

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

—海上地震探査データへの適用—

松島 潤*・池 俊宏**・横田 俊之*
 倉本 真一*・大久保 泰邦*・徳山 英一**
 六川 修一*³・ナディール号乗船者一同*⁴

Diffraction stacking with stacking velocity analysis in a surface seismic survey —Its application to marine reflection seismic data—

Jun Matsushima*, Toshihiro Ike**, Toshiyuki Yokota*,
 Shinichi Kuramoto*, Yasukuni Okubo*, Hidekazu Tokuyama**,
 Shuichi Rokugawa*³ and Nadir Shipboard scientific party*⁴

ABSTRACT

In our previous paper, we proposed a prestack time migration (PSTM) method whose data processing scheme is analogous to that of conventional CMP method. In the present paper, proposed data processing procedure is applied to marine seismic data collected in the Eastern Nankai Trough.

The purpose of this paper is to reveal the feasibility of our method in case of application to real field data. We compare a cross section by PSTM with a cross section by conventional method (CMP stacking + Post stack migration) and study the S/N ratio of both sections based on quantitative evaluation by use of f-x prediction filtering which separates coherent components from random components. We also consider the effect of stacking aperture (defined as an angle range of collecting seismic traces) on the S/N ratio and spatial resolution of obtained cross section.

In order to reduce computation time and memory requirements, we have developed a PSTM code for distributed memory parallel machine systems. The input data size is about 1 Gbytes and the output image after PSTM has totally 1.85 million samples. The process of PSTM can be completed in a practical time (100 minutes) using 256 processors.

Key words : prestack time migration, velocity analysis, parallel processing

2001年12月10日原稿受付；2002年9月2日受理
 物理探査学会第105回学術講演会にて一部を発表

* 産業技術総合研究所
 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7

** 東京大学海洋研究所
 〒164-8639 東京都中野区南台1-15-1

*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

*⁴ 棚橋 学, 芦 寿一郎, 中村恭之, 山口和彦, Udrek, MOE Kyaw Thu, Georges Pascal, Siegfried Lallemand, Mark Noble, Victor Martin, Satish Singh, Herve Nouz, Matthias Alerini

Manuscript received December 10, 2001; Accepted September 2, 2002.

A part of this paper was presented at the 105th SEGJ Conference, 2001.

* National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
 Tsukuba central 7, 1-1-1, Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

** Ocean Research Institute, University of Tokyo
 1-15-1 Minamidai, Nkano-ku Tokyo 164-8639, Japan

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

*⁴ Manabu Tanahashi, Juichiro Ashi, Udrek, Yasuyuki Nakamura, MOE Kyaw Thu, Kazuhiko Yamaguchi, Georges Pascal, Siegfried Lallemand, Mark Noble, Victor Martin, Satish Singh, Herve Nouz, Matthias Alerini

1. 序 論

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、波線の曲がりを考慮に入れた重合前深度マイグレーション (以下では PSDM と呼ぶ) が有効であることが多数報告されている (e.g., Chang et al., 1998; Young et al., 1999)。その一方で、重合前時間マイグレーション (以下では PSTM と呼ぶ) の簡便性に利点を見出し、実フィールドデータに積極的に適用している報告もされている (e.g., Robein and Hanitzsch, 2001)。特に、Gray et al. (2001) は、PSTM のための速度推定はルーチンに行えるようになってきたことを指摘している。

前報 (松島ほか, 2001) では、キルヒホッフ型的一种である PSTM の一手法 (=重合速度解析をともなう散乱重合法) を提案した。この手法の特徴は、均質速度に対する散乱重合記録を多くの速度に対して作成し、そこから各イメージ点について最適な速度を重合速度解析を用いて求めるため、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 重合法と同様な処理スキームで処理が行える点である。また松島ほか (2001) は、重合前マイグレーションの利点として、水平分解能向上ばかりでなく、S/N 比向上についても CMP 重合法と比べてさらなる効果があることを数値実験により指摘した。さらに、PSTM を実施する際に (散乱) 重合範囲

を設定することにより、柔軟な処理が行えることを述べ、この (散乱) 重合範囲が S/N 比の制御に重要なパラメータであることを示唆した。

本稿では、松島ほか (2001) が提案した手法を海上で取得された反射法地震探査データに対して適用し、処理時間・NMO ストレッチ除去の効果、CMP 法に基づいた処理との比較を行った。また、(散乱) 重合範囲を変化させた場合における PSTM 断面の S/N 比ならびに水平分解能評価を行った。

2. 海上反射法地震探査データ概要ならびに前処理

本研究で使用する海上反射法地震探査データは日仏 KAIKO 計画のもとで取得された。日仏 KAIKO 計画の経緯・目的等は徳山ほか (2000) に記載されている。ここではその概略ならびにデータ仕様について述べる。

Fig. 1 に調査領域を示す。調査領域である東海沖の海域ではフィリピン海プレートの西南日本弧への沈み込みと、伊豆-小笠原弧の本州弧への衝突・付加が起きている。このため、この海域には5つの活断層系 (南から、銭洲、前縁、東海、小台場、遠洲断層系) が存在し (東海沖海底活断層研究会, 1999)、東海沖での巨大地震発生メカニズムと密接に関係していることが指摘されており、地震発生帯域と主すべり面 (マスターデコルマン) との関係を解明する目的で三次元地震探査が実施された。

Fig. 1 において、三次元地震探査領域を長方形の囲み

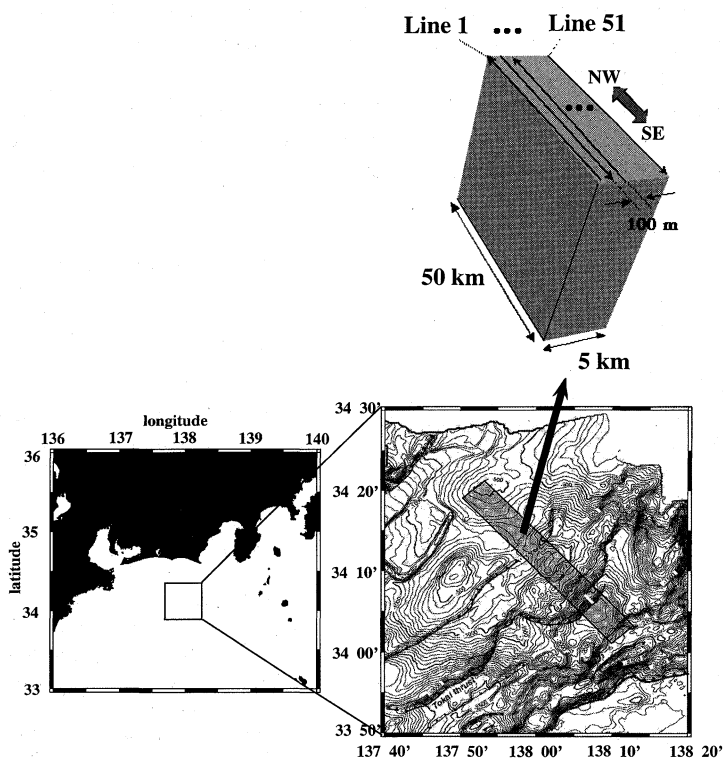


Fig. 1 Location of study area, bathymetry and layout of survey lines. Three-dimensional marine seismic survey area is 50 km long and 5 km wide, which is located in the Eastern Nankai Trough. In this area, fifty-one survey lines are located at every 100 m interval.

で示している（この領域を以下では3D-BOXと呼ぶ）。3D-BOXのサイズはインライン方向約50 km、クロスライン方向約5 kmであり、測線間隔を100 mとして、長軸方向に測線長を50 kmとして51本の測線が設定してある。それぞれの測線においては、間隔50 mでエアガンによる発震を行い（総発震点数は1本の測線あたり約1000地点）、受振側は全長4500 m、チャンネル数360、受振器間隔12.5 mの仕様で1本のストリーマケーブルを深度15 mで曳航することにより調査が実施された。サンプリング間隔は2 msec、サンプリング長は15 sec（サンプリング数7500に相当）である。以上のデータ規模は、1測線あたり約11ギガバイトであり、51測線全データ規模は約561ギガバイトとなる。本研究では、上記の51測線のうち1測線（3D-BOXのうち西側から46本目の測線：Fig. 1におけるLine 46に相当する）に対して二次元のデータ処理を実施した。なお、Line 46での発震点数は1006点である。

前処理は、下記の手順により行った。

- (1) トレース編集
- (2) 時間リサンプリング (2 ms→8 ms)
- (3) 時間ウィンドウ (0.0 sec~10.0 sec)
- (4) 帯域通過フィルタ (5, 8, 50, 55 Hz)
- (5) 振幅補正
幾何的拡散補正
AGC：ウィンドウ長 2000 msec
- トレースバランスング：各トレースをそのトレースのRMS 振幅で割ることによる正規化
- (6) デコンボリューション：スパイクングタイプ、オペレータ長 300 ms、ノイズレベル0.5%
- (7) 帯域通過フィルタ (5, 8, 50, 55 Hz)

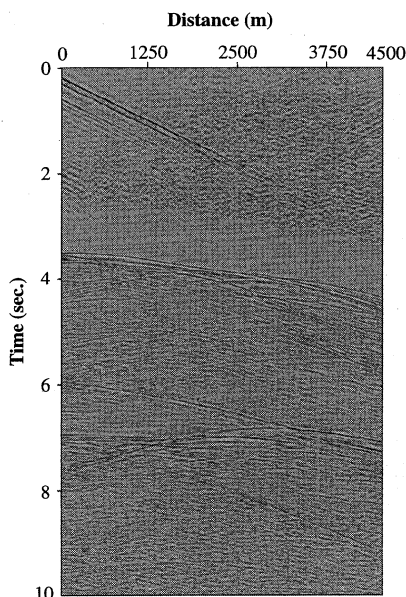


Fig. 2 An example of preprocessed shot gather for line 46.

- (8) 隣接トレース単純加算：2 トレース加算→1 トレース

上記の手順により前処理を実施した後の前処理後のデータ仕様は、以下の通りである。総発震点数1006点、受振チャンネル数180で合計181080トレース、各トレースは1250サンプル数で構成されている。前処理後のデータ規模は、約1ギガバイトである。前処理後の共通発震点記録例を Fig. 2 に示す。

3. 重合前時間マイグレーション処理

前述した前処理後データに対して、松島ほか (2001) が提案した二次元のPSTM 処理を適用した。以下にそのデータ処理の概略を述べる。

- (1) 速度解析地点を適当な間隔で設定する。
- (2) 各速度解析地点では、以下の方法で速度解析パネルを作成する。各イメージ点において様々な均質速度を仮定し、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（この場合は単純に重合した振幅値）を計算し、その値を速度解析パネル内に設定していく。他のイメージ点に関し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であることを意味する。
- (3) すべての速度解析パネルにおいて速度ピックを行

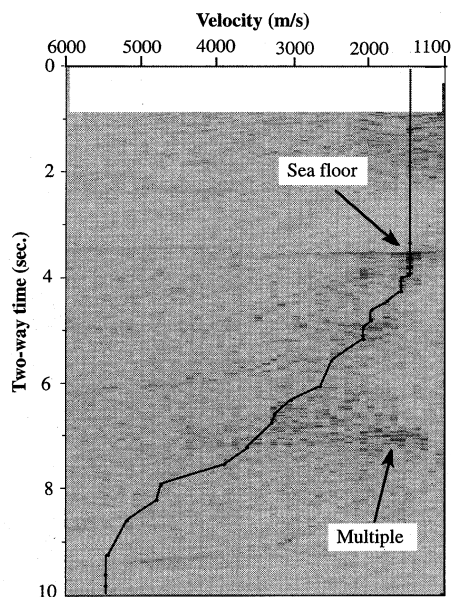


Fig. 3 An example of velocity panel with interpretation. Velocity panel is a table of numbers as a function of velocity versus two-way normal time and velocity-time pairs (velocity function) are selected from this panel based on maximum coherency peaks. Velocity analysis is performed at every 1700 m, totally 30 positions.

い、パネル内において線形な速度関数を決定し、パネル間でも線形内挿により速度関数を推定する。

(4) (3)で推定された速度モデルを用いて PSTM を実施する。このとき、それぞれのイメージ点同士は別々の均質速度を用いて独立に PSTM 処理が実施される。

今回のデータ処理にあたっては、速度解析地点を約 1.7 km おきに合計 30 点設定した。速度解析においては、速度を 1100~6000 m/sec の範囲で 100 m/sec おきに変化させて速度解析パネルを作成した。

Fig. 3 に速度解析パネル例とその速度ピック例を示す。ピックされた点に基づいて測線方向ならびに時間方向に対して線形内挿により速度を推定した結果を Fig. 4

に示す。Fig. 4 において測線方向は 33.3 m でサンプリングされている。このように推定された速度モデルは、各イメージ点における PSTM のための重合効果のある最適なマイグレーション速度 (均質) である。Fig. 4 のマイグレーション速度を用いて PSTM を実施した結果を Fig. 5 に示す。前述したように、それぞれのイメージ点同士は別々の均質速度を用いて独立に PSTM 処理が実施される。Fig. 4 と同様に、Fig. 5 においても測線方向は 33.3 m でサンプリングされている。Fig. 5 の長方形領域で囲んでいる領域 (往復走時 7 秒前後) において、反射面が強くイメージされており、当地域における先行研究 (東海沖海底活断層研究会, 1999) より判

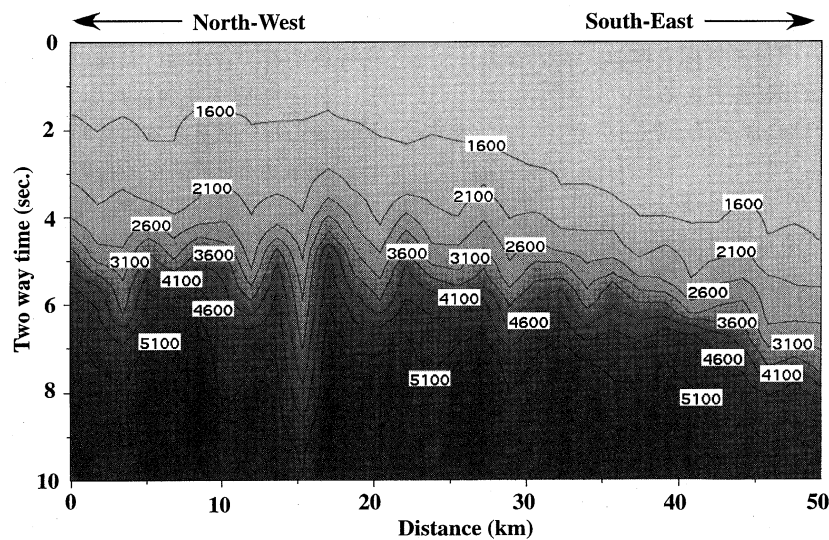


Fig. 4 Migration velocity model for prestack time migration. This velocity model is derived from interpolation of 30 velocity functions.

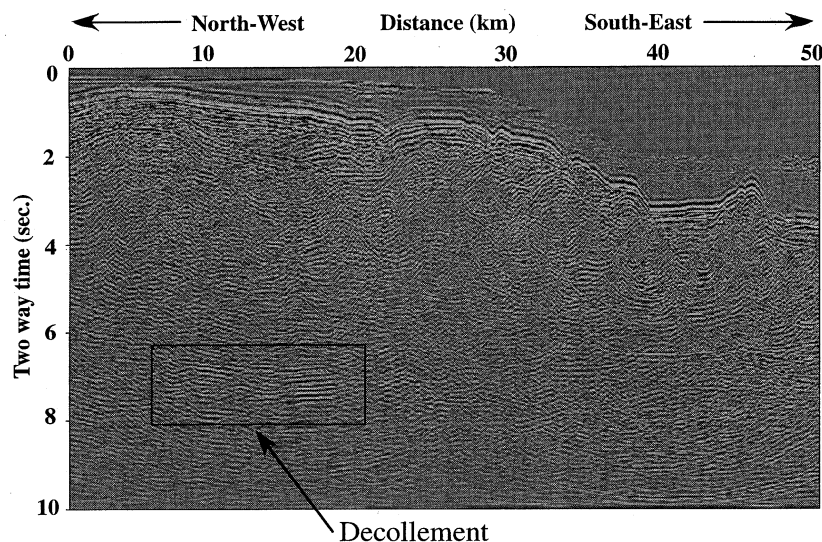


Fig. 5 Prestack time migrated section which is derived by use of the velocity model shown in Fig. 4. Prestack time migration performs a constant velocity migration at each image point and the constant velocity changes at different image points. Strong reflectors can be seen within rectangle area labeled "Decollement".

断して、この強反射面はデコルマンと推定される。

4. 並列処理

上述の PSTM 処理は、産業技術総合研究所先端情報計算センター（以下、TACC と呼ぶ）所有の並列ベクトル計算機 HITACHI SR8000（以下、SR8K と呼ぶ）を用いて並列処理した。SR8K の基本スペックは、総合演算性能512ギガフロップス、メモリ512ギガバイトであり、プロセッサは250 MHz の PowerPC アーキテクチャを元に擬似ベクトル機構、拡張レジスタ、拡張命令等を追加したプロセッサを用いている。また HI-UX/MPP と呼ばれる UNIX 系の OS が搭載されている。現在 TACC に導入されている SR8K は、64個のノードから構成されており、各ノード間は二次元クロスバーネットワークと呼ばれる高速なネットワークで結合されている（ピーク通信性能：1ギガバイト/秒）。さらに各ノード内には8個のプロセッサが搭載され、8ギガバイトの主記憶を共有しており、ノードあたりの総合演算性能は8ギガフロップスである。

以上の性質により、ノードを単位としてシステムは分散メモリマシン、個々のプロセッサを単位としてノードは共有メモリマシンである。従って SR8K の標準的な使用法はノード内ではコンパイラ等による自動並列を行いノード間では通信ライブラリを用いノード間並列を行う。一方、各ノード内（主記憶8ギガバイト）に存在する8個のプロセッサを独立に使用できる（個々のプロセッサは主記憶1ギガバイトを有する）分散メモリシステムも可能であり、この場合は最高512個のプロセッサを使用した並列計算が可能になる。本研究では、256個のプロセッサ（ノード数としては32個に相当）を使用する分散メモリシステムによる並列処理を行った。並列処理に関する詳細な検討は別稿に譲る。

並列処理アルゴリズムに関して、その概略を Fig. 6 ならびに Fig. 7 を用いて説明する。まず始めに単体処理の場合を説明し、それを並列処理に変更する方法について述べる。Fig. 6 に、任意の点において PSTM イメージを実施するのに必要なパラメータとその計算式を示す。任意の点の空間的な位置を表すパラメータは、水平方向距離 (X_d) と深度方向垂直時間 (X_t) の2つである。この点においてすべての発震点・受振点の組を用いて PSTM 処理を行うとき、イメージ点における値は Fig. 6 に示した式に基づいて得られる。入力データを表すパラメータは発震点と受振点番号であるが、実際にはその組み合わせであるトレース数 ($S \cdot R$ 本) が入力データのパラメータとなる。

以上より、PSTM 処理を行うためのパラメータとしては3つ存在し ($X_d, X_t, S \cdot R$)、それぞれループ計算を要するので、Fig. 7 に示したフローに従ってそれぞれのパラメータにおけるループ処理を行う。Fig. 7 の左側のフローは単体処理の場合を示す。始めにデータの読み

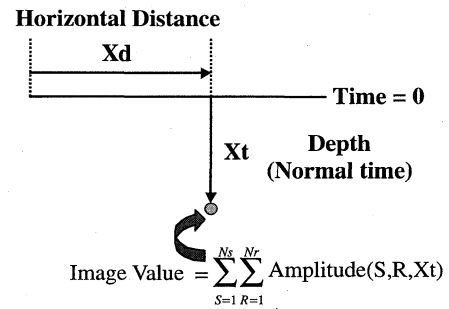


Fig. 6 Illustration of parameters needed for prestack time migration. X_d is the parameter for horizontal distance, X_t is for vertical direction. S and R indicate the number of source and receiver, respectively. N_s and N_r indicate the total number of source and receiver, respectively.

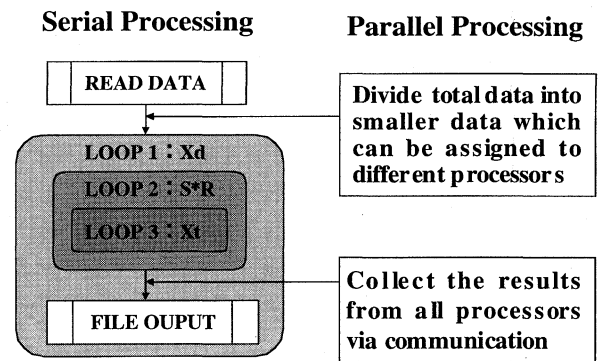


Fig. 7 Comparison of flowcharts of prestack time migration between serial and parallel processing. In case of parallel processing, total data is divided into smaller data which can be assigned to different processors (data decomposition) and each processor perform prestack migration for its own data and finally the results are collected from all processors via communication library (MPI).

とりを行い、外側のループから $X_d, S \cdot R, X_t$ と順にループ処理を行い、最後にファイルに結果を書き出す。

以上の単体処理アルゴリズムを以下の手順で並列処理アルゴリズムに変更する。全データの読み込みが終了すると、そのデータを使用プロセッサ数で分割し、分割されたデータをそれぞれのプロセッサに割り当てる。それぞれのプロセッサでは割り当てられたデータについてのみ解析を行う。すべてのプロセッサで処理が終了すると、すべてのプロセッサで得られた処理結果を通信ライブラリを使用して集計し、ファイルに書き出す (Fig. 7 の右側図)。なお本研究では通信ライブラリとして MPI (Message Passing Interface) を用いた。

上記の並列アルゴリズムに基づいて PSTM 処理を行い Fig. 5 の結果を得るのに要した時間は下記の通りである。速度解析 (30地点) に約50分, PSTM トレース作成 (1480トレース, 185万サンプル) に約50分, 合計

で約100分であり、現実的な時間内で処理が行えた。

5. NMO ストレッチの影響とその除去

CMP 重合の際に実施する NMO 補正においては、反射面への入射角が大きくなる場合、その部分に該当するイベントは時間方向に引き伸ばされる (NMO ストレッチ)。このようなストレッチが生じる原因は以下のように考えることができる。いま、観測記録の時間軸を t とすると、NMO 処理によりこの時間軸 t は垂直往復走時の時間軸 T に変換される。 t, T の微小変化をそれぞれ $\Delta t, \Delta T$ とすると、 $\Delta t/\Delta T$ が 1 であるならば時間方向のストレッチは生じない (ゼロオフセット記録の場合はこれに相当する) が、反射面への入射角の大きさに応じて $\Delta t/\Delta T$ は 1 より小さくなる。これは、垂直方向に伝播していない波を垂直方向の時間軸に変換しているために生ずると解釈することもできる。ある割合以上引き伸ばされる部分は、重合の際にはミュートにより削除される (NMO ミュート)。

PSTM 処理を行う場合においても、同様に NMO ストレッチが発生し、これに対して NMO ミュートを実施する必要がある。CMP 重合法の場合には入射角と反射角は等しいため入射角の大きさを考慮すれば良いが、PSTM 処理の場合には散乱波仮定の場合に入射角と反射角は等しくないで、入射角と反射角との和の大きさを考慮する必要がある。

松島ほか (2001) に基づく PSTM 処理は以下の (1) 式が基本式である。Fig. 8 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 はイメージ地点の基準位置からの水平距離、 $T(0)$ はゼロオフセット時の往復走時、 V は波の伝播速度である。このとき Fig. 8 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 (1) 式で表現される。

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

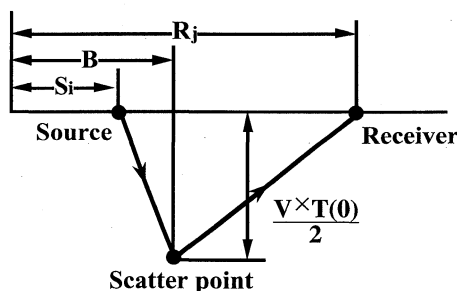


Fig. 8 Parameters for the calculation of a traveltime of a scattered wave during diffraction stacking.

この (1) 式は散乱波走時と垂直往復走時とを関係づける式であるので、(1) 式を垂直往復走時 $T(0)$ で偏微分することにより得られる以下の (2) 式において、散乱波走時の変化量と垂直往復走時の変化量との関係を評価できる。

$$\frac{dt_{ij}}{dT(0)} = \frac{T(0)}{4 \sqrt{\left(\frac{T(0)}{2}\right)^2 + \frac{(S_i - B)^2}{V^2}}} + \frac{T(0)}{4 \sqrt{\left(\frac{T(0)}{2}\right)^2 + \frac{(R_j - B)^2}{V^2}}} \quad (2)$$

いま、NMO ストレッチが x パーセント生じたとすると、(2) 式で表現された偏微分係数と NMO ストレッチの関係は以下の (3) 式になる。

$$\frac{dt_{ij}}{dT(0)} = \frac{100}{100 + x} \quad (3)$$

各イメージ点において、(2) 式で表現された偏微分係数を計算し、さらに (3) 式により NMO ストレッチの程度が計算できる。データ処理の中では、ある値以上の NMO ストレッチが生じている場合はイメージに寄与させない制限を設ける。

Fig. 5 に示した PSTM 断面は 30 パーセント以上の NMO ストレッチが生じた場合に NMO ミュートを実施する設定で作成された。これに対して、NMO ミュートを行わなかった PSTM 断面を Fig. 9 に示す。NMO ストレッチの影響は基本的には浅部において顕著に現れる。Fig. 9 に示した四角で囲んだ領域と、NMO ミュートを行った場合の断面 Fig. 5 における同じ領域とを比較すると、以下のことがわかる。NMO ミュートを実施していない場合においては、反射面のイメージが不鮮明あるいは連続性が悪いが、NMO ミュートを行うことにより、反射面がより明瞭になっており連続性が良くなっていることがわかる。

6. CMP 重合処理との比較

ここでは、PSTM 処理により得られた断面 (Fig. 5) と CMP 重合法に基づいて得られた断面との比較を行う。PSTM 処理と同様に、CMP 重合処理のための速度解析地点を約 1.7 km おきに合計 30 点設定した。CMP 間隔を 10 m とし CMP 重合断面を作成した (Fig. 10 (a))。また、CMP 重合断面に対して重合速度解析によって得られた重合速度を利用した FK マイグレーションを適用した (Fig. 10 (b))。Fig. 10 に示した 2 つの断面と Fig. 5 に示した PSTM 断面との差異を詳細に確認するために、Fig. 10 (a) において A と記した四角で示した領域の拡大部分について、PSTM 断面、CMP 断面、重合後マイグレーション断面を Fig. 11 (a) ~ (c) にそれぞれ示す。

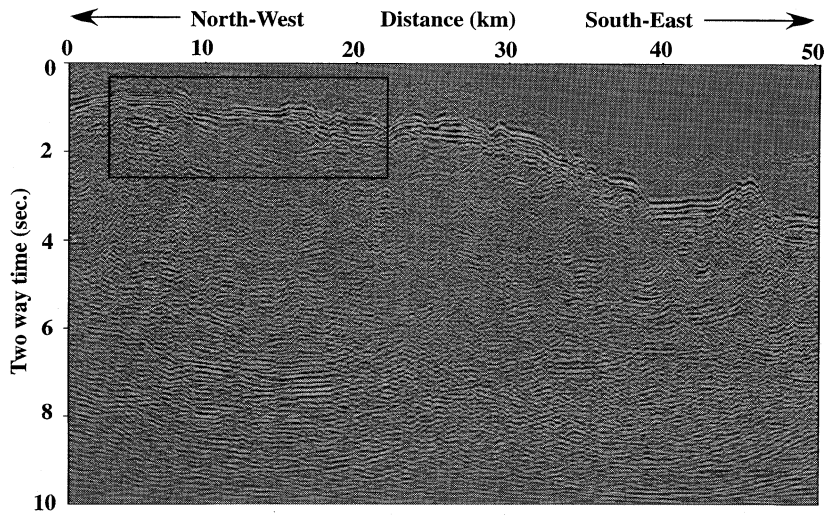


Fig. 9 Prestack time migrated section without NMO stretch mute. Compare with the section with NMO stretch mute shown in Fig. 5. Reflectors are contaminated by NMO stretch at lower than 2.0 sec..

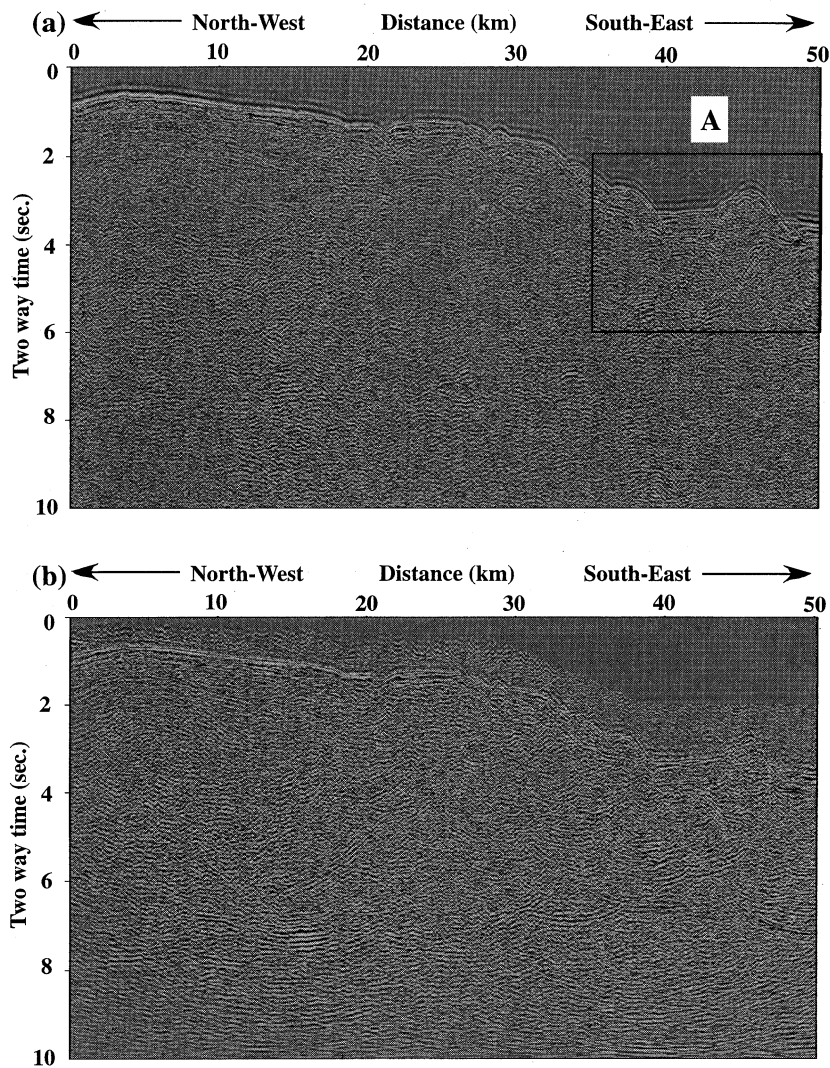


Fig. 10 (a) CMP stacked section, (b) After poststack time migration (FK).

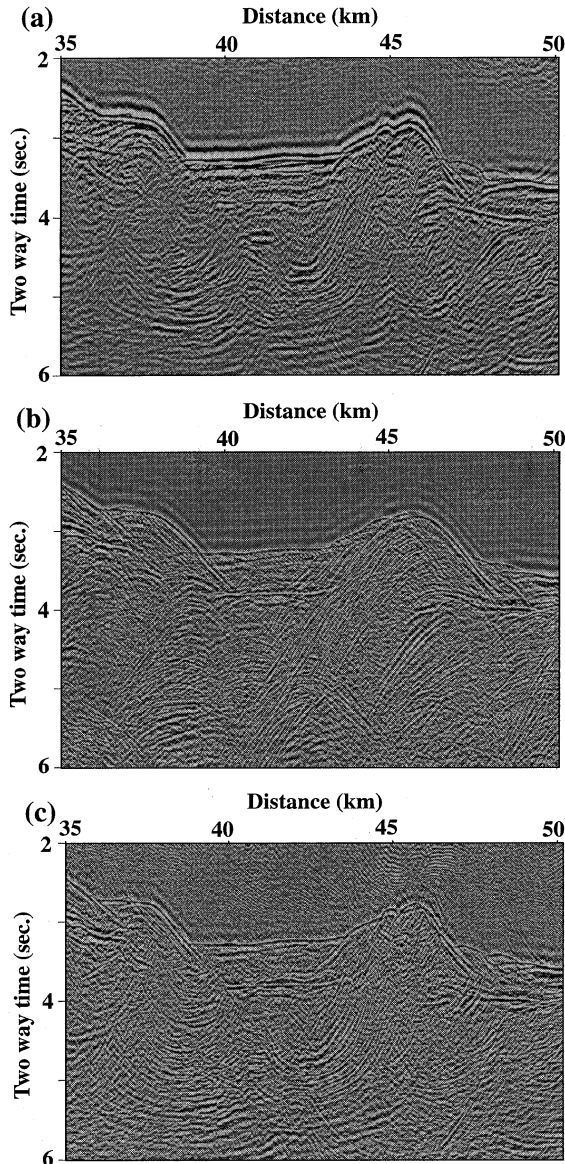


Fig. 11 Enlargement of the part enclosed in rectangle labeled A shown in Fig. 10(a). (a) Prestack time migrated section, (b) CMP stacked section, (c) After poststack time migration (FK).

また、デコルマン (Fig. 5 において Decollement と記した領域) に着目して比較すると、PSTM 断面に比べて CMP 断面ではその反射面が不明瞭であるものの、CMP 断面に対してマイグレーションを施すと、デコルマンがより明瞭になっていることがわかる。PSTM 断面、CMP 断面、重合後マイグレーション断面を比較すると、断面の品質を目視により判断すると、PSTM 断面 > 重合後マイグレーション断面 > CMP 断面の順であると判断される。

以上の断面の品質比較の議論は目視により行われたが、以下では S/N 比の定量的な比較を行う。中神ほか (1994) は f-x 予測フィルタを用いて S/N 比を定量的に評価する手法を提案した。この手法は、f-x 予測フィル

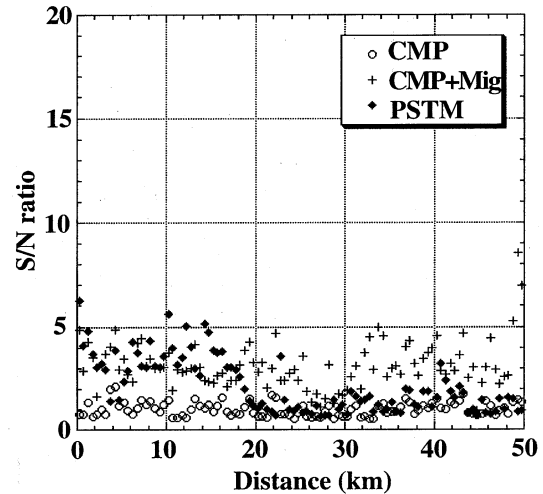


Fig. 12 Signal-to-noise ratio calculated by f-x prediction filter method proposed by Nakagami et al. (1994). Signal-to-noise ratio is calculated at every 500 m. Circle=CMP, Cross=CMP+poststack migration, Filled diamond=prestack time migration.

タにより、断面におけるイベントをコヒーレント成分とランダム成分に分離し、それぞれの RMS 振幅を各トレースで計算し、それらの比により S/N 比を計算する。

この手法により Fig. 5 ならびに Fig. 10 で示したそれぞれの断面において S/N 比を計算した結果を Fig. 12 に示す (実際には各トレースで計算しているがそれらから間引いて 500 m 間隔で表示している)。Fig. 12 より以下のことがわかる。CMP 断面、重合後マイグレーション適用断面、PSTM 断面の中で全体的に S/N 比が最も高いのは重合後マイグレーション適用断面であり、最も低いのは CMP 断面である。CMP 断面に重合後マイグレーションを適用することにより、すべての箇所において S/N 比が向上している。また CMP 断面と PSTM 断面との比較では、水平距離が 0~20 km の領域では CMP 断面より PSTM 断面の方が S/N 比が高いが、それ以外の領域では両者に大きな差はない。水平距離が 0~20 km の領域において両者の S/N 比に差がでた理由の 1 つとして、該当する範囲の PSTM 断面ではデコルマンが明瞭にイメージされているが、一方、CMP 断面では明瞭ではないためと考えられる。

以上のように、f-x 予測フィルタによる定量的な比較を行うと、重合後マイグレーション適用断面が最も高い S/N 比を有するという評価結果になったが、この問題については次節の重合範囲の比較において議論する。

また、CMP 断面に比べて PSTM 断面の方が S/N 比が高くなるという結論は、松島ほか (2001) が行った数値実験によっても得られている。松島ほか (2001) はこの理由についてホイヘンスの原理に基づいて考察しており、CMP 重合法は PSTM 法の近似処理であるためとしている。

最後に、CMP 重合断面ならびに重合後マイグレーション断面を得るのに要した処理時間を以下に述べる。Pentium III 1 GHz のプロセッサ、1 Gbyte のメモリを搭載したパーソナルコンピュータを使用し、CMP 重合処理のための速度解析に約 1 分、CMP 重合処理に約 30

分、重合後マイグレーション処理に約 3 分を要した。

7. 重合範囲を変化させた場合の PSTM 断面の変化

松島ほか (2001) は、PSTM 処理を行う際に Fig. 13 に示した重合範囲を設定することを提案し、この重合範囲が断面の S/N 比を制御する重要なパラメータであることを示唆した。Fig. 13 において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することにより柔軟に PSTM 処理を実施できる。ここでは、Fig. 13 で定義された重合範囲を変化させた場合に Fig. 5 の断面 (重合範囲を 360 度と設定) がどのように変化するかを検証する。

重合範囲を 18 種類 (2, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 45, 60, 72, 90, 120, 144, 180, 200, 240, 300, 360 度) に設定した場合における断面を作成した。そのうち、5 種類 (6, 24, 45, 72, 120 度) の重合範囲に対応する断面を Fig. 14 (a) ~ (e) にそれぞれ示す。以下では、S/N 比と水平分解能の

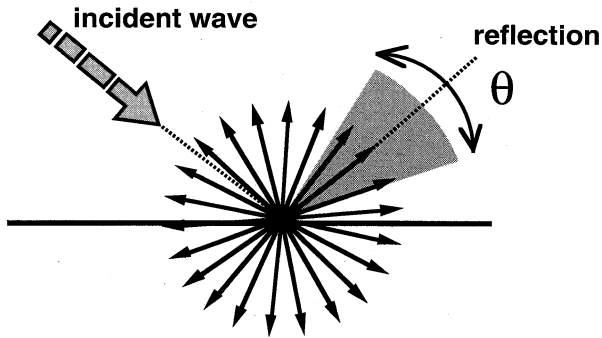


Fig. 13 Definition of aperture angle. The raypaths going through shadow zone are stacked.

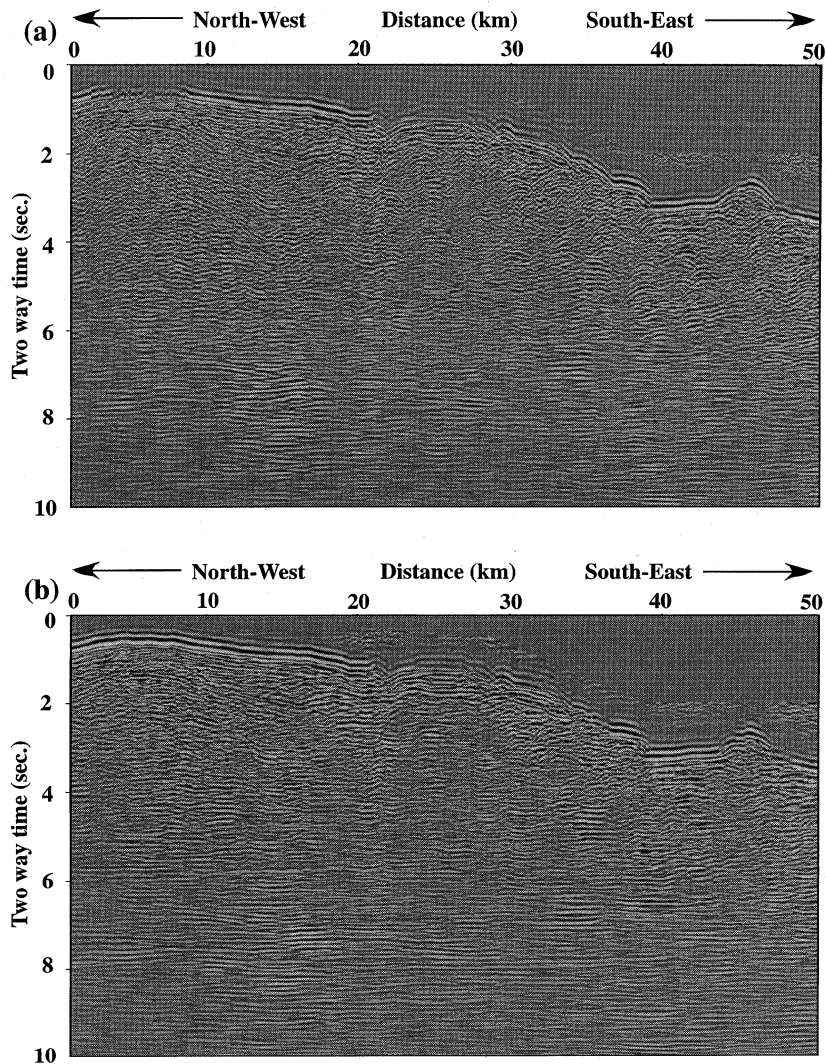


Fig. 14 (a), (b)

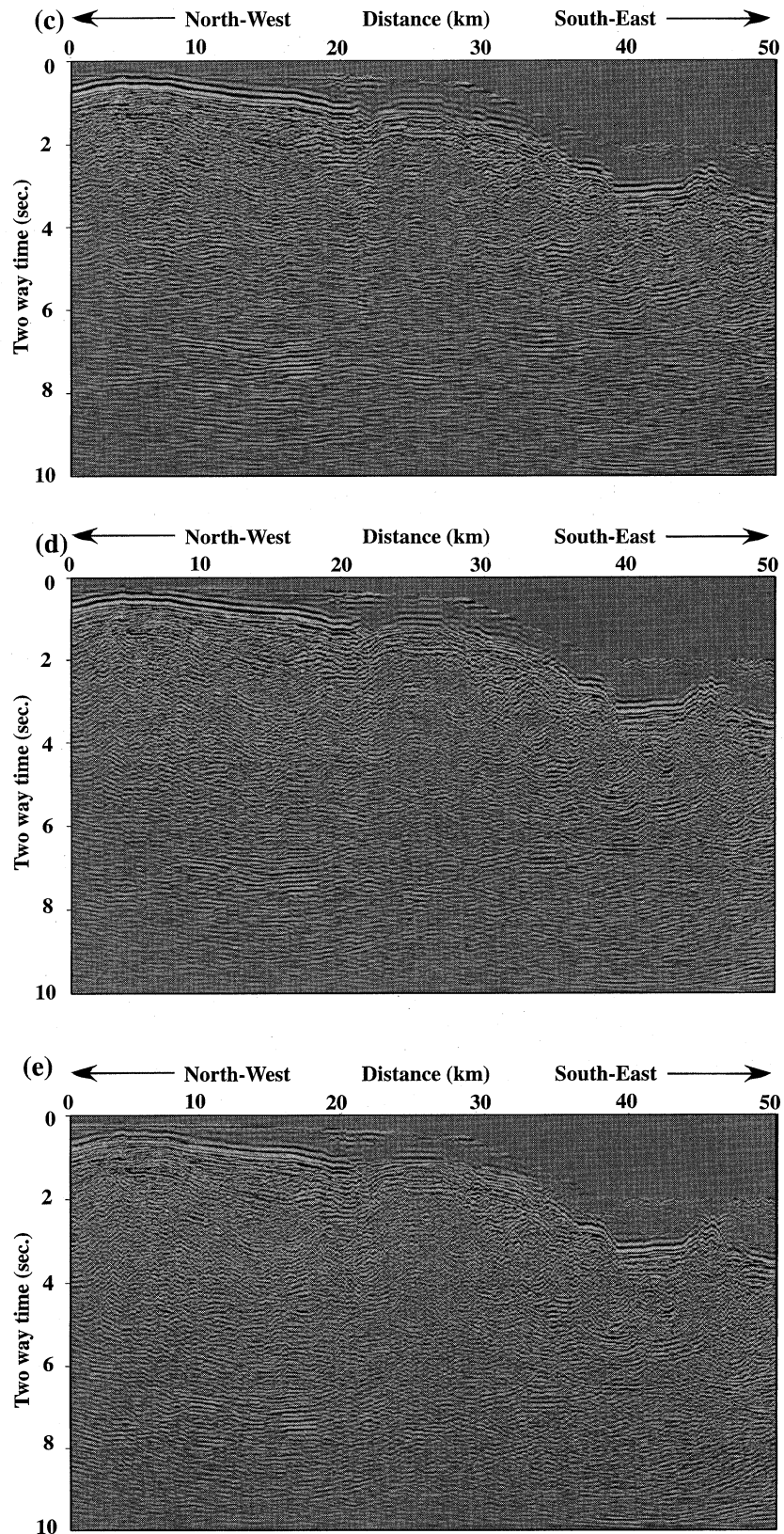


Fig. 14 Prestack time migrated sections with different aperture angles. (a) 6 deg., (b) 24 deg., (c) 45 deg., (d) 72 deg., (e) 120 deg..

2つの観点から Fig. 14に示したそれぞれの断面を比較する。

S/N比に関しては、前述の方法により定量的な評価を行い、上記5種類(6, 24, 45, 72, 120度)の重合範囲

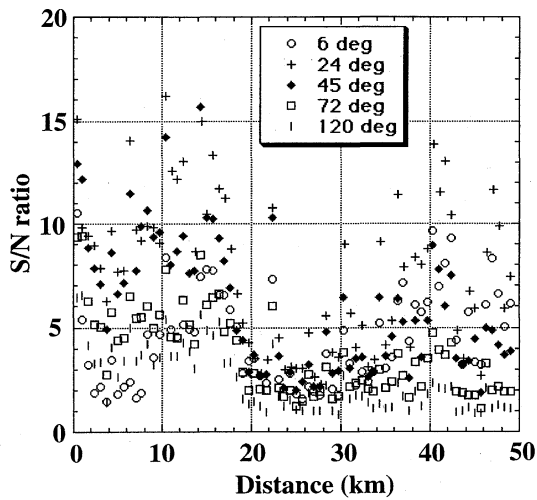


Fig. 15 Signal-to-noise ratio calculated by f-x prediction filter method proposed by Nakagami et al. (1994). Signal-to-noise ratio is calculated at every 500 m. Circle=6 deg., Cross=24 deg., Filled diamond=45 deg., Square=72 deg., Bar=120 deg..

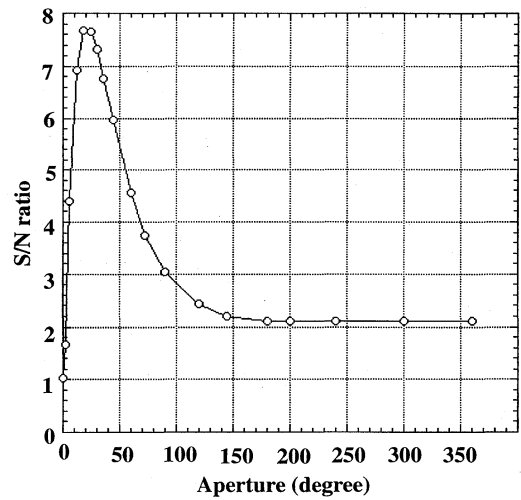


Fig. 16 Signal-to-noise ratio calculated by f-x prediction filter method. Signal-to-noise ratio is calculated at each trace and the average of S/N ratio results is calculated within each section.

における結果を Fig. 15 に示す (Fig. 12 と同様に 500 m 間隔で S/N 比を表示している)。Fig. 15 において、水平距離 20~30 km の箇所では、重合範囲の違いによる大きな差異はないが、それ以外では重合範囲の違いにより S/N 比が大きく変化していることがわかる。Fig. 12 の結果 (CMP 重合は重合範囲がほぼ 0 度の場合であり、Fig. 5 に示した PSTM 断面は重合範囲 360 度) と併せて全体的な傾向を比較すると、S/N 比が最も低いのが重合範囲がほぼ 0 度の場合の CMP 重合処理であり、6, 24 度と重合範囲が増加するに従い、S/N 比は高くなり、最も高いのは重合範囲が 24 度の場合である。45, 72, 120, 360 度と重合範囲がさらに増加するに従い、S/N 比は低下する傾向がわかる。

断面の全体的な S/N 比の傾向を定量的に比較するために、上記 18 種類の重合範囲に対して計算された S/N 比の断面内での平均値 (各トレースで計算された S/N 比を断面内で総和をとり、断面内でのトレース数で除算する) を求めた (Fig. 16)。Fig. 16 において、重合範囲がほぼ 0 度 (CMP 処理に相当) の場合において S/N 比が最も低く、重合範囲を増加させると S/N 比が向上し、ある箇所では S/N 比のピークを迎え、さらに重合範囲を増加させると S/N 比は減少し、ある重合範囲からは一定となることがわかる。このような重合範囲と S/N 比との関係は、松島ほか (2001) が数値実験により得た傾向と一致している。松島ほか (2001) は、S/N 比のピークを与える最適な重合範囲の存在はフレネルゾーンと関係していることを考察した。Fig. 16 に示した結果からは、最適な重合範囲は 25 度付近であり、Fig. 14 (b) に示した断面 (重合範囲を 24 度に設定) が S/N

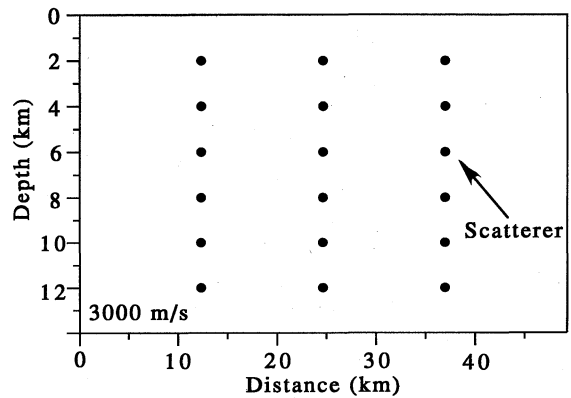


Fig. 17 Numerical model for evaluation of spatial resolution. Eighteen point scatterers are placed uniformly in a medium with constant velocity of 3000 m/s.

比的には最良であることを示唆する。しかし、注意すべきは、Fig. 14 (b) (の特に深部) では、水平方向のイベントが卓越しており、必ずしもそれらが本来の地下構造を反映している、とは言い難い。

一方、水平分解能に関して、以下の数値実験を行った。数値実験に用いるモデルを Fig. 17 に示す。均質速度 (3000 m/s) の媒体において 18 個の散乱点が一様に存在するモデルであり、モデル全体は前述の海上地震探査の二次元測線 (Line 46) とほぼ同等になるように設定した。また、発震・受振点展開は、Line 46 の海上地震記録 (前処理後) と同様に設定した。すなわち、総発震点数 1006 点、受振チャンネル数 180 で合計 181080 トレース、各トレースは 1250 サンプル数で構成されている。数値記録は以下に述べる手順により作成した。発震点、散乱点、受振点の幾何的配置で決定される波線の距

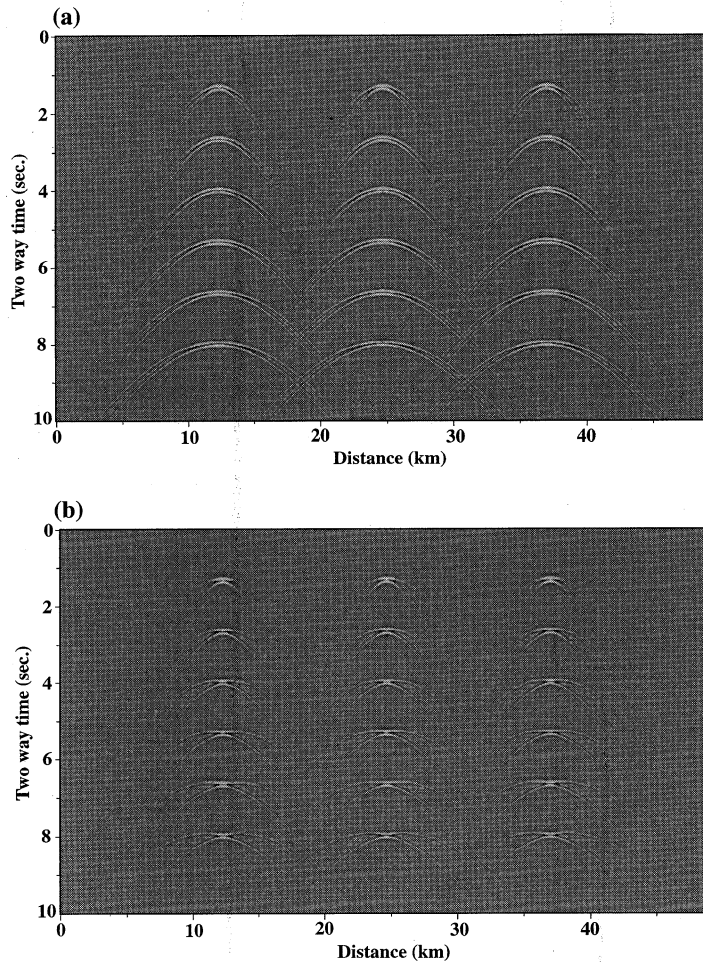


Fig. 18 (a), (b)

離を媒質速度で除算することにより散乱波走時を求める。その走時に相当する箇所インパルスを立て、さらに帯域通過フィルタ(5, 8, 50, 55 Hz)を施した。なお、この帯域は前述の海上地震探査の前処理の際に用いたものと同様である。

上記の数値実験データに対して、Fig. 14(a)~(e)ならびにFig. 5に示した断面の場合と同様に、6種類(6, 24, 45, 72, 120, 360度)の重合範囲に対応する断面を作成した。それらをFig. 18(a)~(f)にそれぞれ示す。Fig. 18(a)~(f)より、重合範囲を大きく設定するにしたがって、水平分解能が向上していることがわかる。また、深度方向については、深度が大きくなるほど水平分解能が低下していくことがわかる。

実フィールドデータに対する断面(Fig. 14(a)~(e)ならびにFig. 5)とそれに相当する数値実験データの断面(Fig. 18(a)~(f))とを比較すると以下のことがわかる。往復走時6.0秒以深では、Fig. 14(a)あるいはFig. 14(b)では水平方向に広がるイベントが顕著に見られるが、Fig. 18(a)ならびに(b)を参照すると、この重合範囲においては水平分解能が低いことがわかる。

以上のS/N比と水平分解能の両者の観点からの評価

により、S/N比の観点からは、重合範囲を24度に設定した場合が最良であったが、水平分解能の観点からは最良ではなく、重合範囲を大きく設定するほど水平分解能は向上することがわかる。最良の断面を得るためには、S/N比と水平分解能の最適なバランスを与える最適な重合範囲の決定が必要であり、このバランスは記録の品質や地下構造に依存すると考えられる。

また、重合範囲が360度の場合の断面Fig. 5において、往復走時6.0秒以深ではマイグレーション処理に特有のスミリング構造がみられることがわかる。数値実験データに対して重合範囲を360度に設定して処理された断面Fig. 17(f)においては、最も深い位置に存在する散乱点のイメージングの際には水平分解能の低下はみられないことから、上述のスミリング構造は、PSTM処理を実施する際の重合速度の精度誤差であると考えられる。

8. 結 論

本稿では、松島ほか(2001)が提案した重合前時間マイグレーションの手法(=重合速度解析をとまなう散乱重合法)を海上で取得された反射法地震探査データに

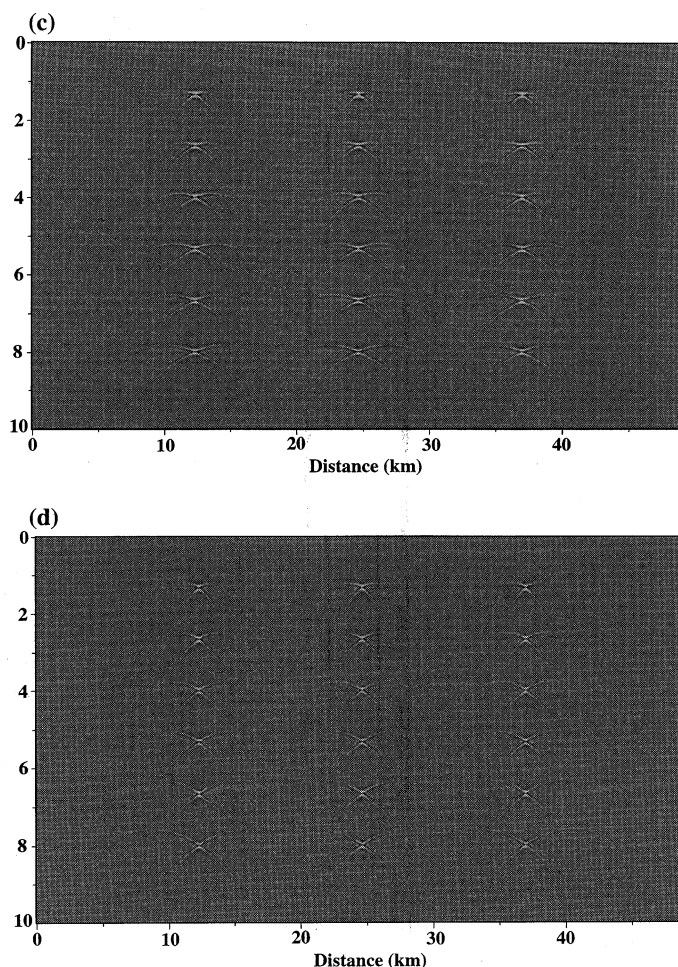


Fig. 18 (c), (d)

適用し、処理時間、NMOストレッチ除去の効果、CMP重合法に基づいた処理との比較、重合範囲を変化させた場合のPSTM断面のS/N比ならびに水平分解能評価の各項目について検討した。その結果以下のことがわかった。

(1) 処理時間

松島ほか(2001)が提案したPSTMの手法を分散メモリシステム型の並列計算機(256個のプロセッサを使用)に実装することにより処理時間の短縮を試みた。本稿で扱う1ギガバイト程度の規模のデータ(約180000トレース)に対しては速度解析(30地点)に50分、PSTM断面作成(1480トレース, 185万サンプル)に50分、合計約100分を要し、現実的な時間で処理が行えた。

(2) NMOストレッチ除去の効果

PSTMの処理の際に、NMOに伴う波形のストレッチ量を計算する過程を導入し、NMOストレッチ除去(30%以上のストレッチは除去)の効果を確認し、NMOストレッチ除去により浅部の反射面が明瞭にイメージされた。

(3) CMP重合法に基づいた処理との比較

PSTM断面、CMP重合断面ならびに重合後マイグレーション適用断面との比較を行った。目視による断面の品質比較では、PSTM断面>重合後マイグレーション断面>CMP断面の順であると判断された。一方、断面の定量的なS/N比の評価として、中神ほか(1994)が提案したf-x予測フィルタを用いたS/N比定量化手法を適用した結果では、重合後マイグレーション断面>PSTM断面>CMP断面の順であり、目視の評価とは異なった。これは、断面の品質を評価するには、S/N比の観点と分解能の観点が重要であることを意味すると考えられる。例えば、水平分解能の点で考えると、正しい重合後マイグレーション断面を得るには、非成層構造におけるCMP重合法の性能の優劣(いかに正確なゼロオフセットを作成できるか)に依存することを考慮する必要がある。

(4) 重合範囲を変化させた場合のPSTM断面のS/N比ならびに水平分解能評価

重合範囲を変化させた場合の断面の変化について、S/N比ならびに水平分解能の観点から評価した。S/N比に関しては中神ほか(1994)の方法により定量的な

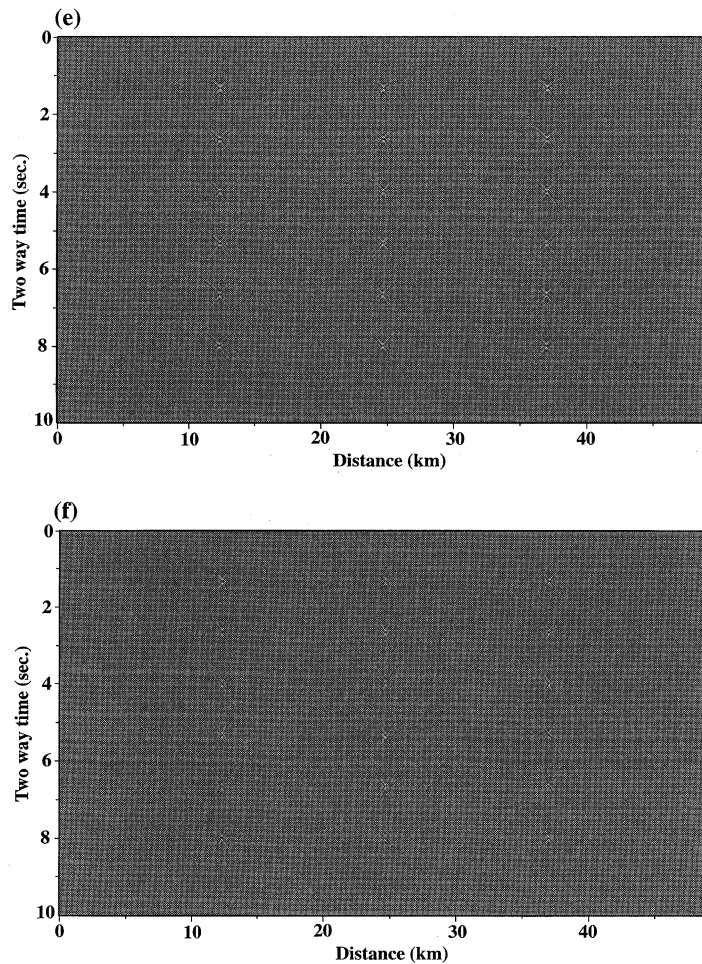


Fig. 18 Prestack time migrated sections for numerical data with different aperture angles. (a) 6 deg., (b) 24 deg., (c) 45 deg., (d) 72 deg., (e) 120 deg., (f) 360 deg.

評価を行い、水平分解能に関しては数値実験による定性的な評価を行った。S/N比の観点からは、最良のS/N比を与える最適な重合範囲が存在することがわかった。一方、水平分解能の観点からは、重合範囲を大きく設定するほど水平分解能は向上することがわかった。したがって、最良の断面は、S/N比と水平分解能の最適なバランスによって決定され、いかにバランスを決定するかが重要である。

最後に今後の課題について述べる。本研究で実施したPSTM処理は各イメージ点で均質速度を仮定しているため、地下の速度不均質性によりイメージング精度誤差が生ずる。どれくらい速度不均質性まで耐えられるのか、速度不均質性による影響はどのように断面上で現れるのか、について検討していきたい。

謝辞

匿名の査読者から本論文改善のための有益な助言をいただきました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

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.
- Gray, S. H., Etgen, J., Dellinger, J., and Whitmore, D. (2001) : Seismic migration problems and solutions, *Geophysics*, **66**, 1622-1640.
- Robein, E. and Hanitzsch, C. (2001) : Benefits of pre-stack time migration in model building : a case history in the South Caspian Sea, *First Break*, **19**, 183-189.
- Young, K. T., Meng, X., Montecchi, P., and Notfors, C. (1999) : Subsalt imaging in Walker Ridge, Gulf of Mexico, 69th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1099-1102.
- 東海沖海底活断層研究会 (1999) : 東海沖の活断層, 東大出版会, 東京.
- 徳山英一, 池 俊宏, 倉本真一, 横田俊之, 松島 潤, Geoges Pascal, Siegfried Lallemant (2000) : 日仏 KAIKO 計画による東海沖地震発生帯の 3D マルチチャンネル地震探査, 物理探査学会第103回学術講演会論文集, 267-272.
- 中神康一, 村山隆平, 渡辺克哉 (1994) : f-x 予測フィルタを用いた S/N 比定量化の試み, 物理探査学会第90回学術講演会論文集, 125-127.
- 松島 潤, 六川修一, 横田俊之 (2001) : 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, 物理探査, **54**, 73-89.