

オフセットL型展開による連続断面法

(連続的に走向・傾斜を統御する1方法)

— 深部物理探査研究 第8報 —

南雲 昭三郎* 鎌田 清吉* 川島 威*

A New Method of Continuous Profiling with Off-set L-Spread

by

Shōzaburō Nagumo, Seikichi Kamata & Takeshi Kawashima

Abstract

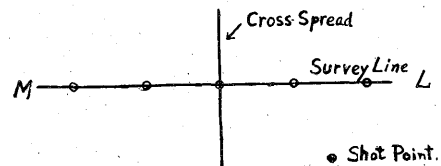
A new spread system in seismic reflection survey, the chain of off-set L-spread as shown in fig. 2, is presented. This spread system gives us both continuous profile and continuous strike-dip control. The computation procedures are given in chapter 3. An example of field test is illustrated in chapter 4.

要 旨

従来連続断面法と等しい作業量で、スプリット展開による連続断面と、走向・傾斜統御とを同時に求める方法として、オフセットL型展開による連続断面法を試みた。新しい方法による計算法を第3章に示した。実際の構造調査の現場で実験を行なった結果、この方式によって意図した結果が一応は得られることがわかった。一方 Poor な反射に対する走向・傾斜統御としてはまだ充分なものでなく、今後さらに考究する必要が認められた。

1. 緒 言

反射面の走向・傾斜の統御は反射法によって地下構造を正確に求める際、非常に大切な統御の1つである。Dix の教科書(1952)に繰り返して述べてあるように、反射面の走向・傾斜の情報は、1つの測線で求められる二次元的な断面図から垂直断面図を考える場合、また1つの断面図に表現されている反射面が、幾つの断面の重ね合わせによってできているものかを考慮する場合、また網目状に測定した測線から地下構造等高線図を求める場合等々に、重要な役割を占めるものである。従来行なわれている走向・傾斜の統御は、第1図に示すように、測線に直交したいわゆるクロス展開によって行なわれている。この方法では、通常爆発点が交差点になるために、また測線 (line) 上展開と別の爆破を行なうことなどのために、ライン展開とクロス展開の2枚の記録において、反



第1図 通常クロス展開の配置

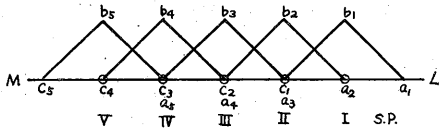
射波の位相を対応させることが実際的にはいろいろの問題を含んでいる。ことに反射波の質が悪い (Poor) 時には反射波の位相を対応できない場合が少なくない。また爆発を特別に行なうために、クロス展開は調査面積をかせぐ時にはかなり重荷になる作業である。このように、従来行なわれている方法に不満足な点が多いので、走向・傾斜の統御をもっと能率よくまた精度よく行なう方法について最近いろいろと議論がなされてきている註1)。今回機会を得たので、オフセットL型展開を各爆発点ごとに行ない、連続的に走向・傾斜を測定し、同時に連続断面も得ようとする新しい展開方式の試験を行なった。実験地は秋田県申川南方地区であり、野外作業には筆者らのほか、金子徹一・平沢清・本荘静光・古谷重政が参加した。この実験は石油資源開発 K.K. 申川南方地震探鉱作業場の方々に非常な協力を得て行なわれたものであり、ここに厚く謝意を表する。

註1) 例えば兵頭盛也・亀谷卓也：地震探鉱調査法反射法，物理探鉱10周年記念号，Vol. 11, No. 4, p. 100~101, 1958

* 物理探査部

2. L型展開の配置

今回実験を行なったL型展開の配置の原理図は第2図に示すとおりである。観測しようとする測線をLMとする。爆発点(I, II, III, ……)を、通常のスプリット展開による連続断面法と等しく、等間隔に設ける。L型展開の配置は、爆発点に対してオフセットにL型 a_i, b_i, c_i ととり、 b_i で直角になるようにとる。そして、この展開を各爆発点ごとにとってゆく。この展開方式によって、各爆発点ごとに走向・傾斜統御が得られ、また展開の両端の時刻差 (step-out time) ΔT から通常のスプリット展開に対応する連続断面が求められる。すなわち、オフセットL型展開を爆発点ごとにとってゆく方式は、スプリット展開による連続断面法と等しい作業量でもって、連続断面と走向・傾斜を同時に得ようと意図するものである。



第2図 オフセットL型展開による連続断面法の展開配置図 (爆発点Iに対してオフセットL型展開を a_1, b_1, c_1 にとる)

3. 計算法

上記のL型展開によって得られた記録から (1) 通常のスプリット展開に対応する傾斜素片, (2) 反射波の到来方向, (3) 反射面の走向・傾斜等が計算されることを説明する。

3.1 スプリット展開に対応する傾斜素片の計算

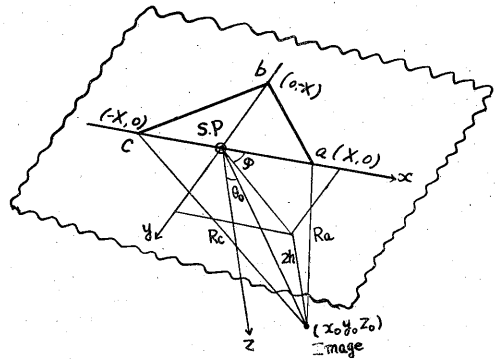
オフセットL型展開の両端 a, c (第2図参照) はスプリット展開の両端に対応するから、 a, c における反射波の到達時刻差 ΔT はスプリット展開で観測されるであろう ΔT と等しい。爆発点における反射時間 (normal time) T_0 はオフセットL型展開では観測されていないので、正確には求められない。しかし、地下の速度分布が一定であれば、展開の両端 a, c における反射時間を T_a, T_c とし、爆発点と a までの距離を X とし、地下の速度を V とすると、爆発点における反射時間 T_0 は、

$$T_0 = \frac{\sqrt{T_a^2 + T_c^2 - 2(X/V)^2}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

で与えられる。したがって地下の速度分布が一定でない場合には、例えば V として平均速度 $\bar{V}(z)$ をとるなど、適当に V を定めて (1) 式によって近似的に求めなければならない。

(1) 式の証明

爆発点を原点として直角座標 (x, y, z) , 極座標 $(r,$



第3図

θ, φ を第3図のようにとる。ある反射面に対する爆発点の像の座標を $(x_0, y_0, z_0), (2h, \theta_0, \varphi_0)$ とする。直角座標と極座標との変換関係から、

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= 2h \cos \theta_0 \\ y_0 &= 2h \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \\ x_0 &= 2h \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

受振点 $(x, y, 0)$ と像爆発点 (x_0, y_0, z_0) との距離を R とすると、

$$R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \quad (3)$$

像爆発点から展開の両端 a, c , 爆発点までの距離をそれぞれ R_a, R_c, R_0 とし、爆発点と a との距離を X とすると、(2), (3) から

$$\left. \begin{aligned} R_a^2 &= (+X - 2h \sin \theta_0 \cos \varphi_0)^2 \\ &\quad + (2h \sin \theta_0 \sin \varphi_0)^2 + (2h \cos \theta_0)^2 \\ R_c^2 &= (-X - 2h \sin \theta_0 \cos \varphi_0)^2 \\ &\quad + (2h \sin \theta_0 \sin \varphi_0)^2 + (2h \cos \theta_0)^2 \\ R_0^2 &= (2h \sin \theta_0 \cos \varphi_0)^2 \\ &\quad + (2h \sin \theta_0 \sin \varphi_0)^2 + (2h \cos \theta_0)^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ゆえに

$$\begin{aligned} R_a^2 + R_c^2 &= 2R_0^2 + 2X^2 \\ \therefore R_0 &= \frac{\sqrt{R_a^2 + R_c^2 - 2X^2}}{\sqrt{2}} \quad (5) \end{aligned}$$

反射時間に直すと

$$T_a = R_a/V, T_c = R_c/V, T_0 = R_0/V$$

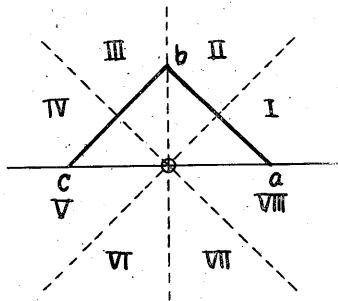
から

$$T_0 = \frac{\sqrt{T_a^2 + T_c^2 - 2(X/V)^2}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

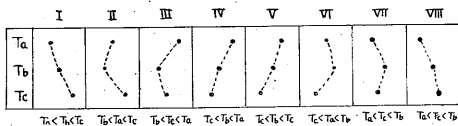
となる。(証明終り)

3.2 反射波の到来方向

オフセットL型展開 abc (第4図参照) で得られた記録における反射波の line up はスプリット展開 asc で得られる記録上のそれとかなり趣きを異にする。反射



第4図



第5図 像爆発点のある象限と記録上の反射時間 T_a, T_b, T_c との関係

波の到来方向によって、すなわち爆発点の反射面に対する像爆発点の位置によって、展開 ab, bc において記録される反射波 line up の傾斜曲率が異なってくる。反射波の到来方向を第4図に示すように8つの象限に分けて考えると、それぞれの到来方向に対して、展開の端 a, b, c それぞれにおける反射時間 T_a, T_b, T_c に大小関係がある。反射波の到来方向と T_a, T_b, T_c の大小関係を模式的に表現したものが第5図である。展開の中央 b 点における反射時間 T_b が最小(最も早く到来する)の場合は反射波はIIIII象限から到来している。さらに、展開の両端における反射時間 T_a, T_c の大小によって到来方向がII象限にあるかIII象限にあるか判別される。同様に T_b が最大の場合には、到来方向はVI VII象限のいずれかにあり、 $T_a > T_c$ の時はVI象限に、 $T_a < T_c$ の時はVII象にあることになる。 T_a が最小の場合は I, VIIIの象限にある。この場合I, VIIIのいずれかにあるかは記録のうえからでは判別し難い。同様に T_c が最小の場合はIV, Vの象限にある。このように記録上において T_a, T_b, T_c の大小関係によって反射波の到来方向を大略推定できるわけである。

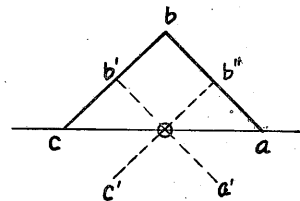
1枚の記録上で反射波の到来方向、したがって反射面の走向を、このように大略推定できるということは、スプリット展開でももちろん望むべくもなく、また従来のクロス展開による走向・傾斜の統御で、2枚の記録を並べて走向の大略の見当をつけるのに較べると、はるかに使い易いことであり、また地下構造を考慮しながら line up を再検討する時には非常に使い易い形になっている。

一方第5図にみられるように、反射波の line up の傾斜曲率は記録の上半分(展開 ab による部分)と下半分

(展開 bc による部分)とで独立であり、反射波の到来方向によってかなり様子が異なるということは、Poor reflection の picking や交錯する反射波の picking が簡単に行なわれないことを示している。すなわち、記録上半分の line up をそのまま記録の下半分へ延長することはできない。下半分でも独立に line up を判定しなければならない。このことは部分的反射 (partial reflection) の場合には picking が非常に困難となり、スプリット展開の記録上では picking できても、オフセットL型展開の記録上では picking できないことも生ずる。

3.3 走向・傾斜の計算

反射波が近似的に平面波とみなしうる範囲^{註2)}においては、Dixの教科書に述べられているクロス展開に対する走向・傾斜の計算法がそのまま使用できる。平面波に対してはオフセットL型展開の半分 ab の ΔT は第6図に示すようなクロス展開の $d'b'$ における ΔT_{ab} に等しく、また cb の ΔT は $c'b''$ の ΔT_{bc} に等しい。したがって真の傾斜方向の時刻差 (step-out time) ΔT_0 は

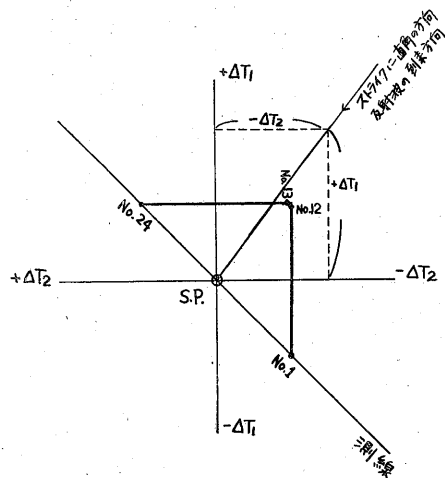


第6図 平面波に対して $\Delta T_{ab} = \Delta T_{a'b'}$, $\Delta T_{cb} = \Delta T_{c'b''}$

$$\Delta T_0 = \sqrt{(\Delta T_{ab})^2 + (\Delta T_{bc})^2}$$

で求められ、走向 α は

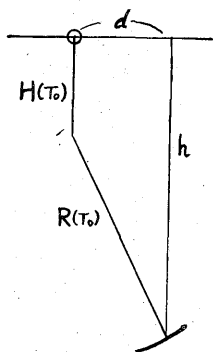
$$\alpha = \tan^{-1}(\Delta T_{ab} / \Delta T_{bc})$$



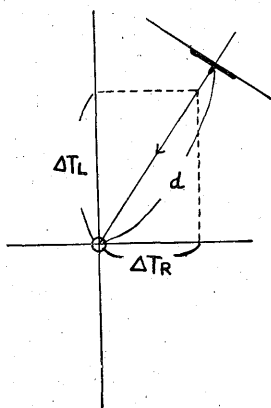
第7図 $\Delta T_1, \Delta T_2$ から図上で走向の方向が求められる

註2) 平面波近似の誤差については補足を参照されたい。

で求められる。走向を求めするには式で数値計算するより、Dixの教科書に述べてあるように図式で求めた方が手取り早い。すなわち第7図のようなグラフを用意しておき、 ΔT_{ab} 、 ΔT_{bc} をそれぞれの軸上にとって、原点から走向に直交する直線を引く。反射点の地表からの垂直の深度 h 、反射点の地表における投影点と原点との距離 d は、図式に求められる。すなわち ΔT_0 に対する真の傾斜 θ_0 を求め、スプリット展開に対応する断面図上で θ_0 に対応する反射面を設定し、第8図のように d と h を読みとる。これから第7図の走向に直交する直線上に d の距離をとり反射点の地表投影点が決まる。したがって直に第9図のように平面図上に走向・傾斜の記号表示が記入される。



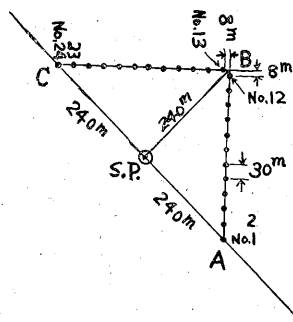
第8図 R-H 尺によって d, h が求められる



第9図 反射点の地表投影点が求められ、走向・傾斜が記入される

4. 実験例

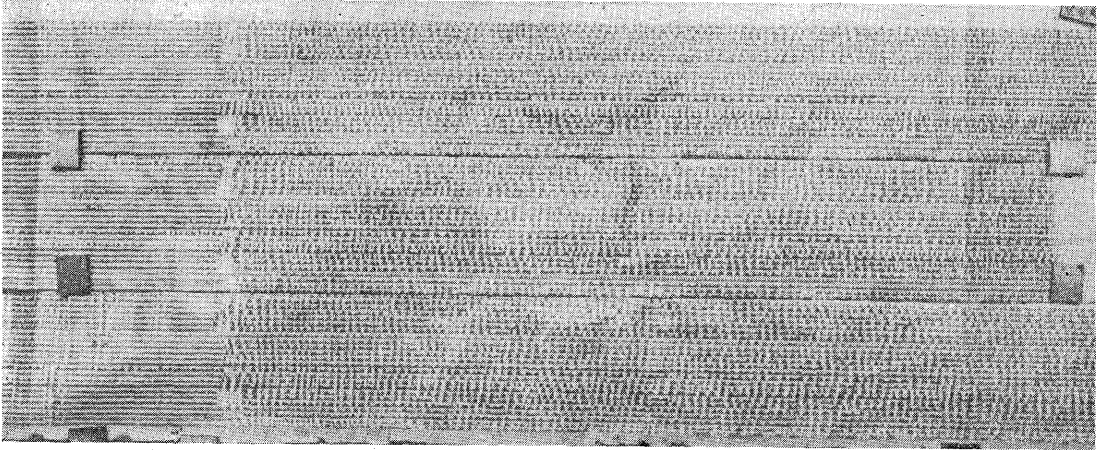
以上の原理的説明からわかるように、オフセットL型展開によって連続的に走向・傾斜を統御し、また同時にスプリット展開に対応する情報もある程度得られる見通しがあったので、実際の現場実験を行なった。爆発孔は作孔の能率上道路沿いに設けられ一直線上に無かったので、爆発点およびオフセットL型展開を連続断面追跡を



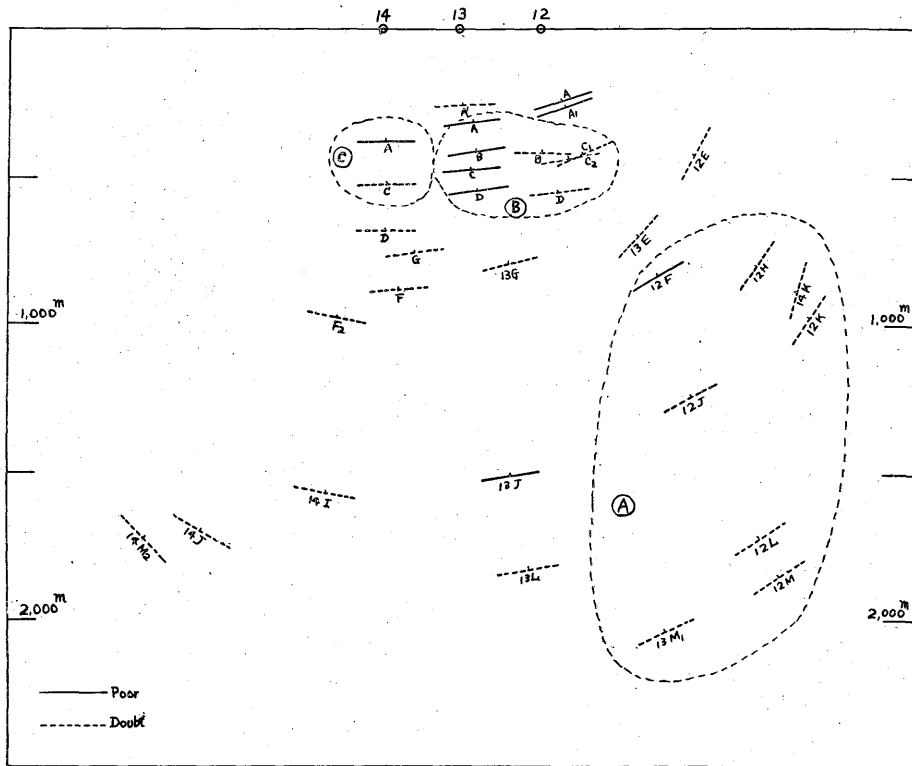
第10図 オフセットL型展開のディメンション

考慮して第13図にみられるように配置した。この爆発点は受振点間隔 20 m、24 成分によるスプリット展開による連続断面法のために選定されたものである。これをオフセットL型展開による連続断面法によって覆うためには、L型展開の両端が次の爆発点上に設定する必要があるが、使用した電線の受振器接続取出口 (take-out) が 30 m 間隔であったため、L型展開の受振点間隔も 30 m におさえざるを得なかった。そのためL型展開の配置のディメンションは第10図に示すようになった。なお受振器の群設置法としては、9コ受振器間隔 3 m 正方形配置を使用した。

このようにして得られた記録が第11図に示すものである。この記録に見られるようにこの地域は非常に反射波の質の悪い所であった。断層帯のすぐ近くで、構造的にも複雑な地域であった。Poorな記録ではあるが一応反射波と認められる line up を picking して計算してみることにした。まず 3.1 に述べた方法によってスプリット展開として計算した結果が第12図である。次に 3.3 に述べた方向によって走向・傾斜を計算した結果が第13図である。第12図の二次元的断面図と第13図の走向・傾斜図とみくらべてみるといろいろ注目すべきことがわかる。まず第13図において傾斜の異なる ㉠ ㉡ 2つの反射群が、その到来方向が異なっている。またほぼ等しい傾斜をもっている ㉢ ㉣ 2つの反射群が、走向・傾斜図上で方向の異なる2つの群に分かれている。このように二次元的断面図で1つの平面上に表現されている反射面は、いろいろの方向からきた反射波によって作られたものであり、この断面図を1つの平面上における断面と考えてはならないことが明瞭である。㉢ ㉣群を、二次元的断面図 (第12図) 上では1つの層準とみなされ易いが、走向・傾斜図上で明らかのように、一つの層準と解釈してはいけぬ。むしろ走向・傾斜の情報によってこの近くに断層構造を考慮してゆくべきものである。また ㉠ ㉡群の層準の傾斜の関係は、㉠ ㉡群の走向の方向が異なるため垂直断面図では著しく変化する。地下構造



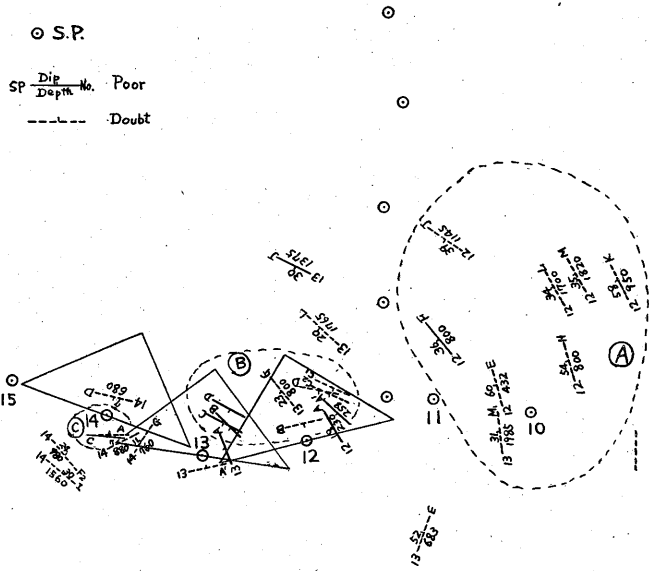
第11図 オフセットL型展開による記録断面



第12図 オフセットL型展開から計算された断面図

を解釈するときは、このように二次元的断面図と垂直断面図との差異を充分考慮しなければならない。この実験地域において反射波が Poor でまた観測したオフセットL型展開の数が少なかったため、走向・傾斜の統御によって地下構造等高線を作成してゆく過程の検討が残念ながら行ないえなかったが、地下構造線作成における走向・傾斜情報の活用ということは今後の問題点であろう。

以上のようにオフセットL型展開方式はスプリット展開とほぼ等しい作業量で、通常のスプリット展開の情報と走向・傾斜の情報について一応の結果が得られることが試験されたが、一方これをスプリット展開の代りにルーチンの連続断面法として使用するにはいろいろ不十分な点があることがわかった。3.2で述べた Poor reflection の picking の困難さが予想以上に大きかった。また浅



第13図 オフセットL型展開から計算された走向・傾斜図

い反射波で像爆発点がL型展開で囲まれる地域内にある場合は反射波の line up と曲率がかなり複雑になり、Picking の際の任意性が大きくなる。このようにL型展開は Poor reflection の処理にまだ十分な展開配置ではないと思われるので、今後は Poor reflection に対する適切な strike-dip control の方式を考究してゆく必要がある。

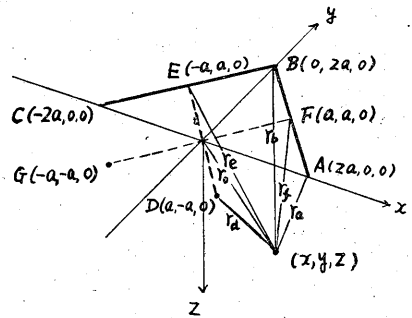
5. 結 語

従来の連続断面法と等しい作業量で、スプリット展開による連続断面と、走向・傾斜の統御とを同時に求める方法として、オフセットL型展開による連続断面法を試みた。新しい方式による計算法を3に示した。実際の構造調査の現場で実験を行なった結果、この方式によって意図した結果が一応は得られることがわかった。一方 Poor reflection に対する走向・傾斜の統御としてはこの方式はまだ充分なものではなく、今後さらに考究する必要があると認められた。

補 足

平面波近似による ΔT の誤差について 3.1 において反射波の平面波近似を使用して、オフセットL型展開の ΔT を爆発点を通るクロス展開における ΔT とみなして計算を進めたが、浅い反射面による反射波に対して近似が悪くなる心配があるのでその誤差を評価してみた。

第14図のようにオフセットL型展開 ABC を平行移動して、爆発点0を通るクロス展開 DE, FG に置き換えた場合を考える。爆発点を原点とする直角坐標系 x, y, z を第14図のようにとる。爆発点の反射面に対する



第14図

像爆発点の座標を (x, y, z) とし、オフセットL型展開 ABC のそれぞれの座標を $A(2a, 0, 0)$, $B(0, 2a, 0)$, $C(-2a, 0, 0)$ とするとクロス展開 DE, FG の座標はそれぞれ $D(a, -a, 0)$, $E(-a, a, 0)$, $F(a, a, 0)$, $G(-a, -a, 0)$ となる。地下の速度分布が一定の場合を考える。反射波の波面は像爆

発点を中心とする球面をなす。球面の座標を x, y, z , 球面の半径を r とすると r は次式で与えられる。

$$r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} \quad (1)$$

したがって像爆発点から A, B までの距離 r_a, r_b はそれぞれ

$$r_a = \sqrt{4a^2 - 4ax_1 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$$

$$r_b = \sqrt{x_1^2 + 4a^2 - 4ay_1 + y_1^2 + z_1^2} \quad (2)$$

同様に像爆発点から DE までの距離 r_d, r_e はそれぞれ

$$r_d = \sqrt{a^2 - 2ax_1 + x_1^2 + a^2 + 2ay_1 + y_1^2 + z_1^2}$$

$$r_e = \sqrt{a^2 + 2ax_1 + x_1^2 + a^2 - 2ay_1 + y_1^2 + z_1^2} \quad (3)$$

(2)(3) から

$$r_b^2 - r_a^2 = 4a(x_1 - y_1) \quad (4)$$

$$r_e^2 - r_d^2 = 4a(x_1 - y_1)$$

$$\therefore \frac{r_b^2 - r_a^2}{r_e^2 - r_d^2} = \frac{(r_b - r_a)(r_b + r_a)}{(r_e - r_d)(r_e + r_d)} = 1 \quad (5)$$

という関係があることがわかる。 $(r_b - r_a)$ を速度 V で割ったものはオフセットL型展開 AB で観測される時刻差 (step-out time) ΔT であり、 $(r_e - r_d)$ を速度 V で割ったものはクロス展開 DE で観測される時刻差 (step-out time) $\Delta T'$ である。したがって (5) 式から

$$\Delta T' / \Delta T = (r_b + r_a) / (r_e + r_d) \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{1}{V}(r_b - r_a), \quad \Delta T' = \frac{1}{V}(r_e - r_d) \quad (7)$$

となる。オフセットL型展開 AB で観測された ΔT を、

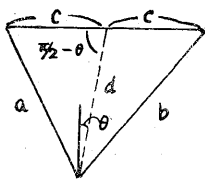
クロス展開 DE で観測されるべき $\Delta T'$ の代りに近似的に用いた場合、その誤差の百分率は

$$(\Delta T - \Delta T') / \Delta T = 1 - \Delta T' / \Delta T \quad (8)$$

となる。(8) (5) 式を用いているいろいろの深度の反射波について数値計算を行なえば、この誤差が評価できる。

数値計算を簡単にするためにさらに (6) 式を変形する。第 15 図に示す記号を用いると

$$\begin{aligned} a &= d \sqrt{1 + \left(\frac{c}{d}\right)^2 - \left(\frac{2c}{d}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \\ b &= d \sqrt{1 + \left(\frac{c}{d}\right)^2 - \left(\frac{2c}{d}\right) \cos\left(\pi - \frac{\pi}{2} + \theta\right)} \end{aligned} \quad (9)$$



第 15 図

いま $\left\{ \left(\frac{c}{d}\right)^2 - \left(\frac{2c}{d}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \right\} < 1$ の場合を考える

と平方を展開して

$$\begin{aligned} a &= d \left[1 + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{c}{d}\right)^2 - \left(\frac{2c}{d}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + \dots \right\} \right] \\ b &= d \left[1 + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{c}{d}\right)^2 - \left(\frac{2c}{d}\right) \cos\left(\pi - \frac{\pi}{2} + \theta\right) + \dots \right\} \right] \\ \therefore a + b &= 2d \left[1 + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{c}{d}\right)^2 + O\left(\frac{c}{2d}\right)^4 \right\} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

この公式を使用すると (6) 式は $O\left(\frac{c}{2d}\right)^4$ を省略して

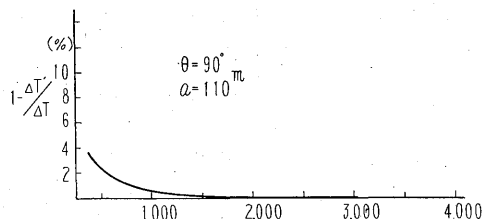
$$\begin{aligned} \frac{\Delta T'}{\Delta T} &= \frac{(r_a + r_b)}{(r_d + r_e)} \\ &\approx r_f \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r_f}\right)^2 \right\} / r_0 \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r_0}\right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

r_0, r_f は像爆発点から原点, AB の中点 F までの距離)。したがって誤差の百分率は

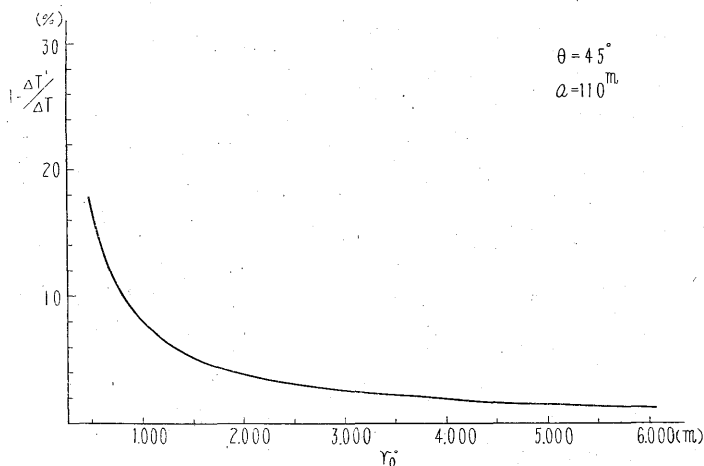
$$1 - \frac{\Delta T'}{\Delta T} = 1 - \frac{r_f \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r_f}\right)^2 \right\}}{r_0 \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r_0}\right)^2 \right\}} \quad (12)$$

から計算される。爆発点から反射面へ垂直に測った深度は $r_0/2$ であるからいろいろの深度について、また a と r_0 とのはさむ角 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ のそれぞれについて誤差 (12) 式を計算した結果が第 16~18 図である。なお $a = 110$ m とした。

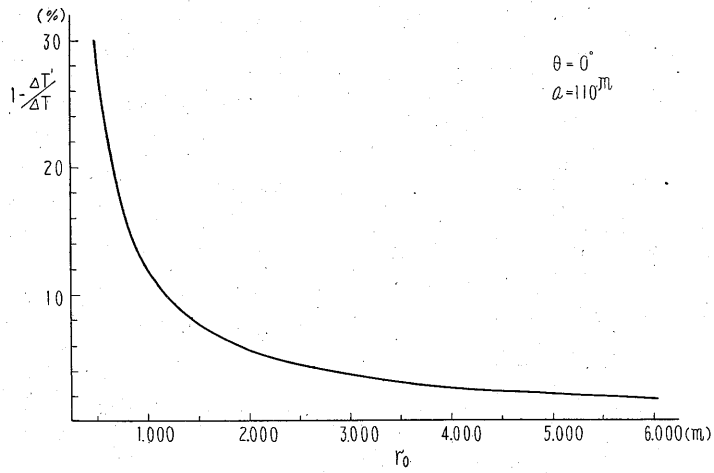
これらのグラフからわかるように反射面の傾斜が 45° より小さければ反射面深度 500 m において平面波近似による誤差は 8% 以下であり、反射面の傾斜が小さいほど小さくなる。500 m 以内の浅い反射面については傾斜が急になるとかなりの誤差が生じてくる。したがって浅い反射、あるいは急傾斜の反射面についてはこのグラフを参考にして平面波近似による反射面の傾斜を検討し



第 16 図 球面波の平面波近似の誤差百分率 (第 12 式) $\theta = 90^\circ$ の場合



第 17 図 球面波の平面波近似の誤差百分率 (第 12 式) $\theta = 45^\circ$ の場合



第 18 図 球面波の平面波近似の誤差百分率 (第 12 式) $\theta = 0^\circ$ の場合

てゆけばよい。

(昭和 34 年 10 月~11 月調査)

文 献

Dix, C.H. : Seismic Prospecting for Oil, Harper & Brothers, 1952