

坑井間地震探査における重合処理と分解能に関する基礎研究

松島 潤*・六川 修一**・横田 俊之*³

宮崎 光旗*⁴・加藤 俣史**

On the relationship between stacking process and resolution of stacked section in crosswell seismic survey

Jun MATSUSHIMA*, Shuichi ROKUGAWA**, Toshiyuki YOKOTA*³
Teruki MIYAZAKI*⁴, Yoshibumi KATO**

ABSTRACT

This paper describes both vertical and horizontal resolution resulting from stacking process (CDP stacking and diffraction stacking) in cross-well seismic survey. Basically, the resolving power of seismic data depends on the dominant frequency of the recorded wavelet and average velocity of media. It is proposed that both vertical and horizontal resolving power is controlled by two main aspects: (1) NMO (Normal Move Out) stretching, (2) source/receiver geometrical arrangements. In respect of the first point, basic equations were derived in order to estimate the influence resulting from NMO (Normal Move Out) stretching. In respect of the second point, formation process of resolution due to the arrangement of sources and receivers was studied based on interference of equi-travel planes. From these points, suitable source/receiver geometrical arrangements in homogeneous media are discussed. These studies are illustrated on numerical simulation model, in which the zero phase Ricker wavelet is used and homogeneous and isotropic media is assumed.

Key words: resolution, stacking, NMO stretch, source/receiver arrangement

1997年7月15日原稿受付; 1998年2月5日受理
物理探査学会第95, 96回学術講演会にて一部を発表

* 東京大学工学部

〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16

** 東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*³ 石油公園石油開発技術センター

〒261-0025 千葉県千葉市美浜区浜田1-2-2

*⁴ 地質調査所

〒305-0046 茨城県つくば市東1-1-3

Manuscript received July 15, 1997; Accepted February 5, 1998.

A part of this paper was presented at the 95th, 1996 and 96th SEGJ Conference, 1997.

* Faculty of Engineering, The University of Tokyo

2-11-16, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

** Division of Engineering, Graduate School, The University of Tokyo

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

*³ Japan National Oil Corporation, Technology Research Center

1-2-2, Hamada, Mihamaku, Chiba, Chiba, 261-0025, Japan

*⁴ Geological Survey of Japan

1-1-3, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-0046, Japan

1. 序 論

人工地震波によって地下の構造あるいは物性を探査する場合、その探査仕様ならびにデータ処理仕様によって、処理結果の分解能は左右される。期待される分解能をあらかじめ把握しておくことは、データ取得デザイン、データ処理過程あるいは処理結果解釈の際の指標として役立つものと思われる。

筆者等はこれまで坑井間の幾何的配置において取得される地震探査記録に対して、CDP 重合法並びに散乱重合法の適用に関する研究を行ってきた (MATSUSHIMA et al., 1997)。本稿ではこれら重合処理によって形成される分解能を詳細に検討することを目的とする。なお散乱重合法は本稿での適用 (均質媒体) においては、入力データに時間微分を施さない点と振幅補正を施さない点を除けば、キルヒホッフ重合前時間マイグレーション処理と原理的に同等である。

地震探査における分解能の一般的な定義は、2つの特徴を識別できる能力であるとされる。波形自身が有する基本的な分解能は観測される波形の卓越周波数と媒質の平均的速度に依存する。この波形に対してマイグレーション処理を含む重合処理を施すことにより分解能が如何に形成させられるかを検討する。

このような分解能形成を論ずるにあたり主として以下の二点に着目する。

(1) NMO 補正ストレッチ効果による分解能への影響を評価すること。

(2) 発振・受振点の観測配置による分解能への影響を評価すること。

(1) に関しては、坑井間地震探査の発振・受振点の幾何的配置を考えれば、反射面に対して入射角度の大きなトレースを本質的に多く含むため、NMO 補正におけるストレッチ効果による分解能低下を評価することが重要になってくる。また(2)に関しては、理論的に導出される分解能は空間サンプリングに依存しない (例えば、SCHUSTER, 1995)。これは理想的に無限小の空間サンプリングを仮定しているためである。しかし現実的には有限の空間サンプリングを行うため、一種の近似誤差が生ずると考えられる。この近似誤差の性質を理解して、発振・受振点の観測配置をどのように行えば最良の分解能が得られるかを考えることは坑井間地震探査の場合に限らず陸上反射法地震探査においても重要な課題である。

SAFAR (1985) は陸上地震探査において重合前キルヒホッフマイグレーションにより形成される水平分解能に

対して測線のアレイ幅、波形の周波数帯域、空間サンプリング等が及ぼす影響を数値実験により考察した。SAFAR (1985) の結果では水平分解能に対する空間サンプリングの影響はほぼ無いことが示されている。粗い空間サンプリングによって水平分解能が影響をほとんど受けないという同様な議論が NEIDEL (1994) や VERMEER (1995) によっても行われている。しかしながらこの事実に対してはさらに研究の余地があると考えられる。

またマイグレーション処理を含む重合処理により形成される分解能の概念が、得られる処理結果において如何なる意義を持つかという点に関しては、詳細な検討が行われてこなかったように思われる。

本稿は上記に関する一連の基礎研究 (松島ほか, 1996; 松島ほか, 1997) として、数値実験により坑井間地震探査における重合処理と分解能との関係を検討し、重合処理によって形成される分解能の処理結果における意義付けを試みたものである。

2. 重合処理前における諸問題

ここでは重合処理を行う前の段階において、最終的な処理結果の分解能を左右すると思われる諸要因について整理する。

2.1 波形特性

周波数の振幅特性を変えずに垂直分解能を向上させるためには位相特性としてゼロ位相波形を利用することが有効である (SHOENBERGER, 1974)。またゼロ位相波形であっても振幅特性によって分解能が変化する (KALLWEIT and WOOD, 1982)。ゼロ位相波形のなかでリッカー波形は地震波動モデリングや解釈段階で広く使用されている波形である (KALLWEIT and WOOD, 1982) ため、本論文の数値実験データにはリッカー波形を利用する。

2.2 全反射領域の反射波

Fig. 1(a) に示すような上側の層の速度を V_1 、下側の層の速度を V_2 とする 2 層構造モデルを考える。上側の層に比べて下側の層の速度が大きい場合 ($V_1=3000$ m/s, $V_2=4000$ m/s), このモデルの反射面に対する入射波は入射角が大きくなると臨界角を迎え、さらに大きくなると全反射領域に達する。この全反射領域においては反射係数は複素数となり、位相を有する。

このことを Fig. 1(a) のモデルを用いた数値実験で説明する。Fig. 1(a) に示すように、発振深度と受振深度の等しい状態で記録 (以下、共通波線角度記録と呼ぶ)

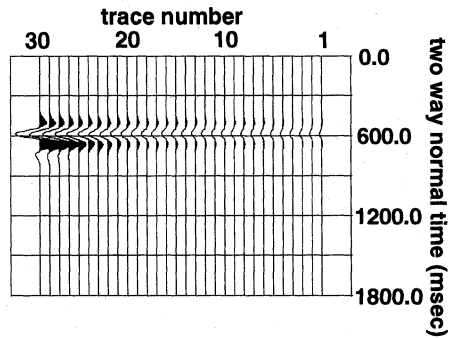
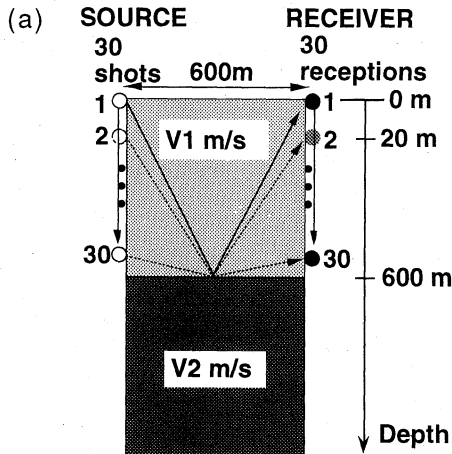


Fig. 2 Only reflections were extracted by subtracting calculated incident wavefields from calculated total wavefields and aligned horizontally in the case of $V_1=3000$ m/s and $V_2=2500$ m/s. The starting time for two way normal time corresponds to the depth of 0 m.

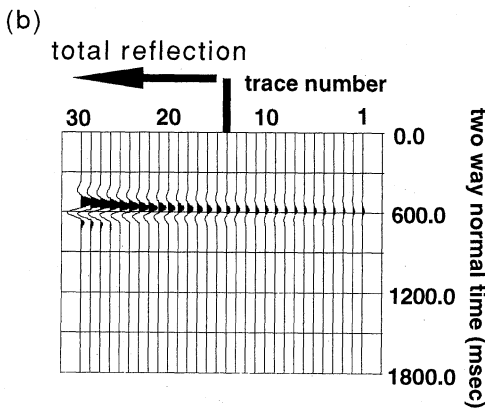


Fig. 1 (a) Single-interface numerical model and the specifications of data acquisition. The top layer is 600 m thick with a velocity of V_1 m/s and the velocity of bottom layer is V_2 m/s. The separation of boreholes is 600 m. 30 sources and receivers are spaced 20 m apart. A CDP ensemble with a common depth point at the center of the interwell was produced by finite difference method. Central frequency of Ricker wavelet is 10 Hz.
 (b) Only reflections were extracted by subtracting calculated incident wavefields from calculated total wavefields and aligned horizontally in the case of $V_1=3000$ m/s and $V_2=4000$ m/s. Zone of total reflection is indicated by the arrow. The starting time point for two way normal time corresponds to the depth of 0 m.

記録を Fig. 1(b)に示す。

反射面の深度情報と媒体の速度情報を与えることにより、各発・受振点組における反射波走時が計算できる。同時にモデル上部を時間軸の原点とし、反射面までの垂直往復走時も計算できる。反射波走時が垂直往復走時と等しくなるように過不足データ分を各トレースの先頭に付加あるいは先頭から削除したりする。このような操作により変換される記録において、反射波列は水平に並ぶはずである。しかし上述のように反射係数が位相異常を有する場合、本来水平に並ぶはずの反射波列が全反射領域 (Fig. 1(b)の矢印で示した範囲、つまりトレース番号が15以上のトレース) において水平軸からずれていることがわかる。このずれは速度コントラストが強くなるにしたがって大きくなる。

比較のために、上側の層に比べて下側の層の速度が小さく ($V_1=3000$ m/s, $V_2=2500$ m/s)、臨界角が存在しないモデルにおいて上述と同じ処理を行ない、その結果を Fig. 2 に示す。反射波列がまっすぐ水平に並んでいることがわかる。

以上より全反射領域が存在する構造においては、全反射の影響を考慮せずに処理すると精度並びに分解能の劣化が生ずることになる。

2.3 入射角の違いによる垂直分解能の変化

一般に垂直分解能は卓越波長の1/4とされている (YILMAZ, 1988) が、これは垂直入射の場合である。なお垂直分解能の定義は波形の周波数特性や記録の S/N 比や分解能の判断基準によって異なる (KALLWEIT and WOOD, 1982; KOEFOED, 1981; SHERIFF and GELDARR,

を作成する。なお計算は差分法により行い、反射面の存在しないモデルにおいて計算された結果を差し引くことにより、反射波のみを抽出した。この反射波のみが存在する記録を以下に述べる手順により反射波列を変換した

1982; WIDESS, 1982) が本稿ではこれに関する議論は行わない。ここでは入射角が大きくなった場合を Fig. 3(a) に示したモデルを用いて検討する。数値モデルは 3 層構造をしており、中央の層の上側の反射面と下側の反射面からの反射波の共通波線角度記録を差分法により計算した。震源関数には中心周波数 10 Hz のリックカー波形を用いた。見やすくするために反射波列を水平に揃えて示した (Fig. 3(b))。入射角が大きくなる (トレース番号が大きくなる) につれ、垂直分解能が低下していくことがわかる。

3. NMO ストレッチ効果が分解能に及ぼす影響

3.1 NMO ストレッチ効果による分解能低下を評価するための基本式の導出

坑井間における散乱重合法の散乱波走時式は以下の (1) 式で表わされる (MATSUSHIMA et al., 1997)。なお (1) 式は垂直片道走時の重合記録に変換する式である。

$$t_{ij} = \frac{\sqrt{(VT(0) - S_i)^2 + B^2} + \sqrt{(VT(0) - R_j)^2 + (L - B)^2}}{V} \quad (1)$$

同様に CDP 重合法の反射波走時式は以下の (2) 式で表わされる。

$$t_{SR} = \sqrt{\left(2T(0) - \frac{X_S + X_R}{V}\right)^2 + \left(\frac{L}{V}\right)^2} \quad (2)$$

t_{ij} 及び t_{SR} はそれぞれ散乱波及び反射波の走時、 $T(0)$ は垂直片道走時、 V は波の伝播速度、その他のパラメータは Fig. 4 に示す。 i, j はそれぞれ発振及び受振の番号を表す。ここで t_{ij} 及び t_{SR} は観測記録上の時間の尺度を表わし、 $T(0)$ は重合記録上の時間の尺度を表わしている。いま重合処理を t_{ij} または t_{SR} から $T(0)$ への時間軸変換作業として捉え、(1) 式及び (2) 式は t_{ij} または t_{SR} と $T(0)$ とを結び付ける関係式と考えることができる。分解能の観点から考えれば、 t_{ij} または t_{SR} の微小変化 Δt_{ij} または Δt_{SR} と $T(0)$ の微小変化 $\Delta T(0)$ の関係がわかれば、重合処理を行なう際の周波数の変化、つまり分解能の変化を評価することができる。この目的のためには (1) 式及び (2) 式を $T(0)$ で偏微分すればよい。(1) 式を偏微分した結果を (3) 式に示す。

$$\frac{\partial t_{ij}}{\partial T(0)} = \frac{T(0)V - S_i}{\sqrt{(T(0)V - S_i)^2 + B^2}} + \frac{T(0)V - R_j}{\sqrt{(T(0)V - R_j)^2 + (L - B)^2}} \quad (3)$$

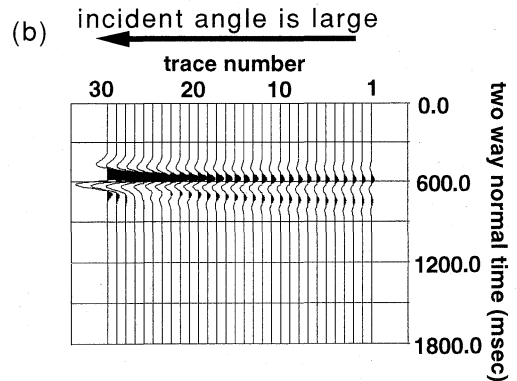
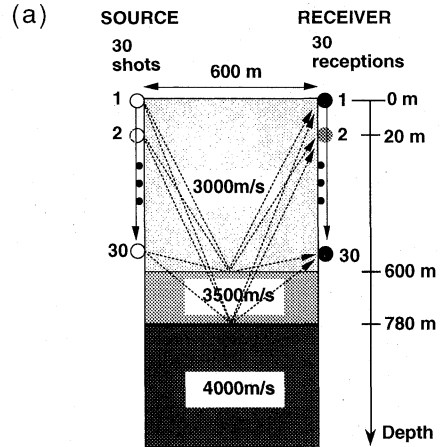


Fig. 3 (a) Three-layer numerical model and the specifications of data acquisition. The top layer is 600 m thick with a velocity of 3000 m/s and the second layer is 180 m thick with a velocity of 3500 m/s and the velocity of bottom layer is 4000 m/s. The separation of boreholes is 600 m. 30 sources and receivers are spaced 20 m apart. A CDP ensemble with a common depth point at the center of the interwell was produced by finite difference method. Central frequency of Ricker wavelet is 10 Hz. (b) Only reflections were extracted by subtracting calculated incident wavefields from calculated total wavefields and aligned horizontally. The starting time point for two way normal time corresponds to the depth of 0 m. Vertical resolution declines with increasing incident angle.

同様に (2) 式を偏微分した結果を (4) 式に示す。

$$\frac{\partial t_{SR}}{\partial T(0)} = \frac{2 \left(2T(0) - \frac{X_S + X_R}{V}\right)}{\sqrt{\left(2T(0) - \frac{X_S + X_R}{V}\right)^2 + \left(\frac{L}{V}\right)^2}} \quad (4)$$

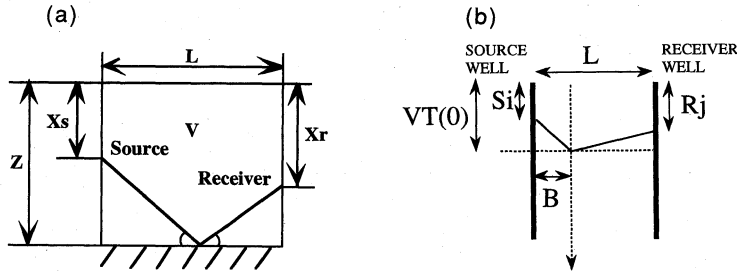


Fig. 4 Parameters for calculus of travel time in the case of (a) CDP stacking and (b) diffraction stacking in crosswell seismic survey.

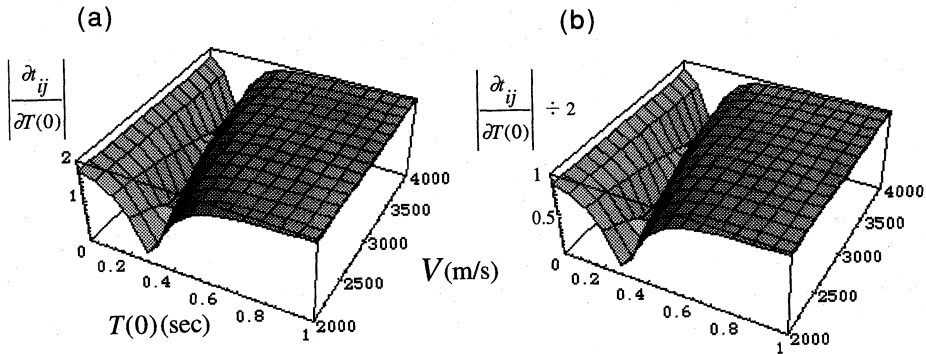


Fig. 5 3-D plots of the partial differentiation coefficient $|\partial t_{ij}/\partial T(0)|$ (a) in the case of one way normal time, (b) divided by 2.

この(3)式及び(4)式が分解能を評価する基本式となる。以下では散乱重合法を例にして説明する。(3)式において $T(0)$ と V をパラメータとして偏微分係数の絶対値を Fig. 5(a) に表示する。なお S_i, R_j, L を 600 m, B を 300 m とする。トラフ領域を有する偏微分係数の3次元表示が得られたが、トラフ領域以外では、 $\partial t_{ij}/\partial T(0) = 2.0$ 、すなわち $\Delta t_{ij} = 2\Delta T(0)$ の関係が得られる。これは観測記録を垂直片道走時の重合記録に変換すると、周波数が見かけ上2倍になることを意味する。しかしこれは分解能が2倍向上することを意味せず、垂直片道走時の重合記録に変換することによるもので、垂直往復走時に変換する場合は $\partial t_{ij}/\partial T(0) = 1.0$ 、すなわち $\Delta t_{ij} = \Delta T(0)$ の関係が得られる。よって垂直片道走時に変換する場合の偏微分係数は2で割っておくとわかりやすい (Fig. 5(b))。Fig. 5(b) において $\partial t_{ij}/\partial T(0) = k$ とおき、 $k = 1.0$ のときには分解能は変わらず、 $k < 1.0$ (トラフ領域) のときには分解能は $1/k$ 倍低下する。トラフ領域における極小の部分において分解能は最も低下するが、この極小部分 ($k = 0.0$) は発振及び

受振の深度に等しく、入射角が 90° に相当する箇所である。よってトラフ領域は入射角の大きなトレースを意味する。

3.2 数値実験例

3.2.1 垂直分解能

前述のように垂直分解能は一般に卓越波長の $1/4$ 程度と言われているが、入射角の大きなトレースに NMO 補正を施し、さらに重合処理を行うことで、この垂直分解能がどのような影響を受けるのかを評価する。この目的のために Fig. 6 に示す数値モデルを用いて CDP 重合処理適用による分解能形成の検討を行なう。

モデルは深度 600 m に反射面が存在し、坑井間距離は可変である (坑井間距離を N m とする)。 N を大きく取れば、反射面に対する入射角が全トレースについて大きくなる。なお数値計算は以下に述べる簡易な方法によった (以下、コンボリューション法と呼ぶ)。反射波 (あるいは散乱波) の幾何学的な波線距離を均質媒質速度で除算することにより反射波走時にスパイクを立て

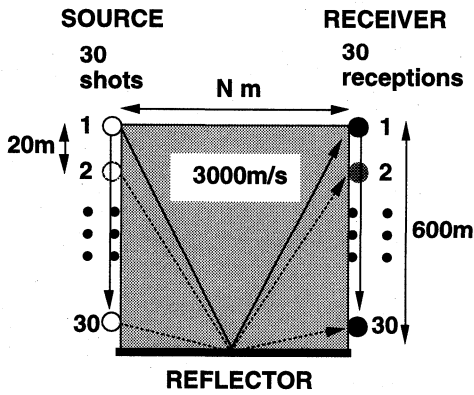


Fig. 6 Single-interface numerical model and the specifications of data acquisition. Reflector is placed at a depth of 600 m in a medium with constant velocity of 3000 m/s. The separation of boreholes is N m. 30 sources and receivers are spaced 20 m apart. Central frequency of Ricker wavelet is 10 Hz. A CDP ensemble with a common depth point at the center of the interwell was produced by using the convolution method.

る。このスパイクに対して波形（振幅は一定）をコンボリューションする。このような簡易な手法により記録を作成するため、コンボリューション法では前述の全反射現象を考慮していないことを注意されたい。

以上のコンボリューション法により、Fig. 6 のモデルにおいて共通波線角度記録（30トレース）を作成した。この記録は坑井間の中央における CDP アンサンブルを成す。なお波形は中心周波数 10 Hz のリックカー波形を用いた。この記録に対して坑井間距離 N を 600 m, 1200 m, 1800 m と変化させた場合の NMO 補正後の記録を Fig. 7 に示す。入射角の大きなトレース（トレース番号が大きい）ほど、NMO 補正により低周波数になっていることがわかる。なお Fig. 7 においてトレース番号が大きいトレースの波形がミュートされ途切れているが、この場合においては上方進行反射波のみを用いてイメージングを行っているため、ある深度の反射面をイメージングす場合には、その反射面深度より深い発振・受振点のトレース（すなわち下方進行反射波）は加えないことによるものである。

Fig. 8 には坑井間距離 N を 600 m, 1200 m, 1800 m と変化させ、かつ重合するトレースを制限した場合の CDP 重合記録を示した。それぞれの重合記録に対する振幅スペクトルも重合記録の右側に示す。例えば Fig. 8(a) は坑井間距離が 600 m の場合の CDP 重合記録で、

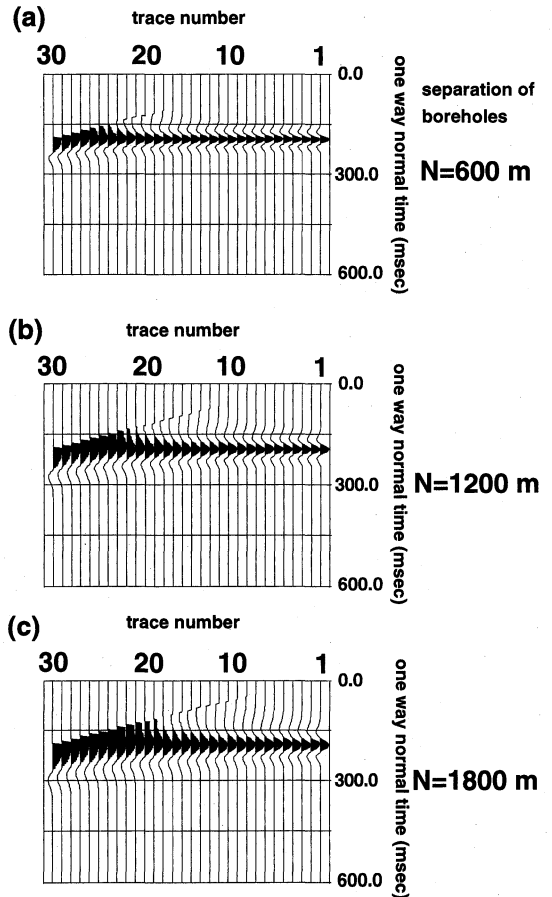


Fig. 7 Application of NMO correction to each data set calculated for various values of N , (a) $N=600$, (b) $N=1200$, (c) $N=1800$.

一番右端の重合記録（trace number=1）は Fig. 7(a) における番号 1 から 15 のトレースを足し合わせて作成したもので、以降左の重合記録ほど入射角の大きなトレースを番号に従って一本ずつ加えて重合記録を作成した。よって一番左端の重合記録（trace number=16）は Fig. 7(a) における番号 1 から 30 のトレースを足し合わせて作成したものである。坑井間距離 N が一定の場合を考えると、入射角が大きなトレースを加えて重合記録を作成すると重合記録は低周波数になることがわかる。また坑井間距離 N を大きくすることによっても（つまりこれは全トレースの入射角を大きくすることに相当する）重合記録は低周波数になることがわかる。すなわち、入射角の大きさに応じて周波数が低下し、その低下率は前節で導出した基本式で評価できる。

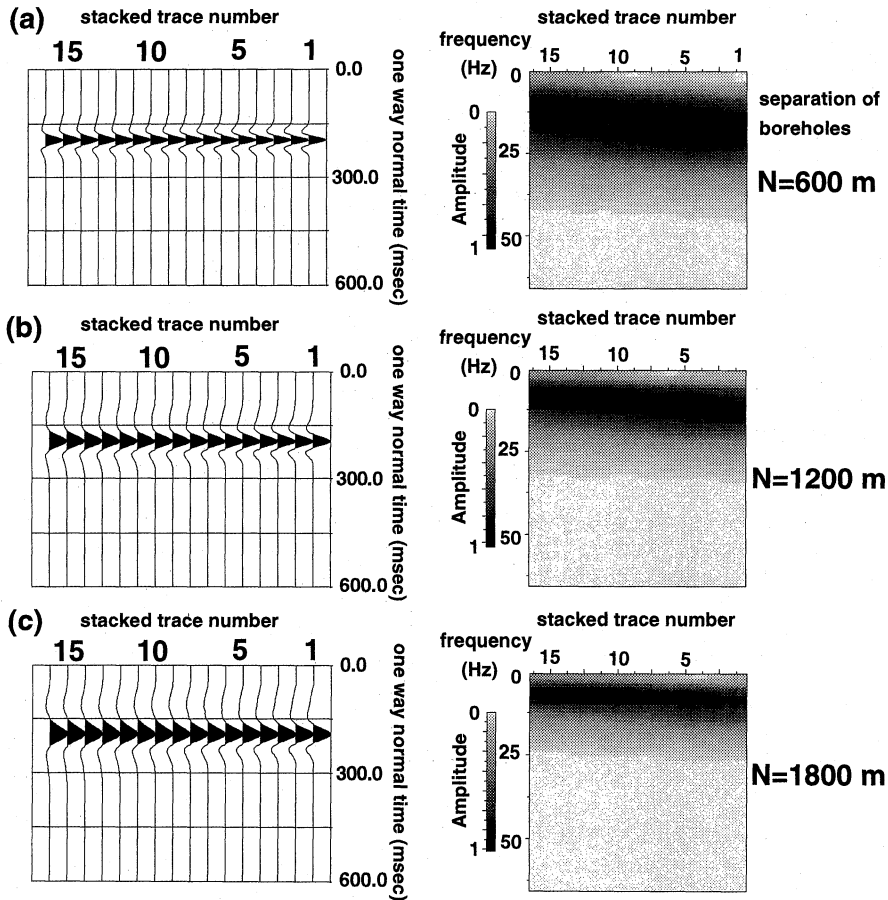


Fig. 8 CDP stacked records at the center of the interwell for various values of N , (a) $N=600$, (b) $N=1200$, (c) $N=1800$. Right figures show the amplitude spectra for each trace.

3.2.2 水平分解能

一般に水平分解能はフレネルゾーンで定義されるが、マイグレーション処理によりこのフレネルゾーンは卓越波長に縮小される (STOLT and BENSON, 1986)。ここではマイグレーション的側面をもつ散乱重合法の適用による検討を行なう。

まず上述の事実を確かめるために、Fig. 9 に示すような均質速度場に散乱点が1つ存在する数値モデルを用いる。坑井間距離を N m, 伝播速度を V m/s, 散乱点深度を D m, 発振点数を X_S , 受振点数を X_R , 発振間隔を ds m, 受振間隔を dr m とする。ここでは坑井間距離 N 及び伝播速度 V を変数, 散乱点深度 D を 600 m, 発振点数 X_S 及び受振点数 X_R を 30 点, 発振間隔 ds 及び受振間隔 dr を 20 m とする。周波数を一定にして波の伝播速度 V を変化させることにより波長が可変とな

る。数値計算は前述のコンボリューション法により行った。なお波形には中心周波数 100 Hz のリッカー波形を用い、30発振×30受振の900トレースを作成した。

坑井間距離 N を一定にし ($N=600$)、波の伝播速度 V を 3000 m/s, 2000 m/s, 1000 m/s と変化させた場合の散乱重合記録を Fig. 10 に示す。周波数を一定にして伝播速度 V を大きくする (つまり波長を長くする) にしたがって、水平分解能が低下するのがわかる。これはフレネルゾーンは卓越波長に縮小されるという前述の理由による。

次に波の伝播速度 V を一定 ($V=2000$) にし、坑井間距離 N を 600 m, 1200 m, 1800 m と変化させた場合の散乱重合記録を Fig. 11 に示す。 N を大きくするに従い、重合記録の垂直および水平分解能が低下することがわかる。これは坑井間距離を長くすると、散乱点への入

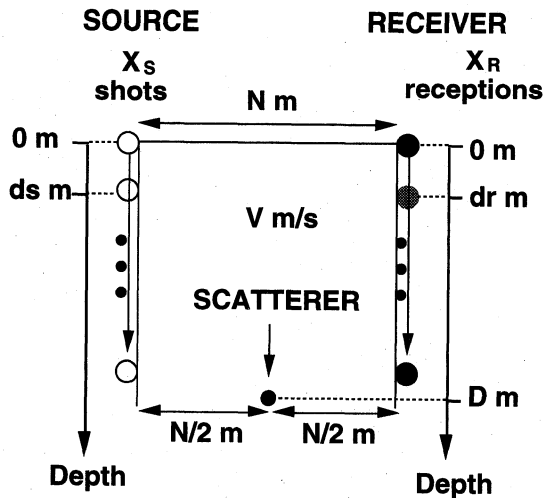


Fig. 9 One point scatterer numerical model and the specifications of data acquisition. One point scatterer is spaced at the center of interwell and placed at a depth of D m in a medium with constant velocity of V m/s. The separation of boreholes is N m. The number of shot and reception points is X_S and X_R respectively. Sources and receivers are spaced ds and dr m apart respectively. Diffracted waves generated by a scatterer were produced by using the convolution method.

射 (+散乱) 角が全体に大きくなり、このことで波形の周波数が低下し、その結果波長が長くなる効果が大いいためである。

4. 発振・受振点の観測配置が分解能に及ぼす影響

前章では、NMO ストレッチ効果により入射 (+散乱) 角の大きさに応じて波形が低周波数化し、垂直及び水平分解能に影響を与えることを評価した。ここでは分解能を左右する要因として、発振・受振点の観測配置の効果を考え、その影響を評価する。

4.1 等走時面による分解能形成過程の理解

観測配置が分解能に及ぼす影響を評価するための第一段階として、Fig. 12に示す数値実験を行った。数値モデルは再び Fig. 9 に示した均質媒体内に散乱点が一存在するモデルを用い、このモデルに散乱重合法を適用してイメージングを行う。なお数値計算はコンボリューション法 (ここでは中心周波数 100 Hz のリックカー波形) により記録を作成した (波形の振幅は一定)。ここでは

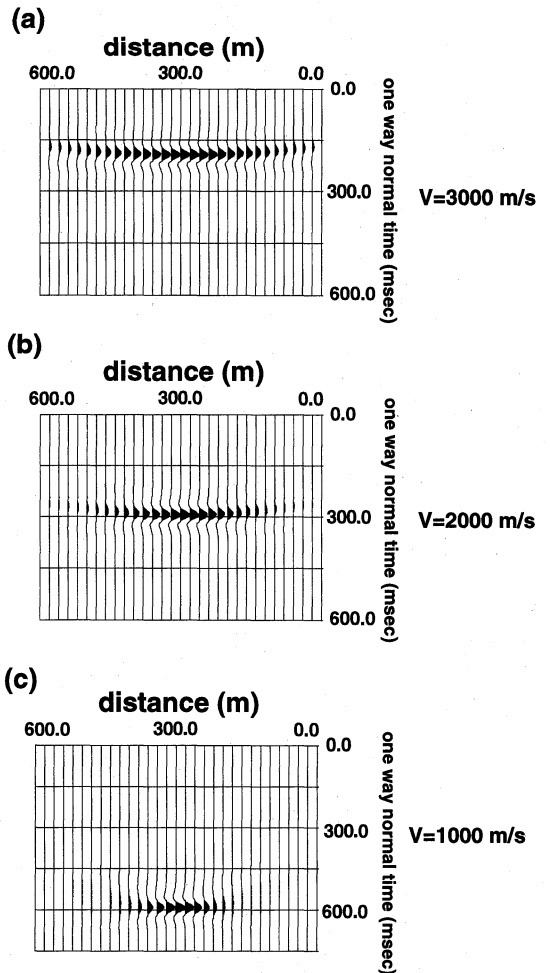


Fig. 10 Diffraction stacked records at constant well interval ($N=600$), for various values of velocity, (a) $V=3000$, (b) $V=2000$, (c) $V=1000$. Lateral resolution is improved with decreasing velocity at fixed central frequency of Ricker wavelet (100 Hz).

坑間距離 N を 600 m, 伝播速度 V を 3000 m/s, 散乱点深度 D を 600 m, 発振点数 X_S , 受振点数 X_R , 発振間隔 ds 及び受振間隔 dr を変数とする。Fig. 12(a-1) は $X_S=X_R=3$ 点, $ds=dr=200$ m に対する散乱重合記録である。同様に (b-1) は $X_S=X_R=6$ 点, $ds=dr=100$ m, (c-1) は $X_S=X_R=60$ 点, $ds=dr=10$ m に対する散乱重合記録である。

Fig. 12(a-1)~(c-1) は発振・受振点数を増やしなが、それらの配置を粗い状態から密な状態まで変化させた場合における散乱点のイメージング形成過程の様子を

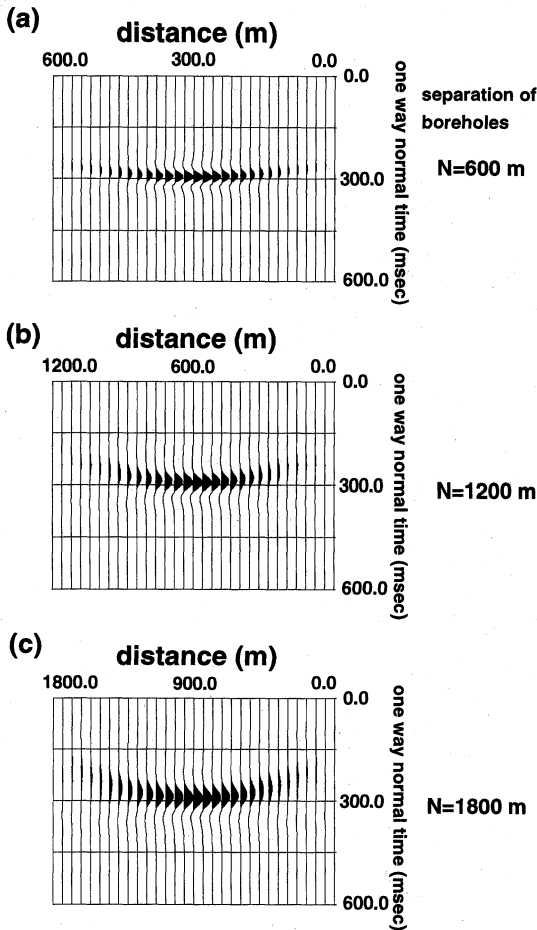


Fig. 11 Diffraction stacked records at constant velocity ($v=2000$) of the model, for various values of well interval, (a) $N=600$, (b) $N=1200$, (c) $N=1800$. Lateral resolution declines with increasing well interval.

示す。発振・受振点数を増やしていくにしたがい、散乱点のイメージングが局所化されていく様子がわかる。

このような散乱点のイメージング形成過程を理解するために、坑井間探査における等走時面の考え(芦田・佐々, 1993)を利用する。いま均質媒体内において散乱点 P 、発振点 S 、受振点 R が存在すると、散乱点 P の等走時面は発振点 S と受振点 R を焦点とする楕円上である。したがって、複数の発振点と受振点の組に対して楕円を描くと、散乱点 P においては同位相で振幅値が加えられるが、散乱点 P 以外においては位相のずれた振幅値が加えられるために波が打ち消しあうことにより、散乱点 P における S/N 比が向上する。Fig. 12(a-

1)~(c-1)に対する等走時面を Fig. 12(a-2)~(c-2)に示す。

以上の議論より、Fig. 12に示した散乱点のイメージング形成過程は、散乱点 P における加算効果と散乱点 P 以外における打ち消し合いの効果により散乱点のイメージングが形成されていくと考えることができる。そこで、分解能の形成過程を理解するために、以下では等走時面同士の干渉の仕方に着目した議論を行う。

4.2 等走時面同士の干渉

等走時面同士の干渉による打ち消し合いの効果を考える場合において着目すべきは、イメージング対象とする点の近傍、特に左右の近傍である。なぜならば、水平分解能を向上させるためには対象とする点の左右近傍のイメージングのされ方が重要になってくるからである。

いま例として Fig. 13に示す3つの等走時面が存在する場合を考える。Fig. 13に示すように、イメージングしようとする散乱点の左右方向に動くウィンドウで囲まれた部分に着目し、それぞれのウィンドウ内における波形同士の打ち消し合い効果を考える。

まずウィンドウ内に2個のリッカー波形が存在する場合を考える。2個のリッカー波形が間隔 dx 離れた状態で存在する場合、 dx を変化させたときの2個のリッカー波形の干渉の様子を Fig. 14に示す。なお計算は dx 離れたインパルスに対してリッカー波形をコンボリューションする方法によった。Fig. 14において dx が小さい場合は加算効果が働いており (a), dx を大きくしていくにしたがって、打ち消し合いの効果が生じ (b), (c), さらに dx を大きくすると、ついにはいずれの効果も生じなくなる (d)。

次に20個のリッカー波形がウィンドウ内に均一間隔 dx 離れた状態で存在する場合、 dx を変化させたときの20個のリッカー波形の干渉の様子を Fig. 15に示す。Fig. 15において dx が小さいときは、20個のリッカー波形密集領域の内部では打ち消し合いが起こり波形が見えないが、領域の左右の境界部には打ち消し合うことのできない波形が残存している (a), (b)。 dx を大きくしていくと、領域の内部では打ち消し合い効果が弱まり、それまで見えていなかった波形が見えてくる (c), (d)。

ここで Fig. 15(b)の場合において、リッカー波形の中心周波数を変化させた場合の結果を Fig. 16に示す。Fig. 16(b)と Fig. 15(b)は同一である(中心周波数 100 Hz)。中心周波数を 200 Hz に設定した結果を Fig. 16(a)、50 Hz に設定した結果を Fig. 16(c)に示す。中心周波数 200 Hz の場合は互いの波形同士が打ち消し合い

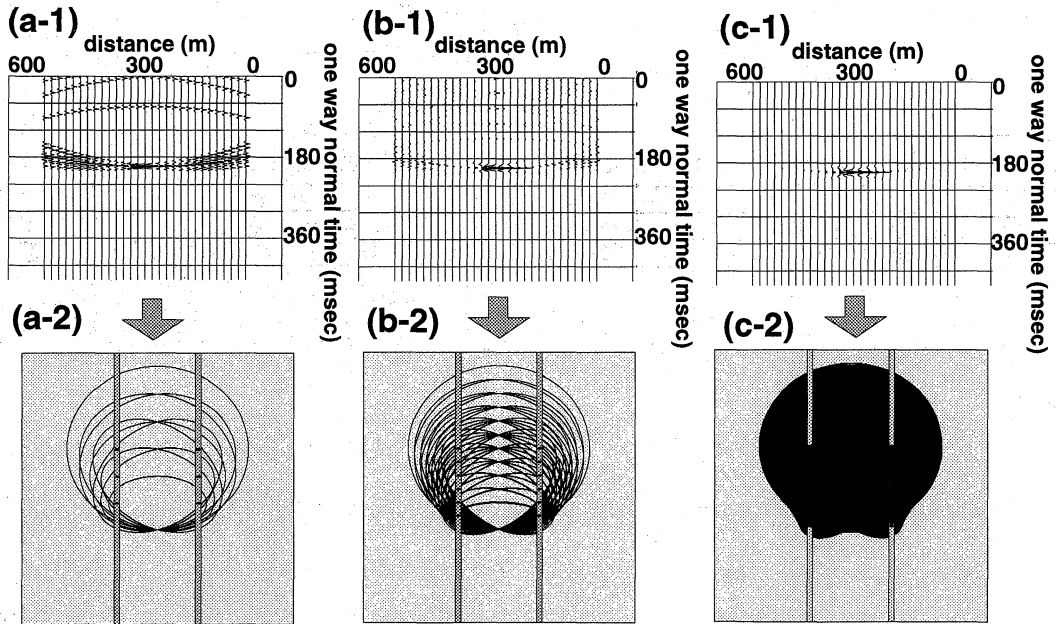


Fig. 12 (a) Diffraction stacked records for each type of spatial sampling. (a-1) 3 sources and receivers are spaced 200 m apart. (b-1) 6 sources and receivers are spaced 100 m apart. (c-1) 60 sources and receivers are spaced 10 m apart. (a-2)~(c-2) Equi-travel time planes corresponding to the diffraction stacked records.

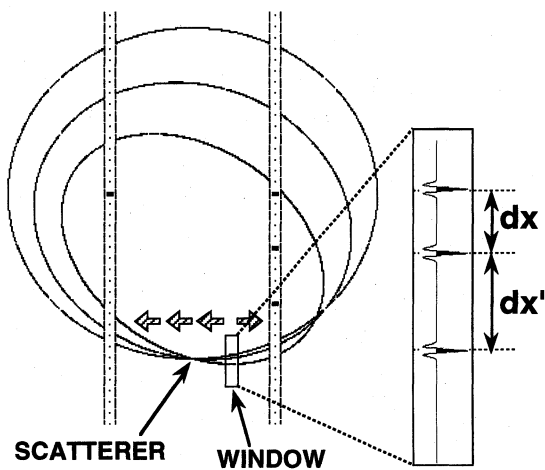


Fig. 13 Three equi-travel time planes for one scatterer. Rectangular window is moving from left to right of the scatterer. We pay attention to the interference of Ricker wavelets within rectangular window.

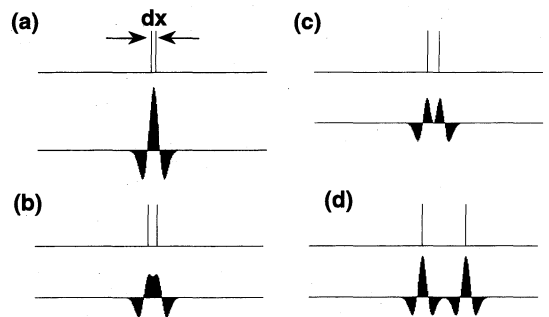


Fig. 14 Interference of two Ricker wavelets for different time intervals dx . The response of Ricker wavelet convolved with two spikes of equal amplitude and equal polarity is a composite wavelet that varies as a function of spike separation. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz. (a) $dx=2.1$ msec, (b) $dx=3.9$ msec, (c) $dx=4.8$ msec, (d) $dx=17.4$ msec.

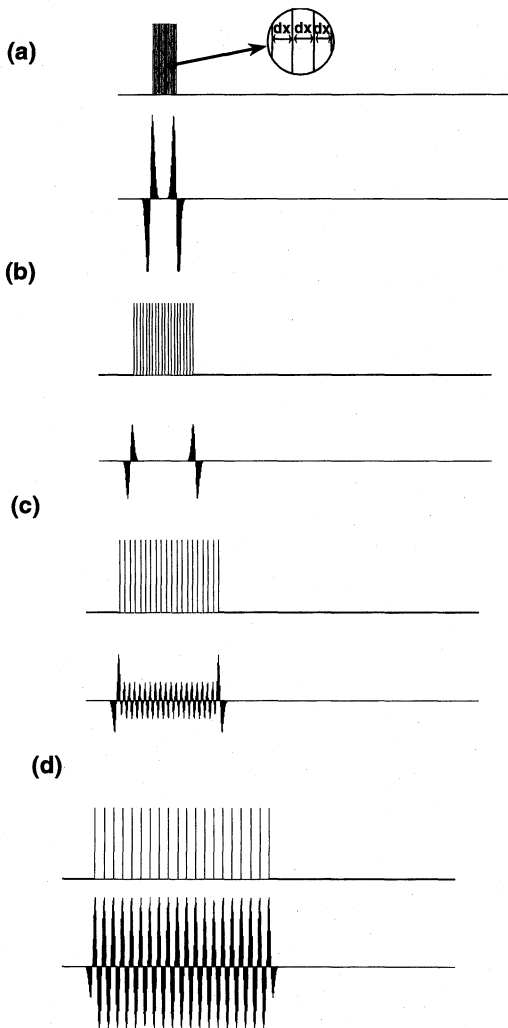


Fig. 15 Interference of twenty Ricker wavelets for various regular time intervals dx . Twenty spikes of equal amplitude and equal polarity set at a constant time interval are convolved with Ricker wavelet. The responses in case of increasing a constant time interval are shown. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz. (a) $dx=1.2$ msec, (b) $dx=3.0$ msec, (c) $dx=4.8$ msec, (d) $dx=8.4$ msec.

効果が小さい状態にあるが、中心周波数 100 Hz の場合は打ち消し合い効果が見られ、さらに中心周波数を 50 Hz にすると、打ち消し合い効果も見られるが、境界部分の加算効果が 100 Hz の場合にくらべて大きくなっていることがわかる。

また Fig. 15(b) の場合において、リッカー波形の存在

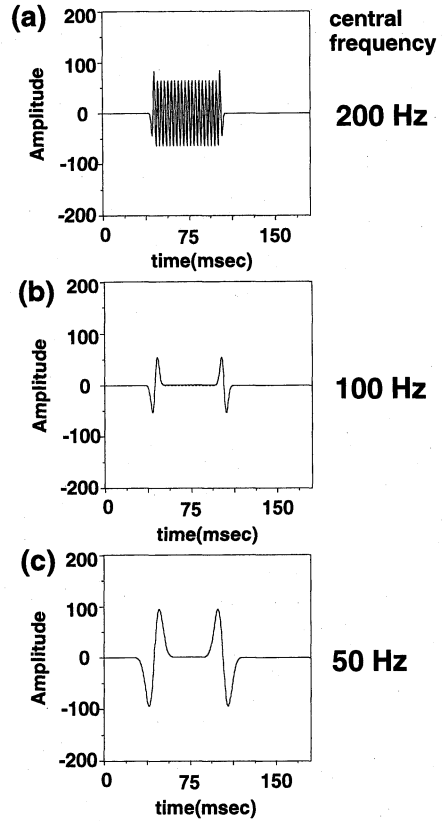


Fig. 16 Interference of twenty Ricker wavelets for various central frequencies in a fixed range. Twenty spikes of equal amplitude and equal polarity set at a constant time interval are convolved with Ricker wavelet. The value of amplitude of each spike is 100. The responses in case of decreasing central frequency at a fixed constant time interval (3.0 msec) in a fixed range are shown. Central frequency of Ricker wavelet is (a) 200 Hz, (b) 100Hz, (c) 50 Hz.

する領域は一定にして、リッカー波形の数を増やした場合を Fig. 17 に示す。Fig. 17(b) はリッカー波形を 40 個に増やした場合、Fig. 17(c) はリッカー波形を 100 個に増やした場合である。リッカー波形の数を増やすにしたがい、境界部分の振幅が大きくなっていくことがわかる。

次に Fig. 15(b) の場合においてリッカー波形同士の間隔は一定の状態、存在する領域を拡大していく場合を Fig. 18 に示す。Fig. 18(b) はリッカー波形を 40 個、Fig. 18(c) は 100 個の場合の結果である。リッカー波形の数を増やしていくに従って、境界の位置が移動する

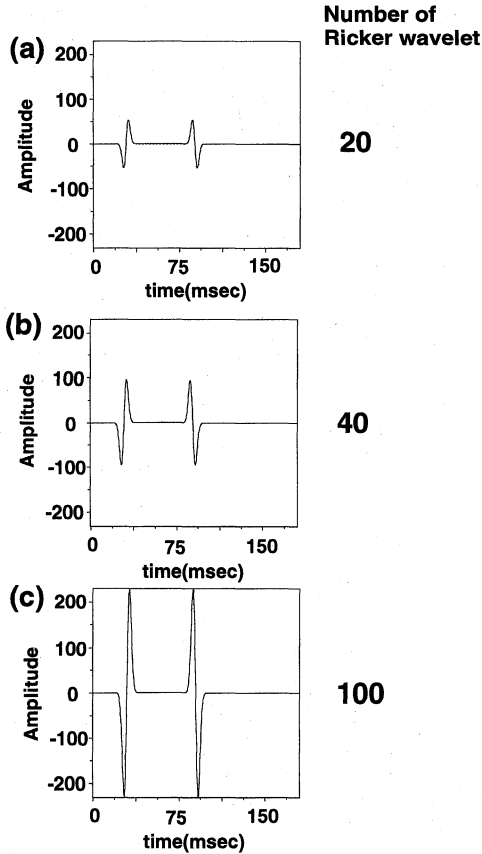


Fig. 17 Interference of various numbers of Ricker wavelets in a fixed range. Various spikes ((a) 20, (b) 40, (c) 100) of equal amplitude and equal polarity set at a constant time interval ((a) 3.0 msec, (b) 1.5 msec, (c) 0.6 msec) are convolved with Ricker wavelet. The value of amplitude of each spike is 100. The responses in case of increasing number of Ricker wavelets in a fixed range are shown. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz.

が、境界部分の振幅は増加しないことがわかる。

最後に20個のリッカー波形が粗密のある不均一間隔で存在する場合に、不均一間隔を一樣に変化させたときの20個のリッカー波形の干渉の様子を Fig. 19に示す。Fig. 19において全体の間隔が小さいときは、密の部分では加算効果が働き振幅の大きな波形が現れ、粗な部分では打ち消し合いが起こっている ((a))。全体の間隔を大きくしていくと、密の部分では打ち消し合いが起こり、ある程度粗の部分では打ち消し合いが起こり、さらに粗になると波同士の干渉が弱まっていく ((b), (c))、

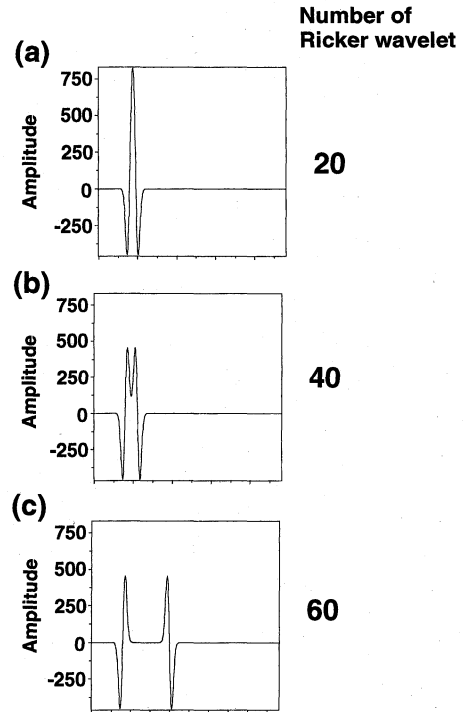


Fig. 18 Interference of various numbers of Ricker wavelets at a fixed interval with increasing a range of spikes. Various spikes ((a) 20, (b) 40, (c) 60) of equal amplitude and equal polarity set at a constant time interval (3.0 msec) are convolved with Ricker wavelet. The value of amplitude of each spike is 100. The responses in case of increasing number of Ricker wavelets with increasing a range of spikes are shown. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz.

(d))。

以上の打ち消し合い効果の基本的性質は、次節以降の議論の基礎となる。

4.3 発振・受振点間隔の影響

発振・受振点間隔の影響を評価するために、再び Fig. 9 に示した均質速度場に散乱点が1つ存在するモデルを用いて数値実験を行った。数値記録はコンボリューション法により作成し(ここでは中心周波数 100 Hz のリッカー波形)、この記録に対して散乱重合法を適用した。なおリッカー波形の振幅は一定である。ここでは坑井間距離 N を 600 m、伝播速度 V を 3000 m/s、散乱点深度 D を変数、発振点数 X_S 及び受振点数 X_R を 30 点、発振間隔 ds 及び受振間隔 dr を変数とする。Fig.

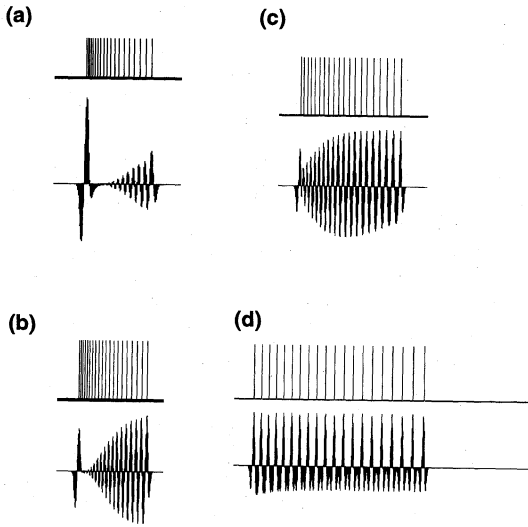


Fig. 19 Interference of twenty Ricker wavelets for various irregular intervals. Twenty spikes of equal amplitude and equal polarity set at gradually increasing time interval are convolved with Ricker wavelet. The value of amplitude of each spike is 100. The responses in case of increasing a range of spikes are shown. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz.

20(a)は $D=600$ m, $ds=dr=20$ m に対する散乱重合記録である。同様に(b)は $D=1200$ m, $ds=dr=60$ m, (c)は $D=3000$ m, $ds=dr=100$ m に対する散乱重合記録である。

Fig. 20は散乱点 P における加算効果(重合数)を一定にして発振・受振点間隔を密な状態から粗い状態まで変化させた(発振・受振点間隔を 20 m, 60 m, 100 m と大きくした)場合の散乱点のイメージ形成過程の様子を示す。Fig. 20より発振・受振点間隔を粗くしていくに従い、水平分解能が低下していくことがわかる。

このことを理解するためには、発振・受振点の様なサンプリングについて考える必要がある。一般的には発振・受振点は等間隔に配置されるが、イメージング対象の散乱点の視点から発振・受振点を見た場合、この配置は様ではないことがわかる (Fig. 21(a))。つまり Fig. 21(a)において、散乱点の視点からは散乱点からの距離が離れるに従い、発振・受振点の間隔が狭くなっている。一方、イメージング対象の散乱点に対して発振・受振点を等角度に配置する場合、散乱点の視点からは、発振・受振点が均等に配置されている (Fig. 21(b))。散乱点の視点から見て、発振・受振点が均等に配置され

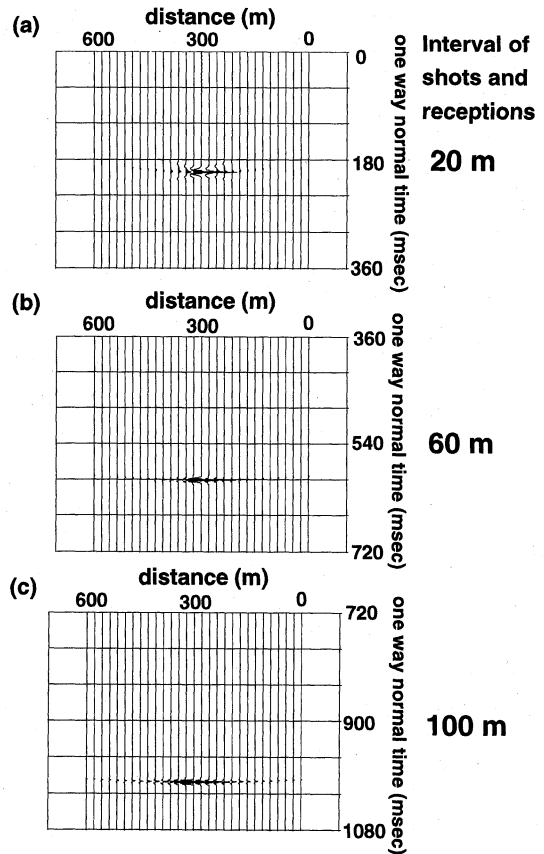


Fig. 20 Diffraction stacked records for various intervals of shots and receptions, (a) interval=20 m, (b) 60 m, (c) 100 m.

ている状況は、等走時面同士の間隔は前述のいかなるウインドウで切り出しても近似的にほぼ均等であることに相当する。

このことを Fig. 22に示す簡単な数値実験で検証する。均質速度場に散乱点が1つ存在するモデルにおいて、コンボリューション法(ここでは中心周波数 250 Hz の振幅一定のリッカー波形)により記録を作成し、この記録に対して散乱重合法を適用した。このモデルにおいて、一つの発振点に対して受振点を等間隔に配置した場合と散乱点に対して等角度に配置した場合とにおけるそれぞれの散乱重合記録を Fig. 23に示す。散乱点に対して等角度(12.6度)に配置した場合の各トレースにおいて、等走時面同士の間隔はほぼ均等であることがわかる。

したがって、Fig. 20(c)の場合、等走時面同士の間隔に粗密が出来てしまい、密の部分では加算効果が働き

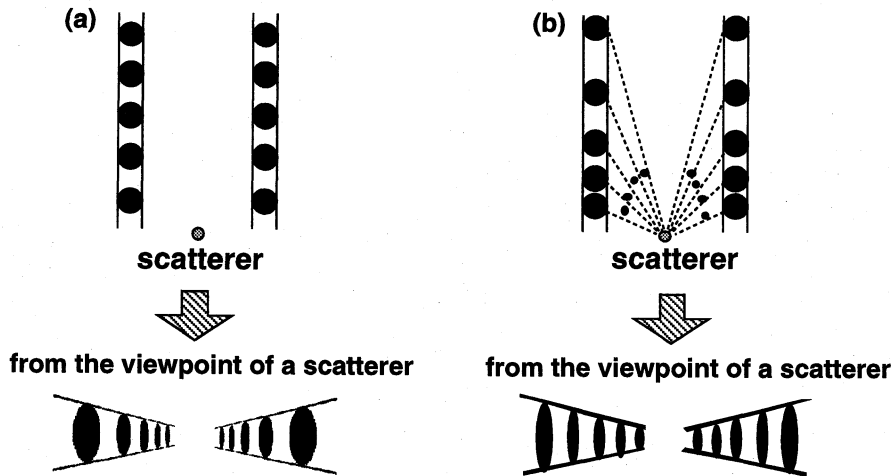


Fig. 21 Comparison of source/receiver arrangements between (a) a constant interval and (b) a constant angle against a scatterer. The lower figures represent source/receiver positions from the viewpoint of the scatterer.

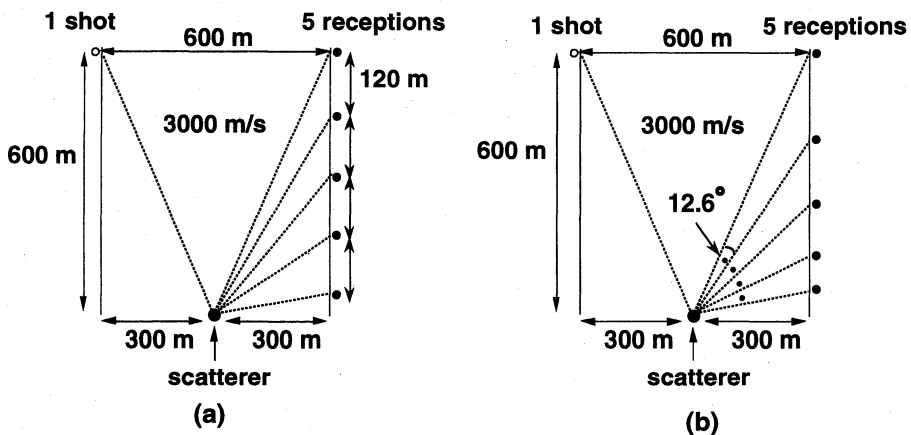


Fig. 22 One point scatterer numerical simulation models and two types of the specifications of data acquisition. One point scatterer is spaced at the center of interwell and placed at a depth of 600 m in a medium with constant velocity of 3000 m/s. The separation of boreholes is 600 m. Diffracted waves generated by a scatterer were produced by using the convolution method. Central frequency of Ricker wavelet is 250 Hz. (a) 5 receivers are arranged at constant intervals of 120 m. (b) 5 receivers are arranged at a constant angle of 12.6 degrees against the scatterer.

振幅の大きな波形が現れることになる。その結果、密の部分に生じた波形が現れてくることにより、水平方向の分解能が低下したと考えられる。この現象は前節で述べた Fig. 19(a) の場合に相当する。Fig. 20 に示した例の場合、(a), (b), (c) の順番にしたがって、この現象が次第に強く現れている。

以上の議論より、発振・受振点間隔の影響については、それらを等間隔に配置した場合は水平分解能が低下

し、その間隔を大きくすると水平分解能の低下は大きくなる。この場合、水平分解能の低下を避けるためには、イメージング対象の散乱点に対して等角度に発振・受振点を配置することが有効である。このことを検証するために Fig. 24 に示した数値実験を行った。Fig. 24 に示したモデルは均質速度場に散乱点が 1 つ存在する数値モデルである。坑井間距離を N m、伝播速度を V m/s、散乱点深度を D m、発振点数を X_S 、受振点数を X_R 、

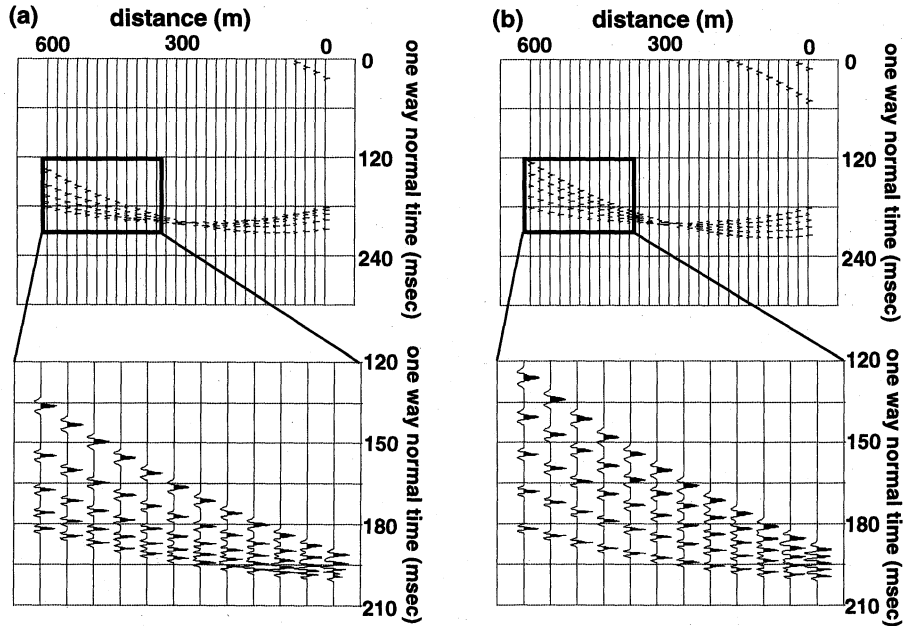


Fig. 23 Diffraction stacked records for each model shown in Fig. 22. The lower figures are enlargement of the parts enclosed in rectangles.

散乱点に対して発振・受振点を等角度に配置し、その角度を θ とする。ここでは坑井間距離 N を600 m、伝播速度 V を3000 m、散乱点深度 D を3000 m、発振点数 X_S 及び受振点数 X_R を30点、散乱点に対して等角度(2.8度)になるように発振・受振点を配置した。中心周波数100 Hzのリック波(振幅は一定)を用いたコンボリューション法により記録を作成し、散乱重合法を適用した。なお発振・受振点の高低差はFig. 20(c)の場合とほぼ同等に設定している。散乱重合結果をFig. 25に示す。Fig. 20(c)の散乱重合結果と比較して水平分解能が向上したことがわかる。

発振・受振点を等角度に配置する場合は、サンプリング角度を一定の条件で重合数を増やしていくと、対象とする点の加算効果は増加する一方で、対象とする点以外における打ち消し効果は一定である(Fig. 18に示した現象に相当する)ため重合記録のS/N比は最も効率良く向上する。

またFig. 20(c)の場合のアレイ長はそのままに、発振・受振点数を増やしながら発振・受振点間隔を等間隔のまま小さくしても水平分解能は向上しない。これはFig. 17に示した現象に相当する理由のためである。よってアレイ長が長くなる場合は発振・受振点を等角度に配置することが必要である。

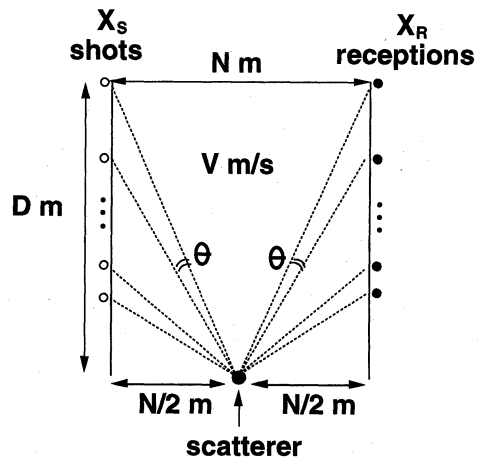


Fig. 24 One point scatterer numerical simulation model and the specifications of data acquisition. One point scatterer is spaced at the center of interwell and placed at a depth of D m in a medium with constant velocity of V m/s. The separation of boreholes is N m. The number of shot and reception points is X_S and X_R respectively. Sources and receivers are arranged at a constant angle of θ degrees against the scatterer. Diffracted waves generated by a scatterer were produced by using the convolution method. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz.

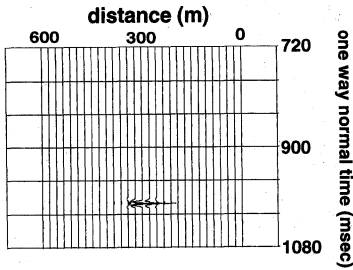


Fig. 25 Diffraction stacked record for the model shown in Fig. 24. $D=3000$ m, $V=3000$ m/s, $N=600$ m, $X_S=X_R=30$, $\theta=2.8$ degrees.

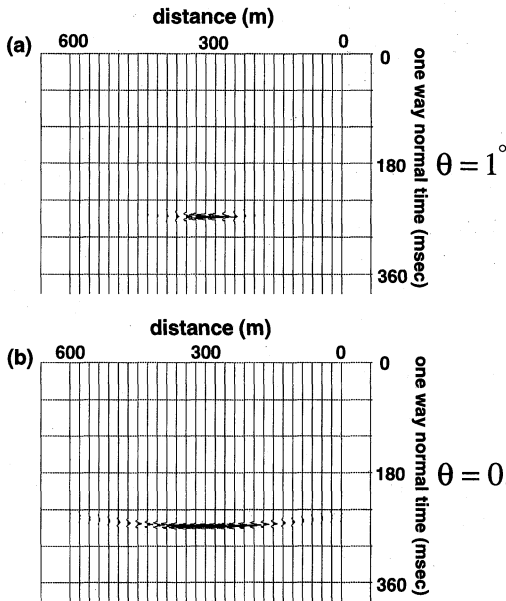


Fig. 26 Diffraction stacked records for various values of θ shown in Fig. 24, $D=800$ m, $V=3000$ m/s, $N=600$ m, $X_S=X_R=30$, (a) $\theta=1^\circ$, (b) $\theta=0.3^\circ$.

なお、本稿において適用している散乱重合法は重合の際に、各トレースに対して重みづけによる振幅補正を施していない。SAFAR (1985) は水平分解能向上においては、この重みづけによる効果はほとんど見られないと報告している。また厳密な定式化に基づいた重みづけによる振幅補正とその近似的な重みづけによる振幅補正とは精度にあまり変化はみられない (中島ほか, 1997)。

4.4 発振・受振点アレイ長の影響

前節では、発振・受振点をイメージング対象の散乱点

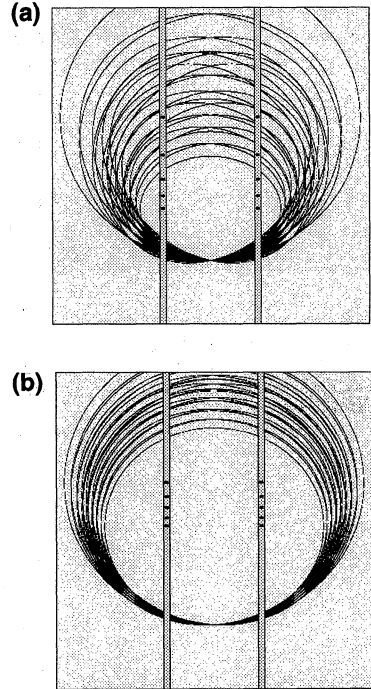


Fig. 27 Equi-travel time planes corresponding to the diffraction stacked records shown in Fig. 26. Some sources and receivers are thinned out for easy visualization.

に対して等角度になるように配置することが水平分解能向上に有効であることがわかった。

ここでは発振・受振点があるように配置された状況において、それらのアレイ長が分解能に及ぼす影響を評価する。この目的のために、再び Fig. 24 に示したモデルを用いた数値実験を行った。ここでは坑井間距離 N を 600 m、伝播速度 V を 3000 m、散乱点深度 D を 800 m、発振点数 X_S 及び受振点数 X_R を 30 点、角度を変数とした。数値記録は前述したコンボリューション法 (ここでは中心周波数 100 Hz の振幅一定のリッカー波形) により作成し、この記録に対して散乱重合法を適用した。発振・受振点数を共に固定した上で等角度サンプリングの角度 θ を変化させた場合の散乱体のイメージング形成変化の様子を Fig. 26 に示す ((a) $\theta=1^\circ$, (b) $\theta=0.3^\circ$)。アレイ長を短く (サンプリング角度を小さく) すると、水平分解能が低下していく様子がわかる。また Fig. 26 のそれぞれの結果に対応する等走時面を Fig. 27 に示す (見やすくするために、発振・受振点数を間引いてある)。アレイ長が短い場合は、等走時面同士が接近してしまい、加算効果が働くことにより水平分解能が低

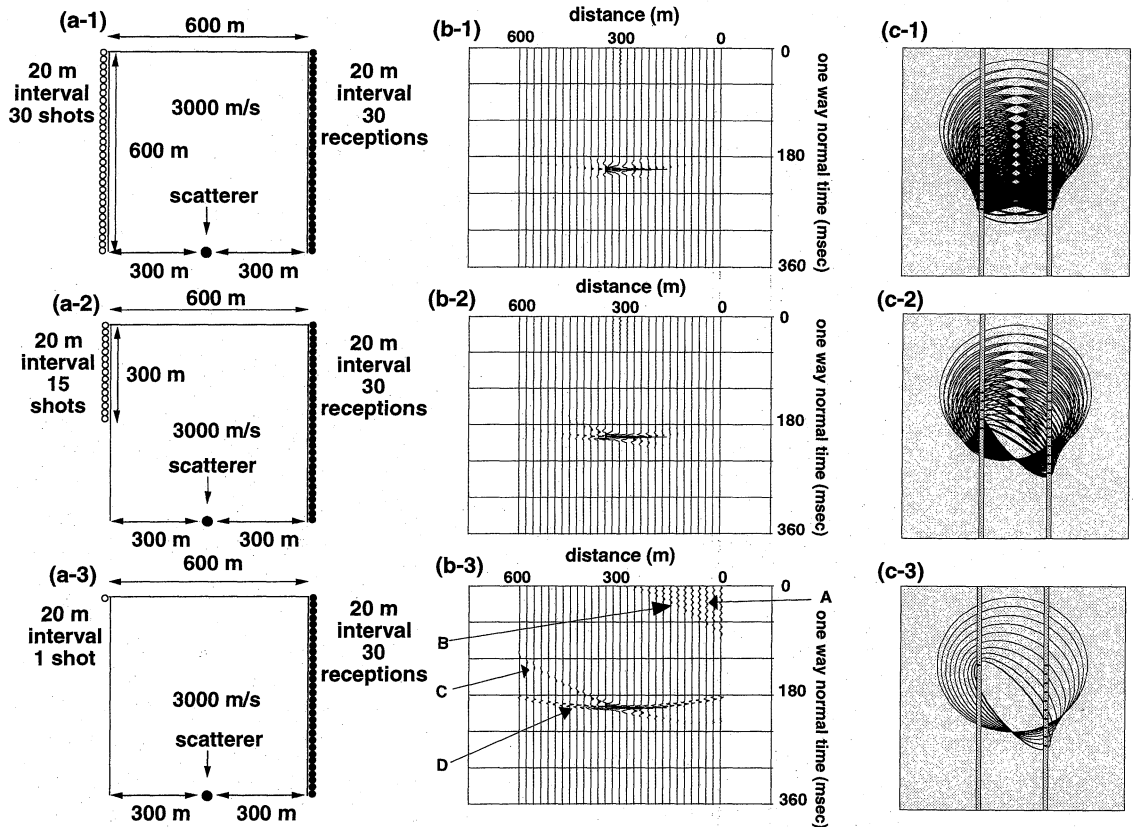


Fig. 28 (a) One point scatterer numerical simulation models and three types of the specifications of data acquisition. One point scatterer is spaced at the center of interwell and placed at a depth of 600 m in a medium with constant velocity of 3000 m/s. The separation of boreholes is 600 m. Diffracted waves generated by a scatterer were produced by using the convolution method. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz. (a-1) One source is spaced at a depth of 0 m in one side borehole and 30 receivers are spaced 20 m apart in the other side borehole. (a-2) 15 sources are spaced 20 m apart in one side borehole and 30 receivers are spaced 20 m apart in the other side borehole. (a-3) 30 sources are spaced 20 m apart in one side borehole and 30 receivers are spaced 20 m apart in the other side borehole. (b) Diffraction stacked records for each model shown in (a-1)~(a-3). False images are indicated by the arrows. (c) Equi-travel time planes corresponding to the diffraction stacked records shown in (b-1)~(b-3). Some sources and receivers are thinned out for easy visualization.

下してしまう様子がわかる。これは Fig. 15(a)の場合に相当する現象である。

以上の議論より、水平分解能の改善には発振・受振点アレイ長はできるだけ長くとした方がよい。ここで、発振・受振点アレイ長を長くするという意味は、散乱点に対する入射(+散乱)角度の範囲を広くした方がよいという意味である。

4.5 発振・受振点配置が非対称の場合の影響

発振・受振点配置が非対称な場合の影響を評価するた

めに、Fig. 28(a-1)~(a-3)に示した均質速度場に散乱点1つ存在するモデルを用いて数値実験を行った。波形は振幅一定のリッカー波の中心周波数 100 Hz を用いて、コンボリューション法により記録を作成し、この記録に対して散乱重合法を適用した。受振点配置はそのまま発振点数を順次少なくしていく場合における散乱体のイメージング形成変化の様子を Fig. 28(b-1)~(b-3)に示す。発振点を順次少なくしていったがって、偽像が現れてくることがわかる (Fig. 28(b-3)の A, B, C, D で示した部分)。

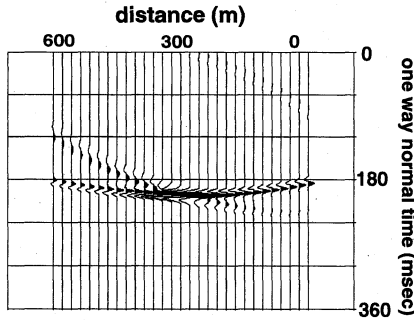


Fig. 29 Diffraction stacked record for the model shown in Fig. 28(a-3) at a central frequency of 50 Hz. One source is spaced at a depth of 0 m in one side borehole and 30 receivers are spaced 20 m apart in the other side borehole.

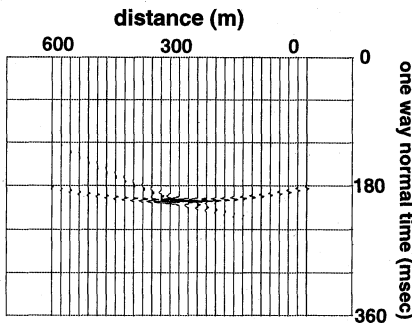


Fig. 30 Diffraction stacked record for the model shown in Fig. 28(a-3). One source is spaced at a depth of 0 m in one side borehole and 300 receivers are spaced 2 m apart in the other side borehole.

これらの偽像は発振・受振点配置の非対称のために生じた打ち消し残しであると考えられる。Fig. 28(c-1)~(c-3)に Fig. 28(b-1)~(b-3)のそれぞれの散乱重合記録に対応する等走時面を示す(なお見やすくするために、発振・受振点数を間引いてある)。Fig. 28(b-3)の結果と等走時面とを比較すると、Fig. 28(b-3)のA, B, C, Dで示した偽像部分は、等走時面同士の打ち消し効果が小さい箇所(A),あるいは等走時面群の境界部分(B, C, D)である。

Fig. 28(b-3)の場合においてリッカー波形の中心周波数を 100 Hz を 50 Hz に設定して処理を行った結果を Fig. 29 に示す。波長を長くしたことによる打ち消し合い効果で、A で示した偽像部分が弱められたことがわかる。これは Fig. 16(a) と (b) の関係に相当する。しかし、B, C, D で示した偽像部分は依然残存している。特

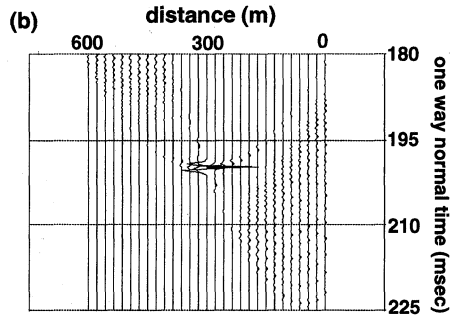
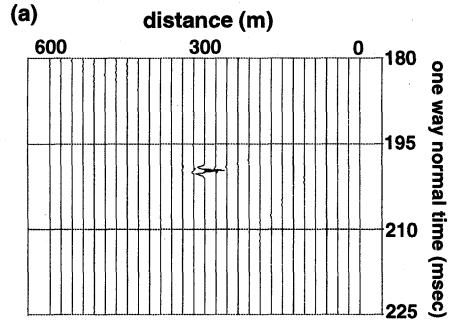


Fig. 31 (a) Diffraction stacked records for the model shown in Fig. 28(a-3) at a central frequency of 500 Hz. (b) Same as (a) but displayed with larger trace deflection.

に、C と D に関しては、振幅が大きくなっていることがわかる。この現象は Fig. 16(b) と (c) の関係に相当する。

また Fig. 28(b-3) の場合において受振点間隔を 1/10 (2 m 間隔)、総受振点数を 10 倍 (受振点数 100 点) にして処理を行った結果を Fig. 30 に示す。受振点密度を増やしたことにより、等走時面密度が増加し、A で示した偽像部分が弱められたことがわかる。しかし、この場合においても B, C, D で示した偽像部分は残存している。これは、受振点数を増やせば散乱点における重合数は増加するため散乱点における振幅は増加するが、同時に境界部分における振幅も増幅してしまうため(これは Fig. 17 の場合に対応する現象である)、境界部分の振幅に対する散乱点における振幅の S/N 比はさほど変化しないからである。

次に Fig. 28(b-3) の場合においてリッカー波形の中心周波数を 100 Hz を 500 Hz に設定して処理を行った結果を Fig. 31(a) に示す(表示の都合上、散乱体近傍を含む時間区間のみを表示している)。Fig. 31(a) よりこれまで現れていた偽像がほぼ消えていることがわかる。こ

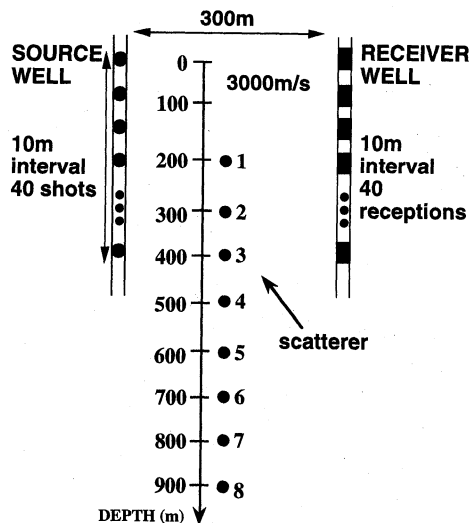


Fig. 32 Numerical simulation model and the specifications of data acquisition. Eight point scatterers are spaced at the center of interwell and placed 100 m apart in a medium with constant velocity of 3000 m/s. 40 sources and receivers are spaced 10 m apart. The separation of boreholes is 300 m. Diffracted waves generated by eight scatterers were produced by using the convolution method. Central frequency of Ricker wavelet is 100 Hz.

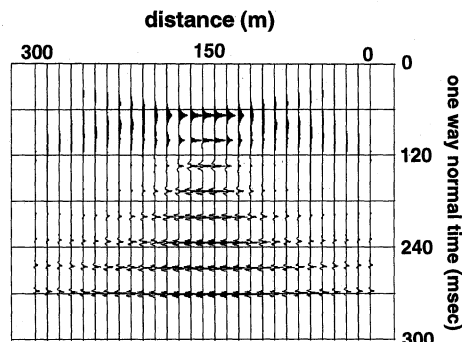


Fig. 33 Diffraction stacked record for the model shown in Fig. 32.

5. 考 察

5.1 分解能の概念について

前節までは、NMO補正によるストレッチ効果ならびに発振・受振点観測配置が分解能形成にどのような影響を及ぼすのかを検討してきた。前述したように反射法地震探査における分解能の定義は一般に、2つの示徴を識別できる能力であるとされている。ここでは重合処理によって形成される分解能の概念について考察する。

まずNMO補正によるストレッチ効果に関しては、インパルス波形を入力とする場合にはストレッチ効果は生じない。

また観測配置に関しては、インパルス波形を利用し、無限個の発振点あるいは受振点を利用してイメージングすると仮定すれば、発振・受振点配置に関わらず散乱点Pにおいてのみ無限大の値が得られる。このような状況においては分解能という概念は存在しない。

すなわち有限周波数を有する波形を入力とし、有限個の受振点および発振点を利用してイメージングする場合において分解能が生ずる。その分解能の考え方は、等走時面同士が打ち消し合いを行い、その打ち消し効果の良し悪しで『視覚的な』像が表現されることに基づく。このような分解能の概念は工学的にみれば、非常にあいまいな概念であることがわかる。逆の見方をすれば、このような分解能の概念の中で、最良の分解能を得るための知識が工学的に重要であると考えられる。よって前章までに検討してきた分解能に関する議論は、このような知識の一端として位置づけることができる。

5.2 分解能の最適化

前章までは分解能を左右する要因となる、NMO補正

れは以下のように考えることができる。中心周波数100 Hzを500 Hzに設定したことにより、等走時面同士の干渉が弱くなる。その一方で、散乱点における加算効果は変化しないので、散乱点以外の振幅に対する散乱点における振幅のS/N比は大きくなる。すなわち、偽像がほぼ消えているのは、相対的に“見えなくなっている”という意味である。よってFig. 31(a)の表示振幅を増幅すれば、偽像が“見えてくる”(Fig. 31(b))。

以上の議論より、発振・受振点配置が非対称の場合においては、散乱点以外における等走時面同士の打ち消し合い効果を期待することは困難で、むしろ等走時面同士を干渉させない状況にすることが重要である。この状況は、発振・受振点間隔をより広くするか高周波数の波形を用いることにより実現できる。しかしながら現実問題として、前者に関しては、波動の減衰効果があるため間隔を広く取るには限界がある。また後者に関しては、現在のデータ取得技術においては使用できる高周波数に上限があるため、発振・受振点配置はできる限り対称にした方がよい。

によるストレッチ効果と、発振・受振点の観測配置との影響とを別々に評価した。しかし両者は相対関係にある。つまり、NMO 補正によるストレッチ効果による分解能低下を避けるためには、入射（+散乱）角度の大きなトレースを除去する必要がある。しかし、発振・受振点の観測配置の観点からは、できるだけ広く入射（+散乱）角度範囲をとる方が良くと考えられる。ここでは両者をパラメータとする分解能の最適化について考察する。

この目的のために、Fig. 32に示す数値実験を行った。数値モデルは8個の散乱点が等間隔になるように深度方向に存在し（それぞれ深度方向に番号がつけてある）、このモデルに対して前述したコンボリューション法（ここでは中心周波数 100 Hz の振幅一定のリッカー波形）により記録を作成した。この記録に対して散乱重合法でイメージングした結果を Fig. 33に示す。1番ならびに2番の散乱点に関しては、それらの散乱点に対する入射（+散乱）角が大きいため、NMO 補正によるストレッチ効果による垂直分解能の低下ならびにそれに伴った水平分解能の低下が卓越している。逆に、5番、6番、7番、8番の散乱点に関しては、それらの散乱点に対する入射（+散乱）角度範囲が縮小するため、水平方向分解能の低下が卓越している。両者の中間である3番、4番の散乱点は相対的に良好な分解能が得られている。す

なわち、NMO 補正によるストレッチ効果と入射（+散乱）角度範囲との関係には最適化問題が存在することがわかる。ただし、ここでは減衰の効果は考慮していないので、実際には減衰の効果も含めた最適化問題が存在すると考えられる。

5.3 データ処理結果の解釈における分解能評価への応用の可能性

データ処理結果の解釈の段階において、反射面の連続性に着目する機会が多い。この場合に重要なことは、データ処理により描かれている反射面が分解能の観点から合理的であるか否かを評価することである。ここではフィールドデータ処理結果を用いて、このような評価への応用の可能性について述べる。

フィールド記録処理例として、MATSUSHIMA et al. (1997) が大分県湯坪地熱地帯において NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）により取得された坑井間地震探査記録を用いて3種類の周波数帯域（180–280 Hz, 80–180 Hz, 30–130 Hz）ごとに散乱重合法を適用した結果を Fig. 34に示す。Fig. 34において、反射面らしき特徴が認められ、それらが周波数依存をしていることがわかる。なお、フィールド記録ならびにデータ処理方法については MATSUSHIMA et al. (1997) を参照されたい。

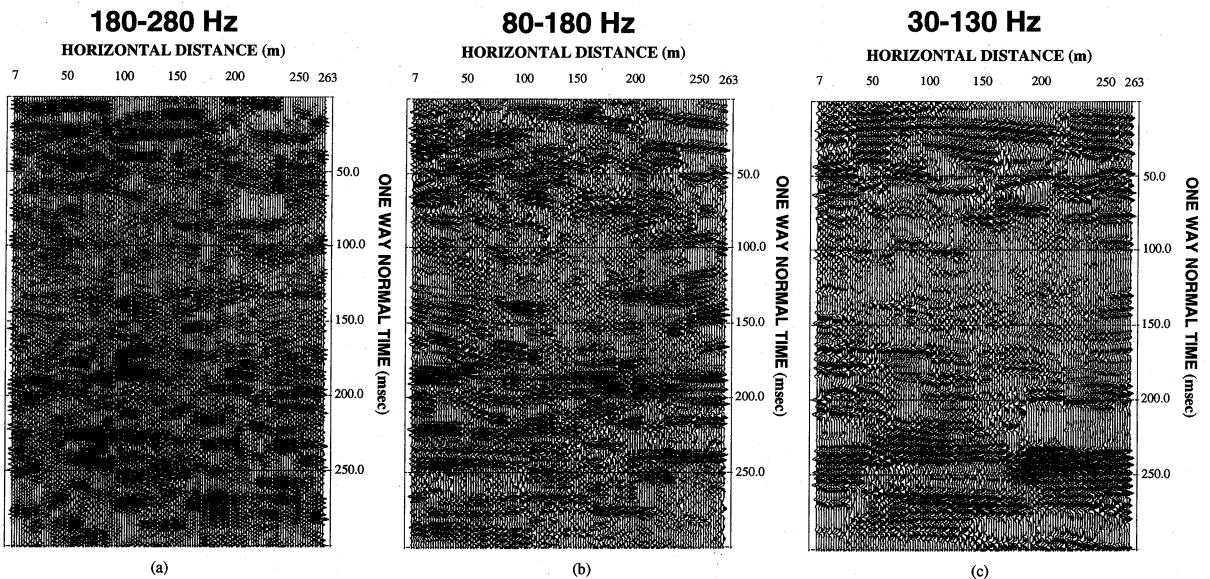


Fig. 34 Diffraction stacked records for the cross-well seismic field data, bandpass filters (a) 180–280 Hz, (b) 80–180 Hz, (c) 30–130 Hz (MATSUSHIMA et al., 1997).

ここで Fig. 35 に示す数値実験を行った。数値モデルは 9 個の散乱点が存在し、これらの散乱点を散乱重合法でイメージングする。数値記録はコンボリューション法により作成した。なお、中心周波数が 230 Hz, 130 Hz, 80 Hz の 3 種類の振幅一定リッカー波形を用いた。これら 3 種類の中心周波数に関しては、上述の 3 種類の周波数帯域の中間値に設定した。また発振・受振の幾何学的配置も上述のフィールド記録のそれに近い状態に設定した。

3 種類の中心周波数を有する記録に対する散乱重合記録を Fig. 36 に示す ((a) は中心周波数 230 Hz の結果、以下 (b) 130 Hz, (c) 80 Hz の結果)。Fig. 36 より中心周波数 230 Hz の場合においては、それぞれの散乱点が判別可能な状態でイメージングされているが、中心周波数を低くするに従って、散乱点同士の識別が困難な状態になることがわかる。Fig. 36 (c) の状態は、散乱点同士の間隔に対して分解能の悪い状態でイメージングしており、“みかけ反射面”を形成していることがわかる。GIBSON and LEVANDER (1990) は、このような“みかけ反射面”の形成について陸上反射法地震探査を利用した地殻下部探査において議論している。

以上の議論より、Fig. 34 に示した MATSUSHIMA et al. (1997) の処理結果に見られる反射面らしき特徴は、実際には連続的な反射面でない可能性が考えられる。このような評価において本稿で論じている分解能に関する研究を応用できる可能性があると思われる。

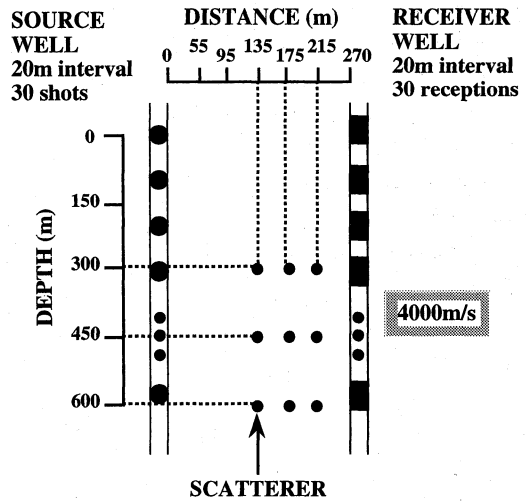


Fig. 35 Numerical simulation model and the specifications of data acquisition. Eight point scatterers are spaced as shown in figure in a medium with constant velocity of 4000 m/s. 30 sources and receivers are spaced 20 m apart. The separation of boreholes is 270 m. Diffracted waves generated by nine scatterers were produced by using the convolution method.

5.4 速度不均質性の影響

本稿ではこれまで、均質速度場における分解能に関して検討してきた。ここでは速度不均質性の影響について

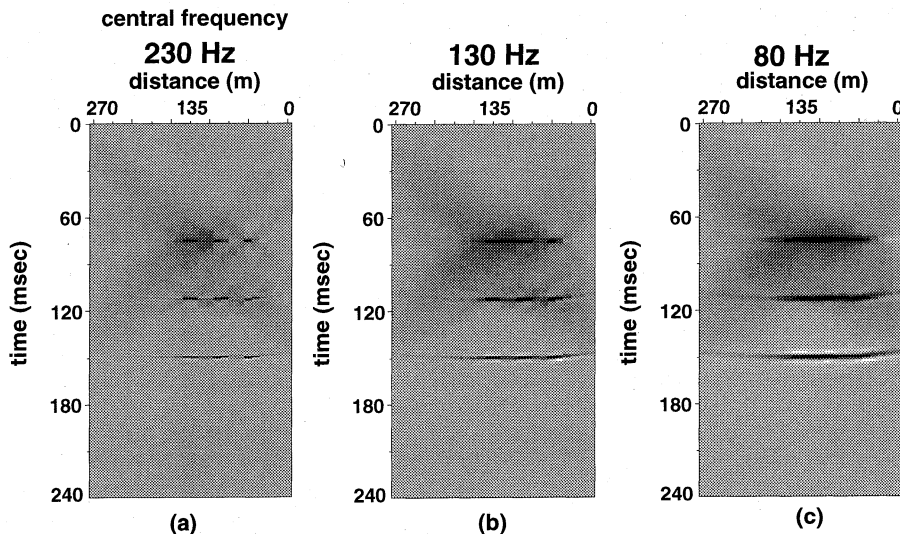


Fig. 36 Diffraction stacked record for the model shown in Fig. 35, for various central frequencies, (a) 230 Hz, (b) 130 Hz, (c) 80 Hz.

若干考察する。

一つの散乱点をイメージする場合、得られる分解能は散乱点における加算効果と散乱点以外における打ち消し効果により決定されることを前述した。しかし、本質的に重要な要素は加算効果である。本稿において適用している重合処理は、場の平均的な速度（いわゆる重合速度）を仮定するため、速度不均質性による影響を受け、その影響により加算効果は減少する。以下では速度不均質性による加算効果減少を評価する。

この目的のために、Fig. 37に示す数値実験を行った。数値モデルは水平二層構造（上側の速度を V_1 、下側の層の速度を V_2 とする）で、下側の層中に散乱点が一存在し、このモデルに対してコンボリューション法により記録を作成した。なおリッカー波形の中心周波数は三種類（10 Hz, 30 Hz, 100 Hz）使用し、その際の波形の振幅は一定とした。各中心周波数の記録に対して散乱重合法を適用した結果を Fig. 38に示す（ $V_1=3000$ m/s, $V_2=3500$ m/s）。なお散乱重合適用の際の重合速度は、重合速度解析パネルによりピックアップされた重合速度を用いた。比較のために上側の速度と下側の層の速度が等しい場合（ $V_1=V_2=3000$ m/s）の散乱重合記録も Fig. 38の下側に示す。

Fig. 38より中心周波数を高く設定するにしたがって、

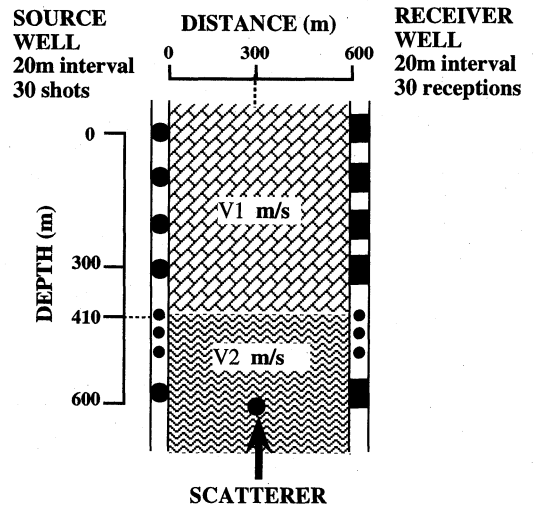


Fig. 37 Two-layer numerical simulation model and the specifications of data acquisition. The top layer is 410 m thick with a velocity of V_1 m/s and the velocity of bottom layer is V_2 m/s. One point scatterer is spaced at the center of interwell and placed at a depth of 600 m in a bottom layer. The separation of boreholes is 600 m. Diffracted waves generated by one scatterer were produced by using the convolution method.

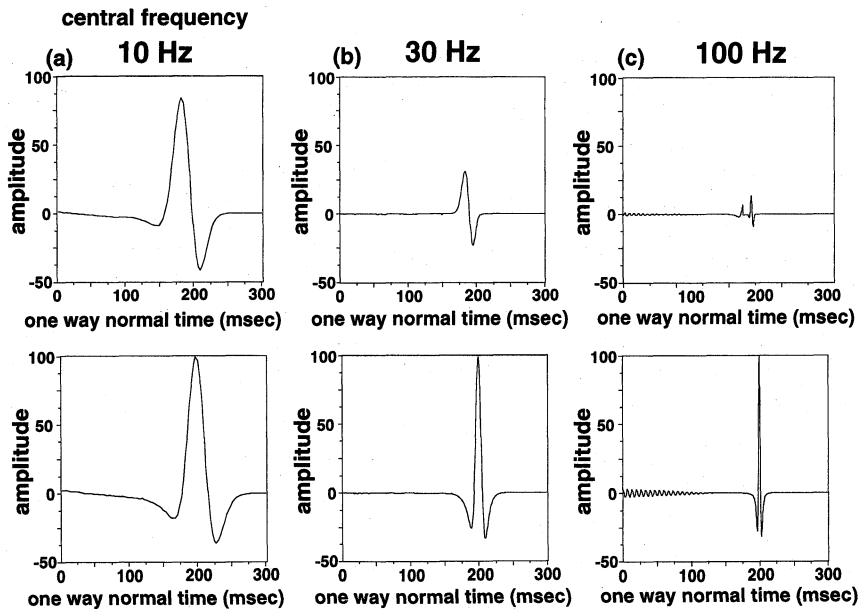


Fig. 38 Diffraction stacked records for the model shown in Fig. 37 at the center of the interwell, for various central frequencies, (a) 10 Hz, (b) 30 Hz, (c) 100 Hz ($V_1=3000$ m/s, $V_2=3500$ m/s). The lower figures represent diffraction stacked records in the case of homogeneous media.

速度不均質性による影響を受け、加算効果が減少することがわかる。このことは本稿で適用している重合処理に際しては、周波数が低い波形にくらべて周波数が高い波形の方が速度不均質性に対して敏感であることを意味する。この理由は、周波数が低い波形は時間軸において局在性が低いため、例えば CDP 重合処理する際に、速度不均質性による反射波列の双曲線パターンからのずれを吸収してしまうが、周波数が高い波形は時間軸における局在性が高いため、このずれによる影響を敏感に受けてしまうためである。

なお Fig. 38(c) の反射波形の初めの方に振動が見られるが、これは波形の周波数が高くなったことにより、打ち消し合っていた波形同士の打ち消し効果が減少し、波形が現れてきた理由による。この現象は Fig. 16(b) あるいは(c)と(a)の関係に相当する。

以上の議論より、速度不均質性の影響に関しては周波数依存性があることがわかった。速度不均質性の影響に関しては今後さらに検討する必要がある。

6. 結 論

重合処理によって形成される分解能は、有限周波数を有する波形を入力とし、有限個の受振点および発振点を利用してイメージングする場合において生ずる。その分解能の考え方は、等走時間同士が打ち消し合いを行い、その打ち消し効果の良し悪しで『視覚的な』像が表現されることに基づくことを示した。このような分解能の概念は工学的にみれば、非常にあいまいな概念であることがわかった。このような分解能の概念において、最良の分解能を得るための知識が工学的に重要であると考えられる。以下の結論はこのような知識の一端として位置づけることができる。

重合処理によって形成される分解能の支配要因として、NMO 補正におけるストレッチ効果と発振・受振点の幾何的配置とに着目して、それぞれの影響の評価を行い、以下を得た。

(1) NMO 補正におけるストレッチ効果に関しては、入射（+散乱）角の大きさに応じた波形の低周波数化が起り、その低下率は本稿で導出した基本式で評価できる。重合処理においては入射（+散乱）角の大きなトレースを除去すること。この操作により状況によっては全反射領域の反射波の影響を避けることができる。NMO 補正におけるストレッチ効果は水平および垂直分解能に影響を与える。

(2) 発振・受振点の幾何的配置に関しては、

(2-a) 一様なサンプリングをすること。ここで一様

なサンプリングとは、発振・受振点間隔を等しく配置することではなく、イメージング対象とする点に対して、発振・受振点を等角度に配置することである。このことは特に、発振・受振アレイ長が長くなる場合に重要である。

しかし、イメージング対象があらかじめわかっているならば、その対象に対して上記のように発振・受振点を配置すればよいが、一般的にはイメージング対象は未知である。そこで、発振・受振点をできるだけ細かく配置して、処理の過程でそれぞれのイメージング箇所において最適な発振・受振点を選択して重合処理を行うことが考えられる。

(2-b) 発振点数と受振点数に偏りがいないこと。

(2-c) イメージング対象となる地点に対する入射（+散乱）角の範囲を広くするように発振・受振点を配置すること。すなわち発振・受振アレイ長を長くすることに相当する。範囲を広くとれば水平分解能が向上するが、どれだけ範囲を広くできるかは、その調査対象媒質の波動の減衰特性による。また、以上の要請は坑井間反射法における坑底以深探査の水平分解能を規定する。

(3) (1)と(2)の影響は相対関係にあり、波動の減衰効果も考慮を含めて状況に応じた最適化を行うことが必要である。

以上の結論は速度場が均質の場合である。

(4) 速度不均質性が分解能に及ぼす影響に関しては、周波数が低い波形にくらべて周波数が高い波形の方が速度不均質性の影響をより受けやすいことを示し、周波数依存性があることを示唆した。速度不均質性の影響に関する詳細な評価は今後の課題としたい。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、匿名の査読者の方々には丁寧な査読をしていただき、論文改善に非常に有益な御指摘を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- GIBSON, B. S., A. R. LEVANDER (1990) : Apparent layering in common-midpoint stacked images of two-dimensionally heterogeneous targets, *Geophysics*, **55**, 1466-1477.
- KALLWEIT, R. S. and WOOD, L. C. (1982) : The limits of resolution of zero-phase wavelets, *Geophysics*, **47**, 1035-1046.
- KOEFOD, O. (1981) : Aspects of vertical seismic resolution, *Geophysical Prospecting*, **29**, 21-30.

- MATSUSHIMA, J., S. ROKUGAWA, T. YOKOTA, T. MIYAZAKI (1997) : Cross-well imaging by the CDP stacking and the diffraction stacking with velocity analysis, *BUTSURI-TANSA*, **50**, 107-122.
- NEIDEL, N. S. (1994) : Sampling 3-D seismic survey: A conjecture favoring coarser but higher-fold sampling, *The Leading Edge*, **13**, 764-768.
- SAFAR, M. H. (1985) : On the lateral resolution achieved by Kirchhoff migration, *Geophysics*, **50**, 1091-1099.
- SCHOENBERGER, M. (1974) : Resolution comparison of minimum-phase and zero-phase signals, *Geophysics*, **39**, 826-833.
- SHERIFF, R. E. and GELDARR (1982) : *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, 117-122.
- SCHUSTER, G. T. (1995) : Fracture resolution limits for crosswell migration and travelttime tomography: theory, *Geotomography vol. 3, Proceedings of the 3rd SEGJ/SEG International symposium on Geotomography—Fracture Imaging—*, 86-93.
- STOLT, R. H. and BENSON, A. K. (1986) : *Seismic migration theory and practice*, Geophysical Press, London-Amsterdam, p. 45.
- VERMEER, G. J. O. (1995) : Is “coarse” the right course?, *The Leading Edge*, **14**, 989-993, with reply by N. NEIDEL.
- WIDESS, M. B. (1982) : Quantifying resolving power of seismic systems, *Geophysics*, **47**, 1160-1173.
- YILMAZ, O. (1988) : Seismic data processing, Society of exploration geophysicists, 468-469.
- 芦田 讓, 佐々宏一 (1993) : 坑井間反射法地震探査データの深度変換, *物理探査*, **46**, 167-174.
- 中島善成, 松岡俊文, 鶴 哲郎 (1997) : キルヒホッフ法による3次元重合前時間マイグレーション処理, *物理探査学会第96回 (平成9年度春季) 学術講演会講演論文集*, 170-173.
- 松島 潤, 六川修一, 横田俊之, 宮崎光旗, 加藤叔史 (1996) : 重合処理と分解能に関する基礎研究, *物理探査学会第95回 (平成8年度秋季) 学術講演会講演論文集*, 1-5.
- 松島 潤, 六川修一, 横田俊之, 宮崎光旗, 加藤叔史 (1997) : 重合処理と分解能に関する基礎研究 (その2), *物理探査学会第96回 (平成9年度春季) 学術講演会講演論文集*, 152-156.