

反射法の解析について(2) 地震断面図の作成法

— 深部物理探査研究 第3報 —

南雲 昭三郎* 川島 威*

On the Interpretation of Seismic Reflection Method (2) Making of Seismic Cross-section

by

Shōzaburō Nagumo & Takeshi Kawashima

Abstract

A new method of making seismic cross-section is presented. First, reflection events are plotted by wave fronts and dip-segment on the 1st seismic cross-section.

Next, the 1st seismic section is interpreted with the seismic record section to make the 2nd seismic cross-section.

The 2nd seismic cross-section represents continuity of reflection beds, amplitude quality, horizon break, phase change, diffraction source, disturbed zone etc. The 2nd seismic cross-section is intended to represent all informations which are involved in the seismic record.

The 3rd section is the seismic-geologic cross-section, where continuous horizon, phantom horizon, fault and other structural interpretations are represented.

要 旨

地震探査反射法の解析における地震断面図の作成法について、一つの新しい方法を試みた。これは記録のなかに含まれている色々な情報、および貧弱な情報をできるだけ有効に使用し、解析の内容を従来以上に充実させようとする意図をもつものである。断面図は3つの段階に従って作成される。第1断面図は記録の上に読みとった反射波を、波面と傾斜素片で表現したもので、第2断面図は波動論的に解釈された反射面を表わし、情報をできるだけ多く表現したものである。第3断面図は地質構造および層序について解釈された地震地下構造断面図である。

1. 緒 言

地震記録の上に反射波が判定され、 T 、 ΔT が読みとられると、次にそれらを断面図に表現する作業が行なわれる。現在普通に用いられている方法は、速度仮定を行ない、 $R-H$ Plotter あるいは Wave Front-Ray チャー

トを用い、反射面素片に等級 (grade) を付けてプロットする方式である。この方法は良好な反射波に対しては満足すべき方法であるが、反射波の質 (quality) が Poor な場合、または地下深部からの反射波の場合に幾つかの欠点をもっている。例えば反射面が一定の長さの素片 (segment) で表わされるので、爆発点間の連続性が見難く、特に深部反射に対しては、 ΔT の僅かな差異によって素片の水平距離が大きく移動するために、反射面素片がとびとびになるのが普通である。また多くの解析手 (interpreter) が経験しているように、記録の印象と断面図の印象との間にかかなり大きな差があるのが普通である。

そのため、この断面図から反射面素片を記録と見較べて地下構造を解釈するときにかかなりの困難があり、また解釈に吝意がはいってくるおそれがある。このような現在の状態を改善するためには、地震断面図において (1) 地震記録に含まれている色々な情報をできるだけ多く表現し、(2) それらを地下構造の解釈に役立つように表現しなければならぬと考えられる。

以上の観点から次に述べるような作図方式を試みた。
地震断面図作成の手續の概要：まず記録上に読みと

* 物理探査部

られた全部の反射波を、各爆発点ごとに波面と短い傾斜素片 (dip segment) で記入し、反射波の番号を記しておく。これを第1断面図とする。次に第1断面図と記録断面と対応させながら反射面を決定し、振幅の質、連続性その他の情報を記号によって表現する。この時、解釈の理由を備考として断面図の両側に書入れる。これを第2断面図とする。次に第2断面図から断層、連続する反射層準 (continuous reflection horizon) や仮想反射層準 (phantom reflection horizon) 等を決定し、地質構造に対応する地震構造断面図を作成する。これを第3断面図とする。この時、解釈の理由、任意性、再吟味を要する箇所等を備考として書きとめておく。第1断面図は元の情報を全部表わしたものであり、機械的に計算されるものである。第2断面図は波の伝播機構によって解釈された反射面の様子を表わすものである。第3断面図は地質構造および層序等によって解釈された、地震地下構造断面図である。

以下それぞれの断面図の作成法、および作成について注意すべきところを記す。

2. 第1断面図

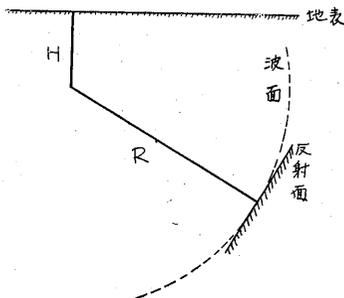
記録の上読みとられた反射波の normal time, step out time をそれぞれ T , ΔT とする。まず T の波面を画く。Normal time T の反射波の反射点における波面は、良く知られているように、S.P. の真下

$$H = (V_0/a) (\cosh aT - 1)$$

の点を中心とし、

$$R = (V_0/a) (\sinh aT)$$

を半径とする円弧で表わされる。したがって、第1図のように S.P. の真下に H をとり、その点を中心とし、 R を半径にとって、反射点を含んで円弧の一部を画く。 H , R を決めるには、 R , H の長さを実際の作図の縮尺 (例えば 1/5,000, 1/1,000) に T で目盛った R - H スケールを使用する。Wave Front-Ray チャートの S.P. の



第1図 反射波の反射点における波面

下に H スケールを、また R スケールをチャートの片側に貼り付けておくと便利である。

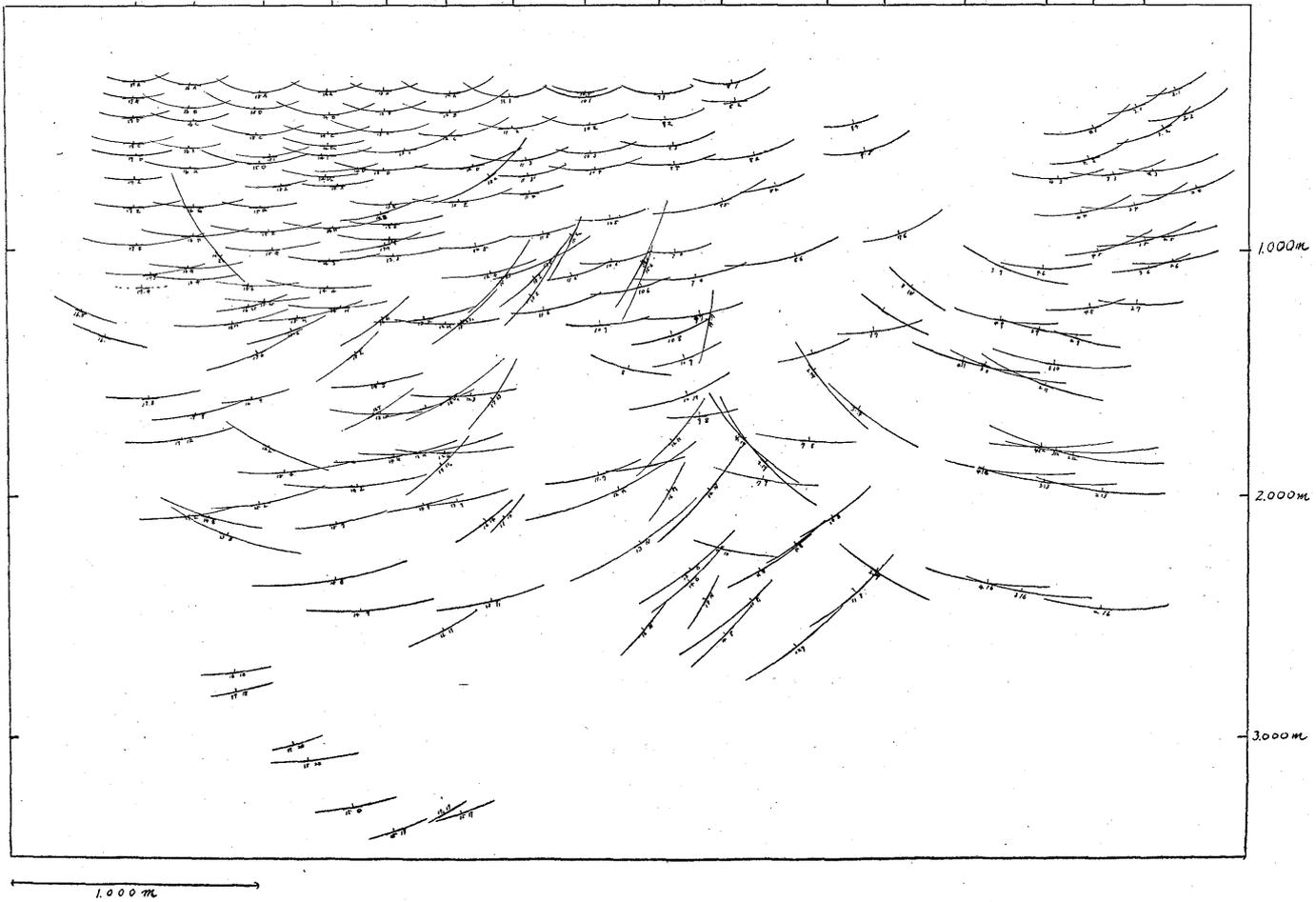
次に Ray チャートの上に ΔT に対応する Ray によって反射点を求め、短い傾斜素片を記入する。その下に S.P. と反射波番号を記入する。Ray チャートが無い時には、 ΔT から θ を求め、 H 点から θ によって反射点を先に画いた波面の上に求める。

このように、記録上に読みとった反射波を反射点における波面と反射面の短い傾斜素片で記入したものを第1断面図とする。第2図はこのようにして作られた第1断面図の実際の例である。反射波をこのように波面と傾斜素片で表現しておくこと、次に述べる第2断面図を作る場合、反射面の連続性の吟味、 ΔT の変動による傾斜および水平距離の変化の吟味、回折波の吟味等に便利でありまた記録断面と対応させるにも便利である。

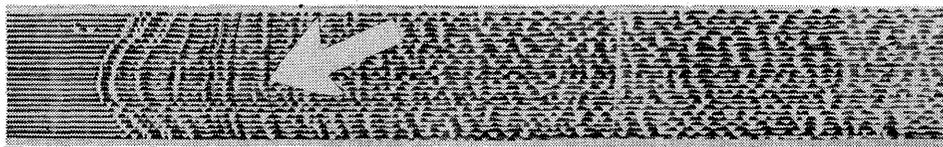
3. 第2断面図

第1断面図ができると、次に、それと記録断面とを対照させ、地震波の伝播機構を考えながら反射面を決めてゆく。その際出合わず色々な場合について取り扱い方を次に述べる。

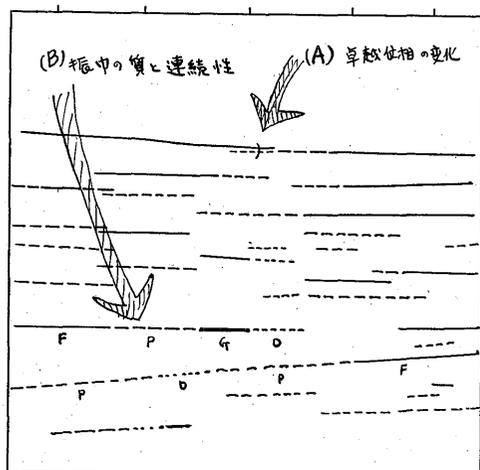
反射波が、記録断面上において隣接する爆発点にわたって連続している場合、波面の包絡線と傾斜素片の傾斜が一致する時は包絡線を反射面とする。しかし包絡線と傾斜素片とが一致しない時は、記録上の ΔT の読みとり誤差と反射波の曲率を再吟味しなければならない。反射波の質が良く、 ΔT の読みとり誤差による傾斜素片の変動が小さい時は、傾斜素片に重きをおいて反射面を決定する。この時2つの爆発点間の反射面は、平面ではなく緩やかに曲った面になる。反射面が曲っている場合には、反射波の曲率にその影響が現われていることが多い。すなわち爆発点の両側で反射波の曲率が異なる場合が多い。1例を第3図に示す。反射波を読みとる位相が爆発点によってずれている時は、包絡線の傾斜と傾斜素片のそれとが食い違うために容易に見えされる。卓越位相が次第に移る場合は、その記号を第4図Aのように付する。この記号のある場合には、2つの反射面の間隔は深度差の意味をもたない。反射波の質が悪く (Poor) ΔT の読みとりにかなりの任意性がある場合には、記録によって反射面の連続性を検討し、反射面の連続性が傾斜素片の読みとりによる変動と同程度の場合には、包絡線と傾斜素片とを等しい重みで考慮しながら反射面を決定する。このようにして断面図上で連続した反射面は記録のうえで必ず連続しているものである。逆に記録の上で連続しているようにみえる反射波は、必ずしも断面図上で



第2図 第1断面図の一例
記録上に読みとつた反射波を、波面と短い傾斜素片で表わす。それぞれに爆発点反射波読みとり番号を記入しておく。



第3図 Line upの曲率が、爆発点の両側で異なる一例



- A: 卓越位相の変化する記号
- B: 振幅の質と連続性の表現

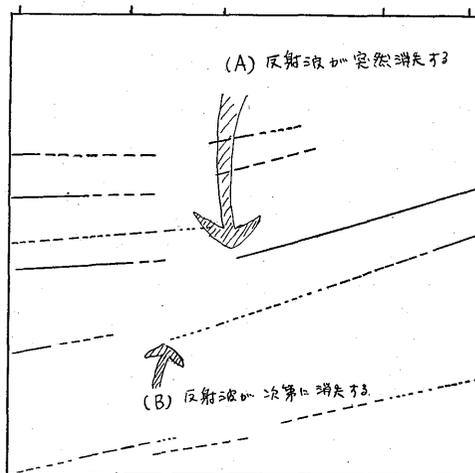
第4図 第2断面図に記入する記号 (I)

連続しているとは限らない。

反射面が決定されたら、そこに記録上の情報を記号によって表現する。まず振幅の質を4段階 Good, Fair, Poor, Doubt に分け、それぞれ太い実線、細い実線、波線、点線で示す(第4図B参照)。この際一つの爆発点の反射波でも、そのなかに反射波の振幅の大小、位相の揃い方の良否がある場合には、記録のとおり記入する。従来ある爆発点の一つの反射波の grade は、振幅と連続性との両者によって決められていたが、今回の方法では連続性は断面図上の線の連がりそのものによって表現されるので、反射波の質としては振幅のそれを記入することにした。例えば第4図Bに示されたような反射面は、振幅が良くなったり悪くなったりして繋がっていることを示している。地表で観測される反射波振幅の良否は、反射面の反射係数の良否のほかに、表層の条件やその到達時刻における2つ以上の反射波の干渉等にも依存するので、直接反射面の反射係数の変化、すなわち地質的には反射層の状態の変化に対応させることはできないが、岩相変化や断層を吟味する際に一つの資料となるものである。

記録のうえで2つ以上の爆発点間で連続していない反射波は、上述した振幅の質を表わした直線で表現される。その直線の幅は ΔT の精度によって加減する。すなわち ΔT の精度が良く傾斜の誤差が少ない場合は、反射面の長さとしてスプレッドの長さの $1/2$ をとり、 ΔT の精度が悪くなるにつれて短くする。このことは ΔT の誤差が大きくなると傾斜の精度が悪くなるので、その長さを短くすることによって誤差の大きいことを表現するとともに、断面図全体をみる時に目立たぬようにするためである。

反射波が消失する位置は、第2断面図上の反射面の上で意味をもつように注意深く決めなければならない。というのは、反射面の消失する様子は岩相変化や断層の情報として大切なものであるからである。第5図のAは、



- A: 反射波が Fair のまま突然消失することを表わす
- B: 反射波が Fair から次第に悪くなって消失することを表わす

第5図 第2断面図に記入する記号 (II)

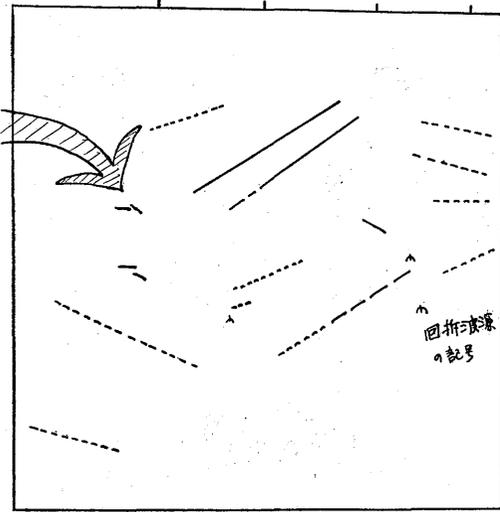
Fair の反射波が突然消失することを表わし、同図Bは反射波の振幅が次第に悪くなって消失することを表わしている。反射波が消失するとき、隣りの爆発点の記録の

一部に短く反射波が Poor で現われており、しかもその line up は部分的であるため、その爆発点では独立した反射波として $T, 4T$ が読みとれない場合がある。このような場合、反射面の消失点としては前の爆発点のスプレッドで決められるところではなく、次の爆発点の記録に対応するところまで延長させねばならない。また反射面が消失する時にはその曲率の変化に注意しなければなら

るときに役立つものである。明らかに回折波と判定されたものは、回折源の記入をしておく。

記録の上で連続する位相で、爆発点ごとに $4T$ が変化して、反射波として計算された傾斜素片が離れてくることがある。浅い場合には位相の曲率を吟味する。曲率が大きくなっていることが多い。このような場合には正常な反射波でないこともあり、また斜めからの反射波であるかも知れない。あるいは、フィルターで遮断しきれなかった表面波の高調波であるかも知れない。それぞれの場合の検討を行なって、考察した結果を備考に記しておく。正常な反射波と認め難いときは、次の第3断面図で地下構造を求める際に充分注意しなければならない。

次に深い場合は、正常な反射波でも曲率が小さくなるので、おもに $4T$ の読みとり誤差による傾斜素片の変動と波面の包絡線とによって吟味する。反射面が深い場合は $4T$ の僅かの誤差で傾斜素片の位置が大きく変動し、また波面の曲率が大きくなるので、曲った反射面によって解釈のつく場合がある。もしそのような解釈が妥当でない場合には、位相が記録の上で連続していても、断面図上で反射面を連続させることはできない。前述のように、 $4T$ の誤差の程度に従って決められた長さの傾斜素

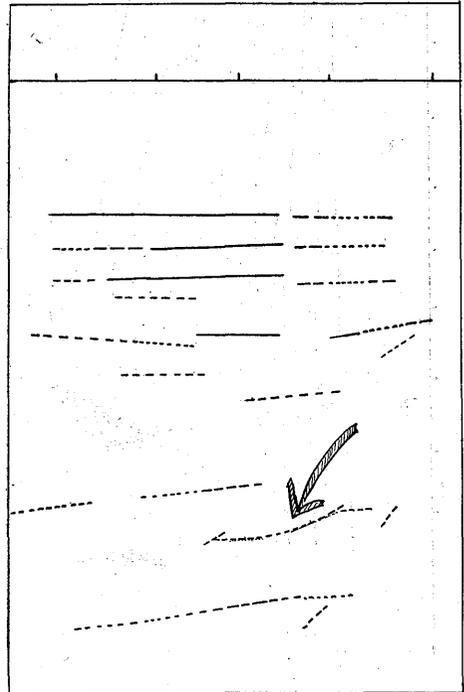


第6図 第2断面図に記入する記号(III)

記録上で連続する反射面について、計算された傾斜素片がほとんど同じ場所に集まる場合がある(矢印)。回折波と判定されたものは回折波源の記号 ρ を記入しておく。

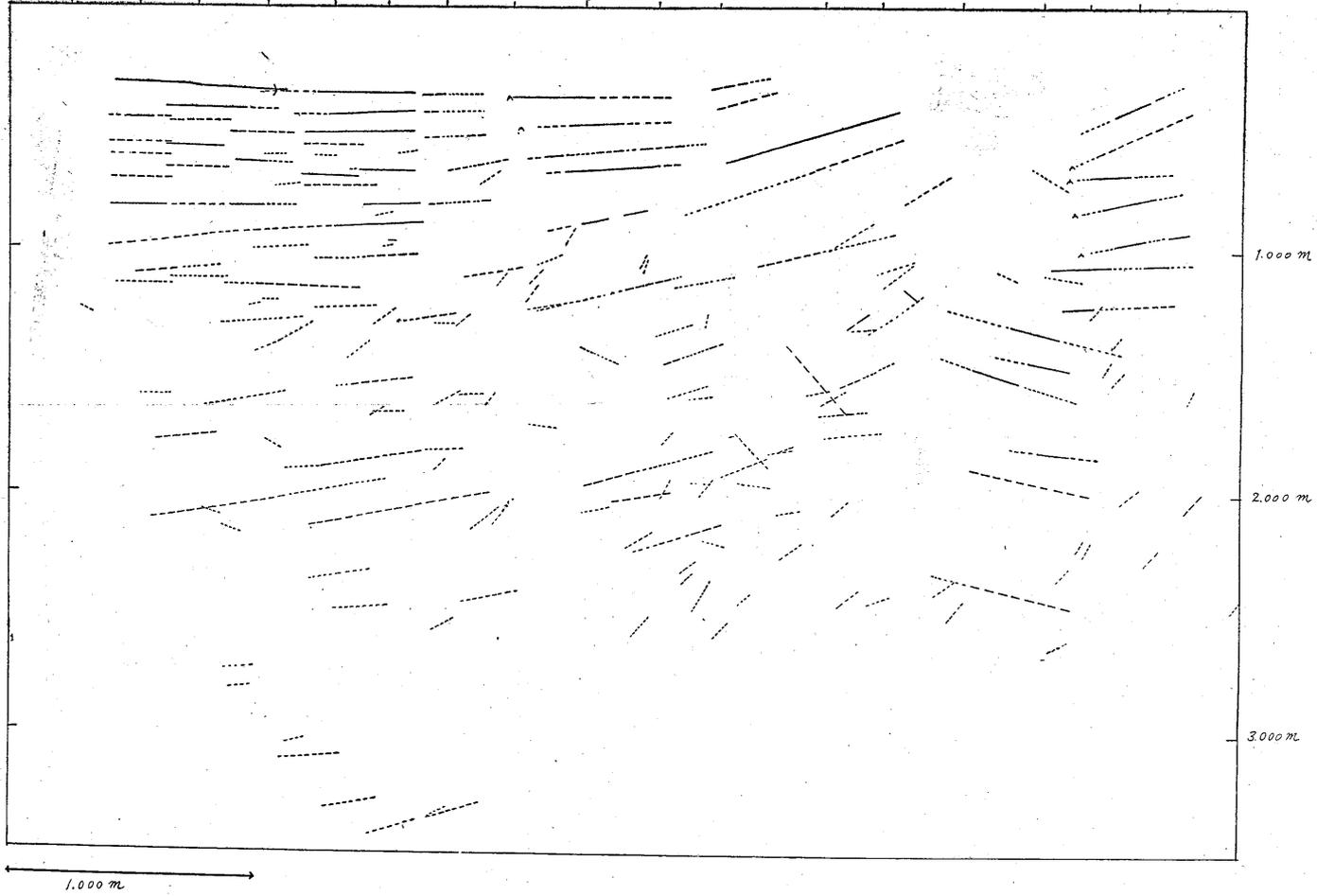
ない。というのは回折波があるかも知れず、あるいはまた反射面が曲っているかも知れないからである。この点は断層の判定の際にふたたび検討されなければならない。

記録の上で連続する位相をもちながら、爆発点ごとに $4T$ が変化して、反射波として計算された傾斜素片がほとんど同じ場所に集まる場合がある。第6図はその一例である。このような場合には、上に述べたようにまず波面の包絡線と $4T$ による傾斜の変動を検討する。その結果、 $4T$ の誤差を考慮に入れても、傾斜素片が包絡線とひどく食い違うような場合は、回折波の indication と考える。そして傾斜素片を振幅の質を入れて短い素片で記入する。その場所が浅い場合は、揃った位相の曲率を再吟味し、その曲率が等しい深度の反射波のそれよりも急な場合は回折波の可能性が強い。これらの検討の結果を断面の両側に備考として記入しておく。これは後で地下構造の解釈をするとき、あるいは、他の人が再検討す



第7図 第2断面図に記入する記号(IV)

$4T$ の誤差が大きくて、反射素片の位置が確定できない場合。



第 8 図 第 2 断面図の一例

弾性的性質に基づく境界面を表わす。反射面の連続性、反射波の振幅の質、その他多くの情報が記入されている。

片で示さねばならない。第7図の例は、 ΔT の誤差が大きく、反射素片の位置が確定できない場合の例である。

以上述べてきたように、第2断面図は、第1断面図と記録断面とを対応させながら、反射面の連続性、反射波の振幅の変化、反射波の消失の様子、卓越位相の変化、 ΔT による反射面の位置および傾斜の誤差、回折波その他の反射波以外の揃った位相などを、おもに波の伝播機構の観点から検討し、その結果を表現したものである。第2断面図の両側に記載された備考は、その解釈の過程を示すものでとくに重要なものである。この第2断面図は地下の弾性的性質に基づく境界について、上記のような情報を示すものであり、次にこれらの情報に基づいて地下構造の解釈が行なわれる。第8図は第2断面図の実際の例である。

なお第2断面図の地表近くに、U. H. Time と初動から求めた表層の速度とを各爆発点ごとに記入しておく。これは表層の影響を考察するとき大切な資料である。

4. 第3断面図

地層の傾斜、褶曲の大要、断層の存在等の地下構造の大体的様子は、第2断面図において反射面を求めてゆく過程でおのずから明らかになってくる。この地下構造に対する解釈を総合的に求めて表現したものが第3断面図である。すなわち、連続する反射層準、仮想反射層準を求め、また断層の位置および性質を考察し、弾性的性質

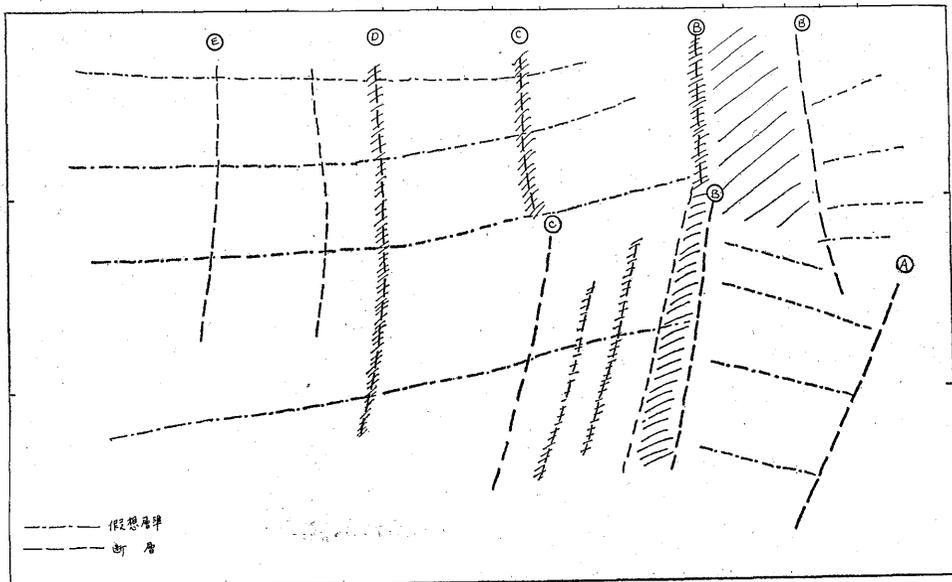
の境界面に基づく地下構造を推定してゆくものである。この際地震波の伝播に基づく物理的な観点と、構造地質学および層位学の観点と、2つの観点から総合的に検討してゆくことが必要である。第9図に、第3断面図の例を示す。次に第3断面図を作成してゆくときの手続きを述べる。

4.1 垂直断面の位置

まず、第2断面図が地下構造のどこの切断面になっているかを検討する。第2断面図は測線を反射面に垂直に投影する断面を表わしている。幾つかの反射面の走向・傾斜がそれぞれ異なっている場合には、それぞれの投影断面は異なった平面である。したがって第2断面図はこれらの幾つかの平面が重なって1つの断面で表現されているものである。特別な場合として、すべての反射面の走向が一定で、測線が走向に直交している場合には、この第2断面図は垂直断面図となる。しかし、地層の走向が地下浅部から深部まで一定でない場合が多く、また測線の全部にわたって一定でないことも多い。

このような場合は、走向・傾斜の統御 (strike-dip control) によって反射面を反射波の到来する方向により幾つかの群に分け、それぞれの群について一つの断面を考えてゆかねばならない。

Strike-dip control が多くの爆発点について行なわれている場合には、virtual survey line (仮想測線) を求める。第2断面図は近似的に virtual survey line



第9図 第3断面図の一例
第2断面図から解釈された地質構造に対応する地震地質構造断面図

の垂直断面図とみなされる。このような strike-dip control が行なわれていない場合は、第2断面図がどこを通る垂直断面とみなされるか定まらない。このような場合は、直交する測線によって地層の走向を大まかに推定して virtual survey line の見当をつけることが多く行なわれている。この場合の推定はかなり定性的なものであるから、地震断面を地質的に解釈するとき充分注意しなければならない。とくに地層の傾斜、断層の位置、および延びの方向等を量的に検討する場合は充分注意しなければならない。走向に直交した構造断面図と走向に斜めに交わる地震断面との関係および両者が非常に食い違う例などについては Gates (1957), Ivanhoe (1955), (1956) らの文献に詳しく述べられている。

第2断面図が近似的に垂直断面とみなされる位置が決まると、次に control horizon を決めてゆく。すなわち第2断面図上の連続した反射面 (continuous reflection bed) から連続反射層準 (continuous reflection horizon) を、断片的に連続する反射面から仮想反射層準 (phantom reflection horizon) を求めてゆく註1)。

4.2 連続反射層準

第2断面図で連続している反射面は、そのまま連続反射層準とする。反射波の卓越位相の変化がある場合は、第2断面図上の深度差は意味がないので等しい傾斜で連続させる。cross-control を行なう爆発点の所に卓越位相の変化がある場合は、horizon の深度に充分注意しなければならない。というのは、僅かの深度の差が走向に大きく影響してくるからである。

また卓越位相の変化は反射層の岩相の変化や、層の厚さの変化に関係することが多いので、そこに地質的意味があるかどうか検討する。小さな断層によって反射面が僅か途切れている場合は、左右の horizon のつながりが容易に判定される。しかし断層が幅をもつ場合は左右の horizon の対比は多くの場合難しい。記録にかえって、役立つ情報があるかどうか再検討し、また構造的に考察を加える必要がある。

4.3 仮想反射層準

次に第2断面図でとびとびにつながっている反射面について、仮想反射層準を設定する。まずとびとびにつながっている反射面のそれぞれの傾斜から地層の傾斜を推定する。それらの反射面から、比較的連続性の確かな反射面の所に仮想反射層準を設定する。その際、仮想層準

と実際に観測された反射面とが、ある場所で一致するように選ぶ。そこがその層準の control point となる。また実際には、反射面が観測されていない所を通る仮想層準については、その上下にある部分的反射面との深度差を明らかにしておく。このことは後日、試掘結果と対比させる時重要な意味をもってくる。仮想反射層準を設定する際に、縮尺された面積表示方式による記録断面を使用することが必要である。記録断面図を参照することによって、反射面の途切れている所が反射面に由来するものか、あるいはほかの波との干渉によって反射波が見えなくなっているのが判明する。また採用した傾斜が、記録の上でどこに重きをおいたことになるのか、反射波として読みとらなかつた類似の傾斜があるかないか、等が明らかになる。また仮想反射層準をどこまで伸ばすかという問題に対しては、記録断面上において、断層に伴なう擾乱帯の陰になって観測にかからない区域、あるいはまた地層の傾斜の関係で観測にかからない区域などを検討する必要がある。深部の反射波になると、反射面の曲率によって反射波のエネルギーが集中したり発散したりするので、記録の上で連続しなくなることが多い。(c.f. Dix, p. 217~219)。したがって深い反射面について仮想反射層準を設定する場合は、不連続の原因がこのような curvature effect にあるのかどうか検討する必要がある。

4.4 Poor Information の解釈

Poor reflection, Doubtful reflection は第2断面図において、 ΔT の精度に応じた幅をもった素片 (segment) で記入されている。これらの波は位相の揃いが悪いために、正常な反射であるか、回折波であるか、その他の意味をもつ波か、あるいは偶然的な位相の揃いであるか判定のつかなかつたものである。それぞれの記録の上では解釈のつかなかつた波でも、一応正常の反射波として計算して第2断面図に記入してみると意味のはっきりしてくることが多い。これらの素片が連続反射層準や仮想反射層準と異なる傾斜をもって交わっている場合には、これらの素片を地層の堆積面からの反射と考えることは地質的に矛盾する。むしろその場所における地層の弾性的性質が局部的に変化して、弾性波を反射させるような状態になっていると考えた方がよい。地層の弾性的性質の変化としては、断層などに伴なう破砕帯とか、地層面が急に曲っている所とか、あるいは小区域の岩相変化等が考えられる。このような狭い区域からの反射波は、普通回折波と呼ばれている。このような波を、正常な反射として計算した場合の傾斜はあまり意味がなく、むしろその位置が反射を生じた場所を示すものとして意味をもつ

註1) このところの術語はまだ用いられていない。ここで用いる反射面とは、地震探鉱で得られた量であり、反射層準とは、それらの観測量から推定されたものであり、地質的意味をもつものである。

ている。すなわち地層の擾乱部を示すものと解釈すべきである。このような観点に立って Poor, Doubtful の反射素片の集まりを考察すると、断層帯の存在、および断層の地下深部への延びの方向が明らかになってくることが多い。

このように Poor, Doubtful reflection は、断層等の地下擾乱帯の indication として重要な意味をもつものであるから、最初の記録の picking の過程において、充分注意深く Poor information を mark し読みとらなければならない。Poor information をどの程度 picking するかということについては、色々の見解が分かれるところであるが、以上のような観点から、Doubtful な line up でもできるだけ picking して一応第 2 断面図上にプロットすることが大切だと筆者らは考えている。とくに面積表示方式による記録表現で認められる位相の揃いは一応計算に乗せ、地質的考察の対象にのせるべきだと考える。そして上記のような観点に立って取り扱うことによって、従来以上の情報が得られてくるであろう。

4.5 断層の判定

断層の存在は第 2 断面図および第 3 断面図のいままでの過程ではほとんど明らかになってくる。すなわち反射面の急激な傾斜の変化、反射波の得られない場所、Poor reflection segment に示される擾乱帯などによってほとんど明らかになってくる。次にこれらの断層について、位置幅、伸び等をできるだけ求めてゆかねばならない。断層の位置および幅は、連続する反射面の消失する位置、回折源、また急傾斜の反射素片の集まりなどによって定める。断層の伸びは擾乱帯や反射面の消失点などから推定してゆく。この際地下構造、層位関係および構造運動の観点から充分考察する必要がある。しかし前にも述べたように、この断面図は断層の走向に直交する垂直断面でないことが多いので、断層のより詳細な検討は次の段階における解釈へと引きつがれる。すなわち loop する測線によって地域的に検討され、contour map, 走向に直交する垂直断面図等を作成しながらさらに検討される。

以上便宜的に幾つかの項目に分けて注意すべき点を述べてきたが、それらはお互いに一つの地質構造を表わす

ものとして、密接に関係しあっているものなので、実際の解釈に際してはいつも総合的に考えさせてゆく必要がある。第 3 断面図は、地震記録上に得られた色々な情報を観測資料とし、地層の弾性的性質の境界面に基づいて地下構造を解釈することを目的とするものであるから、第 3 断面図の作成にあたっては地質探査師と地質技師の十分な協同作業が必要である。

地震探査で得られる情報が Poor な所については、地質構造の解釈に任意性がでてくることが多い。その場合 Dix も述べているように、それぞれの解釈とそれを裏付ける根拠および矛盾する資料を書き止めておく。これは試掘井の資料が得られたときに再検討するのに役立つとともに、再調査するときに注意しなければならぬ点がこれによって明らかになる。

5. 結 語

地震探査反射法の解析における、地震断面図の作成法について、一つの新しい方法を試みた。これは記録のなかに含まれている色々な情報および Poor information をできるだけ有効に使用し、解析の内容を従来以上に充実させようとする意図をもつものである。

断面図は、3 つの段階に従って作成される。第 1 断面図は記録の上に読みとった反射波を、波面と傾斜素片で表現したもので、記録と次の第 2 断面図をつなぐためのものである。第 2 断面図は波動論的に解釈された反射面を表わし、記録の情報をできるだけ多く表現したものである。第 3 断面図はその資料によって、地質構造および層序について解釈された地震地下構造断面図である。

この方法は使用してから日が浅く、まだ多くの事例を取り扱っていないので、本文中に述べたそれぞれの断面図作成の手續、および注意すべき事項については色々不備な点が少なくないことと思う。今後色々御批判をいただいてより満足すべきものにしてゆきたいと思う。面積表示方式による記録表現法とともに、このような情報の処理方法によって、従来以上に地震探査の内容が増大し、経済的により一層役立つものになることを筆者らは希望している。

(昭和35年1月稿)

文 献

- 1) Dix, C. H.: Seismic prospecting for oil, p. 217~219, New York, Harper, 1952
- 2) Gates, J. P.: Descriptive geometry and the offset seismic profile, Geophys., Vol. 22, p. 589~609, 1957
- 3) Ivanhoe, L. F.: Geometric analysis of seismic fault evidence, AAPG, Vol. 39, p. 753, 1955
- 4) Ivanhoe, L. F.: Integration of geologic data on seismic section, AAPG, Vol. 40, p. 1016, 1956