

No. 282 /	D
34年2月	
鉦床部	

VI.

地質調査所報告第182号

地震探鉦における群設置法と

多孔爆発法の研究

地質調査所

昭和34年2月



550.834

地質調査所報告

所長 兼 子 勝

地震探鉱における群設置法と
多孔爆発法の研究

通商産業技官 金子 徹一

目 次

要 旨	1
I. 序 論	2
I. 1 はじめに——問題点について——	2
I. 2 反射波の検出	3
I. 3 これまでの研究	6
II. 理論的考察	8
II. 1 群設置と多孔爆発の物理的意味	8
II. 2 群設置と多孔爆発の理論的關係	10
III. 反射波の変形	12
III. 1 wavelet	12
III. 2 受振器間隔が一定で受振器個数を変えた場合	13
III. 3 受振器の cover する長さが一定で個数を変えた場合	16
IV. 特性函数 $K(\omega)$	19
IV. 1 いろいろの表現	19
IV. 2 特性 図	20
IV. 3 受振器 9 個の $K(\omega)$	21
IV. 4 5 点爆発の $K(\omega)$	23
IV. 5 直線型の $K(\omega)$ の図表	28
IV. 6 群設置と多孔爆発の組合せの $K(\omega)$	29
V. 重みのある群設置と多孔爆発	32
V. 1 重み函数	32
V. 2 制限のある $B(t)$ に対する $K(\omega)$	34
V. 3 各種の方法の比較	37
VI. Mixing との組合せ	38
VI. 1 群設置と mixing との組合せ	38
VI. 2 重みをつけた mixing	39
VII. 浅い、あるいは急傾斜の反射面の場合の注意	42
VII. 1 この場合の見掛けの速度	42
VII. 2 この場合の注意	45
VIII. 妨害波の消去	46
VIII. 1 A 型の妨害波の消去	46
VIII. 2 B 型の妨害波	47
VIII. 3 電ヶ崎における実験——B 型妨害波の消去——	48
文 献	59
Abstract	1

地震探鉱における群設置法と多孔爆発法の研究

通商産業技官 金子 徹一

要 旨

1) 火薬の爆発により、地中に発生する振動パルスをフィルター回路の入力とし、記録に現われた波形をその出力と考えると、多孔爆発および群設置は、土地および観測装置とともに、それぞれ1つの系をなす filter 回路と置換することができる。しかも、おのおのは直列に配置されると考えられるので、その総合特性はそれぞれの filter 特性の積の形で表現される。ここでは、特に群設置と多孔爆発の理論的關係を明らかにした。そして両者を併用した場合、おのおのが単独で行われる場合と比較して、著しい効果があることを明らかにした。また、この場合にはA型の波の消去に関しては、総合個数として受振器の数 M と、爆発孔の数 N との積、 $M \times N$ になることが注目される。

2) 群設置(多孔爆発)の操作により、signalとしての反射波がどのように変形するかを調べた。その結果、振幅、卓越周期がこの操作の数学的表現である特性函数 $K(\omega)$ を知ることにより、変形(振幅、卓越周期)の大体を推測することの可能なことを示した。

3) わが国で広く用いられている直線形の群設置、十字形多孔爆発の特性函数 $K(\omega)$ を計算し、その性質についての検討を行い、その使用上の注意を明らかにするとともに、近似計算によるノモグラムを作成した。

4) 希望する種の型の特性函数 $K(\omega)$ を得るための受振器(爆発孔)の重み函数を計算し、Parr, Savitらの発表している従来の方法との比較をした。

5) 群設置を mixing と組合せたとき、その総合特性函数 $K(\omega)$ は簡単に計算されることを示し、特に最近発達した磁気録音式地震探鉱器により、再生時に重みをつけて mixing することを考慮して、その場合の特性について吟味し、この方法の利点を明らかにした。

6) 浅い、あるいは急傾斜の反射面をもつ地質構造の調査に際しては、群設置あるいは多孔爆発の使用は、しばしば害のあることも生ずるので、この際の注意事項を述べ、記録から直ちに求められない爆発点の見掛けの速度の計算図表を作成した。

7) A型妨害波(random noise)の消去は統計的に取扱われるが、この際には群設置と多孔爆発とを併用することは、特に効果のあることを明らかにした。また、B型妨害波(wave noise)に対しては、妨害波の性質により、適当な型の群設置および多孔爆発を用いる必要のあること、さらに茨城県竜ヶ崎における実験により、実例により上記の理論を実証した。

I. 序 論

I. 1 はじめに——問題点について——

反射波の検出の困難な地域において、その検出を良好ならしめるために、群設置法 (multiple geophones setting) あるいは、多孔爆発 (pattern shooting), または両法の併用がこんにち広く用いられている。わが国では、一般に地質、あるいは地表の条件が複雑なため、諸外国に較べて、反射法により信頼の高い結果を得ることが困難とされている。このため、反射法に従事する物理探鉱技術者は、現在では種々の方法を採用し、反射波の検出を良好ならしめるために努力してきたのであるが、群設置法と多孔爆発法は、貧弱な反射波を検出するための、最も有力な方法の一つになつている。

反射波の検出を良好にすることは、いうまでもなく妨害波 (noise) に対する有効波である反射波 (signal of reflection) の比率を大きくすることであり、いわゆる S-N 比を大きくすることである。群設置法と多孔爆発法の両法が S-N 比を向上させるための方法であることについては、I. 2 に述べるように、こんにちまで幾多の人々によつて研究され、発表されている。また、これらの方法が実際上非常に有効な方法であることについては、発表されている幾多の実験報告にまつまでもなく、実際に地震探査に従事している人々の誰もがよく知っているところである。こゝに、特に本論文で群設置法と多孔爆発法について述べるのは、以下に述べる諸事項を明らかにすることにより、これらの方法がより有効に利用され、より信頼できる反射波の検出が可能になると考えたからである。

こゝで問題にする点は次の通りである。

- (1) 群設置および多孔爆発の物理的意味と理論的關係を明らかにすること (第 II 章)。
- (2) 群設置および多孔爆発は一種の特性函数 $K(\omega)$ として表現されるが、この種の操作によつて反射波 signal はどのような変形を受けるであろうか (第 III 章)。
- (3) 実際に多く用いられている群設置、あるいは多孔爆発の特性函数 $K(\omega)$ はどのようなか。そして、この特性函数から使用上いかなる知識が得られるか (第 IV 章)。
- (4) 群設置および多孔爆発において、いわゆる“重み”をつけたときに、どのような特性函数が得られるか。また逆に、望ましい特性函数を得るのには、いかなる重み函数を用いたらよいか (第 V 章)。
- (5) Mixing と組合せたとき、特性函数はどうなるか (第 VI 章)。
- (6) 浅い、あるいは急傾斜の反射面の調査にあつての注意すべき事項はなにか (第 VII 章)。
- (7) 妨害波は群設置および多孔爆発によつてどのように消去されるか (第 VIII 章)。

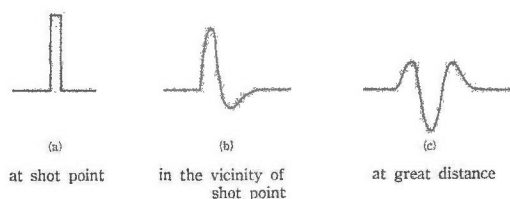
本論文を草するにあたり、終始御指導を賜つた淵田隆門博士、また日頃から御支援、御鞭撻を頂いている飯田波事博士に深く敬意を表する次第である。なお、電力技術研究所の増田秀夫・鍋岡昭三・中野辰裕、東京電力 K. K. の北野昭彦の諸氏には、竜ヶ崎の実験で御援助を受けた。こゝに各位に対し謝意を表する次第である。

本所物探部の人々からも多くの援助を受けた。森喜義・中条純輔・古谷重政・井波和夫の諸君には竜ヶ崎の実験において、細野武夫・田村登志子両氏には計算および製図について、また早川正巳博士・南雲昭三郎・中条純輔の諸氏には、有益なる注意を頂いた。

I. 2 反射波の検出

I. 2. 1 爆発と伝播と記録

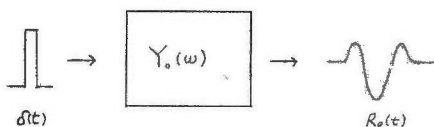
火薬を地中で爆発させたとき、パルスの形の地震波が発生して、これが四方に伝播して行くという考え方は、相当古くから知られている。しかし、その形については種々に考えられていたようである。たとえば、Klipsch¹¹⁾は、火薬によつて発生する impulse は“damped wave train”であろうと述べている。1940年以來、Rickerはこの地震波の単位 (seismic pulse) について研究し、wavelet と名づけて提示した。周知のように、彼は wavelet を粘性のある一様な無限に広がる物体での弾性波動の方程式から求めたのであるが、その波形は第1図に示すようなものである。



第 1 図

地中での火薬の爆発に際しては、普通衝撃波 (shock wave) が発生すると考えられているが、これを第1図 (a) のような一種の単位衝撃函数 $\delta(t)$ で表わすことについては、まだ多くの疑問があるかもしれない。事実、地震探査においては、爆発点の地質や深度などにより、波形に相当の違いがあり、そう単純なものでもなさそうである。

いま、第1図の (a) と (c) とを較べてみたとき、(a) を filter の入力波形、(c) を出力波形と考えることができよう。この場合、その変形は (a) の波が地中を伝播して行く過程でなされたもので、したがつてその過程を1つの filter の系と考えることはさしつかえないであろう。これを第2図のように表現することができる。いま、wavelet を $R_0(t)$ 、 $\delta(t)$ のスペクトルを $\Omega(\omega)$ とすると、 $\Omega(\omega) \equiv 1$ であるから

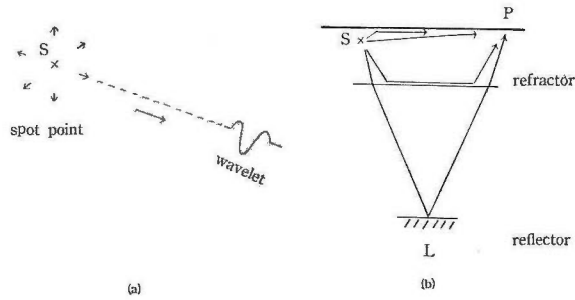


第 2 図

$$\begin{aligned}
 R_0(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega(\omega) Y_0(\omega) e^{j\omega t} d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Y_0(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

となる。すなわち、 $Y_0(\omega)$ は一様な粘弾性体が現わす特性函数であり、wavelet $R_0(t)$ は filter $Y_0(\omega)$ の衝撃応答 (impulse response) にほかならない。

地震探査でわれわれが見る多くの記録は、wavelet のような単純なものでないことはよく知



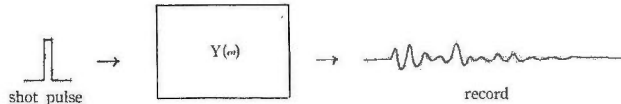
第 3 図

(a) 爆発と wavelet (b) 爆発と各種の波と受振

(a) Explosion and wavelet

(b) Explosion, many kinds of waves and receiving

つている。それは、次のように解釈することができる。すなわち、爆発点から四方に伝播する波は第3図(a)のように wavelet であるが、これが種々の地質の境界面(弾性的の性質の違い)において屈折し、あるいは反射などして、また異質の波(たとえばS波、表面波)になつて重合して観測点Pに到達し、実際われわれが見るような複雑な記録を得るものと考えられる。このことは、第2図の wavelet の場合の $Y_0(\omega)$ から、さらに複雑な場合の特性函数 $Y(\omega)$ を拡張して考えることができよう。この関係を第4図に示してある。



第4図 爆発パルス、土地、装置および記録の関係の概念図

Schematic relation between shot-pulse, ground, instrument and record

この際、 $Y(\omega)$ は2つのことを含んでいる。それは、爆発点から受振点の間の土地と観測装置とであり、これは直列に連なつた2つの filter の系に分離することができよう。すなわち

$$Y(\omega) = E(\omega) \cdot I(\omega) \quad (1-2)$$

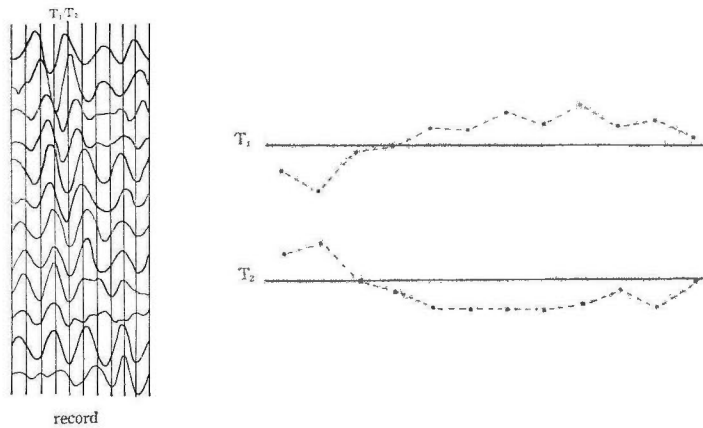
ここで $E(\omega)$ は爆発点Pと受振点Sの間の地震波が関係する空間が示す filter 特性、 $I(\omega)$ は観測装置の filter 特性^{註1)}である。

I. 2. 2 反射波と妨害波

上記のような考え方からすれば、反射波の検出ということは、第4図の右のような記録のなかから $S \rightarrow L \rightarrow P$ (第3図)の経路を通つてきた wavelet を抽出することにほかならない。この場合、抽出すべき wavelet を反射波(有効波)とし、それ以外の波を妨害波と呼んでいる。したがつて、ここで妨害波というのは反射波に対していうのであつて、これらが情報 (information) を含まないことを意味するわけではない。たとえば、屈折波(初動、2動、3動など)が重要な情報をもつていることは周知のことであり、また表面波の観測からも地下構造に対する情報が得られることも最近知られている。

一般によく知られていることであるが、反射波を検出する操作は、第4図のような1成分の記録から反射波の wavelet を抽出することではなく、数成分の記録から、いわゆる“line-

註1) 観測装置のなかの増幅器は、通常 A.G.C. 回路が用いられており、特にその時定数を考えれば、線型と考えることはできないが、ここでは簡単のため A.G.C. を考慮しない。

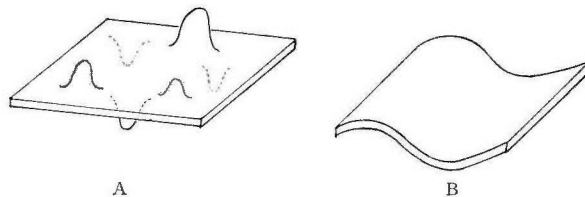


第5図 Line-up と土地の振幅
Line-up and vibration of ground

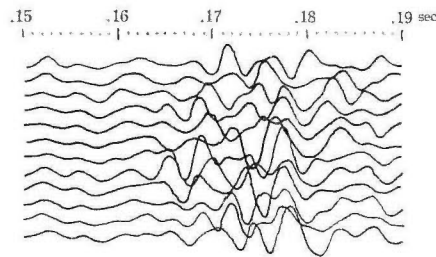
up” という現象から検出している。このことは次のことを意味する。もし、各成分の振幅が土地の変位振幅を現わすとすると、line up の起る時刻には、第5図に見るように、土地は見掛け上非常に波長の長い振動をすることを現わしている。この見掛けの波長 λ_{ap} の長さは、土地の下方の特定の方向から伝播してくる wavelet の進行方向に関する。いま、wavelet の来る方向を θ とし、その真の波長を λ とすると、地表での見掛けの波長は $\lambda_{ap} = \lambda / \sin \theta$ で表わされる。すなわち、line up とは土地の特定の方向から wavelet が来ることから生ずる現象であり、このような wavelet をわれわれは反射波と認定している。

火薬の爆発によつて生ずる土地の振動を、現象的には第6図のA、Bのように2つに分けておくことは、種々の問題を理解するのに有益であろう。Aは地表が偶発的に、あちらこちらと凹凸ができるものである。これはランダムな方向から来る波の合成と考えてもよいし、外部から刺戟されて、その場所、場所で特異な resonance を起す運動と考えてもよい。この種の運動が実在することは、特に水田のような、やわらかい地面においては小範囲に見られることは金子¹⁰⁾も指摘している。

これに対して、B型のものは、土地の振動が、ある波長をもつて、ある方向に（主として爆発点から四方に向かつて）波を打つて進行するものである。表面波は、この種の波の代表的なものに考えられるが、屈折波も反射波も前に述べたように、この種の波に含まれる。すなわち、A型の波は全部妨害波、B型の波は一部妨害波であり、一部反射波である。前者の妨害波を random noise、後者の妨害波を regular noise または wave noise と呼ぶこともある。



第6図 火薬の爆発によつて生ずる土地の2つの型の振動
Two types of vibration of ground generated by an explosive



第7図 Random な妨害波の1例。受振器間隔
1 m。竜ヶ崎の実験(1958)より

A sample record of random noise at Ryūgasaki test field
Spacing of each geophone = 1 m

火薬の爆発によつて生ずる土地の運動では、実際にはA型、B型の両方のタイプの波を含んでいる。しかし、その比率、特に周波数成分に対しての比率は、土地の条件により、かなり大きく異なつてゐることが知られている(たとえば金子¹⁰⁾、Jones & Morrison⁸⁾)。

I. 2. 3. 反射波の検出

妨害波のなかから反射波を検出する最も広く用いられている方法は、増幅器中に含まれる電気回路的 filter を用いる方法である。これは原理的には1成分を1つの time series として、そのなかで時間に関する反射波のスペクトルと妨害波のスペクトルとの違いを利用するものである。多くの場合、S-N 比が最大になるような filter が用いられている。この種の問題は最近情報理論 (information theory) の発展に伴ない、その理論的研究が進められている。以上のように、電気的 filter においては、時間的要素だけによつて signal の検出をはかるのに対して、群設置法あるいは多孔爆発法では空間的要素を導入している点に特長がある。たとえば、A型の波に対しては、地表に受振器を並べるとき、受振器の間隔が波の波長に較べて大きい場合には、各受振器の出力は random energy と考えることができよう。これに対してB型の波については、受振器の出力の和は、いわゆる“move out filter”とみなされる。この場合は、後に詳しく述べるように、各受振器の move out time (時刻差) Δt に支配される一種の filter を構成する。このことは多孔爆発についても同じことがいえる。

反射波の検出をよくするためには、このほかにも種々の方法が研究されている。たとえば観測装置としては A.G.C. suppression, compression など、爆発点では爆薬の種類、量、また爆発深度、地質との関係などである。また重錘を落す方法も実用化されている。受振点では spread のとり方、受振器の深度、振子棒の使用など種々の努力がなされている。

I. 3 これまでの研究

群設置法と多孔爆発法に関する研究の歴史は意外なほど古いことに驚く。H. G. Taylor がこの方法について特許をとつたのは1931年のことであり、この年に1成分について2つの受振器を用いて群設置を実施している^{註2)}。また、これに関する研究論文として1935年に Born が、その翌年に Klipsch が発表している。Klipsch は random 型の妨害波について統計学的見地から S-N 比を研究している。すなわち、受振器の出力が一定でその位相が任意であるとき(その確率が等しいとき)、M個の受振器の出力の平均 \bar{r} は

$$\bar{r} = \sqrt{M} \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

註2) Savit, C. H. et al ^{註2)} による。

$$=0.886\sqrt{M} \quad (1-3)$$

と与えられる。もし、反射波が各受振器で同位相で受けられるならば、反射波の振幅は M 倍になる。したがって、受振器1個のときの S-N 比 R_1 と、受振器 M 個のときの S-N 比 R_M との比 \bar{G} は

$$\bar{G}=R_M/R_1=1.13\sqrt{M} \quad (1-4)$$

と計算される。この式から S-N 比の向上の割合が \sqrt{M} に比例することがわかる。したがって、彼はその結論の項で S-N 比を 10 倍に向上させるためには、各成分につき 100 個の受振器を、6 成分とすると、600 個の受振器を用いなければならないことを述べ、それを全部 1 ft の孔のなかに入れてなければならないことは(当時は受振器を風などの noise から守るために 1 ~ 2 ft の孔のなかに入れていた)、実用上問題にならないと述べている。そしてまた、群設置を用いるときに、昇斜方向の spread が降斜方向の spread よりも効果的であることを述べていることは興味深い。

Klipsch の random 型の妨害波に対する考察に対し、1937 年から 38 年にかけて McDermott¹³⁾, Mott-Smith¹⁶⁾, Johnson⁷⁾などは、それぞれ B 型の妨害波の群設置による消去について述べている。そして、この時代は群設置法が一般に使用され始めた時代でもある。たとえば、Mott-Smith は真下の方向から来る波は群設置により、その出力は最大になり、斜めの方向のものは中間値を、側方から来る ground wave は最小の値になると述べている。そして、彼はこの考察から群設置は反射面の傾斜の小さい所では安全に用いることができるが、たとえば California のように急傾斜、皺曲、断層構造の所では良好な結果は得られないかもしれないことを警告している。

Johnson は群設置法の指向性の問題について述べている。この問題は短波無線における指向性アンテナの理論と同じ考え方である。問題にする波が定常的の sine 波とすると、合成された振幅は $A=\sin\left(\frac{N}{N-1}\pi-\frac{B}{\lambda}\sin\varphi\right)$ ^{註3)} となる。ここで B/λ は波長の受振器の cover する長さに対する比、 N は受振器の個数、 φ は波の ray の水平面との角(前述の θ の余角)である。この指向性の問題は後に Hales & Edward⁴⁾ がふたたび取上げており、金子¹⁰⁾ もふれている。

以上のような古い歴史をもつ群設置と多孔爆発の方法が、1954 年の Oil and Gas Journal に新しい技術として紹介されていることには驚かされる。このことは、群設置法を経済的に実施するための基礎である受振器の小型化と、多孔爆発を可能にする作孔機の進歩が、これらの方法を真に実用的なものにしたためと想像される。科学上の思いつきが真に実用化されるためには、周囲の技術の進歩をまたなければならない一つの事例と考えれば、興味あることである。

上記の Journal の諸論文、Parr & Mayne¹⁵⁾, Lombardi, イギリスの Hales & Edward⁴⁾ および Muir & Hales¹⁷⁾ の論文では群設置が一種の波長 λ_{ap} の filter であるという考え方が次第に明確になつた点に特色がある。

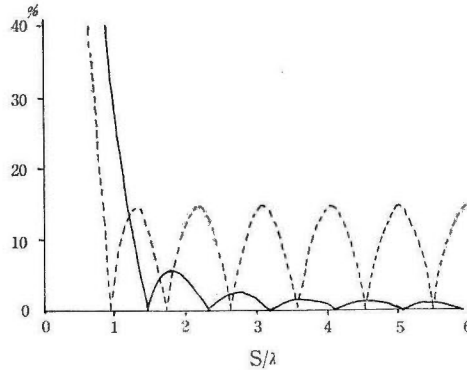
1956 年に出された Smith の論文は特に注意すべきものであると考えられる。彼は Generalized Harmonic Analysis (Wiener) を利用して、電氣的 filter と群設置との関係を求めている。すなわち、その総合効果は群設置の wave number response と、filter の frequency response との積として表わすことができることである。この関係は群設置と電氣的 filter とが直列の 2 つの filter 系をなしていることを意味している。このように、彼は波長の逆数である波数 k を使用しており、 k - f 面において random noise, wave noise, signal の power

註3) $A=\sin\left(\frac{N}{N-1}\pi-\frac{B}{\lambda}\sin\varphi\right)/\sin\left(\frac{1}{N-1}\pi-\frac{B}{\lambda}\sin\varphi\right)$ となるべきであろう。

spectrum を求めて比較検討していることは興味ある点である。この結果から 群設置における受振器の配置に関する諸提案をしているが、この点に関しては後にまた述べることにしたい。

筆者がこの論文を執筆中、2つの群設置と多孔爆発法に関する論文が発表された。その1つは Savit et al²⁸⁾で、これは Parr¹⁹⁾らのものと同じ傾向のもので、重み関数を適当に選び、さらに良好な性質の filter を作ろうとするものである。Parr との比較を示すと第8図の通りである。この図でSは受振器が cover する長さ (次章においてはLとしている)、 λ は見掛けの波長である。点線は Parr の方法の filter 特性であり、実線は Savit のものである。

その2は White²⁹⁾のもので、彼は群設置法、あるいは多孔爆発法が move out filter であることを述べ、前記の重み関数の種々の分布に対する衝撃応答を論じている。



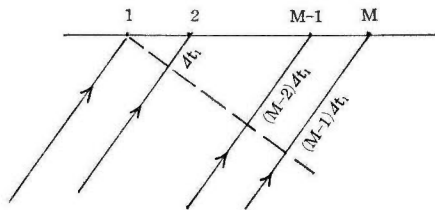
第8図 Savit et al(実線)と Parr-Mayne
(点線)の filter の比較

Comparison between the Savit et al. filter (solid line)
and Parr-Mayne filter (dashed line)

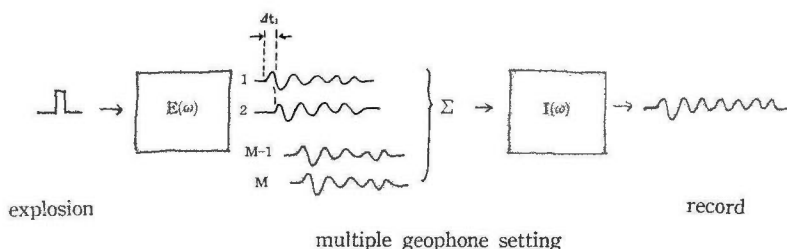
II. 理論的考察

II. 1 群設置と多孔爆発の物理的意味

I. 2 の項において、総合した特性関数 $Y(\omega)$ が爆発のパルスと記録とを結びつける filter 効果を表わすことを述べた。そして、 $Y(\omega) = E(\omega) \cdot I(\omega)$ と書くことができることを知った。一般に群設置とは地上に並べた受振器の出力を合成することであるから (この場合、簡単のため等間隔としておく)、波の来る方向により、第9図に示すように等しい時間的遅れを生ずる



第 9 図



第 10 図 群設置の作用の概念図

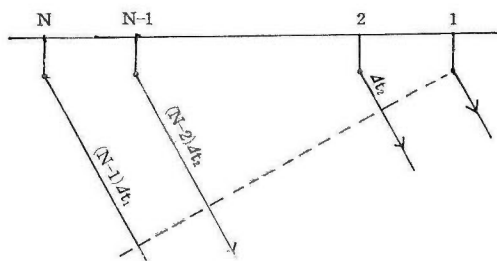
Schematic diagram of explosion, ground, instrument, operation
of multiple geophone setting and record

わけである。したがって、1番からM番目までの土地の振動は、第10図に見るようにM個あり、それぞれの時間の遅れは Δt_1 である。これを合成して増幅器に入れるのであるから、合成が意味する move out filter の特性函数を $K_1(\omega)$ で表わせば、群設置法を用いた総合特性 $Y(\omega)$ は

$$Y(\omega) = E(\omega) \cdot K_1(\omega) \cdot I(\omega) \quad (2-1)$$

と表わすことができる。第10図は、これらの関係の概念図である。

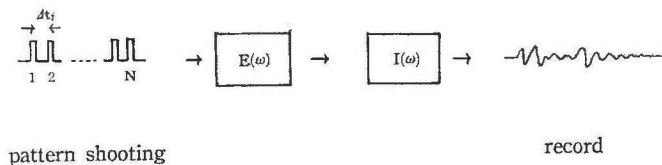
多孔爆発についても、ほぼ同様なことが考えられる。すなわち、第11図のように1, 2, 3, ... N個の等間隔に爆発孔を作り、同時爆発をするとすれば、波の出る一定の方向に対しては、



第 11 図

群設置の場合と同様に時間的の遅れが起る。したがって、この概念図を作れば第12図のようになる。すなわち、 Δt_2 だけの時間間隔で起るパルスの合成にほかならない。こゝで、この合成を1つの特性函数 $K_2(\omega)$ とすると

$$Y(\omega) = K_2(\omega) \cdot E(\omega) \cdot I(\omega) \quad (2-2)$$



第 12 図 多孔爆発の作用の概念図

Schematic diagram of pattern shooting, ground, instrument
and record

と書くことができ、したがって、群設置と多孔爆発が可逆的の関係にあること、およびその総合個数が $M \times N$ 個であることが推察されよう。また、群設置と多孔爆発とを併用するときには、(2-1)と(2-2)の関係から総合特性 $Y(\omega)$ は、

$$Y(\omega) = K_2(\omega) \cdot E(\omega) \cdot K_1(\omega) \cdot I(\omega) \quad (2-3)$$

という重要な関係が得られる。すなわち、その特性は $K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ のように積の形で表現されるが、その数学的証明は次項に述べることにする。

II. 2 群設置と多孔爆発の理論的關係

II. 2. 1 群設置の理論

いま、受振器を等間隔に地表に並べ、その数を M 個とし、おのおのの出力を $a_1 y(t)$, $a_1 y(t + \Delta t_1)$, $\dots \dots a_{M-1} y(t + (M-1)\Delta t_1)$ と表わす。すると、その合成されたもの、すなわち増幅器の入力 $z(t)$ は

$$z(t) = \sum_{K=0}^{M-1} a_K y(t + K\Delta t_1) \quad (2-4)$$

ただし、 a_K は各受振器の出力の重み函数 (weighting function) で、同じ受振器を1個ずつ用いる場合には $a_K \equiv 1$ である。いま、 $y(t)$ のスペクトルを $Y(\omega)$ 註4、 $z(t)$ のスペクトルを $Z(\omega)$ とすると

$$Z(\omega) = \left[\sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K\Delta t_1} \right] Y(\omega) \quad \text{註5} \quad (2-5)$$

ゆえに群設置の表わす周波数特性函数 (伝達函数) $K_1(\omega)$ は

$$K_1(\omega) = \sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K\Delta t_1} \quad (2-6)$$

となり

$$Z(\omega) = K_1(\omega) \cdot Y(\omega) \quad (2-7)$$

と表わすことができる。 $a_K \equiv 1$ のときには(2-6)式から

註4) この $Y(\omega)$ は前項まで用いた総合特性函数ではない。

註5) (2-4)式を Fourier 変換して

$$Z(\omega) = \int_{T_1}^{T_2} \sum_{K=0}^{M-1} a_K y(t + K\Delta t_1) e^{-j\omega t} dt$$

他方、受振器の出方 $y(t + K\Delta t_1)$ のスペクトルは

$$Y(\omega) = \int_{T_1}^{T_2} y(t + K\Delta t_1) e^{-j\omega(t + K\Delta t_1)} dt$$

いま、 $\varepsilon = (t + K\Delta t_1)$ とすると

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= \int_{T_1}^{T_2} \sum_{K=0}^{M-1} a_K y(t + K\Delta t_1) e^{-j\omega(t + K\Delta t_1)} e^{j\omega K\Delta t_1} dt \\ &= \left[\sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K\Delta t_1} \right] \int_{T_1}^{T_2} y(\varepsilon) e^{-j\omega \varepsilon} d\varepsilon \\ &= \left[\sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K\Delta t_1} \right] Y(\omega) \end{aligned}$$

ただし、 $T_2 - T_1$ は $K\Delta t_1$ よりも充分大きいとする (Jones⁹⁾による)。

$$|K_1(\omega)| = \frac{\sin \frac{M\omega \Delta t_1}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta t_1}{2}}, \quad \arg K_1(\omega) = -\frac{(M-1)\omega}{2} \Delta t_1 \quad (2-8)$$

多孔爆発については、それが単独で行われる場合には上とまったく同じである。

II. 2. 2 群設置と多孔爆発を併用したときの理論

多孔爆発の個数をN個、重み関数を b_s 、このとき b_s は各孔の薬量と考えてもよい。このとき、爆発点 $S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N-1}$ のおのおのに対して各受振器の出力は次のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} S_0: & a_0 b_0 y(t), \quad a_1 b_0 y(t + \Delta t_1), \dots, a_{M-1} b_0 y(t + (M-1)\Delta t_1) \\ S_1: & a_0 b_1 y(t + \Delta t_2), \quad a_1 b_1 y(t + \Delta t_1 + \Delta t_2), \dots, a_{M-1} b_1 y(t + (M-1)\Delta t_1 + \Delta t_2) \\ S_{N-1}: & a_0 b_{N-1} y(t + (N-1)\Delta t_2), \quad a_1 b_{N-1} y(t + \Delta t_1 + (N-1)\Delta t_2), \\ & \dots, a_{M-1} b_{N-1} y(t + (M-1)\Delta t_1 + (N-1)\Delta t_2) \end{aligned}$$

すなわち、増幅器の入力 $z(t)$ は

$$z(t) = \sum_{K=0}^{M-1} \sum_{S=0}^{N-1} a_K b_S y(t + K\Delta t_1 + S\Delta t_2) \quad (2-9)$$

と表わされる。いま、 $t + S\Delta t_2 = t'$ とし

$$g(t') = \sum_{K=0}^{M-1} a_K y(t' + K\Delta t_1)$$

とおくと (2-4) と (2-5) の関係から

$$G(\omega) = \sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K \Delta t_1} Y(\omega)$$

が得られる。(2-9) 式から

$$z(t) = \sum_{S=0}^{N-1} b_S g(t + S\Delta t_2)$$

であるから、まったく同様に

$$Z(\omega) = \sum_{S=0}^{N-1} b_S e^{j\omega S \Delta t_2} \cdot G(\omega)$$

となる。すなわち

$$Z(\omega) = \left(\sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K \Delta t_1} \right) \left(\sum_{S=0}^{N-1} b_S e^{j\omega S \Delta t_2} \right) \cdot Y(\omega) = K_1(\omega) \cdot K_2(\omega) \cdot Y(\omega) \quad (2-10)$$

の関係が得られる。ただし

$$K_1(\omega) = \sum_{K=0}^{M-1} a_K e^{j\omega K \Delta t_1}, \quad K_2(\omega) = \sum_{S=0}^{N-1} b_S e^{j\omega S \Delta t_2} \quad (2-11)$$

すなわち、 $K_1(\omega)$ は群設置の、 $K_2(\omega)$ は多孔爆発の特性関数を表わす。 $a_K \equiv b_S \equiv 1$ のときは $K(\omega) = K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ とすると

$$\left. \begin{aligned} |K(\omega)| &= \frac{\sin \frac{M\omega \Delta t_1}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta t_1}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{M\omega \Delta t_2}{2}}{\sin \frac{\omega \Delta t_2}{2}} \\ \arg K(\omega) &= -\frac{M-1}{2} \omega \Delta t_1 - \frac{N-1}{2} \omega \Delta t_2 \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

次に、(2-6) 式あるいは (2-11) 式を数値計算をするときのための注意を述べておこう。これらの式まいうまでもなく、一般には虚数部分と実数部分とを含んでいる。虚数部分の存在

は filter としては周波数に対して位相差を生ぜしめるものである。しかし、普通の場合、群設置法あるいは多孔爆発法を用いるとき、その中心に対して対象的に分布させる型を用いている。原点を中心に移すと (2-6) 式は K の奇数に対しては

$$K_1(\omega) = a_0 + 2 \sum_{K=0}^{(M-1)/2} a_K \cos(\omega K \Delta t_1) \quad (2-13)$$

K の偶数に対しては

$$K_1(\omega) = 2 \sum_{K=1}^{M/2} a_K \cos(\omega \frac{2K-1}{2} \Delta t_1) \quad (2-14)$$

となり、虚数部分は 0 となる。したがって、この場合には (2-8) の下式 $\arg K_1(\omega) = 0^\circ$ となり、位相差は表われない。 $K_2(\omega)$ についても同じことがいえるのはもちろんである。

III. 反射波の変形

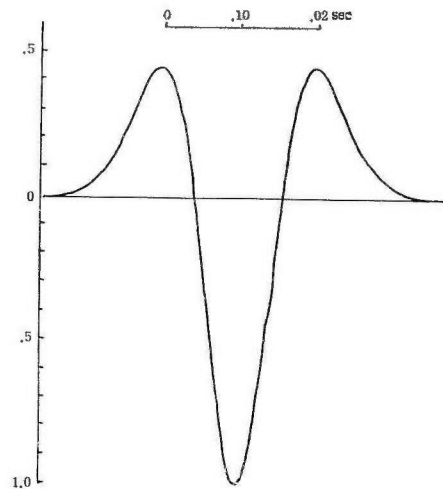
III. 1 wavelet

群設置法、あるいは多孔爆発法は (2-3) 式で表わされる線型操作 (linear operation) として表現されるが、これが地震波の単位である wavelet に作用したときに、実際どのような変形を与えるであろうか。われわれが記録紙上に反射波を検出するとき、反射波である wavelet の変形のありさまを頭に入れておくことは有益なことと思われる。

Ricker²¹⁾ は wavelet を表わす式として、爆発点から相当離れた距離では、その速度の波形として次の式で示している。

$$y(t) = -\frac{2}{R} \int_0^{\infty} \beta^2 e^{-\frac{R}{2}\beta^2} \cos(R\beta - \beta T) d\beta \quad (3-1)$$

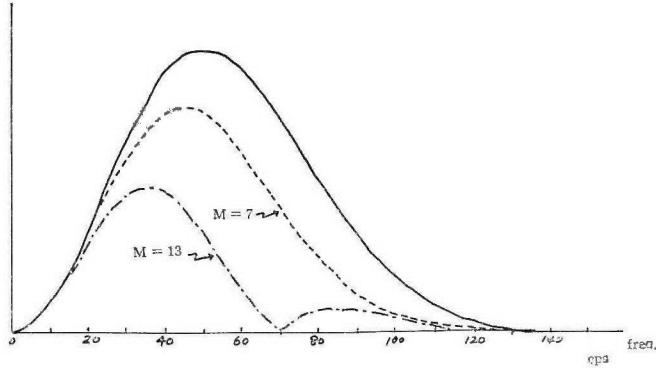
ただし、 $R = \omega_0 r / c$ 、 $T = \omega_0 t$ 、 r は爆発点からの距離、 t は時間、 ω_0 、 c は物質の常数である。



第 13 図 Ricker の wavelet

Ricker's wavelet

この式で表わす wavelet の形を第13図に示す。この波の卓越周波数は常数 ω_0 , c および距離 r で決まるものであるが、反射波の最も一般的の値を代表するものとして、山から山までの間を 0.02 sec としよう。すなわち、この場合には 50 cps の周波数が最も卓越したものにあたる。このときのスペクトル $|Y(\omega)|$ を第14図の実線で示してある。



第14図 実線は wavelet のスペクトル、点線と破線は変形した wavelet のスペクトル

Spectrums of wavelet (solid line) and distorted wavelets (dotted and broken lines); M: geophone number

III. 2 受振器間隔が一定で受振器個数を変えた場合

重み函数 $a_K \equiv 1$ の場合、すなわち (2-8) 式において $\Delta t = 1/900$ sec にあたる合成波形を次に計算してみよう。これは、第13図の波形を $1/900$ sec だけずらして加算することにほかならない。ただし、波形の変形を比較するのに便利のため、平均値すなわち個数で割った値をとることにした。変形された波は次式で表わされる。

$$z(t) = \frac{1}{M} \sum_{K=0}^{M-1} y(t + K/900) \quad (3-2)$$

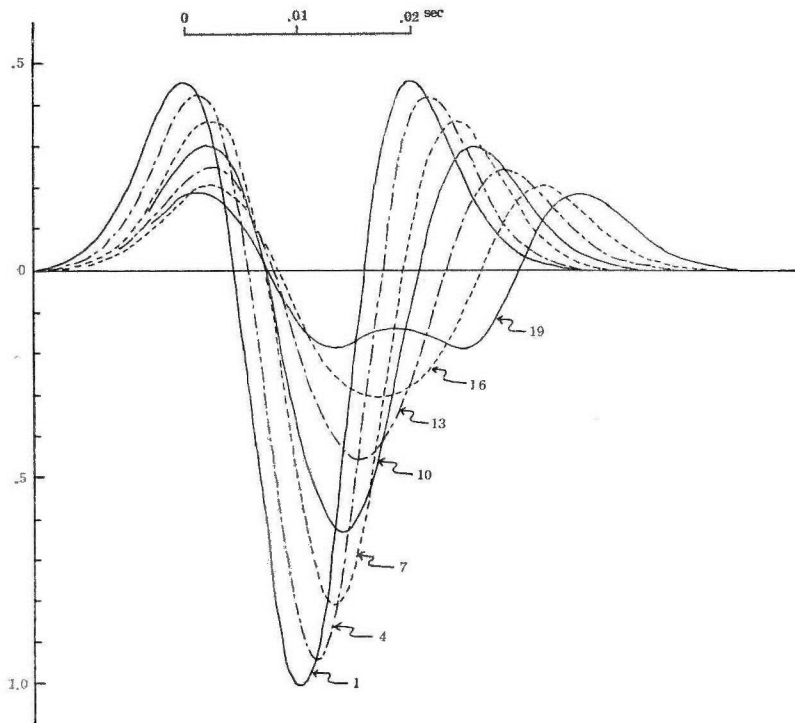
個数 M を 1~19 までとつて表わしたのが第15図である。まず、その振幅についてみると、その山、谷ともに個数 M が増すとともに減少し、また卓越周期を示す2つの山の間隔は漸次増大する。また山、谷がともに次第に右の方に移動する。これは (2-8) 式に示される位相差であるが、受振器群の中心に原点をとれば起らない。

Signal が定常的の sine 波である場合の合成振幅の変化については、Johnson⁷⁾ が求めているが (I. 3 参照)、この場合と比較することも興味あることと思う。定常的の sine 波の合成振幅は次の式で表わされる。

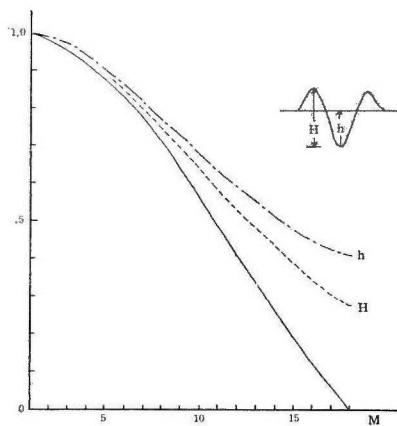
$$A = \frac{\sin\left(\frac{M\Delta t}{T_0}\pi\right)}{\sin\left(\frac{\Delta t}{T_0}\pi\right)} \quad (3-3)$$

ただし、 T_0 は sine 波の周期である。

この値と合成された wavelet の振幅との比較を第16図に示してある。合成された wavelet の振幅として、山と谷との振幅と谷だけの振幅と2通りとつてみた。この図から明らかなように、一般に合成された wavelet の振幅の方が A の値よりも大きいのが、wavelet の変形の著し



第15図 合成された wavelet の形, Mは受振器の個数
 Composed wavelet form in case of move-out time,
 $\Delta t=1/900$ sec; M: geophone number



第16図 定常波と変形した wavelet の
 振幅の比較
 実線は(3-3)式から計算したもの

Comparison between amplitudes of stationary wave and distorted wavelet for geophone number; Solid line is calculated by formula (3-3)

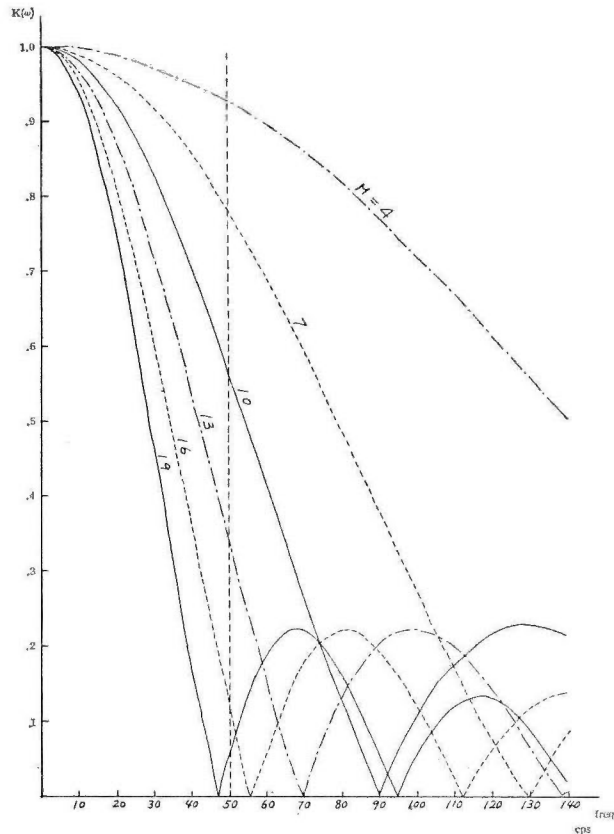
くない $M=10$ 以下では、その差は大したことはない。しかし、 M がそれ以上大きい値に対しては、合成された wavelet の方が相当大きくなる。

第15図の wavelet の変形について、さらに詳しく調べるために、(2-8)式を用いて、加え合せ作業に該当する $K(\omega)$ を計算してみよう。この場合、 $K(\omega)$ は次の式で与えられる。

$$K(\omega) = \frac{\sin(\pi M f \Delta t)}{M \sin(\pi f \Delta t)} \quad (3-4)$$

ただし、 $\omega = 2\pi f$, $\Delta t = \frac{1}{900}$ sec

(3-4)式から計算される特性函数を第17図に示す。第15図の波形の様子と、第17図の



第17図 第15図に対応する $K(\omega) = \sin(\pi M f \Delta t) / M \sin(\pi f \Delta t)$
 Characteristic function $K(\omega) = \sin(\pi M f \Delta t) / M \sin(\pi f \Delta t)$
 corresponds to Fig. 15

filter $K(\omega)$ とを較べて気づく 2, 3 のことを述べよう。第1は (3-3)式で求めた振幅の減少率は第17図からも求めることができることである。すなわち、周波数が 50 cps のときは、第17図に点線で示すように 50 cps を通り、縦軸に平行な直線が $K(\omega)$ と交わる点によつて求められる。したがつて、前にも述べたことから、この交点の値は変形された wavelet の振幅の減少率を近似的に表わすものとしてもよい。また、第15図において $M=19$ の場合には、変形された wavelet は谷に1つのくびれを示し、反射波としての wavelet の形は、この程度になると完全にくずれて、2つの wavelet に分離する傾向を示し始める。第17図においては

$M=19$ の曲線は 47 cps で 0 となり, $f=50$ cps では 次の山の値になる。 $K(\omega)$ の値が一度横軸を切つて次の山になることは, $K(\omega)$ の値が負の値になり, 位相が反転することになり, これがくびれを生ずる現象と一致する。

$K(\omega)$ は, 第 17 図にも見るように一種の low-pass, high-cut filter であるから, 第 15 図のように M の値が大きくなるに従い, 山と山との間隔が次第に広がるのは不思議ではない。このことは, wavelet のスペクトル $Y(\omega)$ が, この操作により, どのような $Z(\omega)$ に変わるかを調べてみるとよくわかる。第 14 図に, その例を示してある。すなわち, $Z(\omega)$ の極大値の位置は M の値が大きくなるに従い, 次第に f の小さい値の方に移動する。たとえば, $M=13$ では極大値は $f=35$ cps であり, 第 15 図の山と山との間隔から求めた値によく一致する。

以上述べた反射波の変形に関することは, 単に Ricker の wavelet にのみ適用されることでなく, 第 13 図のような wavelet に類する孤立波の形をなす反射波に対しては, 大体共通していえることと考える。

III. 3 受振器の cover する長さが一定で個数を変えた場合

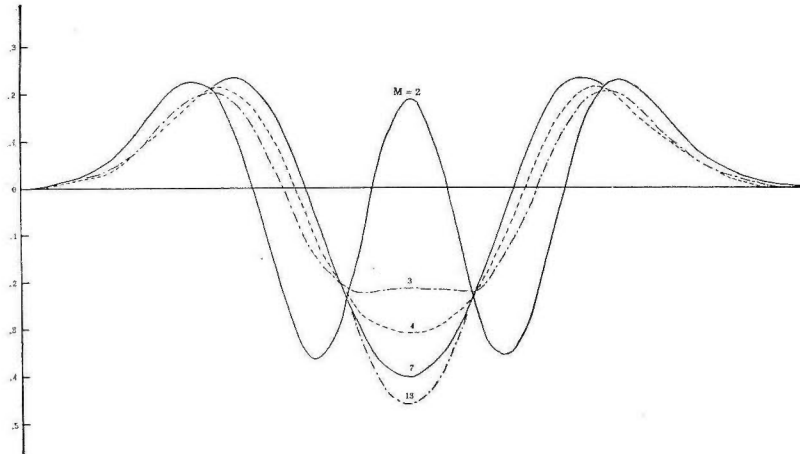
次に, 受振器の cover する長さ L を一定にして, 受振器の個数 M を変化させた場合について調べてみよう。このときの特性関数 $K(\omega)$ は次式で与えられる。

$$K(\omega) = \frac{\sin\left(\pi f \frac{ML}{M-1} - \frac{1}{V_{ap}}\right)}{\sin\left(\pi f \frac{L}{M-1} - \frac{1}{V_{ap}}\right)} \quad (3-5)$$

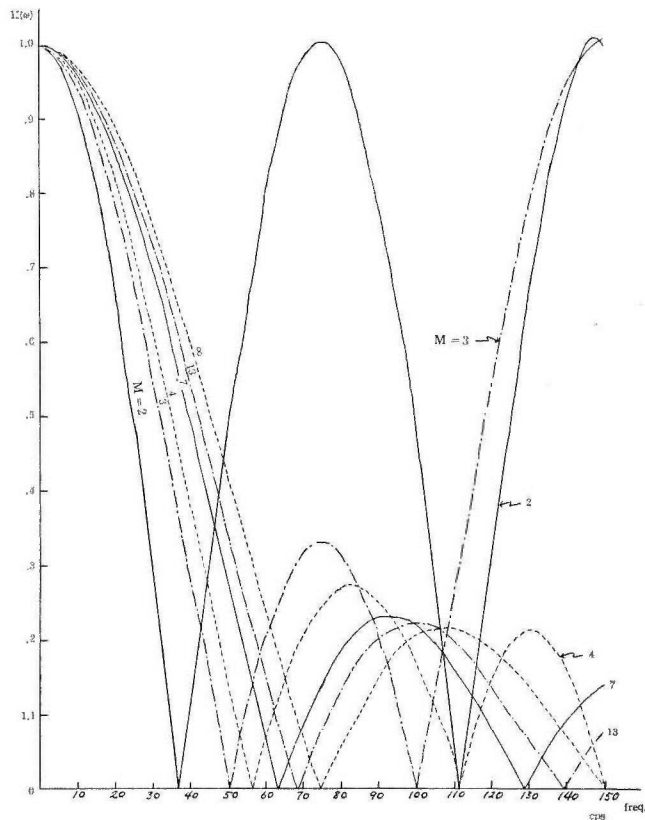
ただし V_{ap} は見掛けの速度である。

$$(1) \frac{L}{V_{ap}} = \frac{12}{900} \text{ sec のとき}$$

これは, 見掛けの速度が 3,600 m/sec のときは $L=48$ m に相当する。すなわち, 受振器の cover する長さが相当長い場合に相当する。この L m の間に 2, 3, 4, 7, 13 個の受振器を等間隔に並べたときの波形 $z(t)$ を第 18 図に, また, そのときの特性関数 $K(\omega)$ を (3-5) 式から計算して第 19 図に示す。こゝで示された波形の変化と $K(\omega)$ との関係は, 前の場合に述



第 18 図 wavelet の変形, $L=V_{ap} \times 12/900$ sec の場合
Distorted wavelet in case of coverage length $L=V_{ap} \times 12/900$ sec ;
M: geophone number



第19図 第18図に対応する $K(\omega)$

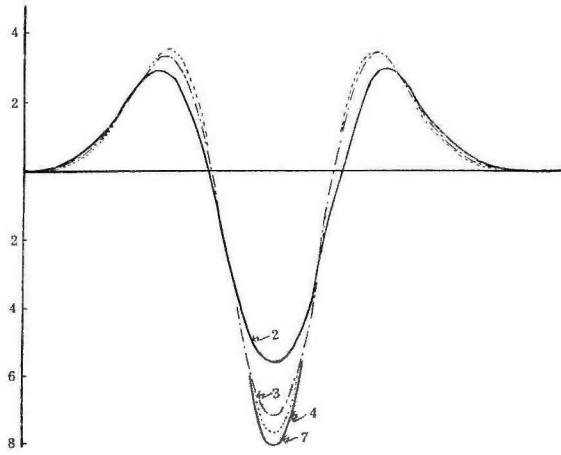
Characteristic function $K(\omega)$ corresponds to Fig. 18

べたことが、そのまま適用される。しかし、次のことは注意すべきであろう。すなわち、 L の間におかれる受振器の個数が多いと wavelet の変形は少なくなり、個数が少ないほど変形の率は著しい。このことは、cover する長さ L が長い群設置や多孔爆発を用い、反射波の見掛け速度が比較的小さい場合には、受振器の個数が少ないと signal の変形も大きいし、また、その振幅の減少も著しいことを意味する。前記の見掛け速度 3,600 m/sec の値をとることは、實際上そうまれなことではない。そのときの cover する長さ 48 m は、普通としては長い距離を意味するが、多孔爆発や後にも説明するが (VI. 1) 2-channel mixing を行う場合には受振点間隔^{註6)}は大体 24 m に相当することになるので、第18図に示すような signal の変形も実際にありうるものである。すなわち、比較的受振器の個数が少ない、しかも mixing を行う場合には、妨害波の消去作用は別にして、反射波に対する変形、振幅の減少は無視できないことを注意しておこう。

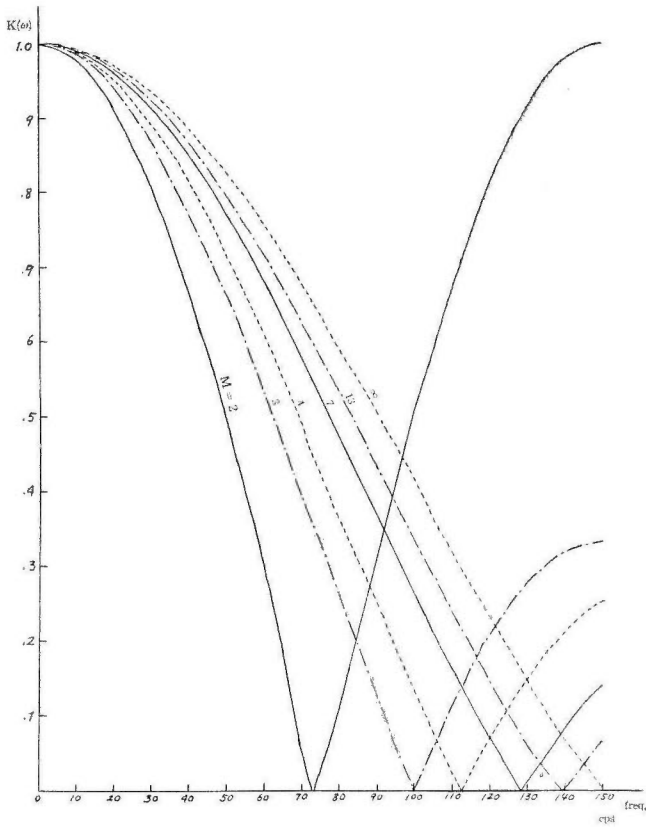
$$(2) \quad \frac{L}{V_{sp}} = \frac{6}{900} \text{ sec のとき}$$

受振器の cover する長さが(1)の場合の半分のときの $z(t)$, $K(\omega)$ を第20図、第21図に示す。この場合には、(1)のように大きな wavelet の変形は見られない。(2)の受振器の個

註6) 受振点間隔: 群設置の場合の受振器間隔と、その中心の位置の間隔とを区別するため、後者を受振点間隔と呼ぶことにする。



第 20 図 wavelet の変形 $L=V_{ap} \times 6/900 \text{ sec}$ の場合
 Distorted wavelet in case of coverage length $L=V_{ap} \times 6/900 \text{ sec}$



第 21 図 第 20 図に対応する $K(\omega)$
 Characteristic function $K(\omega)$ corresponds to Fig. 20

数 $M=2$ のときも(1)の $M=13$ の場合より変形は小さく、振幅も大きい、このことは、対応する第19図と第21図の $K(\omega)$ からわかることである。

なお、参考のために第19図、第21図において cover する長さ L の間に、無限個の受振器を並べた場合の $K(\omega)$ を求めておいた。この場合には (3-5) 式は次のようになる。

$$K(\omega) = \frac{\sin\left(\pi f \frac{L}{V_{ap}}\right)}{\pi f \frac{L}{V_{ap}}} \quad (3-6)$$

この式は標本函数 (sampling function) としてよく知られた函数である。

IV. 特性函数 $K(\omega)$

IV. 1 いろいろの表現

同じ出力の受振器や、爆発孔を等間隔に並べた場合の特性函数 $K(\omega)$ は、(2-8) 式で求められているが、その変数を種々に変えることにより、次のように表わすことができる。

$$|K(\omega)| = \frac{\sin\left(\frac{M\omega \Delta t}{2}\right)}{M \sin\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right)} \quad (2-8)$$

$$= \frac{\sin\left(\pi f M \frac{\Delta x}{V} \sin \theta\right)}{M \sin\left(\pi f \frac{\Delta x}{V} \sin \theta\right)} \quad (4-1)$$

$$= \frac{\sin\left(\pi f M \frac{\Delta x}{V_{ap}}\right)}{M \sin\left(\pi f \frac{\Delta x}{V_{ap}}\right)} \quad (4-2)$$

$$= \frac{\sin\left(\pi M \frac{\Delta x}{\lambda_{ap}}\right)}{M \sin\left(\pi \frac{\Delta x}{\lambda_{ap}}\right)} \quad (4-3)$$

$$= \frac{\sin\left(\pi M k \Delta x\right)}{\sin\left(\pi k \Delta x\right)} \quad (4-4)$$

$$= \frac{\sin\left(\pi f \frac{ML}{M-1} \frac{1}{V_{ap}}\right)}{M \sin\left(\pi f \frac{L}{M-1} \frac{1}{V_{ap}}\right)} \quad (3-5)$$

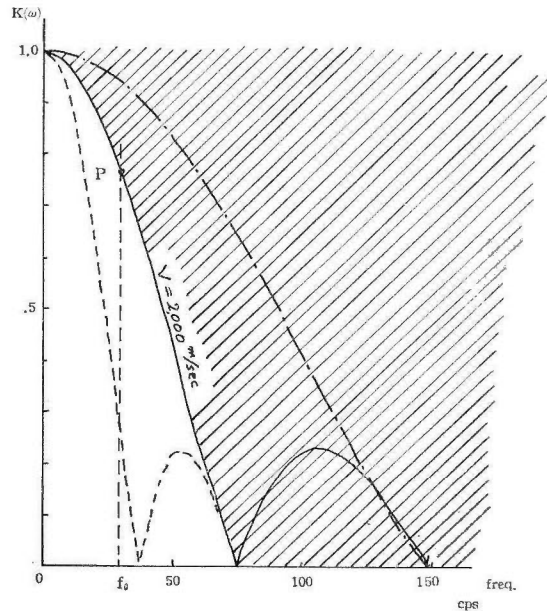
ここで $\omega=2\pi f$, $\Delta t = \frac{\Delta x \sin \theta}{V}$, $V_{ap} = \frac{V}{\sin \theta}$, $L = (M-1) \Delta x$, $\lambda_{ap} = V_{ap}/f$, $k=1/\lambda_{ap}$, 上記の式において、 V は地層の真の速度、 V_{ap} は地表に受振器を並べたときの見掛けの速度、 Δx は受振器間隔、 θ は入射あるいは射出角、 L は群設置、あるいは多孔爆発の cover する長さ、 λ_{ap} は地表での見掛けの波長、 k は波数である。

(4-1) 式の θ は、反射波の ray の方向を表わすものと考えられるので、この点に着目すると Johnson⁷⁾などが述べている反射波の指向性の問題を示している。また、(4-3) 式は見掛けの波長 λ_{ap} を含んでいるので、この式は波長に対する filter の性質を表わしている。以上のように、上の関係式で、どの変数に注目するかは任意であり、それはわれわれの目的によるのであるが、最も便利なものとして、筆者は (4-2) 式を用いることにした。その理由は、見掛けの速度 V_{ap} は現場において慣れており、また観測記録から直ちに知ることのできる、

最も利用し易い数量と考えたからである。

IV. 2 特 性 図

実際に用いられる受振器や、爆発孔の配置 (分布) に対応する $K(\omega)$ を計算して特性図を作る前に、特性図一般について少し説明しておこう。(4-2) 式からわかるように、変数は f , M , Δx , V_{ap} である。 M , Δx を一定にして、他の2つの変数を用いて特性図を作ったのが第22図である。この特性図の反射波の変形に対する意味は III. 2 において詳しく述べたから、附け加えることはない。



第22図 特 性 図

A characteristic function $K(\omega)$

第22図の点線は見掛けの速度 $V_{ap}=1,000$ m/sec, 実線は $2,000$ m/sec, 破線は $4,000$ m/sec に相当する filter 特性を示している。このように、一般に見掛けの速度により filter の性質が著しく変わること、すなわち、見掛けの速度が大きくなればなるほど high-cut filter としての性質は鈍になる。また、その逆に見掛けの速度が小さいときには著しい high-cut filter としての性質を表わす。いうまでもなく、反射波の見掛けの速度は、反射波の来る方向に支配され、その最小値は地層の真の速度 V の値である。したがって、反射波を考える場合、その見掛けの速度が V の値より小さくなることはない。もし、地層の真の速度を $2,000$ m/sec とすると、反射波に関して問題にする領域は $V_{ap} > V$ の部分、第22図の斜線の部分である。

反射波の卓越周波数を f_0 とすると、第22図の点 P の値が反射波の変形、振幅の減少率を表わすことは III. 2 の項において述べた通りである。したがって、この値が $1.0 \sim 0.7$ 程度であるならば、変形も著しくないし、減衰率も大体この値程度である。群設置や多孔爆発の配置は、この程度の値になるように選ぶべきであることはいうまでもない。

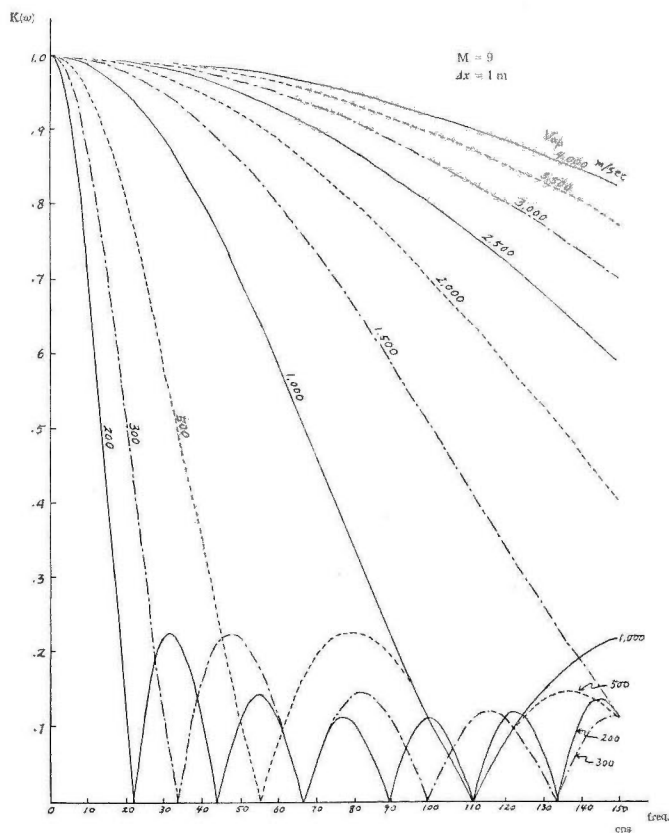
斜線で示す左の部分は、主として妨害波を問題とする部分である。妨害波にも、時とすると見掛けの速度が V の値に近いことがありうる。この場合には、この種の妨害波の消去は比較的困

難である。妨害波でも表面波に類するものは、その速度が小さいので左の部分に含まれる。しかし、表面波の卓越周波数は一般に小さいので、鈍い high-cut filter では除去することは難しい。非常に鈍い filter を用いると、反射波の変形はほとんど起こらないが、同時にB型の妨害波(第6図)に対しても、ほとんど除去作用はないわけである。これに反して、あまり high-cut の鋭いものを用いると、妨害波に対する除去作用は大きいが見掛けの速度の非常に大きい反射波以外に対しては著しい変形を起こし、振幅を減少させるので、両者ともに S-N 比の向上にはあまり大きな効果を期待することはできないであろう。

上記の説明からも明らかなように、群設置や多孔爆発の型、個数(孔数) M 、間隔 Δx は調査すべき地域の反射波の見掛けの速度(このことについては後にふたゝび詳説する)、卓越周波数、および妨害波のそれらの関係から最も適当なものを定めるべきである。もし、調査地において、これらのことが未知の場合には、少なくとも極端なタイプの filter 特性をもつものは避けるべきである。

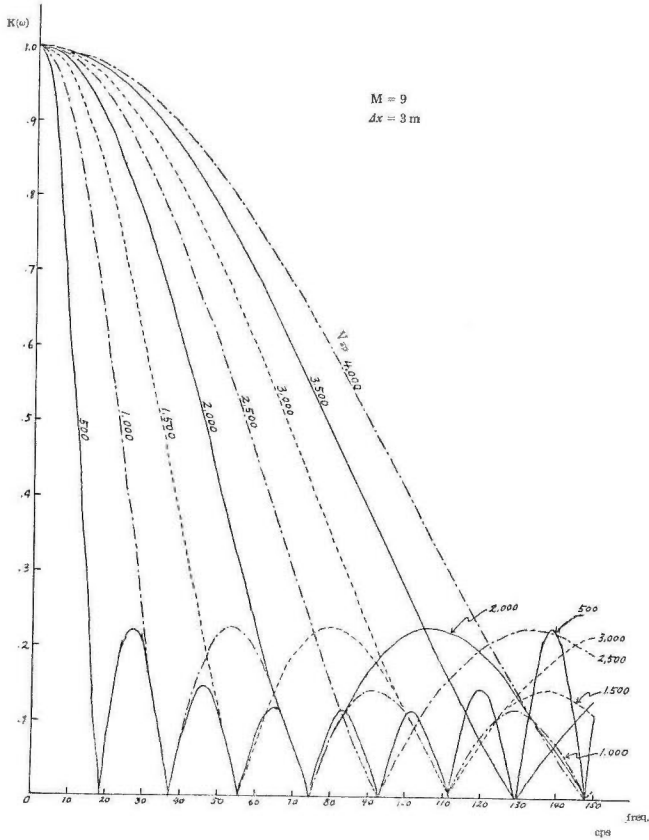
次に、わが国で比較的多く使用されている群設置と、多孔爆発の方法の特性函数 $K(\omega)$ を計算しておこう。

IV. 3 受振器9個の $K(\omega)$



第23図 受振器9個、直線形の $K(\omega)$, $\Delta x = 1$ m

Characteristic function $K(\omega)$ for linear array of 9 geophones, spacing = 1 m



第24図 受振器9個、直線形の $K(\omega)$, $\Delta x=3\text{ m}$

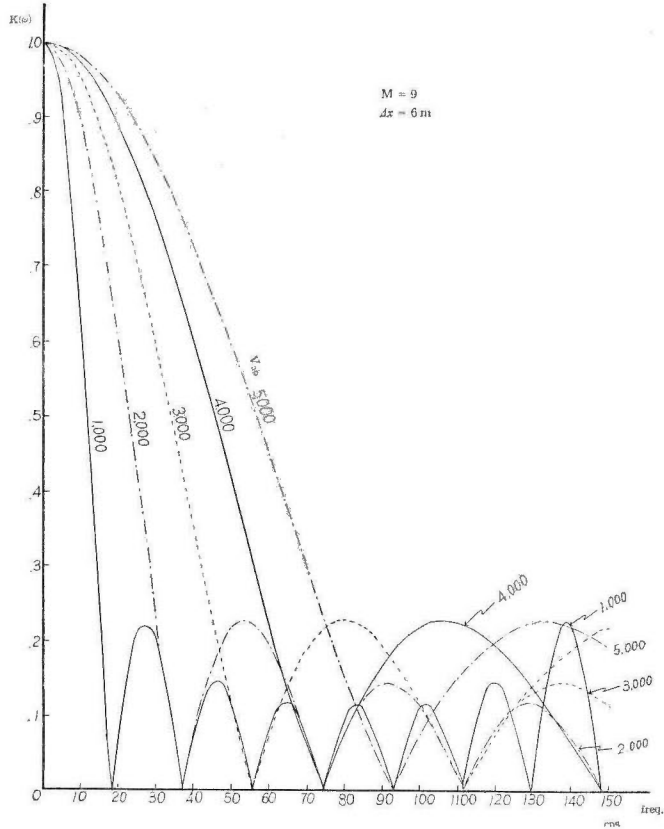
Characteristic function $K(\omega)$ for linear array of 9 geophones, spacing=3 m

わが国で最も普通に行われる群設置法は、9個の等距離、直線形 (linear array) に設置する方法である。特性函数 $K(\omega)$ を計算する場合、受振器間隔 Δx は 1 m, 3 m, 6 m にとり、見掛けの速度は 200 m/sec から適当な間隔で 4,000 m/sec までとつた。周波数 f は 0~150 cps まで求めた。これ以上の値は現在の観測ではあまり必要がないと考えたからである。

第23図で示される $\Delta x=1\text{ m}$ の場合の $K(\omega)$ について調べてみよう。一般に、B型の妨害波の周波数は 30 cps 以下の場合が多いので、その場合、この程度の受振器間隔の群設置法では、あまり消去効果は期待できない。他方、反射波の見掛けの速度は少なくとも 2,500 m/sec 以上の値が多いので、その変形も起こらない。要するに、この場合には filter としての作用はあまりないことである。

受振器間隔 $\Delta x=3\text{ m}$ (第24図) になると、high-cut filter としての性質は少し顕著になる。大体、見掛けの速度 V_{ap} が 500 m/sec 以下の妨害波はほとんど消去される。500~1,500 m/sec のものでは、30 cps 以上の周波数をもっているものは相当消去されるが、低周波のものに対しては、その消去効果はあまり著しくない。他方、反射波に対してはあまり変形は考えられない。

$\Delta x=6\text{ m}$ (第25図) の場合は、high-cut filter としての性質は著しくなる。すなわち、 V_{ap} が 1,000 m/sec 以下のものはほとんど消去され (図で見ると、特性曲線の次の山の部分で



第 25 図 受振器 9 器，直線形の $K(\omega)$ ， $\Delta x=6$ m

Characteristic function $K(\omega)$ for linear array of 9 geophones, spacing = 6 m

は最大値は 0.2 になるので，この部分での消去作用はある程度鈍化するが，この点に関しては次章においてふれる)，1,000~2,000 m/sec まではかなり消去される。B 型の妨害波の消去という観点からすると，群設置法における受振器間隔 Δx は，少なくともこの程度の距離が必要であることが，この計算から明らかである。他面， V_{ap} の比較的小さい反射波の変形もかなり著しくなることも事実である。

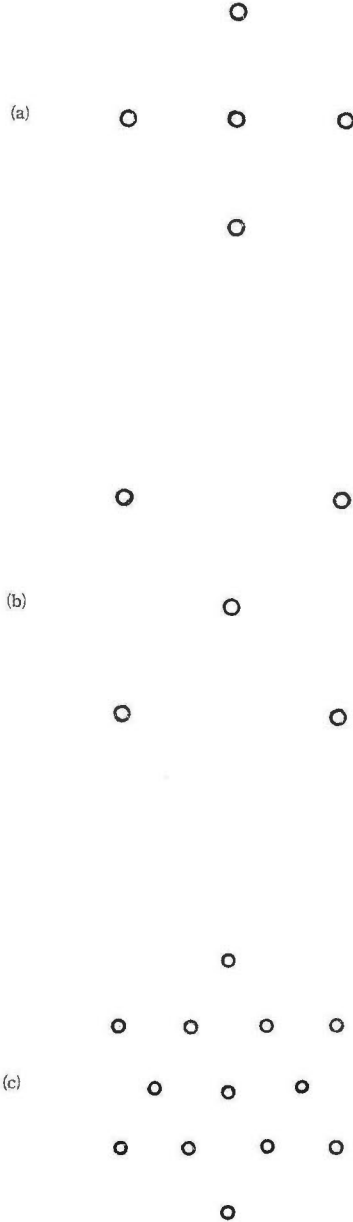
IV. 4 5 点爆発の $K(\omega)$

受振点，あるいは爆発点の配置が一直線上にない場合には，中心点を受振点と結ぶ直線上に投影して考えればよい。この場合 (2-13) 式，あるいは (2-14) 式が用いられる。たとえば，わが国で多く用いられる中心線上に 3 点，左右に 2 点の十字形の 5 点爆発の場合には (第 26 図 (a) 参照)， $K(\omega)$ は次式のようになる。

$$K(\omega) = \frac{1}{5} \left\{ 3 + 2 \cos \left(2\pi f \frac{\Delta x}{V_{ap}} \right) \right\} \quad (4-5)$$

また，第 26 図 (b) の型の 5 点爆発の場合には，

$$K(\omega) = \frac{1}{5} \left\{ 1 + 4 \cos \left(2\pi f \frac{\Delta x}{V_{ap}} \right) \right\} \quad (4-6)$$



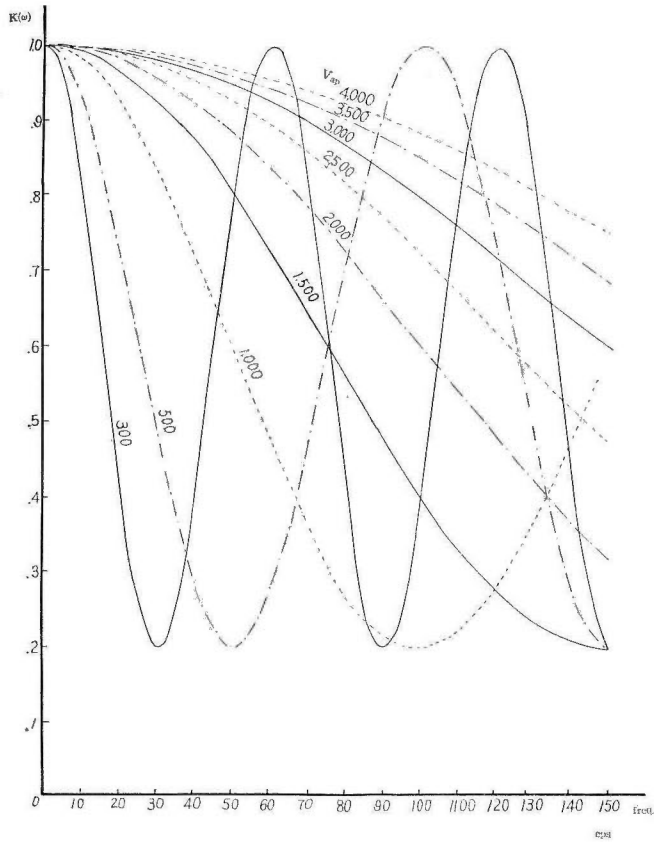
第26図 多孔爆発の型
Patterns of shot holes

となる。さらに複雑な星形の場合(第26図(c))には

$$K(\omega) = \frac{1}{13} \left\{ 3 + 4 \cos \left(\pi f \frac{4x}{V_{ap}} \right) + 2 \cos \left(2 \pi f \frac{4x}{V_{ap}} \right) + 4 \cos \left(3 \pi f \frac{4x}{V_{ap}} \right) \right\}$$

となる。

次に(4-5)式により爆発点間隔が5, 10, 15, 20, 25 m の場合について $K(\omega)$ を計算してみよ

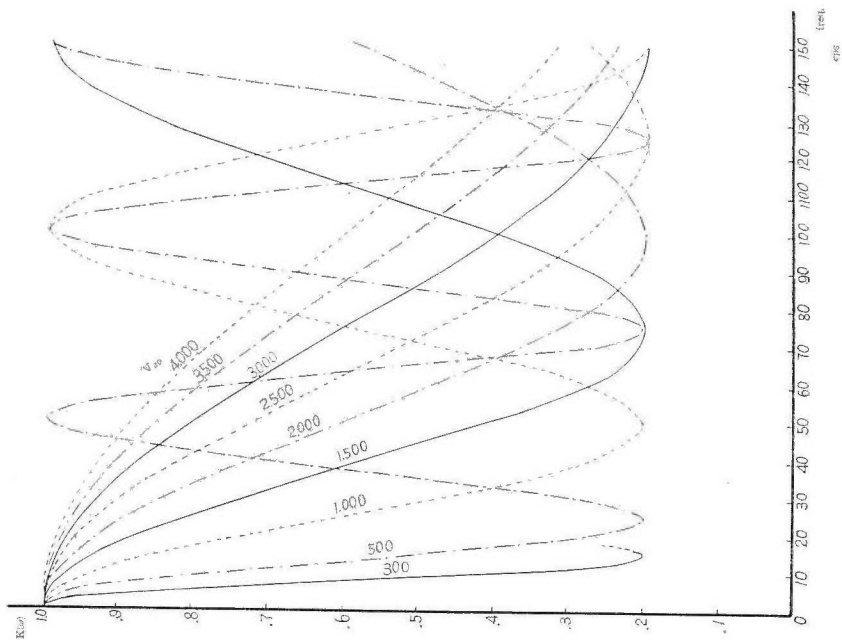


第 27 図 十字型 5 点爆発の $K(\omega)$, $\Delta x=5 \text{ m}$

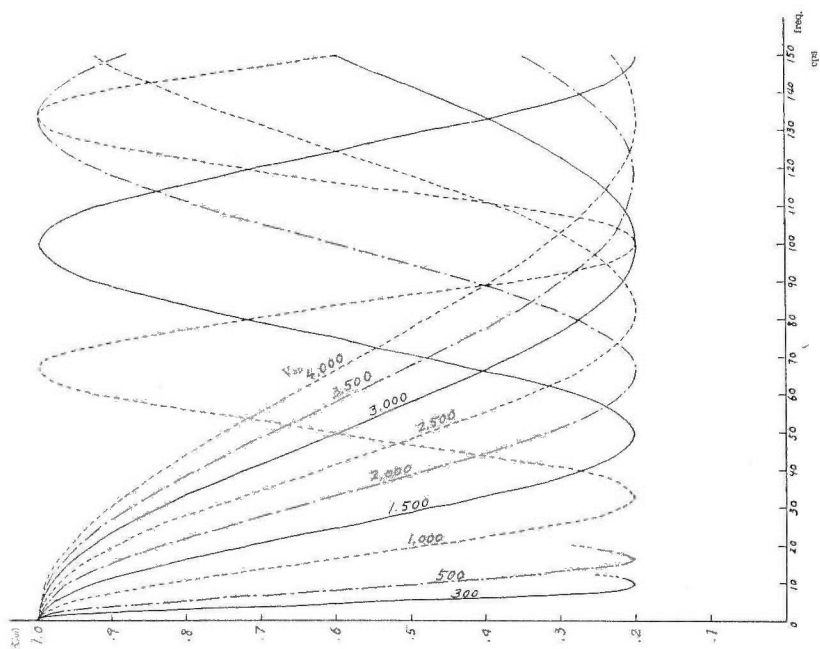
Characteristic function $K(\omega)$ for the cross five shot holes
(a) in Fig. 26), spacing $\Delta x=5 \text{ m}$

う。この場合にも第 23~25 図の群設置の場合と同様に、 Δx の値の小さいときは、その filter 効果は小さく、 Δx の値の大きいときは filter 効果は大きい。しかし、両者の間には $K(\omega)$ の函数形の相違から当然期待される性質がある。すなわち、第 27 図から第 31 図の場合には、すべて $K(\omega)=0.6$ を中心として cosine 形の振動を表わしている。したがって、その最低値は 0.2 でそれよりも小さくなることはない。このことは、爆発点を中心に 3 点あり、左右にそれぞれ 1 点あるような、中心部に多数点を有する配置が filter 効果の小さいことを示すものである。

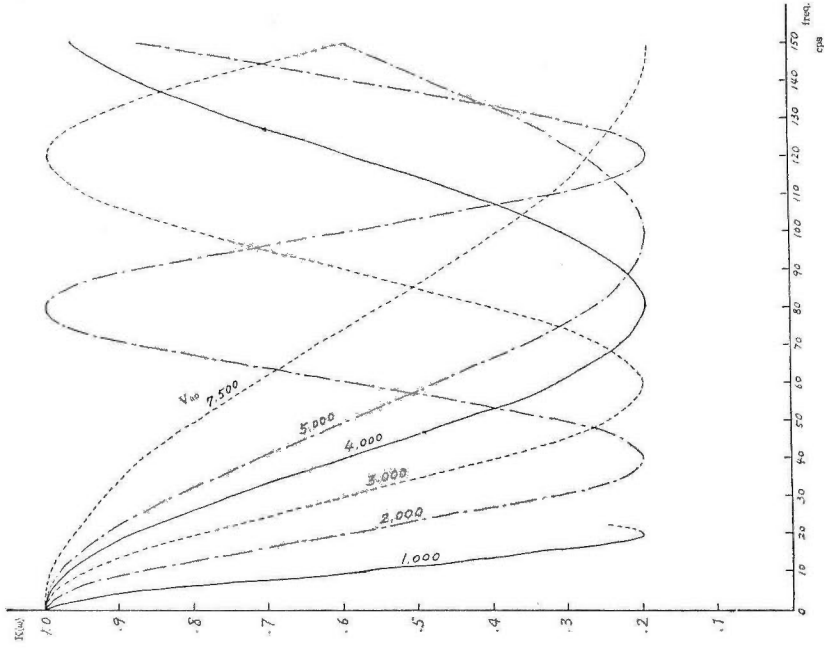
第 27 図の爆発孔間隔 $\Delta x=5 \text{ m}$ の場合には、B 型の妨害波の消去作用はあまり期待できない。同時に、signal の変形もほとんど問題にならない。第 28 図の $\Delta x=10 \text{ m}$ になると消去作用は少しよくなる。第 29 図の $\Delta x=15 \text{ m}$ になると消去作用はかなりよくなり、群設置の第 24 図の $\Delta x=3 \text{ m}$ に相当する程度となる。両者の消去作用は似てはいるが次の点では異なっている。その 1 つは、前にも述べたように、第 23~25 図では $K(\omega)=0$ の値をとることがあるが、この場合はない。つまり消去作用としては弱いことである。しかし、他面 $K(\omega)$ の値が負の値になることはない。次に、この場合には、その形が cosine であるから、たとえば第 28 図の $V_{ap}=300 \text{ m/sec}$ のように、周波数 f の値が大きくなると $K(\omega)$ の値がすぐ最低値になるものは、またすぐ最高値 1.0 になる。このことは、特に遅い速度の妨害波に対しては、消去作用が非常



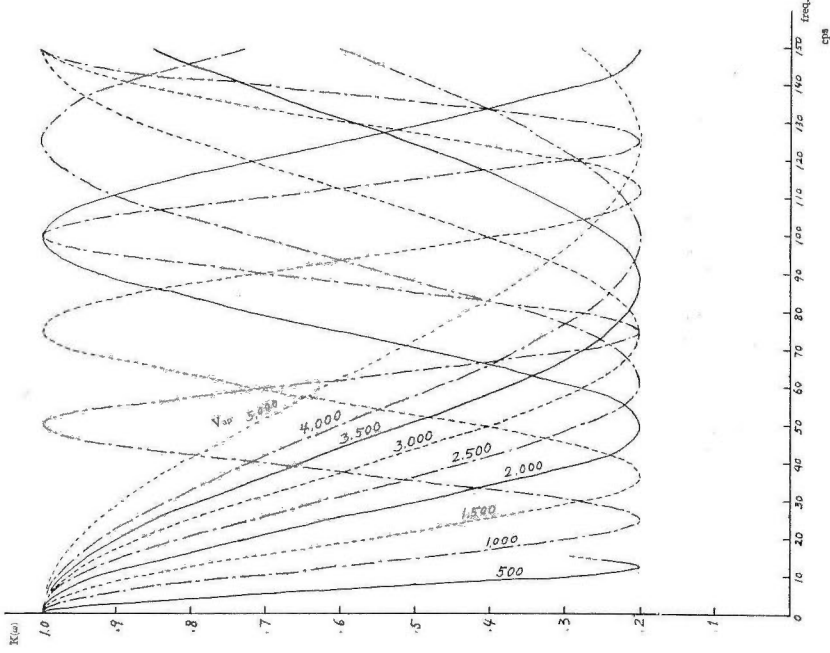
第 28 図 十字型 5 点爆発の $K(\omega)$, $4x=10$ m
 Characteristic function $K(\omega)$ for the cross five shot holes,
 spacing $4x=10$ m



第 29 図 十字型 5 点爆発の $K(\omega)$, $4x=15$ m
 Characteristic function $K(\omega)$ for the cross five shot holes,
 spacing $4x=15$ m



第31图 十字型5点爆發の $K(\omega)$, $4x=25$ m
 Characteristic function $K(\omega)$ for the cross five shot holes,
 spacing $4x=25$ m



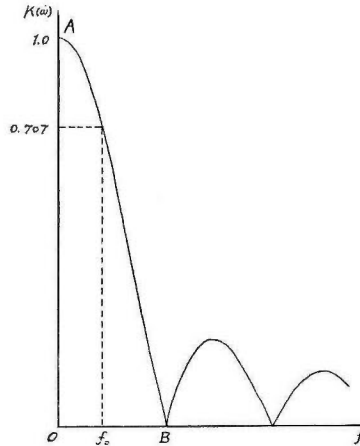
第30图 十字型5点爆發の $K(\omega)$, $4x=20$ m
 Characteristic function $K(\omega)$ for the cross five shot holes,
 spacing $4x=20$ m

に複雑なものになることである。

第30, 31図の $\Delta x = 20, 25$ m になると消去作用は著しくよくなる。しかし、反面 signal の変形に対しても相当大きな影響を及ぼす。たとえば、第31図では見掛けの速度が 3,000 m/sec で、周波数 60 cps の signal は最低値になる。この場合には S-N 比の向上の目的にそわないことはいうまでもない。

IV. 5 直線型の $K(\omega)$ の図表

直線形の配置(受振器あるいは爆発孔)の特性函数 $K(\omega)$ は(4-2)式で計算されるが、この数値計算はなかなか手数を要する。このため次のような近似計算の図表を作成した。



第 32 図

ここで

$$\frac{\sin nx}{n \sin x} \approx \cos \frac{n}{2} x \left[1 + \frac{1}{6} \left(1 - \frac{n^2}{4} \right) x^2 \right] \quad |nx| \leq \frac{\pi}{2}$$

の関係から、第32図の AB の部分では近似的に(4-2)式は

$$K(\omega) = \cos \left(\pi f M \frac{\Delta x}{2V_{ap}} \right) \quad (4-7)$$

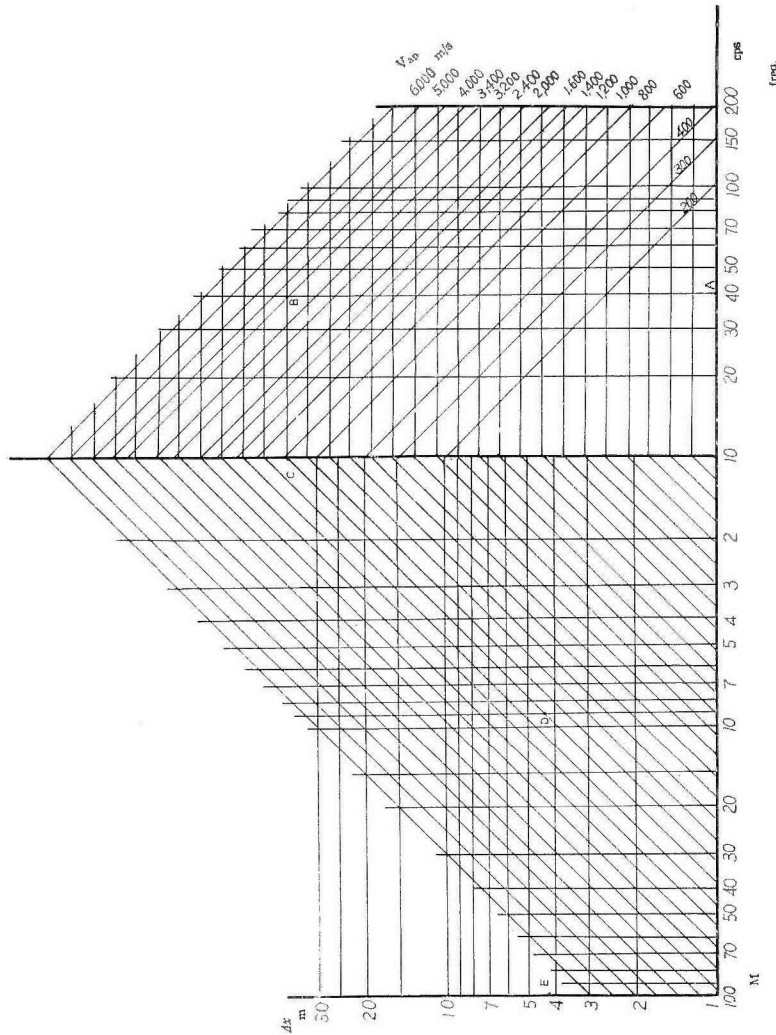
とすることはできる。filter 回路などの議論において、入出力電圧比が $1/\sqrt{2}$ になる周波数(註7)をもつて、その遮断周波数を代表させるという習慣に従つて、 $K(\omega) = 1/\sqrt{2} = 0.707$ になる周波数(第32図の f_0)で、filter 作用によつて signal の変形のゆるせる範囲とする。

すなわち

$$\begin{aligned} \cos \left(\pi f_0 M \frac{\Delta x}{2V_{ap}} \right) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \therefore f_0 M \frac{\Delta x}{V_{ap}} &= \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (4-8)$$

現場調査において、多孔爆発あるいは群設置を使用するとき、記録から V_{ap} , f_0 はすぐ読みとれるが、このとき群設置あるいは多孔爆発の個数(孔数) M , 間隔 Δx が signal の変形に対して適当であるか、否かを判断する必要がしばしば生ずる。この場合のために(4-8)式を図表化しておくことは実用上便利であろう。

註7) このときエネルギー比は $1/2$ になる。

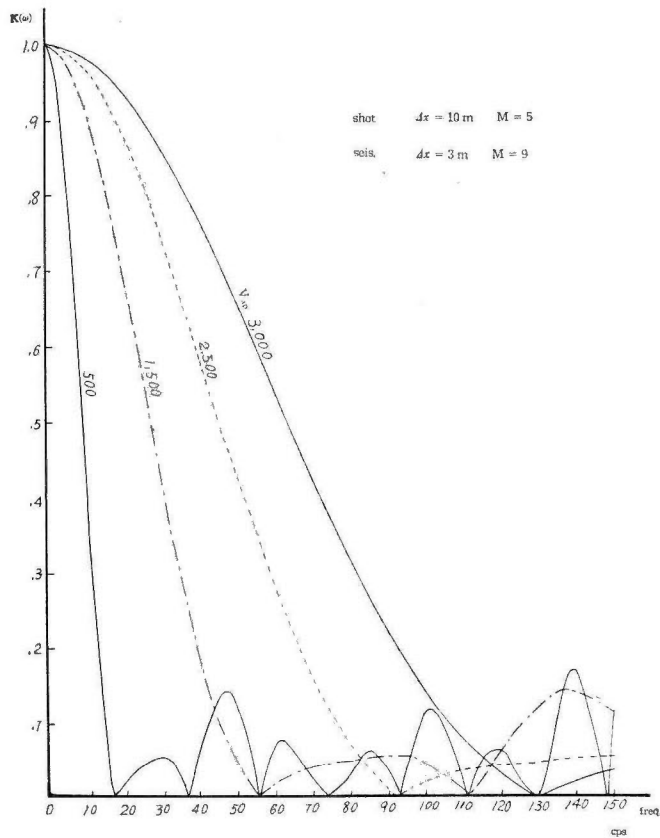


第33図 $f_0 M \Delta x / V_{ep} = 0.5$ の計算図表
 Nomogram for the formula $f_0 M \Delta x / V_{ep} = 0.5$

次に、第33図の使用法について述べよう。いま signal が 40 cps で見掛けの速度 V_{ep} が 3,200 m/sec とすると、図の右側で交点Bが求められる。B点から横軸に平行に中心軸との交わりをC点とし、C点より斜め左に降りて $M=9$ との交点Dの値を求めると $\Delta x=4.3$ m (E点) になる。すなわち、この場合には受振器間隔は大体 4 m 以上では signal の変形は相当大きくなることを意味している。またB型の妨害波の消去に関しても、同じように利用することができる。

IV. 6 群設置と多孔爆発の組合せの $K(\omega)$

II. 2 において群設置法と多孔爆発法とを同時に使用した場合の理論的關係を述べた。すなわち、(2-12)式のように、その filter 効果は $K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ と積の形で表わされる。いま、その総合効果を調べるために、1例として前に述べた間隔 3 m, 9個の受振器配置(第24図)の $K_1(\omega)$ と間隔 10 m, 5孔の爆発点(第28図)で示される $K_2(\omega)$ とを用いて、 $K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ を計算してみよう。はじめに、爆発点および受振点で同じ見掛けの速度が対応する場合を第



第34図 同じ見掛けの速度を示す場合 (水平な反射層の場合) の群設置と多孔爆発を組合せた $K(\omega)$ の1例

A combined characteristic function $K(\omega)$ for the same apparent velocity in case of the linear arrays of nine geophones with $\Delta x=3$ m and cross five shot holes with $\Delta x=10$ m

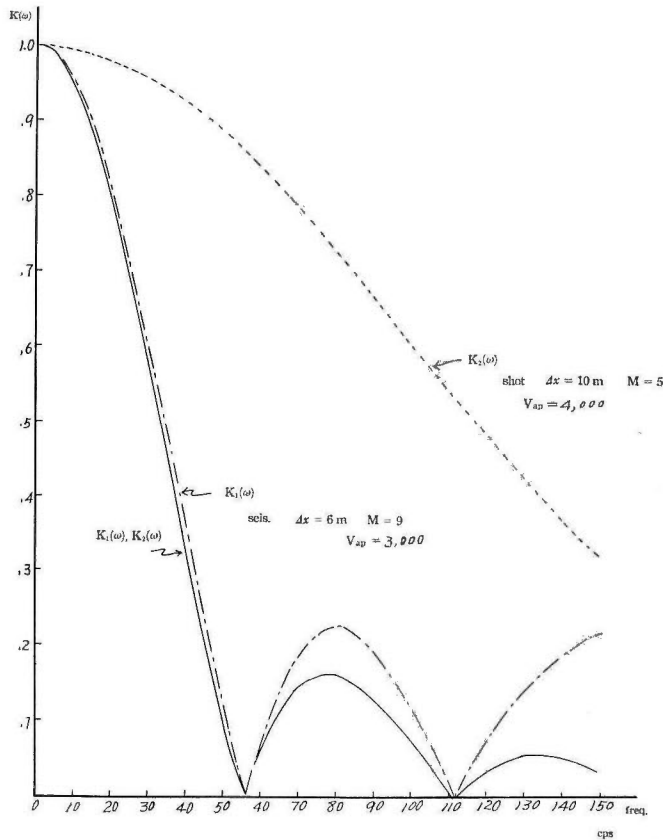
34図に示す。同じ見掛けの速度が対応することは、signalの変形に関しては、反射面が水平である場合を意味している。一般の場合として、反射面が傾斜していると、爆発点での見掛けの速度と受振点での見掛けの速度との間には相当の違いがある。このことに関しては後に詳しく述べることにする。

第34図を見て気づく、2,3のことについて述べよう。第1は high-cut filter としての性質が著しくよくなることである。すなわち、第24図での第1または第2の山の高さは大体0.2内外の値であつたが、第34図での山の高さは平均して0.1以下の値になり、一般に平坦化されている。また、爆発点についての第28図に対してはいうまでもなく high-cut filter としての効果は良好になつている。

妨害波を除去する目的として群設置あるいは多孔爆発の配置を考える場合、よい性質の high-cut filter を用いることは望ましいことである。この際、よい性質というのは $K(\omega)$ の特性で、第1, 第2, ……の山の高さが低く、平坦化されたものである。たとえば、第28図のように、また第19図の $M=2$ のように、次の山の高さが1.0に達するようなものは最も悪い例である。次の山の高さは第19図で見るように、配置された受振器の個数 M の数が増加するに従つて低くなるが、その高さは M を無限個にしても著しく低くなるものでないことは注意

を要する。この理由から Parr & Mayne¹⁹⁾および Savit et al²⁵⁾は(2-4)式の重み函数 a_K の値を適当に選び、山の低い平坦な群設置、および多孔爆発の配置について発表していることは前に述べた通りである。この問題についてはまた次章においてふれることにして、第34図に見るように、 $K(\omega) = K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ の性質から、山を低くし、平坦化するためには、重み函数 a_K の値を変えるという特別の操作をすることなしに、群設置と多孔爆発とを組合せることでも容易に得られることは重要なことである。このことは、McKay¹⁴⁾¹⁵⁾などが実験的に示しているように、群設置と多孔爆発の組合せが、それぞれ単独に使用した場合に較べて、反射特性の向上が著しく良好な理由の一つが、この点にあるものと考えられる。

次に、爆発点と受振点とで見掛けの速度 V_{ap} の値が異なる場合について考えてみよう。



第35図 異なつた見掛け速度を示す場合の群設置と多孔爆発を組合せた $K(\omega)$ の1例

A example of combined characteristic function $K(\omega)$ for the different apparent velocity at the shot and receiving point

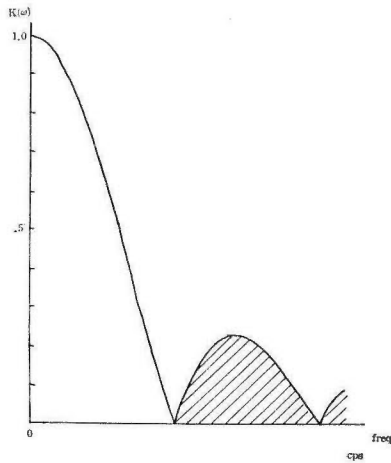
たとえば、群設置において(受振点において) signal の変形の大きい配置をしたとしよう。いま、間隔 6 m、受振器の個数 9 個、受振点での見掛けの速度が 3,000 m/sec、signal の周波数が 40 cps としよう。この場合には第35図の $K_1(\omega)$ のような特性が得られる。他方、爆発点(5孔、十字形、 $\Delta x = 10$ m)での見掛けの速度は大きく 4,000 m/sec としよう。この場合には爆発点では第35図の $K_2(\omega)$ で示されるように、signal の変化はほとんど起こらない。この

2つを組合せた総合特性を計算したものが第35図の実線である。ここで気をつけることは $K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ は $K_1(\omega)$ に非常によく似ており、特に $0 \sim 60$ cps までの間はほとんど一致している。このことは群設置法と多孔爆発法を同時に用いる場合には、signalの变形に関しては、主として変形を大きくする方の特性に支配されるという一般的法則を表わしている。

V. 重みのある群設置と多孔爆発

V. 1 重み函数

群設置あるいは多孔爆発の示す filter 特性の良否については前節でも述べたが、良好な filter の意義については次のように考えられる。すなわち、消去すべき妨害波は表面波のような比較的定常波に近いものであつても、その周波数帯域はかなりの幅をもつものと考えられる。したがつて、特性曲線が第36図のように、すその振動部分(斜線の部分)をもつとすると、この部分が signal に対する妨害波として残される。この理由から良好な filter 特性としては斜



第 36 図

線の部分をできるだけ小さいものにしたいわけである。その方法の1つとして Parr, Savit などの報告のあることは前にも述べたが、ここでは別の方法について検討することにしてしよう。

重みのある場合の特性函数 $K(\omega)$ は(2-6)式、すなわち

$$K(\omega) = \sum_{K=1}^M a_K e^{j\omega K t}$$

で与えられる。第19図、あるいは第21図に見るように、個数(孔数) M の値が相当大きい場合には、受振器あるいは爆発孔が cover する間に無限個おいたとしても、両者の特性函数には大差ない。したがつて、このときには上の式は

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(t) e^{j\omega t} dt \quad (5-1)$$

と積分の形で表現される。

普通に用いられる中心に対して、左右が対称的に設置されるときには、(5-1)式は

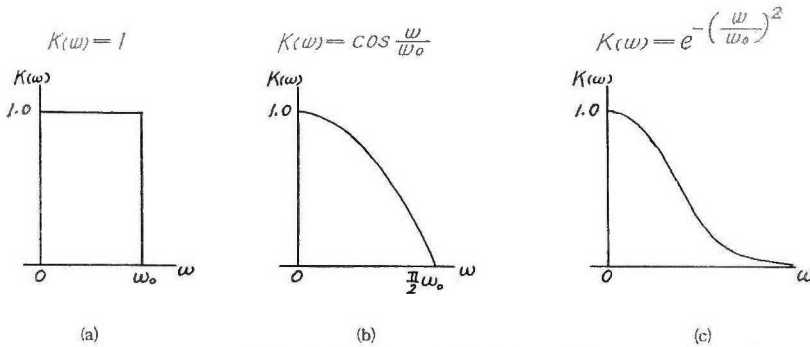
$$K(\omega) = 2 \int_0^{\infty} B(t) \cos \omega t dt \quad (5-2)$$

この式はまた $B(t)$ が $K(\omega)$ の衝撃応答であることを示している。そして、 $B(t)$ は

$$B(t) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\omega) \cos \omega t \, d\omega \quad (5-3)$$

と表わすことができる。

上記の推論から、われわれが適当と考える特性の群設置、あるいは多孔爆発を求めようとする場合、その重み函数 a_K をどのように選べばよいかは、 $B(t)$ から近似的に求めることができよう。



第37図 望ましい3種の filter の形
Three models of ideal filter

いま、望ましい filter の特性として第37図の (a), (b), (c) のような特性について考察しよう。すなわち、(a) は0から ω_0 までは $K(\omega)=1$ で、 $\omega > \omega_0$ では0となるもの、(b) は0から $\pi\omega_0/2$ までは $\cos(\omega/\omega_0)$ で、 $\omega > \pi\omega_0/2$ では0になるもの、(c) は $\exp\{-(\omega/\omega_0)^2\}$ の形のものである。このような特性を得る $B(t)$ は(5-3)式から求められる。すなわち

$$(a) \quad B(t) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} \cos \omega t \, d\omega = -\frac{\omega_0}{\pi} \left(\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0 t} \right) \quad (5-4)$$

$$(b) \quad B(t) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2} \omega_0} \cos \frac{\omega}{\omega_0} \cos \omega t \, d\omega$$

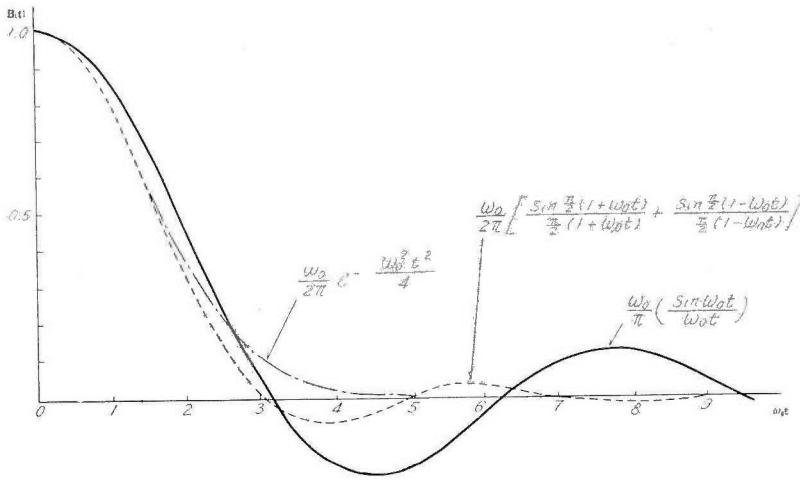
$$= \frac{\omega_0}{2\pi} \left\{ \frac{\sin \left\{ \frac{\pi}{2} (1 + \omega_0 t) \right\}}{\frac{\pi}{2} (1 + \omega_0 t)} + \frac{\sin \left\{ \frac{\pi}{2} (1 - \omega_0 t) \right\}}{\frac{\pi}{2} (1 - \omega_0 t)} \right\} \quad (5-5)$$

$$(c) \quad B(t) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \cos \omega t \, d\omega = -\frac{\omega_0}{2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\omega_0^2 t^2}{4}} \quad (5-6)$$

(5-4), (5-5), (5-6)式から計算される $B(t)$ を図示すれば第38図の通りである。この図においては、横軸の単位に $\omega_0 t$ をとっているが、いま受振器の cover する長さを L とすると

$$\omega_0 t = 2\pi f_0 L = \pi f_0 L / V_{ap}$$

の関係がある。 $\omega_0 t = 3.0$, $V_{ap} = 1,000$ m/sec, $f_0 = 20$ cps とすると $L = 48$ m, $\omega_0 t = 6.0$ のときには 96 m となる。ここで、實際上問題になることは、受振器あるいは爆発孔の cover する長さには、ある程度の限界があり、その最大値として大体 $40 \sim 50$ m と考えてよからう。したがって、上の場合には、 $\omega_0 t$ の値を 3.0 以上にとることは、実際上は無理ということになる。この理由から、もし $\omega_0 t$ の値を一定の値までとつた場合には、それから求められる $K(\omega)$ の値は、第37図に示している形とは多少異なつたものが期待されるであろう。この場合、(a)



第38図 第37図の3種の filter の重み函数 $B(t)$
 Weighting functions $B(t)$ of three filters in Fig. 37

と (b) について計算ができるので調べてみよう。

V. 2 制限のある $B(t)$ に対する $K(\omega)$

$B(t)$ がわかっていて $K(\omega)$ を求めるには (5-2) 式を用いればよい。この際、積分の上限は無有限大の代りに t_0 になる。すなわち

$$K(\omega) = \frac{2\omega_0}{\pi} \int_0^{t_0} \left(\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0 t} \right) \cos \omega t \, dt \quad (5-7)$$

この式は $t(\omega_0 + \omega) = x$, $t(\omega_0 - \omega) = y$ とおくことにより

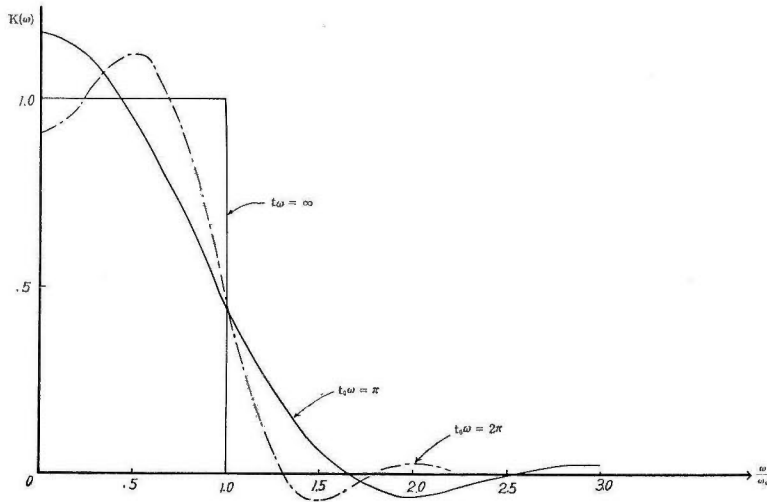
$$K(\omega) = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{t_0(\omega_0 + \omega)} \frac{\sin x}{x} \, dx + \int_0^{t_0(\omega_0 - \omega)} \frac{\sin y}{y} \, dy \right] \\
 = \frac{1}{\pi} \left\{ Si \left[t_0 \omega_0 \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] + Si \left[t_0 \omega_0 \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \right\} \quad (5-8)$$

となる。これを図示すると第39図のようになる。いうまでもなく、 $t_0 \omega_0$ の値を大きくすれば (このことは cover する長さ L を大きくすることであるが)、初めに予定しておいた「 Γ 形」(第37図(a))のものにより近似するわけであるが、これには実際上の制約のあることは前にも述べた通りである。また、この種の方法においては、カドのある点で ($\omega/\omega_0 = 1$ の点) いわゆる Gibbs の現象^{註8)}が起ること、そして、これが特性として悪い影響のあることは知られている (たとえば Smith²⁷⁾)。

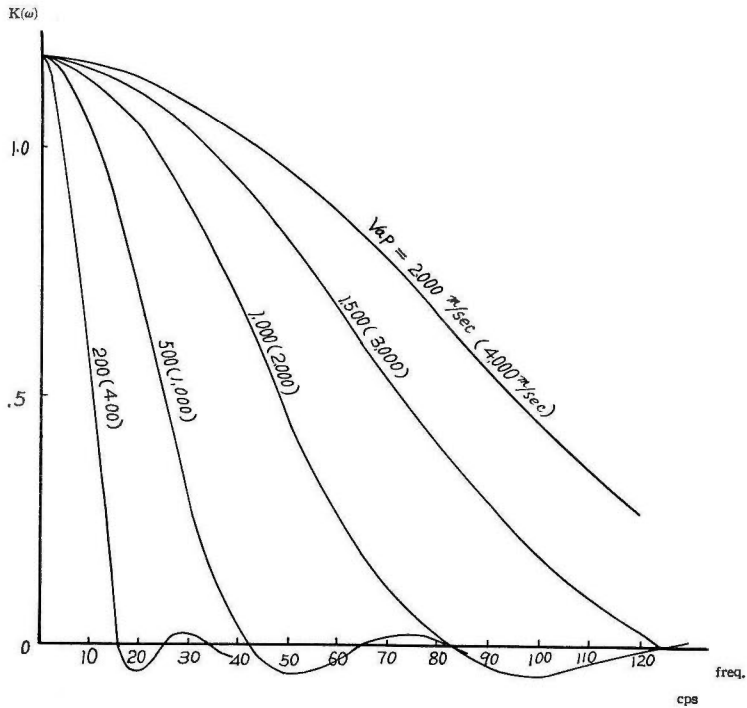
第39図においては、横軸の単位として ω/ω_0 にとつてあるので、実際に用いる場合の概念が得にくい。そこで、前章と同様に f , V_{ap} で表わすと第40図のようになる。この図は cover する長さを 20 m としているが、もしその長さを2倍の 40 m としたときには、見掛けの速度 V_{ap} はカッコのなかの値に対応する。そして、すぐ「気」のつくことは、cover する長さ $L = 20$ m のときは、この filter は非常にあまいものであるから、前にもしばしば述べたように、特殊の場合以外ではあまり効果を期待されない。 $L = 40$ m とした場合には、やゝ high-cut と

註8) この式は move-out filter として Jones が求めている。

註9) たとえば Goldmann, S., Frequency analysis, modulation and noise (1948) p. 30 を参照されたい。



第39図 coverする長さが制限されたときの第37図(a)の特性函数 $K(\omega)$
 Characteristic function $K(\omega)$ of (a) in Fig. 37 in case of limited coverage length



第40図 coverする長さ $L=20$ m のとき, $t_0\omega=\pi$ に対応する $K(\omega)$
 カツコのなかは $L=40$ m にあたる

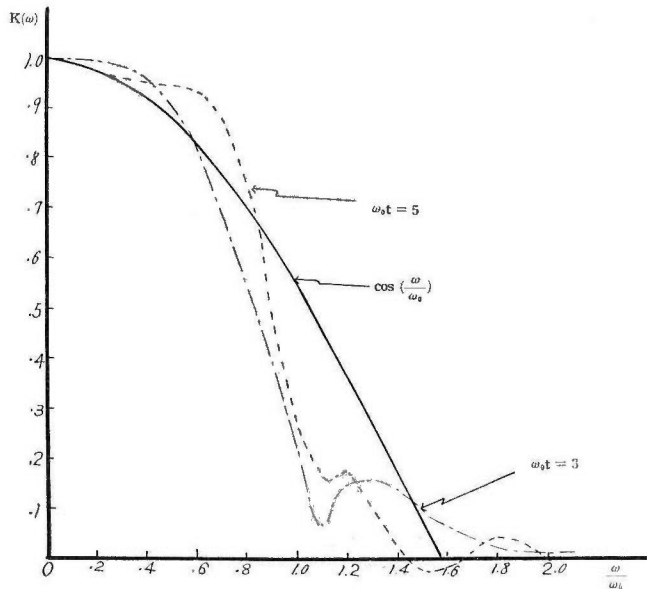
Characteristic function $K(\omega)$ for $t_0\omega=\pi$ in case of coverage
 length= 20 m (40 m)

しての性質はよくなるが、IV. 3 における第 23 図 ($\Delta x=1$ m) と第 24 図 ($\Delta x=3$ m) の中間の場合、すなわち受振器 9 個の間隔 $\Delta x=2$ m の場合に相当する。

次に、cosine 型の (b) の場合について調べてみよう。この場合には $K(\omega)$ は

$$\begin{aligned}
 K(\omega) &= \frac{\omega_0}{\pi} \int_0^{t_0} \left\{ \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(1+\omega_0 t)\right]}{\frac{\pi}{2}(1+\omega_0 t)} + \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(1-\omega_0 t)\right]}{\frac{\pi}{2}(1-\omega_0 t)} \right\} \cos \omega t \, dt \\
 &= \frac{\omega_0}{2\pi} \left\{ \int_0^{t_0} \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(1+\omega_0 t+\omega t)\right]}{\frac{\pi}{2}(1+\omega_0 t)} \, dt + \int_0^{t_0} \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(1+\omega_0 t-\omega t)\right]}{\frac{\pi}{2}(1+\omega_0 t)} \, dt \right. \\
 &\quad \left. + \int_0^{t_0} \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(1-\omega_0 t+\omega t)\right]}{\frac{\pi}{2}(1-\omega_0 t)} \, dt + \int_0^{t_0} \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2}(1-\omega_0 t-\omega t)\right]}{\frac{\pi}{2}(1-\omega_0 t)} \, dt \right\} \\
 &= \frac{1}{4} \left(\cos \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left\{ \text{Si}\left[\frac{\pi}{2}\left(1+\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1+\omega_0 t)\right] + \text{Si}\left[\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1+\omega_0 t)\right] \right. \\
 &\quad \left. - \text{Si}\left[\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1-\omega_0 t)\right] - \text{Si}\left[\frac{\pi}{2}\left(1+\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1-\omega_0 t)\right] \right\} \\
 &\quad + \frac{1}{4} \left(\sin \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left\{ -\text{Ci}\left[\frac{\pi}{2}\left(1+\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1+\omega_0 t)\right] + \text{Ci}\left[\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1+\omega_0 t)\right] \right. \\
 &\quad \left. - \text{Ci}\left[\frac{\pi}{2}\left(1-\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1-\omega_0 t)\right] + \text{Ci}\left[\frac{\pi}{2}\left(1+\frac{\omega}{\omega_0}\right)(1-\omega_0 t)\right] \right\} \\
 &\hspace{15em} (5-9)
 \end{aligned}$$

これを計算したのが第 41 図である。図で見られるように、この場合には Gibbs の現象が

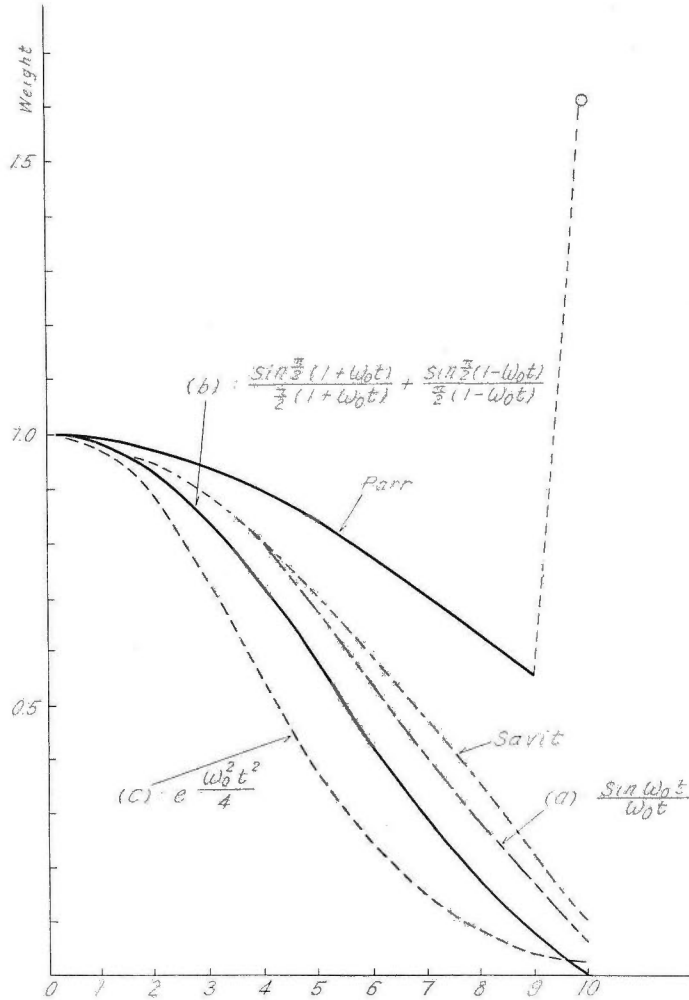


第 41 図 cover する長さが制限されたときの第 37 図 (b) の特性函数 $K(\omega)$
 Characteristic function $K(\omega)$ of (b) in Fig. 37 in case of
 limited coverage length

なり著しく見られる。

V. 3 各種の方法の比較

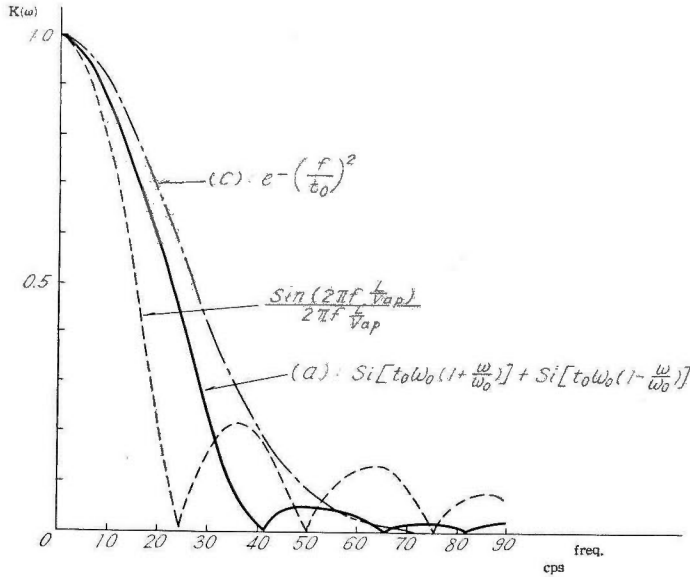
Parr など, Savit など, それに前項で述べた (a) 註10), (b), (c) の諸法について比較してみよう。上記の5つの方法において, 受振器の cover する間での重みの分布を示したのが第42図である。この図でみるように, Parr などの方法は他のものに較べて著しく異なっている。これは, 第8図にも示してあるように第1, 2, 3, ……の山の高さを同じにするという他のものと違う観点をとつたためと考えられる。Savit などのものは, (a) のものに非常に近い分布をしており, 実用的にはほとんど同じものと考えられる。誤差曲線を示す (c) は多少趣を異にしており, これでは中心点附近の重みが側方のものに較べてかなり大きい。(b) は (a) と (c) との中間の値をとつている。



第42図 各種の重み函数の比較

Comparison between weighting distributions of Parr, Savit and above-mentioned three types

註10) (a) の方法については Smith もふれている。



第43図 直線形および第37図の(a), (c)の特性函数 $K(\omega)$ の比較, ただし $L=20$ m, $V_{ap}=500$ m/sec

Comparison between characteristic function $K(\omega)$ of (a), (c) and linear array, $L=20$ m and $V_{ap}=500$ m/sec

Parr などのものと Savit などのものについての特性は第8図に示してあるので, 次に $L=20$ m とし, 見掛けの速度 $V_{ap}=500$ m/sec の場合の (a), (c) と直線型 ($a_K \equiv 1$ の場合) の3種の $K(\omega)$ を較べてみよう(第43図参照)。この際, Savit などのものは上に述べたように, 大体 (a) のものと同じと考えてよい。第43図から明らかなように, 直線形に較べて (a) も (c) も (b) については描いてないが同様のことがいえる, filter 特性としては良好になつている。特に (c) についてははつきつぎに山が起る振動現象がみられないのが特徴的である。

他の1つの性質としては, 直線形に較べて (a), (c) では最初の $K(\omega)=0$ の点の周波数 f の値が大きくなつてゐることである。したがつて, 前項で述べたように適当な filter 特性を得るためには, cover する長さ L をより大きくする必要がある。この点は現場作業にとつては欠点である。たゞ, (c) の場合には理論的には $K(\omega)=0$ は $f \rightarrow \infty$ になるが, 実際的には $K(\omega)=0.03$ 内外のとき0とみなすことができよう。第43図では $f=60$ cps のとき $K(\omega) \approx 0$ となる。

以上各種の方法を比較してみたが, 実用的には Savit, (a), (b), (c) については特に著しい差異はないように思われる。よく知られてゐるように, 現場作業においては, 受振器の接地条件などにより, 出力の値にはかなりの変動があるので, 重み函数の値に多少変化があつても問題にならないであろう。しかし, 理論的立場からいえば, 誤差曲線の分布をする (c) の場合が, filter 特性としては最も優れていることがいえる。

VI. Mixing との組合せ

VI. 1 群設置と mixing との組合せ

現在使用されている mixing の方法としては, 2-channel mixing と graded mixing とがあ

る。前者においては片隣の成分の50%を受取つて、その代りに自分の50%を他の隣の成分に与えるものである。後者においては、ある率、たとえば自分の65%を与える一方、両隣からは17%、また1つにおいて両隣りから9%、2つにおいて4%、...ともらつて mixing を行うものである。

2-channel mixing

群設置を用いない場合の 2-channel mixing は受振器間隔の長い、個数 $M=2$ の群設置とまったく同じことである。したがつて、この種の mixing から期待される特性 $K(\omega)$ は

$$K(\omega) = \cos\left(\pi f \frac{x}{V_{ap}}\right) \quad (6-1)$$

ただし、 x は受振点間隔である。もし、受振点間隔一杯に M 個の受振器を並べた場合には、そのときの $K(\omega)$ は

$$K(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{K=1}^M \cos\left[\pi(2K-1) \frac{Ax}{V_{ap}}\right] \quad (6-2)$$

ただし、 $x = M \Delta x$

(6-2)式からわかるように、この種の mixing を行つた場合の $K(\omega)$ は、mixing なしの $K(\omega)$ の cover する長さを2倍にした値と大体同じである。したがつて、たとえば第23~25図において、見掛けの速度の値を $1/2$ 倍にしたものが、2-channel mixing を行つたときの特性図と考えてもよい。このことから一般に mixing を用いることは、その high-cut filter としての効果を強化するものであることが理解されよう。個数 M の値が大ききときには (6-2) 式は近似的に積分の形で表わされることはいうまでもない。

Graded mixing

前記の率での Graded mixing の $K(\omega)$ は次式で与えられる。

$$K(\omega) = \frac{1}{3} \left\{ \cos\left(\pi f \frac{x}{V_{ap}}\right) + \cos\left(3\pi f \frac{x}{V_{ap}}\right) + \frac{1}{2} \cos\left(5\pi f \frac{x}{V_{ap}}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(7\pi f \frac{x}{V_{ap}}\right) + \dots \right\} \quad (6-3)$$

前の場合と同様に、受振器を受振点間隔一杯に等間隔に並べた群設置の場合には、

$$K(\omega) = \frac{1}{3M} \left\{ \sum_{K=1}^{2M} \cos\left[(2K-1)\pi f \frac{Ax}{V_{ap}}\right] + \frac{1}{2} \sum_{K=2M+1}^{3M} \cos\left[(2K-1)\pi f \frac{Ax}{V_{ap}}\right] + \frac{1}{4} \sum_{K=3M+1}^{4M} \cos\left[(2K-1)\pi f \frac{Ax}{V_{ap}}\right] + \dots \right\} \quad (6-4)$$

といずれも無限級数の形で表わされる。(6-1)式と(6-3)式、(6-2)式と(6-4)式とを比較すれば、2-channel mixing と graded mixing との特性上の比較をすることができるであろう。

VI. 2 重みをつけた mixing

近年磁気録音式地震探鉱器が用いられるようになるに従い、mixing の操作を再生のときに実施することが可能になつた。すなわち、現場における録音の際は mixing なして行い、再生のときに種々の割合で他の成分の出力と mixing をすることができる。この種の mixing を群設置と組合せると、その総合特性を一層広い範囲で変化させることが可能になる。次に、3-channel mixing^{註11)}の場合について計算しておこう。graded の場合も計算はさらに複雑に

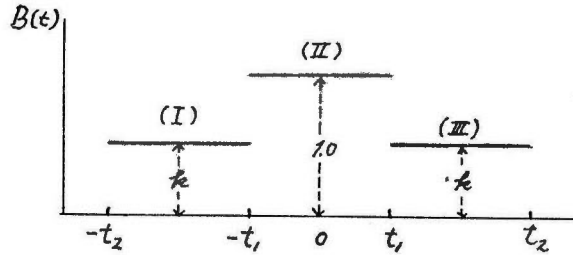
註11) 2-channel mixing の場合には、1:1 の場合以外では位相差が複雑になるので避けた方がよい。

なるが、操作は大體同様である。

前章と同じように個数Mが相当多く、積分の形で表わされるとする。そして、重み函数を第44図のように表わすと、その特性函数 $K(\omega)$ は

$$K(\omega) = 2 \int_0^{\infty} B(t) e^{j\omega t} dt = 2 \int_0^{t_1} \cos \omega t dt + 2k \int_{t_2}^{t_1} \cos \omega t dt \quad (6-5)$$

ただし、 $t_2 = 3t_1$



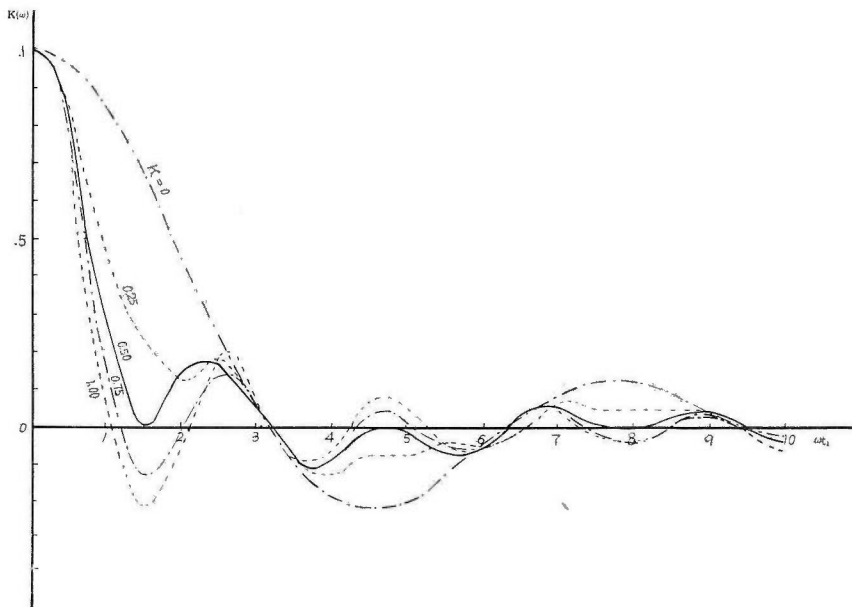
第44図 3-channel mixing の重み函数 $B(t)$

Weighting function $B(t)$ of 3-channel mixing

と表わすことができる。ここで、 k は中央 (II) の受振器群の出力に対する左右 (I, III) の出力の割合である。(6-5) 式は簡単な計算により

$$K(\omega) = 2t_1 \left\{ (1-k) \frac{\sin \omega t_1}{\omega t_1} + 3k \frac{\sin(3\omega t_1)}{3\omega t_1} \right\} \quad (6-6)$$

が得られる。



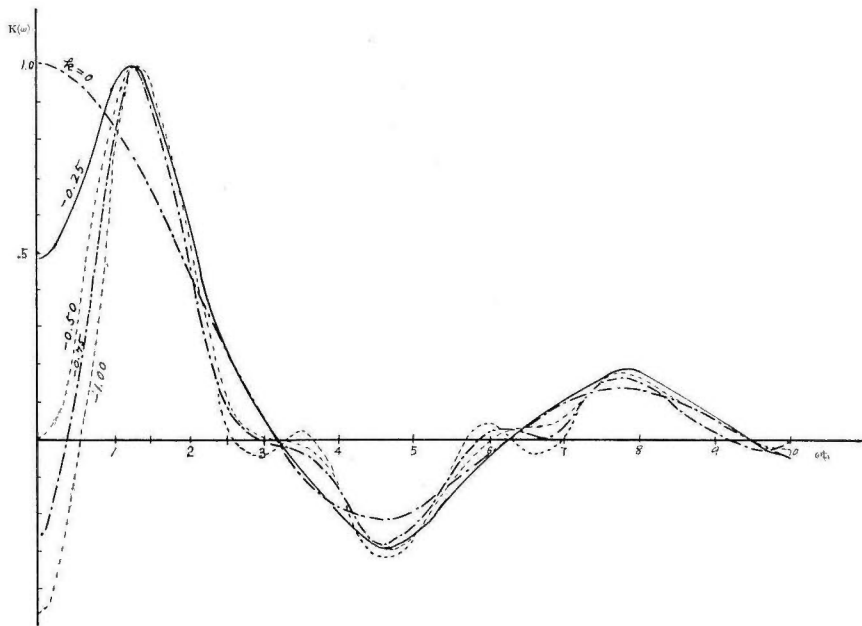
第45図 重みのある 3-channel mixing の $K(\omega)$, k の正の場合

Characteristic function $K(\omega)$ of weighted 3-channel mixing

in case of $k=1.00, 0.75, 0.50, 0.25, 0.00$

いま、 $k=1.00$ とすると I, II, III の間を cover する直線形の群設置に相当し、 $k=0$ とすると II の間だけを cover するものにあたる。 k を 1.00 と 0 との間の値をとると、第 44 図のように、ある重みをつけた群設置に相当することになる。いま、この間の $K(\omega)$ の様子を調べるために $k=1.00, 0.75, 0.50, 0.25, 0$ に対する $K(\omega)$ を計算してみると第 45 図ようになる。この図からわかるように、 $k=1.00$ と $k=0$ とでは、始めに $K(\omega)$ が 0 になる周波数 f の値は 3 倍になり、当然のことであるが cover する範囲の広い $k=1.00$ の方がより鋭い high-cut filter の性質を示している。その中間の値では、filter としての性質も大体中間的であるが、 $k=0.50$ の場合のものが初めの部分では $k=1.00$ のものに著しく似ていることは注意すべきである。すなわち、 $k=0.75$ と $k=1.00$ とした場合とでは、その特性上の差別はほとんどみられない。

参考のために、 k の値を負にした場合、すなわち $k=0, -0.25, -0.50, -0.75, -1.00$ の $K(\omega)$ を計算したものを第 46 図に示しておこう。この場合には一種の band-pass filter の形になる。そして、 $k=-0.50$ のとき最も形のよい band-pass filter の形を示し、pass 帯域



第 46 図 重みのある 3-channel mixing の $K(\omega)$, k の負の場合
Characteristic function $K(\omega)$ of weighted 3-channel mixing
in case of $k=-1.00, -0.75, -0.50, -0.25, 0.00$

の中心を示す ω_1 の値は $\pi/2$ であるが、この値は $k=-0.25, -0.50, -0.75, -1.00$ でもほとんど変わらない。このように band-pass filter の形を示し、 $\omega=0$ のとき $K(\omega)=1$ にならないことは、地下真下の方向からくる反射波を小さくすることになるので、普通の場合反射法において利用されることはほとんどないであろう。しかし、急傾斜の反射面からの signal を特に選び出すような特殊の場合には、あるいは使用されるかもしれない。また、特に 2 つの反射波が別の方向から同時に到達しているようなとき、これらを分離するためには便利な方法かもしれない。

以上のことから、磁気録音式の探鉱器を使用するときには、重みをつけた mixing を利用し

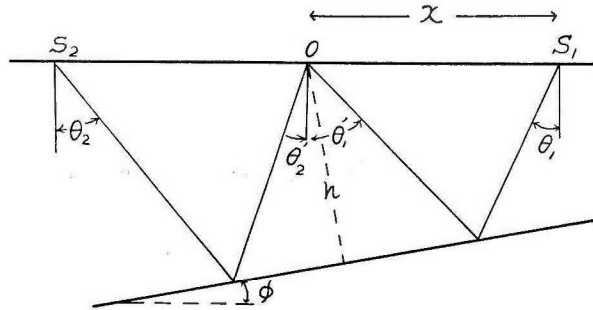
て再生することは、経済上の観点も考慮に入れて、有効な方法のように筆者は考えている。その際の k の値としては 0, 0.25, 0.50, 1.00 とし、特殊の場合として k の負の値を用いるべきであろう。

VII. 浅い、あるいは急傾斜の反射面の場合の注意

VII. 1 この場合の見掛けの速度

反射面が比較的浅いとき、群設置あるいは多孔爆発を利用するに際しては、その間隔を小さくする必要のあることは Anstey¹⁾ も指摘しているが、本章ではこの問題について考えてみよう。

反射面の浅いときには、爆発点から比較的遠い受振点においては、signal の入射角はかなり大きくなり、したがって群設置が指向性の強いものであると不都合になる。このことは Hales & Edward²⁾ が図示して注意している。しかし、反射面が急傾斜のときも同様のことが当然考えられる。第 47 図のような反射面を考えたとき、一般に昇斜方向にある受振点 S_1 と降斜方



第 47 図

向にある受振点 S_2 としては、その入射角が異なり、 S_2 の入射角の方が大きい。そして、反射面が急傾斜をなすときには、この関係も複雑になり、入射角 θ_1 は垂線に対して反対側になることもある。

ここに、特に注意を要することは、群設置と多孔爆発とを組合せて使用したときには、前に述べたように指向性に関しては、受振点の入射角ばかりでなく、爆発点の射出角にも依存するので、両者の総合効果を考慮しなくてはならない点である。

受振点における入射角はよく知られている $\theta = \sin^{-1}(V/V_{sp})$ の関係により、観測記録上から直ちに知ることできる量であるが、爆発点の射出角は記録上からすぐ算出されない。したがって、両者の関係を求めておく必要がある。

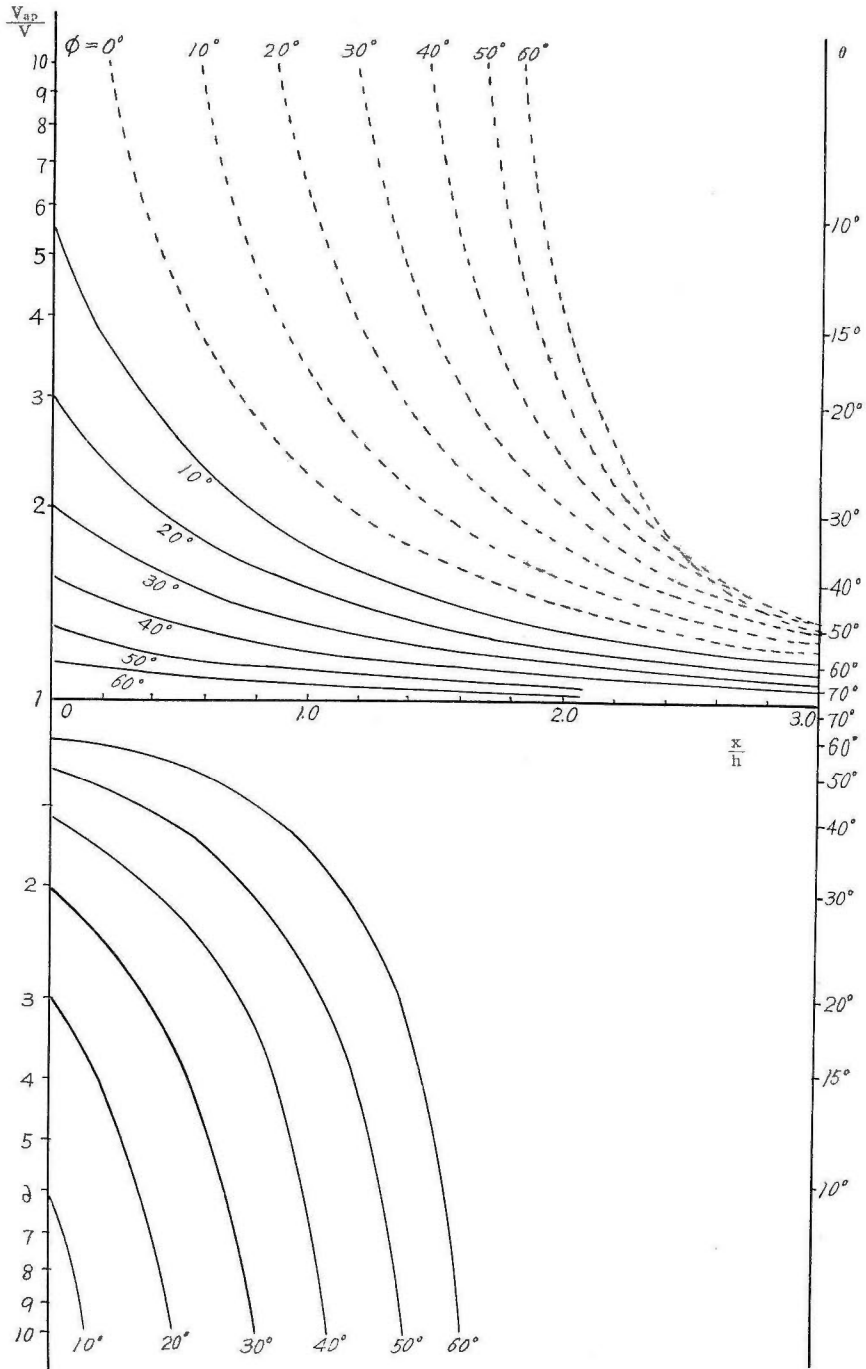
簡単のために、反射面までの速度 V は一定とする。第 47 図に示すように、反射面の傾斜を ϕ 、入射角を θ 、射出角を θ' 、爆発点から受振点までの距離を x 、爆発点から反射面に下した垂線の長さを h 、反射波の走時を t とすると、次の関係がある。

$$V^2 t^2 = 4h^2 + x^2 \pm 4hx \sin \phi$$

ゆえに

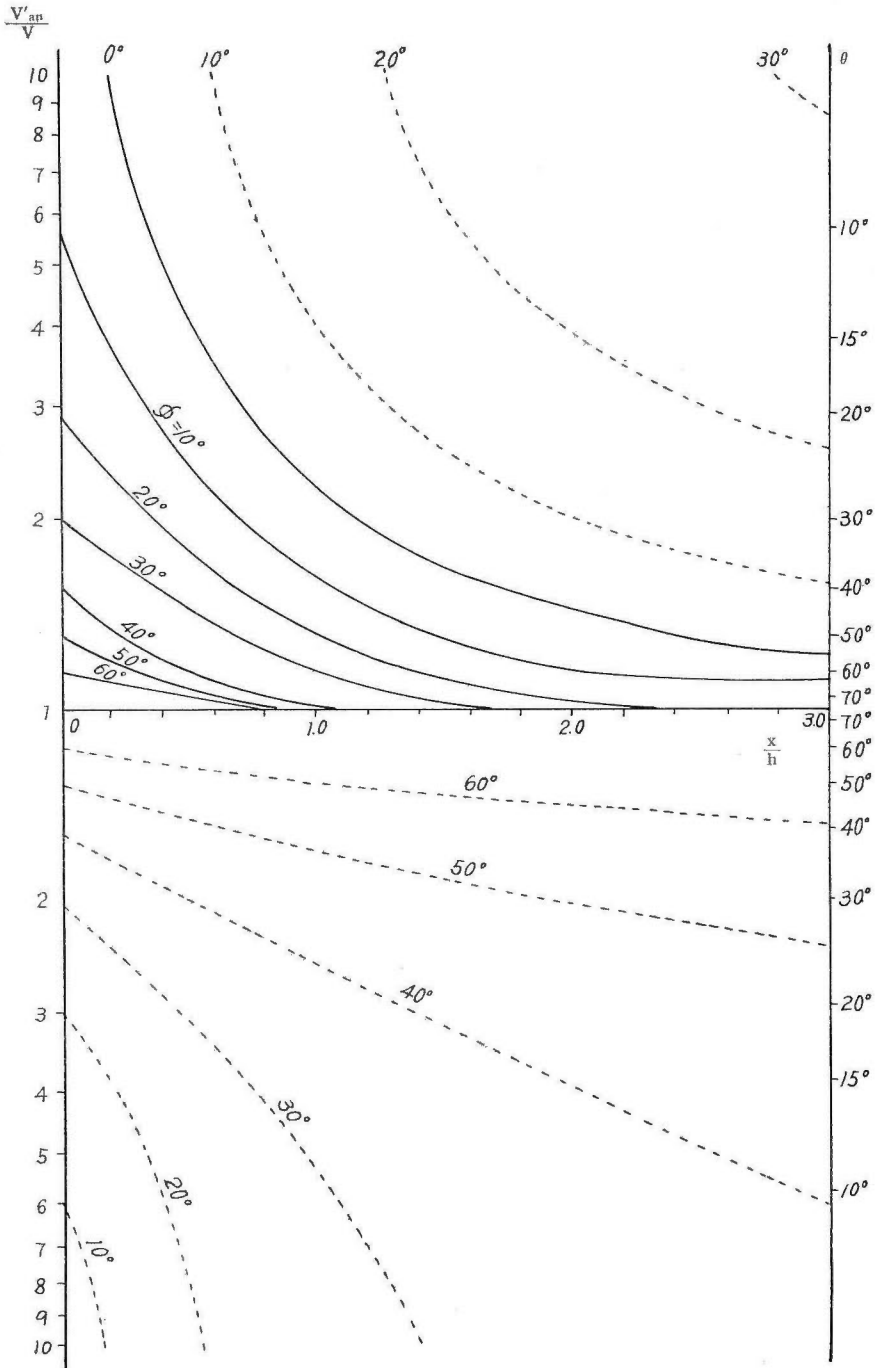
$$\frac{1}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{\sqrt{4 + \left(\frac{x}{h}\right)^2 \pm 4\left(\frac{x}{h}\right) \sin \phi}}{\left(\frac{x}{h}\right) \pm 2 \sin \phi} \quad (7-1)$$

dx/dt は見掛けの速度であるから



第48図 受振点における見掛けの速度 V_{ap} を求めるノモグラム
 実線は昇斜, 点線は降斜

Nomogram for the apparent velocity V_{ap} of receiving point; Solid line corresponds to up dip reflector and dotted line to down dip one



第49図 爆発点における見掛けの速度 V'_{ap} を求めるノモグラム
 実線は昇斜, 点線は降斜

Nomogram for the apparent velocity V'_{ap} of shot point; Solid line corresponds to up dip reflector and dotted line to down dip one

$$\frac{1}{V} \frac{dx}{dt} = \frac{V_{ap}}{V} = \frac{1}{\sin \theta} \quad (7-2)$$

また、射出角と入射角の間には $\theta' = 2\phi \pm \theta$ の関係が求められる。爆発点での見掛けの速度を V'_{ap} とすると

$$\frac{V'_{ap}}{V} = \frac{1}{\sin \theta'}$$

反射波の見掛けの速度、あるいは、その入射角、射出角が爆発点と受振点間の距離 x/h (単位として x の代りに x/h を用いた)、反射面の傾斜 ϕ に対してどのように変化するかを計算しておくことは、推定された地下構造に対して signal の見掛けの速度の変化を知るうえにも、また受振点での見掛けの速度から、爆発点で射出角に対応する見掛けの速度 V'_{ap} を求めるうえにも便利であろう。第 48 図においては、横軸に x/h 、縦軸に入射角 θ 、あるいは V_{ap}/V をとり、第 49 図においては、横軸は同様に x/h 、縦軸に爆発点での射出角 θ' 、あるいは V'_{ap}/V をとつてある。両図とも、実線は昇斜方向の値であり、点線は降斜方向の値である。また第 47 図で示したような射出角、入射角を正規なものとし、その角が鉛直線に対して反対側になるような θ, θ' は下向きに、すなわち図の下の部分に表現することにした。

VII. 2 この場合の注意

具体的な例をあげて調べてみよう。初めに、反射面の傾斜が緩く、浅い場合である。この場合には x/h の値は比較的大きい値をとることになる。反射面の深さを 300 m、爆発点から最も遠い受振点までの距離を 600 m とすると、 x/h の値は 2.0 になる。もし傾斜がないとすると第 48 図から $V_{ap}/V=1.4$ 、すなわち $\theta_1=46^\circ$ になる。この場合には $V_{ap}=V'_{ap}$ 、 $\theta_1=\theta'_1$ である。もし、真の速度が 2,140 m/sec とすると $V_{ap}=3,000$ m/sec である。この場合を IV. 3 の第 23~25 図について調べてみると、 $\Delta x=3$ m (第 24 図) 以下では signal の変形はほとんど無視できる。しかし、 $\Delta x=6$ m (第 25 図) にとると 40 cps 以上の signal に対する変形度は相当著しい。十字形 5 点爆発 (IV. 4) についても、 $\Delta x=25$ m 以上になると同様のことがいえる。

以上のことは、次のことを教えている。浅い反射層の構造を調べたいときには、傾斜の小さいときでも、filter 効果の大きくない群設置および多孔爆発の型をとるべきである。換言すると、受振器(爆発孔)の間隔は比較的小さく、cover する長さが一定ならば、その個数を多く、中心になるべく集中した型のものを使用すべきである。隔井爆発のように、爆発点と受振点との距離の大きいときには、特に留意する必要がある。

反射面が急傾斜をなすときは、前記のように射出角、入射角が複雑に変化する。いま、 $x/h=0.6$ 、反射面の傾斜角 ϕ が 40° としよう。第 48, 49 図から $V_{ap1}/V=2.5$ 、 $V_{ap2}/V=1.3$ 、また $V'_{ap1}/V=1.1$ 、 $V'_{ap2}/V=2.0$ が求められる。いま、真の速度 $V=2,000$ m/sec と仮定すると $\theta_1, \theta'_1, \theta_2, \theta'_2$ 、および $V_{ap1}, V'_{ap1}, V_{ap2}, V'_{ap2}$ 、などは第 1 表のようになる。

第 1 表

	群 設 置 (受振点)		多 孔 爆 発 (爆発点)	
	V_{ap1} と V_{ap2} (m/sec)	θ_1 と θ_2 (degree)	V'_{ap1} と V'_{ap2} (m/sec)	θ'_1 と θ'_2 (degree)
昇 斜 方 向	5,000	23	2,200	67
降 斜 方 向	2,600	50	4,000	30

前と同様に、直線形9点の群設置と5点爆発の多孔爆発について検討してみよう。まず、群設置の場合からみると降斜方向では $\Delta x=5\text{ m}$ 以上になると signal の変形が大きくなる。昇斜方向では見掛けの速度 V_{opt} は相当大きいので、あまり問題はない。多孔爆発については昇斜方向に対しては爆発孔間隔 $\Delta x=15\text{ m}$ 以上になることは望ましくない。降斜方向に対しては $\Delta x > 20\text{ m}$ に対してよくない。このように、昇斜方向と降斜方向に対して、群設置と多孔爆発の signal の変形に対する filter 効果が反対に対応することは、急傾斜の構造を調査する際に注意すべきことを強調しておきたい。いま、split spread において、群設置として $M=9$, $\Delta x=1\text{ m}$, 多孔爆発として $M=5$, $\Delta x=25\text{ m}$ を用いたとする。この場合には、昇斜方向での signal の変形は非常に大きく、降斜方向では小さい。したがって、降斜方向でみられたかなり良好な反射 signal が昇斜方向に向かうに従い消滅したり、その波形の特長が変わつたりすることが起こりうる。このことは、この附近に誤つて断層の存在を推定するおそれがある。

両端爆発 (end shooting) の spread においても同様のことが起こるが、この場合、もし昇斜方向に対する群設置、多孔爆発の形と、降斜方向に対するそれらとを適当に変えて用いるならば、上記の障害を避けることは可能である。

VIII. 妨害波の消去

VIII. 1 A型の妨害波の消去

この種の波は、Leonard¹²⁾が random energy と称し、また random noise ともいわれるものである。しかし、この波はあくまでも現象的なもので、たとえば多方向から一時に到達した反射波も、この種の波と考えることができる。

この問題について初めてとりあげたのは I. 3 にも述べたように Klipsch である。次に彼に従つて少しく考察しよう。波の振幅および周期が同じで、たゞ位相が任意であるとする、random walk の問題として、M個の受振器の出力の和が r より小さくなる確率を求めることができる。いま、その確率を P とすると

$$P=1-e^{-r^2/M} \quad (8-1)$$

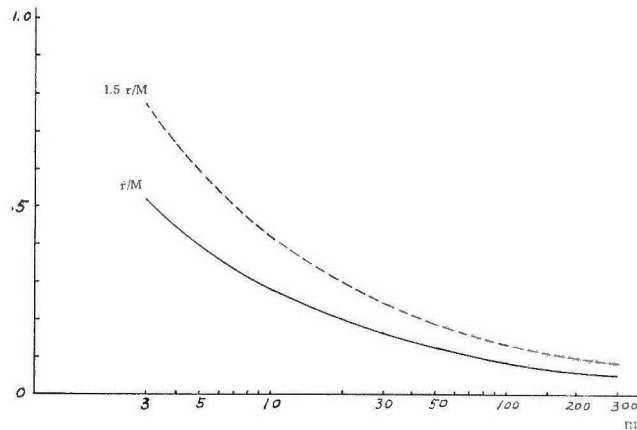
となる。平均値を \bar{r} とすると

$$\bar{r}=\int_0^1 rdP=\sqrt{M}\frac{\sqrt{\pi}}{2}=0.886\sqrt{M} \quad (8-2)$$

を求めている。そして、 $r=\bar{r}$ になる。すなわち平均値よりも大きな振幅になる確率は、0.45 になる。また、平均よりも 1.5 倍以上の振幅になる確率は 0.16 と求められる。いま、一応平均値 \bar{r} と受振器の個数 M との関係を調べるために、(8-2) 式から \bar{r}/M ^{註12)} と M との関係を求めてみよう。第 50 図の実線は、その関係を示しているが、この図からわかるように、 \bar{r}/M の値が 0.2 以下になるには $M=25$ 以上、0.1 以下になるには $M=80$ 以上にならなければならない。しかも、上に述べたように平均値 \bar{r} 以上になる確率は 0.45 であるから、安全度を加味すると $1.5 \times \bar{r}/M$ の値を妨害波の減少係数と考えた方がよいかもかもしれない。この場合には、第 50 図の点線に見るように 0.2 に減少させるためには 50 個の受振器を必要とし、0.1 のためには 200 個以上の受振器が必要である。

Klipsch もこの点を指摘し、實際上困難であることを述べている。しかし、II. 2 において述べたように、群設置と多孔爆発とを組合せた場合には、受振器としての総合効果は $M \times N$ 個である点は重要なことである。もし、爆発孔の数を 5 孔、受振器 9 個とすれば 45 個の効果が

註12) \bar{r} は個数 M を大きくすると増大するので、signal と比較のために \bar{r}/M を用いた。



第50図 平均値 \bar{r}/M (実線) と $1.5 \bar{r}/M$ (点線) の値
Reduction ratio of random noise— \bar{r}/M (solid line) or $1.5 \bar{r}/M$
(dotted line)—against the geophone number M

期待され、この場合には減少係数としては大体0.2弱程度である。

以上の議論においては、波の振幅、周期は一定であるとした。もし、あらゆる周期に対して振幅が確率的に一樣であると“白い雑音”(white noise)となり、それがガウスの確率分布で表わされるときは“ガウス雑音”(gauss noise)と呼ばれている。しかし、反射法においてわれわれが対象としているものが白い雑音でないことは明らかであり、どちらかといえばガウス雑音に近いものと考えられる。

この種の考察を進めるうえには Smith²⁷⁾の手法を用いて k, f の函数として $k-f$ 面上での power response を考えることが便利である (k は波数)。そして、各成分間の cross-correlation 函数を実験的に決定して、関連性を数量的に表わし、減少係数を決定する方法が考えられる。しかし、これらの方法を実用上のものとして考えるには、今後数多くの研究を必要としよう。

VIII. 2 B型の妨害波

この種の波は表面波、多重屈折波、多重反射波、air coupled wave、音波、hole blow などが知られている。これらのうちで、どの波が卓越して妨害波になるかは、その地域の地質や爆発状態などにより異なる。火薬の爆発により生ずる各種の波を、広い範囲で全面的に調べることはかなり大規模な実験を必要とする。その1つに Reeves Country, Texas において Dobrin 其他³⁾の実験の詳しい報告がある。この論文によれば、初動のP波を除いて第2表のような5種類の波が観測されている。

初動に続くものとして multiple reflected refraction が見られるが、その周期は0.9~0.6 sec であるので、普通の受振器を用いたときはほとんど観測されないであろう。次の屈折されたS波についても同様である。第3の波は速い速度層の間に挟まれた遅い速度層のなかを伝播する波である。この波は、その低速層のなかで爆発を行うと特に大きく表われるものである。この波の周波数は18 cpsで、反射波の周波数にかなり近い値をもち、問題になる妨害波である。

第4の Rayleigh 波(1)については、その周波数が12 cpsで、速度が約400 m/sec である。Rayleigh 波(2)は周波数が3.6 cpsで非常に小さいので考慮する必要はないと思われる。

第2表 (after Dobrin et al, 1954)

	種類 Name of waves	周波数 Frequency (cps)	見掛けの速度 Apparent velocity (m/sec)
1	multiple reflected refraction	1.7~1.1	2,300~3,500
2	refracted shear wave	(註)	1,900
3	normal-mode propagation	18	970
4	Rayleigh wave (1)	12	390
5	Rayleigh wave (2)	3.6内外	440

(註) 論文には報告されていないが、写真記録からみると(1)と大体同じである。

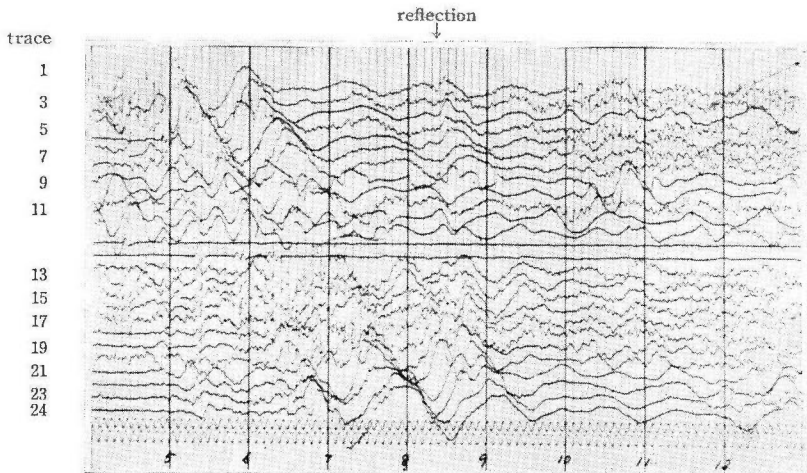
このように、この地域でB型の妨害波として問題になるのは(3)と(4)の2種であつて、他のものは考えなくてもよさそうである。次に、これらの波が電氣的の filter 回路、群設置および多孔爆発によつていかに消去できるかを、竜ヶ崎における事例について説明しよう。

VIII. 3 竜ヶ崎における実験——B型妨害波の消去——

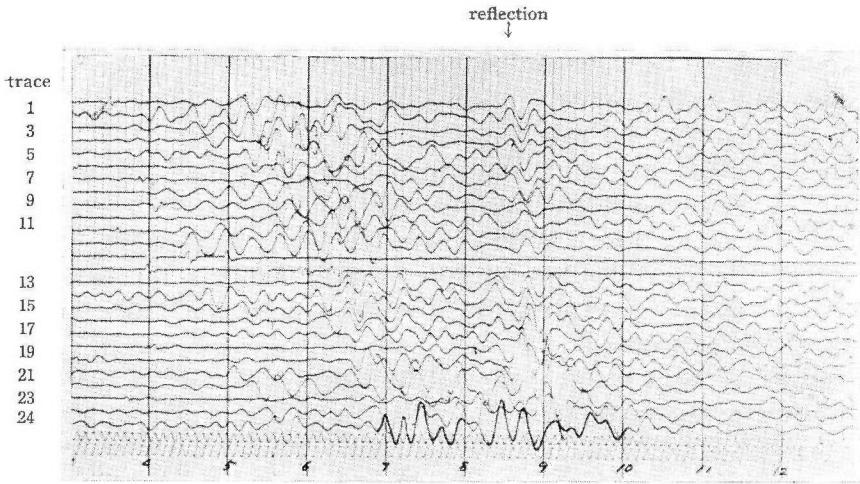
昭和33年3月、茨城県稲敷郡新利根村稲敷(竜ヶ崎市郊外)において、森喜義を中心として、反射法に関する2,3の研究実験が行われた。この作業と一緒にB型妨害波の消去の実験を実施した。次にこれを報告する。

実験地は利根川の沖積地で、水田および湿地で、上部は軟弱な水分を多く含む地層である。この附近の反射波の検出としては金子¹⁰⁾がすでに述べているように、妨害波が多いため、split spread ではよい記録が得難い所である。また、天然ガスの試掘井の結果から、第三紀層の基盤は約800mであることが知られている。

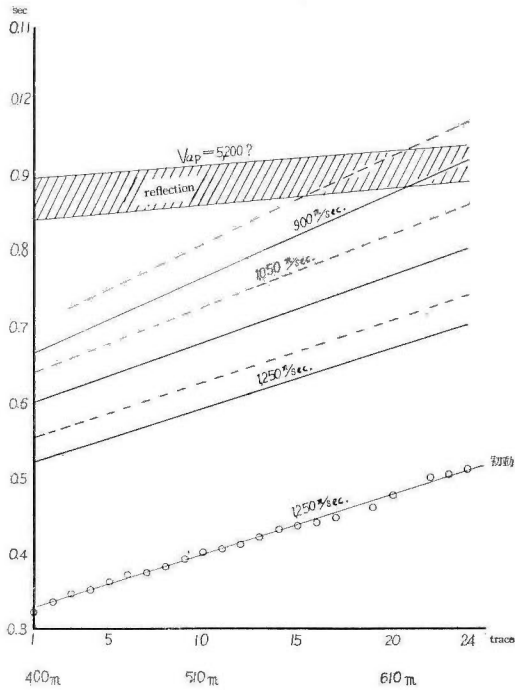
この実験に用いた装置は、FR-1(E.T.L.製 電力技術研究所所有)磁気録音式地震探鉱器である。この装置での最も幅の広い帯域の filter (out-220 cps) を用いて再生した記録が第51図である。この記録から明らかのように、反射の signal はほとんど検出することはできない。



第51図 竜ヶ崎における実験の記録。最も広い帯域の filter (out-220) 使用
A record of experiment at Ryūgasaki test field with the
widest band filter (out-220)



第52図 第51図と同じものを最適の filter (21-40) を用いて再生した記録
 Same record as Fig. 51 with suitable filter (21-40) for signal



第53図 第51図から作られた走時図
 Time distance curve calculated by the record in Fig. 51

しかし、他の filter、たとえば (21~40 cps) を用いると (第52図参照) 0.9 sec 附近に signal が認められるが trace 20~24 附近では、この signal は非常に乱されている。これは第51図の記録から明らかなように 10 cps 内外の妨害波により特に乱されたものと考えられる。この記録の trace 1~24 から走時図を作ると第53図のようになる。この 10 cps 内外の波の速度は、その初めの部分では 1,250 m/sec で初動の走時と平行している。しかし、この波は次第にその速度を減じ、第3の山では 900 m/sec 程度になる。この妨害波の種類が何であるかは不明であるが、multiple reflected refraction とも予想される。

Trace 20~24 は、丁度この妨害波によつて、反射 signal が乱される部分にあたるので、この部分で群設置および多孔爆発の試験を行い、B型の妨害波の除去に対する効果を調べることとした。群設置としては9個の直線形で、その間隔を 1 m, 3 m, 6 m の3組、それに single を合せて合計4組を比較することにした。

多孔爆発との組合せとしては、間隔 15 m の十字形の5点爆発を用いた。このようにすると、次のように変化の組合せを作ることができる。

第 3 表

Pattern shooting	Geophone setting	Filtering
single	single	out~220 cps
5 cross shot holes	9 geophones	15~ 28
$\Delta x=15\text{ m}$	$\Delta x \begin{cases} 1\text{ m} \\ 3\text{ m} \\ 6\text{ m} \end{cases}$	21~ 40
		21~ 56

次に参考のために FR-1 の filter 特性を示すと第54図である。また、妨害波の見掛けの速度は約 1,000 m/sec であるので、これに対する群設置と多孔爆発の特性函数 $K(\omega)$ を計算しておくくと第55図のようになる。

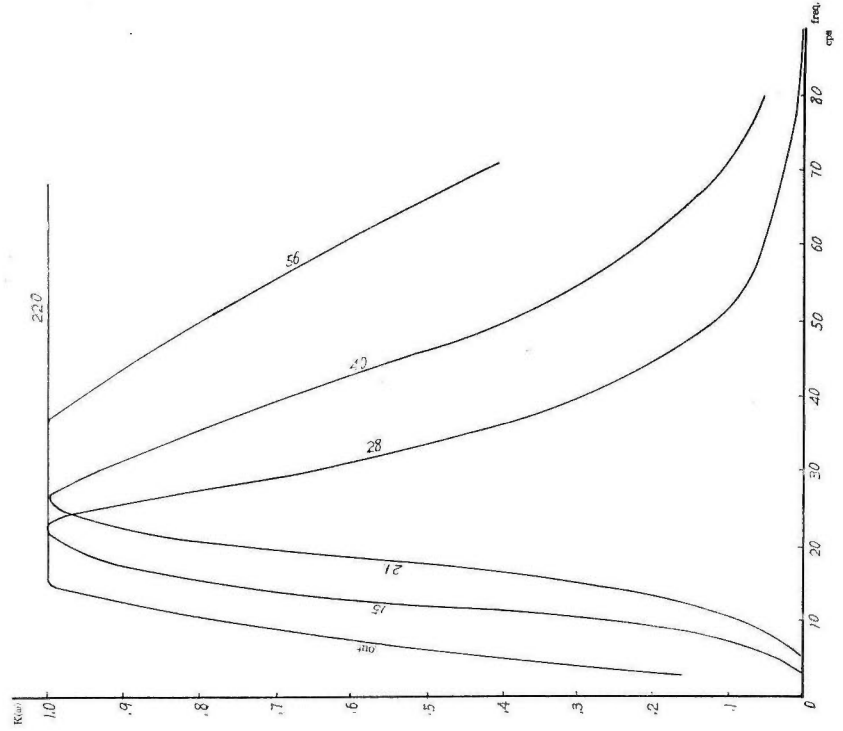
以上の準備を終えて、次に撮られた記録を見よう。観測点としては、前記のように 21~24 の4つの trace について調べたのであるが、その1つの 24 番の trace をとり出して、第3表の組合せについて比較したのが第56, 57図である。

第56図は単一爆発の場合の組合せで、第57図は多孔爆発の場合のものである。第56図で最も目につくことは、0.8~1.0 sec 附近の妨害波が single, 群設置の 1~3 m ではあまり消去されないのが、6 m の場合にはかなりよく消去されていることである。第56図に対応する総合特性、すなわち $F(\omega) \cdot K_1(\omega)$ を計算したのが第58~61図である。

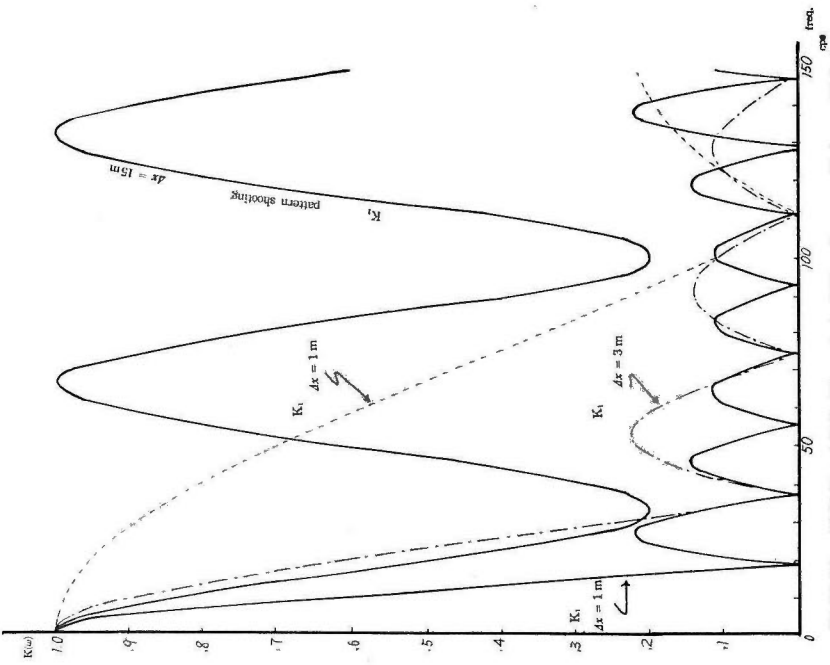
この特性図を見ると、見掛けの速度 1,000 m/sec の妨害波の消去作用の比較がよくわかる。たとえば、single の場合と 1 m 間隔の群設置の場合とでは filter としての特性に大差はないが、これは記録上にもよく表われている。間隔 6 m の群設置の特性はかなり他の場合と異なり、第58図の場合を除き $|K(\omega)|$ の値は大体 0.2 程度である。このことは記録上でも 0.9 sec 附近の signal がかなり顕著なことと一致する。

多孔爆発の場合の記録、第57図に対する総合特性 $F(\omega) \cdot K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$ を計算したのが第62~65図である。一般に $|K(\omega)|$ の値は小さくなるが、第64図の場合には、その平均値が 0.05 以下の値になる。したがって、速度 1,000 m/sec の B型の妨害波に関しては S-N 比は 10 倍以上に大きくなることが期待される。

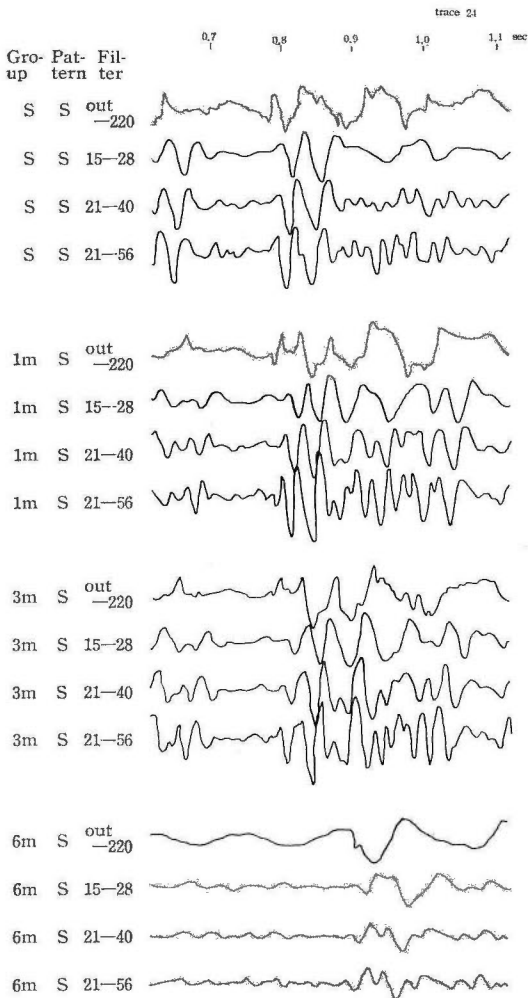
他方、反射波については、その見掛けの速度は 5,000 m/sec 以上になるので、反射 signal のスペクトルと大体同じであると考えられる filter (21~40) の場合には、その変形はほとんど



第54図 FR-1のfilter特性
Frequency response of filter of FR-1, magnetic recording
seismograph

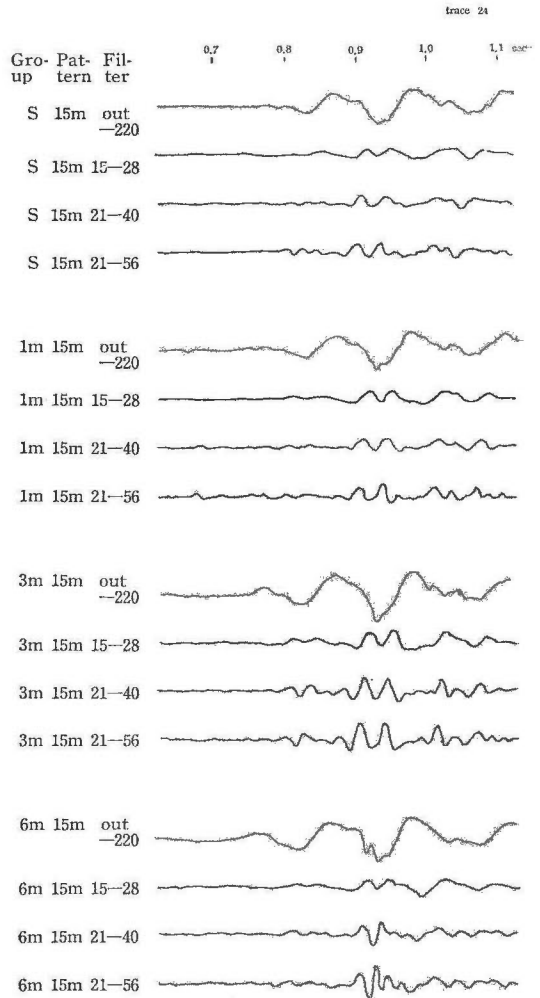


第55図 見掛けの速度 V_{sp} が 1,000 m/sec の場合の $K_1(\omega)$:
 $\Delta x=1$ m, 3 m, 6 m; $K_2(\omega)$: $\Delta x=15$ m
In case of apparent velocity = 1,000 m/sec, characteristic
function $K_1(\omega)$ at the receiving point ($\Delta x=1$ m, 3 m, 6
m) and $K_2(\omega)$ at the shot point ($\Delta x=15$ m)



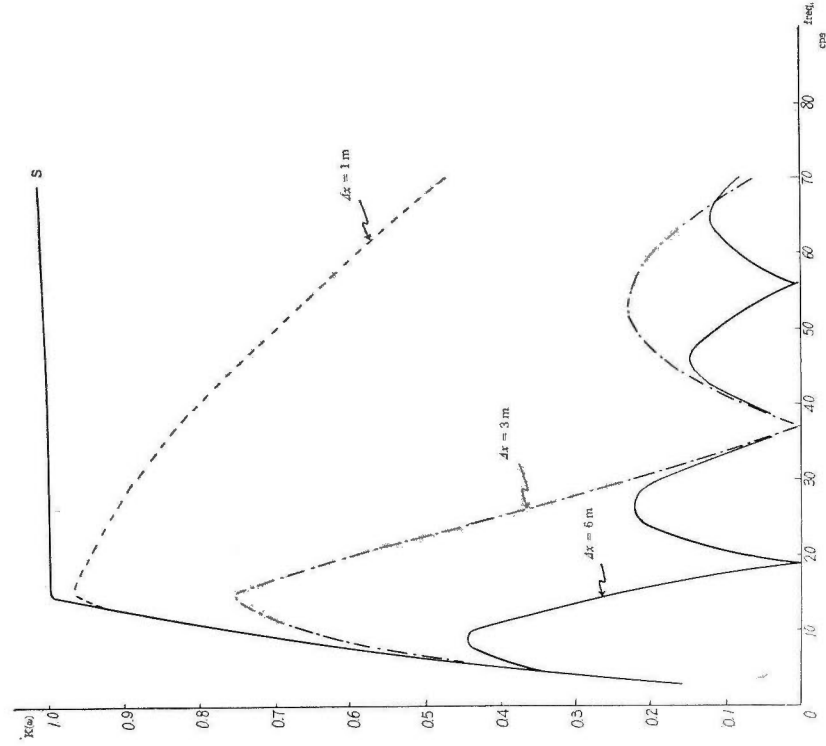
第 56 図 単一爆発で各種の群設置と filtering を用いたときの trace 24 の記録

Records of trace 24 without pattern shooting used multiple geophone settings ($\Delta x=0, 1\text{ m}, 3\text{ m}, 6\text{ m}$) and four filterings

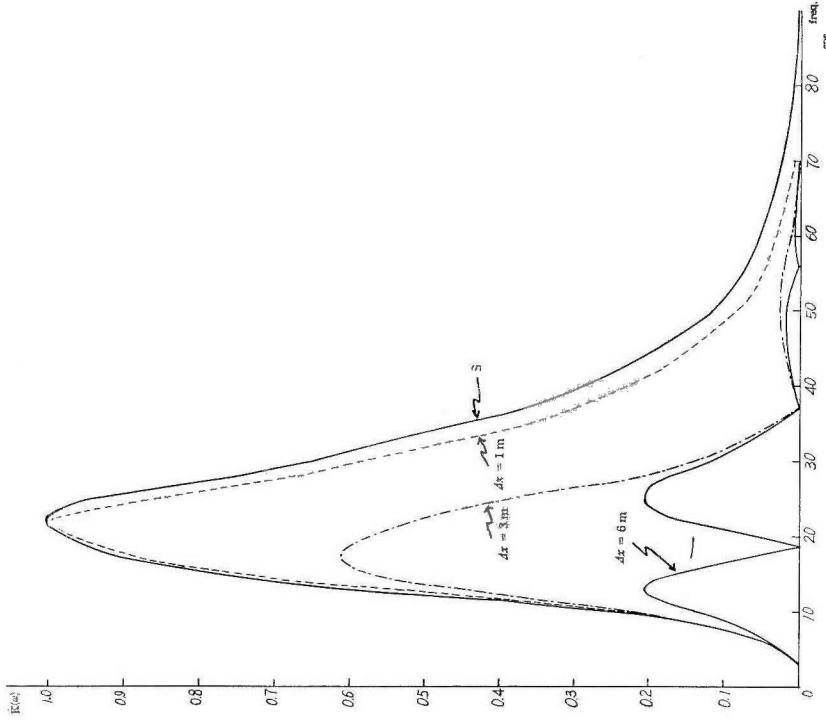


第 57 図 多孔爆発 ($\Delta x=15\text{ m}$) で各種の群設置と filtering を用いたときの trace 24 の記録

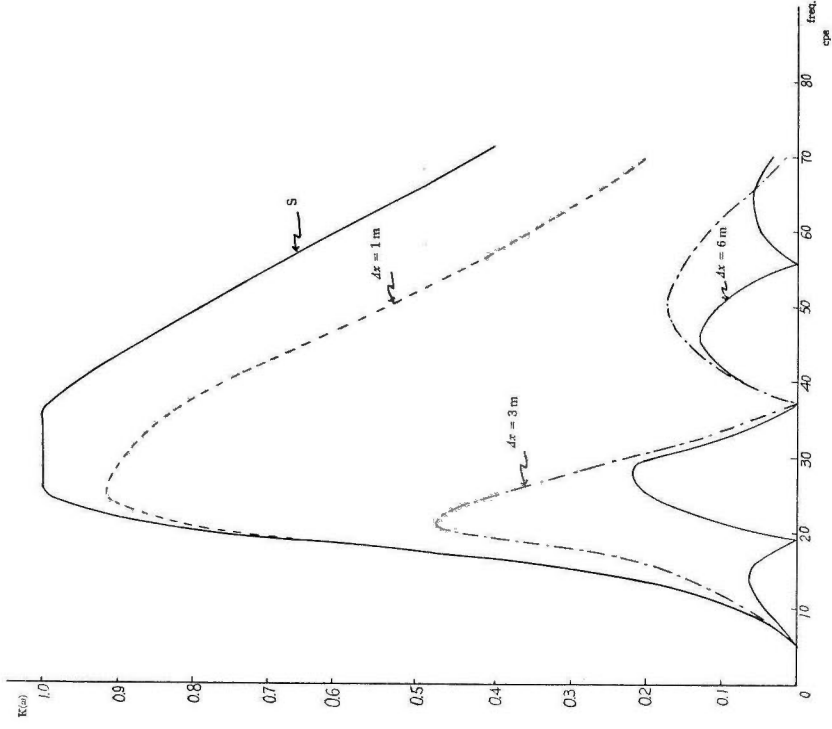
Records of trace 24 with pattern shooting ($\Delta x=15\text{ m}$) used multiple geophone settings ($\Delta x=0, 1\text{ m}, 3\text{ m}, 6\text{ m}$) and four filterings



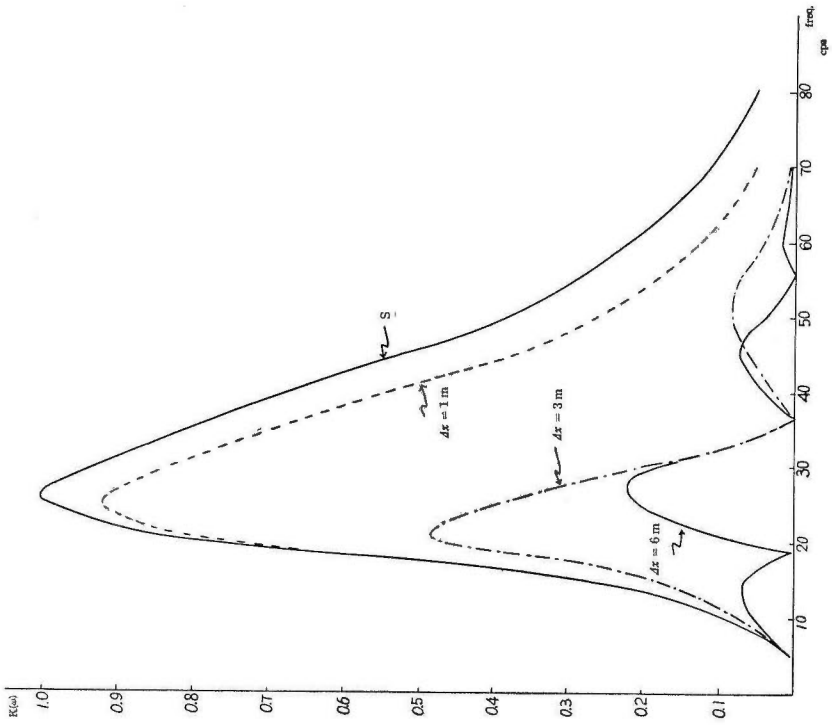
第 58 図 特性函数 $K=K_1 \times F$ (out-220)
 K_1 は受振点 (設置) の特性函数、 F は filtering の特性函数
 Characteristic function $K=K_1 \times F$ (out-220), where K_1 =charac-
 teristic function of multiple geophone setting and F =charac-
 teristic function of filtering



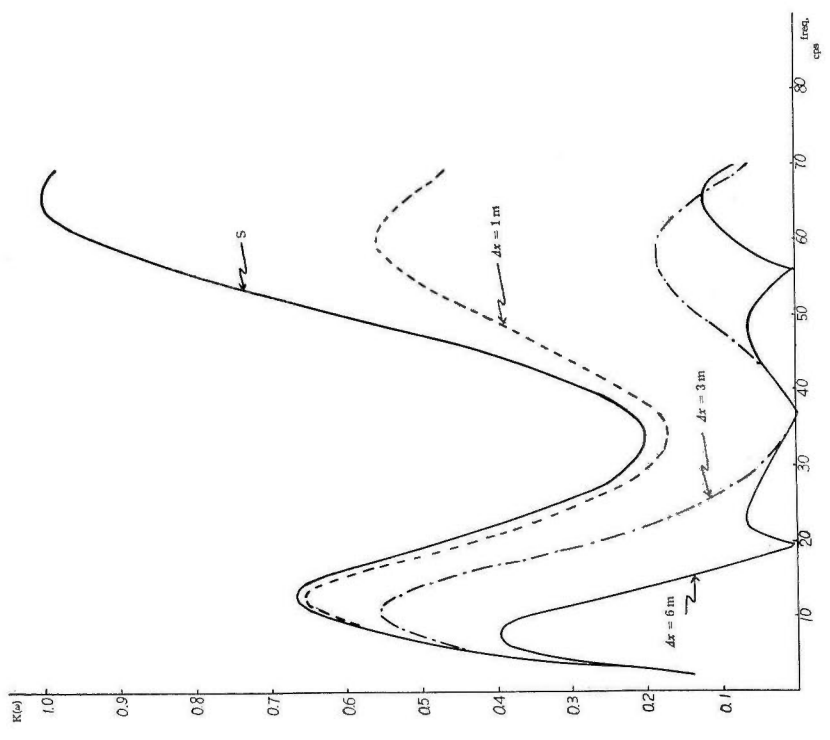
第 59 図 $K=K_1 \times F$ (15-28)



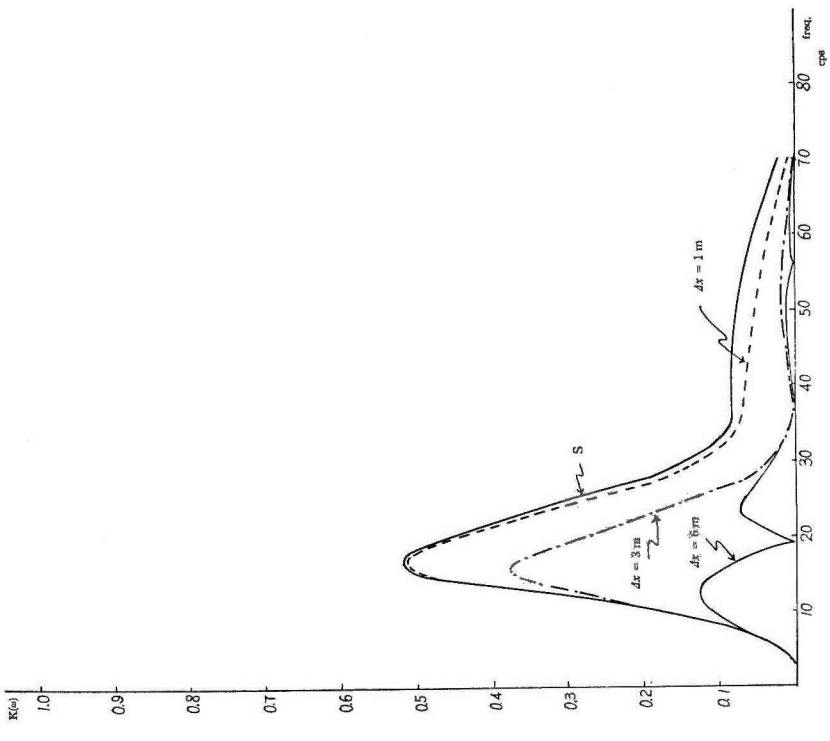
第 60 图 $K = K_1 \times F$ (21-40)



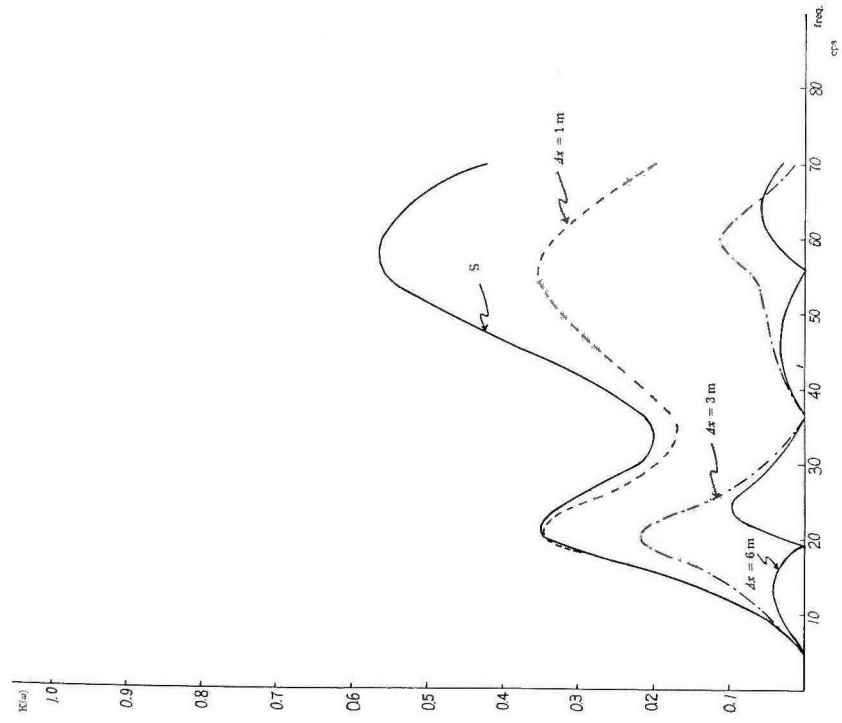
第 61 图 $K = K_1 \times F$ (21-56)



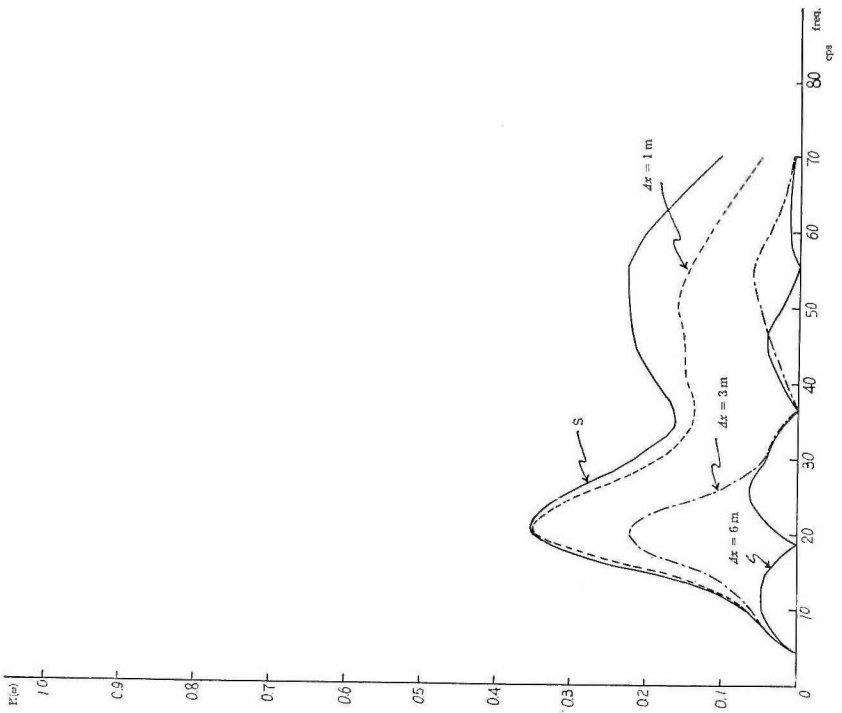
第 62 図 $K=K_1 \times K_2 \times F$ (out-220)
 K_2 は爆発点 (多孔爆発) の特性函数
 $K=K_1 \times K_2 \times F$ (out-220), where
 K_2 =characteristic function of pattern shooting



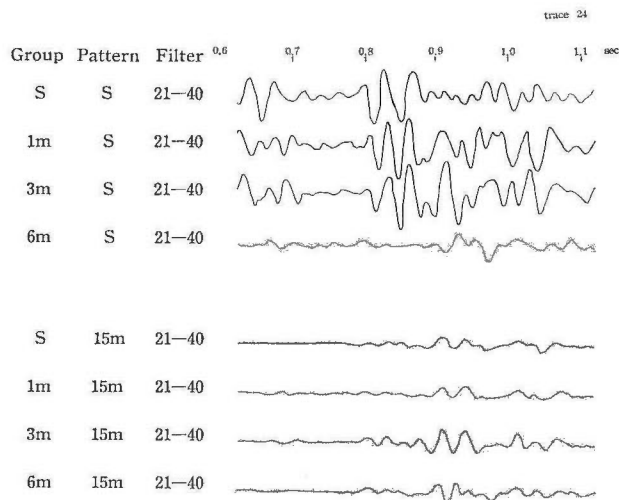
第 63 図 $K=K_1 \times K_2 \times F$ (15-28)



第 65 图 $K = K_1 \times FK_2 \times 1$ (2-56)



第 64 图 $K = K_1 \times K_2 \times F$ (21-40)

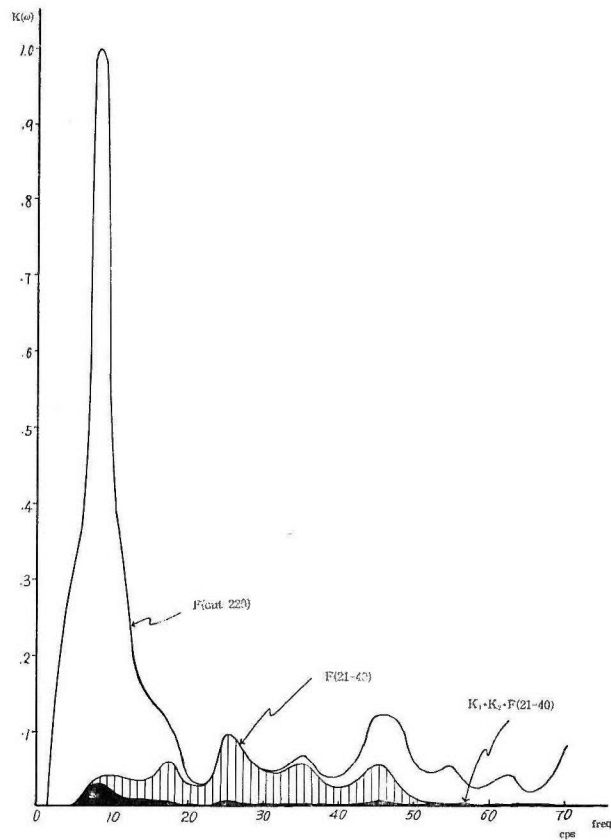


第 66 図 signal に対して最適の filter (21-40) を用い、多孔爆発
および各種の群設置を用いた場合の trace 24 の記録
Records of trace 24 with most suitable filter (21-40) for
reflection signal in case of multiple geophone settings
($\Delta x=0, 1\text{ m}, 3\text{ m}, 6\text{ m}$) and pattern shooting ($\Delta x=15\text{ m}$)

ど起こらないと考えられる。したがって、filter (21-40) のみを用いた場合の trace 24 の記録を比較のために第 65 図としてあげておいた。この図から明瞭なことは 0.8~0.9 sec 附近の妨害波の成分が下の 4 つの記録ではよく消去され、特に最後のものでは反射波がよく表われている。

0.8~0.9 sec 附近の妨害波の成分というのは、前に述べた 10 cps 内外の波のなかの 20~40 cps の成分のことをいうのであるが、この関係を明らかにするために、trace 24 の filter (out-220) の記録 (第 56 図の一番下の記録) のスペクトルを調べてみると第 67 図の実線のようになる。記録から期待されるように、8 cps を中心とした狭い幅の卓越周波数が見られるのは当然であるが、それに対して、平均 5~10 % 程度の値を示す成分が高い周波数帯にも見られる。この周波数帯のものは皆 1,000 m/sec の見掛けの速度をもっているか、否かについては疑問であるが、相当量のものがあると考えられる。この妨害波に対して filter (21-40) を用いれば斜線の部分が残される。このことは、当然のことであるが、10 cps 以下の低周波の妨害波の卓越周期は filter によりほとんど消去されることは留意しておいてよい。しかし、これによりこれまで比較的小さい energy をもっていた 20~40 cps の妨害波成分が、相対的にはかなり大きなものになる。したがって、もし signal の成分が (signal の卓越周波数は 30 cps と考えられるので)、妨害波の成分と大体同じ、ないし、小さいならば、signal の検出は困難であろう。間隔 6 m の群設置、15 m の多孔爆発を用いたときの妨害波の成分は、黒い影の部分である。これから明らかなように、signal の検出に対して、最も障害を及ぼす 20~40 cps の間の妨害波の成分は著しく小さくなる。これが第 66 図におけるように、最後の記録において著しく signal が顕著になつた理由である。

上記のことから、1 つの重要な現場技術の注意が明らかにされる。それは、従来しばしば群設置、多孔爆発を使用するとき、妨害波の波長(卓越周期に対する)の長さの間に、受振器あるいは爆発孔を分布させたらよいといわれてきた。しかし、上記の実験例からも明らかなよう



第 67 図 第 51 図の trace 24 のスペクトル (filter は (out-220) を使用)。filter (21-40) を使用したときには斜線部分のように減少し、群設置 ($\Delta x=6$ m) および多孔爆発 ($\Delta x=15$ m) を併用したときは黒に塗りつぶした部分のように減少することがよく判る。

Component of wave noise (spectrum of trace 24 in Fig. 51) becomes smaller and smaller by using the suitable filtering (21-40) and by the combination of the suitable filtering, multiple geophone setting ($\Delta x=6$ m) and pattern shooting ($\Delta x=15$ m)

に、妨害波が 10 cps 以下のように低周波の場合には、10 cps 以下の成分は、たとえその成分が大きくても filter により大きく消去され、signal に対して邪魔するものは、その妨害波の 2 次的の成分にあたる、signal の卓越周波数附近の成分である。したがって、この周波数の波長の間を受振器、爆発孔を分布することが必要であろう。

文 献

- 1) Anstey, N. A. : Modern technique in seismic reflection recording, Geophysical Prospecting, Vol. 5, No. 1, p. 44~66, 1957
- 2) Born, W. T. : Notes on the use of multiple shot holes and multiple geophones, Meeting Soc. of Pet. Geophysicists, Nov. 29, 1935, Dallas, Texas, 1935
- 3) Dobrin, B. M. & Lawrence, P. L. : Surface and near surface wave in the Delaware Basin, Geophysics, Vol. 19, No. 4, p. 695~715, 1954
- 4) Hales, F. W. & Edward, T. E. : Some theoretical considerations on the use of multiple geophones arranged linearly along line of traverse, Geophysical Prospecting, Vol. 3, p. 65~73, 1955
- 5) Hammond, J. W. : How to recognize and eliminate certain types of record disturbance, Oil and Gas Jour., Vol. 53, No. 50, p. 141~144, 1954
- 6) 飯田波事: 多孔爆発法の研究, 物理探鉱, Vol. 8, No. 4, p. 143~149, 1955
- 7) Johnson, C. H. : Steady state polar sensitivity curves, Geophysics, Vol. 4, p. 33~52, 1939
- 8) Jones, H. J. & Morrison, J. A. : Cross-correlation filtering, Geophysics, Vol. 14, p. 660~683, 1954
- 9) Jones, H. J. & et al. : Magnetic delay line filtering techniques, Geophysics, Vol. 20, No. 4, p. 745~765, 1955
- 10) 金子徹一: 地震探鉱反射法の研究, 地質調査所報告, No. 156, 1953
- 11) Klipsch, P. W. : Some aspects of multiple recording in seismic prospecting, Geophysics, Vol. 1, p. 365~377, 1936
- 12) Leonard, V. L. : Notes on the use of multiple geophones, Geophysics, Vol. 20, No. 2, p. 215~226, 1955
- 13) McDermott, E. : Use of multiple seismometers, Petroleum Engineer, Vol. 8, No. 5, p. 135~136, 1937
- 14) McKay, A. E. : Review of pattern shooting, Geophysics, Vol. 19, p. 420~437, 1954
- 15) McKay, A. E. : Record improvement in bad-reflection areas, Oil and Gas Jour., Vol. 52, No. 50, 1954
- 16) Mott-Smith, M. : Adverse effects associated with variably compounded seismograph records, Geophysics, Vol. 2, p. 265~294, 1937
- 17) Muir, F. & Hales, F. W. : A rational approach to the design of electrical filtering and of shot-hole and geophone patterns in seismic reflection prospecting, Geophysical Prospecting, Vol. 3, No. 4, p. 350~358, 1955
- 18) Palmer, R. L. : A new approach to seismic exploration, World Oil, Vol. 13, No. 7, p. 140~158, 1954
- 19) Farr, J. O. & Mayne, W. H. : A new method of pattern shooting, Geophysics, Vol. 20, No. 3, p. 539~564, 1955
- 20) Reynolds, F. F. : Design factors for multiple arrays of geophones and shot holes, Oil and Gas Jour., Vol. 52, No. 50, p. 145~146, 195, 1954
- 21) Ricker, N. H. : The form and laws of propagation of seismic wavelets, Geophysics Vol. 18, p. 10~40, 1953
- 22) Rummerfield, B. F. : Pattern shooting. Why this symposium? Oil and Gas Jour., Vol. 52, No. 50, p. 136~138, 1954
- 23) Rust, W. M. : What's new in geophysics? World Oil, Vol. 138, No. 5, p. 80~

82, 83, 88, 1954

- 24) 佐藤泰夫: いかにして表面波から逃れるか, 物理探鉱, Vol. 7, No. 4, p. 165~173, 1954
- 25) Savit, C. H. et al. : The moveout filter, Geophysics, Vol. 28, No. 1, p. 1~25, 1958
- 26) Shock, I. : The progressive detonation of multiple charges in a single seismic shot, Geophysics, Vol. 15, p. 208~218, 1950
- 27) Smith, M. K. : Noise analysis and multiple seismometer theory, Geophysics, Vol. 21, No. 2, p. 337~360, 1956
- 28) Swartz, C. A. & Sokoloff, V. M. : Filtering associated with selective sampling of geophysical data, Geophysics, Vol. 19, p. 402~419, 1954
- 29) White, J. E. : Transient behavior of patterns, Geophysics, Vol. 28, No. 1, p. 26~43, 1958

Some Aspects of Multiple Geophone Setting and Pattern Shooting in Seismic Reflection Prospecting

By

Tetsuichi KANEKO

Abstract

Introduction

Since Born²⁾ presented a paper on a multiple geophone setting and pattern shooting, many papers on this subject have been published. In this paper, we considered synthetically this problem from many points of view, namely (1) physical meaning of them and theoretical relation between them, (2) distortion of reflection signal, (3) characteristic function $K(\omega)$ which shows the frequency response of these operations, (4) weighted multiple geophones or pattern shooting, (5) characteristic function combined with mixing, (6) notes on the shallow or steep dip reflector, (7) elimination of random and wave noise with experimental study.

Theoretical consideration

A seismic pulse generated by an explosive may be regarded as an input signal to a filtering circuit which is composed of ground and instrument. Then the wave form on a record will be output signal from this circuit. And operations of multiple geophone setting and pattern shooting could be regarded as two filtering circuits. The relations between seismic pulse, the ground as a medium of propagation, instrument and operations of multiple geophone setting and pattern shooting, are schematically shown in Fig. 11. Because these filters are connected in a series circuit, the combined characteristic function for the whole system is given as the product of each characteristic function. Namely, when the characteristic functions of multiple geophone setting and pattern shooting are denoted by $K_1(\omega)$ and $K_2(\omega)$ respectively, the combined characteristic function $K(\omega)$ is expressed by

$$K(\omega) = K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)$$

and

$$K_1(\omega) = \sum_{K=0}^{M-1} a_k e^{j\omega k \cdot \Delta t_1}$$

$$K_2(\omega) = \sum_{S=0}^{N-1} b_s e^{j\omega s \cdot \Delta t_2}$$

where

- M: number of geophones
- a_k : weighting function for the Kth geophone
- N: number of shot holes
- b_s : weighting function for the Sth shot hole

The synthetical number of this system is given by the product $M \times N$ for random noise.

Distortion of the reflection signal

The distortion of the signal wave form by the use of linear array of multiple geophones is investigated for two cases: the case of the given spacing (with various number of geophones) and the case of the given coverage.

As a reflection signal we use the Ricker's wavelet of which wave form and spectrum $Y(\omega)$ are shown in Fig. 13 and Fig. 14 respectively.

The case of given spacing :

The distortion of the signal wave form is illustrated in Fig. 15. This is computed for the spacing 1/900 sec and for $M=2, 3, \dots$, assuming the breadth of Ricker's wavelet as 2/100 sec. The relative height, namely the amplitude of composed wavelet, decreases with number M , and its predominant period increases with M . The general feature of the distortion will be seen from a family of characteristic curve (frequency responses), shown in Fig. 17, which correspond to the above composition. Therefore approximate attenuation of the amplitude will be estimated from these curves taking the values of frequency response at 50 cps.

The case of given coverage :

The distortion of the signal wave form due to the given coverage is illustrated in Fig. 18 and Fig. 20 for the cases of $L/V_{ap}=12/900$ sec and $L/V_{ap}=6/900$ sec respectively. The characteristic function $K(\omega)$ in this case is given by

$$K(\omega) = \frac{\sin \left(\pi f \frac{ML}{M-1} \frac{1}{V_{ap}} \right)}{M \sin \left(\pi f \frac{L}{M-1} \frac{1}{V_{ap}} \right)}$$

where V_{ap} is apparent velocity and L is the coverage length. The characteristic functions for the above cases are computed and illustrated in Fig. 19 and Fig. 21. From these figures, it is noticed that multiple geophones method causes a remarkable distortion of signal wave form in case where a few geophones are used for low apparent velocity.

On the characteristic function $K(\omega)$

The characteristic function $K(\omega)$ has been expressed by many formulae. When emergent or incident angle of ray is used as a variable, the formula of $K(\omega)$ shows the polar sensitivity as stated by Johnson⁷⁾ and others. And when wave length or wave number is taken as a variable, then it becomes problem of filtering for wave length or wave number. In this paper, we expressed $K(\omega)$ by four variable, f , M , Δx and V_{ap} , since frequency f and apparent velocity V_{ap} are read directly on the record, and since a curve as a function of wave length is spread into the family of curves showing more explicitly the effect on one variable V_{ap} or f . $K(\omega)$ is expressed by

$$K(\omega) = \frac{\sin \left(\pi f M \frac{\Delta x}{V_{ap}} \right)}{\sin \left(\pi f \frac{\Delta x}{V_{ap}} \right)}$$

A curves of $K(\omega)$ is illustrated in Fig. 22. This curve demonstrates that frequency response is a low-pass filter and varies with apparent velocity. In Figs. 23~31, many curves of $K(\omega)$ are illustrated for the cases of linear array of evenly spaced nine geophones ($\Delta x=1$ m, 3 m and 6 m) and for the cases of cross pattern of five shot holes ($\Delta x=5$ m, 10 m, 15 m, 20 m and 25 m).

For the quick estimation of the cut-off region, a nomogram is made for the relation between M , Δx , V_{ap} and f_0 (cut-off frequency). The f_0 relates to other variables by the formula $f_0 M \Delta x / V_{ap} = 0.5$ when the first crest of $K(\omega)$ in Fig. 32 is replaced by a cosine curve. Fig. 33 shows the nomogram based on this formula.

Examples of combined characteristic function $K(\omega)$ are computed for the combination of nine geophone setting ($\Delta x=5$ m) and cross five shot holes ($\Delta x=10$ m). Fig. 34 shows the case where apparent velocity at the receiving point and the shot point is same, and Fig. 35 shows the case where apparent velocity is different.

Generally speaking, combined characteristics is better than each characteristics, because crests of higher frequency region become flat and small value.

Weighted multiple geophones or pattern shooting

When a large number of geophones or shot holes are used, the characteristics of them will be approximately treated by those of infinite numbers. And the relation of $K(\omega)$ and the weighting function $B(t)$ are given by

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(t) e^{j\omega t} dt \quad (5-2)$$

and

$$B(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} K(\omega) \cos \omega t d\omega \quad (5-3)$$

if $B(t)$ is symmetric.

Let us try to simulate three model filters (a), (b) and (c), which are shown in Fig. 37, by proper weighting function. Weighting functions for these filters are obtained from (5-3)

$$(a) \quad B(t) = \frac{\omega_0}{\pi} \left(\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0 t} \right)$$

$$(b) \quad B(t) = \frac{\omega_0}{2\pi} \left\{ \frac{\sin \frac{\pi}{2} (1 + \omega_0 t)}{\frac{\pi}{2} (1 + \omega_0 t)} + \frac{\sin \frac{\pi}{2} (1 - \omega_0 t)}{\frac{\pi}{2} (1 - \omega_0 t)} \right\}$$

$$(c) \quad B(t) = \frac{\omega_0}{2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\omega_0^2 t^2}{4}}$$

These weighting functions are shown in Fig. 38. As is seen in these figures, an infinite length of coverage is demanded to simulate exactly these model filters. And this is not practical to be used in the field. Therefore, let us see how the characteristics of the model filters vary when the finite coverage is used. The characteristic functions for the finite coverage is obtained from formula (5-2) by limiting the integration range to $0 - t_0$; t_0 is shown in these figures. Then we have

$$(a) \quad K(\omega) = \frac{1}{\pi} \left\{ \text{Si} \left[t_0 \omega_0 \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] + \text{Si} \left[t_0 \omega_0 \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] \right\}$$

$$(b) \quad K(\omega) = \frac{1}{4} \left(\cos \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left\{ \text{Si} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 + \omega_0 t) \right] + \text{Si} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 + \omega_0 t) \right] \right. \\ \left. - \text{Si} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 - \omega_0 t) \right] - \text{Si} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 - \omega_0 t) \right] \right\} \\ + \frac{1}{4} \left(\sin \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left\{ -\text{Ci} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 + \omega_0 t) \right] + \text{Ci} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 + \omega_0 t) \right] \right. \\ \left. - \text{Ci} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 - \omega_0 t) \right] + \text{Ci} \left[\frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0} \right) (1 - \omega_0 t) \right] \right\}$$

These curves are illustrated in Fig. 43. These curves show that frequency responses are almost satisfactory, even though there are a little difference to model filters.

As regards weighting method, Parr¹⁹⁾ and Savit²⁵⁾ presented several weighting functions as illustrated in Fig. 8 and Fig. 42. It will be seen that Savit's weighting function is very similar to that of type (c) of the above model filters.

Combination of multiple geophone setting and mixing

The characteristic functions for 2-channel and a graded mixing are obtained as follows,

$$K(\omega) = \cos\left(\pi f \frac{X}{V_{ap}}\right)$$

$$K(\omega) = \frac{1}{3} \left\{ \cos\left(\pi f \frac{X}{V_{ap}}\right) + \cos\left(3\pi f \frac{X}{V_{ap}}\right) + \frac{1}{2} \left(\cos 5\pi f \frac{X}{V_{ap}} \right) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \cos\left(7\pi f \frac{X}{V_{ap}}\right) + \dots \right\}$$

where X is distance between receiving points.

In similar way, the characteristics for 2-channel and graded mixing with linear full spaced M geophones between receiving points are obtained as

$$K(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{K=1}^M \cos\left[\left(2K-1\right)\pi f \frac{4x}{V_{ap}}\right]$$

$$K(\omega) = \frac{1}{3M} \left\{ \sum_{K=1}^{2M} \cos\left[\left(2K-1\right)\pi f \frac{4x}{V_{ap}}\right] + \frac{1}{2} \sum_{K=2M+1}^{3M} \cos\left[\left(2K-1\right)\pi f \frac{4x}{V_{ap}}\right] \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \sum_{K=3M+1}^{4M} \cos\left[\left(2K-1\right)\pi f \frac{4x}{V_{ap}}\right] + \dots \right\}$$

The characteristic function for the weighted multiple geophones shown in Fig. 44 is given by

$$K(\omega) = 2t_1 \left\{ (1-k) \frac{\sin \omega t_1}{\omega t_1} + 3k \frac{\sin (3\omega t_1)}{3\omega t_1} \right\}$$

where k is ratio of weight and t_1 is $L/2 V_{ap}$. Fig. 45 and Fig. 46 show the function $K(\omega)$ when k are 1.00, 0.75, 0.50, 0.25, 0, -0.25, -0.50, -0.75 and -1.00, respectively.

This combination system could be used with magnetic recording seismograph.

Notes on the shallow or steep dip reflector

It is necessary for the party chief to know that the distortion of the signal cannot be neglected when distance shot point and spread is relatively large compared with the depth of reflector. The quantitative estimation of amount will be made by the above shown figures of characteristic function $K(\omega)$.

When the reflector's dip is steep, apparent velocities at the receiving point and shot point have different values. Therefore the distortion of signal is not so simple. With regard to the apparent velocity at the receiving point, this velocity is easily obtained on a record. But it is not easy to know the apparent velocity V'_{ap} at the shot point. The apparent velocity is given by

$$V'_{ap} = V \frac{\sqrt{4 + \left(\frac{x}{h}\right)^2 \pm 4\left(\frac{x}{h}\right) \sin \phi}}{\left(\frac{x}{h}\right) \pm 2 \sin \phi}$$

where x , h and ϕ are parameters shown in Fig. 47.

This relation is made into nomograms and is presented in Fig. 48 and Fig. 49. Generally speaking, the distortion of signal in down dip side spread is mainly controlled by the characteristic function of the receiving system in steep dip area. While the distortion of signal in the opposite side spread is controlled by the characteristic function at the shot point.

Reduction of noise

(1) Reduction of random noise

Klipsch¹¹⁾ attacked this problem from a statistical viewpoint. He stated the average value \bar{r} (expectation) as follows,

$$\begin{aligned}\bar{r} &= \int_0^1 r dP \\ &= \sqrt{M} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \\ &= 0.886 \sqrt{M}\end{aligned}$$

where P = probability of a resultant amplitude less than \bar{r} ,

r = resultant amplitude of a large number of isoperiodic vibrations of arbitrary phase.

The probability of occurrence of this value is 0.45 and probability of $1.5\bar{r}$ is 0.16. Therefore, let us take the value \bar{r}/M or $1.5\bar{r}/M$ as a reduction ratio of random noise for number of geophones or shot holes. Fig. 50 shows the reduction ratio against the number M .

(2) Reduction of wave noise — Experiment at Ryūgasaki test field

An experiment on the reduction of wave noises was carried out at Ryūgasaki, Ibaragi prefecture in March 1958. The test field is covered by rice field and damp ground. It is difficult to pick up reflection signal in split spread.

Instrument used in the experiment was FR-1 magnetic recording seismograph. Fig. 51 demonstrates a record obtained by the widest filter band (out-220 cps). Reflections are not seen on this record. But a reflection signal is recognized in the vicinity of 0.9 sec when filtered by 21-40 cps band, as shown in Fig. 52. This reflection signal is disturbed at traces 20-24 by the wave noise of which frequency is about 10 cps and velocity is 900-1,250 m/sec as shown in Fig. 51 and Fig. 53. In order to investigate the effects of multiple geophones and pattern shooting, we planted nine geophones at traces 20-24 and used five cross shooting. Combinations of geophones, shooting and filtering are shown in the Table.

Table

Explosion	Multiple geophone pattern	Filtering (cps)
single	single	out-220
five cross	nine	15-28
shooting	geophones Δx {	21-40
	1 m	21-56
	3 m	
	6 m	

Fig. 54 shows the filter characteristics and Fig. 55 filter responses of these multiple geophones and pattern shooting. Fig. 56 and Fig. 57 show the trace 24 which is filtered by electrical filter, multiple geophone setting and pattern shooting according to the above combination. And corresponding characteristic functions $K(\omega)$ for the combination of Table are illustrated in Figs. 58-65. Correlation between figures of trace 24 and corresponding function $K(\omega)$ shows the reasonableness of the theory developed in the above chapter. Namely, component of the wave noise becomes smaller and smaller by using the suitable electrical filter, multiple geophone setting and pattern shooting as shown in Fig. 67.

Summary

The results obtained in the above chapters are summarized as follows,

1) The combined characteristic functions of multiple geophone setting and pattern shooting are presented as a product of each characteristic function.

2) The approximate attenuation ratio of amplitude of the distorted signal is obtained by the characteristic function of these methods.

3) The characteristic function $K(\omega)$ is calculated for the linear array of evenly spaced nine geophones and the cross pattern of five shot holes.

For the quick estimation of the cut-off region of the first crest, a nomogram is made for the relation between geophone number, spacing of geophones, apparent velocity and cut-off frequency. The combined characteristic function of multiple geophone setting and pattern shooting is generally better than each characteristics.

4) Five types of variable weighted multiple geophone setting or pattern shooting are compared. The exponential pattern seems to be the most ideal one.

5) The characteristic functions for the weighted 3-channel mixing combined with linear full spaced geophone are calculated.

6) In the steep dip area, the distortion of signal in down dip side spread is mainly depend upon the characteristic function of the receiving system, the other hand in the opposite side spread depend upon the function of the shot point.

7) An experiment on the reduction of wave noise was carried out at Ryūgasaki.

It seems that the results obtained in the test field shows the reasonableness of above considerations.

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

Hereafter, all reports will be published exclusively in the Reports of the Geological Survey of Japan. The Report will be consecutive to 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 | } | <ul style="list-style-type: none">a. Geologyb. Petrology and Mineralogyc. Paleontologyd. Volcanology and Hot Springe. Geophysicsf. Geochemistry |
| B. Applied geology | } | <ul style="list-style-type: none">a. Ore depositsb. Coalc. Petroleum and Natural gasd. Underground watere. Agricultural geology
Engineering geologyf. Physical prospecting,
Chemical prospecting & Boring |
| C. Miscellaneous | | |
| D. Annual Report of Progress | | |

Note: In addition to 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、その番号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1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号を附けることにする。

- | | | |
|---------------------|---|---|
| A 地質およびその基礎科学に関するもの | { | a. 地質
b. 岩石・鉱物
c. 古生物
d. 火山・温泉
e. 地球物理
f. 地球化学 |
| B 応用地質に関するもの | { | a. 鉱床
b. 石炭
c. 石油・天然ガス
d. 地下水
e. 農林地質・土地地質
f. 物理探鉱・化学探鉱および試錐 |
| C その他 | | |
| D 事業報告 | | |

なお刊行する報文以外に、当分の間報文を謄写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34年2月10日印刷
昭和34年2月15日発行

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. 182

GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Katsu KANEKO, Director

**SOME ASPECTS OF MULTIPLE GEOPHONE
SETTING AND PATTERN SHOOTING IN
SEISMIC REFLECTION PROSPECTING**

By

Tetsuichi KANEKO

GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN

Hisamoto-chō, Kawasaki-shi, Japan

1959

地質調報
Rept. Geol. Surv. J.
No. 182, 1959