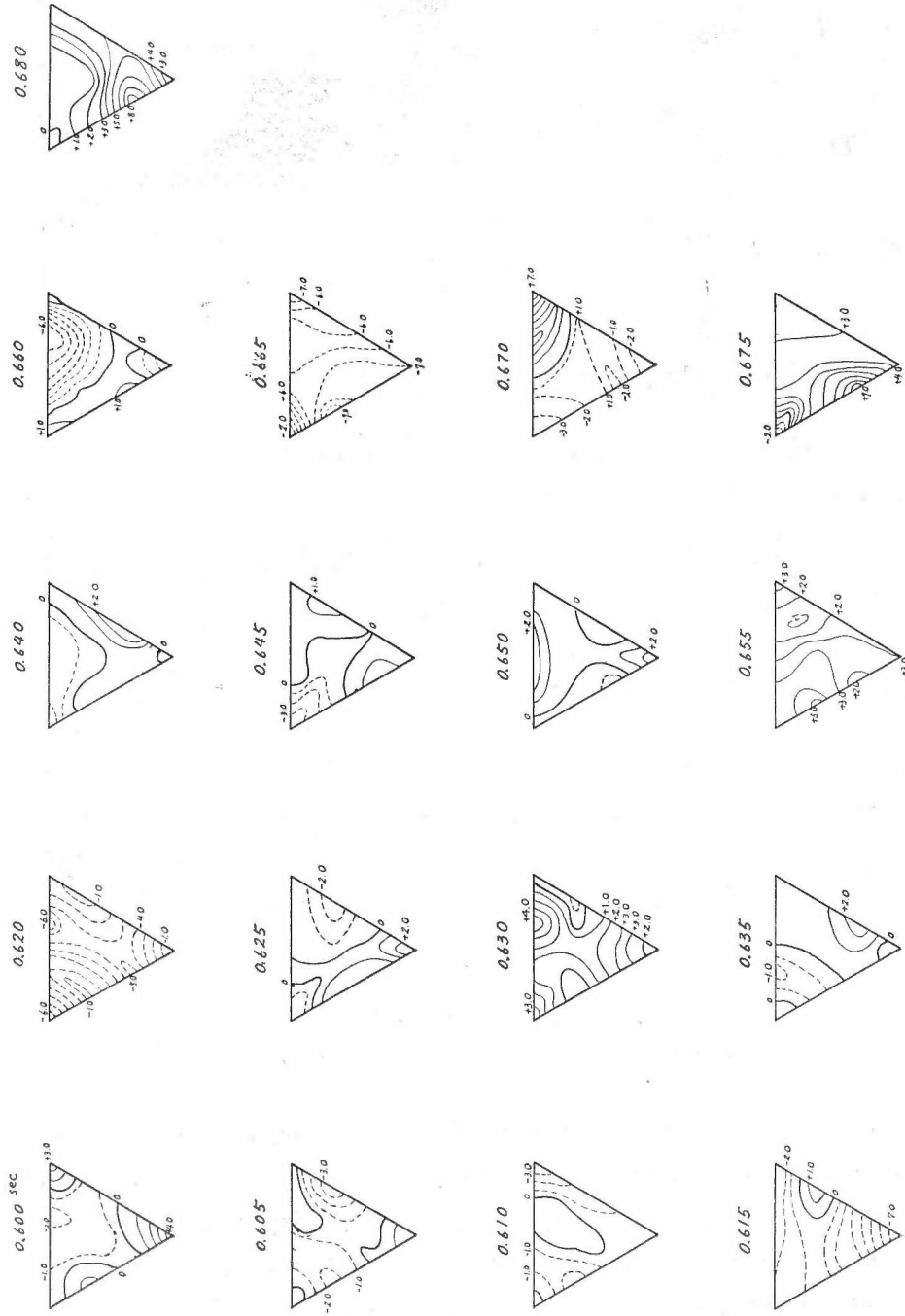


第23図 3角形の実験記録(水田の中)

S.P.V 薬量 450 gr, フィルター 2-3, 0.8 sec. に反射波が見られる。d=20cm

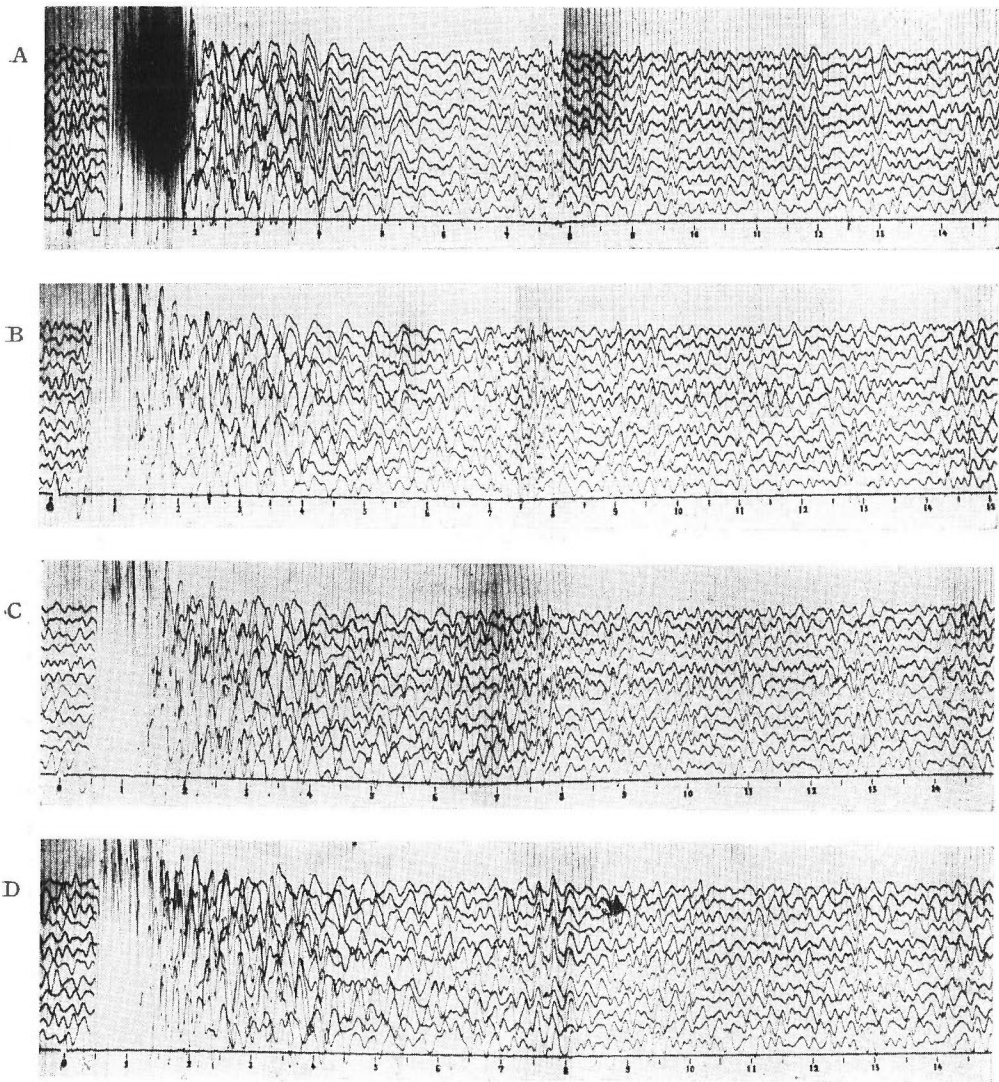
2) 畑の上での実験: 受振器をおいたところは、畑といつてもかなり踏み固められた所である。受振器の配置は水田の中の場合と同様であるが、爆発点との相対的位置は左右逆になっている(第22図)。受振器間隔 d を 20, 60, 120, 200 cm の場合の記録を、第25図 A. B. C. D に示してある。これらの記録から次のことがいえる。

(1) 地震器間隔 d が大きくなるほど、各成分の位相および振幅の揃いが悪くなるという一般的傾向は明らかである。3角形の1辺の長さ $3d$ の土地のブロックを考えてみたとき、1辺の長さが 60 cm から 360 cm ($d=20\sim 120$ cm) くらいまでは、大体1つのブロックとして運動していると考えてよいようである。(2) 一般に水田の中の実験の場合と同様に、位相の揃っている部分(振幅の大きい場合が多い)と不揃いの部分とがある。(3) $d=120$ cm およびそれ以上の場合、50 \sim 以下の波(低周波)は揃うが、50 \sim 以上の波については揃いが悪い。



第 24 図 3 角形の実験

實線は正，破線は負，0線は太い實線



第 25 図 3 角形の実験記録 (畑の上)

S.p.III 深き 22 m, フィルター 2-3, 測點は上から 1, 2, ……12,
A: d=20 cm B: d=60 cm C: d=120 cm D: d=2.00 cm

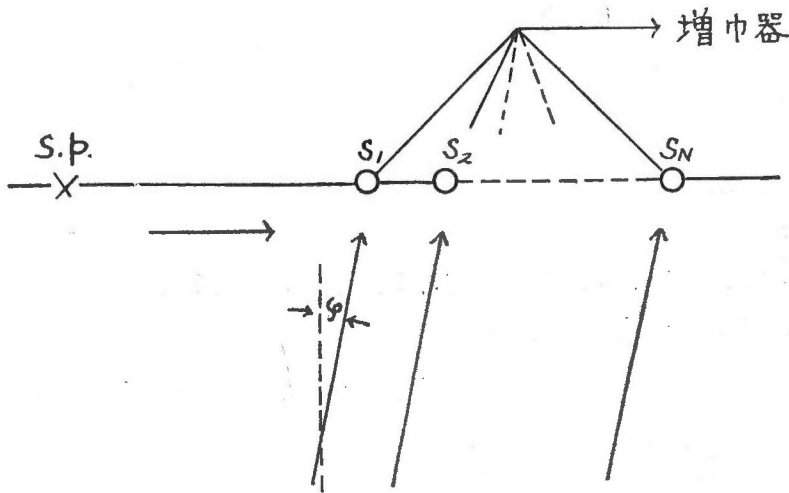
水田の中で $d=20$ cm でも不揃いの部分が相当あつたのにくらべて、畑の中では $d=60$ cm ぐらいまで非常によく位相が揃っているという事実は、受振器の群設置を考える場合、受振器間隔を決定する上で参考になる 1 つの事実である。この事実は、水田に比べて畑の方が水分が少なく、より固体的の性質を持ち、したがって、振動系としてのブロックが大きいことを示すという常識的な解釈でも、一應は理解される。しかし、水平に拡がった粘弾性体(土地)の振動系の単位ということは、それ自体にも問題があり、また定量的なことは明らかではないが、振動の一様性が上にも簡単にのべたように、波の周波数とも関係があるということは興味のある

ることであり、将来研究されるべき問題であろう。

III.4.4 群設置

III.4.4.1 一般的な説明

群設置というのは、前 (III.4.2) にものべたように、数ヶの受振器を1つの成分の増幅器の入力に入れて、反射波の顯出を高める方法である。この方法は、今日、米國では広く実施されている方法であるが、これに関する文献は比較的少ない⁷⁾⁸⁾。群設置が反射波の顯出に効果がある理由として、大体次のようなことが考えられている。第26図の如く、反射波は一般に下



第 26 図

方から到達するから、各受振器 (S_1, S_2, \dots, S_N) の間隔があまり大きくないときには、時刻差は小さく、反射波はほとんど同位相で到達すると考えられる。したがって、反射波の振動によつておこされる受振器の出力は、受振器が N ヶあつたとすると、群設置により合成されたものは N 倍になる。これに対して、表面波その他の妨害波は方向が一定しなかつたりして、各受振器の出力の位相がまちまちになり、確率的に合成された振幅は $\frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{N}$ 倍になると考えられる。この考え方によれば、反射波の振幅と妨害波 (雑振動) の振幅との比 (Signal-to-Noise ratio) は群設置することにより大きくなり、反射波の顯出は良好になるのである。また、地表面の複雑性 (低速層の厚さ、性質——たとえば水田・畑・道路上など——による複雑さ) によつておこる反射波の不規則を合成することにより平均化して、大体一定の性質にするようなことは、反射波の顯出のためにより影響を與えるものと考えられる。

以上のような一般的概念に対して、実際問題としては群設置される受振器の配置の型 (直線形・円形など)、その間隔などいかにえらぶべきかが起つてくる。そして、上の形式の変化により、反射波の顯出がどのように変わるかをできうれば定量的に測定し、一般的の法則性を求め

ることが望ましい。しかし、今回の実験ではいろいろの制限(とくに、受振器の不足による)により、十分な結果は得られなかった。

III.4.4.2 受振器間隔と方向性

上の項で、反射波は真下からくるとしたが、わが國のように地層の傾斜の比較的急な所の多い調査地を持つ場合には、受振器の間隔によつておこる方向性について、しらべておく必要がある。いま簡単にのべるために反射波は平面波とし、垂直方向と φ の角度で地表面に向つてくるとする(λ 射角= φ)。また受振器は地表に d の距離で等間隔に N 個おいてあるとする(第26図参照)。もし、受振点の振動が、等しく a なる振幅を持つ定常波とすると、各受振点の振動は次の如くあらわすことができる。

$$\varphi_1 = ae^{i\omega t}$$

$$\varphi_2 = ae^{i\omega(t+d/T)}$$

$$\varphi_3 = ae^{i\omega(t+2d/T)}$$

.....

$$\varphi_N = ae^{i\omega(t+(N-1)d/T)}$$

ただし、 Δt は時刻差で $\Delta t = d \sin \varphi / \lambda / T$, λ は波長, ω は $2\pi/T$.

いま群設置による合成波を A とすると

$$A = \sum_{N=1}^N y_i = a \frac{\sin\left(\frac{Nd}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\sin\left(\frac{d}{\lambda} \sin \varphi\right)} \cos\left\{\omega t + \frac{(N-1)\omega}{2} \Delta t\right\} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sin\left(\frac{Nd}{\lambda} \sin \varphi\right)}{\sin\left(\frac{d}{\lambda} \sin \varphi\right)}$$

すなわち、(1)式から合成波の振幅は R 倍になっていることがわかる。そして、 R は受振器の個数 N , 間隔 d および反射波の波長 λ , 方向 φ とに關係している。第27図は實際的なこ

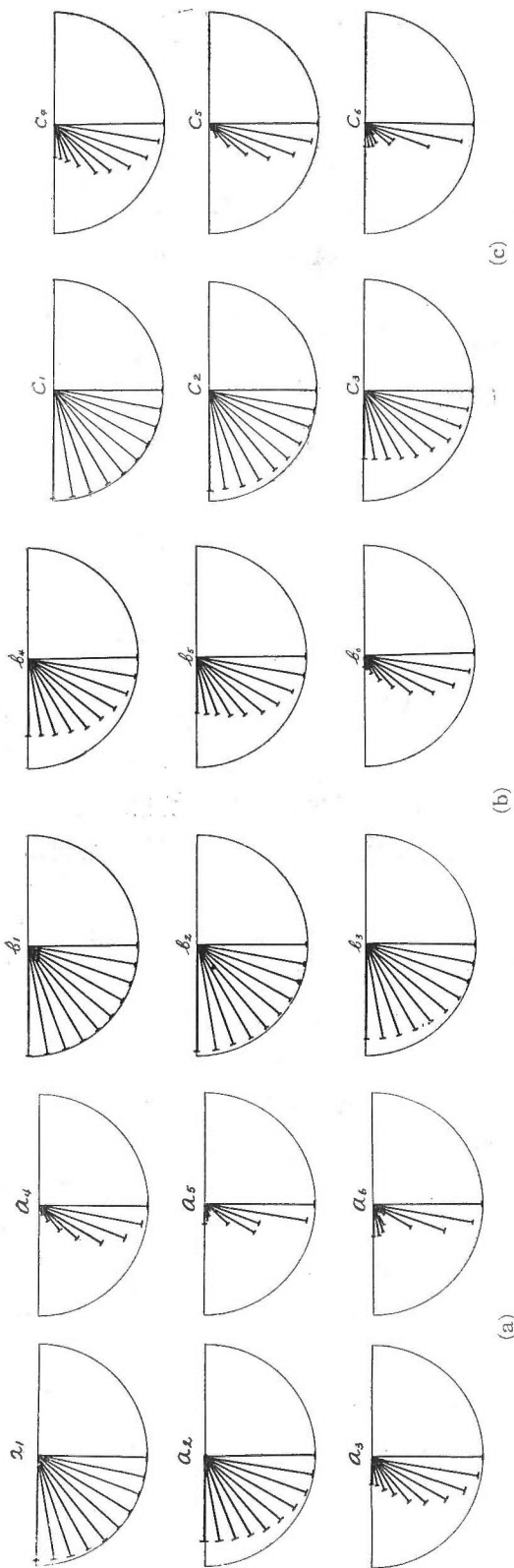
第 2 表

N=4			N=6			N=10		
図面記号	d/λ	dm	図面記号	d/λ	d	図面記号	d/λ	d
a ₁	0.05	2	b ₁	0.01	0.4	c ₁	0.01	0.4
a ₂	0.10	4	b ₂	0.025	1	c ₂	0.025	1
a ₃	0.20	8	b ₃	0.05	2	c ₃	0.05	2
a ₄	0.25	10	b ₄	0.075	3	c ₄	0.075	3
a ₅	0.30	12	b ₅	0.10	4	c ₅	0.10	4
a ₆	0.35	14	b ₆	0.15	6	c ₆	0.15	6

註 d の値は $\lambda=40\text{m}$ とした場合で、例えば $v=2,000 \text{ m/s}$, 周波数 50Hz の場合に相當する。

これらの常数に対する数値計算の結果である。すなわち、(a), (b), (c) はそれぞれ受振器の個数 4, 6, 10 の場合であり、図面に対する常数は第2表に示してある。

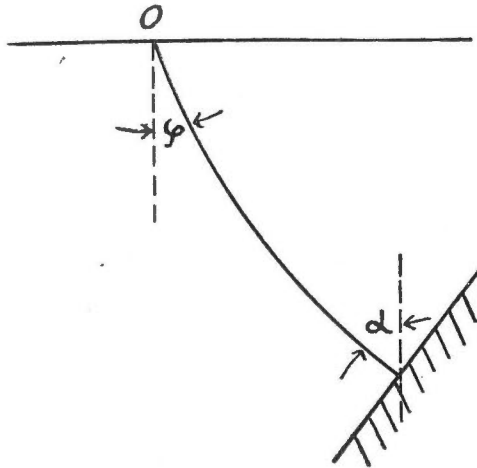
図の一般的傾向は受振器間隔 d (λ は一定として) が大きくなるにしたがい、下方に向う方



第 27 図 群設置による方向性、受振器の個数および間隔との関係

向性が大きくなり、一定の値を越すと ($N=4$ $d=10$ m; $N=6$ $d=6$ m; $N=10$ $d=4$ m) 高次の方向性を持つようになる。

しかし、この図を見る場合、次のことを考慮する必要がある。それは、計算の仮定の所でのべたように φ は反射層の角度でなく、入射角をとつていることである。両側配置の場合、反射面の角度 (α) と入射角 (φ) ——あるいは出射角——との関係はよく知られているように、



第 28 図

次の関係がある。

$$\frac{v_0}{v} = \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha} \quad (2)$$

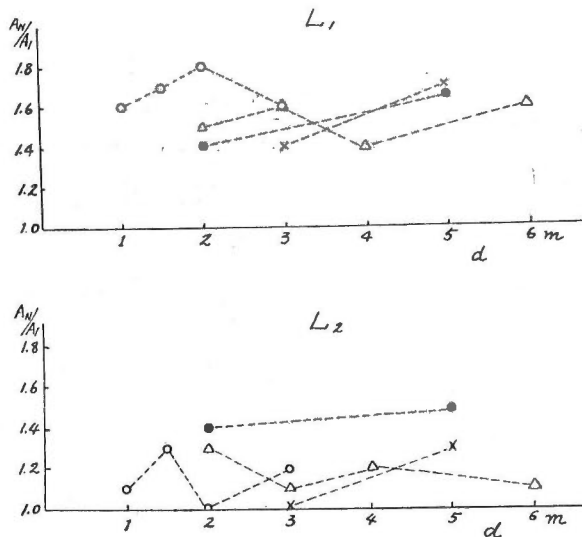
ただし、 v_0 は地表面、 v は反射面での速度、(2) 式で $v > v_0$ であるから $\alpha > \varphi$ になり、したがって、第 27 図で示される方向性の諸性質は入射角 φ のかわりに反射層の傾斜 α におきかえて考えると、実際には図で示されるほど大きいものでないことである。

以上の議論は、両側配置の場合について考えてみた。しかし遠隔配置の場合については、上の考えを拡張して考えればよい。すなわち、 dt が大きくなる場合は両側配置の方向性の強い場合に相当するから、爆発点に対して昇斜方向に Spread をおいた場合と、降斜方向に Spread をおいた場合には、前者は方向性の弱い場合に相当し、後者は強い場合に相当することになる。

高次の方向性を積極的に利用する（たとえば、ラジオビーコンなど超短波において利用されているように）ことが、現在のところ技術的に困難であることを考えると、群設置における受振器の配置は、なるべく方向性の生じないようにすることが望ましい。この意味で 1 群の受振器の数が 10 ケにもおよぶ場合には、直線形に配置することを避けて、円形その他方向性の生じない形をえらぶべきである。この点については後にまた言及することにする。

III.4.4.3 群設置の実験

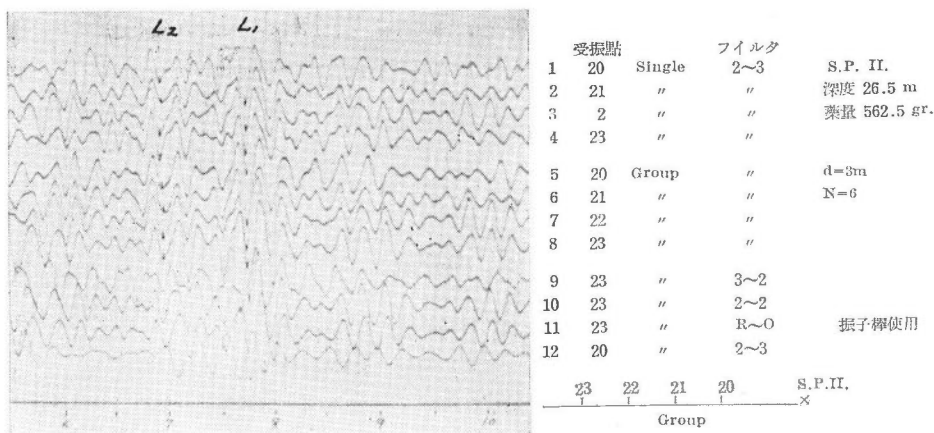
III.4.4.3.1 反射波の振幅の比較： 反射層 L_1 L_2 からの反射波について群設置と単 1 設置との場合について、次の方式で比較した。(1) 3 つの群設置の形——直線型・直角方向直線型・円型——について、(2) 群設置の受振器の個数——4, 6, 10 ケ——について、(3) 受振器の間隔——1~6 m——について。第 29 図は受振器を Spread の線上にならべ、その間隔を 1~6 m まで変え、同時にその個数を 4, 6, 10 ケとした場合の群設置と、単 1 設置の反射波の振幅の比較である。第 30 図は実験記録の 1 枚を参考のためにあげておいたが、これらの実験では各成分の増幅度は 10 % 以内の精度で揃えた。いうまでもなく、これらの記録は自動制御作用 (A.V.C.) が加えられているので、記録上の振幅の比較から入力エネルギーの厳密



第 29 図 A_1/AN と受振器間隔との関係

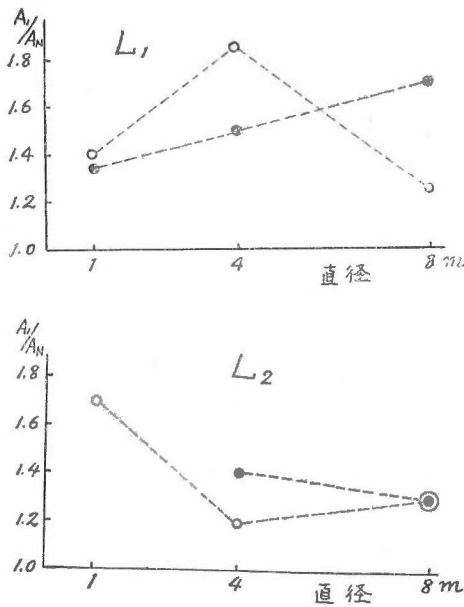
△受振器 4ヶ } 直線上
 × " 6ヶ }
 ○ " 10ヶ }
 ● " 6ヶ 直角線上
 A_1 は単一設置の振幅, AN は群設置の振幅

な比較はできないのであるが、第 29 図のいずれの場合についても、群設置のときの振幅が大きい結果がでている。すなわち、 L_1 層よりの反射波については平均して AN/A_1 の値は 1.5 であり、 L_2 層よりの反射波については平均 1.2 程度である。ただし、 AN は N ヶの群設置の場合の振幅であり、 A_1 は単一設置の場合の振幅である。



第 30 図 実験記録

群設置の受振器を円周上に配置した場合についての実験結果は、第 31 図である。この場合、横軸には受振器間隔 d のかわりに、円の直径をとつてある。この場合のいずれの例でも AN/A_1



第 31 図 A_1/A_N と直径との関係

●受振器 40 ケ } 円周上
○ " 8 ケ }

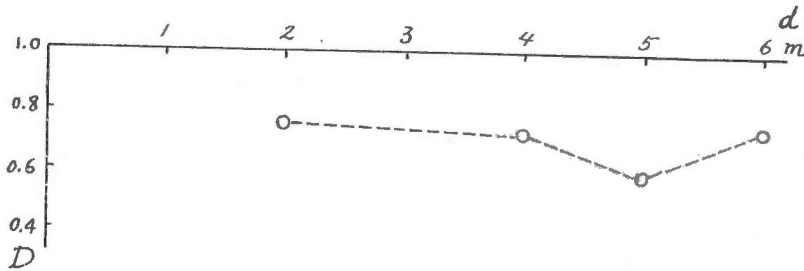
A_1 は単一設置の振幅, A_N は群設置の振幅

の値は 1 より大である。

以上の実験結果から結論されることは、群設置することにより、記録上反射波の振幅は大きくなり、次にのべるように雑振動の振幅は変わらないから、反射波の振幅と雑振動の振幅との比は大きくなり、したがって、反射波の顯出が良好になつてゐることを定量的に示している。また実験では、前にものべたように自動制御が働いているので、直接入力エネルギーの大きさについて比較することはできなかつたが、入力における上記の比の値が大きい場合には、自動制御を受けた記録の上でも、その比は大きくなるという自動制御作用の定性的の性質は、室内実験の結果から判明していることを附記しておく（物理探査部、森喜義技官より別に報告あるはず）。

III.4.4.3.2 雑振動の振幅の比較： 反射

波の顯出とは、雑振動に対して反射波の顯出がどうかという意味であるので、前記のように反射波の振幅の比較とともに、雑振動の振幅についてもしらべる必要がある。しかし、連続的に振動する雑振動の振幅を、定量的にしらべることはむづかしいことであるが、次のような便法



第 32 図 D と受振器間隔との関係

$D = \frac{\text{Group の乱れの程度}}{\text{Single の乱れの程度}}$ 群設置は直線上 4 ケの場合である

を用うることにした。すなわち、記録の上で片側振幅 2 mm 以内を静かな幅として、この幅からはみ出す波の数を、波の全数で割つたものを乱れの程度と定義しよう。

$$\text{乱れの程度}(\%) = \frac{0.4 \sim 1.4 \text{ sec. の 1 秒間の静かな幅を越える波の数}}{\text{波の全数}} \times 100$$

そこで、D を次の如く定義する。

$$D = \frac{\text{群設置の乱れの程度}}{\text{単一設置の乱れの程度}}$$

第32図は縦軸に D 、横軸に受振器間隔 d をとつたもので、群設置は直線上、 $N=4$ の場合である。計算した数も少ないし、自動制御作用が小さな入力は大きく、大きな入力は小さくする作用があることを考慮すれば、 D が1より小さくなつたことから、直ちに雑振動の振幅が小さくなつた（記録上で）と結論することはできないにしても、一應、群設置において、記録の上から大きくないということは推察されよう。実際、第30図の記録でも見られるように、みた感じ程度では群設置の場合と単一設置のものとを比較して、どちらが雑振動の振幅が一般的に大きいかを区別することは困難である。

III.4.4.4 群設置における受振器の間隔

群設置および雑振動の実験の結果から得られた事実を、簡単に再記してみると次のようになる。

1. 雑振動には局所的のものと、かなり広い地域にわたる一様性のものがある。局所的のものについては、表土が1つの振動系のブロックと考えた場合、そのディメンションは水田とか畑といった土地の条件によつて変化するが、実験的には2~3m以内と考えてよい。
2. 反射波の振幅については、自動制御附近の装置による実験結果によれば、一般に群設置の場合の振幅の方が単一設置の場合よりも大きい。
3. 反射波以外の雑振動の振幅については、群設置の場合の振幅の方が大きいとはいえず、2, 3の実験では小さくなつている。

以上の結果について、この事実が多くの調査地についても妥当する一般的なものであるか否かについては、今後研究すべきことがらである。特に3.にのべた雑振動の場合の判定方法が、反射波の顯出という目的に対して妥当するかどうかという点については、筆者自身も疑問を持つている。

群設置が反射波の顯出に有効な方法であることは、上の実験結果からも確かなことであるが、**技術的には**、用うる受振器の個数・間隔・配置方式を決定することが必要なことがらである。実験結果については、前にのべたように個数(4, 6, 10ヶ)、間隔(1~6m)、配置方式(直線上・直角線上・円周上)について大きな傾向(優劣)がみられない。したがつて、この実験結果だけからすれば、作業上もつとも簡単で能率的であるのは受振器の数が少なく、間隔も短い方がよいのであるから、受振器4ヶ、間隔1m、直線上の組合わせが1番よいという結論が一應下される。

ここで、前の項(III.4.4.2)でのべた受振器間隔と方向性とのことをもう1度考えてみよう。わが國では、しばしば、 45° にもおよぶ急傾斜な地層の地域を調査地と選ばねばならぬことを考えると、受振器間隔による方向性のことを充分考慮する必要があるわけである。たとえば、受振器の個数 N が10ヶとすると、その間隔が3m(第26図, C_4)以上になるとかなりの方向性を示し、 45° 近い急傾斜の層からの反射波に対しては、両側配置の場合でも振幅は $1/2$ 。

に近い損失になり、群設置に多くの数の受振器を用いる意義が消失することになり、遠隔配置の場合はそれ以上の損失が見込まれる。したがって、実際の調査に当つては予想される反射層の傾斜、受振器の個数・間隔反射波の波長を考え合わせて適当に選ぶべき問題である。また、理論的な立場からだけ考えれば、間隔の長い場合、あるいは複雑な配列による高次の方向性を用いて、特定の傾斜の反射層を確認することも考えられるが、地表状態の不規則、波長の決定の困難などの事情もあつて、実施はなかなか技術的に困難な問題であり、今後研究すべき問題である。

次に受振器間隔の短い方の限界を考えてみよう。それは群設置された受振器の隣り合せのものが雑振動に対して、かなり異つた振動をすることが必要であり、この距離が受振器間隔の短い方の限界になるわけである。この距離は雑振動に関する実験の結果、2 m ぐらいであることは前にのべた通りである。

以上実施した実験と計算の結果とを総合して考えてみると、**群設置の数が4~10ケ程度の場合には、その間隔は大体2~3m ぐらいが一般的である**ということが結論される。

III.4.4.5 群設置の結合法について

ここで問題にするのは、次の2つの点である。受振器(数ケ)と増幅器の入力トランスとの結合法(III.4.4.5.1)、出力群設置(III.4.4.5.2)。これらの問題は受振器の配置とは直接関係のないことであるが、便宜上この項でのべることにした。

III.4.4.5.1 結合法: 受振器の結合法としては、並列・直列・並一直列の混合の3つの結合法が考えられる。これらの結合法のいずれがもつともよいかは、第1に出力トランス側からみて、受振器群の総合インピーダンスが、出力トランスのインピーダンスに整合するかどうか。第2にある1つの受振器の側からみて、他の受振器および出力トランスの総合インピーダンスによるシャント抵抗の変化が、受振器の減衰常数に不当に変化を與えないかという点である。

実験は4ケの受振器につき、並列・直列・並一直列の3つの場合につき、実際上の変化を見ることにした。しかし、結果的には、3つの場合につき振幅および波形の変化は、ほとんどみられなかつた。この原因としては、次の2つのことが考えられる。

第1に全部が並列、あるいは直列の場合には当然入力トランスに対して、受振器群の総合インピーダンスの不整合が起るわけであるが、この程度の不整合による振幅の減少は、自動制御作用により打ち消されるものと思われる。第2に各受振器の減衰常数は、前記(1.1)のように $h=0.55$ であるが、その減衰作用として2つの作用が働いている。1つはアルミニウムのボビンによる電磁的のものであり、シャント抵抗に無関係のものである。他はコイルを流れる電流によるもので、当然シャント抵抗により変化があるが、前記のように波形に変化のないことは、後者の変化が全体に対して小さいことを示すものと考えられる。

III.4.4.5.2 出力群設置: 従来、群設置といわれる方法は前項(III.4.4.1)でのべたように、いずれも数ケの受振器を1ケの増幅器に結合する方法である。この方法では、結合された

受振器の出力が自動制御の作用をうけることになる。しかるに、自動制御はある卓越した位相を抑える作用があるのであるから、この作用は反射波の顯出をさまたげることになる。

いま、この関係を簡単に数量的に考えてみよう。各受振器の出力は等しく

$$y = a \sin \omega t$$

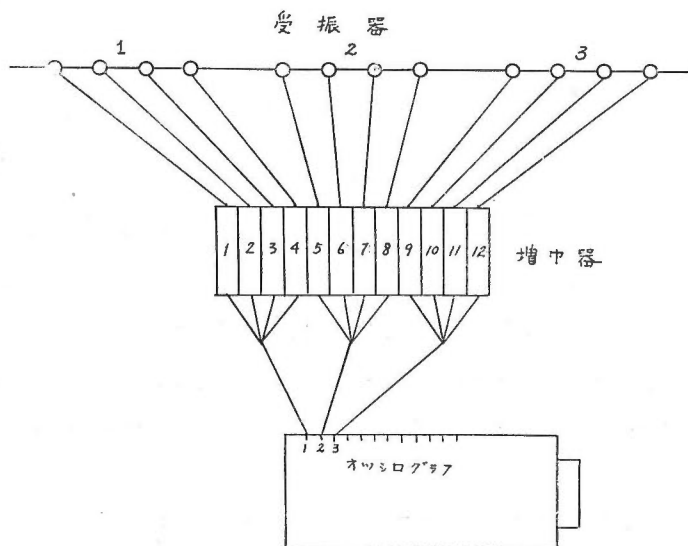
とし、自動制御を加えた増幅率は $Ae^{-m|y|}$ となるとする。すると自動制御を受けた場合の出力 y' は

$$y' = A \cdot a \cdot e^{-m \cdot a |\sin \omega t|} \sin \omega t$$

この場合、時定数その他複雑なことがらは考えないことにする。いま、群設置の受振器の個数を N 枚とすると、通常の群設置の場合の入力は Ny であり、出力 Y は

$$Y = N \cdot A \cdot a \cdot e^{-m \cdot a |\sin \omega t|} \sin \omega t \quad (3)$$

次に増幅器からの出力についての群設置の場合には、出力の和であるから、オッシログラフにはいる入力 Y' は

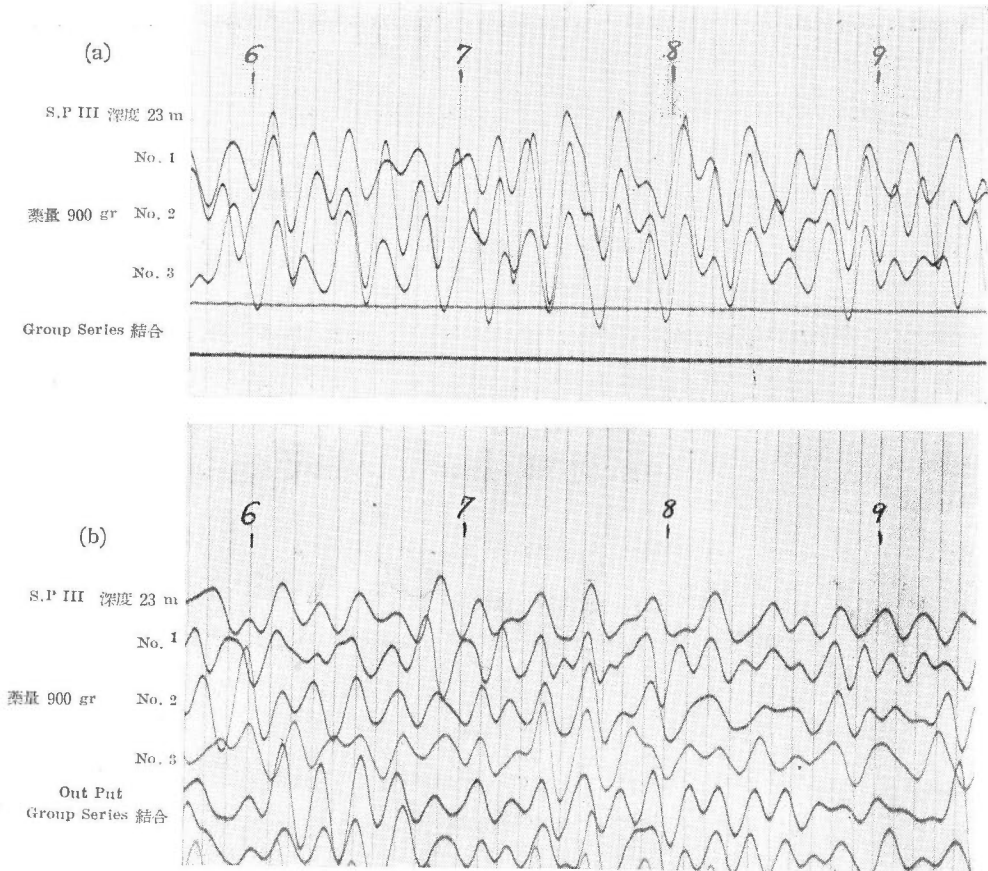


第33図 出力群設置

$$Y' = Ny' = N \cdot A \cdot a \cdot e^{-m \cdot a |\sin \omega t|} \sin \omega t \quad (4)$$

いま、雑振動の振幅による出力を Y 、反射波の出力をその μ 倍とする。この場合、普通の群設置の $S-N$ 比 $\{Y(\mu Y)/Y(y)\}$ は $\mu \cdot e^{-mNy(\mu-1)}$ となり、出力群設置の場合には $S-N$ 比 $\{Y'(\mu Y)/Y'(y)\}$ は $\mu \cdot e^{-m\mu y(\mu-1)}$ となり、明らかに後の方が大きい。すなわち、以上の計算では出力群設置の方が反射波の顯出が良好であることが予想される。

以上のような見通しで出力群設置の実験を行つた。受振器・増幅器・オッシログラフの関係は第33図に示してある。記録は増幅器の数(12枚)に制限があるので3成分である。第34図(a)



第 34 図 出力群設置の記録

は出力群設置のもの、(b) は同じ場所での通常の群設置のものである。成分の数が少ないので、明確な結論を出すまでには行かないが、見た目からは確かに反射波の顯出は良くなつていように思われる。

出力群設置の方法は、理論的にも、実験的にもすぐれているようであるが、このためには受振器に加うるに増幅器の数も、非常に多数 (4 々の群設置でも $4 \times 12 = 48$ 々になる) の増幅器を必要とするので、現在の技術的・経済的実状では、直ちには実現困難のようである。しかし、ミューチューア管など無線工学の発達もすばらしいから、増幅器の超小型化とともに、出力群設置の実用化が行われるのも遠い将来のことではないかもしれない。

III. 5 解 析 法 に つ い て

III.5.1 一般的なことがら

反射法の解析とは、爆発点と受振点との相対的の位置関係、各受振点における走時から反射面の位置 (深さおよび水平距離) および傾斜角を求めることである。今日、多くの場合 $v =$

$v_0 + kz$ (V は深さ Z における速度, v_0 は地表附近の地層の速度, k ^{註15)} は地域における常数) なる1次式が用いられている。

両側配置の場合, $v = v_0 + kz$ の関係式がなり立つとすると, 走時 t ・時刻差 ΔT ・反射点および層の傾斜との間の関係を, 1枚のチャートであらわすことができる^{註16)}。蛇足かもしれないが, あとの説明のため簡単にその方法を説明しておこう。

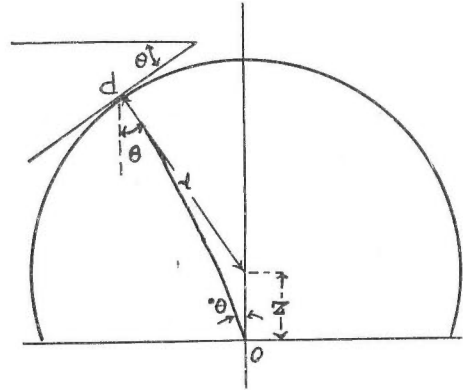
第35図のように, 爆発点(受振点)を O , 反射点を P , 反射層の傾斜を θ , 入射角(出射角)を θ_0 とすると $t = \text{const}$ の波面は O より Z の深さを中心とし, r を半径とする円周になる。これらの量の間には次式の如き関係がある。

$$\sin \theta_0 = v_0 \Delta t / \Delta x$$

$$\tan(\theta/2) = e^{kt/2} \tan(\theta_0/2)$$

$$Z = v_0/k \{ \cos h(kt/2) - 1 \}$$

$$r = (v_0/k) \sin h(kt/2)$$



第 35 図

ただし, Δx は Spread の両端における受振器間の距離であり, 第36図は $\Delta x = 100$ m, $k = 0.7$, $v_0 = 2,200$ m/s の場合のチャートである。

III.5.2 遠隔配置の場合のチャート

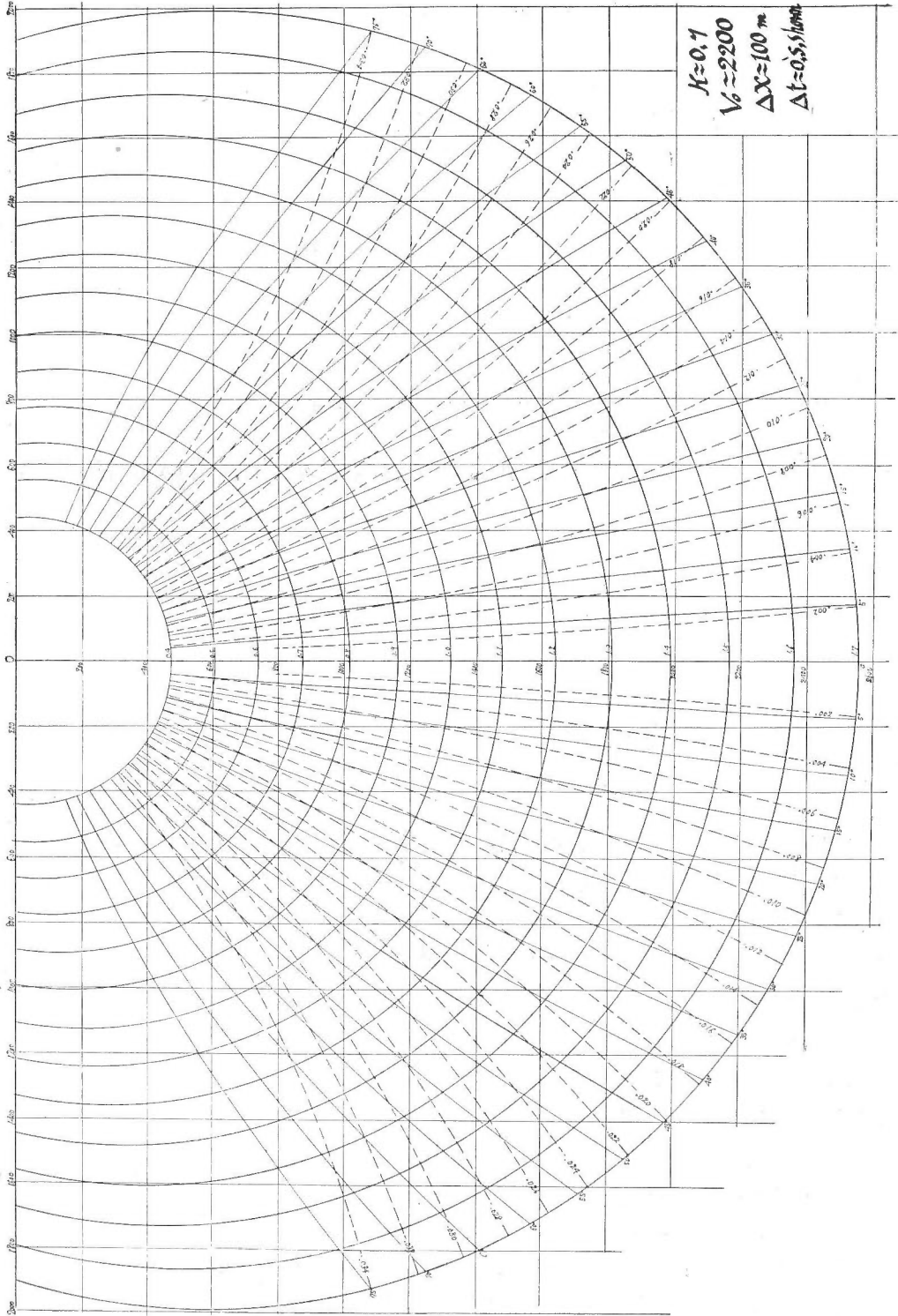
遠隔配置の場合の第36図に類するチャート^{註16)}については, まだ文献がみられない。そこで, 次のような方法で遠隔配置のチャートを作成して用うことにした。2枚の同じ両側配置のチャートを, その中心をそれぞれ爆発点 O , および Spread の中心 S におき, 両チャートの波面 T_1, T_2 の交点を考えると, $(T_1 + T_2)/2 = T$ の軌跡を求めることができる(第37図)。すると, この軌跡(点線で示されている)が遠隔配置の場合の走時が t の場合には, 反射点はこの曲線上にあるわけである。次に, ある点 P から Spread の両端の受振器 S_1, S_2 をみたときに, S_1 と S_2 との距離 Δx に対して, P が S から相当離れている場合には $\sin \theta_0 = v_0 \Delta t / \Delta x$ の式が成立するから, S に中心をおいたチャートの ΔT の曲線を, そのまま使用することができる。すなわち, $T = \text{const}$, $\Delta T = \text{const}$ の交点を求めることにより, 反射点を求めることができるわけである。次に, P 点における反射面の傾斜であるが, 第1に爆発点 O から P に向つてくる波面は, P 点附近では L_2 であり (L_1, L_2 は $T = \text{const}$ の円の接線である), 次に P が

註15) k の値を求めるのに Well-Shooting が用いられている。わが国でも, 帝國石油株式会社により 数多く実施され, 多くの地域で, 0.7 の値が得られている。

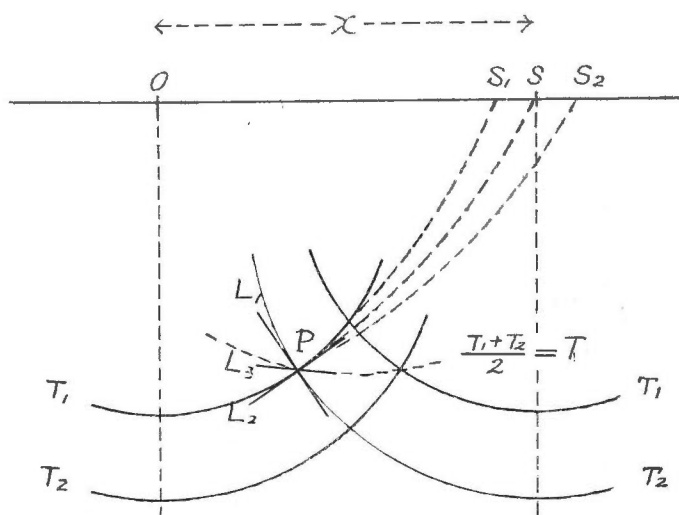
註16) 帝國石油株式会社物探課では作成し, 使用していると聞いている。また走時および時刻差に次式のような補正を行つて, 両側配置のチャートを用うことがのべられている。

$$\text{時刻差の補正量} \quad \frac{kx}{2v_0^2} \left\{ \sin h \frac{kT}{2} \cos \frac{kT}{2} \right\}^{-1} + \sin h \frac{kT}{2} \sqrt{\sin^2 h \left(\frac{kT}{2} \right) + \left(\frac{kx}{2v_0} \right)^2}$$

$$\text{走時の補正量} \quad \frac{2}{k} \log_e \left[\cos h \left(\frac{kT}{2} \right) + \sqrt{\cos^2 h \left(\frac{kT}{2} \right) - \left(\frac{kx}{2v_0} \right)^2} \right]$$



第36図 河側配置のチャート



第 37 図

ら S に向つて行く波面は、当然 P 点附近では L_1 でなくてはならないから、反射面は 2 つの接線 L_1, L_2 の 2 等分線 L_3 でなくてはならない。第 38 図は第 36 図と同じ k, v_0 に対して、 $x=600$ m (x は爆破点と Spread の中心との距離) とした場合の $4T$ および T の値から、反射点を求めるチャートである。

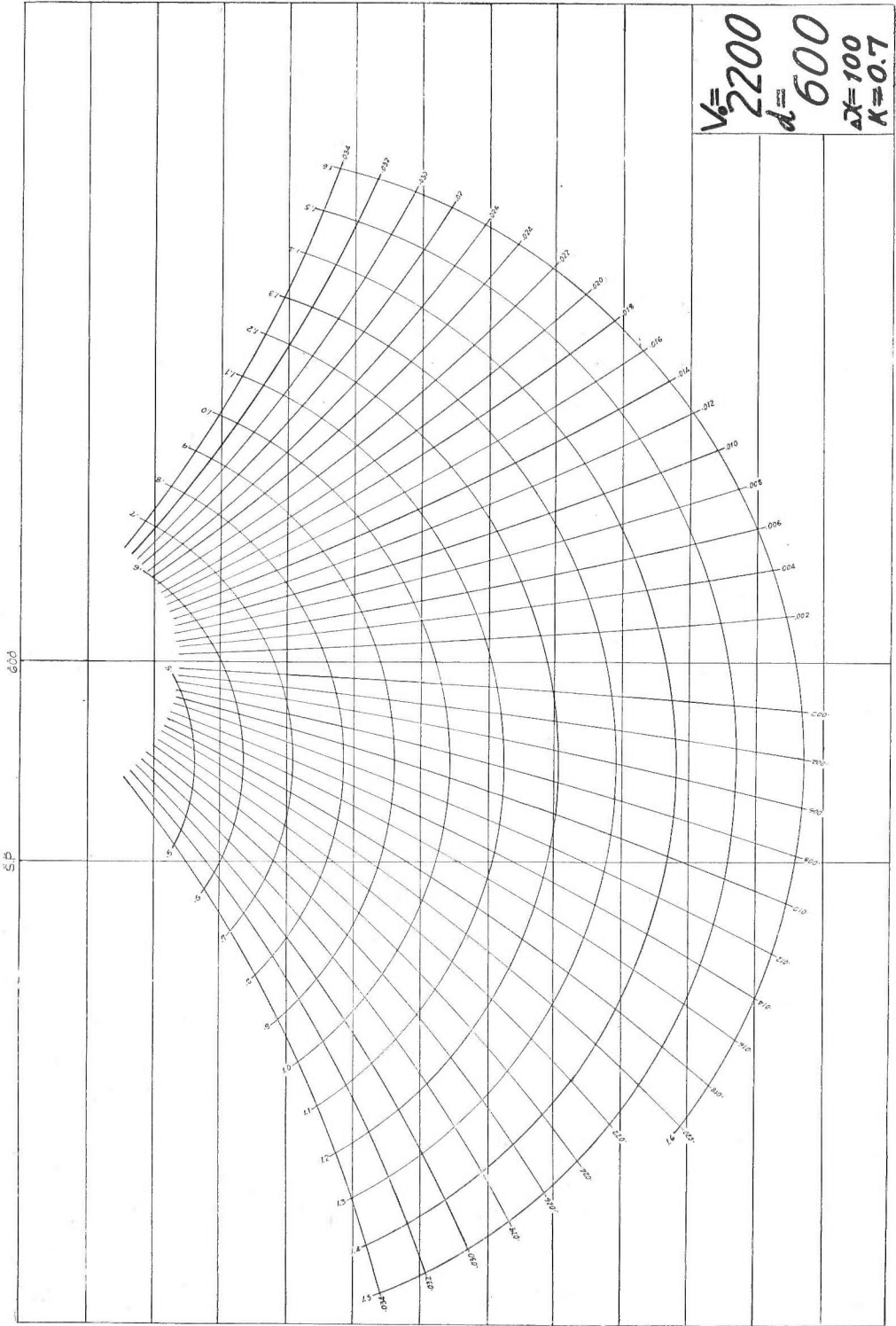
IV. 結 語

わが國の反射法の技術水準の向上のために、微力ではあるが、われわれは多くの人々の協力を得て、わが國としてはじめての反射法の組織的研究に手をつけた。もちろんわれわれの知識の乏しいこと、また各國における研究結果を十分に整理していないため、あとから見ると不必要な寄り路があつたりした点もないでもない。そして、いろいろの事情のため得心の行かなかつた点——特に、表土層（低速度層）の性質についての実験——も多々あり、結果的にははじめにのべたように、浅く広いものになつた次第である。しかし、この点については、今後続いて実施される研究^{註17)}が、補つてさらに発展させてくれることを期待している。

今回の実験結果を簡単に列記すれば、

1. 反射波の顯出に対しては、ある量以上の火薬量が必要であること、また爆発深度の変化に対しては、この場所では反射波の顯出に対しては大きな差異が認められなかつた。
2. 爆発点に対する Spread の位置が、反射波の顯出に大きく関係すること。すなわち、両側配置においては、ほとんど反射波を認めることができなかつたが、爆発点より約 300 m 離

註17) 増幅器を中心とした受振装置については、引續き物理探査部森喜義技官の研究報告の發表が予定されている。



第 38 図 遠隔配置のチャート

れた所から、良好な反射波が認められる結果が得られた。この原因についてはいろいろ考えられるが、雑振動の条件の変化によるものと考えられる。

3. 雑振動の性質をしらべるために数 m の範囲に受振器をならべて、その振動状況をしらべた結果、ある広さの範囲まで同じ位相で振動する波と、その場所場所で不規則に振動する波があり、後者は水川の上では 20 cm の距離に対してもかなり違うが、畑の上では 1 m 以上の距離まで、ほとんど同一の振動をする。

4. 群設置の問題に関しては、その形、受振器の個数、その間隔の変化について実験し、間隔と方向性に関する計算をした。これらの結果と雑振動の性質に関する実験の結果とを総合して、群設置の数が 4~10 ケ程度の場合には、間隔は 2~3 m ぐらいで円型に置くのが、もつとも一般的であることが一應結論された。

このほか、実験的には不十分な点もあるが、従来の増幅器の入力部門で群設置するよりは、増幅器成分を含んでの群設置の方が、A.V.C. 形式の増幅器を用いる限り有効であることを提案した。

以上の結果は、幾多の問題をあとに残しているとはいえ、それでも、現在地震探鉱に従事する技術者に、幾分なりとも貢献するところがあれば幸と考えている。

〔謝辞〕 この研究に多くの協力と有益なる助言を賜った帝國石油株式会社探鉱部林 一物理探鉱課長・兵頭盛也・島山勉・玉野俊郎・佐々木恒郎の諸氏、東京大学淵田隆門教授・表俊一郎・宮村攝三両助教授に対して感謝の意を表する。

文 献

- 1) 飯田汲事：わが国における油田の物理探鉱の発達と今後の問題，石油技術協会誌，Vol. 16, No. 6, 1951.
- 2) Joseph A. Sharpe：The Production of Elastic Waves by Explosion Pressures I. Geophysics, Vol. VII. No. 2, 1942.
- 3) K. E. Burg：Seismic Wave Guid Phenomenon, Geophysics, Vol. XVI, No. 4, 1951.
- 4) 松沢武雄：「平面波の表面反射の一例」，地震，Vol. 4, No. 3, 昭和7年3月.
- 5) 例えば Jakosky, Exploration Geophysics, 1950, pp. 852.
- 6) M. Muskat and M. W. Meres.：The Seismic Wave Energy Reflected from Various Types of Stratified Horizons. Geophysics, Vol. V, No. 2, 1940.
- 7) M. Mott-Smith：Adverse Effects associated with Variably Compounded Seismograph Records Geophys., Vol. II, 1937.
- 8) McDermott E. E.：Use of Multiple Seismometer. Petroleum Engineer, Feb., 1937.
- 9) C. H. Johnson：Steady State Polar Sensitivity Curves Geophysics, Vol IV, No. 1, 1939.
- 10) W. B. Agocs：Computation Charts for Linear Increase of Velocity with Depth. Geophysics; Vol XV, No. 2, 1950.

Résumé

Studies on Seismic Reflection Method

— On the experiment in Inashiki districts, Ibaraki Prefecture —

by

Tetsuichi Kaneko

The important subject on the study of the reflection method is to distinguish the reflected impulses from all other disturbant waves on the records, that is the separation of the reflection waves from the recorded disturbances. The writer performed some experimental and theoretical studies on the subject with S. S. C. seismograph at Inashiki districts, Ibaraki Prefecture.

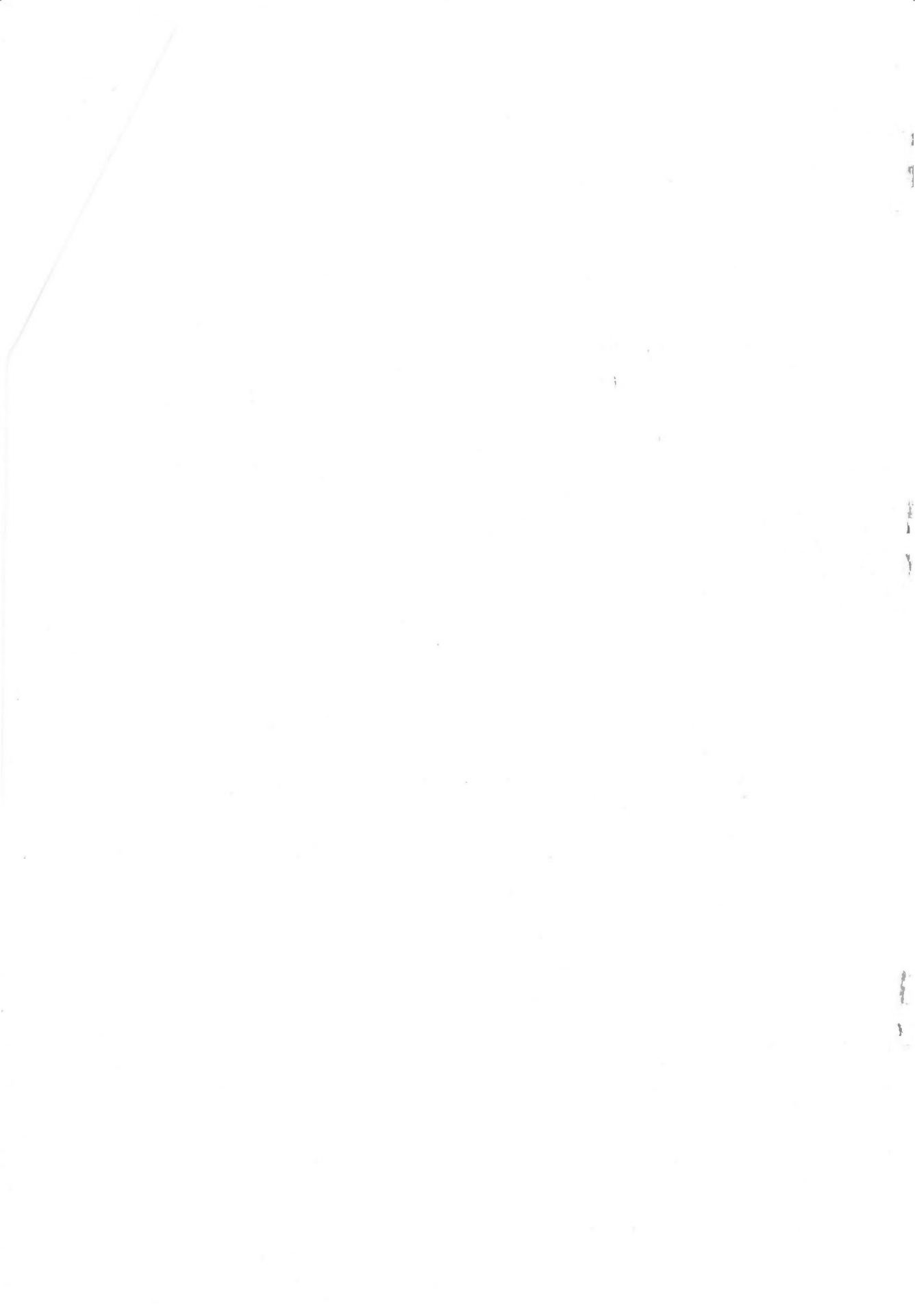
From the favourable conditions whereat obtained some good reflection records already in this region by the geophysicists of Teikoku Oil Company, the writer chose the same district as a test field for seismic reflection method.

The writer studied mainly on group-setting (multiple detector), relations between shot-conditions and reflection records, distance-spread, nature and effects of disturbances, the charts for distance-spread, etc.

After several investigations and discussions, he obtained some remarkable results as follows :

1. Suitable intervals of the detectors in group-setting are 2~3 meters.
2. Out-put group setting is more preferable than in-put for group-setting.
3. In order to obtain good reflection records, some amounts of dynamite charges are necessary.
4. The depth of the dynamite charge have no connection with the degree of the records in the experiments.
5. Some good records were obtained in the case of distance-spread, in where only weak or none reflection records were noticed by the type of split spread. The distance between shot point and spread seems to be the main factor.
6. From necessity as was above described, the writer made a chart of the dip-depth for distance spread.

Under the present economic conditions in Japan, it is difficult to perform such a study, but the writer will endeavour to continue for the development of the study in future.



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 in each Report.

- A. Geology & allied sciences
 - a. Geology.
 - b. Petrology and Mineralogy.
 - c. Palaeontology.
 - d. Volcanology and Hotspring.
 - e. Geophysics.
 - f. Geochemistry.
- B. Applied geology
 - a. Ore deposits.
 - b. Coal.
 - c. Petroleum and Natural Gas.
 - d. Underground water.
 - e. Agricultural geology.
Engineering geology.
 - f. Physical prospecting.
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、その番號は従来の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、その分類の便宜のため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 | 地質およびその基礎科學に關するもの | { | a. 地質
b. 岩石・鉱物
c. 古生物
d. 火山・温泉
e. 地球物理
f. 地球化學 |
| B | 應用地質に關するもの | { | a. 鉱床
b. 石炭
c. 石油・天然ガス
d. 地下水
e. 農林地質・土木地質
f. 物理探鉱・化學探鉱および試鑛 |
| C | その他 | | |
| D | 事業報告 | | |

なお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 28 年 3 月 20 日印刷

昭和 28 年 3 月 25 日発行

著作権所有 工業技術院
地質調査所

印刷者 向 喜久雄

印刷所 一ツ橋印刷株式会社

REPORT No. 156
GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN
Tomofusa MITSUCHI, Director

STUDIES ON SEISMIC REFLECTION
METHOD

ON THE EXPERIMENT IN INASHIKI DISTRICTS,
IBARAKI PREFECTURE

BY

Tetsuichi KANEKO

GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN
Hisamoto-cho, Kawasaki-shi, Japan
1953