

複数の極浅孔を用いた坑井間反射法地震探査実験

松島 潤* 横田俊之** 加野直巳*** 山口和雄*** 木口 努***

Jun MATSUSHIMA, Toshiyuki YOKOTA, Naomi KANO, Kazuo YAMAGUCHI, and Tsutomu KIGUCHI (1997)
Experiment on cross-well seismic reflection survey using shallow holes. *Bull. Geol. Surv. Japan*,
vol. 48 (12), p. 653-660, 13 figs, 2 tables.

Abstract: Cross-well seismic records were collected in the test field within the premise of Tsukuba Research Center, AIST. In general, characteristics of cross-well records are as follows; (1) cross-well records have higher resolution than surface seismic survey records because the source and receiver layout of cross-well survey is closer to targets, (2) the survey is free from a low velocity layer near surface that attenuates high frequency waves, and (3) the survey is free from surface waves. Two types of receiver (3-component geophones and borehole shuttles) were used for data acquisition. The records acquired with 3-component geophones show a high signal to noise ratio because of its hard coupling with ground. Diffraction stacking with velocity analysis was applied to cross-well seismic records acquired with 3-component geophones. The result indicates that cross-well reflector imaging can produce higher resolution subsurface imaging than surface seismic reflection methods. In addition, one dimensional numerical experiments illustrated that it is necessary to take care when interpreting the stacked record by use of high frequency observed data.

要 旨

工業技術院筑波研究センター構内の松林の中に設けられた弾性波伝播特性実験場において坑井間反射法地震探査記録を取得した。一般に坑井間反射法地震探査記録は以下の特徴を有する。

(1) 探査ターゲットに近づいて探査を行うため、地表からの探査に比べて高分解能の記録が得られる。(2) 地表付近の軟弱層(一般的には低速度であり、地震波動の高周波成分を減衰させる)の影響を受けない。(3) 表面波の影響を受けない。

坑井間反射法地震探査記録は2種類の受振器(埋設3成分受振器及びボアホールシャトル)により取得し、得られた記録の品質を比較した結果、地層とのカップリングが良好な埋設3成分受振器を用いた方がS/N比の高い記録が得られた。埋設3成分受振器で取得された坑井間地震記録に対して重合速度解析を伴った散乱重合法処理を適用し、重合断面を作成した。その結果、この坑井間地震記録より得られた重合断面は地表から行われた反射法地震探査と比較してより詳細な地層構造を与えることを示した。

また得られる重合断面は用いる周波数によってその反

射面構造の見え方は本質的に違ってくる可能性があるため、重合断面が高分解能化するにあたりその解釈において注意を要することを一次元の数値実験により示唆した。

1. はじめに

地質調査所では「大深度地下空間開発技術の研究開発」の一環として高精度地下構造評価技術の研究を行った。この研究では、堆積軟岩の構造評価および物性評価を行うための調査技術の開発に必要な基礎データを取得し、都市地下大空間利用に先立つ総合的調査法および解析技術の確立を目的としている。

これまでの一連の研究では坑井内受振器の基本特性の解明(加野ほか, 1993; 横田ほか, 1994)、走時トモグラフィ解析による弾性波伝播特性実験場のP波速度分布構造の推定(横田ほか, 1994)、地表からの反射法地震探査による弾性波伝播特性実験場付近の浅部地質構造の推定(山口ほか, 1994)が行われてきた。

本稿では地表からの反射法地震探査あるいは走時トモグラフィ解析等に比べてより高分解能な解析結果が得られる坑井間反射法地震探査を適用し、実験場の詳細な地質構造を推定することを目的とする。

坑井間反射法地震探査とは坑井間の幾何的配置において観測される反射波を利用して坑井間あるいはその下部の構造をイメージングする技術であり、従来の地表から

Keywords: cross-well survey, seismic reflection, diffraction stacking, high resolution.

*東京大学工学部 (Faculty of Engineering, University of Tokyo; 2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan)

**石油公団 (Japan National Oil Corporation; 1-2-2, Hamada, Mihamaku, Chiba, Chiba, 261 Japan)

***地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

の探査に比較して以下の利点を持つ。

(1) 探査ターゲットに近づいて探査を行うため、地表からの探査に比べて高分解能の記録が得られる。

(2) 地表付近の軟弱層(一般的には低速度であり、地震波動の高周波成分を減衰させてしまう)の影響を受けない。

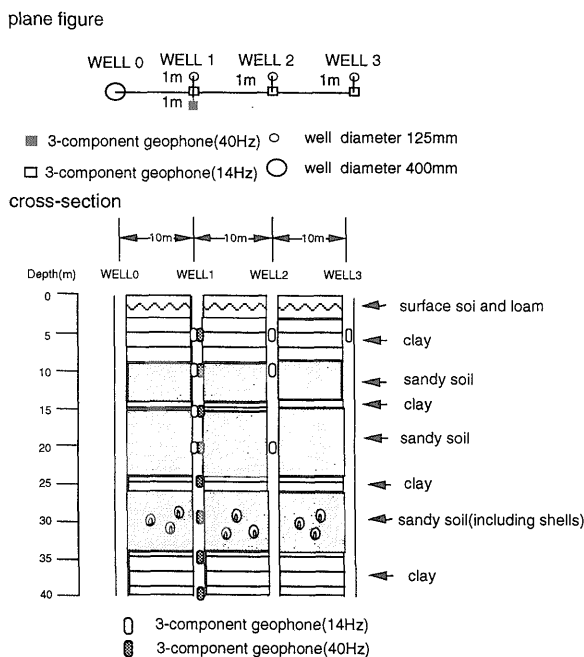
(3) 表面波の影響を受けない。

地表からの反射法地震探査で推定される地質構造は弾性波伝播特性実験場における弾性波伝播経路などを推定する際の基礎的データであり、坑井内機器の特性解析や走時トモグラフィ解析結果の評価のための一定の基準となるものであるが、坑井間反射法地震探査で推定される地質構造はさらに詳細な基礎的データを与えるものとして位置づけされる。

ここでは弾性波伝播特性実験場において坑井間反射法地震探査を実施し、同フィールドにおいて実施された陸上反射法地震探査により得られた断面と比較し、坑井間反射法地震探査により得られた断面の分解能の優位性について検討する。

2. 坑井間地震探査実験の概要

弾性波伝播特性実験場は、茨城県つくば市の工業技術院筑波研究センター構内の松林の中に位置し、4本の深度40mまでの井戸が設けられている。その中に8個の3成分受振器を埋設してある(木口ほか, 1992)。第1図に坑井配置並びに地質断面を示す。今回の実験では受振



第1図 埋設3成分受振器と実験用坑井配置及び地質断面(上側は平面図, 下側は断面図)。

Fig. 1 Location of wells and buried 3-component geophones in the horizontal plane (upper) and in the vertical plane with geological section (below).

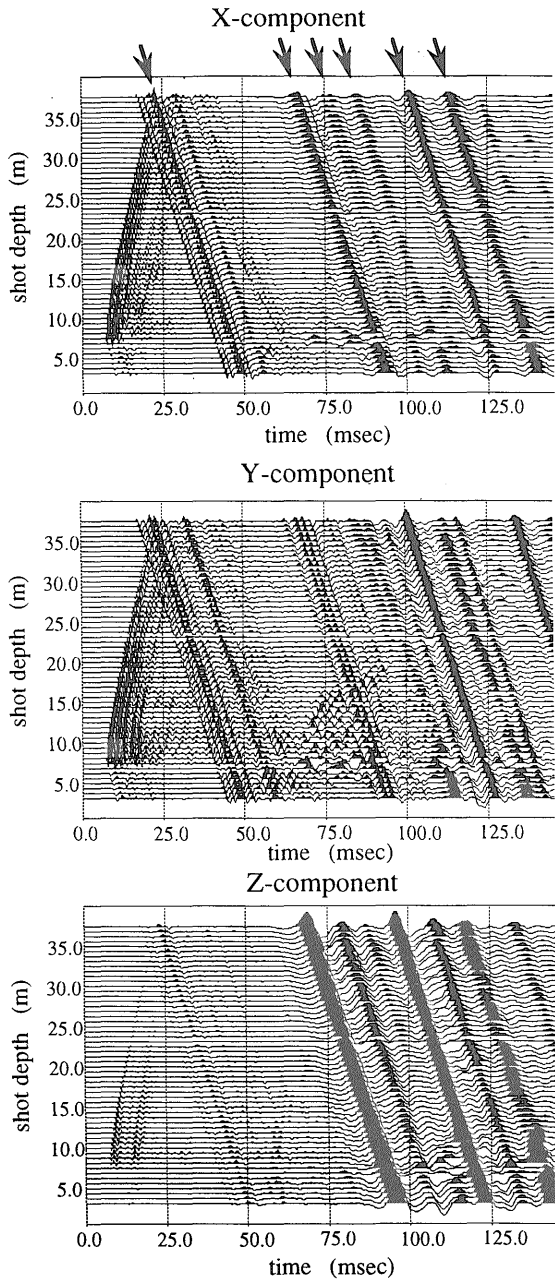
器として埋設3成分受振器の他にボアホールシャトル(応用地質(株)製)とよばれる3成分坑内受振器を用いた。このボアホールシャトル3成分受振器の特徴は、ロッキングアームによる坑壁圧着型であるため、ハイドロフォンなどの坑壁非圧着型の受振器に比べてチューブウェーブの軽減に効果がある。震源としてOWS(Oyo Wappa Shingen, 応用地質(株)製)とよばれるインパルス型坑井内震源を用いた。OWS震源の深度を変えながら発震を行ない、埋設3成分受振器及びボアホールシャトルにより波動を観測した。第1表に埋設3成分受振器を用いた調査仕様を示し、第2表にボアホールシャトルを用いた調査仕様を示す。第2図に埋設3成分受振器を用いて取得された記録例を示し、第3図にボアホールシャトルを用いて取得された記録例を示す。なお第2図において矢印で示した波動がチューブウェーブである。埋設3成分受振器を用いて取得された記録は、ボアホールシャトルを用いて取得された記録に比べてS/N比の良い記録が得られていることがわかる。この原因については、ボアホールシャトルに比べて埋設3成分受振器の方が地層に対するカップリングが良いためであると考えられる。しかしボアホールシャトルの坑壁への圧着力の強化によりボアホールシャトルを用いて取得される記録のS/N比は向上されると思われる。この点は今後の実験の課題としたい。第4図に埋設3成分受振器を用いて取得された任意の記録に対する振幅スペクトルを示す。卓越周波数は600Hz前後である。

第1表 震源, 受振器, 調査の仕様(埋設3成分受振器).
Table 1 Specifications of data acquisition in case of 3-component geophones.

Source	OWS (OYO)
Shot depth	3.125 m - 38.75 m (WELL1) 3.125 m - 37.5 m (WELL2) 5.0 m - 38.75 m (WELL3)
Shot interval	0.625 m
Number of stacks	4 times, normally
Receiver	3-component geophone (OYO GEOSPACE HS-J-K) 14Hz and 40Hz
Receiver depth	5,10,15,20 m (14Hz, 10 m distant from WELL0) 5,10,20 m (14Hz, 20 m distant from WELL0) 5,10,15,20,25,30,35,40 m (40Hz, 10 m distant from WELL0)
Sampling rate	0.125 msec

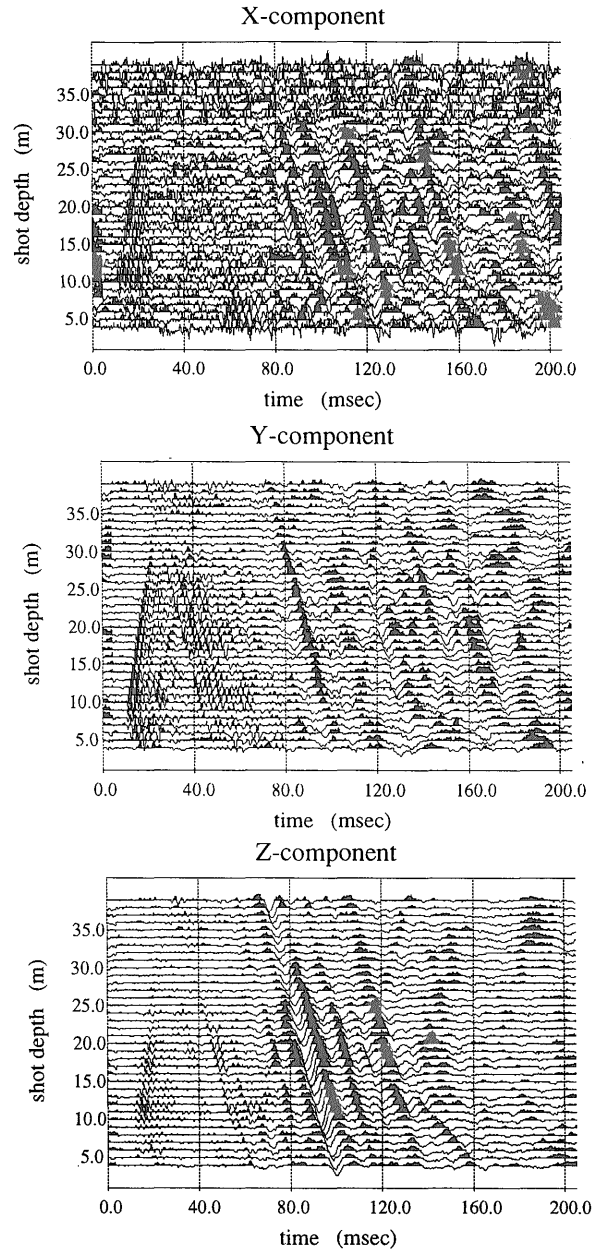
第2表 震源, 受振器, 調査の仕様(ボアホールシャトル).
Table 2 Specifications of data acquisition in case of borehole shuttle.

Source	OWS (OYO)
Shot depth	4 m - 39 m (WELL2)
Shot interval	1.0 m
Number of stacks	2 times, normally
Receiver	borehole shuttle(OYO)
Receiver depth	6,7,8,10,15,20,25,30,35,40 m (WELL1)
Sampling rate	0.2 msec



第2図 埋設3成分受振器により取得された共通受振点記録 (WELL2発震, WELL1受振, 受振器深度5m). 矢印はチューブウェーブを指す. X成分はWELL0から押しの波が来たときに最大感度を持ち, Y成分はそれと90度の角度に最大感度を持ち, またZ成分は上方から押しの波が来たときに最大感度を持つ.

Fig. 2 A sample of common receiver gather obtained with 3-component geophones (source well is WELL2, receiver well is WELL1 and the depth of receiver is 5m). Arrows indicate tubewaves. X-component of 3-component geophones is directional to WELL0. The directivity of Y-component is perpendicular to X-component in horizontal plane. Z-component is directional to surface.

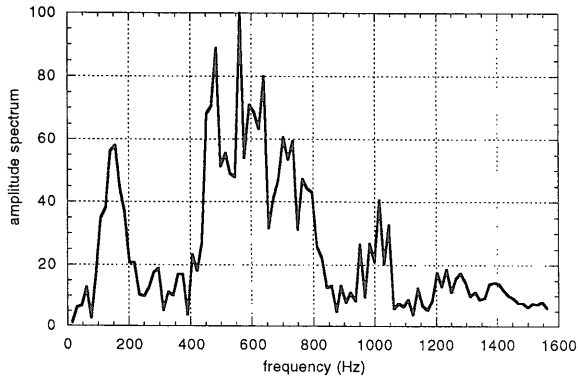


第3図 ポアホールシャトルにより取得された共通受振点記録 (WELL2発震, WELL1受振, 受振器深度5m).

Fig. 3 A sample of common receiver gather obtained with borehole shuttle (source well is WELL2, receiver well is WELL1 and the depth of receiver is 5m).

3. 坑井間反射法地震探査データ処理

データ処理は重合速度解析を伴った散乱重合法 (Matsushima *et al.*, 1997a) を用いた. この手法の特徴は通常のCDP重合法による重合効果ばかりでなく, マイグレーションの側面も内包していることであり, 原理的には重合前マイグレーションと同じである. このためデータ処理はCDP重合法より大量になるが重合後マイグレーションなしに反射面を良好にイメージングすることができる. 通常のCDP重合法は鏡面反射波のみを解析



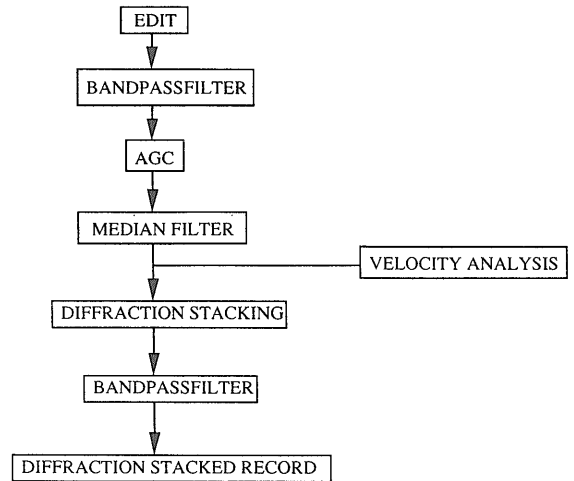
第 4 図 埋設 3 成分受振器により取得された記録の振幅スペクトル。
Fig. 4 Amplitude spectrum of a record acquired with 3-component geophones.

対象しているため成層構造でのみしかその効果を発揮できないが、地層を散乱点の集合と仮定する散乱重合法は対象とする構造に成層構造を仮定するといった仮定を設けずに解析を行う。そもそも地層を散乱点の集合と仮定する考えはマイグレーション処理の基本的な考えに相当しており、散乱重合法は不規則構造をもイメージすることが可能である。また水平反射面においても CDP 重合法に比べて散乱重合法の方が S/N 比の高い重合断面が得られる可能性があることが Matsushima *et al.* (1997b) によって示唆されている。

これまで坑井間反射法地震探査データ処理として提案されてきた手法は VSP-CDP 法 (Lazaratos *et al.*, 1993; Harris *et al.*, 1992; Van Schaack *et al.*, 1992) あるいはマイグレーション法 (Sam *et al.*, 1992) 等がある。これらの手法はあらかじめ別の手法により速度場を推定しなければならない。しかし本稿で用いる散乱重合法は重合速度解析を行い、重合効果の良好な速度を各点において検索するため、そのような速度場は別途あらかじめ求める必要はない。

第 5 図に坑井間反射法地震探査データ処理フローを示す。取得された記録に対してバンドパスフィルタ (300-800Hz) を施し、次に AGC (Automatic Gain Control) 処理を行い、減衰した振幅を回復する。この AGC 処理は一つ一つの地震記録中の振幅を平均化することで、かならずしも真の振幅を回復しないが、異常に強い振幅を抑制し弱い振幅を強調できる。

メディアンフィルタはチューブウェーブによる変換波を除去する目的で適用した。なお、今回の処理では P 波初動の除去を行っていない。これは反射波を利用して構造イメージングを行う際に P 波初動の影響は少ないためである (Matsushima *et al.*, 1997a)。なおメディアンフィルタの原理は、複数の地震記録における中央値 (メディアン) を抽出し、その中央値 (メディアン) により作られる地震記録を、複数の地震記録から減算する処理

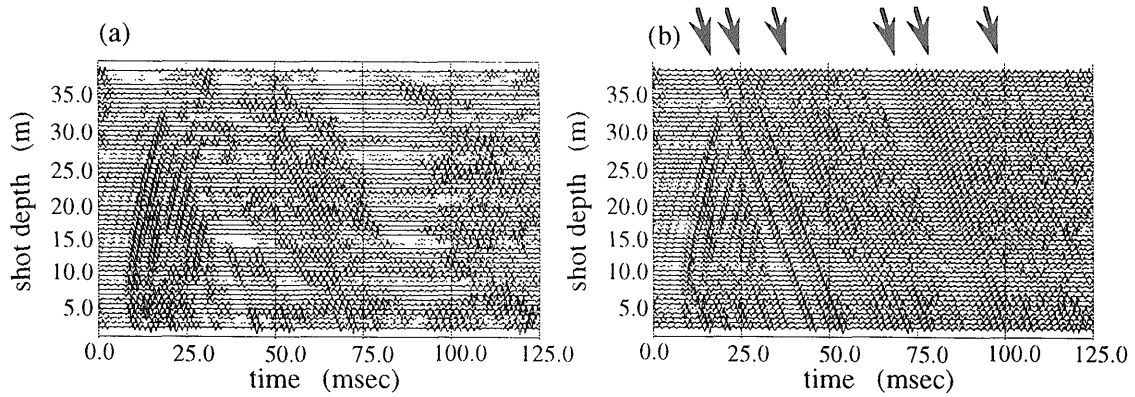


第 5 図 坑井間反射法データ処理フロー。
Fig. 5 Flowchart of data processing for cross-well seismic reflection survey.

である。ここでは、チューブウェーブを一列に並べてメディアンフィルタを適用し、チューブウェーブ除去を行った。

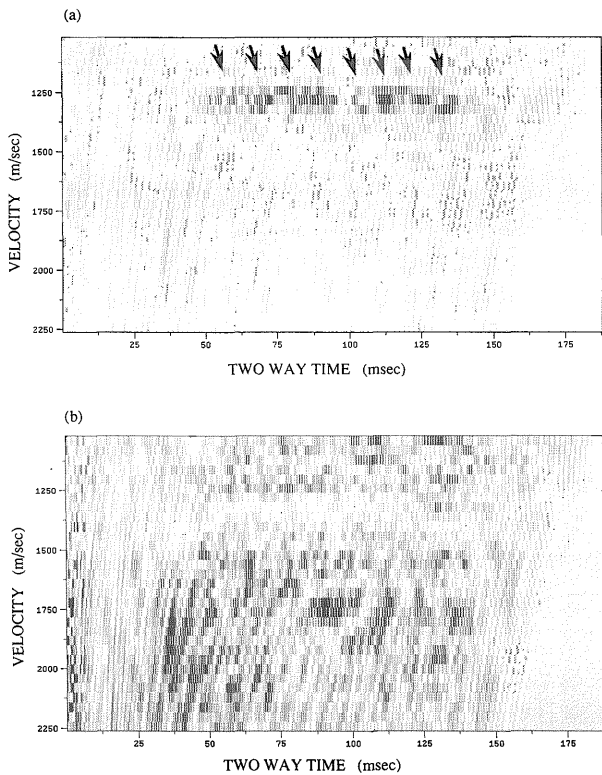
今回の処理に用いたデータは埋設 3 成分受振器 (40Hz) で取得された 3 成分のうち X 成分 (WELL0) の方から波が到来したときに最大感度を持つ水平成分である。第 6 図に第 2 図に示した埋設 3 成分受振器 (40Hz) で取得された 3 成分のうち X 成分の記録に対して、メディアンフィルタまでの一連の前処理を適用した後の記録、及びメディアンフィルタを適用しなかった記録を示す。メディアンフィルタにより、チューブウェーブがほぼ除去されていることがわかる。

これらの前処理を行った記録に対して散乱重合法による速度解析 (Matsushima *et al.*, 1997a) を行った。第 7 図にメディアンフィルタ適用前及びメディアンフィルタ適用後の記録に対する速度解析パネルの一例をそれぞれ示す。速度解析パネルとは、速度を変化させながら、NMO (Normal Move Out) 補正、重合を繰り返し、結果の振幅分布を表示したもので、このパネルから重合効果の高い速度を決定する。メディアンフィルタを適用しなかった記録に対する速度解析パネルにおいて 1300m/s 付近にピーク列が見られ、メディアンフィルタを適用した記録に対する速度解析パネルと比較して、このピーク列はチューブウェーブによるものであることがわかる。メディアンフィルタを適用した記録に対する速度解析パネルに基づいて散乱重合記録を作成した (第 8 図)。また山口ほか (1994) により得られた地表から行われた反射法地震探査の結果を第 9 図に示す。両者を比較するために、垂直往復走時が 0.05-0.15 (sec) の箇所をそれぞれの重合記録から抜きだして時間軸のスケールを揃えたものを第 10 図に示す。坑井間探査により得られた重合断面の方が地表からの探査のそれより高分解能になっているこ



第6図 メディアンフィルタによるチューブウェーブの除去。

(a) メディアンフィルタ適用後, (b) メディアンフィルタ適用前. 矢印はチューブウェーブを指す.
Fig. 6 Remove of tubewaves by application of median filter. (a) after application of median filter, (b) before application of median filter. Arrows indicate tubewaves.

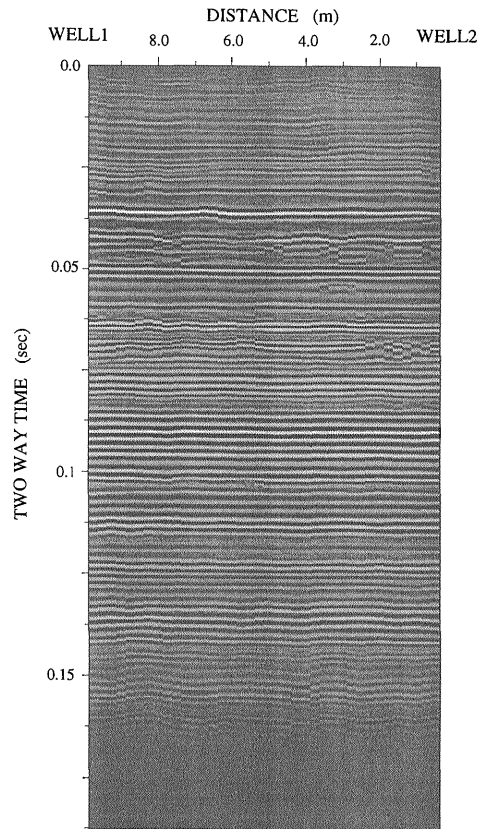


第7図 速度解析パネル例 (WELL1とWELL2の中間点).

(a) メディアンフィルタ適用前, (b) メディアンフィルタ適用後. 矢印はチューブウェーブにより形成されたピーク列を指す.

Fig. 7 A result of velocity analysis panel at the center of interwell before application of median filter (a), and after application of median filter (b). Arrows indicate peak series formed by tubewaves.

とがわかる. 山口ほか (1994) は, 地表から行われた反射法地震探査の重合断面における反射波がリングング波形 (ピークとトラフが複数連続する波形) を示す原因として, 近接する複数の反射面が互層を成している可能性を示唆した. 坑井間探査により得られた重合断面はこのような互層をイメージングしている可能性もある.



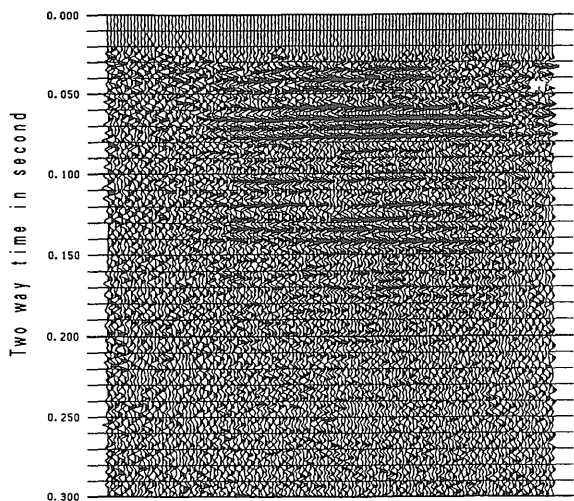
第8図 散乱重合記録.

Fig. 8 A result of diffraction stacked section.

4. 考 察

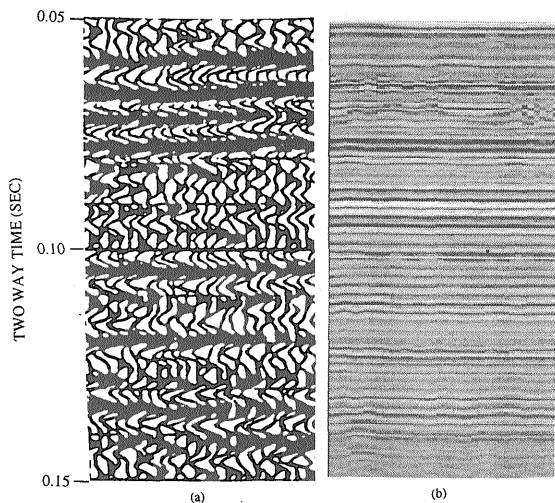
4.1 高分解能化にともなう反射面構造の見え方

前節では, 坑井間探査により得られた重合断面の方が地表から行われる探査のそれより高分解能になっていることを示し, 地表からの探査では得られない高分解能な情報が坑井間探査により得られることを示唆した. この



第 9 図 地表反射法地震探査により得られた重合断面 (山口ほか, 1994).

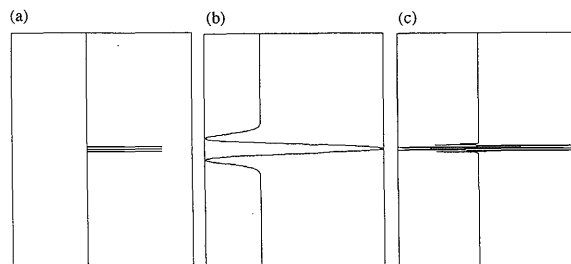
Fig. 9 A result of stacked section obtained by surface seismic reflection method (Yamaguchi *et al.*, 1994).



第10図 地表反射法地震探査により得られた重合断面 (a) と坑井間反射法地震探査記録より得られた散乱重合記録 (b) との比較.

Fig. 10 Comparison of stacked record between (a) surface seismic survey and (b) cross-well seismic survey.

ような状況において重要なことは、重合断面が高分解能化するに伴い、反射面構造が重合断面上でどのように表現されるのかを把握することである。ここでは、一次元モデルを用いた簡単な数値実験による検討を行う。まず第11図(a)に示した反射係数列に対して、30Hz および 300Hz のリックカーウェーブレットを以下の式に基づいてコンボリューションした結果を第11図の (b), (c) にそれぞれ示す。



第11図 (a) 反射係数列モデル, (b) 中心周波数30Hzリックカーウェーブレットを反射係数列モデルにコンボリューション, (c) 中心周波数300Hzリックカーウェーブレットを反射係数列モデルにコンボリューション.

Fig. 11 (a) Reflection coefficient series. (b) A synthetic seismogram derived from convolution with 30Hz ricker wavelet. (c) A synthetic seismogram derived from convolution with 300Hz ricker wavelet.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)f(t-t)dt$$

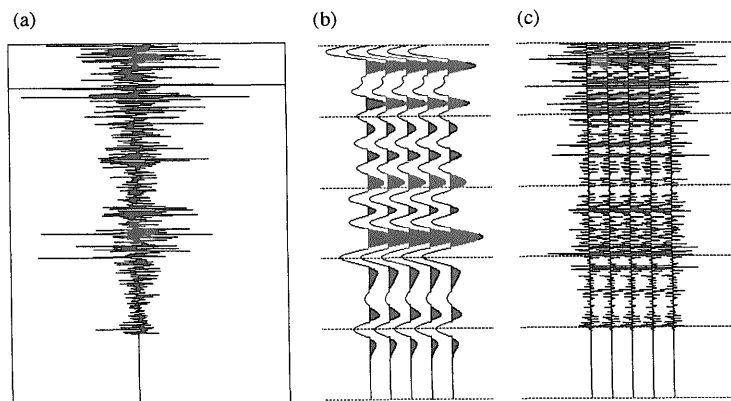
ここで $y(t)$ は合成波形, $x(t)$ は反射係数列, $f(t)$ は基本波形 (この場合はリックカーウェーブレット) である。

第11図の (b), (c) は地下に 3 つの反射境界面が存在し、周波数の異なった波形で反射面をイメージした結果と考えて良い。第11図の (b), (c) より 30Hz の波形を用いた結果では 3 つの反射面を分解できていないが、300Hz の波形を用いると 3 つの反射面のそれぞれが分解されていることがわかる。第11図に示した単純なモデルによる数値実験においては、高分解能の波形を用いることにより詳細な情報が得られることが理解できる。

次に第12図(a)に示した反射係数列を作成した。この反射係数列はより現実の地下の状態に近くなるように任意に作成したものである。この反射係数列に対して前述のように 30Hz および 300Hz のリックカーウェーブレットをコンボリューションし、その結果を第12図の (b), (c) にそれぞれ示す。第12図の (b), (c) の両結果の比較において着目すべきは、高周波の波形を用いた場合 (第12図 (c)) の方が確かに詳細な反射面が描かれている。しかし両結果において描かれている反射面のピーク同士は必ずしも一致していないことがわかる。すなわち、現実的な地下の反射面構造を異なる周波数を用いてイメージングする場合、得られる重合断面は用いる周波数によってその反射面構造の見え方は本質的に違ってくる可能性があると考えられる。

4.2 坑井間地震探査記録と逆VSP (Vertical Seismic Profiling) 記録の比較

坑井間地震探査記録は一方の坑井内で発震を行い、もう一方の坑井内に設置した受振器で受振することにより得られるため、波動は地表付近の軟弱層を通過しない。一方、逆VSP記録は坑井内で発震を行い、地表に設置した受振器で受振することにより得られるため、波動は



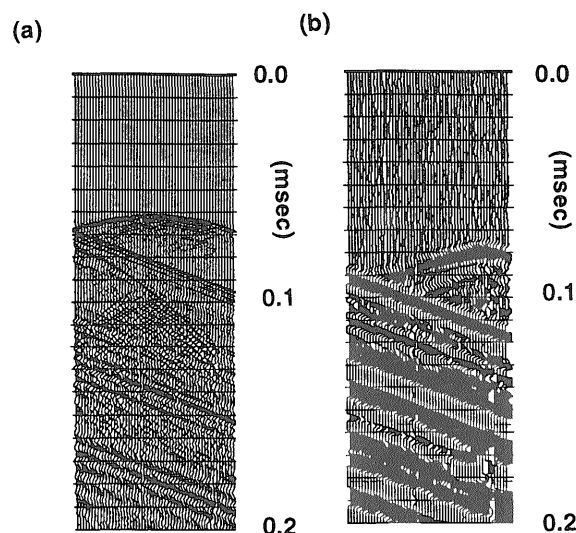
第12図 (a) 乱数反射係数列モデル, (b) 中心周波数30Hzリッカーウェーブレットを反射係数列モデルにコンボリューション, (c) 中心周波数300Hzリッカーウェーブレットを反射係数列モデルにコンボリューション.
Fig. 12 (a) Random reflection coefficient series. (b) A synthetic seismogram derived from convolution with 30Hz ricker wavelet. (c) A synthetic seismogram derived from convolution with 300Hz ricker wavelet.

地表付近の軟弱層を通過する。よって坑井間地震探査記録と逆 VSP 記録の比較を行うことにより地表付近の軟弱層の影響を評価できる。第13図(a)に坑井間地震探査記録, 第13図(b)に逆 VSP 記録をそれぞれ示す。第13図(a)と(b)を比較すると明らかに坑井間地震探査記録の方が高分解能であることがわかる。この場合, 坑井間地震探査記録と逆 VSP 記録における波動伝播距離は大きな差はないため, 逆 VSP 記録が低周波になっている原因は地表付近の軟弱層の影響であると考えられる。坑井内で発震された波動は地表付近の軟弱層を通過することによりその高周波成分を減衰させられてしまうと解釈できる。

5. まとめ

弾性波伝播特性実験場において2本の坑井を利用して坑井間反射法地震探査を適用し, 坑井間及び坑井底以深について, 地下構造を推定した。その結果, 地表からの反射法地震探査により推定される浅部地下構造と比較して分解能の高い重合断面が得られた。これは坑井間の調査が表層付近の軟弱層(一般的には低速度であり, 地震波動の高周波成分を減衰させてしまう)の影響を受けないため, 高分解能な記録が観測される理由による。坑井間反射法地震探査が地表からの調査と比較して, より詳細な基礎的データを与えるものとして期待できることを示唆した。ただしここで注意すべきは, 得られる重合断面は用いる周波数によってその反射面構造の見え方は本質的に違ってくる可能性があることである。そのため重合断面が高分解能化するにあたりその解釈において注意を要することを示唆した。

今後の課題は坑井間探査により得られるこのような分解能の高い重合断面を元に地質構造について検討することである。



第13図 坑井間地震探査記録(a)と逆 VSP 記録(b)との分解能の比較。

Fig. 13 Comparison of the resolution of observed data between (a) cross-well seismic survey and (b) reverse VSP seismic survey.

謝辞 観測機器利用に際しては地質調査所環境地質部の長 秋雄博士に便宜を図っていただいた。また地殻物理部地殻構造研究室宮崎光旗室長ならびに査読にあられた大久保泰邦博士からは, 原稿の改善に極めて有益なコメントを頂いた。これらの方々から感謝致します。

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 : part1. presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG. expanded abstracts.

- 35-39.
- 加野直巳・山口和雄・横田俊之・長 秋雄(1993) 坑井内震源と埋設3成分受振器を用いた受振記録. 産業科学技術研究開発 大深度地下空間開発技術 平成4年度研究成果報告書. 地質調査所. 3-13.
- 木口 努・横田俊之・山口和雄・村上 裕(1992) 堆積軟岩層弾性波伝播特性実験場における埋設型地震計の設置. 大型工業技術研究開発 大深度地下空間開発技術 平成3年度研究成果報告書. 地質調査所. 3-8.
- Lazaratos, S. K., Rector, J. W., Harris, J. M., and Van Sshaack, M. (1993) High-resolution, cross-well, reflection imaging: Potential and technical difficulties. *Geophysics*, 58, 1270-1280.
- Matsushima, J., Rokugawa, S., Yokota, T., Miyazaki, T. (1997a) Cross-well imaging by the CDP stacking and the diffraction stacking with velocity analysis. *BUTSURI-TANSA*, vol. 50, no.2, 107-122.
- Matsushima, J., Rokugawa, S., Yokota, T., Miyazaki, T., Kato, Y. (1997b) Crosswell CDP stacking and diffraction stacking with stacking velocity analysis in inhomogeneous media. 67th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, ed. Unedited.
- Sam G. and Larry L. (1992) Cross-borehole tomographic migration. *Journal of seismic exploration*. 1, 315-324.
- Van Schaack, M., Harris, J. M., Rector, J. W. and Lazaratos, S. K. (1992) High resolution cross-well imaging of a west Texas carbonate reservoir : part2. presented at the 62nd Ann. Internat. Mtg. of SEG, expanded abstracts, 40-44.
- 山口和雄・木口 努・横田俊之・加野直巳(1994) 弾性波伝搬特性実験場における反射法地震探査. 産業科学技術研究開発 大深度地下空間開発技術 平成5年度研究成果報告書. 地質調査所. 3-12.
- 横田俊之・加野直巳・山口和雄・長 秋雄・木口 努(1994) 波線追跡法を利用した埋設受振器への波線入射角に関する考察. 産業科学技術研究開発 大深度地下空間開発技術 平成5年度研究成果報告書. 地質調査所. 13-21.

(受付:1997年8月18日;受理:1997年11月13日)