

遅延爆発法について

—深部物理探査研究 第6報—

本荘静光* 南雲昭三郎* 鎌田清吉* 平沢 清*

On Delay Shooting

by

Shizumitsu Honshō, Shōzaburō Nagumo, Seikichi Kamata
& Kiyoshi Hirasawa

Abstract

Some considerations and field experiments on delay shooting were made. Results obtained are as follows.

- 1) Delay shooting is not so useful to reduce surface waves, because it is difficult to make delay time long.
- 2) Signal to Noise ratio was improved considerably as compared with single shot. The delay shooting at shallow hole with much overdelay time was more efficient to improve S-N ratio in the case of this experiment.

要 旨

遅延爆発法は、地震探査において、一つの爆発孔内で数個の爆薬を順次爆発させ、それによる発振エネルギーの指向性を利用して、反射波等の情報を有効に得ようとするものである。種々の爆発条件に対する指向性、波形変化等についての考察と、34年度秋田県申川での実験結果について述べる。

1. 緒 言

地震探査において、一つの爆発孔内で適当な時間間隔をおいて数個またはそれ以上の爆薬を順次爆発させるいわゆる遅延爆発法 (Delay shooting, Sequential shooting, Progressive detonation などと呼ばれる) は、10年ほど前から着目され、その期待しうる効果や実施方法についてこれまでにいくつかの考察や実験が行なわれている。

Shock Lorenz¹⁾ (1950) は、最大の爆発効果をあげるための適正薬量について実験した後、らせん状に巻いた導爆線を用いて数個ないし数10個の爆薬を順次爆発させる実験を繰り返し、爆発孔内で、孔壁媒質の弾性波速度と同程度の爆速をもたせた場合が最も効果的であり、単一爆薬による爆発に比較し、明らかに優勢な反射波をとりだしうることを述べている。さらに Musgrave, Ehlert

& Nash²⁾ (1958) は“遅延爆薬による方向性の効果”と題して、a) ghost reflection の消去、b) 水平方向のノイズの消去、の2つに着目した考察、実験を行ない、遅延爆薬が ghost reflection の消去に有効であることを実証した。遅延爆発法は、地震探査反射法の新しい技術としてさらに開発される可能性をもっているので、われわれは日本油脂 K. K. で研究試作された遅延爆発装置を用い、34年秋、秋田県申川南部地区においていくつかの実験を行なった。遅延爆発法に期待される種々の効果についての考察と、実験の結果についてここに述べたいと思う。遅延爆発装置の研究試作ならびに現場での使用法指導を担当して頂いた日本油脂 K. K. 村田旺仁技師に心からお礼を上げたい。また現場実験にさいし種々御協力を頂いた石油資源開発 K. K., 特に阿部陽一班長はじめ申川調査班の方々に深く感謝の意を表する。

2. 遅延爆発装置の構造

装置は、マイクロセコンド遅延筒と名付けられ、構造の概要は第1図に示すとおりである。

一次側、二次側にはそれぞれ爆薬 (ダイナマイト) が適当な方法により接続され、一次側の爆発によって誘爆した導爆線が一次延時薬、二次延時薬を誘爆させる過程で、延時薬の爆ごうガス流速を利用して二次側雷管の起

* 物理探査部



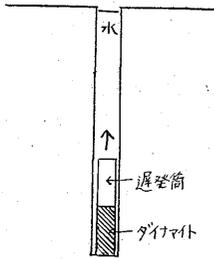
第1図 遅延装置の構造

爆までの遅延時間を生ぜしめるものである。遅発筒には作用を確実にするため、図のように2本の遅延装置を並置している。われわれの使用した装置は1本につき約1.2 m.secの遅延を生じるように製作された。ダイナマイトと交互に接続することによって任意の長さのものが得られ、またダイナマイト長を変えることによりある程度の爆速の変化をもたせることができる註1)。

3. 遅延爆発装置のテスト

遅延装置の外気中での作動については日本油脂 K. K. で実験済みであるが、爆発孔内、特に水中数気圧の圧力下で充分作動するかどうかについて若干のテストを行なった。要点は、1) 爆薬によって遅延装置が破壊されることはないか、2) 爆発が確実に遅延して起こっているか、の2点を確認することである。その結果は次のとおりで、大体満足すべきものであった。

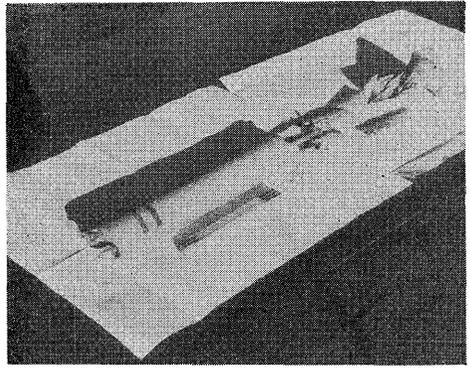
第2図は破壊テストである。孔底のダイナマイト



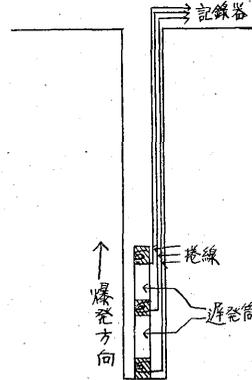
第2図 遅延装置破壊テスト

(2.25 kg) により、それに接続した遅発筒を作動させ、地上に回収した。遅発筒の遅延装置部分が破壊されずに作動していることが確認された(第3図)。さらに、爆発が確実に遅延して作動するかどうかを確認するために、第4図に示すような実験を行なった。すなわち、ダイナマイト1/2本(1.125 kg)を3コ遅延装置と交互に接続し、各ダイナマイトに捲線を行ない、一番下のダイナマイトを起爆して上方のダイナマイトの爆発によって捲線の切れる時刻を測定した。その記録を第5図に示

註1) デュボン社製の同様の装置は、全長5ft(1.52m)遅延時間は0.5~2.0m.sec(4種類)となっている。なお、らせん状に巻いた導爆線を使用する方法のあることは前述したが、Musgrave & others²⁾(1958)は、ほかに、爆薬自体の爆速を遅くしたもの(elongated charge)を使用してより好結果を得たと発表している。



第3図 回収された遅発筒

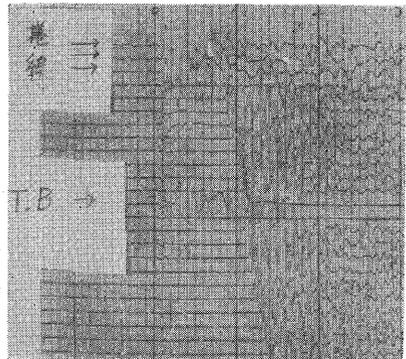


第4図 遅発作動テスト

す。この記録から明らかなように、各ダイナマイトは完全に爆発していること、また約1m.sec程度遅延して爆発していることが確認された(遅延時間の正確な測定は記録の時間目盛の精度上無理であった)。この実験は深度10mで2カ所、42mで1カ所(いずれも水でダンピングした状態)で行なった。

4. 遅延爆発法の基本的性質

遅延爆発は、いずれの方式にせよある長さの間に爆薬



第5図 遅発動作の記録
捲線の3 traceはT.B.より遅れて上から順に切れている。

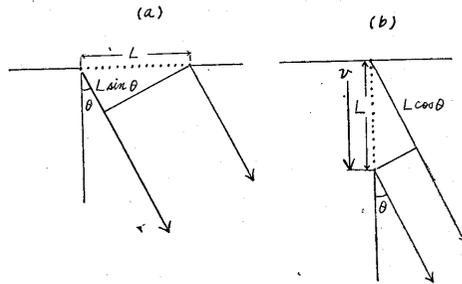
を配置して、適当な爆速をもって順次爆発させるものである。それに期待される効果は、分布した各爆薬から発生する弾性波について、重ね合せの原理が成り立つ場合と成り立たぬ場合とに大別して考えることができよう。重ね合せの原理が成り立たない場合については現在のところ簡単な考察をすることができない。重ね合せの原理が成り立つ場合には、弾性波の出力の時間的サンプリングによってその効果を考えることができる。その時間は、われわれの今回の実験のような不連続爆発の場合には、その遅延装置の作動時間に、また低爆速爆薬を使用する連続爆発の場合(この場合にはサンプリングという言葉は適当でないかも知れないが)にはその誘爆時間によることはいうまでもない。この時間的サンプリングから (1) 上下非対称の指向性による ghost reflection の消去、(2) 進行性表面波の削減、(3) 出力波形の変化、などの効果が期待されることになる。なおこのさい、最大効果をあげるべき適正薬量の問題が、爆発エネルギーの弾性波への変換過程と関連して考慮されるべきであろう。以下これらの効果の基本的性質について簡単に述べる。

4.1 指向性

弾性波の出力に方向性をもたせることは、遅延爆発に限らず、以前から多孔爆発 (Pattern shooting) において行なわれている。これらの指向性については White³⁾ (1958), Musgrave²⁾ らが詳しく述べている。遅延爆発による指向性が、多孔爆発のそれ(群設置の場合でも同じ)と異なる点は、通常遅延爆発が爆発孔内で垂直方向への遅延を行なっていることから(水平方向への遅延爆発の実験例は Shock Lorenz¹⁾ 参照) 上下方向に非対称でない指向性をもつことである。第6図は、出力波形として Ricker の wavelet を仮定し(見掛波長 L)、長さ L の

すなわち、直線形多孔爆発において、充分孔数が多くて連続的爆薬配置とみなしうる場合の各方向への出力波形を示したものであり、(b) は、垂直方向に配置した爆薬を、爆発孔壁の弾性波速度と等しい爆速で上から下へ遅延爆発させた場合の出力波形である。

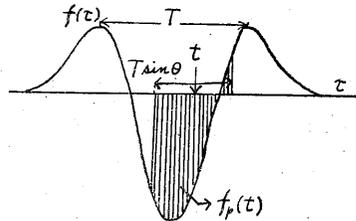
一般に原波形を $f(t)$ 、多孔爆発による出力波形を $f_p(t)$ 、遅延爆発のそれを $f_d(t)$ とすれば、各波形の中心を $t=0$ としたとき、 $f_p(t)$ は第7図 (a) からわかる



(a) 多孔爆発による位相差 $\tau = L/v \sin \theta$
 (b) 遅延爆発による位相差 $\tau = L/v(1 - \cos \theta)$

第7図

ように、 $f(\tau)$ を $\tau=t$ を中心として $L/v \sin \theta$ の範囲で τ についての平均値をとったものにほかならないから(第8図)、



第8図 多孔爆発による出力波形
 縦線部分の平均値が出力 $f_p(t)$ となる

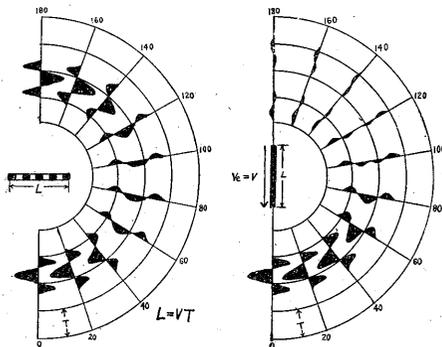
$$f_p(t) = \frac{1}{L/v \sin \theta} \int_{t-L/v \sin \theta}^{t+L/v \sin \theta} f(\tau) d\tau$$

一方、 $f_d(t)$ は第7図 (b) のような $L/v \cos \theta$ の時間差に遅延時間 L/v_e が加わるから、第6図のように $v=v_e$ の場合には、

$$f_d(t) = \frac{1}{L/v(1 - \cos \theta)} \int_{t-L/v(1 - \cos \theta)}^{t+L/v(1 - \cos \theta)} f(\tau) d\tau$$

と表現することができる。

上2式を比較すると $f_p(t)$ の $\sin \theta$ が $f_d(t)$ の $1 - \cos \theta$ に対応しており、前者は $\theta=90^\circ$ に対し対称、すなわち上方への出力と下方への出力が等しいのに対し、後者は θ の $0 \sim 180^\circ$ の変化に対して単調に変わっていて、明らかに上方への出力は下方への出力に比較し、はるかに小さい。Ricker の wavelet を $f(t)$ としてとれば、簡単な式として $f_p(t)$ 、 $f_d(t)$ を表現することはできないが、いま L が wavelet の見掛波長に等しい場合

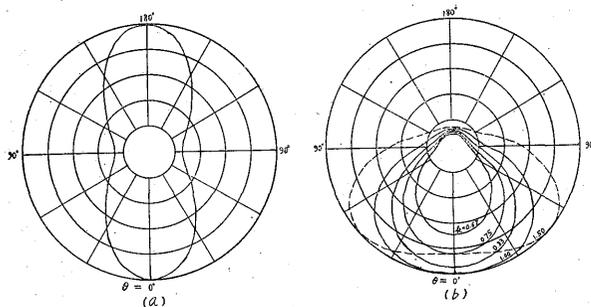


(a) 多孔爆発による各方向出力波形
 (b) 遅延爆発による各方向出力波形

第6図

間に配置された爆薬による波形の方向性を示したものである。(a) は、水平方向に配置された爆薬の同時爆発、

のおのおのの最大振幅を方向 θ の函数として図示すれば第9図のようになる。(a)は $f_p(t)$ の、(b)は $f_d(t)$ のそれぞれ最大振幅である。



第9図 各方向出力波形の最大振幅分布
(a) 多孔爆発
(b) 遅延爆発 $k=v_e/v$

遅延爆発による指向性の特徴は第9図(b)によく表現されている。 k は図に記したように爆速と孔壁速度との比であり、 $k=1$ で示したグラフが前述の $f_d(t)$ にあたるものである。これで見ると、 $k < 1$ すなわち爆速を孔壁速度よりさらに遅くした場合により鋭い指向性を得ることがわかり、事実 $k=4/5$ の場合の効果について Musgrave ら²⁾が実験例とともに述べている。 k を1より小さくすることは一般に overdelay と呼ばれ、後述するわれわれの実験例もこの場合に当たるものが多い。なお逆に $k > 1$ すなわち遅延爆発の爆速を孔壁速度より速めた場合には、直下方への出力は overdelay の場合と同様であるが、指向性としては複雑、かつ悪くなる。一例として $k=1.5$ の場合を点線で附記する。

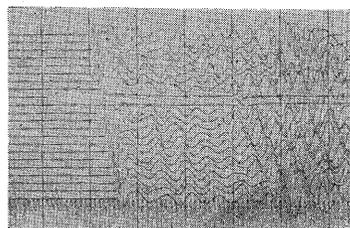
こうした形の指向性が示す効果として、(1) ghost reflection の消去、(2) 水平方向の諸種雑振動の削減、が考えられる。(2)については、たとえば Musgrave ら²⁾は、初動(水平方向出力)と反射波(垂直方向出力)の振幅比が遅延爆発によって約1/7に減少した実験例を示している。興味ある結果ではあるが、実際の記録時の種々の条件を考えると(1)の方がより重要な意味をもつであろう。ghost reflection、すなわち地表面またはごくそれに近い不連続面で一度反射した波がふたたび深部反射面を往復して記録される波形は、実際の記録から反射波を読み取るさいにしばしば障害となることはよく知られている。ghost reflection の存在は、同一孔で種々深度を変えて爆発させ、対応する反射波およびそれらしきものの到達時を比較することにより判定できる。前述の論文は、深度3mから60mに至る18回の爆発を行なって、記録上有力な反射波とみられるもののなかに ghost reflection が数多くあることを指摘している。また通常の遅延爆発とは逆に、下から上へ遅延爆発を行な

ったさいの記録は、反射波としてほとんど ghost reflection のみを表現し、その結果、通常の遅延爆発(もちろん ghost reflection はほとんどみられない)による記録を、位相反転して up hole time の約2倍ずらせたものと非常に一致を示す例も述べられている。

ghost reflection の出現状況は、爆発点付近の浅層の地層構造に大きく支配されることはもちろんである。今回のわれわれの実験では深度変化の爆発を数カ所で行なったがいずれも ghost reflection とみられる phase はなかったので吟味することができなかった。

4.2 表面波のサンプリング

種々の型の表面波に対し、時間的サンプリングによりその振幅を減少させる効果は、本質的には水平方向への指向性の表現と同じことであるが、経験的に、記録に現われる表面波は爆破震源の出力波と異なった形のものであることが多く、われわれの今回の実験では大体数週期にわたるほぼ正弦波形の表面波が卓越しているのがみられる(第10図)ので、一応前述の指向性とは別項目として考察する。



第10図 表面波の記録

表面波の出現状況は爆発深度により左右され、一般に爆発深度が深くなるにつれて振幅は減少する。その各位相の受振点への到達時刻については、たとえば半無限弾性体の表面を伝わる rayleigh 波では爆発深度によらず一定であることが知られている。また love 波では、Satō⁴⁾(1952)によれば、層内に震源がある時はその深度により到達時刻が異なる。遅延爆発では通常全装薬長はかなり長くなるので、各爆薬の深度の違いによる表面波の振幅の差があると思われるが、その差が小であるならば、爆発深度によって intercept time の異なる表面波に対しては、爆発時刻の差による時間的サンプリングによって遅延爆発の効果を表現することができる。

この場合、部分的ながら正弦波形と仮定すれば、原波形を $A \sin \omega t$ 、全遅延時間を td として、遅延爆発により出力波形は

$$Z(t) = \frac{1}{td} \int_{t-td}^t A \sin \omega \tau d\tau$$

となるわけで、

$$\begin{aligned}
 Z(t) &= \frac{1}{\omega t d} \{ \cos \omega(t - td) - \cos \omega t \} \\
 &= \frac{A \sqrt{2(1 - \cos \omega t d)}}{\omega t d} \sin(\omega t - \theta) \\
 \theta &= \tan^{-1} \frac{1 - \cos \omega t d}{\sin \omega t d} \\
 &= A \sin(\omega t - \theta) \left\{ 1 - \frac{(\omega t d)^2}{12} + \frac{(\omega t d)^4}{360} \dots \right\}^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}
 \tag{a}$$

これによれば、 $\omega t d$ が小、すなわち表面波の週期に較べて遅延時間が短い場合には、振幅の減少分は大体 $(\omega t d)^2$ に比例すると考えられる。

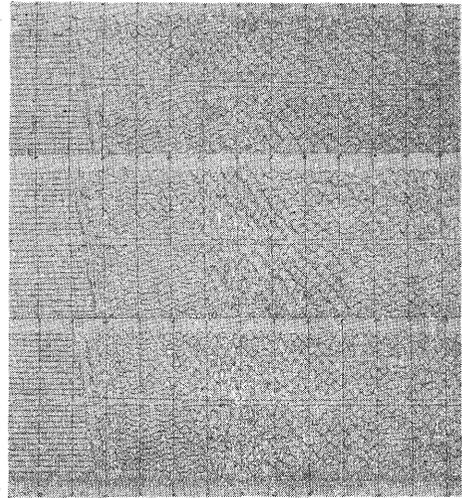
われわれの実験のように不連続な爆発による遅延の場合には、多孔爆発・群設置等のサンプリングフィルターの特性函数と全く同じもので考えることができる。すなわち、爆発個数 M 、隣接爆薬間の遅延時間を Δt とし

$$\begin{aligned}
 \text{特性函数 } K(\omega) &= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \sin \omega k \Delta t \\
 &= \frac{1}{M} \frac{\sin(M\omega \Delta t/2)}{\sin(\omega \Delta t/2)} \\
 &= 1 - \frac{(M\omega \Delta t)^2}{24} + \dots
 \end{aligned}$$

前述の連続の場合と、 $td = (M-1)\Delta t$ に対応することを考えて同じ結果を得る。すなわち、振幅は遅延時間が週期に比較し小さい場合には $(\omega t d)^2/24$ の割合で減ってゆくことになる。遅延時間が大、または表面波の週期が小さい場合には、正確な特性曲線によって減少率を求めなければならない。

表面波に対するわれわれの遅延爆発の実験は 2カ所で行なわれた。いずれも、深度による表面波またはその他の位相の出現状況の変化をみるために、爆発深度を変えての単一爆発の記録をともにとっている。

S. P. 7 での遅延爆発による記録を第 11 図 (a) に示す。(b) (c) には同一地点での深度 25 m, 39 m の単一爆発による記録を比較のために掲げた。(a) と (b), (c) とは観測器の記録条件が若干異なるため一概には判断し兼ねるが、0.4 sec から 0.8 sec の範囲に現われるおもな表面波は、明らかに (a) において最も小さい。(a) の遅延爆発に使用した遅延装置は 10 コ、爆薬は薬長 50 cm のもの (ダイナマイト 1.125 kg) を 11 本、総薬長は 15.5 m である。したがって、 $\Delta t = 1.2 \text{ m. sec}$ であるから、ダイナマイトの爆速を 6,000 m/sec とし $td = 12.8 \text{ m. sec}$ となる。第 11 図に現われているおもな表面波は Rayleigh 型のものではないと考えられるが、約 5 m ごとの深度変化の爆発による記録に現われた結果では、対応する多くの位相について到達時刻は同じとみなされる (後日報告の予定あり) ので、前述のサンプリ



第 11 図 遅延爆発による表面波の減衰
(a) 遅延爆発, 深度 25~41 m
(b) 単一爆発, 深度 39 m
(c) " , 深度 25 m

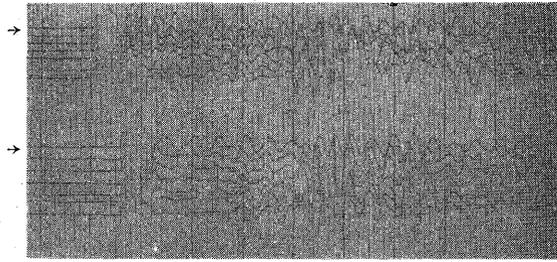
ングが成立しているものと考えられる。対応する特性曲線を見てみると、30 c/sec の表面波に対し振幅は約 75%、50 c/sec に対し約 35% に減少することが予想される。もっとも、第 11 図の記録からは、記録条件から、定量的な判断はできない。

遅延爆発による位相の遅れは前式の θ で表わされるわけであるが、

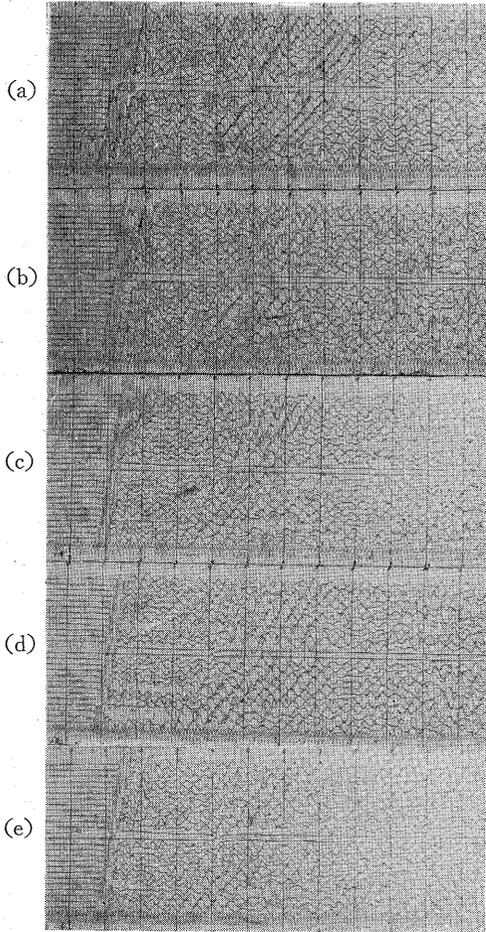
$$\begin{aligned}
 \tan \theta &= \frac{1 - \cos \omega t d}{\sin \omega t d} \\
 &= \left(\frac{1}{2!} (\omega t d)^2 - \frac{1}{4!} (\omega t d)^4 + \dots \right) \\
 &\quad \left(\omega t d - \frac{(\omega t d)^3}{3!} + \dots \right)^{-1} \\
 &= \omega \frac{td}{2} + \frac{\omega^3 td^3}{24} - \dots
 \end{aligned}$$

であるから、位相の遅れを時間で表わして $\tau = \theta/\omega$ を考えれば、 θ の小さい範囲では $\tau = td/2$ 、すなわち総遅延時間の半分の遅れを生じると期待される。これは直感的にも容易に理解されることである。われわれの S. P. 7 での深度変化の記録のなかから、特定の trace を拾って並べたものが第 12 図である。遅延爆発による記録の対応する位相が他に比較し 6~8 m. sec 程度遅れてみられることは、当然とはいいながら、 $td/2 = 6.4 \text{ m. sec}$ を考えて興味深い。

他の爆発点、S. P. 8 で得られた記録を第 13 図に示す。(a) は遅延爆発による記録で、遅延装置は S. P. 7 の場合と同じである。(b), (c), (d), (e) は同所で行なった爆発深度変化の記録のうち深度 41 m, 35 m, 30 m, 25 m の記録である。すなわち、遅延爆発の装置深度が



第12図 遅延爆発による記録上の位相の遅れ
矢印の trace が遅延爆発, 他は単一爆発



第13図 表面波の減少しない例
(a) 遅延爆発, 深度 25~41m
(b) 単一爆発, 深度 41m
(c) " , 深度 35m
(d) " , 深度 30m
(e) " , 深度 25m

(b) から (e) までの各記録の爆発深度にわたっているわけである。これで見ると、先に S. P. 7 で行なった遅延爆発では発生表面波の減少をみたのに対し、(a) では、(b) から (e) までにみられる表面波を合せて表現している傾向がうかがえる。S. P. 8 においては、深度

による表面波の出現状況が大きく変わっていて、単に振幅の変化だけでなく、発生するおもな表面波群が異なる種類 (到達時刻・位相速度) のものに移り変わって行くのがみられる。(こゝに挙げたほか、20m 以浅の深度での記録を比較するとこれはより明瞭にわかる) すなわち、(a) の記録は、爆発深度 25m から 41m に至る間の発生表面波を網羅したものと考えられ、こゝでは、時間的サンプリングによる振幅の減少などを考える以前の問題として、各深度の単一爆発記録ではランダムノイズとなる部分が、他の深度で発生した表面波に打ち消されて、全体として広範囲に表面波を記録していると考えられる。なおこれら各種の表面波が、浅所の速度層中にその発生原因をもつとすれば、対応する位相の到達時刻が爆発深度によって変わるの当然である。深度変化の記録からは、変わっていると確認はできなかったが、S. P. 7 におけるほどの到達時刻の一致はみられない。

2カ所の実験記録から考えるに、遅延爆発を進行性表面波を減少させるために用いるには、遅延時間を表面波の週期と同程度にまで長くとることが必要で (今回のわれわれの実験では無理) かつ、その装薬深度内での各爆発による表面波の種類の違いに留意しないと、マイナスの結果に終わることも考えられる。

4.3 出力波形の変化

遅延爆発により、wavelet の波形がどう変わるかを考える。第6図 (b) は、White の原論文³⁾ には “Waveforms due to matched powder string” として掲げられているものである。matched というのは爆速が孔壁の弾性波速度に等しいことで、上端の爆薬による波が到達した時刻に、各爆薬がいわゆる in phase で次々に爆発してゆくのであるから、直下方 ($\theta=0^\circ$) への出力波形は、重ね合せの原理が成り立つと仮定する限り、単一爆発の波形と変わらない (振幅の変化については考えることを後述する)。しかし、他の方向への波形は図にみられるとおり θ が大きくなるにつれて次第に崩れ、見掛波長が長くなるとともに振幅が減少してゆき、遂には2つに分離した波となってしまうが、この間の事情は指向性の項に述べたとおりである。見方を変えれば、爆速の θ 方向への成分が $v_e \cos \theta$ になっているので、 $\theta=0$ 以外では媒質に対し overdelay になっている。この overdelay を垂直下方にも積極的に利用してさらに指向性を強めたものが第5図 (b) に示されていたわけであるが、振幅としての指向性が鋭くなるだけでなく、波形が broad になることにより、媒質中の透過力が増大することが期待される。

初動の波形を色々変えることによって地層への透過力

を増大せしめたり、また不規則に変化している速度分布をもつ地層のそれぞれの境界からの反射波の合成波形を単純な形にしようとする試みは、最近 velocity logger の記録から反射記録を人工的に合成する方法と関係して盛んに行なわれている。しかしどのような初動波形が複雑な地下の速度分布に対して反射波の検出に有効であるかということについて未解決の問題が多い。また、遅延爆発によってどの程度初動の波形を control できるものかどうかということについては、単に重ね合せによるサンプリングとしての波形合成の問題でなく、遅延爆発の各爆発が順次行なわれてゆく過程に深く関係するものと考えられるので、今後の研究にまちたいと思う。

不連続爆発の場合のサンプリングとしては、前述のとおり、爆薬個数 M 、間隔 l 、媒質速度 v 、爆速 v_e として、出力波形は

$$f_d(t) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} f\left(t - \frac{nl}{v_e} + \frac{nl \cos \theta}{v}\right) \\ = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} f\left\{t - n \frac{l}{v} \left(\frac{1}{k} - \cos \theta\right)\right\} : k = \frac{v_e}{v}$$

となり、サンプリング時間間隔が $l/v(1/k - \cos \theta)$ に対応していることに留意して、group, pattern などに対する計算、たとえば金子⁵⁾ (1959) の計算例を使える。一例として、第 6 図と同じ波長間の爆薬配置で $k=2/3$ の overdelay を行なった場合には、約 20% の波長ののびがあるはずである。もっともこの程度の波形変化では、実験の観測にあたっては、とくに反射波の変形として認められるには至らないであろう。

以上の各項目を通じて、いずれも振幅の重ね合せで波形の変化、減衰などを考えたが、爆薬のエネルギーが弾性波に移り変わる過程を考えるとこれには問題がある。最も単純に、出力波のエネルギーが爆薬量に完全に比例すると考えれば振幅は爆薬量の平方根に比例する。いま一定量の爆薬を M コに分散して matching delay ($k=1$) を行なったとすれば、出力波の振幅は \sqrt{M} に比例して増大し、連続爆発の場合には ∞ になってしまう。Shock Lorenz¹⁾ は、前述のように最大効果をあげるための適正薬量について興味ある実験を行なっているが彼によれば

$$\text{効果} = \frac{(\text{出力波振幅})^2}{\text{薬量}}$$

と考えたとき、震源の媒質により、効果を最大ならしめる薬量がおのおの存在するという。そして薬量をとくに小さくした場合は上式の効果は 0 に近づらしく、これは上述の考えの矛盾を解くためには当然考えられなくてはならないことである。一方、最近の数種の実験では、振幅は爆薬 1~10² kg 位の範囲にわたって薬量に直接比例すると結果が得られており、名和⁶⁾ (1959) によれば、震源の空洞容積が振幅に及ぼす影響を考えると、この結果は理論に矛盾しない。これが大体成り立つとするならば、分散爆薬の総合効果は振幅の重ね合せのまま比較しうることになる。しかしエネルギーとの関係、とくに爆薬のエネルギーが弾性波となる効率についてははっきりとはわかっていない。このように弾性波の振幅 A と薬量 W の関係について $A \propto W^n$ と考えたとき、 n が 1 となるか 0.5 となるかの結論はでていないが、もし $n < 1$ の場合には、遅延爆発で適切な分布薬量をえらぶことによってエネルギーの変換効率をあげることが可能であろう。このことは、火薬の経費が地震探鉱の費用のなかでかなり大きな割合をしめているので、費用の減少という観点から注目されてもよいと思われる。これらはさらに今後研究さるべきことと思われるが、そのさい遅延爆発において、隣接爆薬による衝撃波の範囲内で次々と爆発を起こして行く可能性を考えると、はたして通常の爆発と同様なエネルギーの変換過程をとるかどうかを考慮しなくてはならないであろう。

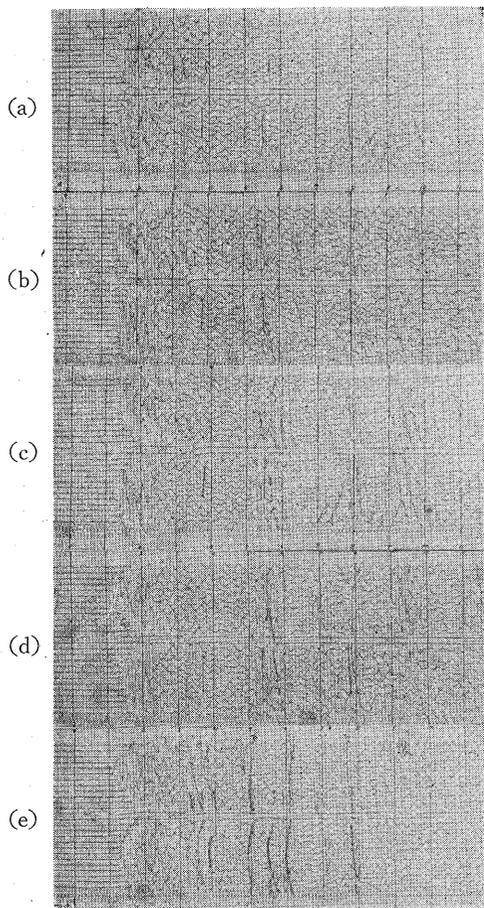
5. 反射波の検出に対する遅延爆発の効果

遅延爆発によって発生する波について、またその基本的性質について究明すべき点は前節で述べたように数多く残っているが、遅延爆発が反射波の検出に対してどんな効果をもつかどうかがいま一番関心があるので、その実験を行なった。遅延装薬の長さ、爆速、深度によって $S-N$ に対する効果が異なると考えられるので、可能な範囲でそれらを変えて実験した。得られた反射波の記録は、データとして充分なものではないが、できる範囲で結果を検討してみることにする。

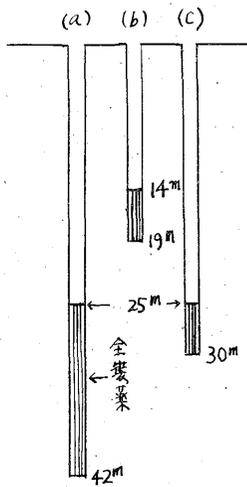
5.1 薬長および深度による $S-N$ 比の変化

第 14 図はいずれも同一地点 (S. P. 13) で得られた記録で、展開はオフセット L -spread 9 コ grouping で受振点間隔は 30 m である。

(a) (b) (c) はいずれも遅延爆発による記録であり、おのおのの深度、薬長は第 15 図のとおりである。みられるとおり、いずれも反射波を検出しがたい記録であるが、遅延爆発によるものなかでは (b) が最もよく反射波を捉えており、(c) (a) は (c) がやゝ勝る程度でいずれも適確な記録とはいえない。各記録の爆発条件は説明に示したとおりで、(a) は前述の S. P. 7, S. P. 8 における表面波の場合と同じ条件で、遅延時間も長く、最も本格的な遅延爆発であるにもかかわらず、単一爆発の場合に比較しさせた $S-N$ 比の向上はみられない。(b) (c) はともに遅延装置 3 コを使用し、全長 5 m の装薬による遅延爆発で遅延時間も (a) の 1/3 の小規模なものであるが、浅所での爆発による (b) が最もよい



第 14 図 薬長および深度による S-N 比の変化
 (a), (b), (c) 遅延爆発 (第 15 図参照)
 (d) 単一爆発, 深度 15 m
 (e) 多孔爆発, 深度 24 m 9 孔



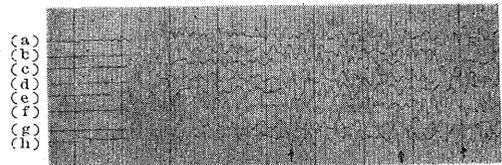
第 15 図

S-N 比を示している。一方, (b) を同深度での単一爆発 (d) と比較するとやはり S-N 比は優れており, 遅延爆発としての効果は一応認められる。すなわち実際に遅延爆発を行なうにあたっては, 装薬を大にして遅延時間を大にするよりも, 爆発深度の適当な選定が大きく影響する一例と考えられる。いまこの爆発点での up hole time による垂直速度分布を概算すると第 1 表のとおりで, 深度 14 m より下ではとくに速度の差異は認められ

第 1 表

深 度 (m)	U. H. Time (m.sec)	区間速度 (km/sec)
0.0	0.0	—
13.6	29.5	0.5
19.0	32.6	1.7
23.3	34.7	2.0
28.5	38.4	1.4
34.0	41.6	1.8
41.0	45.7	1.6

ない。爆速は 1.18 km/sec と計算されるので平均的にみて $k=0.75$ 程度の overdelay になっている。しかし (a), (b), (c) の各装薬深度での孔壁速度にとくに差異が認められないことからして, (b) の S-N 比が最良であることは速度比とは無関係で, 各深度での爆発機構の差でも考えなくては説明がつかない。なお, こゝでの 14 m から 42 m に及んで深度を変えた単一爆発による記録は, 後日 compositing のテストを行なう予定であるが, これらの記録と遅延爆発による記録とから特定の trace を再現して並べたものが第 16 図である。図中の



第 16 図 深度変化および遅延爆発による反射波の位相の変化
 (a)~(f) 単一爆発, 深度は順に 41 m, 35 m, 30 m,
 25 m, 20 m, 15 m
 (g) 遅延爆発, 深度 25~42 m, 遅発筒 10 本
 (h) " , 深度 14~19 m, 遅発筒 3 本

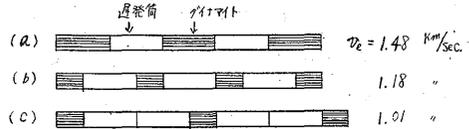
矢印は反射波およびそれらしき位相に当る時刻を, 多孔爆発による記録第 14 図 (e) から摘出して示したものであるが, この図上で明瞭に反射波として認められるものは $t=0.45$ sec 付近に現われている位相だけである (この位相も単独では判然とした line-up をなしていない記録が多い)。前述のように目立った波形の変化はみられない。深度変化による位相の遅れは up hole time を逆にしたのと一致しているのは当然であるが, 遅延爆

発によるものも、その上端の爆薬の深度に相当する遅れを示して遅延動作 (overdelay である) を立証している。

(e) に示した9孔の多孔爆発による記録はこの爆発点での S-N 最良とみられる記録である、結論として、ここでは、遅延爆発はその爆発深度によっては単一爆発に比較し反射波の検出にかなり有効であるが、多孔爆発には及ばなかったと判断できる。

5.2 爆速の変化による S-N 比の変化

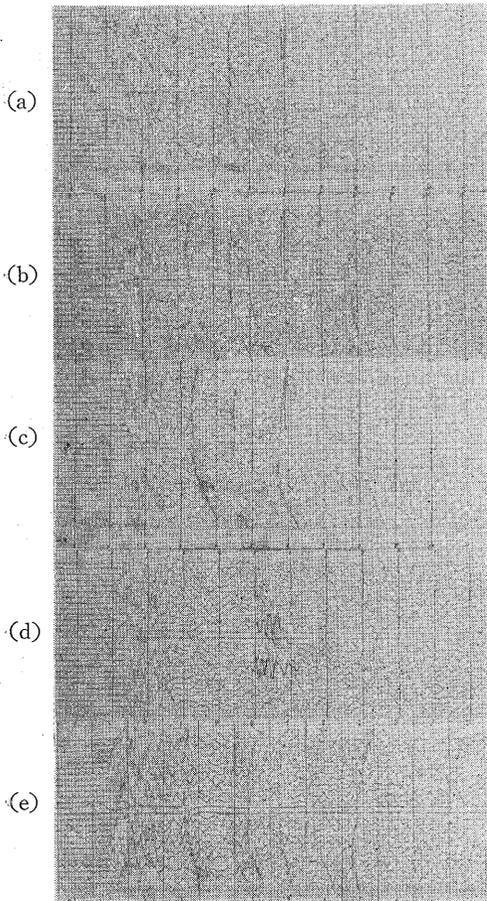
他の爆発点 (S. P. 14) では、遅延爆薬の薬長 (5m)、爆発深度 (20~25 m) を等しくして爆速を可能な範囲で変えた実験を行なった。第 17 図はそれによる記録であり、観測条件は S. P. 13 と同じである。第 17 図 (a), (b), (c) の記録に使用した遅延爆薬の構成は第 18 図のとおりで、ダイナマイト量を調節し、あるいは遅延装置を連結することによってこの程度に爆速を変化させることができる。反射波の検出の立場からみれば (c) が3つのなかではすぐれており (b), (a) の順に悪くなって、



第 18 図

爆速の遅いほどよい結果を示している。こゝでの孔壁速度は測定しえなかったが、前述の S. P. 13 と隣接した地点であるので爆発点の浅層構造も大体同じと考えられ、少なくとも (a) の爆速が孔壁速度よりとくに大きくずれているとは考えられないので、(b), (c) はいずれも相当 overdelay の状態になっていると考えられる。すなわちかなり大幅な overdelay を行なった方がよい結果を得ると一応結論されるが、これも単なる時間的サンプリングによるのみでなく、薬量および爆薬間隔の違いによる爆発機構の違いが影響しているのではないかと推測される。

(d) は同地点での単一爆発、(e) は同じく4孔の多孔爆発による記録である。比較してみると、遅延爆発の記録 (c) は多孔爆発によるものと同程度の S-N 比の向上がみられる。前述の S. P. 13 では多孔爆発による記録に及ばなかったが、こゝでこれに匹敵する効果を見たことは、今後変えうる各種の要素を適当にコントロールすることによって S-N 比をより向上させる可能性を期待させる。また遅延爆発と多孔爆発とを組合せることによって一層の効果も期待できると思われる。われわれの実験でも多孔爆発と組合せた実験を2回 (3孔および4孔) 行なったが、実験した地点が丁度断層帯の中であったため多孔爆発、遅延爆発ともに記録悪くその効果につき検討することができなかった。なお、第 17 図 (a)~(d) の4記録から特定の trace を再現して並べたものが第 19 図である。位相の対応がかなりよく認められる



第 17 図 爆速による S-N 比の変化
(a), (b), (c) 遅延爆発 (第 18 図参照)
(d) 単一爆発, 深度 25 m
(e) 多孔爆発, 深度 24 m 4 孔



第 19 図 遅延爆発による位相の遅れ
(a), (b), (c) とも上から 3 trace が遅延爆発

部分について、遅延爆発によるものは単一爆発に比較し 10~15 ms もの遅れがみられることは注目すべきであろう。この原因はよくわからない。

6. 結 言

遅延爆発に対する今回の考察, 実験の結果は次のように要約される。

(1) 遅延爆発により, ghost reflection および水平方向雑振動を消すために有効な指向性を得ることができるが, これはある程度の overdelay を行なった時が最も有効である。

(2) 進行性の表面波を減少させる目的には遅延爆発法は効果は少ないように思われる。低周波の表面波を充分減少させるためには遅延時間を長くとりねばならず, 実際的には難しい。また爆発深度によって発生する表面波が異なる場合には, すべての表面波を優勢ならしめるおそれがある。

(3) overdelay によって出力波形の周期はのびるが, 反射波に対する効果は今回の実験でははっきりわからなかった。

(4) 爆薬のエネルギーの弾性波への転換という観点からみると, 遅延爆発は適切な分布薬量をえらぶことによって転換効率を上げるのに役立つであろう。

(5) 遅延爆発は同一薬量の単一爆発に較べてかなり $S-N$ 比の向上に役立っている。今回の実験では爆発深度は浅く, 爆速は遅いほどよく, また薬長はあまり長く

ない方が効果的であることがわかった。

(昭和 35 年 10 月稿)

文 献

- 1) Shock Lorenz: The progressive detonation of multiple charges in a single seismic shot, Geophysics, Vol. 15, No. 2, 1950
- 2) Musgrave, A. W., Ehlert, G. W. & Nash, D. M. Jr.: Directivity effect of elongated charges, Geophysics, Vol. 23, No. 1, 1958
- 3) White, J. E.: Transient behaviour of patterns, Geophysics, Vol. 23, No. 1, 1958
- 4) Satō, Y.: Travel time of Love waves, Bull. Earthquake Research Inst., Vol. 30, 1952
- 5) 金子徹一: 地震探鉱における群設置法と多孔爆発法の研究, 地質調査所報告, No. 182, 1959
- 6) 名和小太郎: 爆破震源の諸問題, 石油資源技研特報, 1959