

## 坑井間における CDP 重合法適用

### —数値シミュレーション並びに室内モデル実験による検討—

六 川 修 一\*・松 島 潤\*\*

#### Application of CDP stacking to cross-well reflection data —Consideration by Numerical Simulation and Experimental Scale Model—

Shuichi ROKUGAWA\* and Jun MATSUSHIMA\*\*

#### ABSTRACT

The present paper describes the trials of CDP stacking in the cross-well seismic survey. The conventional processing of surface seismic reflection was modified and applied to the cross-well seismic data. The essential of this method is the application of CDP stacking based on the various source-receiver pairs having different transmit and received levels in the cross-well geometry. The advantages of this method is that the data processing can be performed without using the information of velocity tomograms and that imaging can be done even in the lower part beyond the coverage of cross-well travel time tomography.

Typical procedure of this method are (1) extraction of the upgoing reflection wavefield, (2) derivation of the equation of reflection travel time from the cross-well geometry, (3) velocity analysis using the equation derived in (2), in this procedure, CDP ensembles are selected for each depth among all data, and (4) CDP mapping based on the results of the velocity analysis.

Both numerical and experimental scale models are used for the development and evaluation of this data processing. As the result, the effectiveness of this method was demonstrated by the various kinds of numerical simulation and by the application to the experimental data.

**Key words:** cross-well geometry, CDP stacking, velocity analysis

### 1. 序 論

ジオトモグラフィに代表される坑井利用探査技術は、探査対象である坑井間の詳細な構造あるいは物性を明らかにしようとするものである。これまでのところ、P波

の初動走時を用いる走時トモグラフィ技術がほぼ確立され、実フィールドへの応用も進んでいる。特に EOR のモニタリング等で威力を発揮している。しかしながら、石油や地熱資源など比較的深部のレザervaの静的状態をより詳細に探査しようとする場合には、既に地表の地震

1994年11月29日原稿受付；1995年1月25日受理  
物理探査学会第90回学術講演会にて一部を発表

\* 東京大学工学部

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

\*\* 東京大学大学院工学系研究科

(現 地質調査所)

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

(〒305 茨城県つくば市東1-1-3)

Manuscript received November 29, 1994; Accepted January 25, 1995.

A part of this paper was presented at the 90th SEGJ Conference, 1994.

\* Faculty of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113, Japan

\*\* Graduated School, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

(Presently Geological Survey of Japan)

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113, Japan

(1-1-3 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305, Japan)

探査や VSP などが実施されていることが多いと考えられる。従って走時トモグラフィによって、これらの従来手法よりも高分解能のデータが得られなければ、この手法の技術的利点は少ないといえる。このような視点からすれば、現在の走時トモグラフィは必ずしも満足できるものではないと思われる。とりわけ、この手法が初動のみの利用にとどまっている点に問題があるように考えられる。初動以降のデータを利用した手法には回折トモグラフィがあるが、散乱場の抽出手法等にまだ問題点があり、実用の域に達しているとはいえない。

そこで筆者等は坑井間において観測される反射波に着目したデータ処理の考察を行ってきた(六川・松島, 1993)。坑井間で観測される反射波を利用して地下をイメージングする坑井間反射法技術は一般に以下のような利点を持っている。

(1) 発振点及び受振点が地下にあるので表面波の影響を受けない。  
 (2) 地表からの探査に比べて、対象とするレザーバにより近いところで観測を行なうため地表探査より高分解能の記録が期待される。

(3) 地表付近の風化層の影響を避けることができる。  
 坑井間反射法の手法は、現在いくつか提案されているが、その多くは初動走時を用いた走時トモグラフィにより得られる速度トモグラムを利用することによりイメージングを行なうものである(HARRIS 他, 1992; LAZARATOS 他, 1993; STORK 他, 1992)。しかしながらこの手法ではイメージング可能な領域が速度トモグラムが得られる領域に限られてしまうことおよび信頼性のあるイメージングを行なうには高精度の速度トモグラムが要求さ

れることに難点があると考えられる。

そこで本研究では坑井間の速度分布情報を利用せず、原データの反射波より、直接イメージングを行う手法を提案する。その手法の基本的概念は坑井間の幾何学的配置において、従来の地震反射法の中核技術である CDP 重合法を適用することである。

本論文は上記に関する一連の基礎研究(松島, 1994; 六川・松島, 1994)として、数値実験及び室内模型実験によりこの手法の適用の可能性及び問題点等を検討したものである。

## 2. 坑井間における CDP 重合法のデータ処理

通常の地表地震反射法における CDP 重合法の基本概念は、ある共通点で反射する波を選び出し、それらを加算して S/N 比を向上させることである。この過程において、「反射波を探す」作業が速度解析であり、最も計算量を要する処理である。つまり速度解析とは CDP アンサンブルにおいて反射イベントが作り出す双曲線パターンを検出する処理で、CDP 重合法における中核処理であるといえる。以上の速度解析の概念をさらに一般化すると次のように表現できる。ある観測ジオメトリが与えられれば、そのジオメトリを考慮にいれて編集される CDP アンサンブルにおいて反射イベントが作り出すパターンは一意に決まる。このパターンを検出する処理が速度解析である。本論文ではこの一般化された速度解析の概念を坑井間のジオメトリに適用することが最大の目的である。本章では坑井間のジオメトリにおける速度解析処理及びその結果を利用した CDP 重合記録作成処理法を、地表の地震反射法の場合と比較しながら述べる。

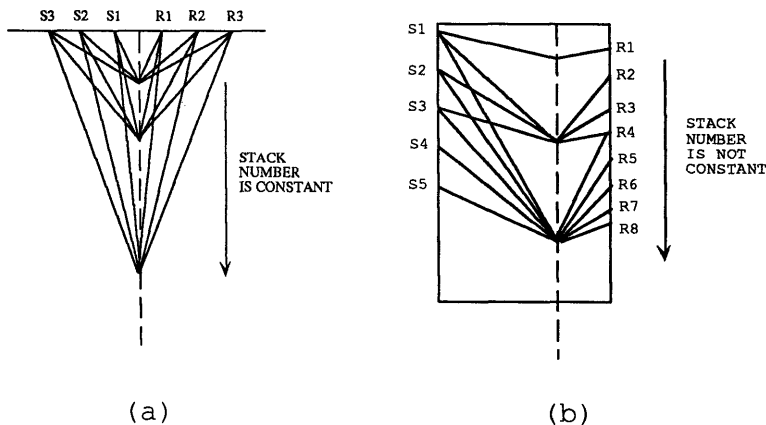


Fig. 1 Comparison of common reflection points between (a) conventional surface reflection and (b) cross-well reflection

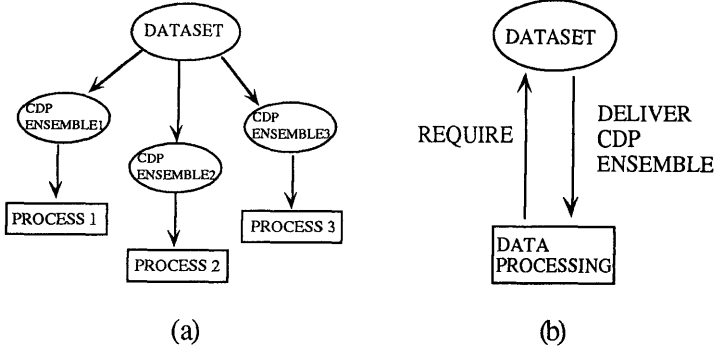


Fig. 2 Comparison of data processing between (a) conventional surface reflection and (b) cross-well reflection

2.1 共通反射点及びデータ処理

一般に地表地震反射法においては、測線の端点付近を除けば Fig. 1(a)に示したように各深度の共通反射点における重合数は一定である。言い換えれば、各深度における CDP アンサンブルを構成するトレース数は常に変わらない。このことは CDP 重合の一連の処理を、全データから分割された各 CDP アンサンブル毎に限定して行えることを意味している (Fig. 2(a))。

一方、坑井間の反射法では、通常 Fig. 1(b)に示したように各深度の共通反射点における重合数は一定にはならない。即ち、各深度における CDP アンサンブルを構成するトレース数は深度によって異なってしまう。このことは Fig. 2(a)に示すような CDP アンサンブルをあらかじめ選択する方法によるデータ処理は行えないことを意味する。そこでこの問題を解決するため、本研究では各深度における CDP 重合の際、CDP アンサンブルを構成するトレースを常に全データから選び出しては処理する手法 (Fig. 2(b))を試みた。つまり地表反射法の場合、一本の重合トレースは一組の CDP アンサンブルのみから作成されるが、坑井間反射法の場合、これが多数組の CDP アンサンブルより作成されることになる。

ここでもう一つ坑井間の CDP 重合において考慮すべき問題がある。それは、ある共通点で反射する複数のトレースを厳密に選び出すことは困難であるという問題である。Fig. 1(b)にはある共通点で反射する複数のトレースが描かれているが、実際には坑井間のジオメトリ並びに発振点および受振点間隔により、波の反射の法則が成立するトレースが必ずしも存在しない。この点について、本研究では実験に用いた波の波長を考慮し、ある点を中心に水平方向に以下に述べる範囲内に存在する反射点群をひとつの共通反射点とみなした (Fig. 3)。この

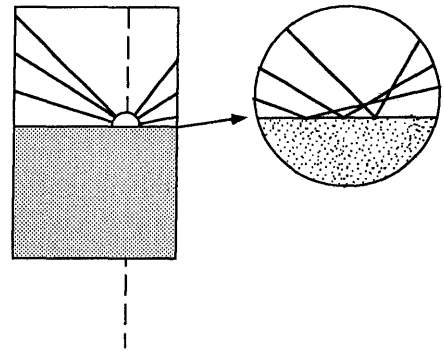


Fig. 3 Expanded schematic view of common depth point in case of the cross-well geometry

近似による誤差の要因には発振点および受振点間隔が考えられる。このことを Fig. 4 を用いて説明する。図において実線太線で示した波線はある共通反射点で反射する波線である。しかしこの波線は受振点列の中間に達しているため、受振点で観測することはできない。そこで実線細線で示した波線で近似することにする。このとき実線太線の波線経路と実線細線の波線経路の差が波長より短ければ、この近似による影響は少ないと判断する。Fig. 4 より次の関係が成り立つ。

$$M > M/2 > D > d$$

$M$  は受振点間隔、 $d$  は実線太線の波線経路と実線細線の波線経路の差を表すので、波長が受振点間隔より長ければ、実線太線の波線経路と実線細線の波線経路の差よりも長くなる。よって波長が発振及び受振点間隔よりも長い場合は、上記の近似による影響は少ないものとみなした。ただしここでの議論では波線経路に直線波線を仮定しており波線の曲がりやを考慮していないため、厳密

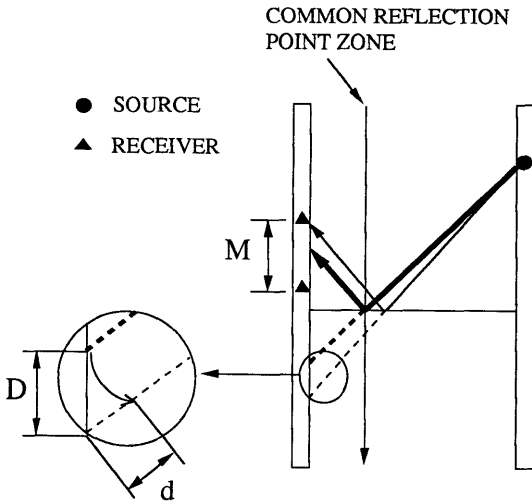


Fig. 4 Raypath reflected in a common reflection point and near a common reflection point

には実際の地下の波動伝播とは異なっている。しかしながら、受振点間隔程度の狭い範囲に到達した波の場合、前述した2つの波線経路差にくらべて充分小さいとみなし、この影響は考えていない。

さらにもう一つ、地表地震反射法と比較した場合の相違点がある。成層構造を仮定すると、地表地震反射法の場合は、ある反射点において CDP アンサンブルを構成する各々のトレースは同一層をもれなく通過するが、坑井間の場合は、ある反射点において CDP アンサンブルを構成する各々のトレースはそれぞれ通過する層が異なってしまう。このことにより、速度コントラストが大きく、層厚の小さい層を含む構造は、データ処理の結果に影響を及ぼすものと考えられる。つまり CDP アンサンブルにおいて反射イベントによる曲線が双曲線を成して

おらず、途中で折れ曲がってしまうため、速度解析によるパターン検出の際に障害となってしまいます。これを除去するには、この曲線の折れ曲がりを補正し、双曲線に回復させればよい。そのためにはマクロな地層の速度コントラスト及び層厚を把握する必要がある。

2.2 反射波走時式

地表地震反射法の中核的な処理である速度解析を坑井間で適用するには、坑井間のジオメトリにおける反射波走時式を導く必要がある。

Fig. 5(a)に地表地震反射法における発振点及び発振点のジオメトリを示す。このジオメトリにおける反射波走時式は良く知られているように、水平構造及び直線波線を仮定して式(1)となる。

$$t = \sqrt{T(0)^2 + \left(\frac{X}{V}\right)^2} \quad \left(T(0) = \frac{Z}{V}\right) \quad (1)$$

ここで  $t$  は走時、 $X, Z, T(0)$  はそれぞれオフセット、地層厚及びゼロオフセット時の片道走時、また  $V$  は波の伝播速度である。一方、Fig. 5(b)に坑井間における発振点及び受振点のジオメトリを示す。水平構造及び直線波線を仮定してこのジオメトリでの反射波(上方進行波)走時を導き、式(2)を得た。

$$t = \sqrt{\left(T(0) - \frac{X_s + X_r}{V}\right)^2 + \left(\frac{L}{V}\right)^2} \quad \left(T(0) = \frac{Z}{V}\right) \quad (2)$$

ここで  $X_s, X_r$  は発振点及び受振点までの深度、 $L$  は発振井、受振井間の距離である。

この式(2)は坑井間における CDP 重合法のデータ処理において基本となる式である。

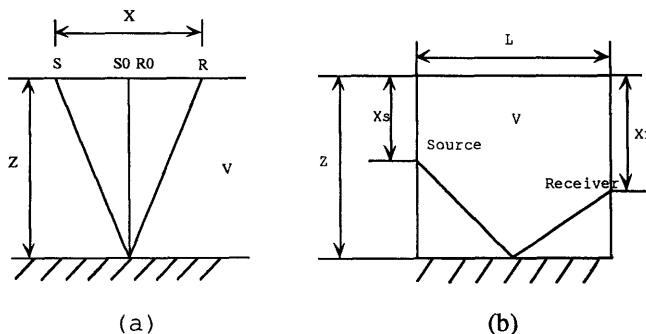


Fig. 5 Comparison of the calculus of the travel time between (a) conventional surface reflection and (b) cross-well reflection

### 2.3 速度解析及び CDP 重合

本研究では以下の手順で坑井間における速度解析を行った。

手順 1. 片道走時  $T(O)$  の基準位置を決める

手順 2. 式(2)において  $T(O)$  と  $V$  の値の組を仮定する。

手順 3.  $T(O)$  と  $V$  との積により深度が求まるので、その深度より浅い発振点及び受振点を選ぶ。

手順 4. さらにその中から、その深度において反射する発振点及び受振点の組をつくる。できた組の数が重合数であり、CDP アンサンブルを構成するトレースの数である。

手順 5. 式(2)の右辺について、いま  $T(O)$ ,  $V$ ,  $L$  は既知である。手順 3 で求めた各組の発振点及び受振点の位置を式(2)の右辺の  $X_s$ ,  $X_r$  に代入すれば、各組のトレースにおける反射波の走時が求まる。

手順 6. すべての組に対して反射波の走時を求め、その走時における記録の振幅をそれぞれ加算する。さらに加算された振幅値を重合数で割って正規化する。この値を手順 2 で仮定した  $T(O)$  と  $V$  の組における速度解析値とする。

手順 7. 次の  $T(O)$  と  $V$  の値の組を仮定して、以下、同様の手順を繰り返す。

以上述べた手順により速度解析を行い、重合速度関数を決定することができる。さらに重合速度関数により CDP 重合記録が得られる。

### 3. 各種モデルへの適用

2. で述べた坑井間における CDP 重合法のデータ処理を各種モデルに適用し、その可能性や問題点を検討した。はじめに数値実験データを用いて本研究の手法の有効性を確かめ、さらにより現実的なデータに近い室内模型実験データへ適用した。なおイメージングにおいては反射波のうち上方進行波を用いた。

#### 3.1 数値実験データによる検討

数値実験データには、P 波に対するスカラー波動方程式の差分近似モデリングにより作成した記録を用いた(サンプリング間隔 3.1 ms, 中心周波数 10 Hz のリッカーウェーブレット)。なお、反射波抽出は、AGC で反射波を強調し、さらにメディアンフィルタで直接波を除去する簡易な処理に依った。

##### 3.1.1 水平構造モデル

Fig. 6 に示す水平構造モデル(坑井間距離 600 m, 深

度 600 m と 1000 m にそれぞれ反射面をもつ) の場合のデータに対してデータ処理を行った。このモデルに対し、発振及び受振点間隔を 20 m とし 64 組の共通発振点記録を作成した。Fig. 7 に原記録から反射波を抽出する過程を示す。このように全記録から反射波を抽出し、2. で述べたデータ処理を行った。速度解析範囲を Fig. 6 の破線矢印で示す。また Fig. 8 に速度解析結果の一例 (Fig. 6 の velocity analysis 15) を示す。さらに Fig. 8 の速度解析結果に対する重合密度を Fig. 9 に示す。重合密度が小さい箇所は重合の効果という点からみれば信頼性が十分でないと言える。Fig. 8 より二つの反射面が認識されていることがわかる (Fig. 8 矢印で指した部分)。また丸で囲んだ部分にもピークが存在するが、これは Fig. 9 より重合密度が小さい場所での反射面を示す点であるので、信頼性はそれほど高くないと考えられるので解析に当たっては注意が必要である。

速度情報に関しては地表地震反射法の重合速度と同様に第一層に関しては真の値に近い結果が得られたが、二層以降に関しては真の値から少しずれた結果が得られた。次に Fig. 8 の速度解析結果を基に重合速度関数を決定し、CDP 重合記録を作成した。すべての速度解析範囲について CDP 重合記録を作成した結果を Fig. 10 に示す。この CDP 重合記録に対する重合密度を示したものが Fig. 11 である。この図は Fig. 10 に対する信頼性を示すと考えて良い。Fig. 10 と Fig. 11 を参照することに

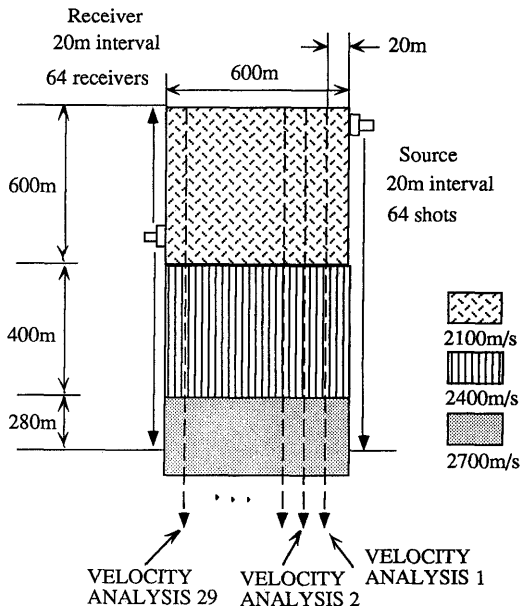


Fig. 6 Geological model for the horizontal layer

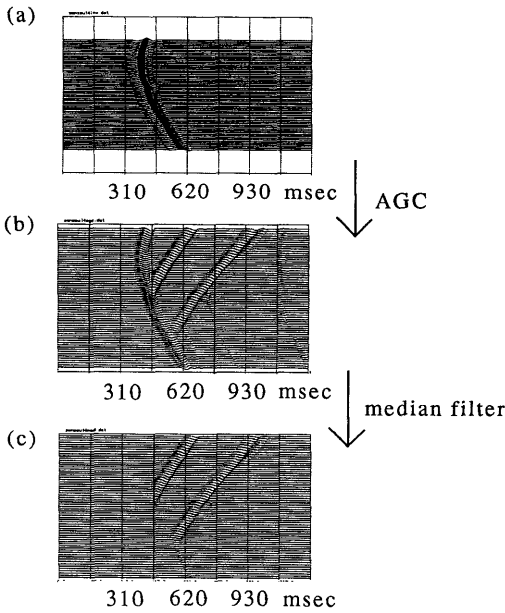


Fig. 7 Outline of the extraction of the reflection wavefield (a) original synthetic data (b) after agc (c) after median filter

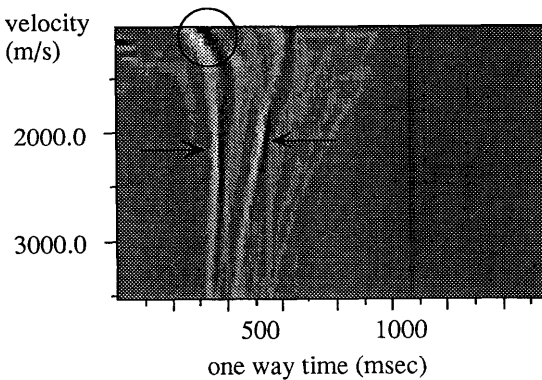


Fig. 8 Result of the velocity analysis (number of velocity analysis is 15)

より、重合密度が比較的大きい坑井間の中央付近の構造がよく再現されていることがわかる。また上側の反射面に較べて下側の反射面の坑井付近はうまくイメージングできていない。この理由は、一般に坑井付近で反射する反射波は、直接波と重畳してフィルタでは抽出しにくいことによる。加えて2.1で述べた速度コントラストによる影響により下側のイメージング精度が悪くなっているとも考えられる。このように CDP 重合図を詳細に

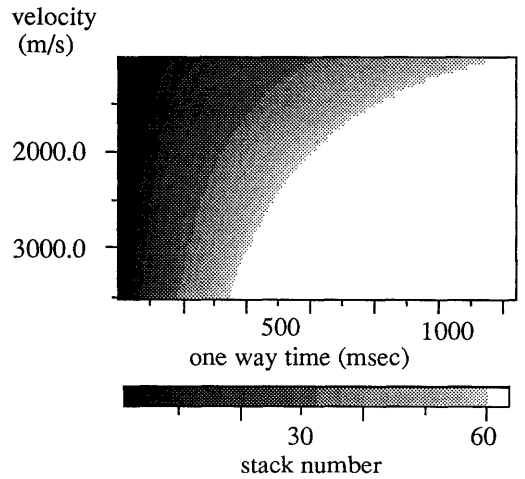


Fig. 9 Density of the stack number for the result of velocity analysis shown in Fig. 8.

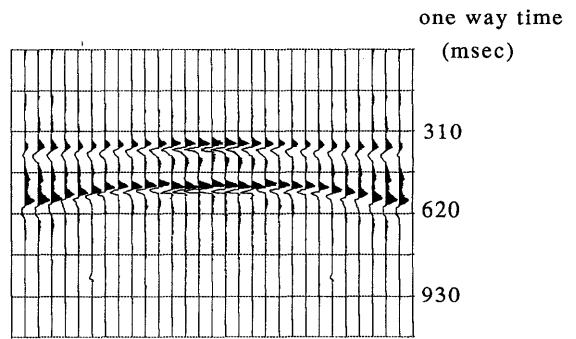


Fig. 10 CDP map for the model shown in Fig. 6

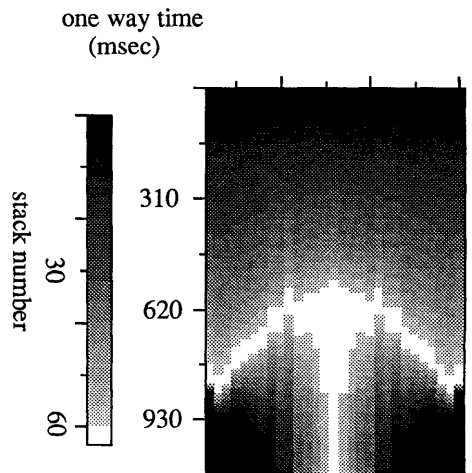


Fig. 11 Density of stack number for CDP map shown in Fig. 10

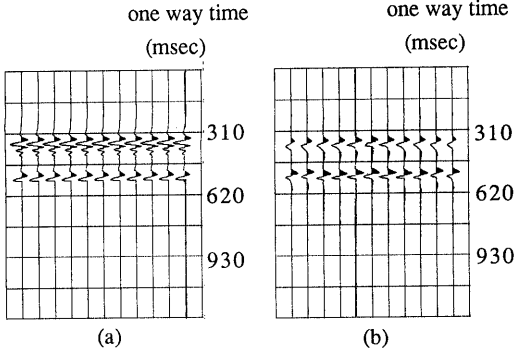


Fig. 12 Comparison between (a) zero offset and (b) CDP map shown in Fig. 6

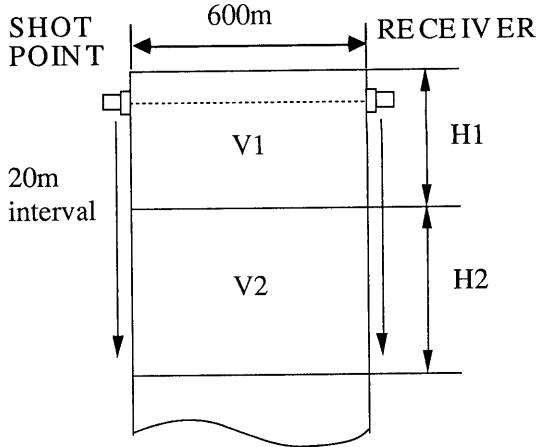


Fig. 13 Geological model for the horizontal layer

検討すれば、位置の違いによるイメージング精度に差がある。しかしながら、坑井間反射法の役割を考えた場合、坑井間の中央付近が関心の高い部分であると考えられるので（坑井付近は VSP 等によりイメージングが可能）、本論文では中央付近の処理結果を良否の判断基準とした。Fig. 10において比較的良好なイメージングがなされている坑井間の中央付近に対して検証を行うために、同じモデルに対して得られた地表からのゼロオフセット記録と比較した（Fig. 12）。Fig. 12(a), (b)はそれぞれゼロオフセット記録及び Fig. 10において比較的良好なイメージングがなされている坑井間の中央付近部分である。その結果比較的良好な一致が見られることがわかった。

### 3.1.2 速度コントラスト及び層厚による影響

3.1.1で扱ったモデルでは速度コントラストは比較的小さいため、妥当なイメージングが成されたが、ここでは速度コントラストの影響が実際にどれくらいあるのかを数値実験データを用いて考察する。

数値実験に用いるモデルを Fig. 13に示す。モデルは2つの反射面をもち、第一層の速度及び層厚をそれぞれ V1, H1 とし、第二層の地層及び層厚をそれぞれ V2, H2 とする。これら V1, H1, V2, H2 の各パラメータを変化させて種々の速度コントラストモデルを作成した。これら種々のモデルにおいて反射波に対する共通波線角度記録（発振及び受振レベルが同一の記録）を作成した（発振及び受振間隔 20 m）。坑井間のジオメトリにおいては前述したように共通反射点を厳密に編集することは困難であるが、成層構造を仮定すれば共通波線角度記録は坑井間中央に対しての CDP アンサンブルとなる。ここでは説明を簡略化するため、共通波線角度記録を用い

る。このとき速度コントラスト及び層厚の影響の大小を判断するため、同一モデルにおいて作成される地表からのゼロオフセット記録と比較した。Fig. 14(a)-(f)にそれぞれ各モデルに対する結果を示す。各モデルのパラメータを図説に示す。図中 I が反射波に対する共通波線角度記録である。図中で矢印で示した部分で反射イベントの双曲線が折れ曲がっている。なお、層厚の変化によって双曲線の折れ曲がりの位置が変化し、速度コントラストの変化によって折れ曲がりの度合いが変化している。II が坑井間における CDP 重合記録、III が地表からのゼロオフセット記録である。すべての結果において上側の反射面は正しくイメージングされているが、下側の反射面に関しては地層速度のコントラスト及び層厚に応じてイメージング精度が変化している。これは下側からの反射イベントによる双曲線が途中で折れ曲がっているためである。Fig. 14において(c)及び(e)及び(f)のモデルに対するイメージング結果が他と比較して余りよくないことがわかる。このことにより地層速度のコントラストが大きい場合、かつ層厚が小さい場合にはこれらによる影響が大きいと考えられる。しかしその他のモデルに対してはイメージング精度がそれほど悪くなることはなかった。これは単純な重合によるデータ処理自体がロバストな性質をもつことによると思われる。

### 3.1.3 断層構造モデル

断層構造に対する適用性を確かめるために、Fig. 15に示すモデルに対して水平構造モデルの場合と同様のデータ処理を行った。なお速度解析範囲を Fig 15の破線矢印で示す。その結果得られた CDP 重合記録を Fig.

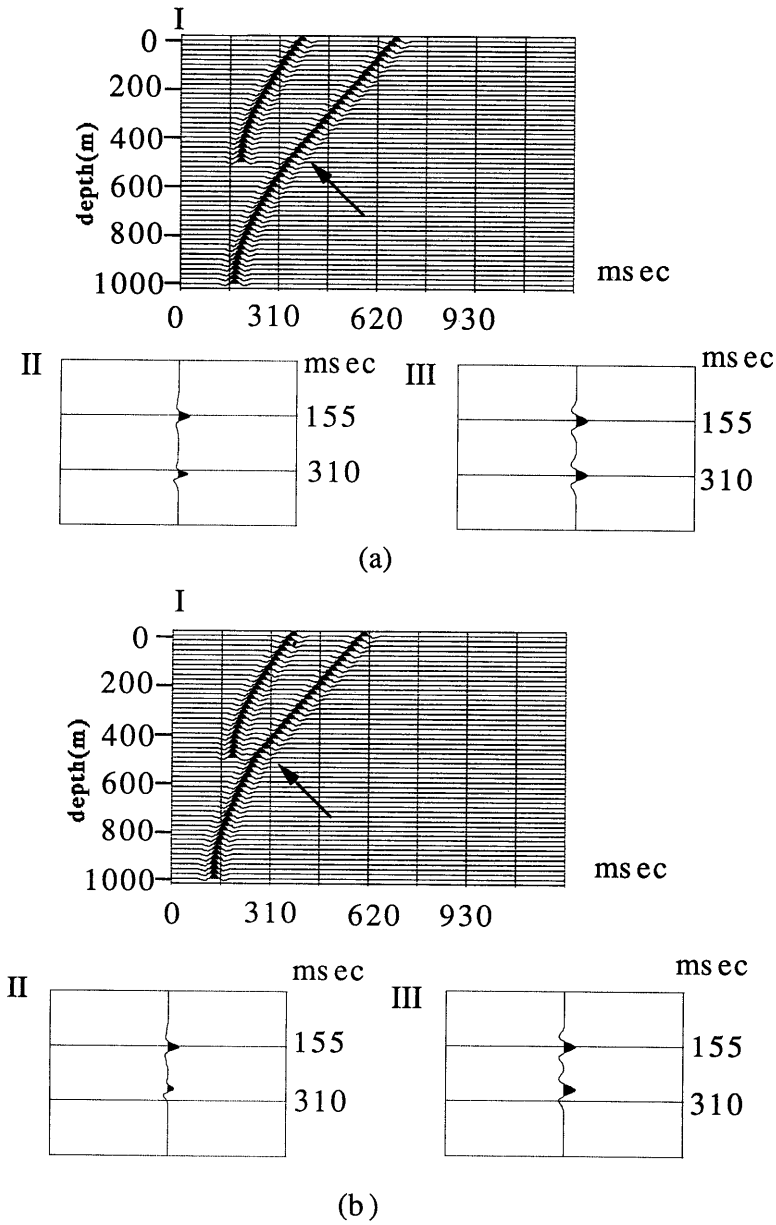


Fig. 14 Results of CDP map in cross-well geometry and zero offset record (1/3)  
 I Common ray angle gather  
 II CDP map in cross-well geometry  
 III Zero offset record  
 (a)  $V_1=3000$  m/s,  $V_2=3300$  m/s,  $H_1=500$  m,  $H_2=500$  m  
 (b)  $V_1=3000$  m/s,  $V_2=4200$  m/s,  $H_1=500$  m,  $H_2=500$  m



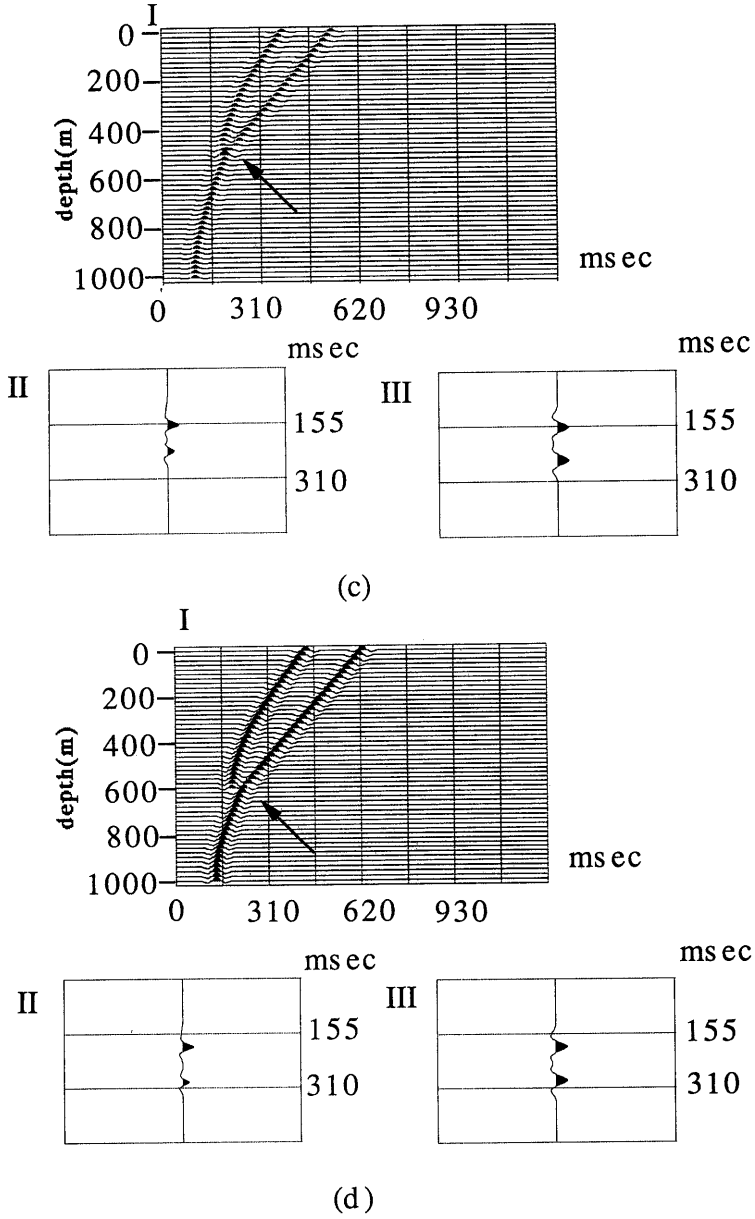


Fig. 14 Results of CDP map in cross-well geometry and zero offset record (2/3)

I Common ray angle gather

II CDP map in cross-well geometry

III Zero offset record

(c)  $V_1=3000$  m/s,  $V_2=5500$  m/s,  $H_1=500$  m,  $H_2=500$  m

(d)  $V_1=3000$  m/s,  $V_2=4200$  m/s,  $H_1=600$  m,  $H_2=400$  m

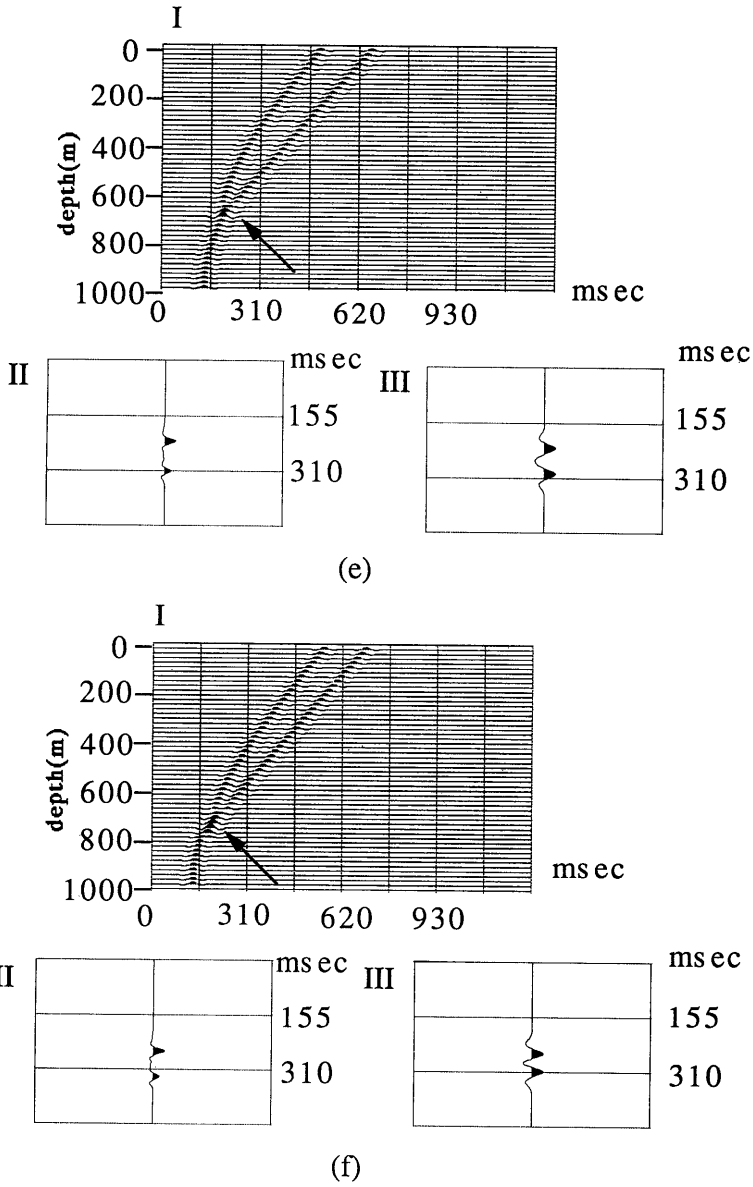


Fig. 14 Results of CDP map in cross-well geometry and zero offset record (3/3)

I Common ray angle gather

II CDP map in cross-well geometry

III Zero offset record

(e)  $V_1=3000$  m/s,  $V_2=4200$  m/s,  $H_1=700$  m,  $H_2=300$  m

(f)  $V_1=3000$  m/s,  $V_2=4200$  m/s,  $H_1=800$  m,  $H_2=200$  m

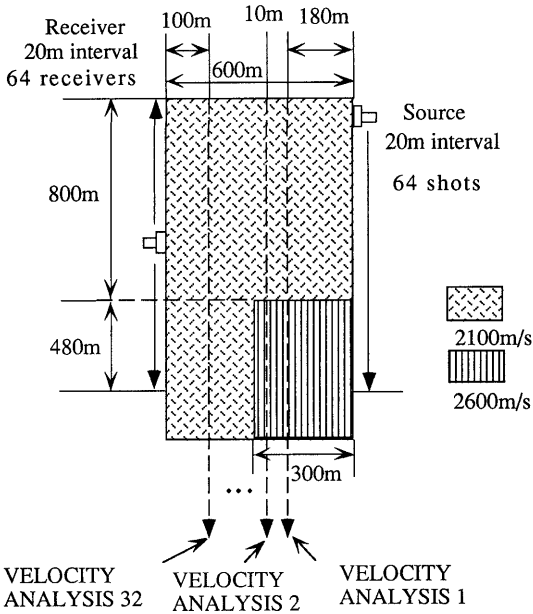


Fig. 15 Geological model for the fault structure

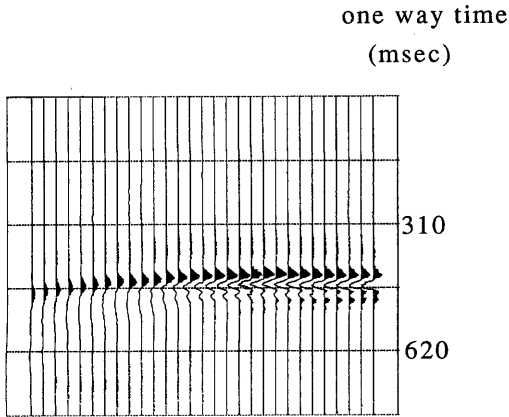


Fig. 16 CDP map (before migration) for the model shown in Fig. 15

16に示す。この図において反射面の存在しない領域になだらかな曲線がイメージングされているが、これは断層のエッジからの回折波と考えられる。Fig. 17に Fig. 16の記録に対するf-kマイグレーション処理後の記録を示す。マイグレーション処理により回折波の影響が除去され断層構造が再生されていることがわかる。

### 3.1.4 速度異常点構造モデル

データ処理のインパルスレスポンスを調べるために

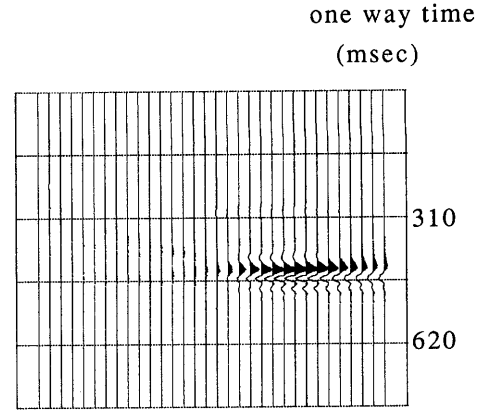


Fig. 17 CDP map (after migration) for the model shown in Fig. 15

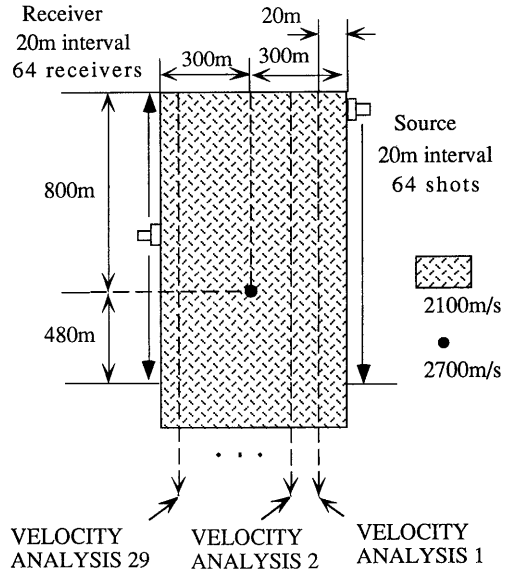


Fig. 18 Geological model for the velocity anomaly point model

Fig. 18に示すモデルに対して同様のデータ処理を行った。このモデルは一樣な速度場に速度異常点が存在する構造である。速度解析範囲を Fig. 18の破線矢印で示す。その結果得られた CDP 重合記録を Fig. 19に示す。Fig. 19においてなだらかな曲線がイメージングされていることがわかる。この曲線は速度異常点が存在する箇所を頂点としてこの点から離れるにしたがってイメージング精度が悪くなっている。これは速度異常点で発生した回折波をその点から離れた位置でも不完全ながら重合

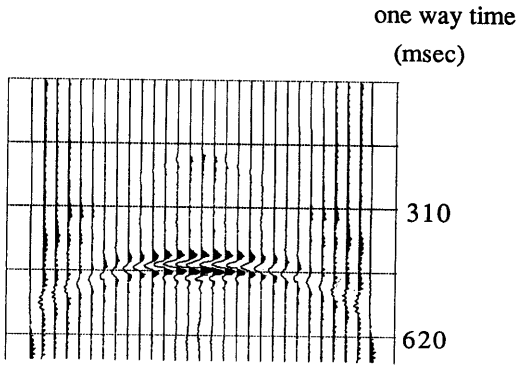


Fig. 19 CDP map (before migration) for the model shown in Fig. 18

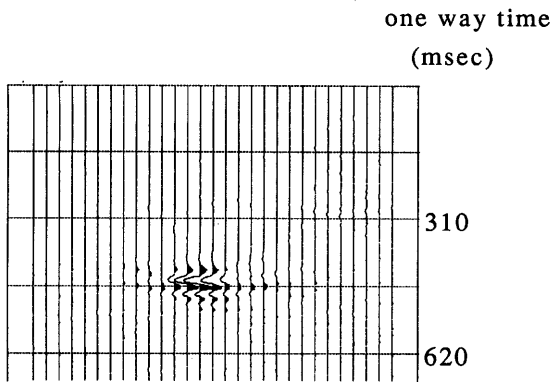


Fig. 20 CDP map (after migration) for the model shown in Fig. 18

してしまふからである。Fig. 20に Fig. 19の記録に対する f-k マイグレーション処理後の記録を示す。マイグレ

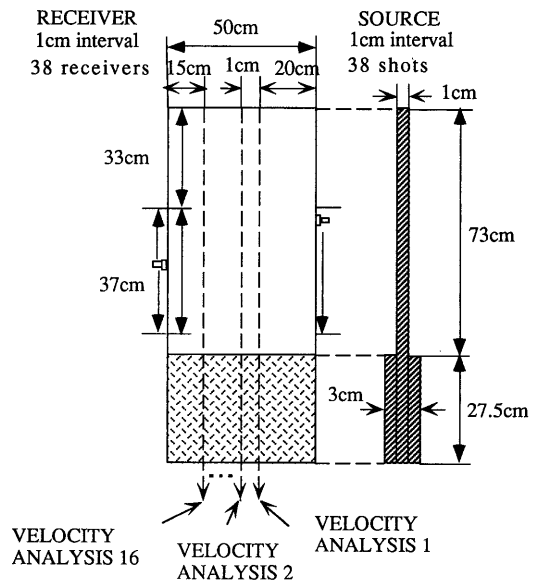


Fig. 21 Schematic view of experimental model

ーション処理により速度異常点が再生されていることがわかる。

### 3.2 室内模型実験データによる検討

本手法をより現実の記録に近い室内模型実験データに適用した。Fig. 21に室内模型実験に用いたモデルを示す。モデルは縦100.5 cm, 横50 cm, 厚さ 1 cm の塩化ビニル板で、板の下27.5 cm を同質の 2 枚の板で挟んで見掛け上密度を 3 倍にして音響インピーダンスに変化をもたしている。塩化ビニルの P 波伝播速度は約1800 m/s である。このモデルに対して Fig. 21に示した条件

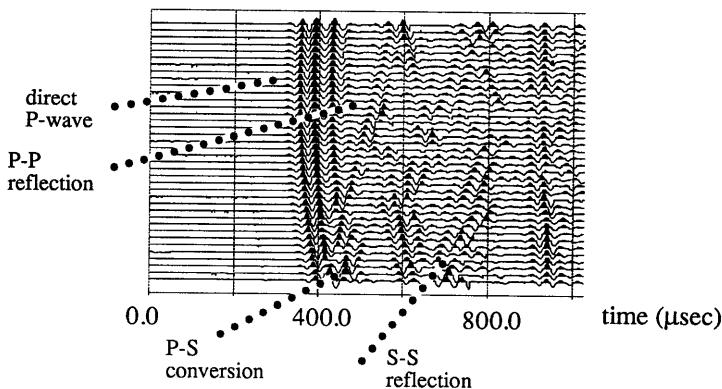


Fig. 22 Observed experimental data (common source gather) after AGC (source depth is 43 cm)

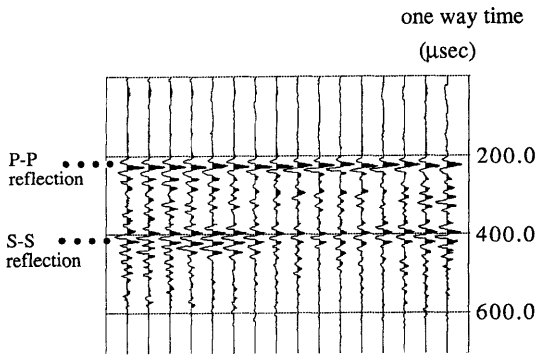


Fig. 23 CDP map for the model shown in Fig. 21

で38セットの共通発振点記録を取得した（サンプリング間隔  $1\mu\text{s}$ ，バンドパスフィルタ20–30 KHz，発振及び受振点間隔  $1\text{cm}$ ）。その中の一つを Fig. 22 に示す（AGC 適用後）。反射波抽出に関しては数値実験データと同様の処理を行った。速度解析範囲を Fig. 21 の破線矢印で示す。その結果得られた CDP 重合記録が Fig. 23 である。Fig. 23 より P-P 反射波のみならず S-S 反射波によるイメージングもなされていることがわかる。ただしこの場合、データを取得しはじめた箇所（モデル上部から  $33\text{cm}$  の位置）を片道走時の基準としている。ここで注目すべきは、P-S 変換波のイメージングは成されていないことである。これは P-S 変換波の放射パターンが P-P 反射波や S-S 反射波と異なるためである。

#### 4. 結 語

坑井間のジオメトリにおいて従来の地表地震反射法技術の中核技術である CDP 重合法を適用した結果、以下のことがわかった。

(1) 坑井間のトモグラフィ調査で一番知りたい場所（坑井付近ではなく、むしろ離れた中央付近）で良好なイメージングが得られることが示され、坑井間における CDP 重合法適用の可能性は十分あると思われる。ただし坑井間のジオメトリ上の制約のため、各反射点における重合数が異なり、常に各処理過程や結果において重合数の状況を検討に加える必要があることも明らかになった。またこの処理を適用するためには使用する波長と発振点及び受振点間隔を充分考慮して処理することが必要であることも明らかになった。

(2) 数値実験データを用いて速度コントラスト及び層厚の影響を評価した結果、比較的速度コントラストの小さい構造（一般的な石油堆積層など）に対しては、速度コントラストによる影響は小さいものと考えられる。ま

た層厚の影響に関しては定量的な表現はできないが層厚が小さくなると影響が出るということがわかった。従ってこのデータ処理では層厚が小さい層を含む構造に対してはイメージング精度が悪くなるものと思われる。この場合は補正処理を行なう必要がある。即ち CDP アンサンブルにおける反射イベントの成す折れ曲がった曲線を双曲線に回復させる処理を行なえばよい。そのためには地層のマクロな速度構造をある程度把握する前処理が必要である。いずれの場合にもデータ処理自体の全体的傾向はロバストな処理手法であると思われる。

(3) 室内模型実験データへ CDP 重合法を適用した結果、P-P 反射波のみならず、S-S 反射波による構造イメージングができ、S 波利用による反射波イメージングの可能性を示唆することができた。ただし P-S 変換波に関しては放射パターンが P-P 反射波や S-S 反射波と異なるためイメージングが成されないことも明らかとなった。

最後に本手法の計算時間について触れる。本手法は各深度毎に CDP アンサンブルを構成するトレースを計算し、集めなければならないため、計算時間がかかる。例えば室内模型実験データにおける計算時間は、反射波抽出処理・速度解析処理・CDP 重合処理の一連の処理を含めて、東京大学大型計算機センター M-880/310 を用いて CPU 時間で約 2 時間程度であった。しかし坑井間を利用したトモグラフィ調査の場合、通常の方法地震探査と比べると、データ量及びデータ取得頻度の点ではるかに少ないと言える。今後実データを処理するにあたり、計算時間の軽減に関する工夫を考えていく必要があるが、本手法の実データへの適用は非現実的ではないと思われる。

#### 参 考 文 献

- HARRIS, J. M., RECTOR, J. W., LAZARATOS, S. K., and VAN SCHAACK, M. (1992): High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: *part 1, presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG, expanded abstracts*, 35–39.
- LAZARATOS, S. K., RECTOR, J. W., HARRIS, J. M. and VAN SCHAACK, M. (1992): High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: *part 4, presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG, expanded abstracts*, 49–53.
- LAZARATOS, S. K., RECTOR, J. W., HARRIS, J. M., and VAN SCHAACK, M. (1993): High-resolution, cross-well, reflec-

- tion imaging: Potential and technical difficulties, *Geophysics*, **58**, 1270-1280.
- 松島 潤 (1994): 坑井間反射法技術に関する基礎研究, 東京大学大学院工学系研究科, 修士論文.
- PRATT, R. G. and GOULTY, N. R. (1991): Combining wave-equation imaging with travelttime tomography to form high-resolution images from crosshole data, *Geophysics*, **56**, 208-224.
- 六川修一, 松島 潤 (1993): 坑井間反射法の基礎研究—データ処理—, 物理探査学会第89回学術講演会論文集, 178-181.
- 六川修一, 松島 潤 (1994): 坑井間における CDP 重合法適用の試み, 物理探査学会第90回学術講演会論文集, 424-428.
- ROBERT, R. S. (1990): Crosswell Seismic Imaging Using Reflections, *Geotomography vol. 1, Proceedings of the 1st SEGJ/SEG International Symposium on Geotomography*, 45-53.
- STORK, C. (1992): Reflection tomography in the postmigrated domain, *Geophysics*, **57**, 680-692.
- VAN SCHAACK, M., HARRIS, J. M., RECTOR, J. W. and LAZARATORS, S. K. (1992): High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir: *part 2, presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG, expanded abstracts*, 40-44.