

重合速度解析をともなう散乱重合法による 反射法地震探査データ処理

松島 潤*・六川 修一**・横田 俊之*

Diffraction stacking with stacking velocity analysis in a surface seismic survey

Jun MATSUSHIMA*, Shuichi ROKUGAWA** and Toshiyuki YOKOTA*

ABSTRACT

A new type of prestack time migration method whose data processing scheme is analogous to that of conventional CMP method is presented. This proposed data processing method does not require multiples iterations for achieving the velocity structure in the case of prestack migration. The optimum constant stacking velocity can be determined at each image point from a stacking velocity analysis based on primary diffraction patterns.

Both the conventional CMP stacking method and the conventional stacking velocity analysis are modified as follows.

1. In the case of the CMP stacking method, the amplitudes of observed data are stacked along the reflection pattern in a CMP gather. On the other hand, in the case of diffraction stacking method with stacking velocity analysis, the amplitudes of observed data are stacked along the diffraction pattern in a common source gather or common receiver gather.

2. Stacking velocity analysis can be a useful tool for detecting characteristic patterns. Conventional stacking velocity analysis is modified to detect patterns caused by diffraction events. Final stacked records can be obtained based on maximum coherency peaks on stacking velocity analysis panels.

Firstly, proposed data processing procedure is described in detail. Secondly, the characteristic analysis of the proposed data processing is presented. We studied the S/N ratio of reflection images by numerical experiments which especially considered the effect of stacking aperture, defined as an angle range of collecting seismic traces. Our numerical experiments revealed that diffraction stacking generally has the ability to produce a seismic reflection image with higher S/N ratio than CMP stacking for a horizontal and dipping reflector. This can be explained by Huygens' principle. In case of dipping reflector, however, source/receiver geometrical arrangements are important. And also, stacking coverage, defined as an angle range of collecting seismic traces, is an important factor in obtaining the highest S/N ratio. This can be explained in terms of Fresnel zones. We also found that S/N ratio and horizontal resolution are in inverse proportion to each other.

Key words: Diffraction stacking, Stacking velocity analysis

2000年6月2日原稿受付; 2001年3月6日受理

* 地質調査所

〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-3

** 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

Manuscript received June 2, 2000; Accepted March 6, 2001.

* Geological Survey of Japan 1-1-3, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

** Graduate School of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

1. 序 論

石油探査とともに発展してきた反射法地震探査は石油開発分野に限らず、地熱開発分野、土木調査、地殻構造探査、活断層調査等にも盛んに適用されており、探査対象の多様化・深部化・高分解能化とともに、探査能力向上を目指して研究開発が進められてきた。

このような発展の背景には観測技術ならびにデータ処理技術の向上があったが、とりわけデータ処理技術としては CMP (Common Mid Point) 重合法の導入が最も重要であったと考えられる。CMP 重合法は、共通の反射点における複数の反射記録を取得し、伝播距離の異なるこれらの記録を NMO (Normal Moveout) 補正し、最終的に加算し、信号である反射波を強調する方法であり、1960年代に Mayne (1962) により提案された。

しかしながら、CMP 重合法の問題点は、データ処理を行う際に成層構造を仮定しているため、複雑な構造に対応できないことである。CMP 重合法のこのような欠点が指摘され、CMP 重合法に代わるデータ処理技術として、重合前マイグレーション法の研究開発が行われるようになった。重合前マイグレーション法の有効性はすでに1970年代初頭に Sattlegger and Stiller (1973) によって示されているものの計算機環境の制約のために、盛んに研究・開発が行われるのは1980年代後半以降であった。近年では、高性能計算機を用いた三次元重合前マイグレーションの適用例が多く紹介されてきており、その有効性が示されてきている (e.g., Chang *et al.*, 1998)。

重合前マイグレーション法は、重合前時間マイグレーションと重合前深度マイグレーションに大きく分類される。横方向の速度変化がそれほど大きくない場合は、直線波線を仮定する重合前時間マイグレーション法の適用は妥当であるが、岩塩層に関連した構造やスラスト構造など横方向の速度変化が大きい場合には、波線の曲がりやを考慮に入れた重合前深度マイグレーション法の適用が必要である。

重合前深度マイグレーションを適用するには、高精度の速度構造が必要とされる。現在のところ速度構造推定手法としては、モデルに基づいた方法 (別の手法により求めた速度構造をアприオリに与える方法) とイメージに基づいた方法 (マイグレーション速度解析などを実行してイメージが最適になるように速度構造を更新していく方法) に区分される (Chang *et al.*, 1998)。モデルに基づいた方法としては、Tarantola *et al.* (1992) の波形インバージョンによるものや、Jacobs *et al.* (1992) な

どの反射トモグラフィ手法によるものがある。一方、イメージに基づいた方法としては、大きく分けて2つの手法がある。ある深度におけるイメージのフォーカシングの度合いに着目して速度更新を行う DFA (Depth-Focusing Analysis) 法 (e.g., MacKay and Abma, 1993) と反射波イベントの曲率に着目してイベントが水平に揃うように速度更新を行う方法 (e.g., Al Yahya, 1989; Derogowski, 1990) である。しかし、以上の手法の中で速度構造を高精度に推定する決定的な手法は現在のところ存在せず、今後のさらなる研究開発が期待される。

重合前時間マイグレーションにおける速度推定方法に関しては、逆 NMO を利用して残差速度解析を行う手法や Bancroft *et al.* (1998) による EOM (Equivalent Offset Migration) と呼ばれる手法がある。いずれの手法においても、通常の CMP 重合法の重合速度解析により導出される速度構造などを初期速度構造として、繰り返しを行うことにより残差速度解析を行う。このような繰り返し処理は S/N 比の良好なデータに対しては有効であると考えられるが、例えば地熱地帯などで取得される S/N 比の低いデータに対しては、繰り返し処理が有効に働くかどうかはわからない。

本論文では、十分な S/N 比のデータ取得が期待できないような地域でも何らかの地下のイメージを得るための簡便な重合前時間マイグレーション法の一手法 (重合速度解析をとまらぬ散乱重合法) を提案する。このデータ処理法の特徴は以下の通りである。任意構造問題を常に、均質速度場に一つの異常点が存在する問題に帰着させ、その点において励起される散乱波パターンを解析対象とする。このとき各イメージ点における最適な均質速度は重合速度解析により求める。従来型の CMP 重合法が鏡面反射波パターンを解析対象としているのに対して、本手法は解析対象を散乱波パターンに変更する点だけが異なり、従来型の CMP 重合法のデータ処理スキームの一部を変更しただけに過ぎない。従来型の CMP 重合法のスキームでデータ処理が行える点が有利であると考えている。

このような処理の原型は Sattlegger (1975) にみることができ、本論文では、後述するように重合範囲と呼ぶパラメータを定義することにより、CMP 重合法と散乱重合法との間を柔軟に埋める処理を可能にし、Sattlegger (1975) の方法を一般化したものである。また、CMP 重合法と比較した場合の重合前マイグレーションの利点は複雑な構造に対応できる、すなわち空間分解能の優位性のみが論じられることが多いが、本論文では数値実験により S/N 比特性に関する検討を行った。この

とき重合範囲は重要なパラメータであることを示す。

なお、本手法のイメージ過程はキルヒホフ型重合前時間マイグレーション法に似た手法であるが、振幅に対する重み付けや位相シフトなどを行わないため、波動方程式に基づいたマイグレーション法が紹介される以前のディフラクションスタック法マイグレーションの手法 (Hagedoorn, 1954) に近いものとなっている。また、本手法は Matsushima *et al.* (1995), Matsushima and Rokugawa (1997) が坑井間の幾何的配置において提案した手法を地表反射法地震探査に適用するために変更した手法である。

2. データ処理の概念と手順

ここでは、筆者等が提案する重合速度解析をともなる散乱重合法のデータ処理の概念とその具体的な手順について説明する。

2.1 データ処理の概念

本論文で提案する手法は重合前時間マイグレーションの範疇に属するが、イメージング処理過程に用いる速度構造の概念に特徴を有する。それは CMP 重合法に関する速度構造概念を拡張したものである。このことについて以下に述べる。

まず CMP 重合法における速度構造概念を考える。CMP 重合法においては、RMS 速度の概念を導入することによって多層構造問題を常に二層構造問題として扱える点である。つまり、本来第 n 層の反射面に着目しているにもかかわらず、第 $n-1$ 層までの影響は全て第 1 層に押しつけ、二層構造問題に帰着させる (松岡, 1988)。このような速度構造概念に基づくことにより、

反射面において共通反射する反射波パターンを解析対象とする。

以上の成層構造における概念を散乱重合法に適用すれば以下のように表現できる。任意構造問題を常に、均質速度場に一つの異常点が存在する問題に帰着させる。このような速度構造概念に基づくことにより、任意の点において共通散乱する散乱波パターンを解析対象とする。さらに各イメージ点における最適な均質速度の導出方法とその速度に基づいたイメージング方法について以下に述べる。

各イメージ点において様々な均質速度 (重合速度) を仮定し、その点で励起されるであろう散乱波パターンに沿って振幅を加算する。この場合、様々な均質速度における加算効果を表現する指標 (単純に重合した振幅値あるいはセンプランス値などの統計値) を計算し、その値を重合速度解析パネルと呼ばれるパネル内に設定していく。他のイメージ点についても同様な作業を繰り返すことによりパネルを完成させる。完成された重合速度解析パネルにおいていくつかのピークが存在すると、そのピーク箇所はそのイメージ点において最もイメージ効果の高い均質速度 (重合速度) であることを意味する。なお、水平成層構造仮定に基づいて導出される重合速度は傾斜層の影響を受ける (Levin, 1971) が、散乱波仮定の基づいて導出される重合速度は傾斜の影響を受けにくい。

以上述べた手法の概略を Fig. 1 を用いて説明する。Fig. 1(a) に示したような 4 つの反射面を有する地質構造を考え、矢印で示した位置において重合速度解析を実施する状況設定である。4 つの反射面と重合速度解析地点における鉛直方向の点線 (図中の K) との交点をそ

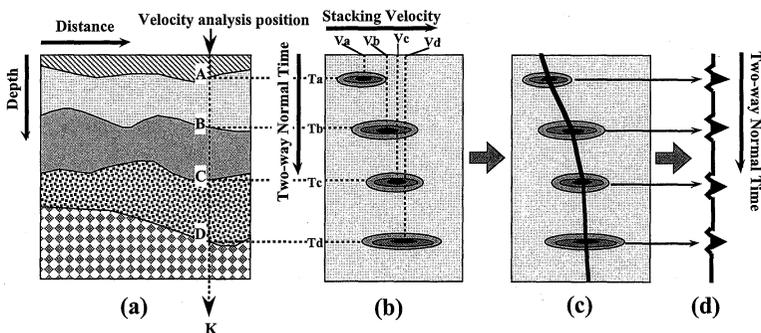


Fig. 1 Illustration of a stacking velocity analysis panel and a stacked trace derived from the stacking velocity panel. (a) Stacking velocity panel which is a table of numbers as a function of velocity versus two-way normal time. (b) Velocity-time pairs are selected from this panel based on maximum coherency peaks. (c) A series of values along these velocity-time pairs makes a diffraction stacked trace.

れぞれ図中に A, B, C, D とする。上述のような手順で作成された重合速度解析パネルを Fig. 1(b) に示す。この地点において最終的に得られるイメージ記録は Fig. 1(d) に示されるように、深度方向が往復走時で表現された記録である。点 A については往復走時 T_a 、重合速度 V_a という位置においてピークが形成される。これは往復走時 T_a においては均質速度 V_a を用いてイメージングを行うことにより最も重合効果があることを意味する。同様に、点 B については往復走時 T_b において均質速度 V_b を用いてイメージングを行うことが重合効果の観点では最良であることを表現している。なお T_a と T_b の間は線形に内挿を行う (Fig. 1(c))。点 C や点 D についても同様な作業をして、Fig. 1(c) の折れ線に示した重合速度関数を決定する (図中の実線太線)。この重合速度関数は、各往復走時の点において最も重合効果のある均質速度を定義している。この重合速度関数を元に最終的なイメージトレースが得られる (Fig. 1(d))。なお、実際には重合速度解析地点は何か所かで実施し、空間的に内挿する手法をとる。

2.2 データ処理手順

本論文で提案する手法に関して、坑井間の幾何的配置におけるデータ処理手順は Matsushima *et al.* (1997) が述べている。地表探査の幾何的配置においても基本的には同様であり、以下にその処理手順を述べる。

Fig. 2 に地表反射法地震探査の幾何的配置と観測配置の各種パラメータを示す。 S_i は i 番目の震源の基準位置からの距離、 R_j は同様に j 番目の受振器の基準位置からの距離である。 B は速度解析地点の基準位置からの距離。 $T(0)$ はゼロオフセット時の往復走時、 V は P 波の伝播速度である。

このとき Fig. 2 に示した波 (i 番目の震源で発振され j 番目の受振器で受振) の伝播時間 (t_{ij}) は以下の (1) 式になる。

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

この (1) 式がデータ処理の基本式となる。

手順 1 地点 B を設定する。

手順 2 (1) 式において $T(0)$ と V の値の組を仮定する。よってすべての i, j の組における (1) 式を計算できる。

手順 3 $T(0)/2$ と V の積により深度 $T(0)V/2$ が求

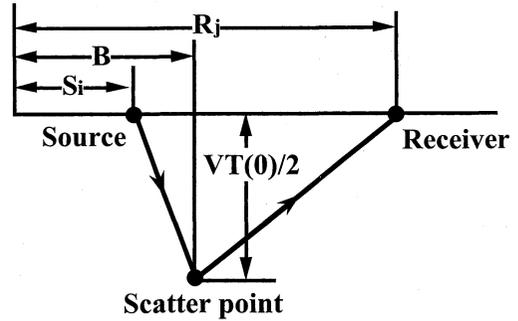


Fig. 2 Parameters for the calculation of a traveltime of a scattered wave during diffraction stacking.

まる。その地点での散乱波の振幅をすべて重合する。この作業は以下の式で行なわれる。

$$m(V, T(0)) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{A_{T_r}(i, j, t_{ij})}{N_s \cdot N_r} \quad (2)$$

ここで $A_{T_r}(i, j, t_{ij})$ は i 番目の震源で発振し j 番目の受振器で観測されるトレースの時刻 t_{ij} における振幅値である。また N_s と N_r はそれぞれ発振及び受振総数であり、加算された振幅を重合数で割ることにより正規化を行っている。(2) 式で求められた値を手順 2 で仮定した $T(0)$ と V の組における速度解析値とする。

手順 4 次の $T(0)$ と V の組を仮定して、以下、手順 2 と 3 を繰り返してその地点での重合速度解析パネルを作成する。このパネルは、横軸に重合速度、縦軸に往復垂直走時の関数とするパネルである。このパネルにおいて振幅が大きい点をピックアップし、それらを結んだ折れ線を重合速度関数とする。さらに重合速度関数によりその地点での散乱重合記録が得られる。通常は重合速度解析パネル作成には計算時間がかかるので、測線上に解析地点を何点か選定し重合速度関数を求め、その間の地点における重合速度関数は内挿により導出する。

手順 5 次の地点を設定して同様の手順を繰り返していく。

以上のデータ処理を適用する際の応用として、重合するトレースを選択することができる。この考え方はマイグレーション処理におけるマイグレーションパッチャーと似た考え方である。

Fig. 3 に示すように網掛け部分に含まれるトレースは、鏡面反射波を中心として任意の角度範囲内に含まれるトレースで、これらのトレースを選択的に利用して重合記録を作成できる。このような選択による散乱重合を

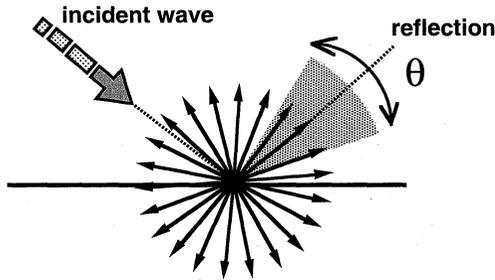


Fig. 3 Definition of stack coverage in case of diffraction stacking. The ray paths going through hatched zone are stacked.

行うことにより CMP 重合法と散乱重合法との両者の間のギャップを柔軟に埋める処理が行える。

このように考えると、Fig. 3 における重合範囲の値が小さいときは CMP 重合寄りの処理になり、重合範囲の値を大きくしていくと散乱重合寄りの処理になると理解することができる。言い換えると、CMP 重合法は重合前マイグレーションの範疇の特別な場合（重合範囲が無限小）に相当すると理解できる。

3. データ処理の S/N 比特性

CMP 重合法と比較した場合の重合前マイグレーションの優位性は複雑な構造に対応できること、すなわち空間分解能の優位性のみが論じられることが多かった。ここでは、本論文で提案するデータ処理の S/N 比特性に焦点を絞って述べる。

3.1 重合範囲を変化させた場合の S/N 比の挙動

松島ほか (1999) は坑井間反射法地震探査の幾何的配置において、前節で述べた重合範囲を変化させた場合の S/N 比の挙動を詳細に調べた。ここでは、松島ほか (1999) と同様な数値実験の方法により、地表反射法地震探査の幾何的配置における S/N 比の挙動を調べる。

数値モデルは均質速度場において一つの水平反射面を有するモデルを用いる (Fig. 4)。展開長を 600 m、発震・受振間隔を 20 m とし、発震数 31、受振数 31 で合計 961 トレースの数値記録を作成した。数値記録は以下に述べるように反射波走時にリッカー波形をコンボリューションする方法により作成した。発震点、反射点、受振点の幾何的配置で決定される波線の距離を媒質速度で除算することにより反射波走時を求める。その走時に相当する箇所にインパルスを立て、最後にリッカー波形をコンボリューションする。なおこのときの波形の振幅はト

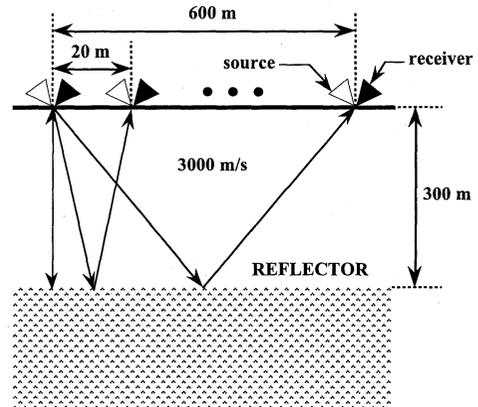


Fig. 4 Single-interface numerical model for seismic survey and the specifications of data acquisition. Reflector is placed at a depth of 300 m in a medium with constant velocity of 3000 m/s. Thirty-one sources and receivers are spaced 20 m apart. Reflected waves generated by one flat reflector were produced by using the convolution method.

レース間で同一としている。リッカー波形の中心周波数は 25 Hz、50 Hz および 100 Hz の 3 種類用いた。Fig. 5(a) に中心周波数が 50 Hz の場合の共通発震点記録を示す。

以上の 3 種類の中心周波数を有する記録は反射波のみを含む記録であり、これらを以降では信号記録と呼ぶ。3 種類の信号記録のそれぞれに対して、以下の (3) 式によって定義された S/N 比が 0.000000001 になるようにランダム雑音を付加した (Fig. 5(b))。なお、3 種類の信号記録の周波数 (25 Hz、50 Hz および 100 Hz) に対応する雑音の周波数帯域をそれぞれ 5-75 Hz、5-150 Hz および 5-300 Hz としている。

$$\frac{S}{N} = \frac{|Signal_max|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Noise_i)^2}} \quad (3)$$

(3) 式において *Signal_max* は信号記録の最大振幅を表し、*Noise_i* は雑音の *i* 番目のサンプルデータの振幅、*N* はサンプル数を表し、(3) 式の分母は雑音の RMS 振幅に相当する。

このように作成された記録は、ほぼランダム雑音のみで形成されているとみなすことができ、以降ではこれらを雑音記録と呼ぶ。

以下の数値実験では信号記録と雑音記録のそれぞれに対して、展開長の中央における重合記録を別々に作成

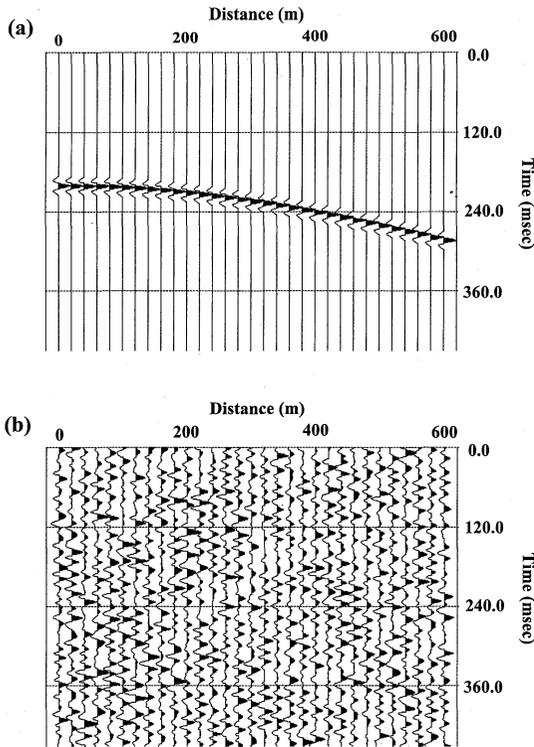


Fig. 5 (a) An example of reflected wavefield gather calculated for the numerical model shown in Fig. 4. Reflected waves generated by one flat reflector were produced by using the convolution method. (b) An example of random noise data. Random noises were added to the traces shown in (a) so that signal to noise ratio might become 0.00000001.

し、最終的に S/N 比を評価する。

信号記録のそれぞれの中心周波数に対して、Fig. 3 で定義した重合範囲を0.18度から360度まで2度ずつ変化させて作成した重合記録の最大振幅をプロットした結果を Fig. 6(a)に示す。ここで重合範囲の開始角度を0.18度としているが、これは鏡面反射波のみを重合処理するために設定しており、この値以外でも条件を満たす角度は存在するがここでは上記の値を用いている。なおデータ処理手順で述べたように、重合記録の振幅は重合数で割って正規化してあることに注意されたい。Fig. 6(a)のグラフは重合範囲を変数とする重合後の信号（重合波形の最大振幅）の挙動を示す。Fig. 6(a)において重合範囲が増加するにつれて、縦軸の重合波形の最大振幅は減少する様子がわかる。これは、重合範囲を大きくするにしたがって、信号（この場合は鏡面反射波）以外の振

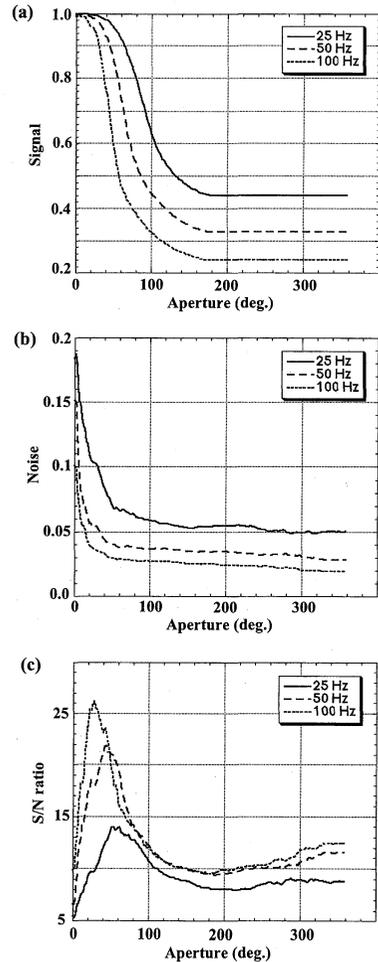


Fig. 6 (a) The variation of maximum amplitude of signal with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet. (b) The variation of RMS amplitude of noise with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet. (c) The variation of signal to noise ratio with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet.

幅（この場合はゼロ振幅）も加算してしまうためである。このことについて Fig. 7 を用いて説明する。

Fig. 7(a)において、1枚の水平反射面に対する鏡面反射波（図中の実線で示した波線）と1つの散乱点に対する散乱波（図中の点線で示した波線）を共通発震点で観測している様子を示す。また、Fig. 3で説明した重合範囲を網掛け部分で示している。Fig. 7(b)には、鏡面反射波波形記録と Fig. 7(a)の網掛け部分に包有される散乱波パターン（図中の灰色の太線）を示している。散

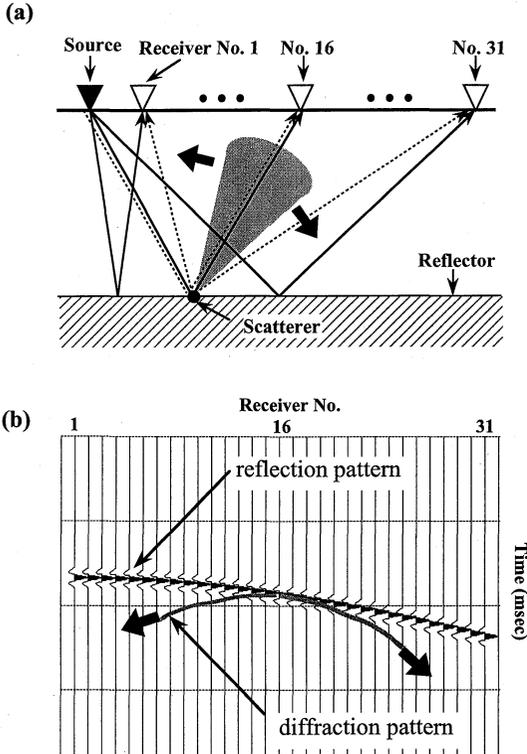


Fig. 7 (a) Schematic view of shot record for a flat reflector. Raypaths (solid lines) generated from one source and reflected by a flat reflector and received by 31 receivers. The dotted lines represent diffracted waves generated by the scatterer indicated by the arrow. Hatched zone indicates stack coverage defined by Fig. 3. (b) Common shot gather of reflected waves with diffraction pattern indicated by gray line which corresponds to diffraction coverage shown in (a).

乱重合法はこの散乱波パターンに沿って振幅を加算しているため、重合範囲を大きくすると (Fig. 7(a)の網掛け部分が図中に示した矢印方向に拡大すると)、Fig. 7(b)の灰色太線で示した散乱波パターンが矢印の方向に拡大する。このとき、散乱重合法は本来信号である反射波以外の振幅 (この場合はゼロ振幅) を加算していることがわかり、重合範囲を大きくするほど、ゼロ振幅を加算することがわかる。Fig. 6(a)において重合範囲が増加するにつれて、縦軸の重合波形の最大振幅が減少するのはこの理由による。

また、Fig. 6(a)において、重合範囲の小さい領域では、信号の重合効果の減少率が低くなっていることがわかる。また、周波数が低いほど、この領域が広いことも

わかる。これはフレネルゾーンが原因であると考えられる。重合範囲がフレネルゾーンに含まれるときは、加算効果のみが働いたため、重合範囲を増加させても信号の重合波形振幅は減少しない。このことは、後述するように S/N 比のピークを形成する上で重要である。

以上の信号記録への処理と同様にして、雑音記録に対する測線中央における重合記録を作成した。それぞれの重合範囲に対して、以下の(4)式に従って重合記録の RMS 振幅を計算し、その値をプロットした結果を Fig. 6(b)に示す。なお(4)式において N は重合記録のサンプル数を表し、 $Stacked_Trace_Noise[i]$ は重合記録の $[i]$ 番目のサンプルデータの振幅値を表す。

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Stacked_Trace_Noise[i])^2} \quad (4)$$

Fig. 6(b)のグラフは重合範囲を変数とする重合後のランダム雑音の挙動である。Fig. 6(b)より、重合範囲が大きくなるにつれて雑音の RMS 振幅が減少していることがわかる。これは、重合範囲が大きくなることにより重合数が増加し、雑音抑制効果が大きくなっていくためと考えることができる。また周波数が高いほど雑音抑制効果が大きくなることがわかる。

重合記録の S/N 比は信号強調効果と雑音抑制効果の両方の効果のバランスで決定される。Fig. 6(c)は Fig. 6(a)と Fig. 6(b)のグラフより3種類 (50 Hz, 100Hz, 200 Hz) の中心周波数に対して以下の(5)式により定義される S/N 比を計算し、それらを重合範囲を変数としてプロットした結果を示す。なお(5)式において $Signal_max$ は重合反射波形の最大振幅を表し、 N は重合記録のサンプル数、 $Stacked_Trace_Noise[i]$ は重合記録の i 番目のサンプルデータの振幅値を表す。

$$\frac{S}{N} = \frac{|Signal_max|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Stacked_Trace_Noise[i])^2}} \quad (5)$$

Fig. 6(c)において、どの中心周波数の場合においても重合範囲が増加するにつれて S/N 比が向上し、ある重合範囲でピークを迎え、さらに重合範囲が増加すると S/N 比が低下していく様子が見られる。また3種類の中心周波数に対するプロット同士を比較すると、周波数が高くなるほど全体的に S/N 比が高くなることがわかる。この理由は松島ほか (1999) に詳しく考察されている。また周波数が高くなるにつれて、S/N 比のピーク的位置が重合範囲が小さくなる方向にシフトしていることがわかる。これは前述したフレネルゾーンが原因である。

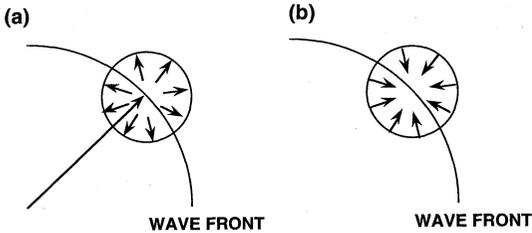


Fig. 8 (a) Huygens' principle. Every point on an advancing wavefront can be regarded as the source of a secondary wave. (b) Back propagation.

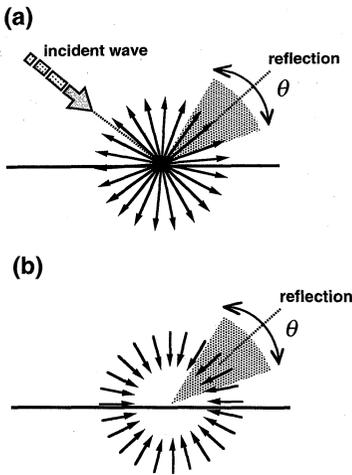


Fig. 9 (a) Diagram illustrating the directivity in case of diffraction stacking. The ray paths going through hatched zone are stacked. (b) Diagram illustrating the directivity in case of back propagation. The raypaths going through hatched zone are back propagated.

まず、S/N 比のピークが形成される原因は、重合範囲を増加させた際に、信号の重合波形振幅が減少しない、あるいは減少率が小さい領域（前述したように重合範囲がフレネルゾーンに含まれる領域）が存在するためである。すなわち、重合範囲を増加させることで、重合数が増え、雑音抑制効果は向上する一方で、信号の重合波形振幅が減少しない領域では、S/N 比は増加し、ピークを形成する。また、このピークが高周波数になるにしたがって、重合範囲が小さくなる方向にシフトするのも、周波数が高い方がフレネルゾーンが狭いため、信号の重合波形振幅が減少しない領域が狭くなるためである。

さらにどの周波数の場合においても CMP 重合（重合

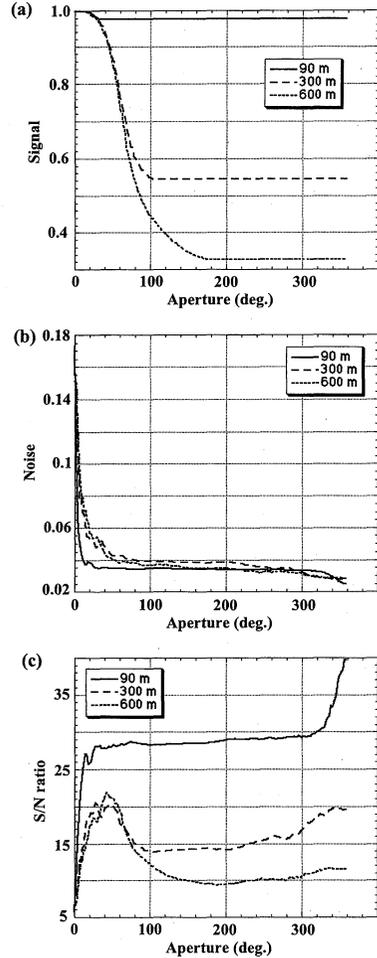


Fig. 10 The variation of maximum amplitude of signal with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet. (b) The variation of RMS amplitude of noise with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet. (c) The variation of signal to noise ratio with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet.

範囲がほぼ 0 度) より散乱重合の方が S/N 比が高いことがわかる。この理由については松島ほか (1999) でも述べている通り、以下のように考察する。

Fig. 8(a)に示すように、波動伝播過程はホイヘンスの原理に基づくので、イメージングの基本は Fig. 8(b)に示すように、ホイヘンスの原理の時間軸を逆にした波動の逆伝播であると考えることができる。ここで Fig. 9 (a)に示した重合範囲を定義することは、Fig. 9(b)に示

すように波動の逆伝播の際に、ホイヘンスの原理に対する近似度を制御することに相当する。すなわち重合範囲を360度に設定すれば、ホイヘンスの原理を満たすことになるが、重合範囲を小さい値に設定するに従い、ホイヘンスの原理に対する近似度が悪くなり、イメージング能力 (S/N 比, 傾斜面への対応) が低下すると考えられる。

3.2 S/N 比と水平分解能の相反性

前節では、展開長を一定にして、3種類の中心周波数の記録に対する重合記録の S/N 比の挙動について検討した。ここでは波形の中心周波数を一定 (50 Hz) にして、展開長を変化させた場合の S/N 比の挙動について検討する。なお、水平分解能の観点では、展開長を短くすることは水平分解能を低下させることに相当する。

数値モデルと観測条件は Fig. 4 と同様として、展開長を 600 m, 300 m, 90 m と変化させる (発震・受振間隔は展開長に応じて、それぞれ 20 m, 10 m, 3 m とする)。このような条件のもとで、中心周波数が 50 Hz の信号記録, 雑音記録を前述の手法によりそれぞれ作成し、前節と同様にして、S/N 比の挙動を表すグラフを作成した (Fig. 10)。Fig. 10(a) に示したグラフは重合範囲を変数とする重合後の信号 (重合波形の最大振幅) の挙動を示す。Fig. 10(a) において重合範囲が増加するにつれて、縦軸の重合波形の最大振幅は減少する様子が見られるが、その減少の割合は展開長が短い程小さいことがわかる。この理由は、展開長が長い場合に比べて、短い場合には、フレネルゾーンに含まれるトレース数が増えるためであると考えられる。

一方、Fig. 10(b) に示した重合範囲を変数とする重合

後のランダム雑音の挙動は、展開長にはほとんど依存しないことがわかる。また、Fig. 10(c) に示された S/N 比の挙動より、展開長を短くすると、S/N 比が向上することがわかる。ただし、CMP 重合の場合には大きな S/N 比向上は見られない。展開長を短くすることは水平分解能を低下させることに相当するので、散乱重合法適用の場合には S/N 比と水平分解能は互いに相反関係にあることがわかる。このことに関して以下でさらに数値実験を行った。

数値モデルと観測条件は Fig. 4 と同様である。前述と同様にして展開長が 600 m, 300 m, 90 m のそれぞれに対応するランダム雑音記録を作成した。このようにして得られた3種類の展開長 (600, 300, 90 m) の雑音記録に対する CMP 重合断面を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、展開長が変化しても CMP 重合断面におけるランダム性が保持されていることがわかる。次に雑音記録に対して散乱重合法を適用して得られた断面を Fig. 12 に示す。Fig. 12 より、展開長を短くするにしたがって、散乱重合断面におけるランダム性が失われ、水平方向に連続イベントが形成されていく様子が見られる。Fig. 11 と Fig. 12 の結果より、以下のことが考察される。

本来水平反射面を対象としている CMP 重合法は、水平分解能向上にはほとんど寄与しない。すなわち、水平分解能とほとんど関連性を有しない。この性質がランダムイベントをそのランダム性を損なうことなく、重合断面にそのランダム性を反映させている。一方、水平分解能向上を目的とする散乱重合法は、水平分解能と密接な関連性を有することになり、展開長の影響を受ける。さらに以下の数値実験を行った。

Fig. 4 に示した数値モデルにおいて、上記と同様に 3

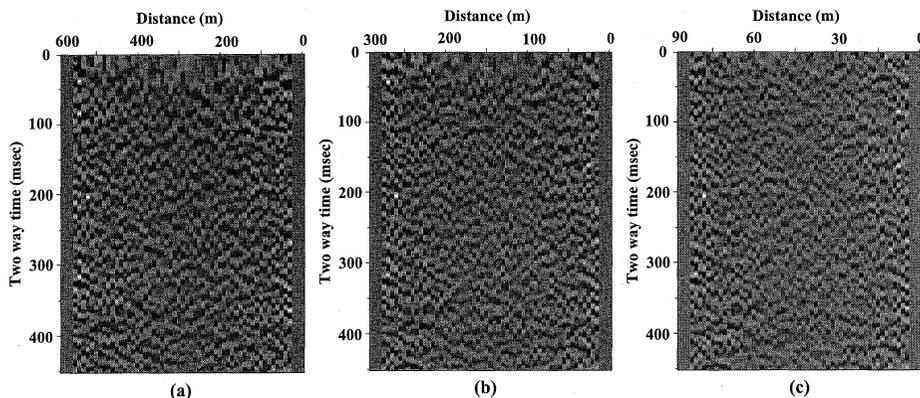


Fig. 11 CMP stacked sections for random noise data with different spread length. Spread length = (a) 600 m, (b) 300 m, (c) 90 m.

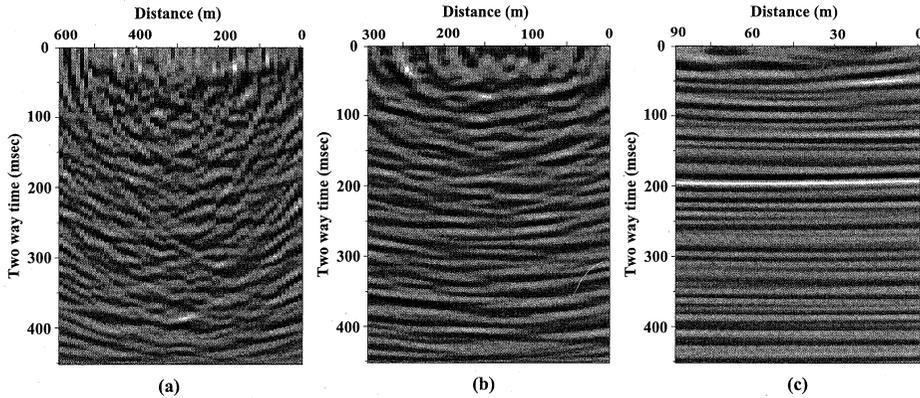


Fig. 12 Diffraction stacked sections for random noise data with different spread length. Spread length = (a) 600 m, (b) 300 m, (c) 90 m.

種類の展開長に対して前述と同様に中心周波数が 50 Hz の反射波のみを含む記録を作成した (Fig. 13(a) に展開長が 600 m の場合の共通発震点記録を示す)。これらの記録に対して(3)式で定義した S/N 比が 0.3 になるようにランダム雑音を付加した記録を作成した (Fig. 13(a) に対応する記録を Fig. 13(b) に示す)。それぞれの 3 種類の展開長の記録に対して CMP 重合断面 (Fig. 14) と散乱重合断面 (Fig. 15) を作成した。なお, Fig. 14 と Fig. 15 において, 下段はそれぞれの重合断面の中心位置における重合トレースである。

Fig. 14 と Fig. 15 より以下のことがわかる。展開長が 600 m のときは CMP 重合断面, 散乱重合断面ともに反射面があまり認識できないが, 展開長が短くなるにしたがって, 特に散乱重合断面において S/N 比の高い反射面がイメージされていく様子がわかる。

以上の結果を合わせると以下のことが言える。散乱重合断面適用において, 水平分解能と S/N 比の間には相反関係がある。すなわち, 展開長が短いと S/N 比の高い重合断面が得られるが, 水平分解能は低下する。逆に展開長を長くすると水平分解能は向上するが, S/N 比は低下する。これは展開長が短くなると, それに比例してトレース密度が高くなることによりフレネルゾーンに入るデータ量が増えるため S/N 比が向上すると考えられる。ただし, 展開長が短い場合においては, ランダム雑音から水平方向に連続するイベントをイメージしてしまい, 反射面が存在しない状況においても擬似的な反射面を作成してしまう危険性があることに注意する必要がある。

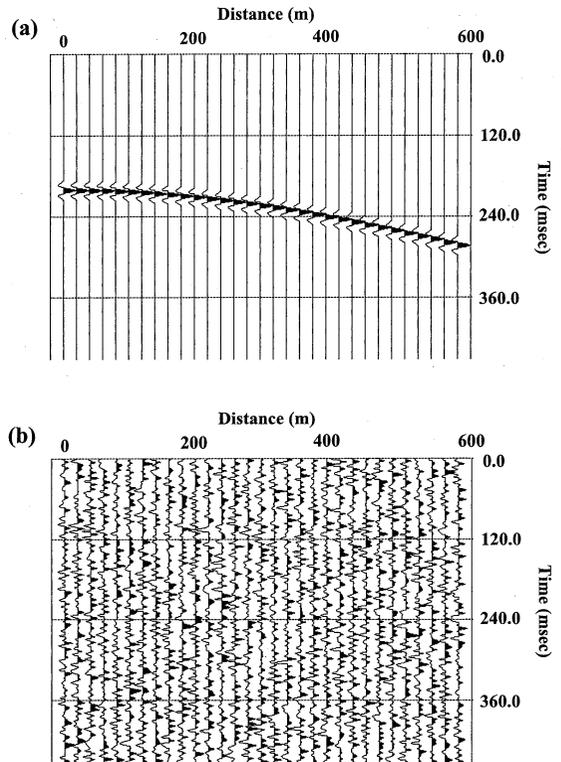


Fig. 13 (a) An example of reflected wavefield gather calculated for the numerical model shown in Fig. 4. Reflected waves generated by one flat reflector were produced by using the convolution method. (b) An example of random noise data. Random noises were added to the traces shown in (a) so that signal to noise ratio might become 0.3.

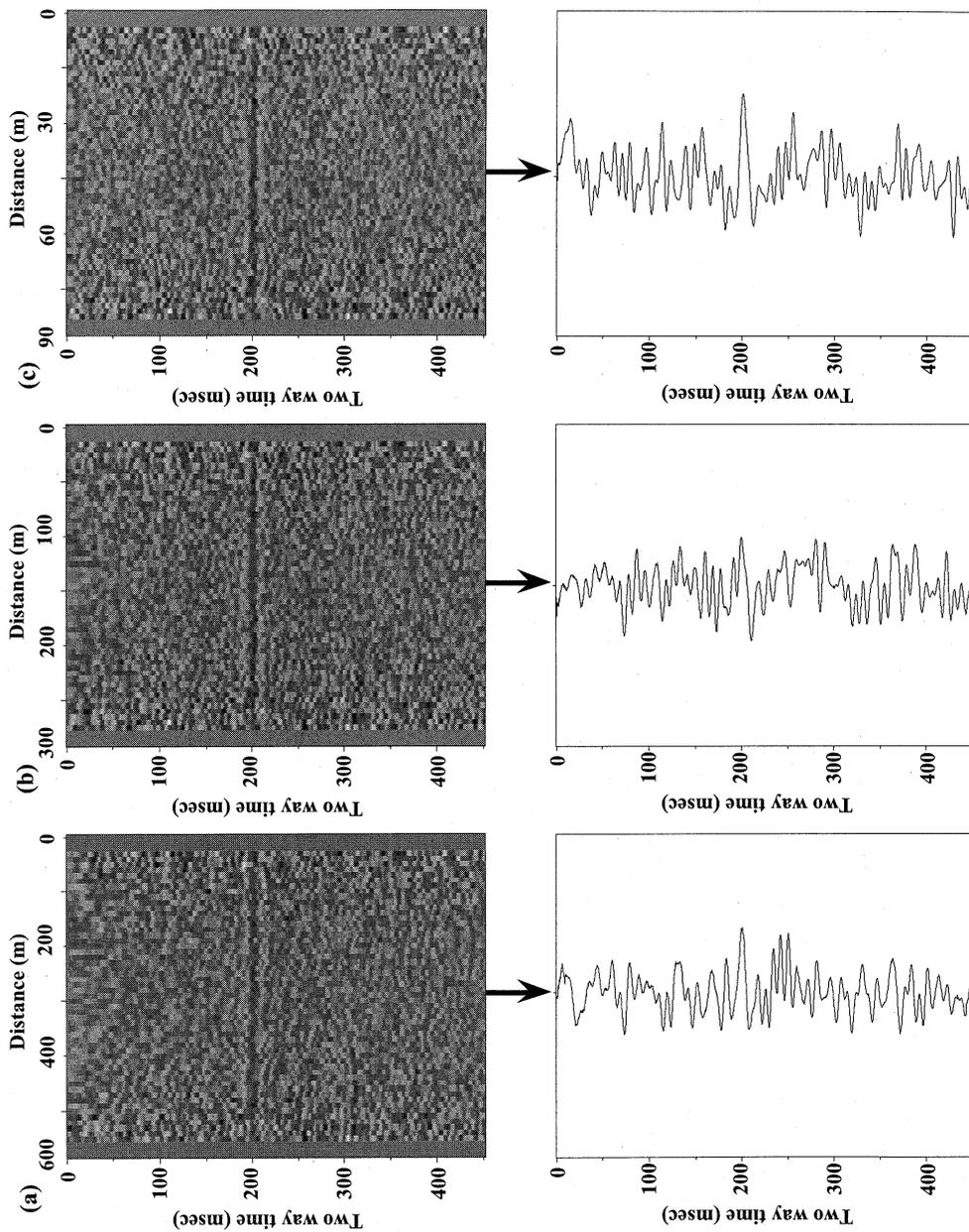


Fig. 14 Upper figures show CMP stacked sections with different spread length for the data whose S/N is 0.3. Lower figures show the center trace of the corresponding section. Spread length = (a) 600 m, (b) 300 m, (c) 90 m.

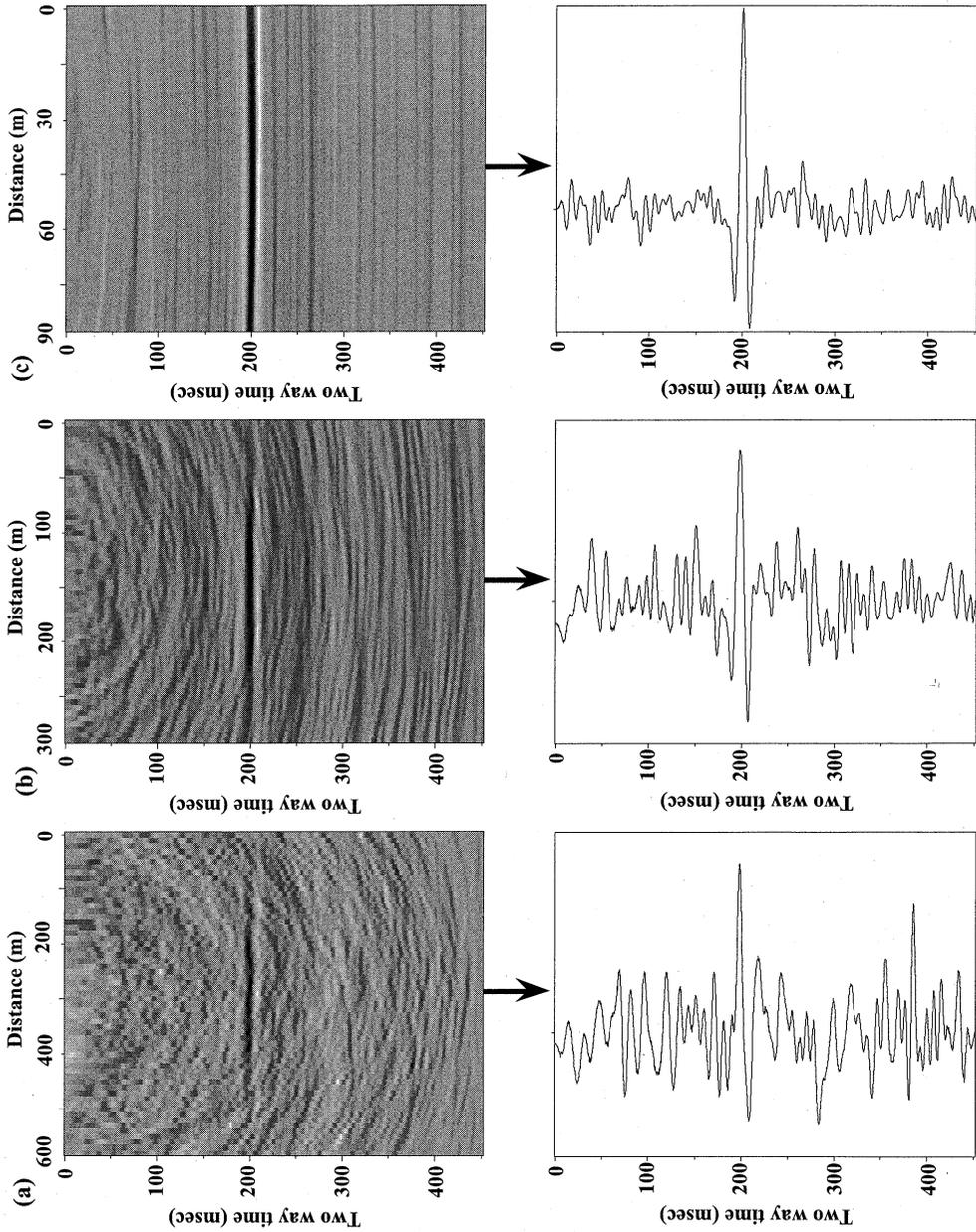


Fig. 15 Upper figures show diffraction stacked sections with different spread length for the data whose S/N is 0.3. Lower figures show the center trace of the corresponding section. Spread length = (a) 600 m, (b) 300 m, (c) 90 m.

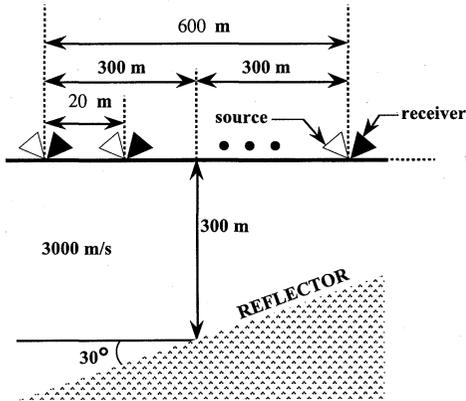


Fig. 16 Dipping single-interface numerical model for surface seismic survey and the specifications of data acquisition. Dip angle of a reflector is 30 degrees. Reflector is placed at a depth of 300 m in a medium with constant velocity of 3000 m/s. Thirty-one sources and receivers are spaced 20 m apart. Reflected waves generated by one flat reflector were produced by using the convolution method.

3.3 傾斜反射面構造の場合

前節までは、水平反射面構造の場合について検討してきたが、ここでは傾斜反射面構造に対する数値実験を行う。数値モデルと観測条件を Fig. 16に示す。反射面の傾斜角を30度とする。基本的な観測条件は水平反射面構造の場合に用いた Fig. 4と同様であり、展開長を600 m、発震・受振間隔を20 mとし、発震数31、受振数31である。Fig. 16に示した数値モデルにおける反射波記録は前述したコンボリューションする方法により作成した。反射波形に用いるリッカー波形の中心周波数は前節までと同様に25 Hz、50 Hzおよび100 Hzの3種類用いた。

水平反射面構造の場合と同様に、信号記録と雑音記録のそれぞれに対して、展開長の中央における重合記録を別々に作成し、最終的にS/N比を評価する。

前節までと同様に、3種類の周波数の信号記録に対して、重合範囲を0.18度から360度まで2度ずつ変化させて、信号、雑音ならびにS/N比の挙動を調べた（重合範囲の開始角度を0.18度としているのは前述の通りである）。結果を Fig. 17(a)から(c)にそれぞれ示す。なお、重合速度に関しては、1500 m/sから6000 m/sの間を100 m/sおきに变化させて、信号の重合効果が最も大きかった速度を重合速度としている。Fig. 17(c)に示したS/N比の挙動より以下のことがわかる。どの周波数に

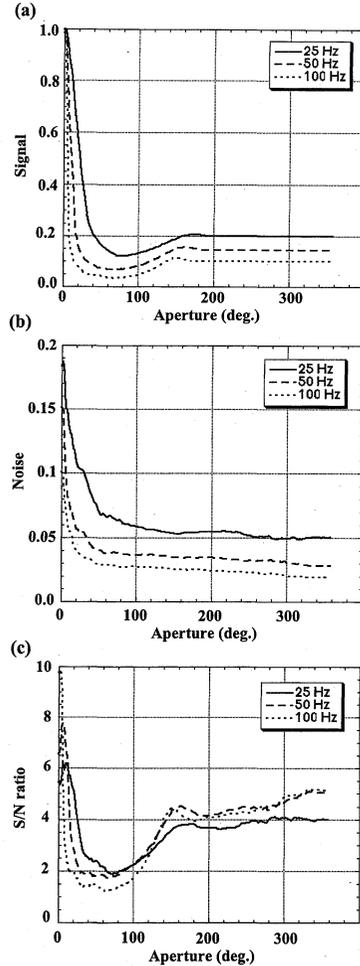


Fig. 17 (a) The variation of maximum amplitude of signal with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet. (b) The variation of RMS amplitude of noise with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet. (c) The variation of signal to noise ratio with stack coverage as a function of central frequency of Ricker wavelet.

おいても重合範囲がほぼゼロに近いCMP重合法がS/N比が最も高いことがわかる。CMP重合法の場合から重合範囲を大きくしていくと、S/N比は若干微増するものの、その後減少していき、あるところで最小値を迎える。さらに重合範囲を大きくすると、途中で小さな変化はあるもののS/N比が増加していく様子が見られる。

このとき、中心周波数が50 Hzの信号（鏡面反射波）のみを含む記録と、この記録に対して(3)式で定義した

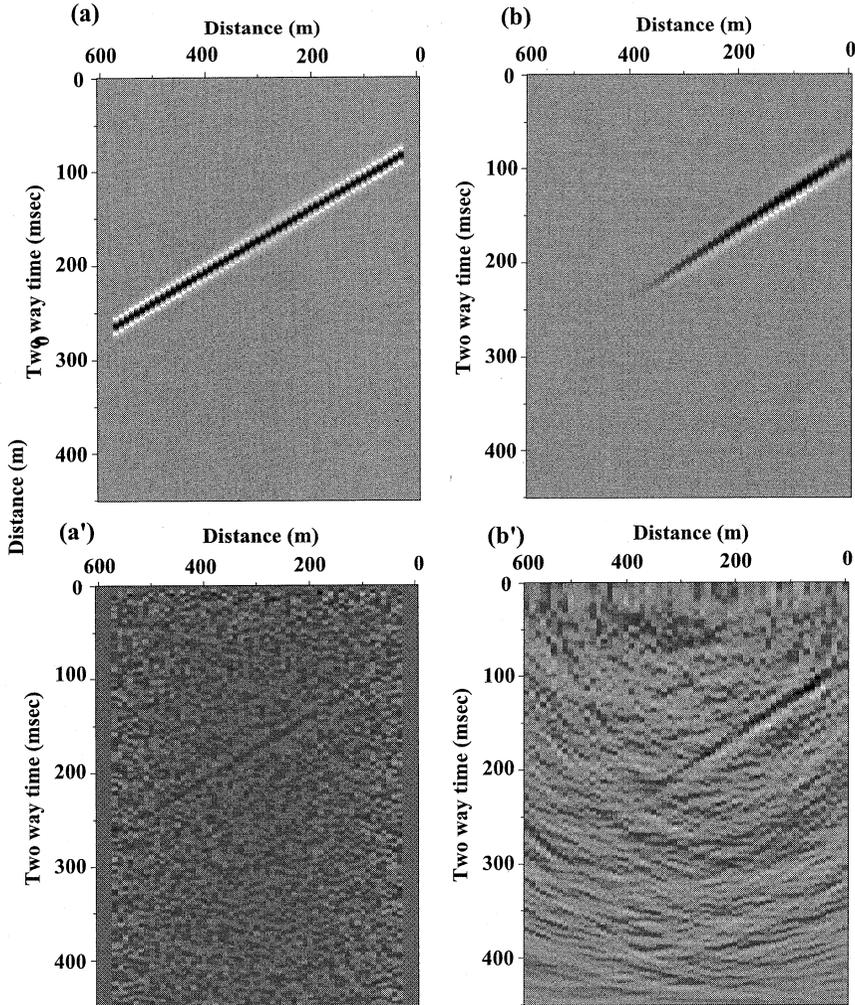


Fig. 18 (a) CMP stacked section for the data containing only signal component. (b) Diffraction stacked section for the data containing only signal component. (a') CMP stacked section for the data whose S/N is 0.3. (b') Diffraction stacked section for the data whose S/N is 0.3.

S/N比が0.3になるようにランダム雑音を付加した記録のそれぞれに対するCMP重合断面と散乱重合断面をFig. 18に示す。Fig. 18において、(a)ならびに(b)は信号のみを含む記録に対するCMP重合断面と散乱重合断面をそれぞれ示す。(a')ならびに(b')はS/N比が0.3の記録に対するCMP重合断面と散乱重合断面をそれぞれ示す。なお、散乱重合断面においては、すでにマイグレーション効果により、空間的に正しい位置に反射面がイメージされていることに注意されたい。

Fig. 18の(a')と(b')を比較すると、Fig. 17(c)が示唆するように、重合断面の中央においては、CMP重合断

面の方がS/N比が良いことがわかる。なお、CMP重合断面作成の際の重合速度は媒質速度を反射面の傾斜角の余弦で媒質速度を割った値を使用している(Levin, 1971)。一方、散乱重合断面は重合速度として媒質速度を使用している。

CMP重合法は傾斜反射面の場合でも重合効果は低下しない(Cressman, 1968)ので、Fig. 6(c)に示した水平反射面の場合のCMP重合法適用のS/N比とFig. 17(c)に示した傾斜反射面の場合のそれとを比較するとほぼ同じ値になっていることがわかる。また、Fig. 14(a)とFig. 18(a')を比較してもS/N比に関してはほぼ変化

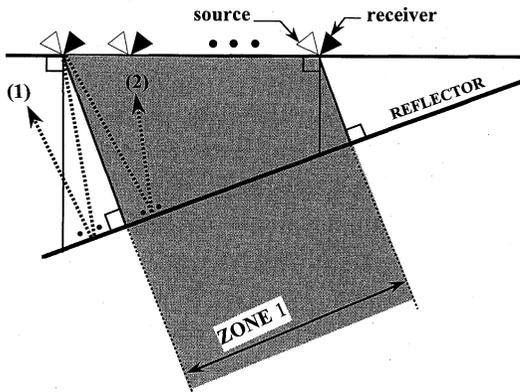


Fig. 19 Schematic view of image area (indicated by hatched zone) for diffraction stacking in case of a dipping reflector.

がないことがわかる。これに対して、散乱重合法の場合には、Fig. 18(b)に示すように、水平距離が400 m 付近から600 m にかけてイメージングがなされていないことがわかる。このことについて、Fig. 19を用いて説明する。

Fig. 19において、ZONE1で示された領域は、図中で示した傾斜反射面からの鏡面反射波を観測できる領域を表している。例えば点線で示された波線(1)はZONE1の領域外で鏡面反射をしているため、この波線はFig. 19に示した観測条件では観測することはできない。しかし、波線(2)はZONE1の領域内で鏡面反射をしているため、観測することができる。したがって、Fig. 18(b)に示されたイメージングが成されていない領域ができる理由は、Fig. 19のZONE1で示されたような領域に含まれていないためと考えられる。

以上の議論より、Fig. 17(c)で示されたように、展開長の中心(この場合は水平距離300 mに相当)におけるS/N比が、CMP重合法に比較して散乱重合法の方が劣っている理由は、観測の幾何的配置の制約のために散乱重合法にとってイメージング位置が不利になっているためと考えられる。散乱重合法のイメージング効果が期待できる領域は、Fig. 19のZONE1で示されたような領域である。Fig. 18(b')に示したS/N比が0.3の記録に対する散乱重合断面の水平距離100 m付近に着目すると、Fig. 18(a')に示したCMP重合断面と比較してもS/N比が高いことがわかる。

以上をまとめると次のようになる。傾斜反射面においてCMP重合法を適用するときは、空間分解能は向上しないものの重合効果は低下しないので、S/N比の低下

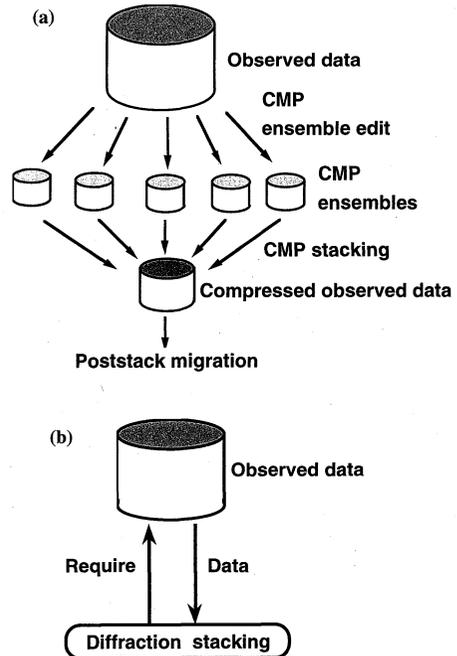


Fig. 20 Comparison of data flow between (a) CMP stacking and (b) diffraction stacking.

は起こらない。一方、散乱重合法を適用するときは、発震・受振配置の観測条件と反射面の傾斜を考慮して、イメージング効果が期待できる領域を把握しておく必要がある。

4. 考 察

波動の伝播現象をホイヘンスの原理に基づいて考えれば、地下は散乱点の集合で形成されていると考えることができる。すると、地下の任意構造をイメージングする作業は、一つ一つの散乱点を独立にイメージングし、最終的にそれぞれのイメージング結果を加算することに相当する。すなわち、地下構造をイメージングすることは、地下の一つの散乱点をイメージングする作業に帰着される。このように考えれば、水平反射面をイメージングする場合も、鏡面反射波のみを解析対象とするCMP重合法より散乱波を解析対象とする散乱重合法の方が有効であると考えられる。ちなみに、一つの散乱点に対してCMP重合法を適用すると、DMO処理を施さないと、正確なゼロオフセット記録は作成できない(Yilmaz, 1987)。

前述したように、CMP重合法は散乱重合法の特別な場合、すなわち重合範囲が非常に狭い場合に相当し、散

乱重合法の近似的な手法と考えることができる。このように CMP 重合法が水平成層構造を仮定する近似的な手法であるにもかかわらず、その手法が提案されて以来、長きにわたって反射法地震探査データ処理の中核を担ってきた理由を考えると、一つは、傾斜層の場合においても、共通反射点のばらつきにより空間分解能は低下するものの、重合効果は低下しない点は大きな利点と考えられる。また、計算機環境の観点から以下の考察を行う。

CMP 重合処理の場合には、通常 CMP アンサンブル編集と呼ばれる処理が行われる。この処理は大規模な観測データを CMP アンサンブルごとに分割し、その分割された小規模データに対して処理を行うことを可能にする (Fig. 20(a))。Fig. 20(a)において観測データは CMP アンサンブルに分割され、それぞれのアンサンブルごとに CMP 重合処理までの一連の処理が行われ、CMP 重合記録が作成される。この CMP 重合記録はゼロオフセット記録と等価であり、重合後マイグレーションにより地下構造がイメージングできる。

この場合、CMP 重合法はゼロオフセット記録を強調するための処理である。別の見方をすれば、CMP 重合を適用して CMP 重合記録を作成することは、観測記録のデータ圧縮操作として捉えることができる。すなわち、CMP 重合法をベースにしたデータ処理法では、データ処理を二段階に分け、第一段階で膨大な観測データを圧縮し、圧縮されたデータに対して第二段階で重合後マイグレーション処理によりイメージングを行う。この過程は CMP 重合法が提案された1960年代の計算機資源の観点からみれば、非常に巧みな近似手法であると考えられる。

一方、散乱重合法の場合には、観測データ全体を処理対象とする必要があるため、Fig. 20(b)に示したように、常に全データと情報のやりとりをしながら処理を行う必要がある。特に三次元データに対して散乱重合法を適用するには計算機資源への負荷は大きく、このような場合には並列計算機などの高性能計算機の積極的な利用が現状では不可欠であると思われる。また、重合範囲は S/N 比を制御するパラメータであることを述べたが、計算時間も制御するため、最適な重合範囲を設定することは重要であると考えられる。

5. 結 論

本論文は、速度場推定のための繰り返し処理を必要とせず、従来型の CMP 重合法の処理手順と同様に反射法地震探査データ処理が行える重合前時間マイグレーション法の一手法 (重合速度解析をとまらぬ散乱重合法) を

提案した。

このデータ処理法の特徴は以下の通りである。任意構造問題を常に、均質速度場に一つの異常点が存在する問題に帰着させ、その点において励起される散乱波パターンを解析対象とする。このとき各イメージ点における最適な均質速度は重合速度解析により求める。従来型の CMP 重合法が鏡面反射波パターンを解析対象としているのに対して、本手法は解析対象を散乱波パターンに変更する点だけが異なっており、CMP 重合法と同様な処理体系でデータ処理が行える。また重合範囲を設定することにより CMP 重合法と散乱重合法との間を柔軟に埋めることができ、またこの重合範囲が S/N 比を制御する重要なパラメータであることを示した。

CMP 重合法と比較した場合の重合前マイグレーションの利点は複雑な構造に対応できる、すなわち空間分解能の優位性のみが論じられることが多いが、本論文では数値実験により本研究で定義した S/N 比に基づいて、S/N 比特性に関する検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- CMP 重合法より散乱重合法の方が S/N 比の高い重合記録が得られる。

ホイヘンスの原理に基づけば、地下構造をイメージングすることは、地下の一つの散乱点をイメージングする作業に帰着される。このように考えれば、散乱重合法は CMP 重合法に比べて S/N 比の高い重合記録を得ることができると考えることができる。ただし、注意が必要なのは、構造が傾斜している場合などは、観測幾何的配置に依存して散乱重合法が効率的にイメージングを行えない領域があることである。

- S/N 比のピークを与えるような最適な重合範囲が存在する。

これはフレネルゾーンの影響であると考えられる。このフレネルゾーンの影響は波形の周波数、観測の幾何学的配置および地下の構造形態などにより決定される。

- 散乱重合法適用において、水平分解能と S/N 比との間には相反関係がある。

展開長が短いと S/N 比の高い重合断面が得られるが、水平分解能は低下する。逆に展開長を長くすると水平分解能は向上するが、S/N 比は低下する。これは展開長が短くなると、それに比例してトレース密度が高くなることによりフレネルゾーンに入るデータ量が増えるため S/N 比が向上すると考えられる。ただし、展開長が短い場合においては、ランダム雑音から水平方向に連続するイベントをイメージしてしまい、反射面が存在しない状況においても擬似的な反射面を作成してしまう危険性

があることに注意する必要がある。

以上のS/N比特性解析は、あくまでも本研究で定義したS/N比に基づいて評価した結果であり、CMP重合法と散乱重合法との性能比較に関しては今後も多角的な検討を行う必要があると考える。

謝 辞

匿名の査読者の方々には、原稿の改善に際し大変有益な御意見、御指摘を頂いた。心から厚く感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- Al-Yahya, K. M. (1989) : Velocity analysis by iterative profile migration: *Geophysics*, **54**, 718-729.
- Bancroft, J. C., Geiger, H. D. and Margrave, G. F. (1998) : The equivalent offset method of prestack time migration: *Geophysics*, **63**, 2041-2053.
- Chang, H., VanDyke, J., Solano, M., McMechan, G. and Epili, D. (1998) : 3-D prestack Kirchhoff depth migration: From prototype to production in a massively parallel processor environment, *Geophysics*, **63**, 546-556.
- Cressman, K. S., 1968, How velocity layering and steep dip affect CDP: *Geophysics*, **33**, 399-411.
- Deregowski, S. M. (1990) : Common-offset migrations and velocity analysis: *First Break*, **8**, 224-234.
- Dix, C. H. (1955) : Seismic velocities from surface measurements, *Geophysics*, **20**, 68-86.
- Hagedoorn, J. G. (1954) : A process of seismic reflection interpretation, *Gephys. Prosp.*, **2**, 85-127.
- Jacobs, J. A. C., Delprat-Jannaud, F., Ehinger, E. and Lailly, P. (1992) : Sequential migration aided reflection tomography: A tool for imaging complex structures: *Annual Meeting Abstracts, Society Of Exploration Geophysicists*, 1054-1057.
- Levin, F. K. (1971) : Apparent velocity from dipping interface reflections: *Geophysics*, **36**, 510-516.
- MacKay, S. and Abma, R. (1993) : Depth-focusing analysis using a wavefront-curvature criterion: *Geophysics*, **58**, 1148-1156.
- Matsushima, J., Rokugawa, S., Yokota, T. and Miyazaki, T. (1995) : Cross-well fracture imaging by the CDP stacking and the diffraction stacking with the precise velocity analysis, *Proceedings of the 3rd SEGJ/SEG International Symposium on Geotomography*, 179-188.
- Matsushima, J., Rokugawa, S., Yokota, T. and Miyazaki, T. (1997) : Cross-well imaging by the CDP stacking and the diffraction stacking with velocity analysis, *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)*, **50**, 107-122.
- Mayne, W. H. (1962) : Common reflection point horizontal data stacking technique, *Geophysics*, **27**, 927-938.
- Sattlegger, J. W. and Stiller, P. K. (1973) : Section migration before stack, after stack or in between, *Geophys. Prosp.*, **22**, 297-314.
- Sattlegger, J. W. (1975) : Migration velocity determination: Part 1. Philosophy: *Geophysics*, **40**, 1-5.
- Tarantola, A., Noble, M., Barnes, C., Charara, M., Igel, H., Lindgren, J., Roth, G. and Roxis, N. (1992) : Nonlinear inversion of seismic reflection data: State of the art: *61st Mtg. Eur. Assoc. Expl Geophys., Extended Abstracts, European Association Of Geophysical Exploration*, 108-109.
- Yilmaz, O. (1987) : Seismic data processing, Soc. of Expl. Geophys., Tulsa, 335.
- 松岡俊文 (1988) : インバージョンの手法を用いた区間速度の推定について, 物理探査学会第79回学術講演会論文集, 81-86.
- 松島 潤, 六川修一, 横田俊之, 宮崎光旗, 加藤叔史 (1999) : 坑井間散乱重合法による坑井間反射面イメージング能力についての検証, 物理探査, **51**, 14-27.