

### 3. 2 海域における既往探査データ等の解析及び統一的断層解釈

#### (1) 業務の内容

(a) 業務題目 海域における既往探査データ等の解析及び統一的断層解釈

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人海洋研究開発機構	グループリーダー代理	高橋 成実
独立行政法人海洋研究開発機構	調査役	及川 信孝

(c) 業務の目的

統一的断層解釈を行うために必要な反射法探査データ等の収集されたデータから、海底下最大10～20km程度までの反射面の分布を把握し、ノイズ除去手法など最新のデータ処理を加え、深部イメージングの品質を向上させる。DBに登録後、断層を解釈し、断層の3次元的な広がり进行评估する。断層には調査の音源に応じた分解能の違いがあるが、主断層を抽出しサブテーマ（3）に情報を提供する。断層の深部延長も解釈を加え、そのデータタッチメントの場所进行评估する。解釈結果は、客観性を保持するため、評価助言委員の方々から意見を頂き、適宜改訂する。

(d) 7カ年の年次実施業務の要約

1) 平成25年度：

収集したデータ（日本海）の再解析を開始、多重反射波除去のパラメータテストを行い、今後の処理のフローを作成した。また、既存の解釈データも収集、参考にしながら解釈作業を開始した。合わせて日本海周辺の速度情報を収集、層構造構築を開始した。

2) 平成26年度：

引き続き収集したデータ（日本海）の再解析と解釈を行い、上記手法に従って断層評価を進める。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て適宜改訂を行う。

3) 平成27年度：

日本海データの解釈をとりまとめDBに登録する。南海トラフ・南西諸島海域のデータの再解析と解釈を行う。

4) 平成28年度：

南西諸島海域データの解釈をとりまとめDBに登録する。南海トラフ域のデータ再解析と解釈を継続する。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て適宜改訂する。データ公開システムの仕様を検討しているサブテーマ(1)に日本海の解釈例の提供を行う。

5) 平成29年度：

南海トラフのデータの解釈をとりまとめDBに登録する。日本海溝・伊豆小笠原海域のデータ再解析と解釈を行う。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て適宜改訂を行う。

6) 平成30年度：

伊豆小笠原海域の解釈をとりまとめ DB に登録を行う。日本海溝・十勝沖再解析と解釈を行う。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て適宜改訂を行う。

7) 平成 31 年度 :

日本海溝・十勝沖海域のデータの解釈をとりまとめ DB に登録する。オホーツク海の再解析と解釈を行い、解釈結果はアドバイザーからの助言を得て、適宜改訂する。日本周辺の断層評価の整合性を確認し、最終的に取りまとめを行う。

## (2) 平成 25 年度の成果

### (a) 業務の要約

日本海海域において反射法探査データの再解析と解釈を開始した。特に日本海西部海域においては、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構のマルチチャンネル反射法データ (MCS データ) のうち、測線長計 10592 km の MCS データの再解析を実施し、解析のフローを作成した。デジタルデータが存在せず、紙記録しか残っていない一部のデータについては、スキャンして MCS データをベクタライズ、デジタル化を実施した。(独)産業総合研究所のシングルチャンネル反射法探査データ (SCS データ) についても、能登半島沖のデータから再解析を開始、解析フローを作成した。最終的なイメージは深度変換の必要があるため、既存の屈折法探査のデータを用いて地殻の層構造作成を開始した。

### (b) 業務の実施方法

日本海西部海域の特に10年以上前に取得したMCSデータに対して主として再解析を実施した。具体的には、昭和48年北陸、昭和49年北陸～山陰、昭和51年北海道西部～新潟、昭和56年北陸～隠岐沖、昭和556年山陰沖、平成元年山陰～北九州沖の(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構の各プロジェクトのデータである。これらのデータを用いて、再解析のフローを作成した。データチェックの後、フォーマット変換、トレースエディットと最小位相化处理、簡易速度解析の後にノイズ抑制処理、各種多重反射処理、振幅補償、デコンボリューション、Common Mid Point(CMP)ソート、1 km間隔の速度解析後のNormal Move Out (NMO)補正、この時点で除去しきれていないデータに対して再度多重反射波除去、タイムマイグレーション、F-X予測フィルター、帯域通過フィルターの順で再処理した。特に多重反射波処理については、海水面に介在する長周期他盾反射波を抑制するSurface-Related Multiple Elimination (SRME)、層間多重反射波に代表される短周期多重反射波を抑制するRadial Trace Deconvolution(RTD)を用いた。

(独)産業技術総合研究所のSCSデータについては、多重反射波除去は不可能であるため、トレースの連続性の着目したフィルター処理が中心である。再解析は、フィールドデータに対して、フォーマット変換、振幅補償、走時補正、F-X予測フィルター、トレースミュート、タイムマイグレーションを実施、解析の基準フローを作成した。これらのデータは当時、アナログでデータを記録しており、データ再生時のレコーダーヘッドの再生速度の不安定や不均等など品質に問題がある部分も存在する。海底地形データをもとに反射波初動をそろえ、明らかに記録に問題のあるものは除去した。

これらの再解析したデータに加え、近年の(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構と(独)海洋研究開発機構の近年取得のデータを合わせて解釈作業を開始した。解釈にあたっては、既存の解釈結果や文献を参考に解釈している。

### (c) 業務の成果

本サブテーマでは、(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)データ、(独)海洋研究開発機構(JAMSTEC)データ、(独)産業総合研究所(AIST)データの再処理を検討し、解釈へとつなげた。ここではそれぞれのデータのクオリティと処理内容について具体的に記述する。

#### 1) データ処理

##### (ア) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構データ

JOGMEC データには、2次元反射法探査(MCS)データと3次元MCSデータを借用した。報告書やデジタルデータを確認し、古いデータを中心に約1万kmの2次元MCSデータを再処理した。

##### a. データ概要

今回の再処理の対象測線が含まれる調査の海域エリアを図1に示す。対象の調査は全てJOGMECの基礎調査であり、能登半島より西方の5調査と北海道西部の1調査の、合わせて5調査(6地域)である。表1に対象調査の概要を示す。各調査のデータ取得仕様を表2に示す。

各調査における発震記録例を図2に示す。「山陰～北九州沖(1989)」以外の調査ではデータ取得時に遮断周波数8Hzのローカットフィルターが適用されているため、発震記録上に波浪ノイズ(Swell Noise)はほとんど確認できない。「山陰～北九州沖(1989)」ではデータ取得時のローカットフィルターの遮断周波数は3Hzと他調査よりも低いため、一部で波浪ノイズと思しき低周波数ノイズが確認できる。全調査の記録で、ケーブルノイズや船舶ノイズなどのコヒーレントノイズも見られず、品質は良好である。海底面に起因する多重反射波が卓越しており、一部の測線では反射波の識別を困難にしている。

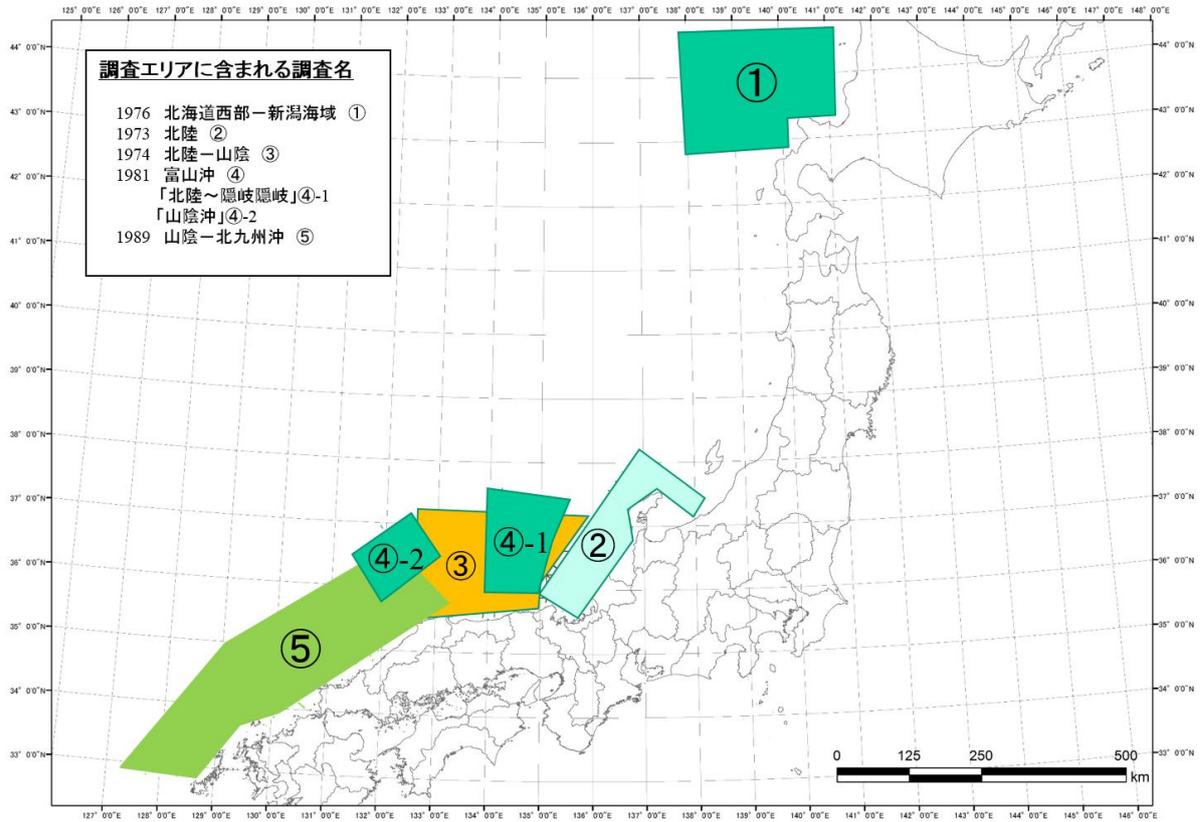


図1 再処理対象調査の各調査海域エリア（色塗りハッチ部分）

表1 再処理対象調査名

調査名	測線数	測線長 (km)	発震点 数	発震点 間隔	受振 器	サンプル 間隔	記録長 (sec)
山陰～北九州沖 (1989)	31	4,138	165,561	25	12.5	4	8
富山沖(1981) 「北陸～隠岐沖」	21	1,203	48,141	25	50	4	5
富山沖(1981) 「山陰沖」	15	971	38,855	25	50	4	5
北陸～山陰(1974)	27	2,054	41,114	50	50	4	5 or 6
北陸(1973)	23	1,429	28,599	50	50	4	5
北海道西部～新潟 海域	7	793	15,870	50	50	4	5

表 2 再処理対象調査仕様

調査名	山陰～北九州沖	富山沖、北陸～ 隠岐沖、山陰沖	北陸～山陰	北陸	北海道西部～新 潟海域
取得年度	1989	1981	1974	1973	1976
調査船	M/V GECO MY	M/V KAIYO	M/V TAKUYO	M/V TAKUYO	M/V TAKUYO
<b>音源</b>					
ガンタイプ	BOLT Air Gun	BOLT Air Gun	BOLT Air Gun	BOLT Air Gun	BOLT Air Gun
ショット間隔(m)	25	25	50	50	50
ガン容量(cu.in)	4768	2090	960	810	810
ガン圧(psi)	2000	2000	2000	2000	2000
ガン深さ(m)	7.5	8	10	10	10
<b>受信機</b>					
ストリーマー	Streamer Cable(FJORD)	Streamer Cable(SEG)	Streamer Cable(SEG)	Streamer Cable(SEG)	Streamer Cable(SEG)
受振点間隔(m)	12.5	50	50	50	50
チャンネル数	240	48	48	48	48
オフセット(m)	168	323.5 ~ 335.7	330	322	323.5
ケーブル長(m)	3000	2400	2400	2400	2400
ケーブル深(m)	12	15	15	15	15
<b>記録系</b>					
探鉱機	NESSIE- II (GECO)	TI DFS/V	TI DFS/IV	TI DFS/IV	TI DFS/IV
サンプリング (msec)	4	4	4	4	4
記録長(sec)	8	5	5 ~ 6	5	5
ローカットフイ ルター	3Hz (18db/oct)	8Hz (18db/oct)	8Hz (18db/oct)	8Hz (18db/oct)	8Hz (18db/oct)
ハイカットフイ ルター	62Hz (72db/oct)	64Hz (70db/oct)	62Hz (72db/oct)	62Hz (72db/oct)	62Hz (72db/oct)
<b>測位</b>					
装置	TEKEDYNE TDL-601	TEKEDYNE TDL-601	SHORAN System(Type-IV)	HI-FIX 電波測量 器	TEKEDYNE TDL-601
主	SYLEDIS system	SYLEDIS system	SHORAN system	HI-FIX chain	LORAN-C
副	INTERNAV	LORAN-C+SATE LLITE system	SATELLITE system	SATELLITE system	SATELLITE system

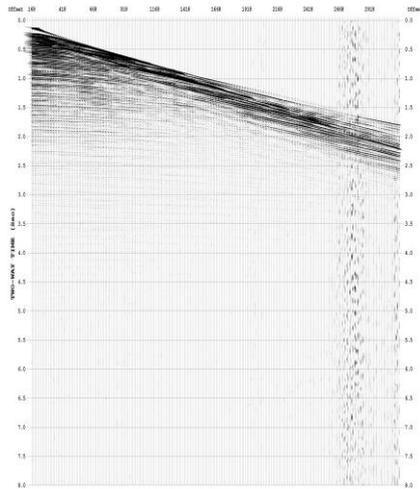


図2 発震記録例  
「山陰～北九州沖」調査 1989

#### b. データ解析

本解析では、海域断層のジオメトリー把握と可視化の観点から、解釈上の必要に応じて、複合型多重反射波抑制処理、重合前時間マイグレーション、**Multi-dip**型 **Common Reflection Surface(CRS)**解析を実施した。古い年代の解析対象データに関しては、一部で発震記録のデータ欠損が確認されている。各測線でデータ欠損が25%を越えている場合は、対象測線をデータ再解析から除外し、重合後記録のデジタルデータが残存する場合はその重合後記録を、残存しない場合はベクトル化処理で作成された重合後記録のデジタルデータを用いて、重合後の信号強調処理、重合後時間マイグレーション及び深度変換を実施した。データ欠損率が25%以下であっても、測線全体に欠損箇所が散在し、データ解析に大きな支障となる場合には同様の対応を取った。主な処理項目について以下にまとめる。

まず複合型ノイズ抑制処理である。対象記録のノイズ特性を考慮して、各種手法を複合的に組み合わせたノイズ抑制処理を検討し、適用した。「山陰～北九州沖(1989)」では一部で低周波数の強振幅ノイズが見られたため、強振幅成分の抑制を目的として**F-X**エディットを適用した。全調査の発震記録上には僅かではあるがランダムノイズが確認されたため、ランダムノイズ抑制効果のある**F-X**予測フィルターを発震記録に適用し、空間的にコヒーレントな信号を抽出・強調した。対象記録では、ケーブルノイズや船舶ノイズといった海域特有のコヒーレントノイズは存在しなかったため、急傾斜構造の反射波の損傷を避けるためにも、速度フィルターに代表されるコヒーレントノイズ抑制処理は適用しなかった。

次に複合型多重反射波抑制処理である。対象海域では海底深度が変化することから、長周期多重反射波、短周期多重反射波及び回折多重反射波などが重複的に発生している可能性があるため、各種手法を複合的に組み合わせた多重反射波抑制処理を検討し、適用した。短周期多重反射波の抑制には、標準解析で適用される**Radial**トレースデコンボリューション法を用いた。長周期多重反射波の抑制には、**Surface-Related Multiple Elimination (SRME)**法を用いた。**SRME**法は、複雑な海底地形でも多重反射波の抑制効果が高く、反射波の損傷

も小さく抑えられるため、全測線に適用することとした。ただし、SRME法は波動方程式に準拠するため、二次元記録では三次元構造に起因する多重反射波の予測に誤差が生じ、このような多重反射波の抑制効果は低下する。また、ファーオフセットでの多重反射波や、回折多重反射波についてはその抑制効果は限定的であるため、このような多重反射波が存在する場合には、ラドン変換法(PRT法)を検証し、効果が見られた場合は適用することとした。割合は全体の34%程度である。なお、本解析ではSRME法を全測線に適用した。

3つ目は重合前時間マイグレーションである。過褶曲、複背斜あるいは衝上断層群といった短波長の構造不均質が顕著であり、海域活断層の解釈に重要な領域のデータに関しては、重合前時間マイグレーションを適用した(割合は全体の12%程度)。

4つ目はMulti-dip型CRS解析である。海域活断層の深部延長に関して、そのジオメトリー把握を目的とした微弱な深部反射波のイメージングが必要と判断されたデータについて、CRS法を適用した。CRS法では、近軸波線理論('Paraxial Ray Theory')に基づき、ゼロオフセット反射波走時に関わるCMP間走時差の挙動を考慮したムーブアウト補正、つまり反射面沿いの振幅応答の集約を通じて飛躍的な重合数が確保される。CRS法では反射面として連続的な曲面を仮定するため、細かな断層形態を把握することは困難と考えられるが、不明瞭な深部構造の大局的な構造や、大きな断層などの把握に関しては有効である。本解析では、複数の傾斜イベントに関して対応可能なMulti Dip Reflection Surface (MDRS)法のアルゴリズムを採用し、深部反射波イメージングの高精度化を図った(割合は全体の5%程度)。

最後は、ベクトル化処理である。データ欠損が多くデータ再解析の除外となった測線で、重合時間記録がデジタルデータとして残存していない場合は、紙面で残存するCMP重合断面図をスキャナーで読み取りSEG-Yファイルを生成するベクトル化処理を実施した。ベクトル化処理の適用測線では、原則としてデータ再解析は行われませんが、ある程度の区間で十分な品質の重合記録が作成可能な場合は、データ再解析も併せて実施した。ベクトル化処理の適用測線は全体の19%程度であった。

c. データ再処理内容

データ解析作業について、データ処理フローを図 3 に示す。解析作業は、標準解析、重合前時間マイグレーション解析 (PSTM 解析)、Multi-dip 型 CRS 解析 (MDRS 解析)、ベクトル化処理の 4 つに大別できる。以下に各段階での処理内容を解析作業ごとに示す。

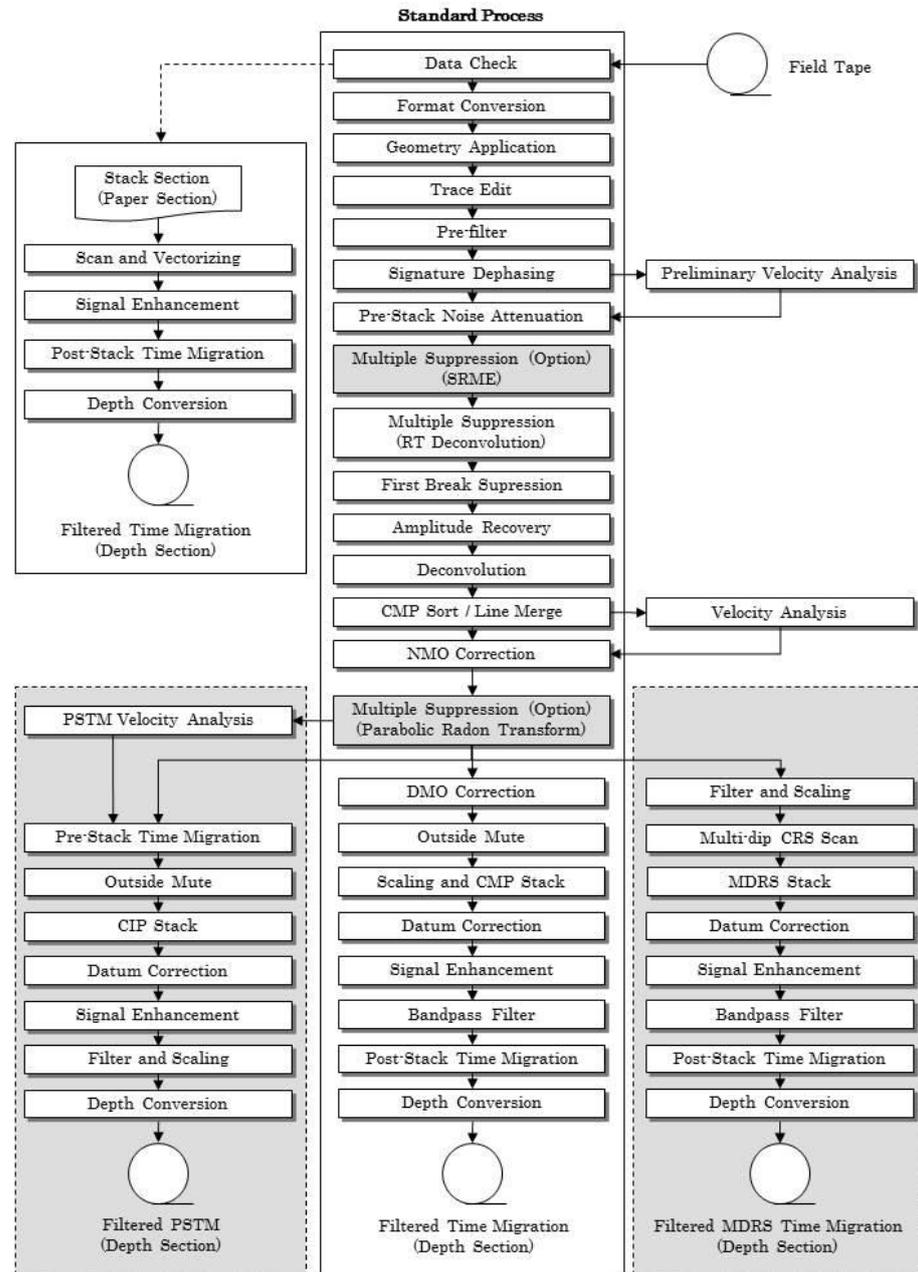


図 3 データ処理フロー  
PSTM 法と MDRS 法は一部に適用した

1. 標準解析

以下、標準解析について、重合後時間マイグレーションの深度断面図を作成するまでの標準的な解析の内容を記す。

#### 1) データ確認 (Data Check)

磁気テープ等の記録媒体に保存されている既存データを精査し、データ欠損の状況を集約した。データ欠損率が小さく、十分な品質の重合記録の作成が見込める記録について再解析の対象とした。発震点記録が欠落している記録あるいは発震記録内でトレースが欠落している記録に関しては、発震記録とデータシート(オブザーバズログ)の対応関係を確認し、過誤が認められた場合には正しい対応を再現した。

#### 2) フォーマット変換 (Format Conversion)

磁気テープ等の記録媒体に保存されている既存データ(「山陰～北九州沖(1989)」は SEG-D フォーマット、それ以外の調査は SEG-Y フォーマット)から内部フォーマットへの変換を行った。複数の測線に分けて取得されたデータのうち、発震船の航行方向が同じであり、接続域で発震点位置を含めて測線が一致するような単純なケースについては、この段階で測線を接続した。なお、データ確認の際に判明したトレース順の過誤や発震記録ごとの記録開始時間のずれ等は、この段階で補正された。

#### 3) 測線情報の入力 (Geometry Application)

発震点、受振点及びCMPのインデックスと座標、オフセット距離等の測線情報をトレースヘッダーに入力した。なお、ここで設定される座標値は、二次元測線上の相対的な値である。この時点の結果を、データ解析に使用した基本発震記録として SEG-Y ファイルに出力した。

#### 4) トレースエディット (Trace Edit)

全発震記録を確認することで、以降の処理に悪影響を及ぼす不良記録を読み取り、処理対象から除外した。不良記録の例を図4に示す。赤枠で示した時間にデータ欠損が見られるが、探鉱機エラーに起因すると考えられる。

#### 5) プレフィルター (Pre-filter)

発震記録全体で、僅かではあるが低周波数ノイズが確認されたため、波形変換処理への悪影響を取り除くために、帯域通過フィルターを適用した。周波数帯域はデータ取得時と同じに設定したため、低周波数側の遮断周波数は「山陰～北九州沖(1989)」では3Hz、それ以外の調査では8Hzである。

#### 6) 波形変換処理 (Signature Dephasing)

ニアトレース記録の海底反射波形から抽出したウェーブレットを用いて、最小位相変換を適用した。処理対象調査ではエアガン震源波形観測記録は取得されておらず、同一エアガン構成及び発震深度仕様による既存震源波形記録も存在しなかった。また、エアガンの容量及び配置の詳細情報の記載が既存報告書にはなかったため、本解析では、ニアトレース記録において海底反射波形の走時を読み取り、これを同一時間に揃えて重合することでウェーブレットを抽出した。ウェーブレット抽出までの過程を図5-1に示す。抽出した海底面反射波

形に対する波形変換処理例を図 5-2 に、ニアトレース記録に対する海底面反射波形を用いた最小位相変換の適用例を図 5-3 に示す。ここで抽出された海底面反射波形には、エアガンとケーブルの双方の位置でのゴースト成分が含まれているため、ここでの波形変換処理を適用することで、両ゴースト成分が取り除かれたことになる。なお、波形変換処理後の極性は、陸域の断面記録との接続を考慮して、海底面反射波が正となるように設定された。図 5-4 は、波形変換処理適用記録にホワイトニング型デコンボリューションを適用した例であるが、海底面反射波が正のピークとして確認できる。

#### 7) 予備的な速度解析 (Preliminary Velocity Analysis)

定速度走査法 (constant velocity scan) を用いて 2km 毎に予備的な速度解析を行った。ここで得られた速度は、ノイズ抑制処理における一時的な速度の他、各処理の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いられた。

#### 8) 重合前ノイズ抑制処理 (Pre-Stack Noise Attenuation)

重合前記録の品質向上を目的としてノイズ抑制処理を適用した。ランダムノイズを抑制し、相対的にシグナルノイズ比(S/N)を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。「山陰～北九州(1989)」では低周波数の強振幅ノイズが一部で確認されたため、F-X 予測フィルターに先立ち、F-X エディットを適用した。ノイズ抑制処理は以下の手順で実施された。

- ① F-X エディット (発震記録) : 「山陰～北九州(1989)」のみ適用
- ② F-X 予測フィルター (発震記録)

F-X エディットの発震記録での適用例を図 6-1 に、F-X 予測フィルターの発震記録での適用例を図 6-2 に示す。重合前ノイズ抑制処理適用前後での重合記録の比較例を図 6-3 と図 6-4 に示す。大きな品質改善は得られてはいないが、僅かではあるが S/N の改善は見られるため、上記の重合前ノイズ抑制処理を全測線に適用することとした。

#### 9) SRME (Surface Related Multiple Elimination)

海水面を介する長周期多重反射波を抑制するために、SRME 法(例えば Verschuur et al., 1992)を適用した。SRME 法は、波動方程式に準拠する多重反射波抑制手法であり、波線経路に海面での反射を含む Surface-related 型の多重反射波を予測し抑制する。共通発震点記録の受振点と共通受振点記録の発震点の位置が一致するような 2 つのトレースをコンボリューションすることにより、一次反射波から多重反射波を合成する。合成された多重反射波は、最小二乗フィルターを用いた Adaptive Subtraction によって波形が調整され、取得された記録から減算される。図 7-1～7-3 に、SRME 法による多重反射波抑制処理の適用結果の例を示す。図 7-3 は、SRME 法で予測された多重反射波を重合記録上で表しており、グレースケール記録が SRME 法適用後の重合記録、赤色が予測された多重反射波成分である。

#### 10) ラディアルトレースデコンボリューション (Radial Trace Deconvolution)

短周期多重反射波を抑制するために、ラディアルトレースデコンボリューション (Radial Trace Deconvolution, RTD; 例えば Henry, 1999) 法を適用した。オフセット-時間領域で表現された発震記録を、震源を原点とする様々な傾き (見掛け速度) を持つ放射状の軌跡に沿った時系列トレースに構成し直すことにより放射速度-時間領域 (Radial Trace 領域:RT 領域) の記録が得られる。一次反射波と多重反射波の走時差、および多重反射波間の走時差は、層厚や区間速度に変動が無ければ、RT 領域においては時間方向に一定となるため、RT 領域で予測型デコンボリューションを適用することで周期性を持つ多重反射波を抑制できる。

図 8-1~図 8-3 に、RTD 法による多重反射波抑制処理の適用結果の例を示す。図 8-3 は、RTD 法で予測された多重反射波を重合記録上で表しており、グレースケール記録が RTD 法適用後の重合記録、緑色が予測された多重反射波成分である。

#### 11) 初動ミュート (First Break Mute)

初動付近では直接波や屈折波が卓越し、これらは幾何発散モデルから極度に逸脱した強振幅を示す。この様な反射波の重合に不都合な波群を予め除去するために初動抑制を実施した。

#### 12) 振幅補償 (Amplitude Recovery)

震源から放出される弾性波は、様々な原因 (三次元的伝播に起因する幾何学的発散効果、多層構造内の透過・反射に起因する伝播損失、非弾性散逸等) により振幅が減衰する。これらの原因による減衰を補償し、データの振幅の一様性を回復するため、振幅補償を適用した。ここでは、球面発散振幅補償適用後に、非弾性効果を補償する目的でゲート長 1000msec の自動振幅補正 (AGC) を適用した。

#### 13) デコンボリューション (Deconvolution)

地層の非弾性や観測系の諸特性により伸張した波形をパルスに戻す目的で、ホワイトニング型のデコンボリューションを適用した。デコンボリューション処理では、次式で示される一次元コンボリューションモデルが前提とされている。

$$F(t) = W(t) * R(t) + N(t)$$

ここに  $F(t)$  は地震波トレース、 $W(t)$  は基本波形、 $R(t)$  はランダム定常な反射係数列、 $N(t)$  はランダムノイズである。このモデルにおいて基本波形を構成する要素としては、以下の項目が挙げられる。

- ・震源波形 ガン波形、ゴースト効果
- ・地層効果 多重反射波、非弾性による吸収
- ・記録系 受振器特性、ゴースト効果、探鉱機の応答特性

デコンボリューションでは、こうした要素の集積としての基本波形を地震トレースから推定・除去することで、記録の分解能向上を図ることが可能である。

#### 14) 共通反射点編集 (CMP Sort)

共通発震点記録を、反射点（発震点と受振点の中点）を共通とするトレースの集合（CMP ギャザー）に編集した。

#### 15) 測線接続 (Line Merge)

複数の測線に分けて取得されたデータについて、(2)の段階では接続が困難だった測線の接続を行った。測線接続の手法としては、共通反射点編集後のデータに対して、測線が交差あるいは近接する付近で両測線の CMP 番号の対応を取り、最近接 CMP で両測線を接続する方法を用いた。後述するマイグレーション処理や解釈作業を考慮すると、近接測線は接続されていることが望ましいため、測線が完全に交差していなくても、測線間の距離が 100m 程度ならば、測線接続を行った。

#### 16) 速度解析 (Velocity Analysis)

定速度走査法 (constant velocity scan) を用いて 1km 毎に速度解析を行った。

#### 17) NMO 補正 (NMO Correction)

速度解析によって求められた重合速度関数を時間－空間方向に内外挿し、その速度テーブルに従って NMO 補正を適用した。NMO 補正は各トレースのオフセット距離を 0m にする補正処理であり、この処理によって CMP アンサンブル内の反射波走時は同一時間となる。NMO 補正に伴い波形の伸長が生じるため、大きく伸長された波形を除去する目的でストレッチミュートを施した。ストレッチミュートの値が N の場合、元の波形に対して N 倍以上に伸長された波形を除去することを意味する。ストレッチミュートで抑制できない過伸張波形については、後述のアウトサイドミュートで取り除いた。

#### 18) 放物線ラドン変換法 (Parabolic Radon Transform)

SRME 法や RTD 法で抑制できなかった多重反射波を抑制するために、放物線ラドン変換 (Parabolic Radon Transform、以下 PRT と略す) 法を適用した。PRT 法では、NMO 補正後の CMP ごとにソートされた CMP アンサンブルを入力として、水平に並ぶ一次反射波と、近似的に放物線軌跡で表現できる多重反射波を分離し、多重反射波を抽出・除去する。各調査で適用テストを実施したところ、「山陰～北九州沖(1989)」以外では抑制効果が得られなかったため、「山陰～北九州沖(1989)」で効果の見られた測線に限り、PRT 法を適用することとした。

図 9-1～図 9-2 に、PRT 法による多重反射波抑制処理適用前後の、NMO 補正後 CMP 記録および重合記録の比較結果を示す。図 9-3 は、PRT 法で予測された多重反射波を重合記録上で表しており、グレースケール記録が PRT 法適用後の重合記録を、青色が予測された多重反射波成分を表している。

#### 19) Dip Move Out (DMO)補正 (DMO Correction)

測線方向に地層傾斜が存在する場合、ゼロオフセットの反射点は傾斜上方に

移動するため、CMP ギャザー内の反射点はばらつき、重合効果は低下する。DMO 補正の適用により、この反射点のばらつきを補正し、反射点を収束させることで、重合効果の向上を図った。本解析では仕様により DMO 補正は受振点間隔 25m 以下の海域マルチチャンネルストリーマ記録を対象としているため、DMO 補正の処理対象調査は「山陰～北九州沖(1989)」に限られる。対象調査は、海域のマルチチャンネルストリーマ記録であり、オフセット分布は均質であるため、共通オフセット領域 DMO 補正を採用した。DMO 補正に最適な速度を得るため、1km 間隔で DMO 速度解析を実施した。DMO 速度解析は、重合速度による NMO 補正済み記録に対して以下の手順で行った。

- ① DMO 補正を適用
- ② 重合速度で逆 NMO 補正を適用
- ③ 「(16) 速度解析」と同様の手法で速度解析を実施

重合速度で逆 NMO 補正した記録に対して、DMO 速度解析で得られた速度を用いて NMO 補正を適用した後に、DMO 補正を適用した。DMO 補正適用前後の重合記録の比較を図 10 に示す。

#### 20) アウトサイドミュート (Outside Mute)

NMO 補正に伴う波形の伸長及びファーオフセット側に残留する屈折波初動部分を抑制する目的で、ミュートを設計し適用した。

#### 21) 振幅調整 (Trace Scaling)

時間方向の振幅バランスを整えるために、ゲート長 600msec の AGC を適用した。

#### 22) CMP 重合 (CMP Stack)

NMO 補正適用後の共通反射点アンサンブルに対して、水平重合処理を実施した。

#### 23) 基準面補正 (Datum Correction)

震源の深度、受振器ケーブルの深度および海水中の音速速度 (1500m/sec) を参照して、基準面を平均海水面とするための補正を行った。

#### 24) 信号強調 (Signal Enhancement)

重合後記録の反射波の連続性を改善するために、ランダムノイズを抑制し、相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。

#### 25) 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

反射波の周波数帯域外にあるノイズを抑制するために、周波数成分解析に基づき、タイム・バリエーション型の帯域通過フィルターを適用した。周波数成分解析結果と帯域通過フィルター適用前後の重合記録の比較を図 11 に示す。この時点の記録を、重合時間断面図 (図 12) として SEG-Y ファイルに出力した。

#### 26) 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

重合断面図では、反射波は各 CMP 位置からの垂直往復走時として表現されている。従って傾斜した反射面に関して、重合断面図上の傾斜は真の傾斜より緩やかに表現されることとなる。この誤差を補正し各 CMP 直下の構造形態を得る処理がマイグレーション処理である。マイグレーション処理の手法としては、時間-空間領域での差分時間マイグレーションを採用した。マイグレーション速度としては、DMO 速度あるいは重合速度を空間方向に平滑化した速度関数をスケーリングして用いた。この時点の記録を、重合後時間マイグレーション時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。以上の解析手順により作成された重合後時間マイグレーション断面図例を図 13 に示す。

#### 27) 深度変換 (Depth Conversion)

深度変換速度を用いて、Vertical Stretch 法による深度変換を実施した。この時点の記録を、重合後時間マイグレーション深度断面図として SEG-Y ファイルに出力した。重合後時間マイグレーション深度断面図を図 14 に示す。

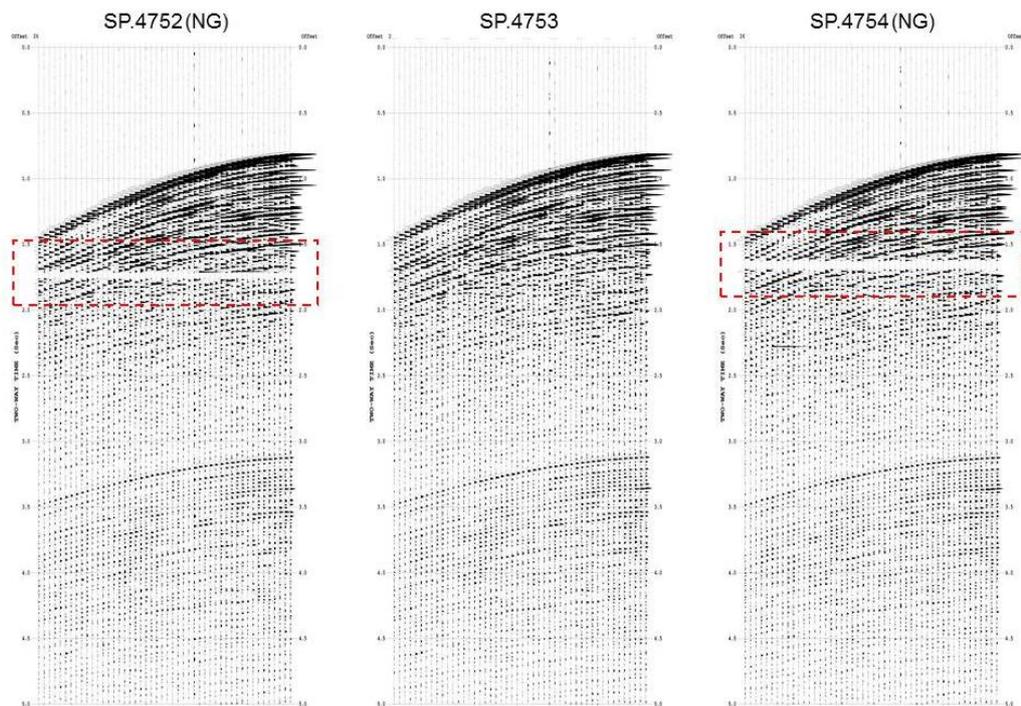


図 4 不良記録の例  
「山陰沖」調査 1981  
赤い点線で囲まれた部分が抜けている箇所

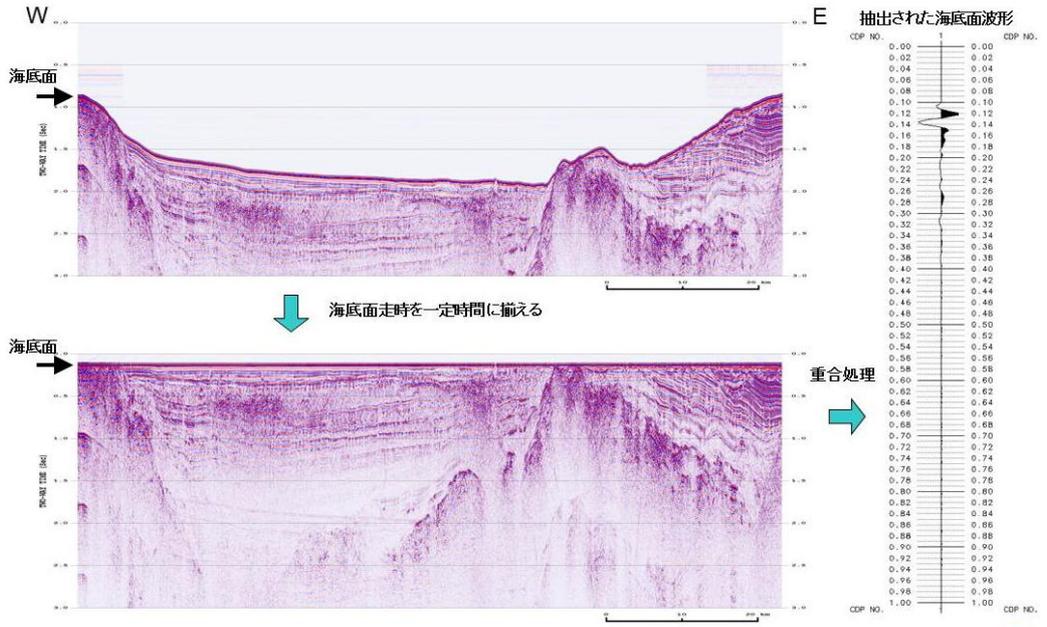


図 5-1 海底面波形から抽出したウェーブレットの例  
「北陸～隠岐沖」調査 1981

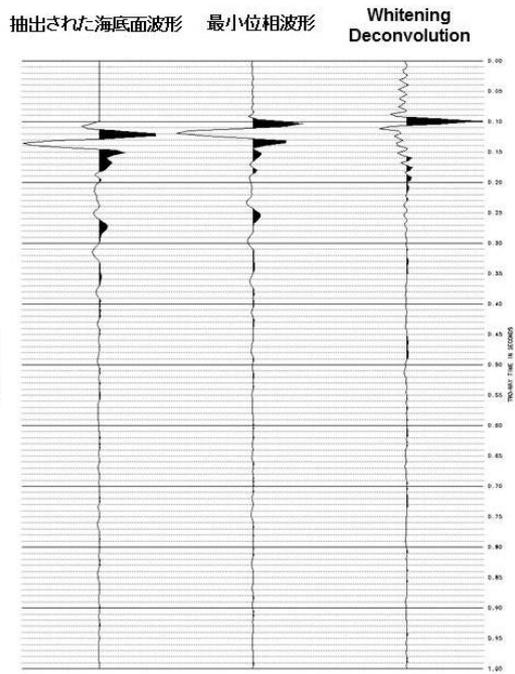


図 5-2 海底面波形から抽出したウェーブレットの波形処理例  
「北陸～隠岐沖」調査 1981

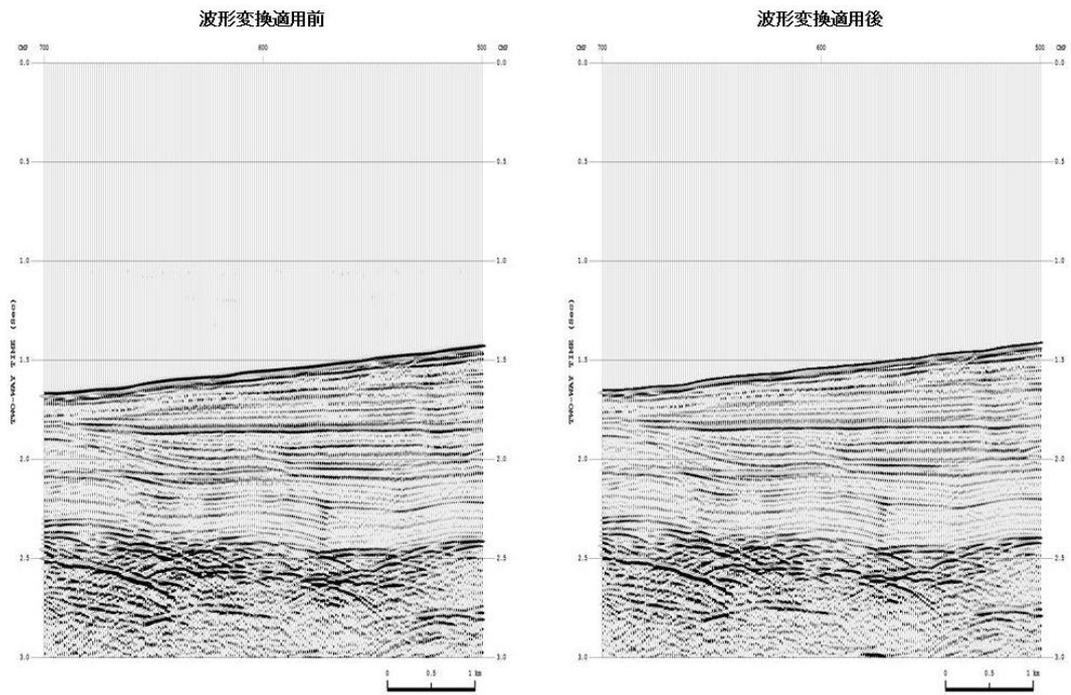


図 5-3 波形変換処理適用前後のニアトレース記録の比較例  
「北陸～隠岐沖」調査 1981

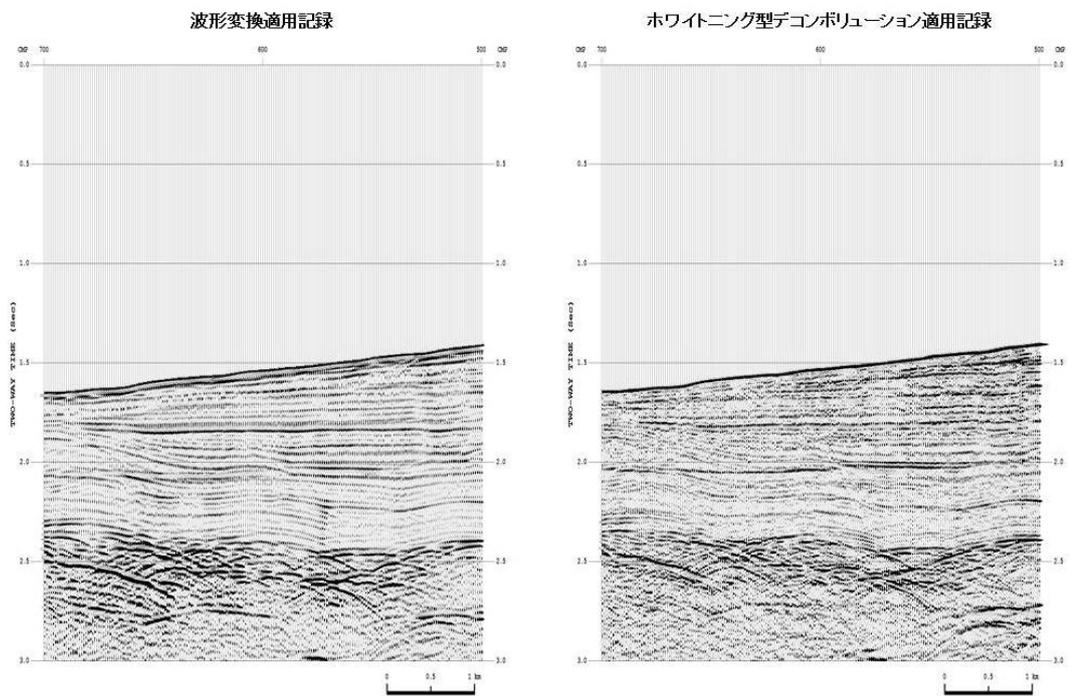


図 5-4 波形変換処理適用記録へのデコンボリューション適用例  
「北陸～隠岐沖」調査 1981

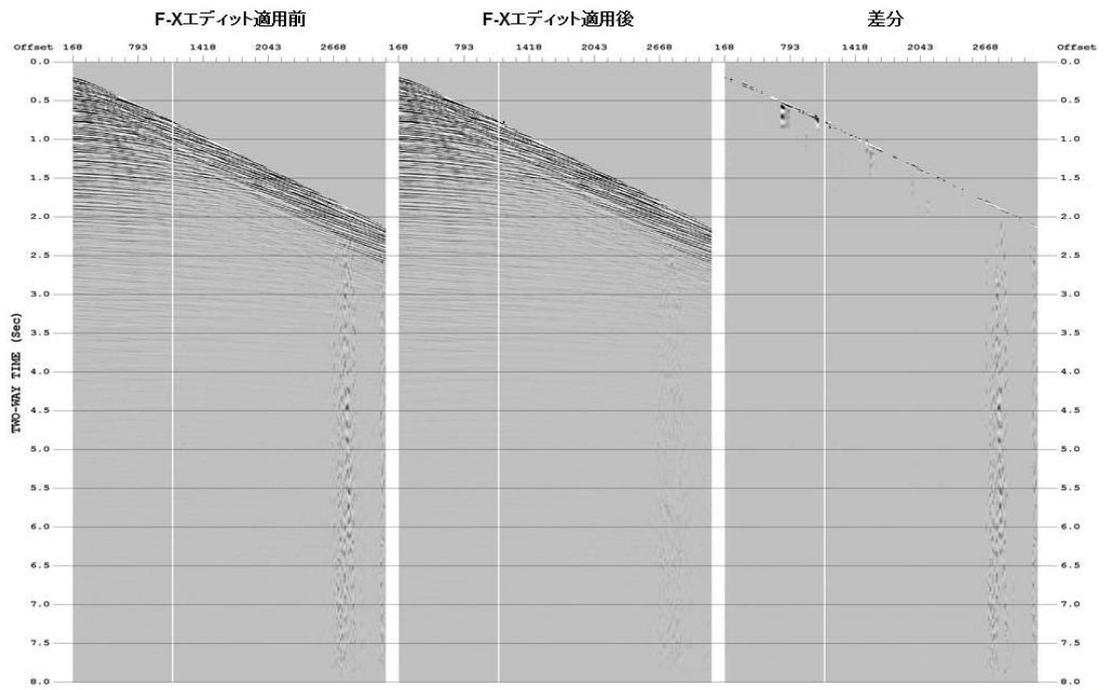


図 6-1 F-X エディット適用例 発震記録  
「山陰～北九州沖」調査 1989

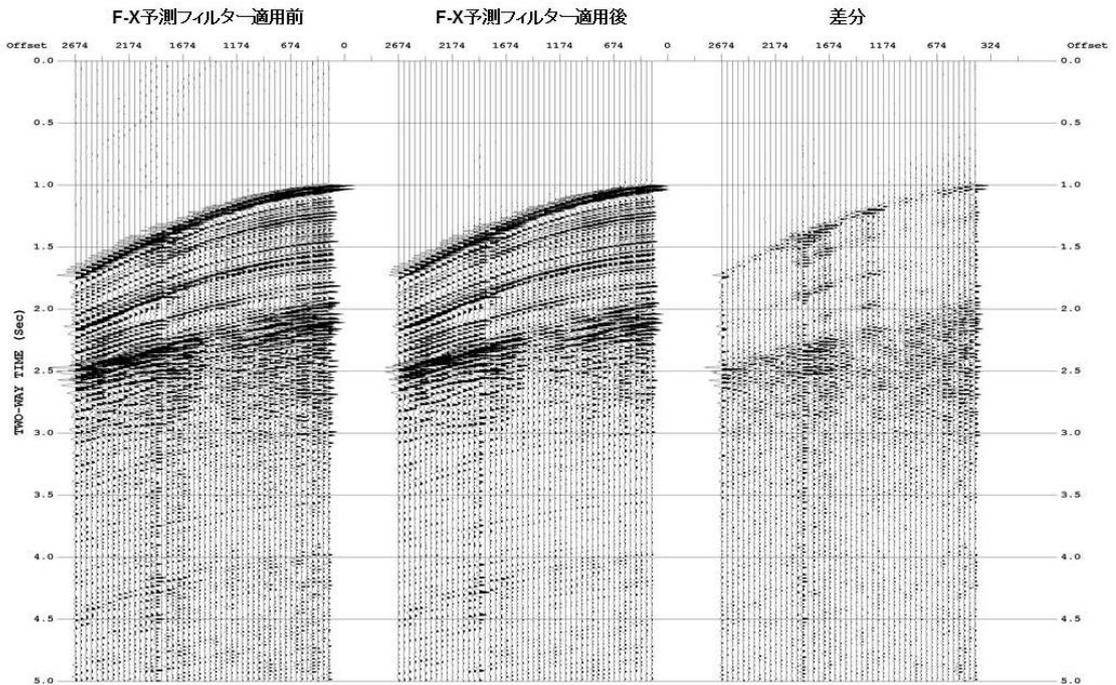


図 6-2 F-X 予測フィルター適用例 発震記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

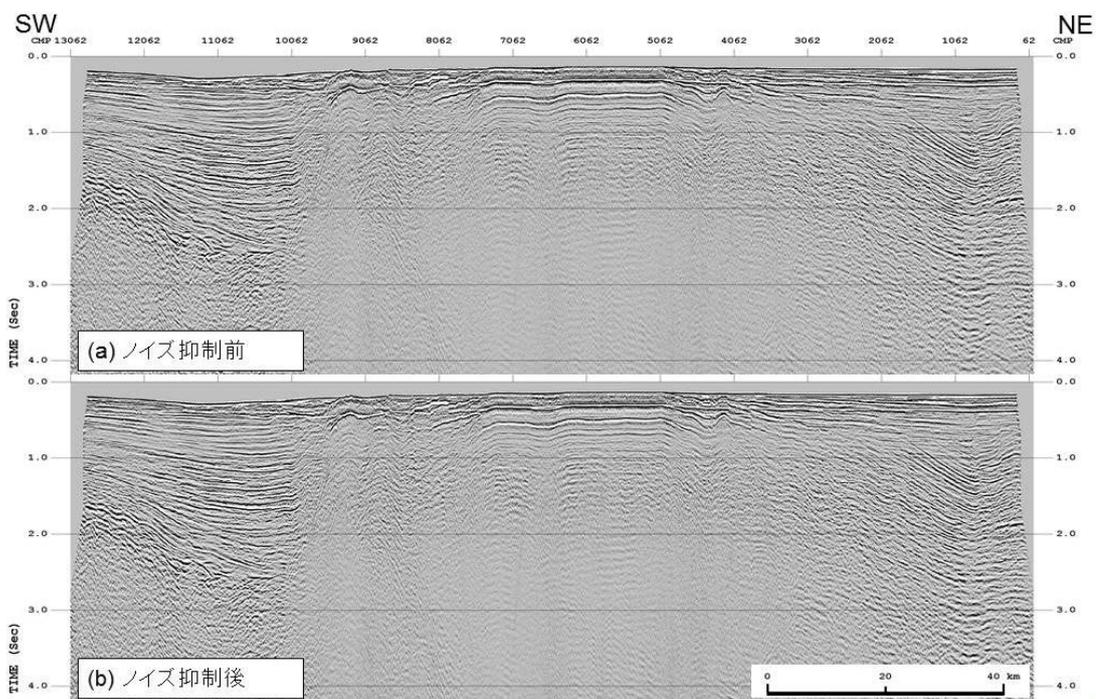


図 6-3 重合前ノイズ抑制処理適用前後の比較例 重合記録  
「山陰～北九州沖」調査 1989

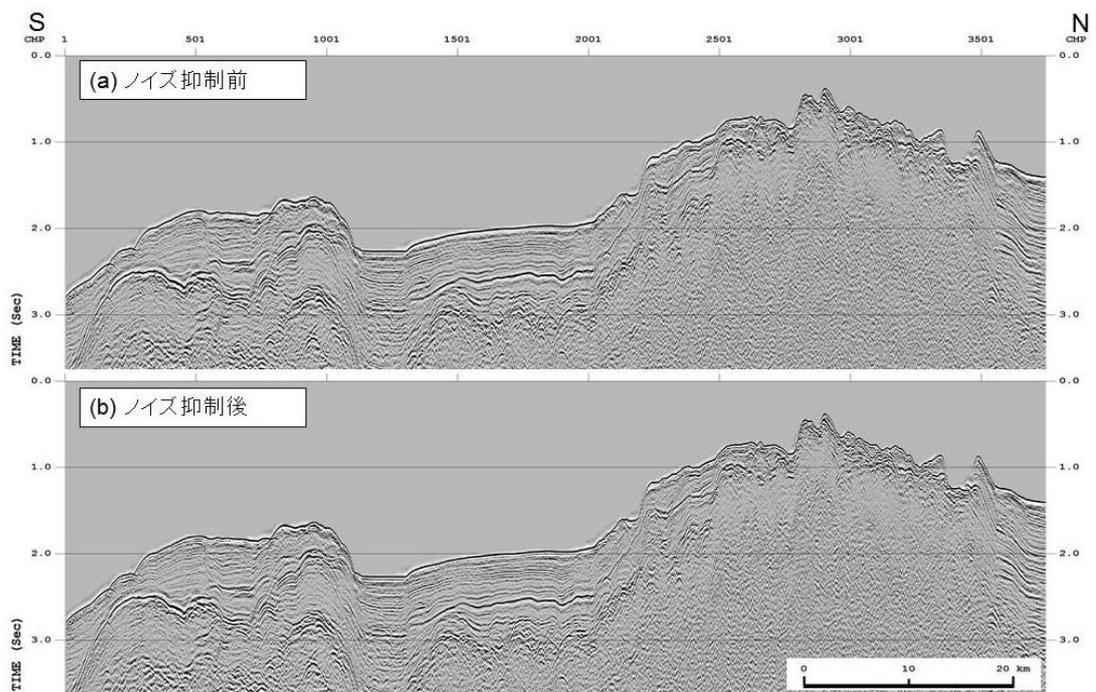


図 6-4 重合前ノイズ抑制処理適用前後の比較例 重合記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

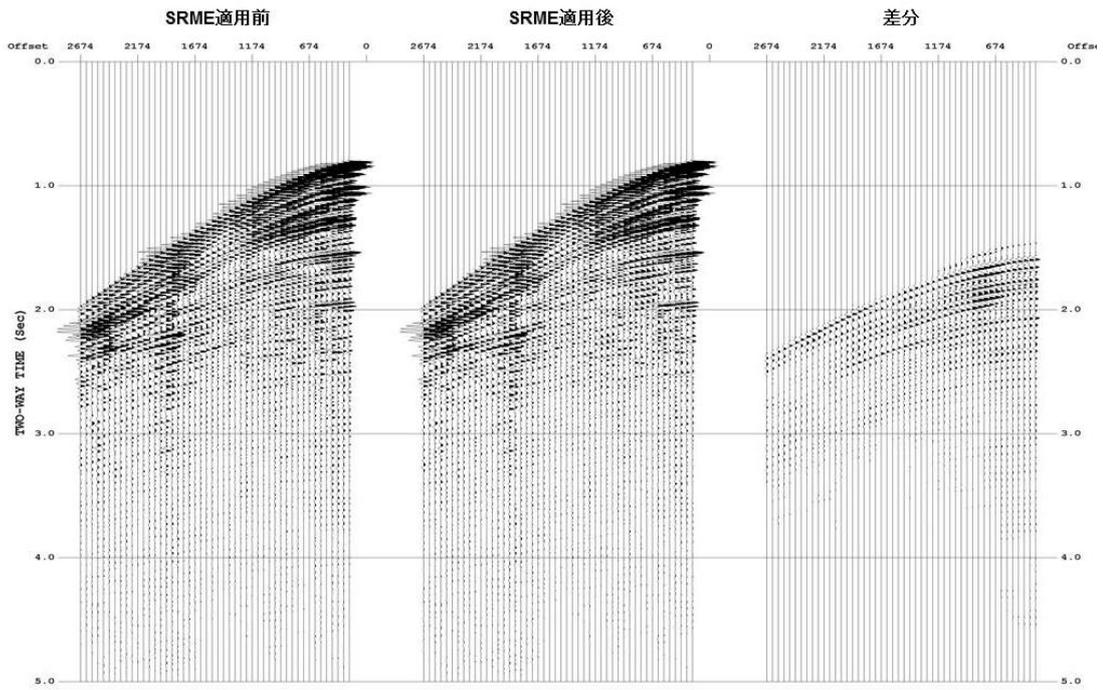


図 7-1 SRME 法適用前後の比較 発震記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

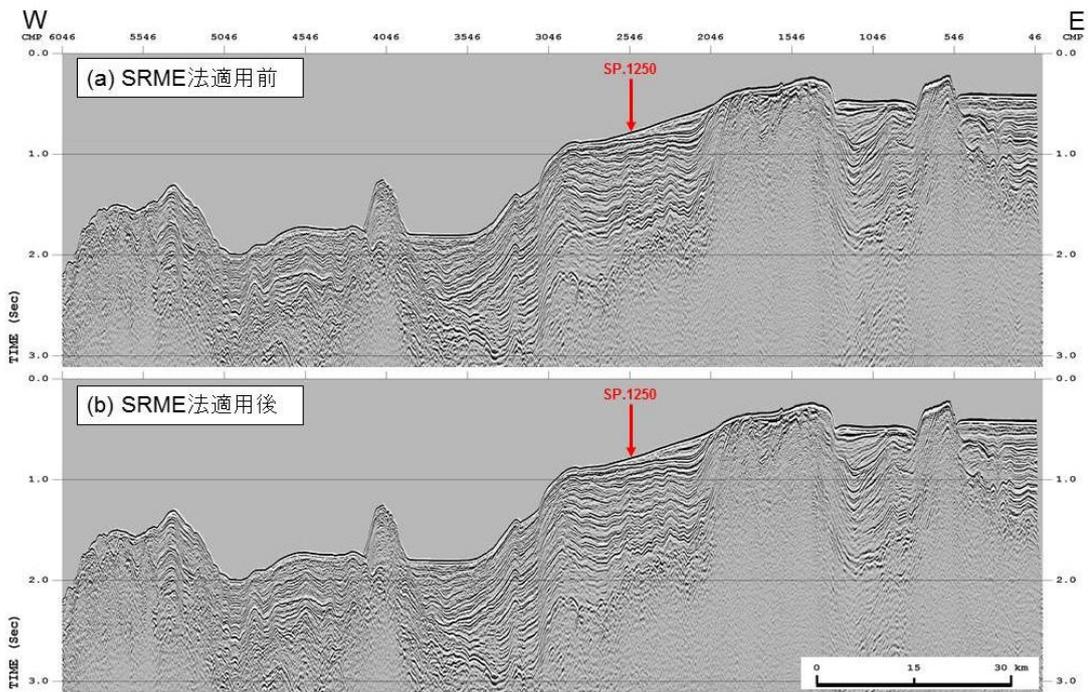


図 7-2 SRME 法適用前後の比較 重合記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

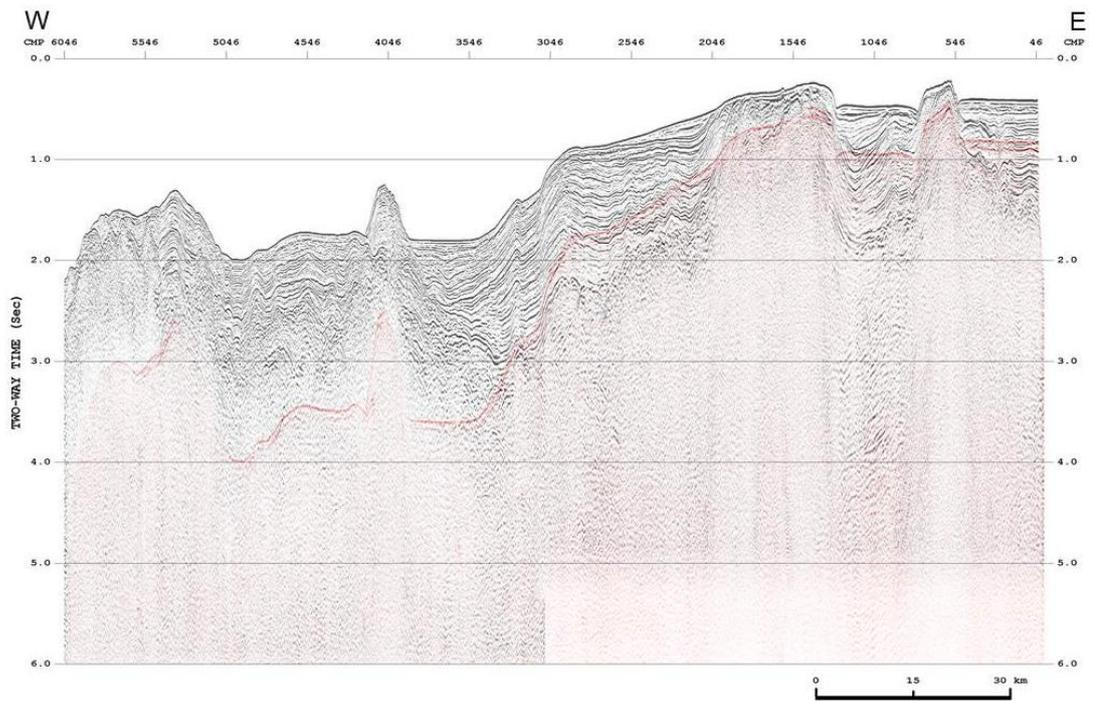


図 7-3 SRME 法で予測された多重反射波の重合記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976  
赤い部分が予測された多重反射波部分を示す

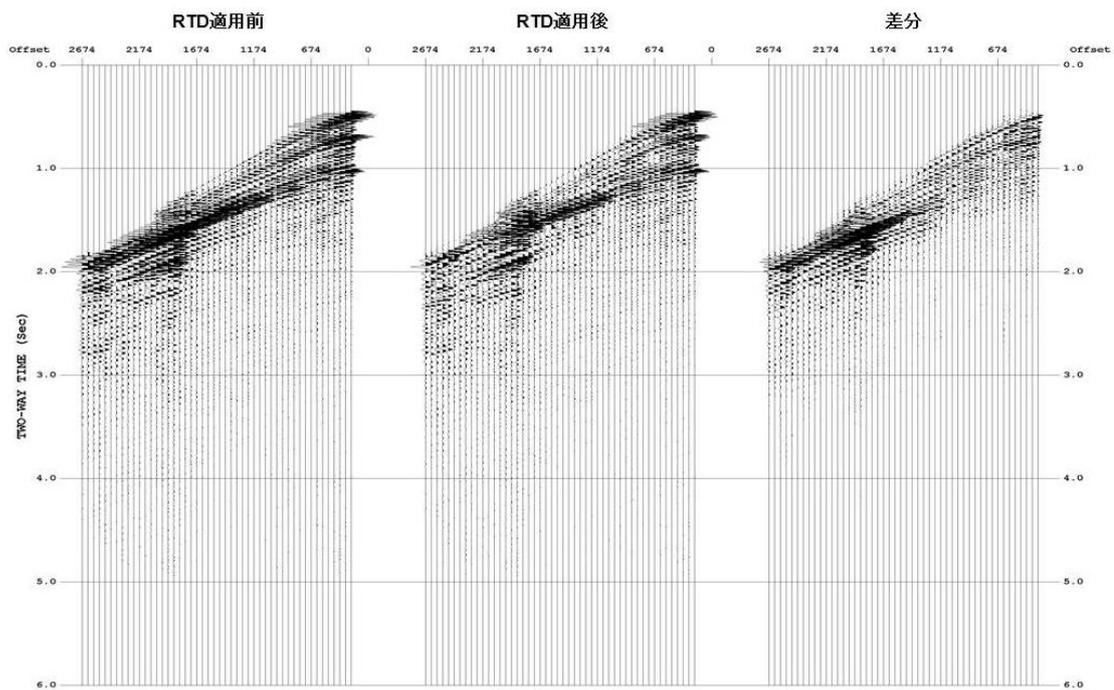


図 8-1 RTD 法適用前後の比較 発震記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

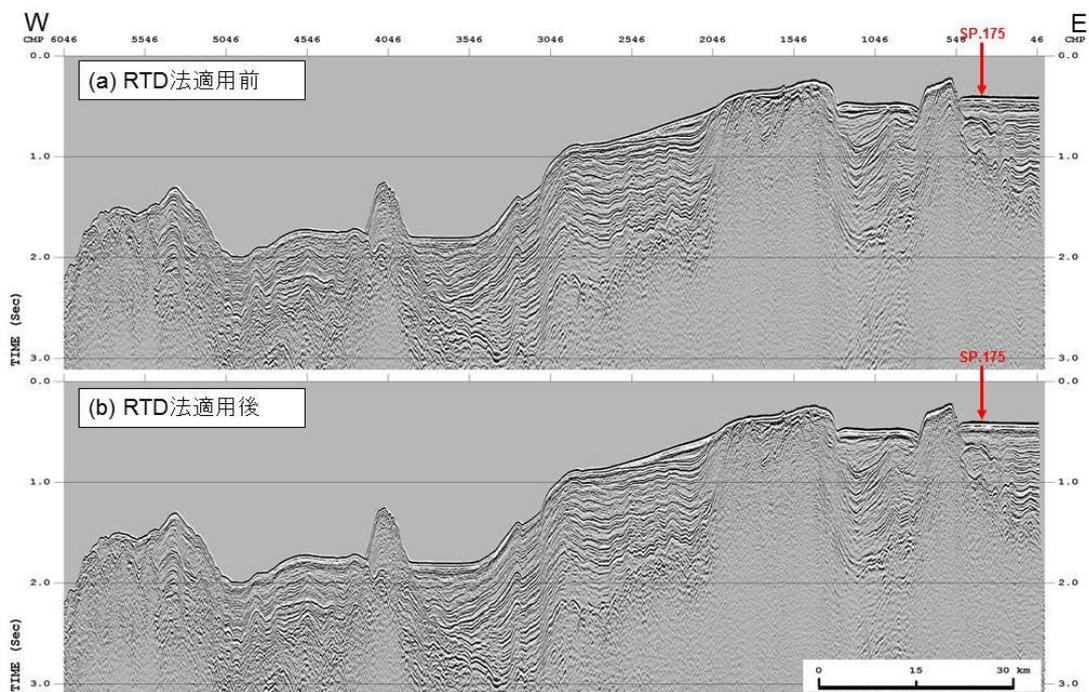


図 8-2 RTD 法適用前後の比較 重合記録  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

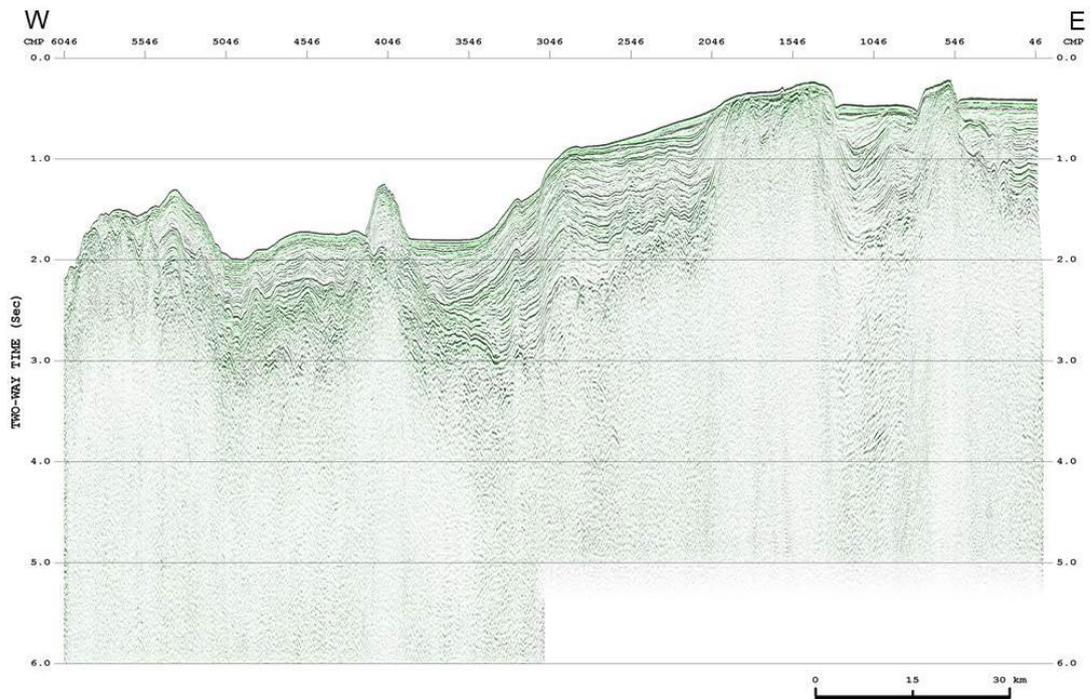


図 8-3 RTD 法で予測された多重反射波の重合記録  
 「北海道西部～新潟沖」調査 1976  
 緑色の部分が予測された多重反射波成分

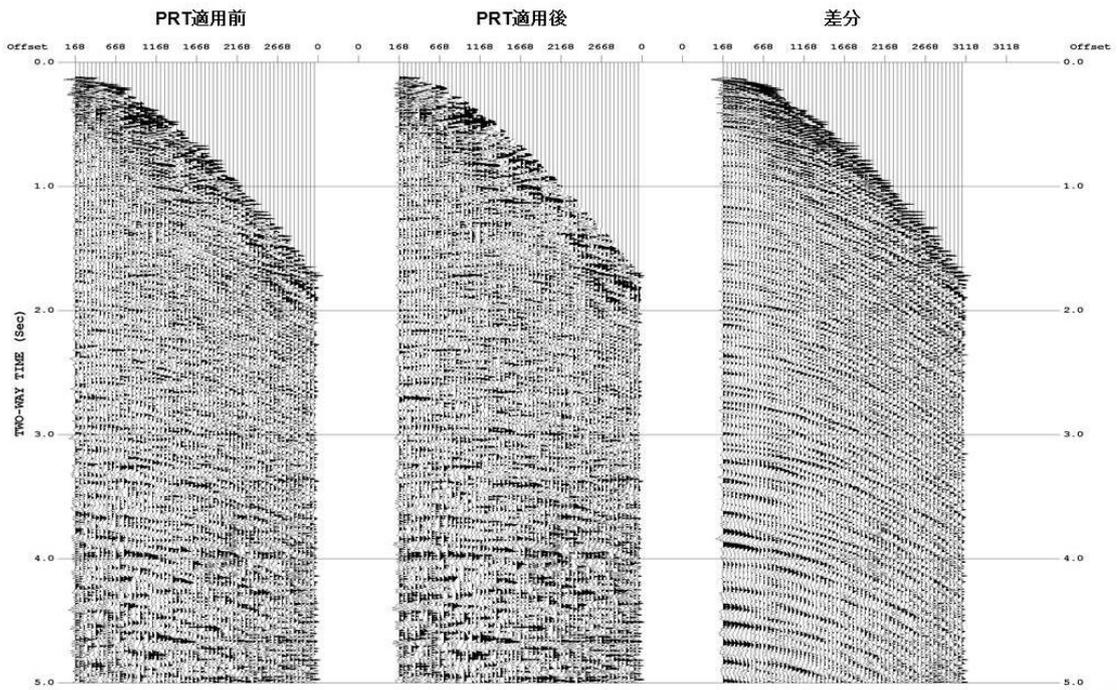


図 9-1 PRT 法適用前後の比較 NMO 補正後 CMP 記録  
「山陰～北九州沖」調査 1989

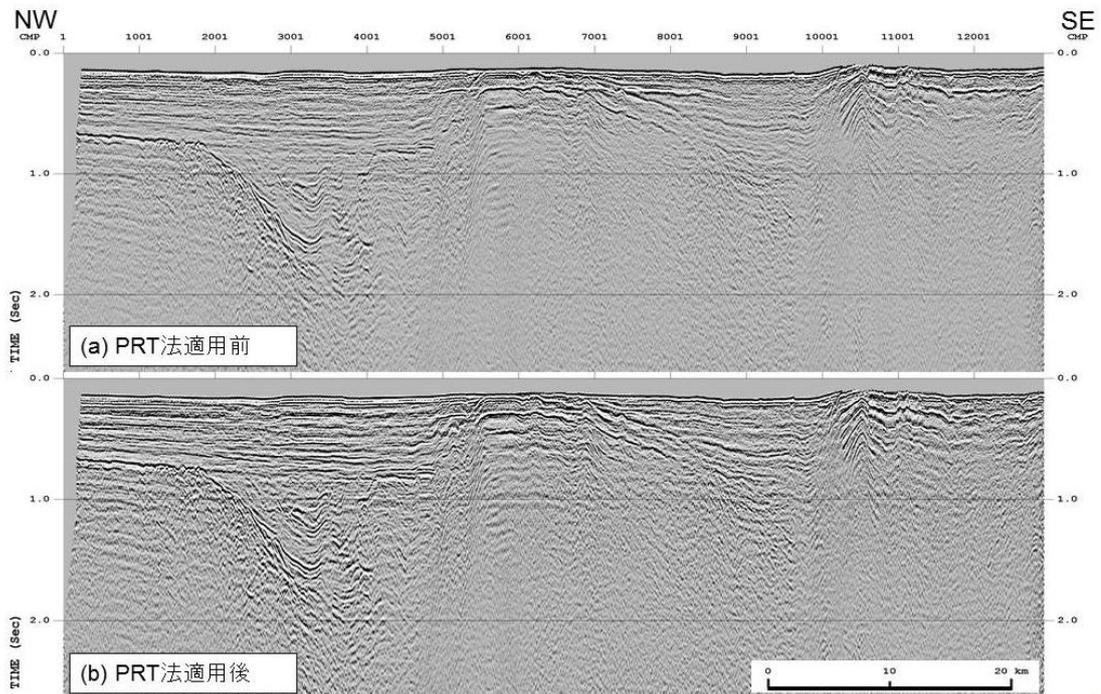


図 9-2 PRT 法適用前後の比較 重合記録  
「山陰～北九州沖」調査 1989

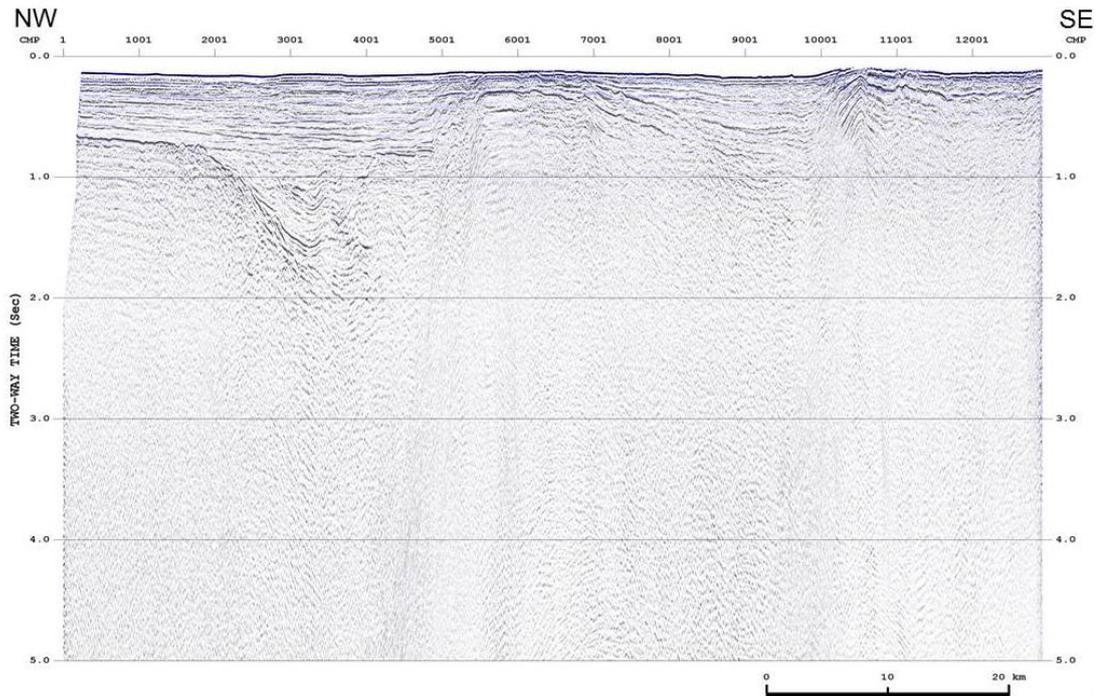


図 9-3 PRT 法で予測された多重反射波の重合記録  
「山陰～北九州沖」調査 1989  
青色の部分が予測された多重反射波成分

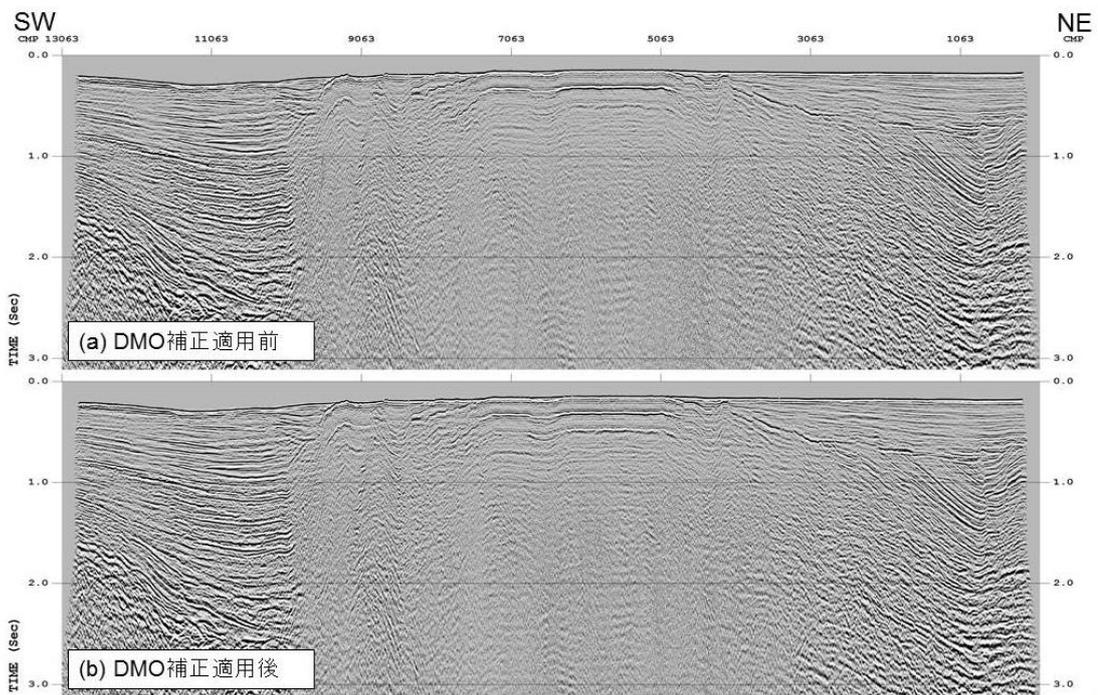


図 10 DMO 補正適用前後の比較 重合記録、  
「山陰～北九州沖」調査 1989

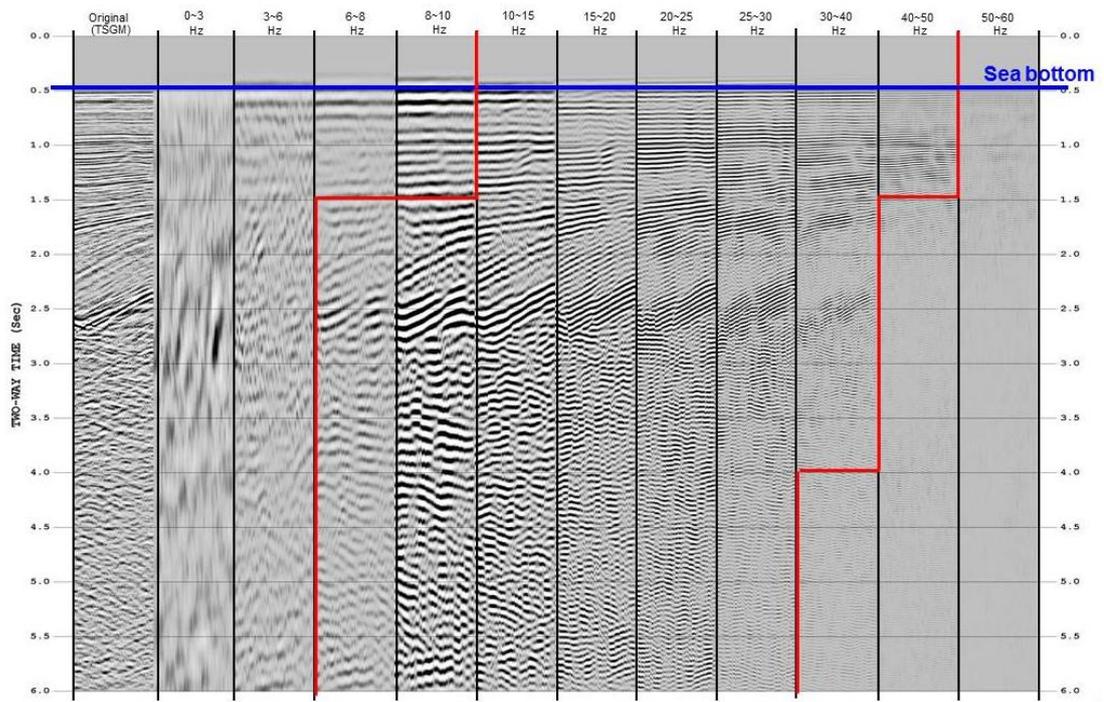


図 11 周波数成分解析の例  
「北陸～山陰」調査 1974

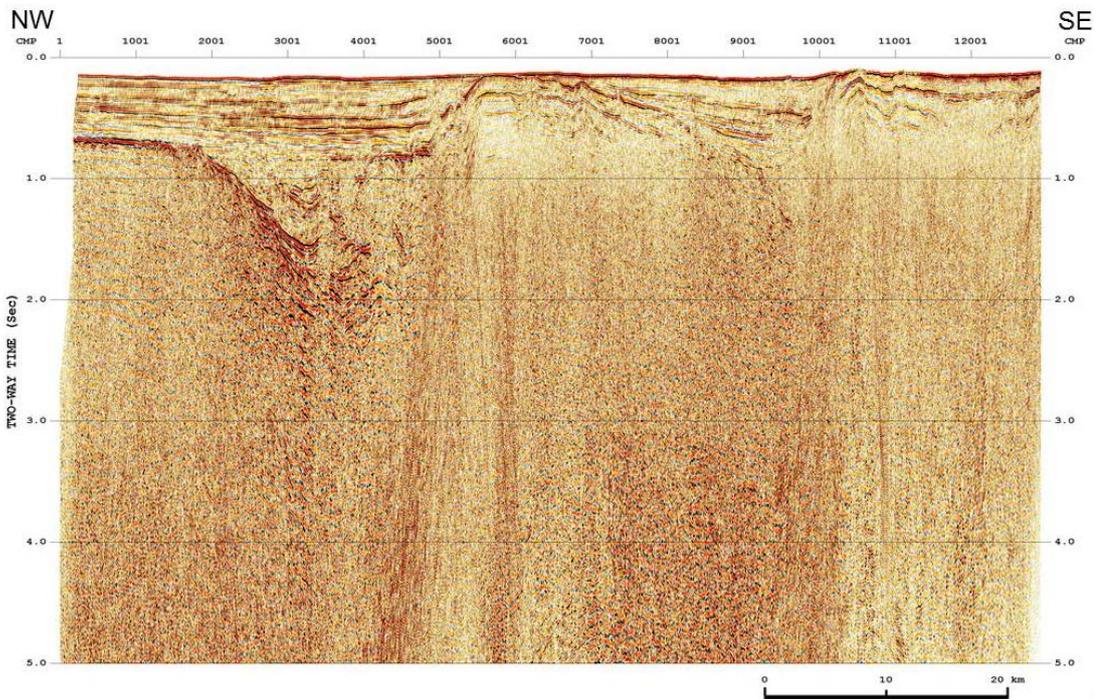


図 12 重合時間断面図  
「山陰～北九州沖」調査 1989

## 2. Pre-Stack Time Migration 解析

Pre-Stack Time Migration (PSTM)解析は標準解析から更に進んだ特殊解析の部類に含まれるが、地殻内の精緻なイメージングが可能になる手法である。ここでは重合前時間マイグレーションの深度断面図の作成までの詳細を記す。1. 標準解析の 1)から 18)の処理に続いて以下の処理を行った。

### 19) PSTM 速度解析 (PSTM Velocity Analysis)

PSTM 処理に最適な速度を得るため、1km 間隔で PSTM 速度解析を実施した。PSTM 速度解析は、逆 NMO 補正を適用した CMP 記録に対して、以下の手順で行った。

- ① 重合速度を近似 PSTM 速度として PSTM 処理を適用
- ② PSTM 適用時の速度で逆 NMO 補正を適用
- ③ 「1. 標準解析」の「16) 速度解析」と同様の手法で速度解析を実施
- ④ 求めた速度を用いて PSTM 処理を適用

速度が収束するまで上記②から④を繰り返し実行した。なお、急傾斜構造では、近似 PSTM 速度（ここでは重合速度）と PSTM 速度の差が大きいため、上記の速度解析手法では PSTM 速度の推定誤差が大きくなる可能性がある。上記速度から得られた PSTM 断面図で十分な品質が得られなかった場合は、速度の精度向上のため Percentage Velocity PSTM Stack を用いた速度解析を追加実施した。Percentage Velocity PSTM Stack とは、基準速度（ここでは上記手順で得られた PSTM 速度）を様々な値でスケールした速度を用いて作成した PSTM 断面図のことである。PSTM 断面図上で直接速度を読み取ることで、急傾斜構造においても最適なイメージを得ることができる。

### 20) 重合前時間マイグレーション (Pre-Stack Time Migration)

重合前データの見かけの反射点位置を真の位置に移動するとともに、回折波を回折点に復元するために 19)で求めた速度を用いてキルヒホッフ・アルゴリズムによる重合前時間マイグレーションを実施した。手法としては共通オフセット領域におけるキルヒホッフ積分マイグレーションを使用した。

### 21) アウトサイドミュート (Outside Mute)

波形の伸長を抑制する目的で、ミュートを設計し適用した。

### 22) Common Imaging Point (CIP) 重合 (CIP Stack)

PSTM 処理適用後の共通イメージ点 (CIP) アンサンブルに対して、水平重合処理を実施した。

23) 基準面補正 (Datum Correction)

基準面を平均海水面とするために、震源の深度、受振器ケーブルの深度および海水中の音速速度 (1500m/sec) を参照して静補正を行った。

24) 信号強調 (Signal Enhancement)

重合後記録の反射波の連続性を改善するために、ランダムノイズを抑制し、相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。

25) 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

反射波の周波数帯域外にあるノイズを抑制するために、タイム・バリエーション型の帯域通過フィルターを適用した。

26) 振幅調整 (Trace Scaling)

空間方向の振幅バランスを調整する目的で、トレースシグマスケールを適用した。この時点の記録を、重合前時間マイグレーション時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

27) 深度変換 (Depth Conversion)

「1. 標準解析」の「27) 深度変換」と同様の手法で、深度変換を実施した。この時点の記録を、重合前時間マイグレーション深度断面図として SEG-Y ファイルに出力した。以上の解析手順により作成された重合前時間マイグレーション時間断面図の例を図 15 に、重合前時間マイグレーション深度断面図の例を図 16 に示す。

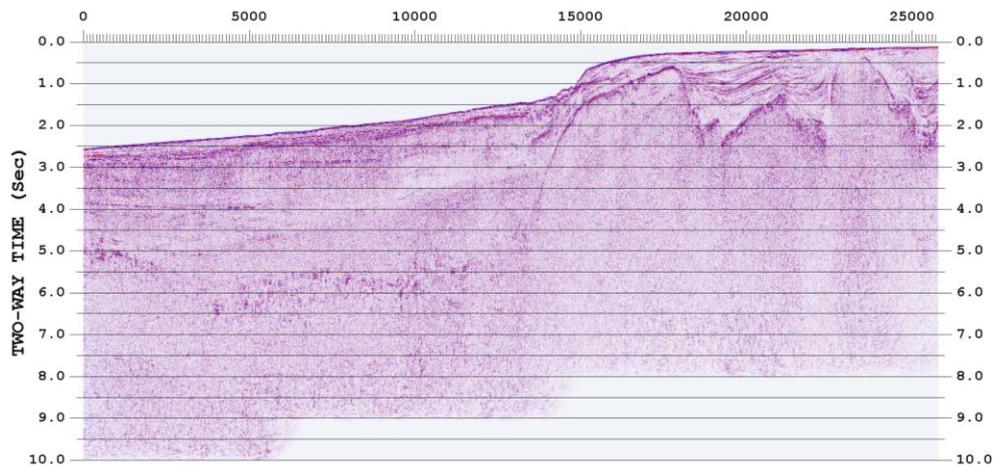


図 13 重合後時間マイグレーション断面図  
「山陰-北九州沖」調査 1989

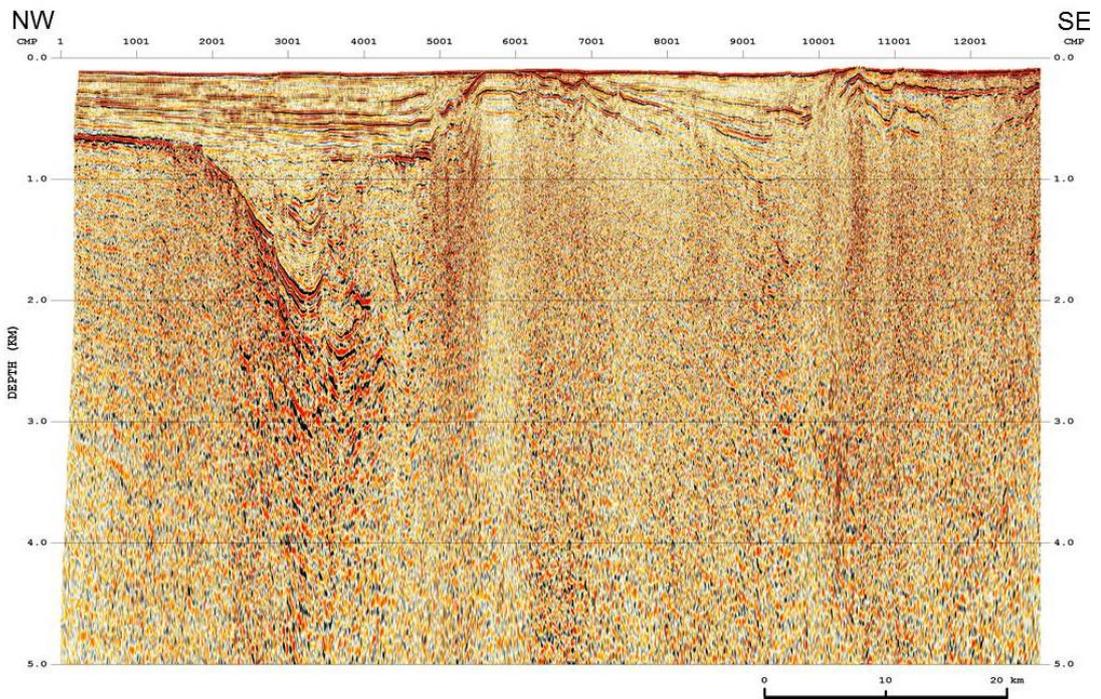


図 14 重合後時間マイグレーション深度断面図  
「山陰-北九州沖」調査 1989

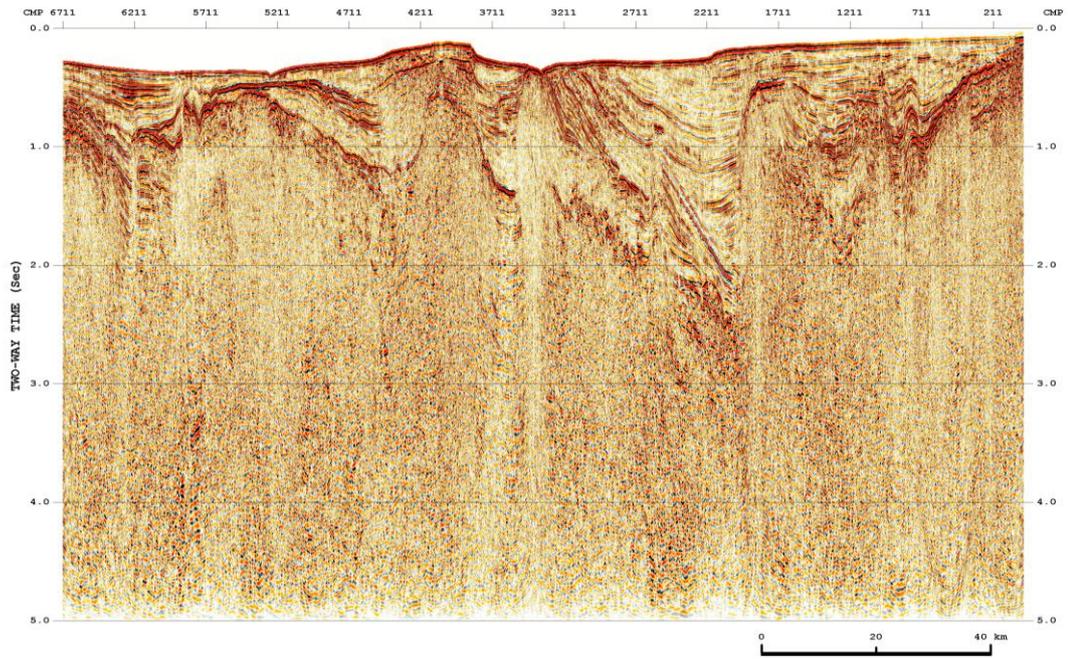


図 15 重合前時間マイグレーション時間断面図  
「北陸」調査 1973

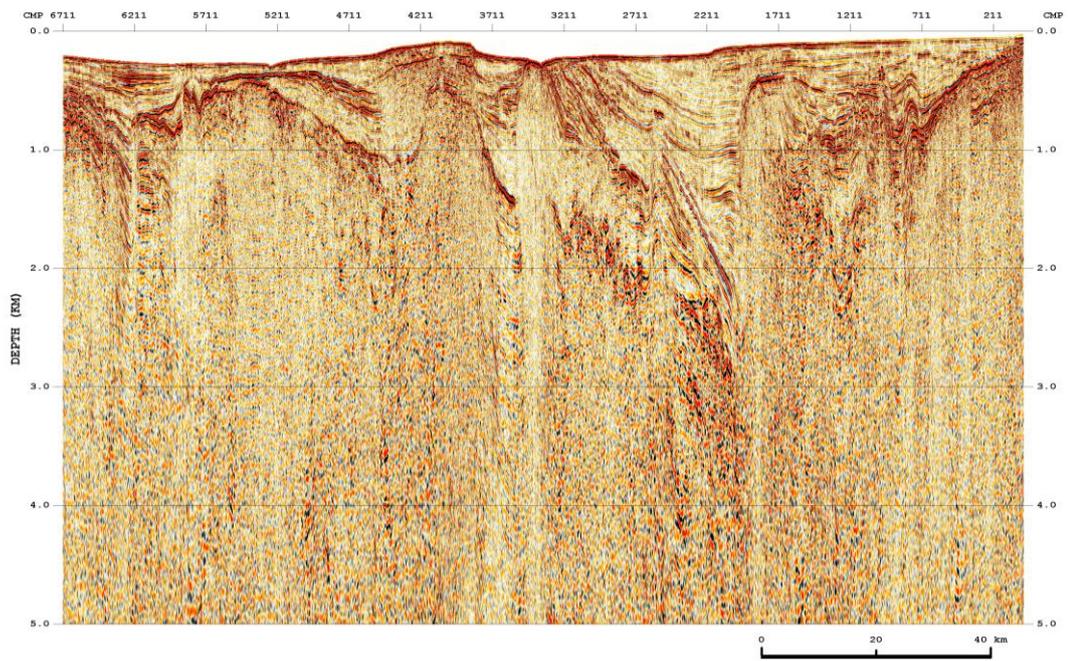


図 16 重合前時間マイグレーション深度断面図  
「北陸」調査 1973

### 3. MDRS (Muliti Dip Reflection Surface)解析

MDRS 解析は、MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図を作成するまでの追加解析である。「1. 通常解析」における 1)から 18)の処理に続いて以下の処理を実施した。

#### 19) 帯域通過フィルター (Bandpass Filtler)

MDRS 解析の前処理として、反射波の周波数帯域外にあるノイズを抑制するために、帯域通過フィルターを適用した。

#### 20) 振幅調整 (Trace Scaling)

MDRS 解析の前処理として、時間方向の振幅バランスを整えるために、ゲート長 600msec の AGC を適用した。

#### 21) マルチディップ CRS スキャン (Multi-dip Common Reflection Surface Scan)

CRS(Common Reflection Surface)法は CMP(Common Mid Point)に属するトレースだけでなく、その近傍の CMP 多数を併せたスーパーギャザーを重合処理することで、従来の CMP 重合法に比べて飛躍的に高い S/N 比を得る手法である。しかし CRS 法では各時間サンプルで 1 つの傾斜角 (1 組の CRS パラメータセット) しか選択できないため、異なる反射面からの反射波が交差する状況 (コンフリクティング・ディップ) には対応できない。本解析の対象地域のように、複雑な地質構造を有する地域ではゼロオフセット断面上でコンフリクティング・ディップの存在が予想されるため、この問題を解決し、より忠実な反射面を再現するために、マルチディップ CRS スキャンを実施した。以下に手順を述べる。

- ① 傾斜の範囲を 61 分割し、それぞれにおいて CRS スキャンを実施
- ② 求めた CRS アトリビュートを用いてスーパーギャザーの走時を補正
- ③ それぞれの傾斜範囲において重合処理を実施

以上の手順により、傾斜の各範囲で CRS 重合記録と関連するアトリビュートを 1 組ずつ、合計 61 組を作成した。

#### 22) MDRS 重合 (MDRS Stack)

一般に反射記録を解釈するにあたり、様々な数値解析を行うが、これを圧トリビュート解析という。これらのアトリビュート解析のうち、センブランス値は CRS 重合記録における重合効果の指標であり、大きなセンブランス値が高い重合効果を表している。これを利用して、重合結果および関連する各アトリビュートに対してサンプル毎にセンブランス値の高い順に並べ替える MDRS ピッキングを行い、センブランス値の高い方から 2 番目までのセクションを用いて MDRS 重合を実行することで、コンフリクティング・ディップに対応した CRS 重合記録を作成した。このようにセンブランス値の高い方から複数枚のセクションを加算することで、ゼロオフセット断面上で複数(ここ

では最大 2 つまで)の反射波が交差する状況に対応した。なお、センブランス値による並べ替えに際して、傾斜範囲に制限を設けることで不要な傾斜ノイズを除去した。

#### 23) 基準面補正 (Datum Correction)

基準面を平均海水面とするために、震源の深度、受振器ケーブルの深度および海水中の音速速度 (1500m/sec) を参照して静補正を行った。

#### 24) 信号強調 (Signal Enhancement)

重合後記録の反射波の連続性を改善するために、ランダムノイズを抑制し、相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。

#### 25) 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

反射波の周波数帯域外にあるノイズを抑制するために、「1. 標準解析」の(25)と同様のタイム・バリエーション型の帯域通過フィルターを適用した。この時点の記録を、MDRS 重合時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

#### 26) 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

「1. 標準解析」の(25)と同様の手法で、重合後時間マイグレーションを適用した。この時点の記録を、MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

#### 27) 深度変換 (Depth Conversion)

「1. 標準解析」の「27) 深度変換」と同様の手法で、深度変換を実施した。この時点の記録を、MDRS 重合時間マイグレーション深度断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

以上の解析手順により作成された MDRS 重合時間断面図の例を図 17-1 に、MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図の例を図 17-2 に、MDRS 重合時間マイグレーション深度断面図の例を図 17-3 に示す。

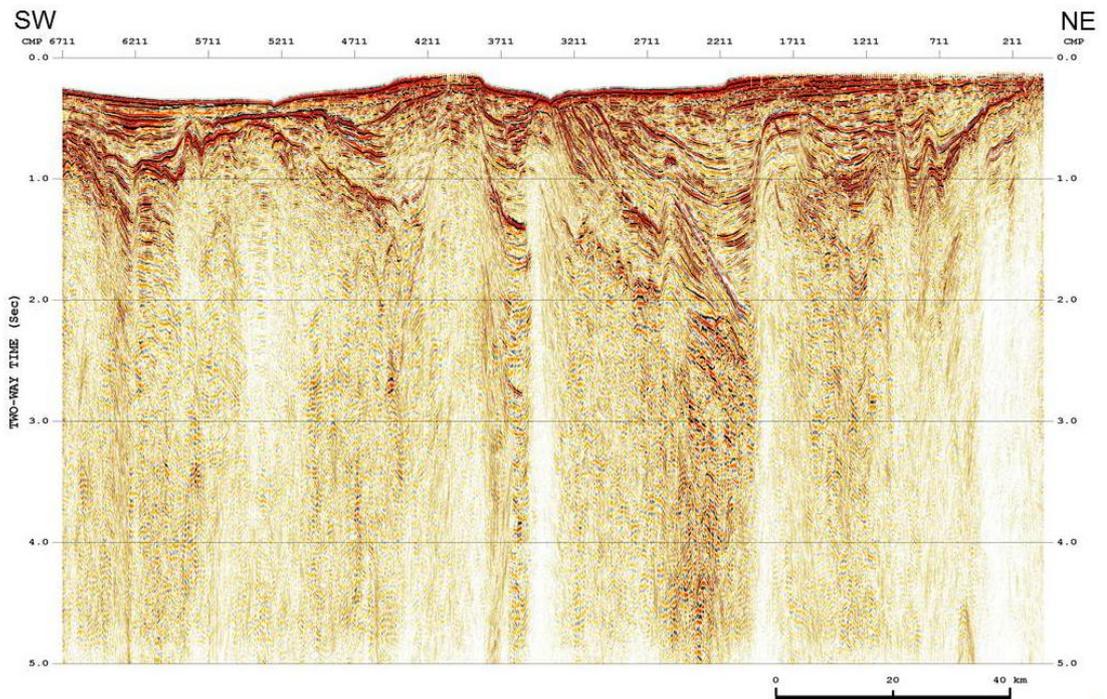


図 17-1 MDRS 重合時間断面図  
「北陸」調査 1973

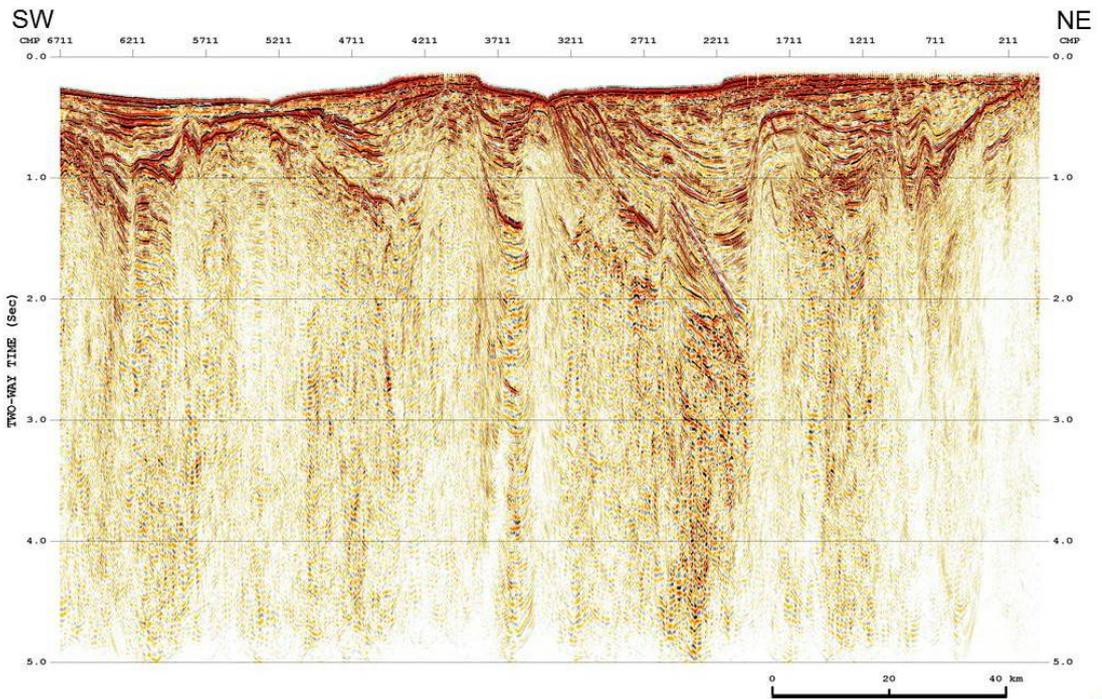


図 17-2 MDRS 重合後時間マイグレーション時間断面図  
「北陸」調査 1973

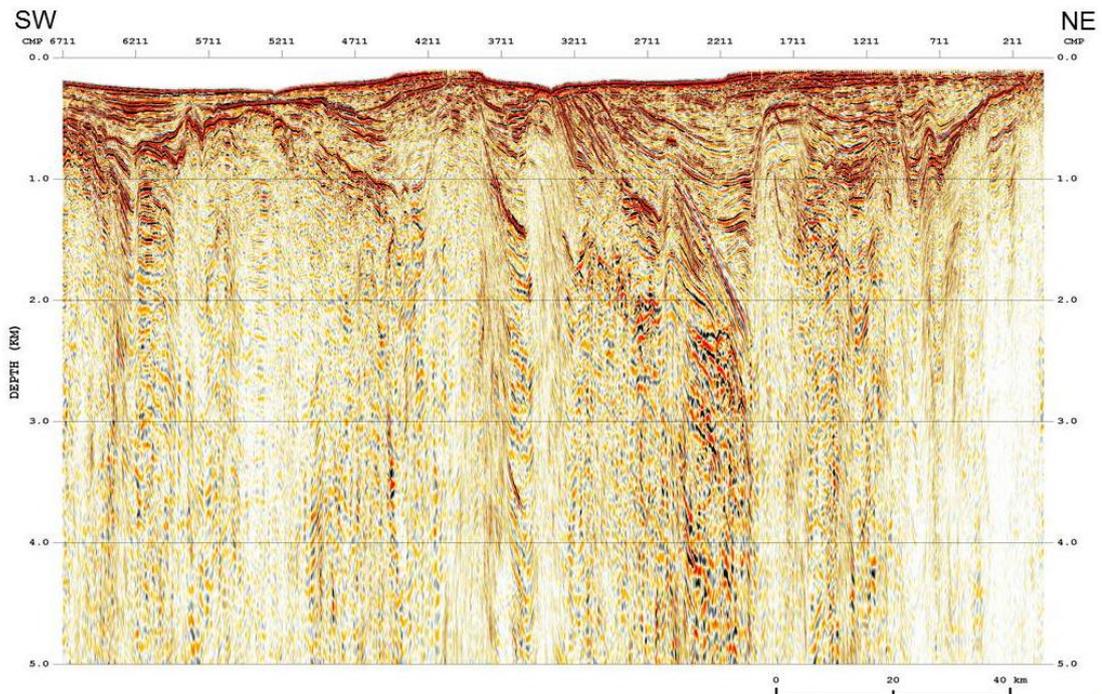


図 17-3 MDRS 重合後時間マイグレーション深度断面図  
「北陸」調査 1973

#### 4. ベクトル化処理

ベクトル化処理は、データ欠損が大きくデータ再解析の除外となった測線で、重合時間記録がデジタルデータとして残存していない場合に、紙面で残存する CMP 重合断面図から重合後時間マイグレーション深度断面図を作成するまでの処理である。「山陰～北九州沖(1989)」の一部測線については、重合時間記録がデジタルデータとして残存していたため、ベクトル化処理は行わず 3)以降の処理を適用した。

##### 1) スキャンとベクトル化処理 (Scan and Vectorizing)

大型スキャナーを使用して紙の重合時間断面図をスキャンした tiff フォーマットの画像データに対して、Lynx Information Systems Ltd 社のソフトウェア「SSV (Seismic Section Vectorizing)」を使用してトレースデータをベクトル化した。ベクトル化されたトレースデータに、同社のソフトウェア「TRACEPREP」を使用して振幅補正等の処理を行い、SEG-Y ファイルに出力した。

##### 2) 信号強調 (Signal Enhancement)

重合後記録の反射波の連続性を改善するために、ランダムノイズを抑制し、相対的に S/N を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。この時点の結果を、ベクトル化処理の重合時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

##### 3) 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

「1. 標準解析」の 26)と同様の手法で、重合後時間マイグレーションを適用した。マイグレーション速度としては、対象測線で再解析を実施している場合はその速度を用い、再解析を実施していない場合は近接測線の速度を投影

し、これを用いた。この時点の記録を、ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

#### 4) 深度変換 (Depth Conversion)

「1. 標準解析」の「27) 深度変換」と同様の手法で、深度変換を実施した。この時点の記録を、ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション深度断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

以上の解析手順により作成されたベクトル化処理の重合時間断面図の例を図 18 に、ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション時間断面図の例を図 19 に、ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション深度断面図の例を図 20 に示す。

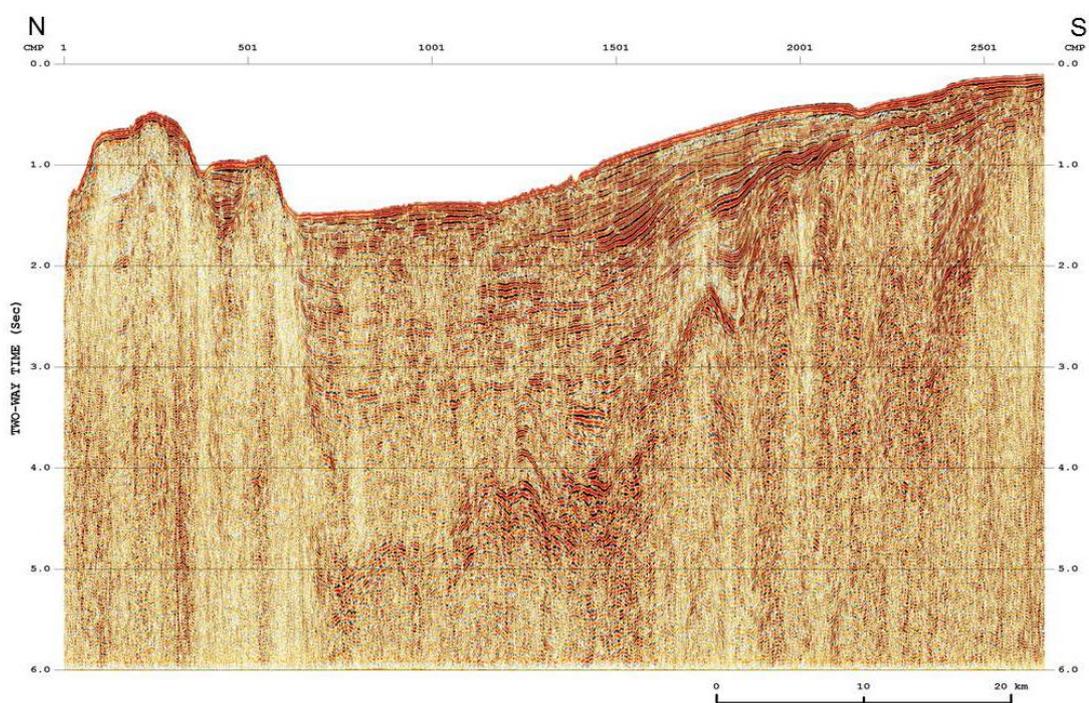


図 18 ベクトル化処理の重合時間断面図  
「北陸～山陰」調査 1974

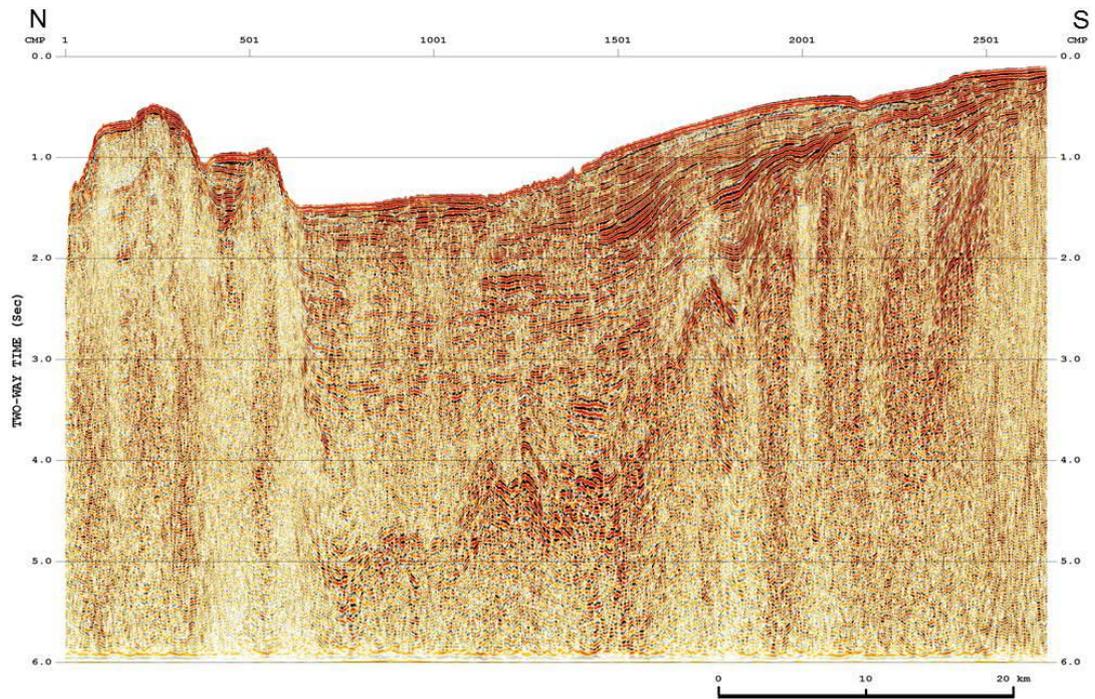


図 19 ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション時間断面図  
「北陸～山陰」調査 1974

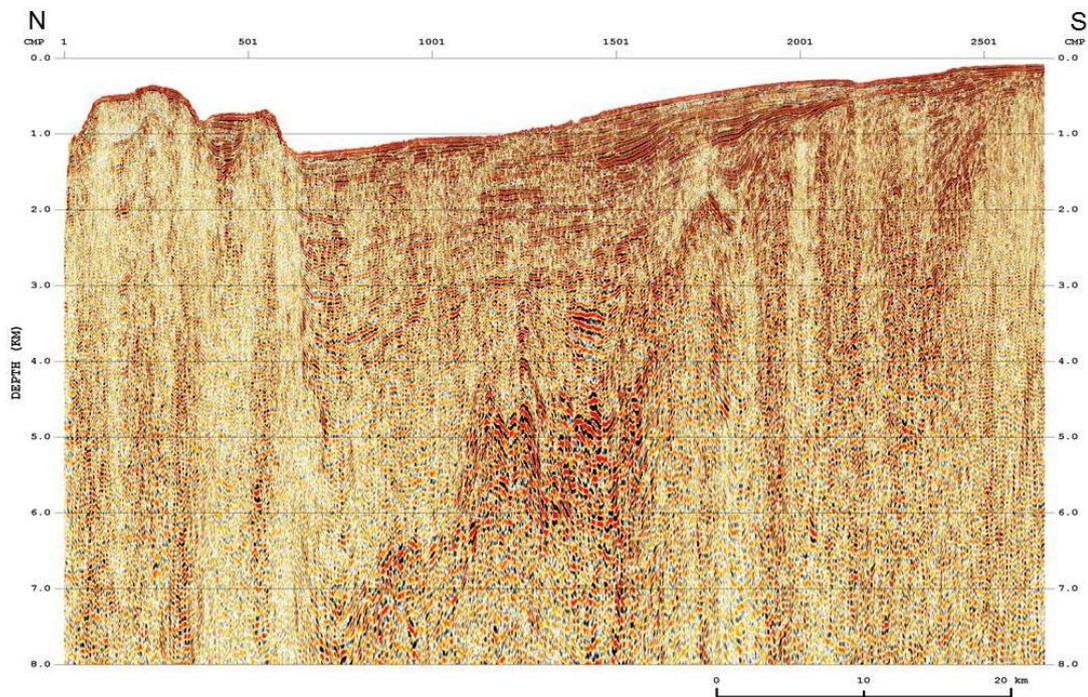


図 20 ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション深度断面図  
「北陸～山陰」調査 1974

d. 処理結果検討

処理対象調査の記録は概ね S/N が良好であったが、多重反射波が顕著であり地

震探査記録の解釈を阻害する要因となると考えられた。本解析では、重複的に発生しうる様々な多重反射波に対応するために、複数の抑制手法を複合的に適用した。ここで各多重反射波除去の特性を整理した上で、その効果について検討した。

多重反射波除去の手法としては、SRME 法、RTD 法、PRT 法を選択した。SRME 法は波動方程式に準拠した多重反射波抑制手法であり、複雑な海底地形でも多重反射波の抑制効果が高く、反射波の損傷も小さく抑えられるため、長周期多重反射波の抑制に最も有効な手法である。ただし、二次元記録では三次元構造に起因する多重反射波の予測に誤差が生じ、このような多重反射波の抑制効果は低下する。また、ファーオフセットでの多重反射波や、回折多重反射波についてはその抑制効果は限定的であることが知られている。RTD 法は多重反射波の周期性に準拠した抑制手法であり、層間多重反射波を含む短周期多重反射波の抑制に有効な手法である。ただし、水平成層構造を仮定しているため、海底面の不規則な形状変化や海底面近傍の速度不均質には対応できないという問題がある。PRT 法は、一次反射波と多重反射波の走時差に準拠した手法である。走時差が存在すれば多重反射波の周期に関係なく抑制可能であるが、長周期であるほど走時差が顕著になるため、長周期多重反射波の抑制効果が高い。多重反射波の抑制効果は、走時差の小さいニアオフセットでは低く、走時差の大きくなるファーオフセットで高い。多重反射波の走時が放物線で近似可能ならば、回折多重反射波や三次元構造に起因する多重反射波も抑制可能なため、SRME 法とは補完的な関係にある。

ここで、2,3 の測線を例に多重反射波処理の効果を検証する。

#### 1. 深部海域における多重反射抑制処理検証

海底が十分に深く長周期多重反射波が見られる海域の例として、「北海道西部～新潟海域(1976)」の一測線において、多重反射波抑制処理の効果を検証した。図 21-1 に SRME 法適用後の、図 21-2 に SRME 法と RTD 法を適用後の重合記録を示す。これらの図を見比べると、海底面の一次多重反射波は確認できるが、それ以外の多重反射波成分の識別は、適用結果の比較からは困難である。多重反射波成分の識別を容易にするために、SRME 法および RTD 法で予測された多重反射波（多重反射波予測結果）の重合記録を図 21-3 に、この多重反射波成分を重ねて表示した、多重反射波抑制処理適用後の重合記録を図 21-4 に示す。

多重反射波予測結果は、多重反射波の抑制段階で得られた多重反射波成分を、標準解析の手順に従い一次反射波速度で重合した記録のことである。標準解析にはデコンボリューションや AGC といったデータ依存処理が含まれるため、位相や振幅の絶対値の評価は困難であるが、多重反射波の出現時間や相対的な振幅の強弱は保持されているため、多重反射波成分の識別に有効な表示である。この図を見ると、SRME 法で抑制された海底面多重反射波や、RTD 法で抑制された短周期多重反射波が明瞭に確認でき、両手法の抑制効果が確認できる。

図 21-4 において赤枠で示した範囲を拡大表示した結果を図 21-5 に示す。この図で、(a)は多重反射波抑制前、(b)は多重反射波抑制後、(c)は多重反射波予測結果を重ねて表示した重合記録である。(a)の赤矢印で示した位置に海底面一次多

重反射波が確認できるが、(b)ではこの成分が抑制されたことで、被覆されていた反射波が明瞭になっている。(c)では予測された多重反射波が明瞭に確認でき、海底面直下の短周期多重反射波が抑制されていることが分かる。(d)は速度スペクトルの比較図であり、(a)から(c)で青矢印で示したCMP位置における、多重反射波抑制前、SRME法適用後、SRME法とRTD法適用後の結果を示している。抑制前のピンク丸で示した位置は海水速度に相当するため、この成分は海底面多重反射波と考えられるが、SRME法適用後ではこの成分は見られず、SRME法により海底面多重反射波が抑制されたことが分かる。RTD法適用前後（中図が適用前、右図が適用後）の速度スペクトルを比較すると、短周期で縦に並ぶ成分が抑制されており、短周期多重反射波が抑制されたことが分かる。多重反射波抑制処理により、速度スペクトルが整理され、速度が読みやすくなったことから、この後の速度解析の精度向上が期待できる。

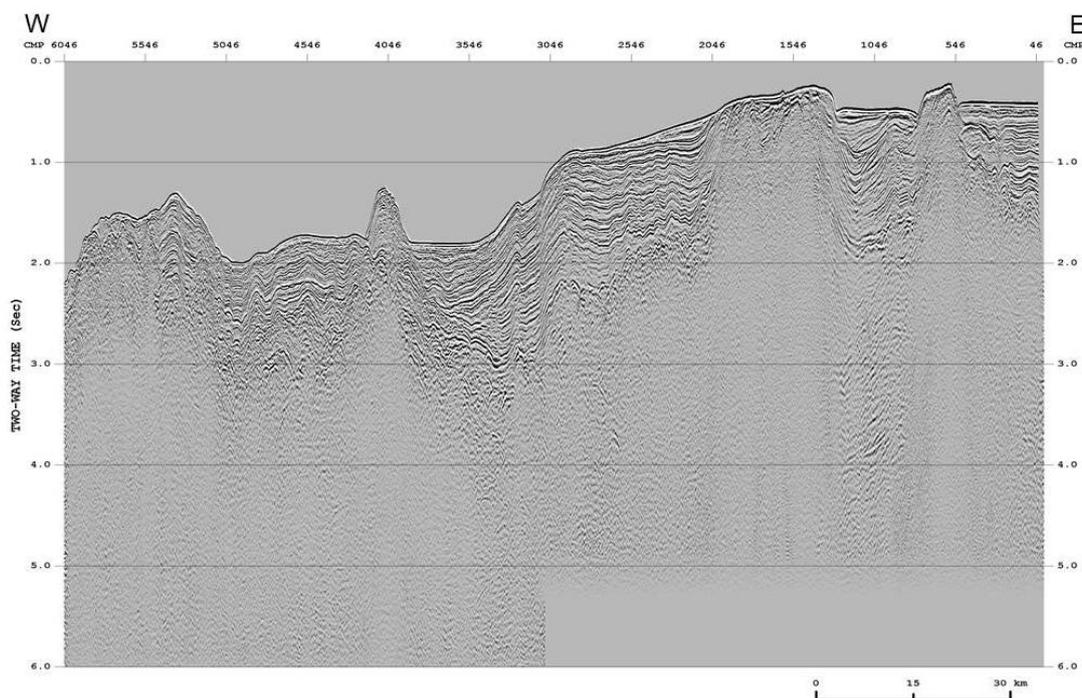


図 21-1 SRME 適用後の重合記録例  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

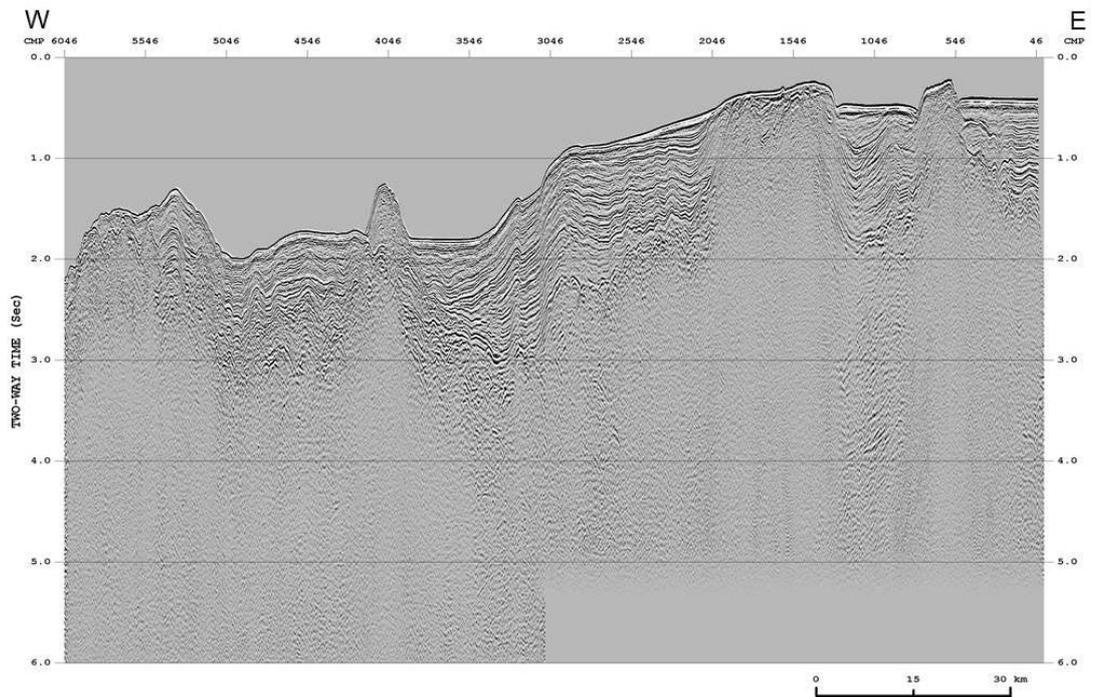


図 21-2 多重反射波処理適用後の重合記録例  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

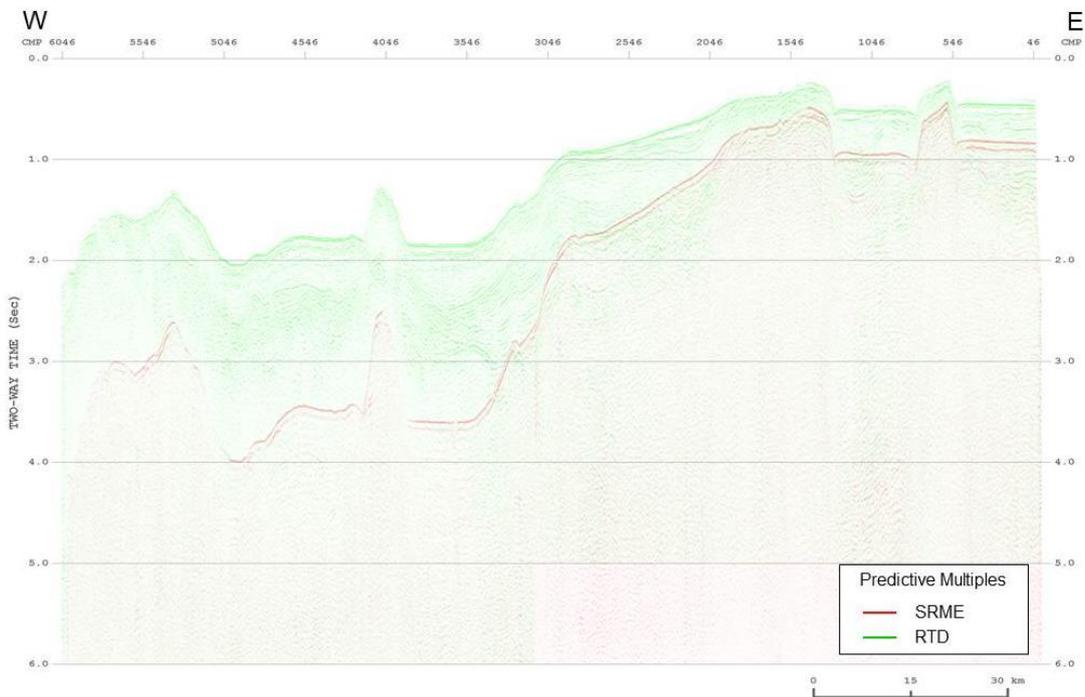


図 21-3 多重反射波予測結果の重合記録例  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

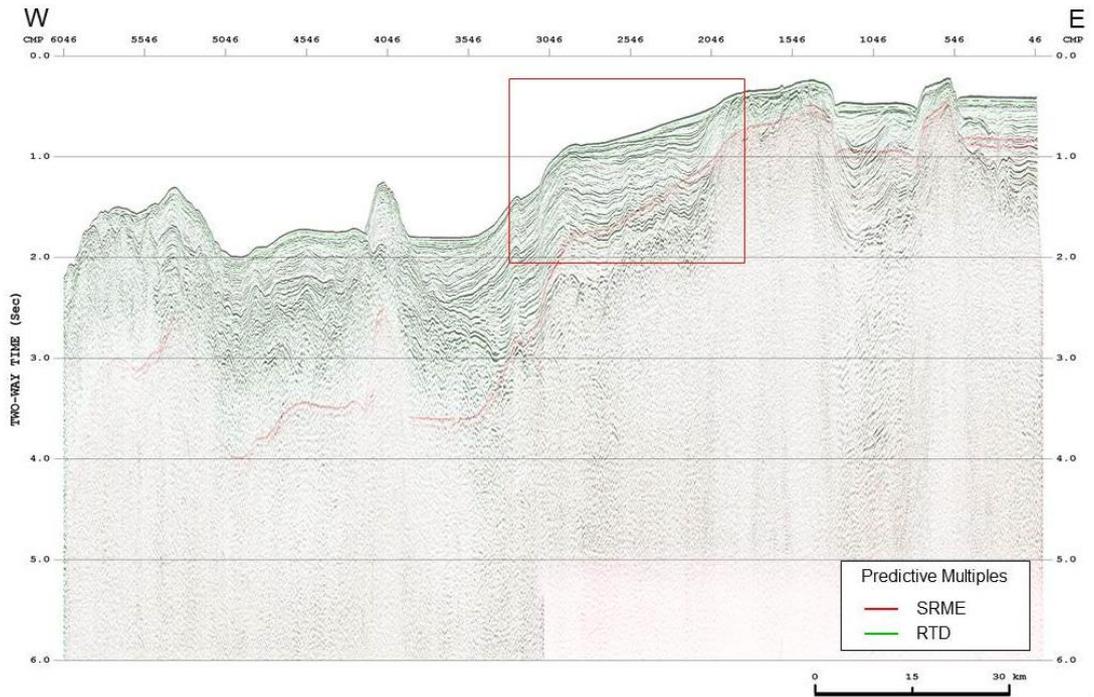


図 21-4 多重反射波予測結果を重ねて表示した重合記録例  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

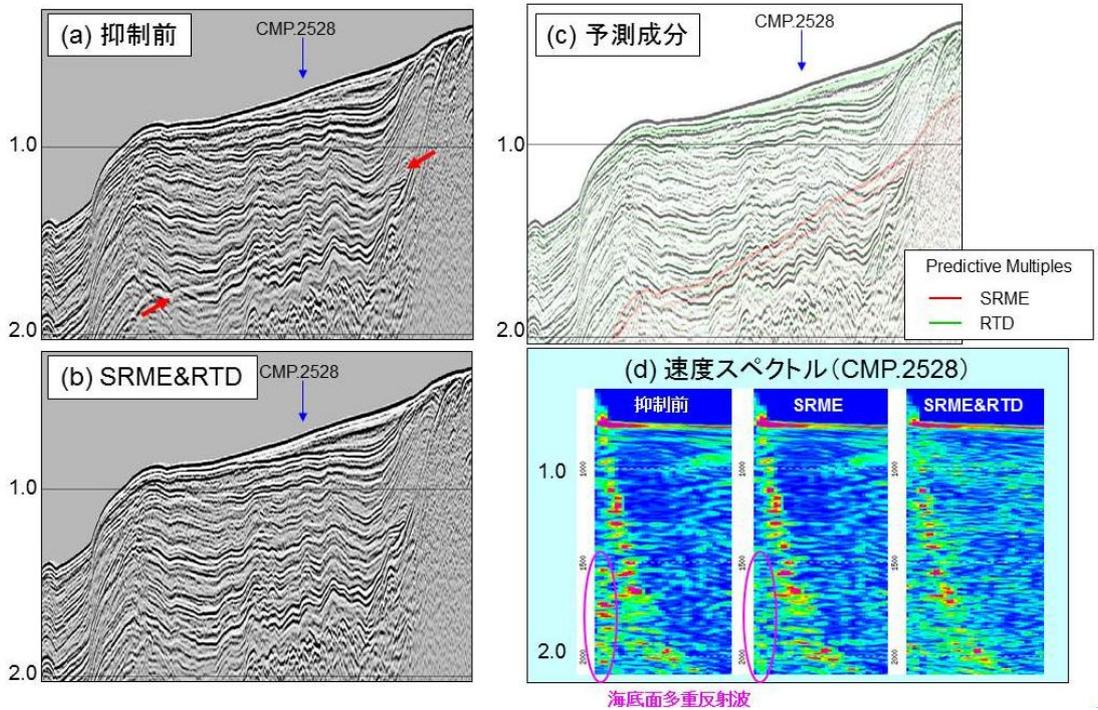


図 21-5 多重反射波抑制処理の効果検証  
「北海道西部～新潟沖」調査 1976

## 2. 浅部海域における多重反射抑制処理検証

海底が浅く短周期多重反射波が見られる海域の例として、「山陰～北九州沖(1989)」の一測線について、多重反射波抑制処理の効果を検証した。図 22-1 に多重反射波抑制処理前の、図 22-2 に SRME 法適用後の、図 22-3 に RTD 法適用後の、図 22-4 に SRME 法と RTD 法、PRT 法を適用した複合型多重反射波抑制処理の重合記録を示す。これらの図を見比べると、(1)の赤丸で示した位置に見られる海底面多重反射波が、(2)では SRME 法により抑制されており、さらに(3)では RTD 法により僅かに残存する多重反射波が抑制されたことが確認できる。また、(3)の青丸で示した位置に見られる多重反射波は、SRME 法と RTD 法だけでは抑制効果が不十分であるが、(4)を見ると PRT 法により抑制され、多重反射波に被覆されていた一次反射波が確認できるようになった。このように複数の手法を組み合わせることで多重反射波を効果的に抑制できることが分かる。

多重反射波成分の識別を容易にするために、各手法で予測された多重反射波（多重反射波予測結果）の重合記録を図 22-5 に、この多重反射波成分を重ねて表示した、多重反射波抑制処理適用後の重合記録を図 22-6 に示す。浅部に注目すると、各手法で予測された多重反射波が入り乱れており存在していることから、3つの手法を組み合わせた複合型多重反射波抑制処理により、単独の手法を適用した結果に比較して高い抑制効果が得られたことが分かる。

図 22-6 において赤枠で示した範囲を拡大表示した結果を図 22-7 に示す。この図で、(a)は多重反射波抑制前、(b)は多重反射波抑制後、(c)は多重反射波予測結果を重ねて表示した重合記録である。(a)の赤丸で示した位置に海底面の短周期多重反射波が確認できるが、(b)ではこの成分が抑制されたことで、被覆されていた波が明瞭になっている。(c)では予測された多重反射波が明瞭に確認できる。短周期多重反射波は各手法により抑制されており、特に海底面直下では RTD 法と PRT 法の効果が大きいことが分かる。(d)は速度スペクトルの比較図であり、(a)から(c)で青矢印で示した CMP 位置における、多重反射波抑制前、SRME 法適用後、SRME 法と RTD 法適用後、SRME 法と RTD 法と PRT 法適用後の結果を示している。抑制前のピンク丸で示した位置は海水速度に相当するため、この成分は海底面の短周期多重反射波と考えられる。SRME 法適用により二次以降の多重反射波は抑制されているが一次多重反射波は抑制できておらず、RTD 法適用により一次多重反射波が弱まり、PRT 法適用により完全に抑制されたことが分かる。短周期多重反射波については、複数の手法を組み合わせることで、効果的に抑制できることが改めて確認できた。多重反射波抑制処理により、速度スペクトルが整理され、速度が読みやすくなったことから、この後の速度解析の精度向上が期待できる。

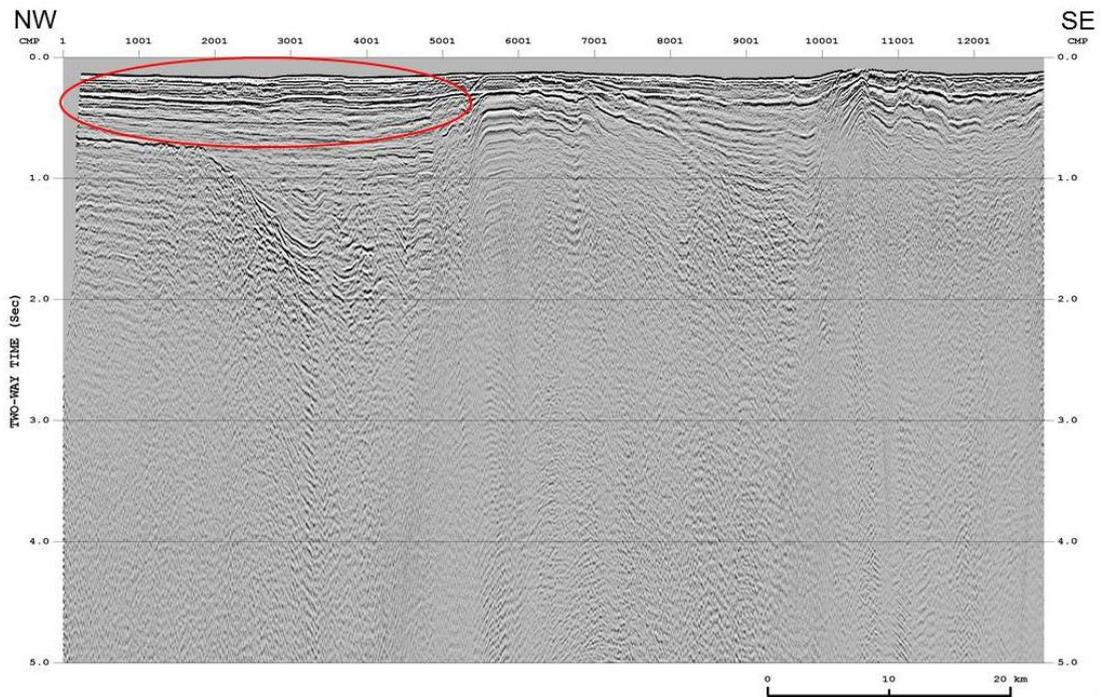


図 22-1 多重反射波抑制処理前の重合記録例

「山陰-北九州沖」調査 1989

赤線で囲まれたエリアは多重反射波が顕著に確認できる場所を示す

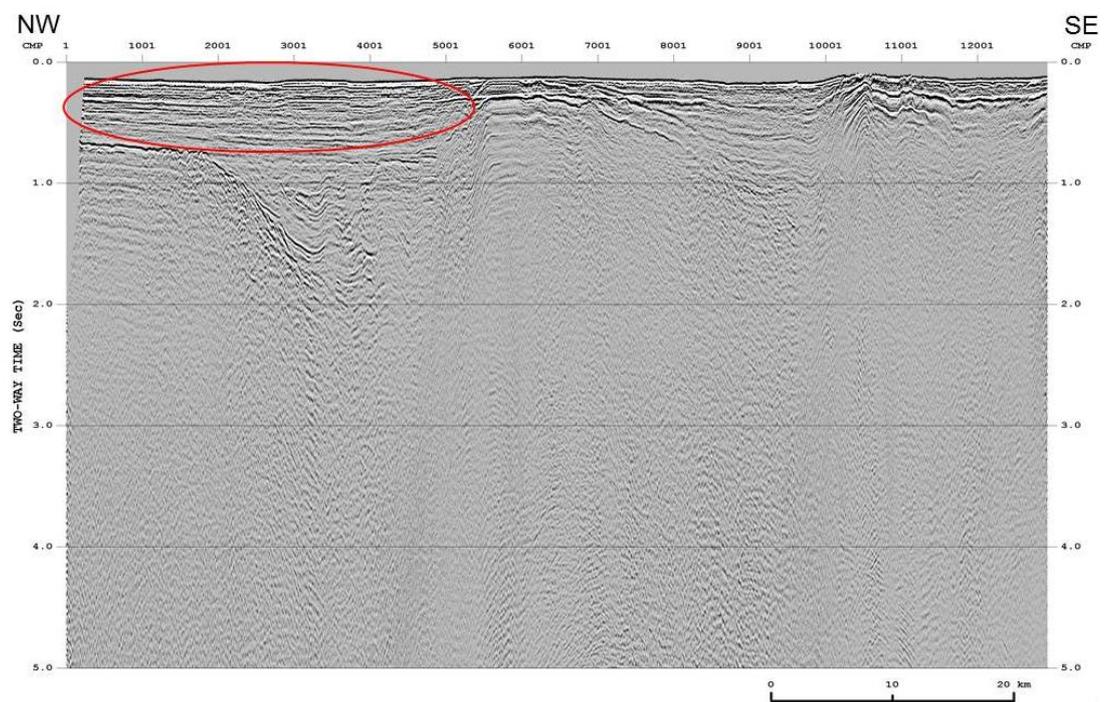


図 22-2 SRME 法適用後の重合記録例

「山陰-北九州沖」調査 1989

赤線で囲まれたエリアは多重反射波が顕著に確認できる場所を示す

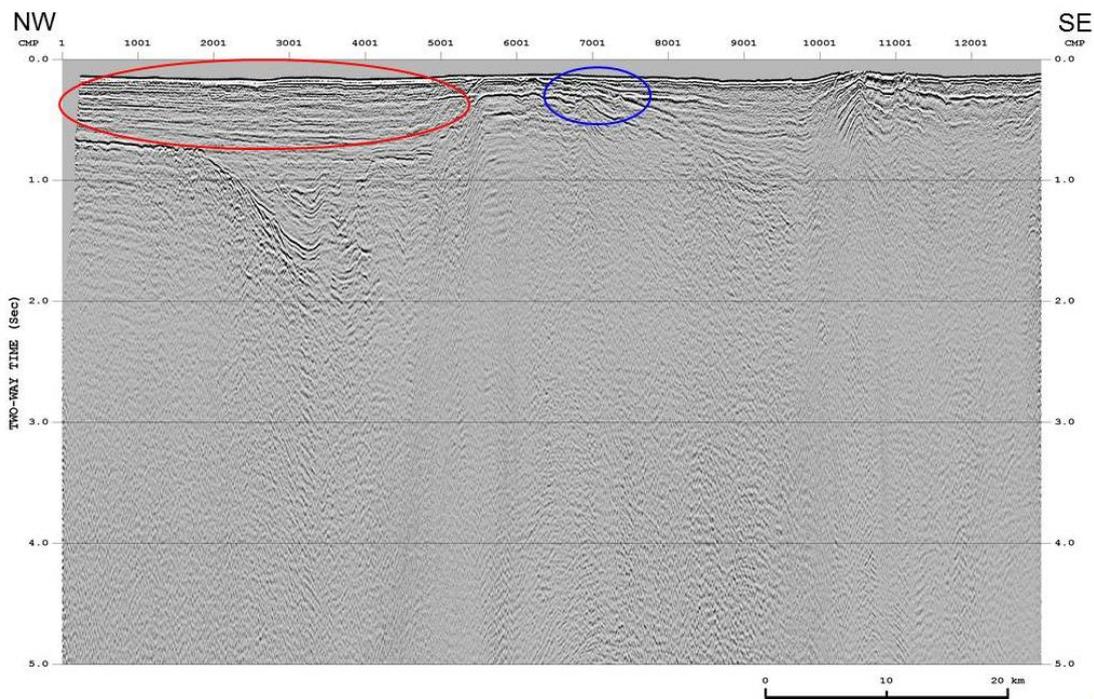


図 22-3 RTD 法適用後の重合記録例。

「山陰-北九州沖」調査 1989

赤いエリアの多重反射波は除去されたが、青いエリアの多重反射波は残る

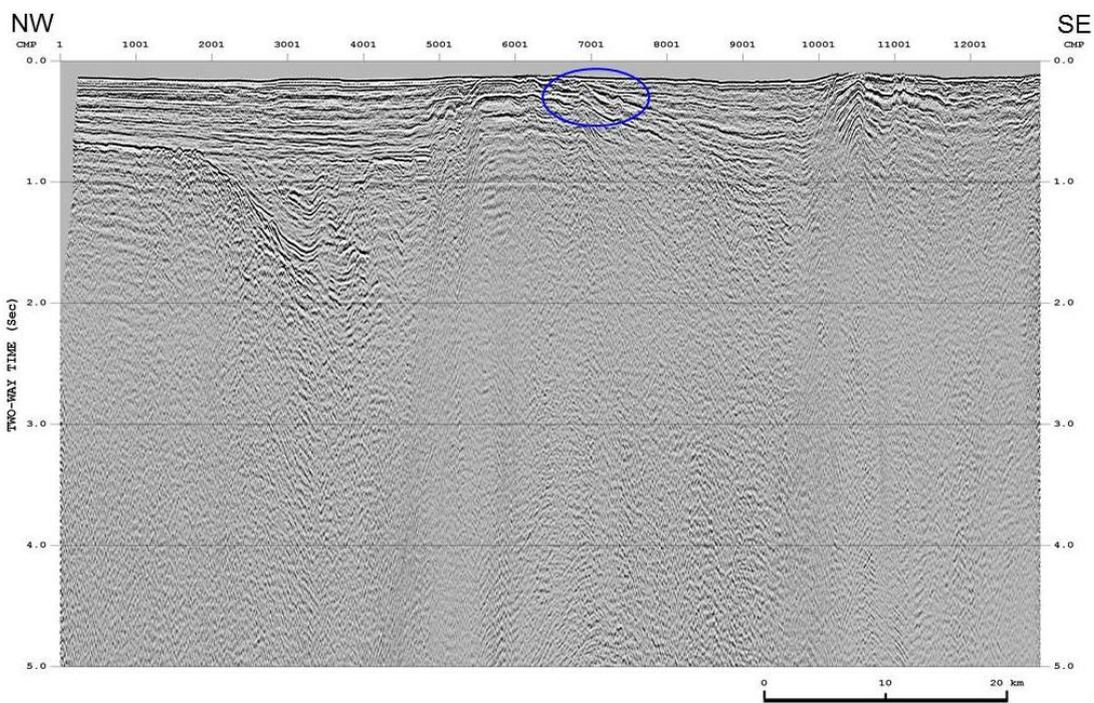


図 22-4 多重反射波抑制処理適用後の重合記録例

「山陰-北九州沖」調査 1989

青いエリアの多重反射波が抑制された

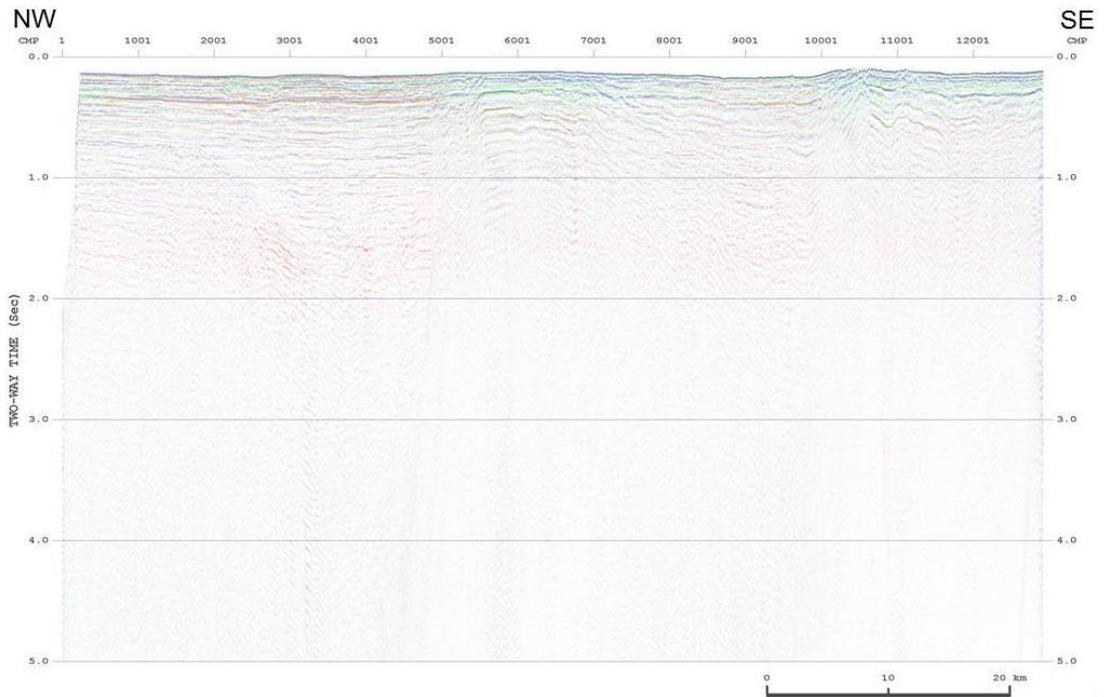


図 22-5 多重反射波予測結果の重合記録例  
「山陰-北九州沖」調査 1989

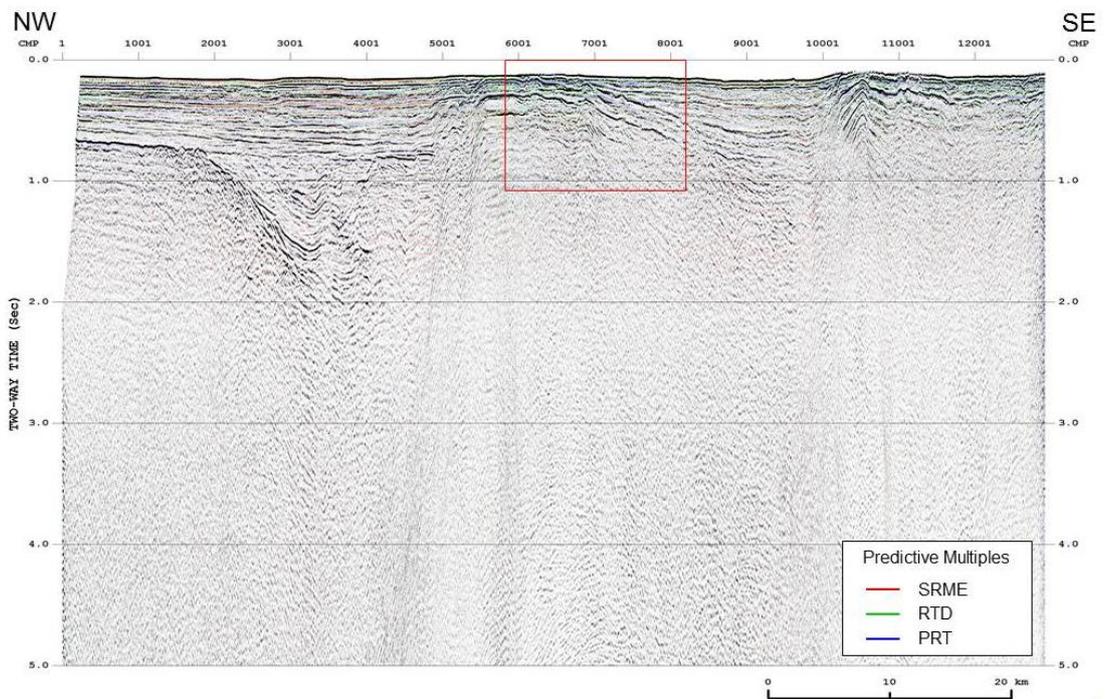


図 22-6 多重反射波予測結果を重ねて表示した重合記録例  
「山陰-北九州沖」調査 1989  
赤線で囲まれたエリアの拡大図を図 22-7 で示す

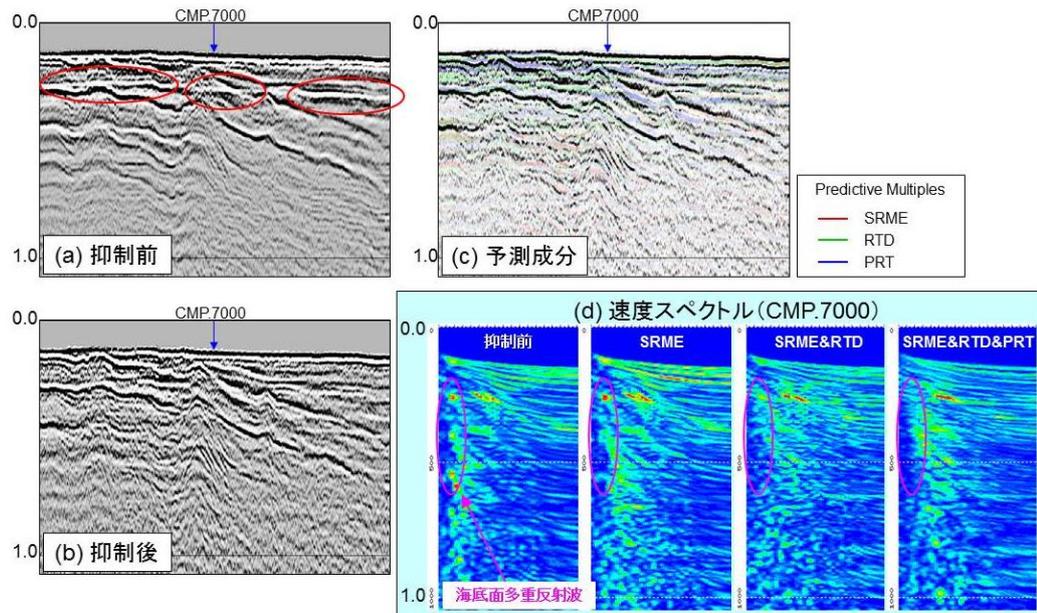


図 22-7 多重反射波抑制処理の効果検証  
「山陰-北九州沖」調査 1989

### 3. PRT 法の適用限界

本解析では、処理対象の全調査において PRT 法の適用テストを実施したが、「山陰～北九州沖(1989)」以外では品質の改善が見られなかったため適用しなかった。「北陸～山陰(1974)」の一測線における PRT 法適用前後の比較を、図 23 に示す。

PRT 法適用前の(a)において赤丸で示した位置には海底多重反射波の消え残りと思しき成分が見られる。SRME 法の抑制効果が限定的だった理由として、この付近は海底面深度の変化が大きいため、三次元的な構造に起因した多重反射波が発生していることが考えられ、PRT 法による抑制効果が期待された。しかし、PRT 法適用後の(b)では、この成分は強調されており、抑制効果は得られなかった。

抑制効果が得られなかった原因としては、対象調査では受振点間隔が 50m と大きくエイリアシングが発生しやすい状況であること、ニアオフセットギャップが 330m ありラドン変換に誤差が生じやすいこと、ケーブル長が 2400m 程度しかなく走時差に基づき多重反射波を抽出・抑制する PRT 法には厳しい状況にあることが考えられる。

効果の見られた「山陰～北九州沖(1989)」は、受振点間隔が 12.5m、ニアオフセットギャップは 168m、ケーブル長は 3000m 程度のため、上記の調査よりも条件が良かったと考えられる。今後の再解析では、PRT 法の適用測線の選定に際しては、受振点間隔やニアオフセットギャップ、ケーブル長も考慮することが望ましいと考える。

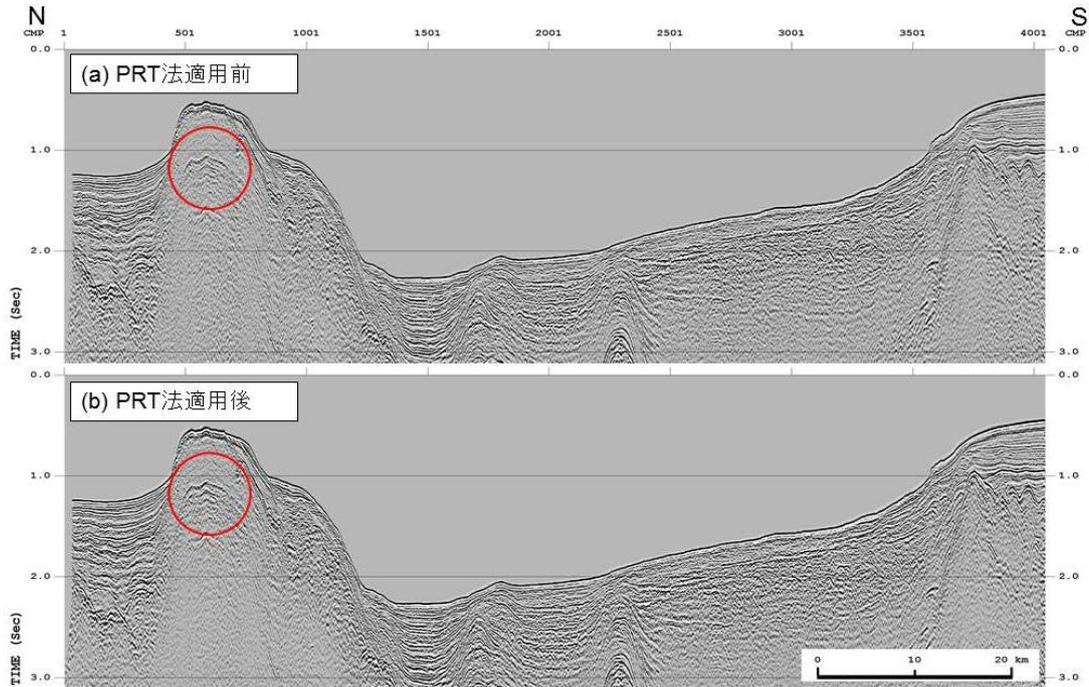


図 23 PRT 法適用前後の比較例  
「北陸～山陰」調査 1974

#### 4. 重合前時間マイグレーション (PSTM) の効果

過褶曲、複背斜あるいは衝上断層群といった短波長の構造不均質が顕著であり、海域活断層の解釈に重要な領域のデータに関しては、より高精度のイメージが期待できる、重合前時間マイグレーションを適用した。

PSTM 処理の効果を検証するために、「北陸(1973)」の HK73-C-2 測線における PSTM と重合後時間マイグレーションの時間断面図の比較を図 24-1 に、この図の赤枠の領域を拡大表示した図面を図 24-2 に示す。PSTM 結果では、回折波が収束するとともにマイグレーションノイズも小さく、反射波の識別が容易になった。分解能の改善も見られることから、構造解釈の精度が向上することが期待される。

図 25-1 と図 25-2 に、重合速度と PSTM 速度の RMS 速度プロファイルを示す。2 秒以深については、有意な反射波は確認できなかったため両者の違いに意味はないが、2 秒以浅に注目すると PSTM 速度には細かな速度変化が確認できる。浅部の速度プロファイルを、マイグレーション断面図に重ねて表示した図面を図 26-1 に、この図の赤枠の領域を拡大表示した図面を図 26-2 に示す。これらの図で、(a)は重合後時間マイグレーション断面図に重合速度を、(b)は PSTM 断面図に PSTM 速度を重ねて表示した図面である。これらの図を見ると、PSTM 速度で抽出された速度変化は重合速度結果と比較して水平方向のばらつきが抑制され、反射波と整合していることから、反射波の明瞭な浅部については、PSTM 速度解析により高精度の速度情報が抽出されたと考えられる。

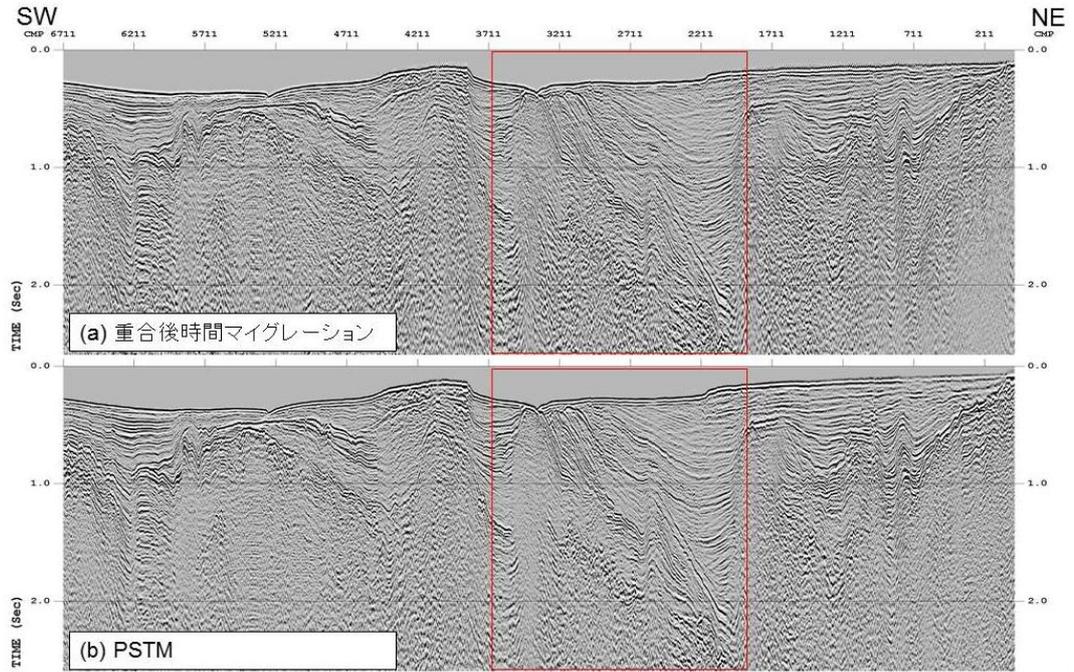


図 24-1 重合後時間マイグレーションと PSTM の比較。  
「北陸」調査 1973  
赤い四角内を拡大図を図 24-2 に示す。

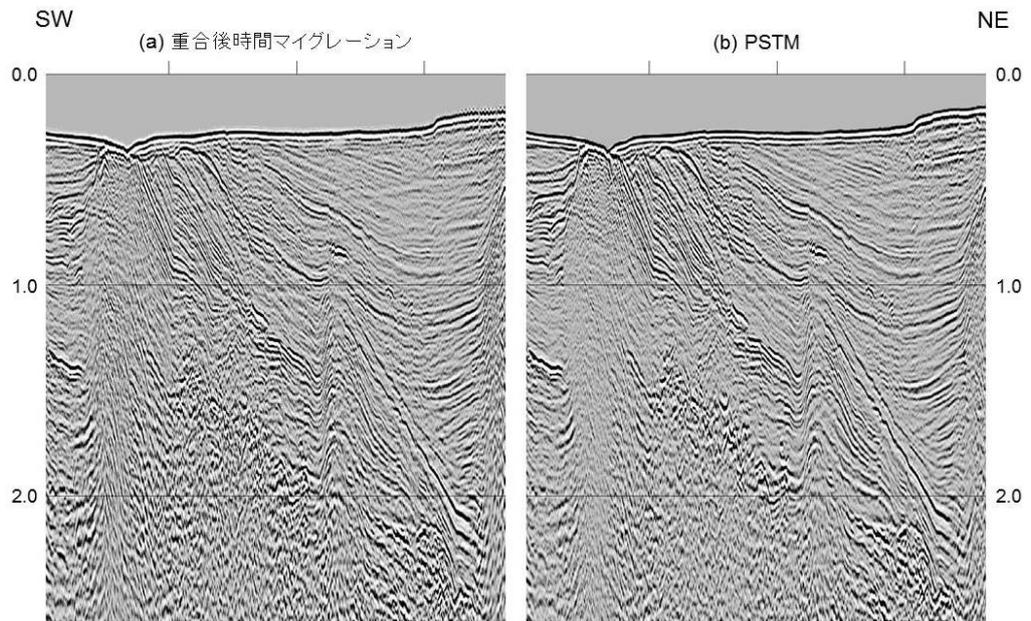


図 24-2 重合後時間マイグレーションと PSTM の比較（拡大図）  
「北陸」調査 1973

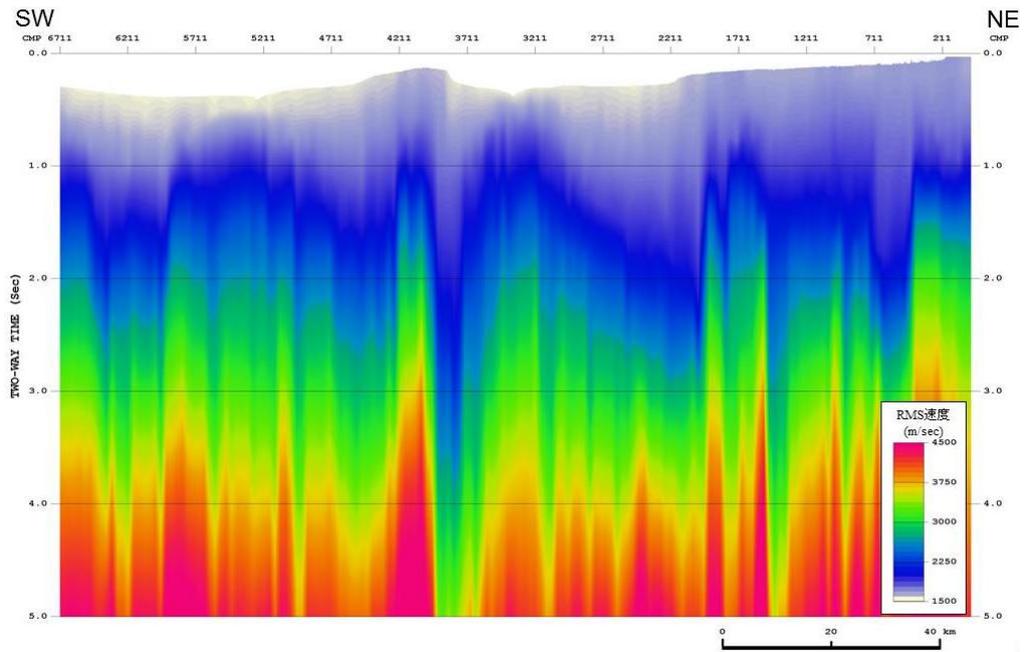


図 25-1 重合速度プロファイル (RMS 速度)  
「北陸」調査 1973

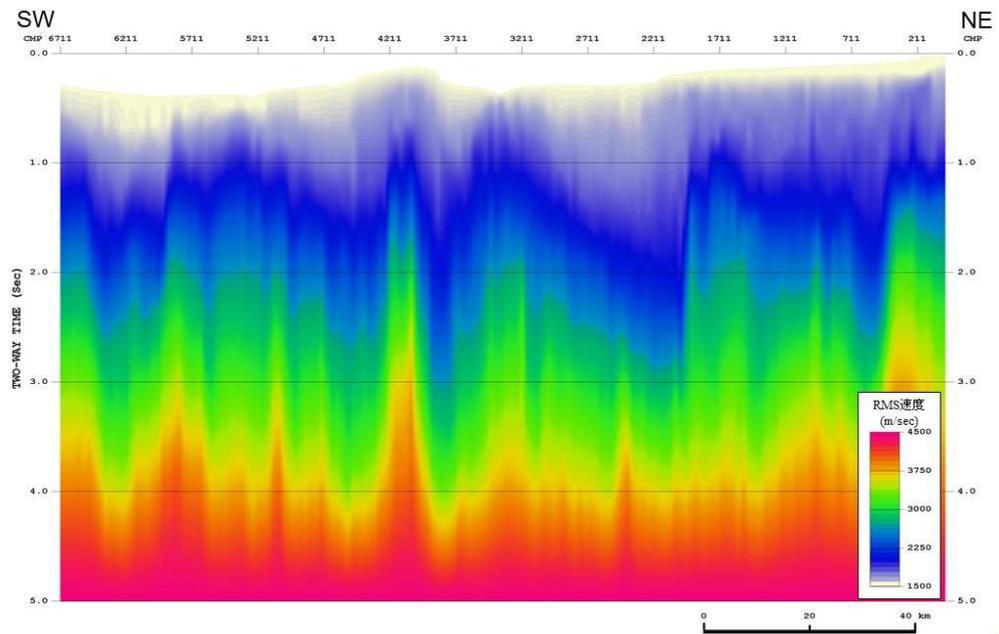


図 25-2 PSTM 速度プロファイル (RMS 速度)  
「北陸」調査 1973

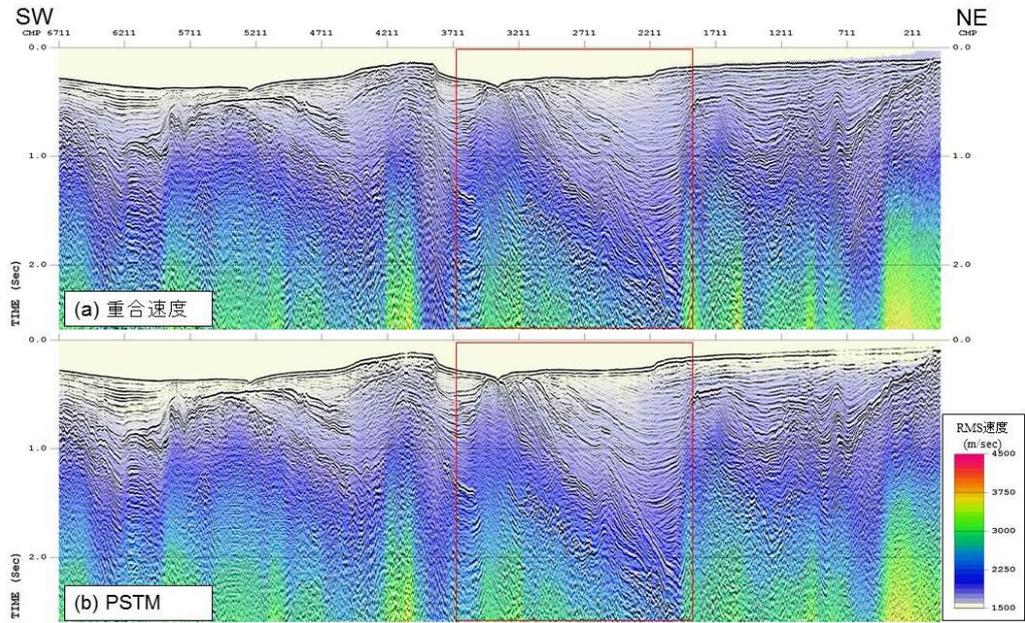


図 26-1 重合速度と PSTM 速度の比較  
「北陸」調査 1973  
赤い四角内の拡大図を図 26-2 に示す。

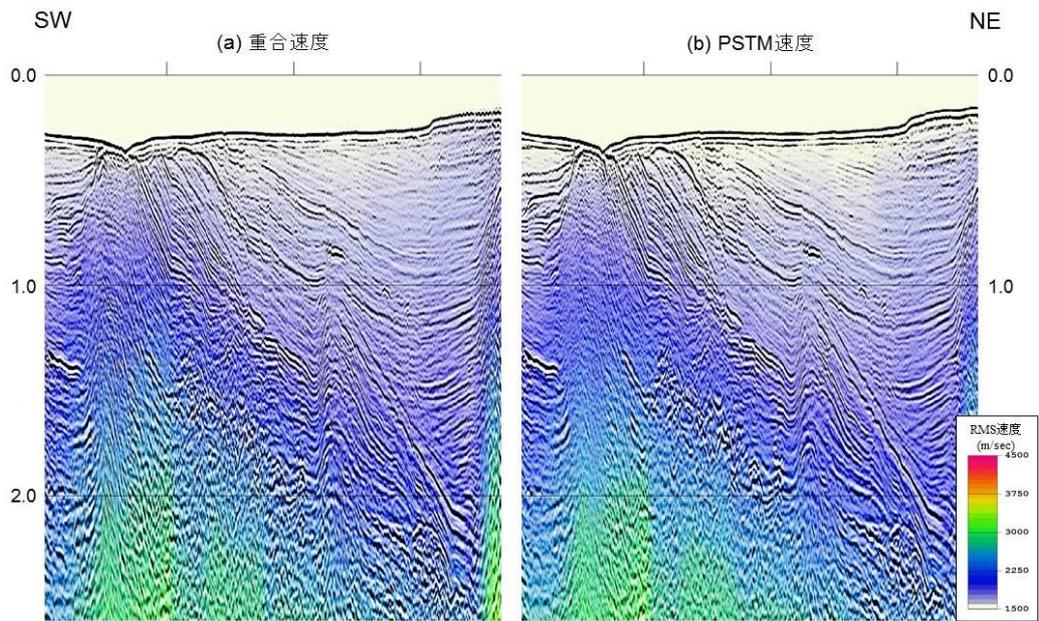


図 26-2 重合速度と PSTM 速度の比較 (拡大図)  
「北陸」調査 1973

## 5. MDRS 法の効果

MDRS 法では反射面の傾斜や曲率を考慮しながら近傍の CMP に属するトレースも重合に利用することで、CMP 重合法よりも遥かに多い重合数を確保しつつも、空間分解能の劣化を抑えることが可能であり、S/N 比を飛躍的に改善することが可能である。MDRS 処理の効果を検証するために、「北陸(1973)」の HK73-C-2 測線における重合断面図と MDRS 重合断面図の比較を図 27 に示す。この比較から、MDRS 解析により S/N が向上しており、反射波の連続性の改善が確認できる。赤丸で示した領域に注目すると、重合断面図ではノイズに被覆されて僅かにしか確認できなかった構造が、MDRS 重合断面図では波を追えるまで品質が向上しており、MDRS 解析により微弱な深部反射波が抽出されたことが分かる。一方で、青丸で示した領域では、重合断面図で抑制されていた多重反射波が強調されていることが確認できる。MDRS 解析では、多重反射波に代表されるコヒーレントノイズも強調されるため、MDRS 解析結果を解釈で使用する際には注意が必要である。

MDRS 解析の一環として、各種のアトリビュート解析を実施しているが、この中で処理の品質管理や解釈に有用な値は、センブランスと RMS 速度である。HK73-C-2 測線の MDRS 解析で得られたセンブランスと RMS 速度を図 28 に示す。図 28-1 はセンブランスを MDRS 重合断面図上に重ねて表示した図面である。センブランスは重合効果の指標であり、大きいほど重合効果が高いことを意味するため、センブランスは MDRS 重合断面図上の反射波の信頼性の指標となる。図 28-2 は、MDRS 解析で得られた RMS 速度である。この速度は局所的で空間変化が大きく、ノイズの影響を受けやすいため低 S/N 領域では信頼性が低いという問題もあるが、指定した速度範囲内で重合効果を最大とする速度を自動で求めていることから、解析者によらずに速度を推定できること、速度解析点の間隔よりも短い周期で速度変化を捉えられることを考慮すると、MDRS 解析の速度は解釈に有用な情報となりうると考えられる。図 28 の重合速度プロファイルと比較すると、大域的な速度構造は保持しつつも局所的な速度変化を抽出していることが確認できる。

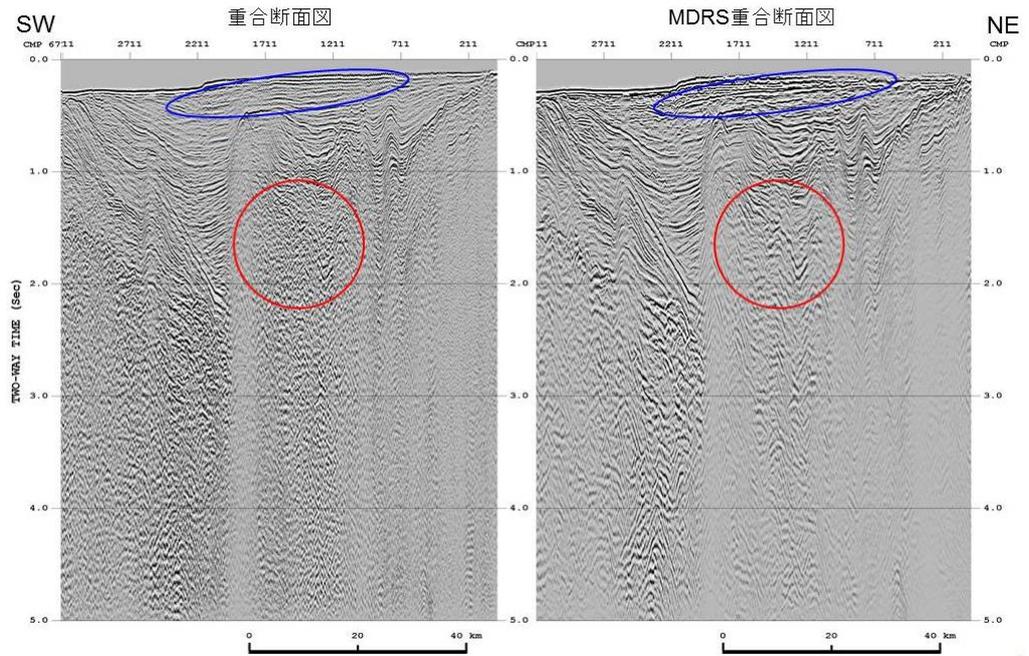


図 27 重合断面図と MDRS 重合断面図の比較

「北陸」調査 1973

赤いエリアでは反射面が強調されているが、青いエリアでは多重反射面が強調されている

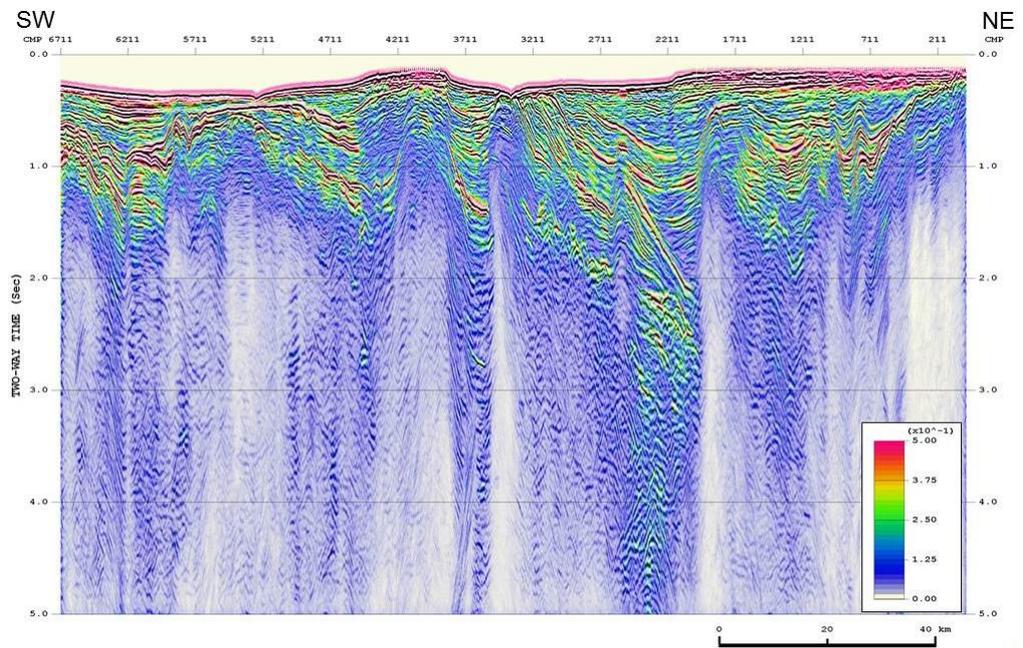


図 28-1 MDRS 重合断面図と MDRS アトリビュート (センブルランス)

「北陸」調査 1973

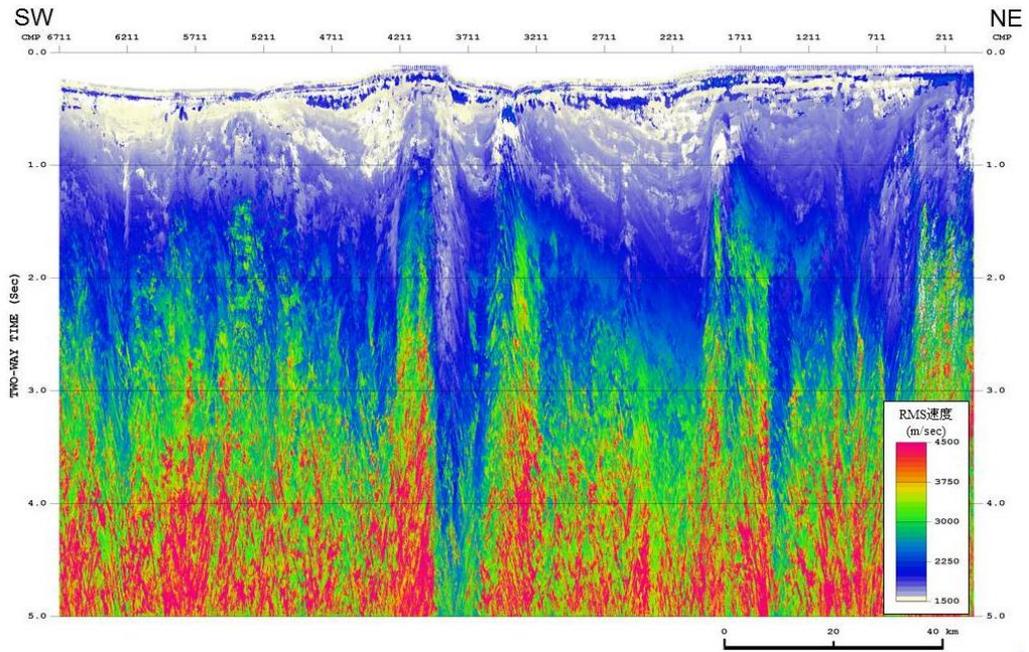


図 28-2 MDRS アトリビュート (RMS 速度)  
「北陸」調査 1973

#### 6. ベクトル化処理データの品質

ベクトル化は、デジタルデータが現存せず紙記録のみに残る場合、スキャンしてデジタルデータを作る作業である。ある一定のトレース密度でなければ復元できない上、その品質は紙面の断面図の品質に大きく影響を受ける。品質の異なる紙断面図でのベクトル化処理結果について、検証した。

図 29 に高品質の紙断面図のケース (HS74-1-3 測線) を、図 30 に低品質の紙断面図のケース (TS81-2 測線) を示す。図 29-1 の紙断面図では細部まで反射波の確認が可能であり、図 29-2 のベクトル化処理結果は紙イメージを完全に再現できており、良好な結果である。一方、図 30-1 の紙断面図では浅部の波形が黒く潰れており、(2)のベクトル化処理結果も不明瞭である。図 30-2 の測線はデータ欠損が一部に限られたため、標準解析も併せて実施されている。その結果の図 30-3 と比較すると、ベクトル化処理結果は赤丸で示した位置で反射波の連続性や解像度で大きく劣っていることが分かる。

紙断面図の状態が悪い場合にベクトル化処理の品質が低下することは明らかであるが、上記の紙断面図はどちらも紙の状態は良好であった。図 29 の紙断面図はトレース間隔が 1.0mm でありトレースが明瞭に確認できるのに対して図 30 の紙断面図はトレース間隔が 0.5mm でありトレースが黒潰れしてウィグルは確認できない。以上から、紙断面図の品質は、紙の状態だけでなく、プロットのトレース間隔にも依存していることが分かった。

ところで、残存する紙断面図の中には図 33-1 のように解釈結果の線が書き込まれているものが存在する。このような場合、ベクトル化処理結果の図 33-2 でもこれらの線の影響が残るため、解釈の際には注意が必要である。

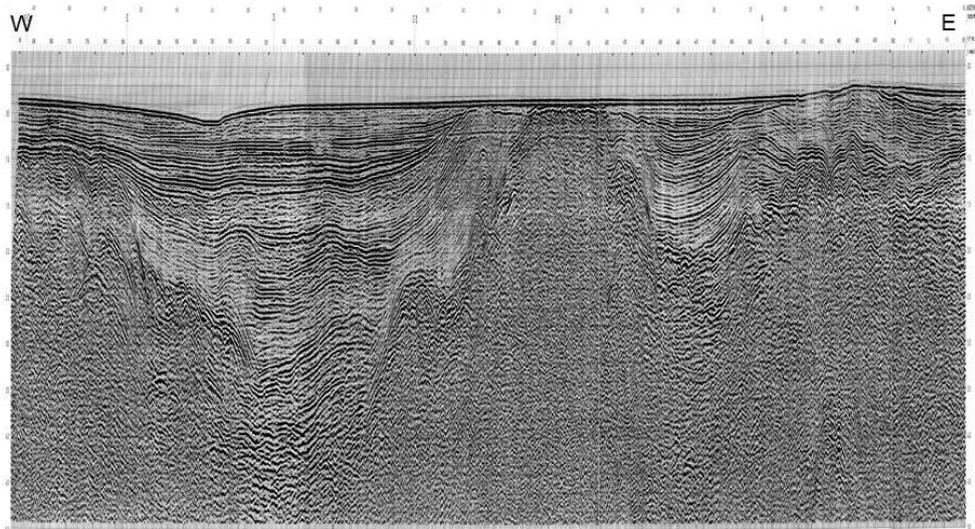


図 29-1 ベクトル化処理の対象紙断面図のイメージ（高品質）  
「北陸～山陰」調査 1974

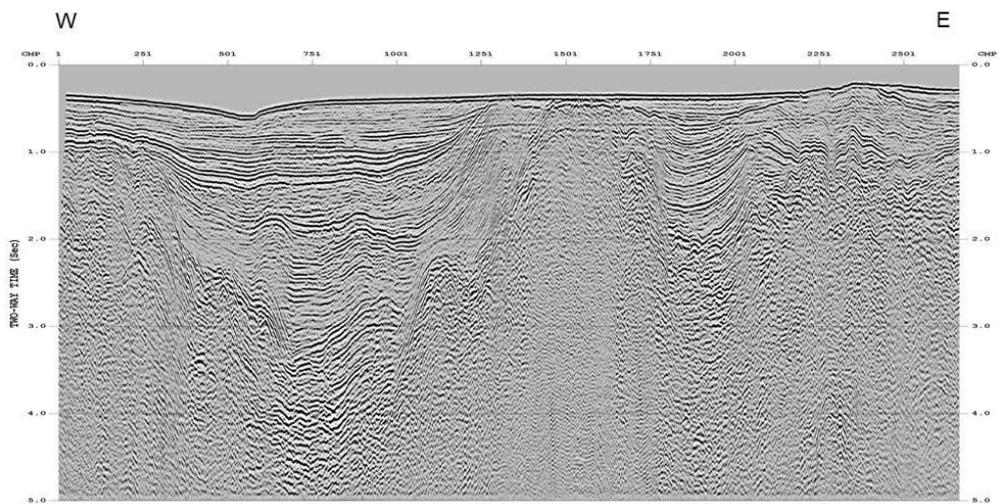


図 29-2 ベクトル化処理適用後の重合時間断面図  
「北陸～山陰」調査 1974

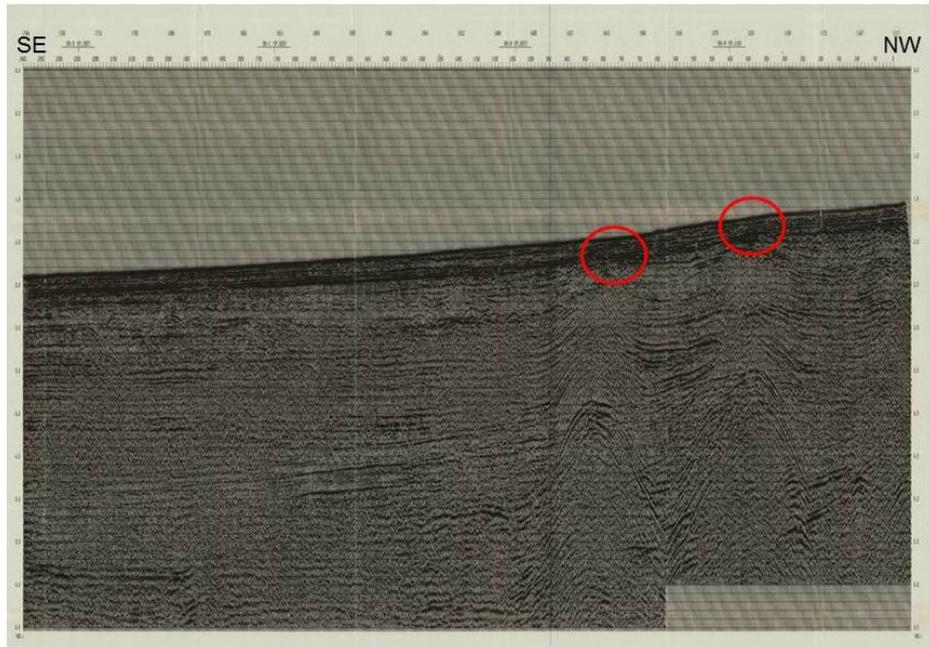


図 30-1 ベクトル化処理の対象紙断面図のイメージ（低品質）  
「山陰沖」調査 1981

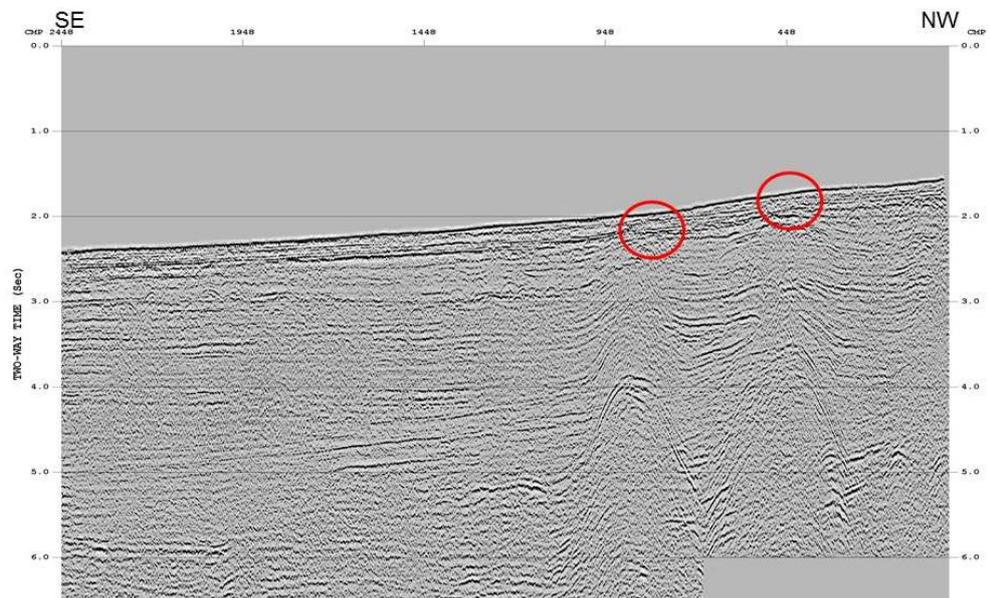


図 30-2 ベクトル化処理適用後の重合時間断面図  
「山陰沖」調査 1981

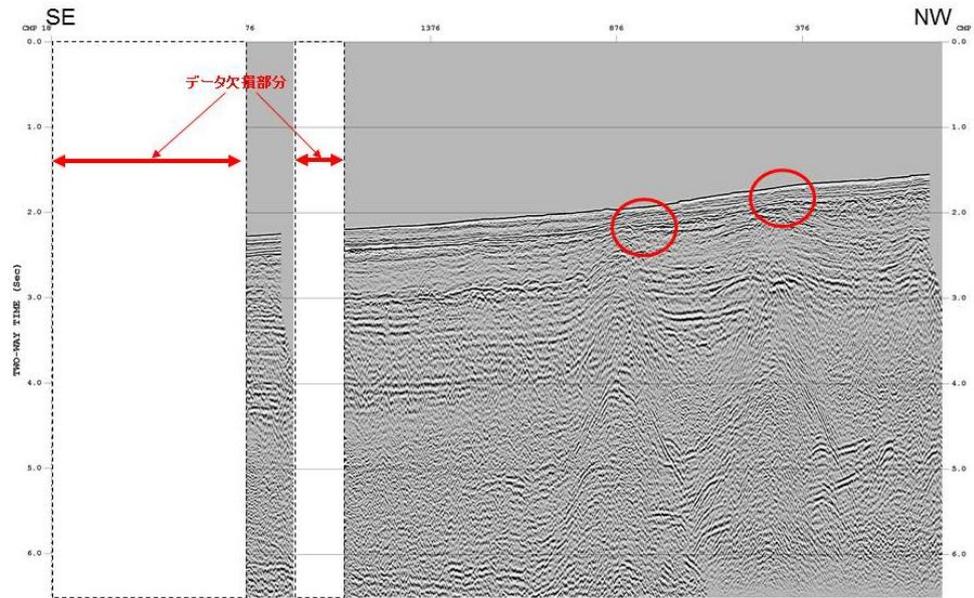


図 30-3 標準解析の重合時間断面図  
「山陰沖」調査 1981

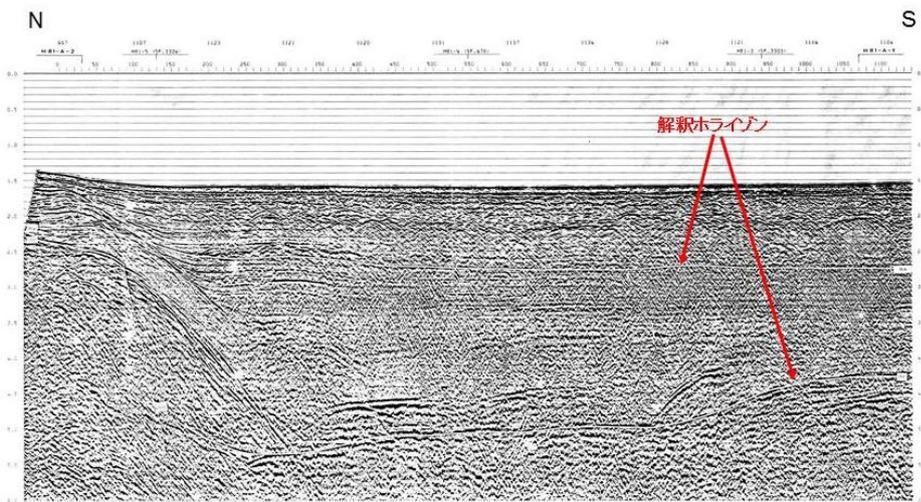


図 33-1 ベクトル化処理の対象紙断面図のイメージ（解釈あり）  
「北陸～隠岐沖」調査 1981

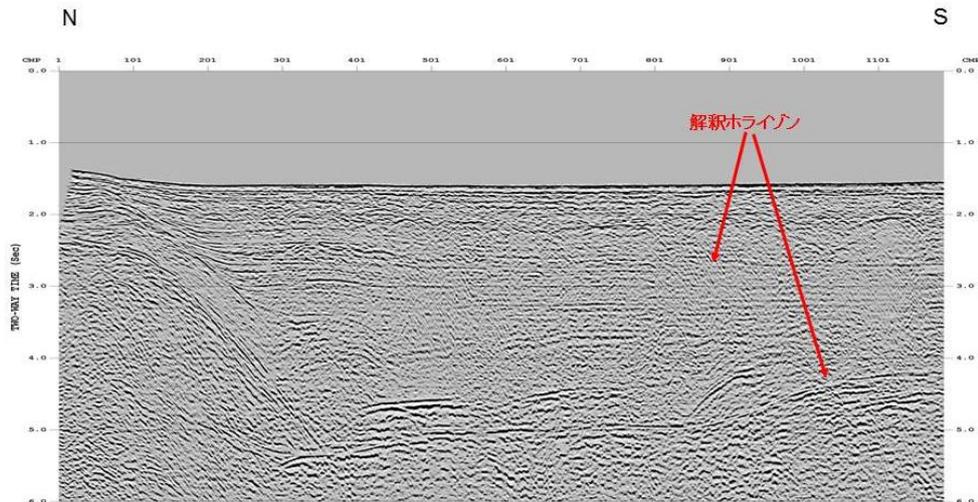


図 33-2 ベクトル化处理適用後の重合時間断面図  
「北陸～隠岐沖」調査 1981

## 7. まとめ

JOGMEC の既存の二次元海上反射法地震探査データを、最新の技術で統一的な再解析を行い、以下に本解析の結果を得た。

- 1) 対象記録において最も解釈の妨げとなる要因は多重反射波の存在であった。対象海域では海底深度が変化することから、様々な種類の多重反射波が発生していたため、各種手法を複合的に組み合わせた多重反射波抑制処理を検討し、適用することで多重反射波を抑制することができた。
- 2) 短波長の構造不均質が顕著で、海域活断層の解釈に重要な測線については、重合前時間マイグレーションを適用することで、標準解析に比較して高 S/N で分解能の高いイメージが得られた。
- 3) 海域活断層の深部延長といった微弱な深部反射波のイメージングが必要と判断された測線については、MDRS 解析を実施することで、S/N が大きく改善し深部反射波の品質を向上できた。
- 4) 古い年代の解析対象データで発震記録に欠損が確認された記録については、紙面で残存する重合記録断面図をデジタル化し、重合後処理を行うことで、再解析結果には劣るものの解釈に資する断面図が得られた。

### (イ) 海洋研究開発機構データ

海洋研究開発機構データは、444 チャンネルの長大ストリーマーと大容量のチューンドエアガンを用いたもので、深部のイメージングも期待できる。主なデータ処理は、トレースエディット、F-K フィルター、バンドパスフィルター、振幅回復、CMP 編集、最小位相変換フィルター、プレディクティブデコンボリューション、DMO 処理、多重反射波除去処理、速度解析、NMO 補正、CMP 重合、F-X デコンボリューション、キルヒホッフ時間マイグレーションである（ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト 平成 21 年度成果報告書, 2009; 同 平成 22 年度成果

報告書, 2010; 同 平成 23 年成果報告書, 2011; 同 平成 24 年度成果報告書, 2012; No et al., accepted)。多重反射波除去処理も行っており可データ処理後の記録断面の品質は確保されているとして、既に得られている反射記録断面をそのまま使用することとした。

(ウ) 産業技術総合研究所データ

産業技術総合研究所のデータは、GH85-2, GH85-4, GH86-2, GH86-4, GH87-2, GH87-4, GH88-2, GH88-4 調査航海のシングルチャンネルデータであるが、試行錯誤的に処理内容を検討し、新たな反射記録断面を作成した。ナビゲーションデータの信頼性を確認し、解釈に使用できるデータを抽出した。元データは、振幅のバランスや位相の連続性に改善要素があった。振幅補償、ウェーブエフェクトの除去、デコンボリューション、F-X プレディクションフィルター、ミュート、時間マイグレーション、ゲイン調整を実施した(図 32)。特に、F-X プレディクションフィルターは水平方向の位相の連続性を改善するフィルターであり、これらのデータのクオリティの改善に大きく寄与した。これらのデータはショット間隔の時刻を一定としてデータを取得されている。仮に使用船舶の測線に対する速度が天候や潮流などによりゆらいでしまうと、現実的なショット間隔がばらばらになってしまう。この場合、時間マイグレーションを適用しても除去すべき散乱波の走時をそろえることができず、なかなかマイグレーション処理による改善がみられないことになる。実際、このようなケースはナビゲーションのデータの品質に依存するので、これ以上の改善は望めない。しかし、このような事例は一部であるため、時間マイグレーション処理は反射断面の品質向上には有益である。図 32 に示した処理フローをシングルチャンネル反射法データの標準処理として用いることとした。

この処理フローに従って処理した結果、堆積層内の変形や層序もよく確認できた。産業総合研究所データについてはデータ再処理もルーチン化でき、H26 年度は日本海全体に広げる予定である。

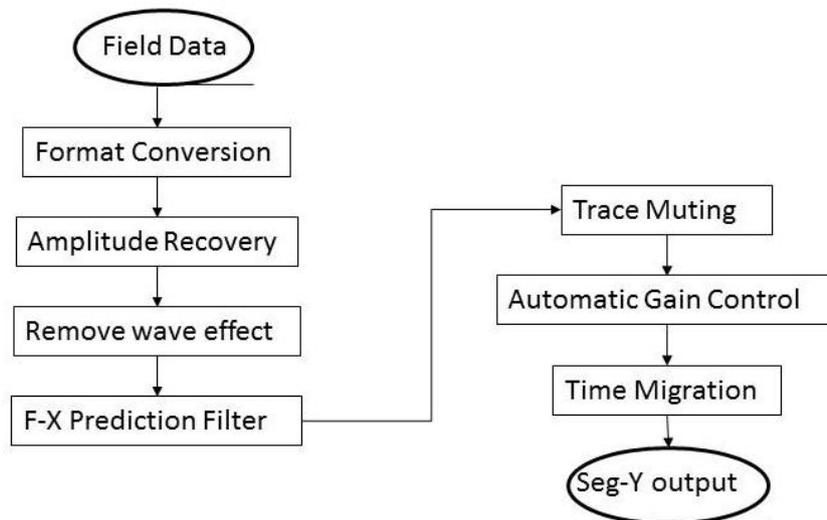


図 32 シングルチャンネルデータの処理フロー

## 2) 3次元速度構造ボリューム構築

断層解釈において、その傾斜を見積もるためには、時間断面を深度断面に変換する必要がある。解釈自体を深度断面で行うことも可能であるが、深度断面作成時の速度構造が統一的でなければ、測線ごとのタイが取れなくなることは自明である。各機関とも深度断面を作成しているが、必ずしも速度構造は同一ではなく、整合しないことが多々ある。一般にMCSデータにおける速度解析は反射面が同定できなければ速度解析はできない。また、測線に対してオフセットしたところからの散乱波や反射波を速度解析に使うと遅い速度が見積もられてしまう。そのため、本プロジェクトでは、海底地震計を用いた屈折法探査結果をもとに3次元の測度ボリュームを作成する方針とした。

最近の屈折法探査解析は客観性を重視し、トモグラフィックインバージョンの手法を用いて構造イメージングを実施することが多い。しかし、この手法は速度構造の内部に特異点を発生させることもあり、これは残っていると3次的に影響が広がってしまう。そのため、シンプルなレイヤー構造を作成して速度ボリュームを構築する方針とした。図33に測線図を図34に日本海東縁における屈折法探査データに基づくレイヤー構造を示す。

H26年度では時間断面に変換した速度構造を用いて、MCSデータを用いて各レイヤーの空間的な広がり求め、速度構造ボリュームを構築する予定である。

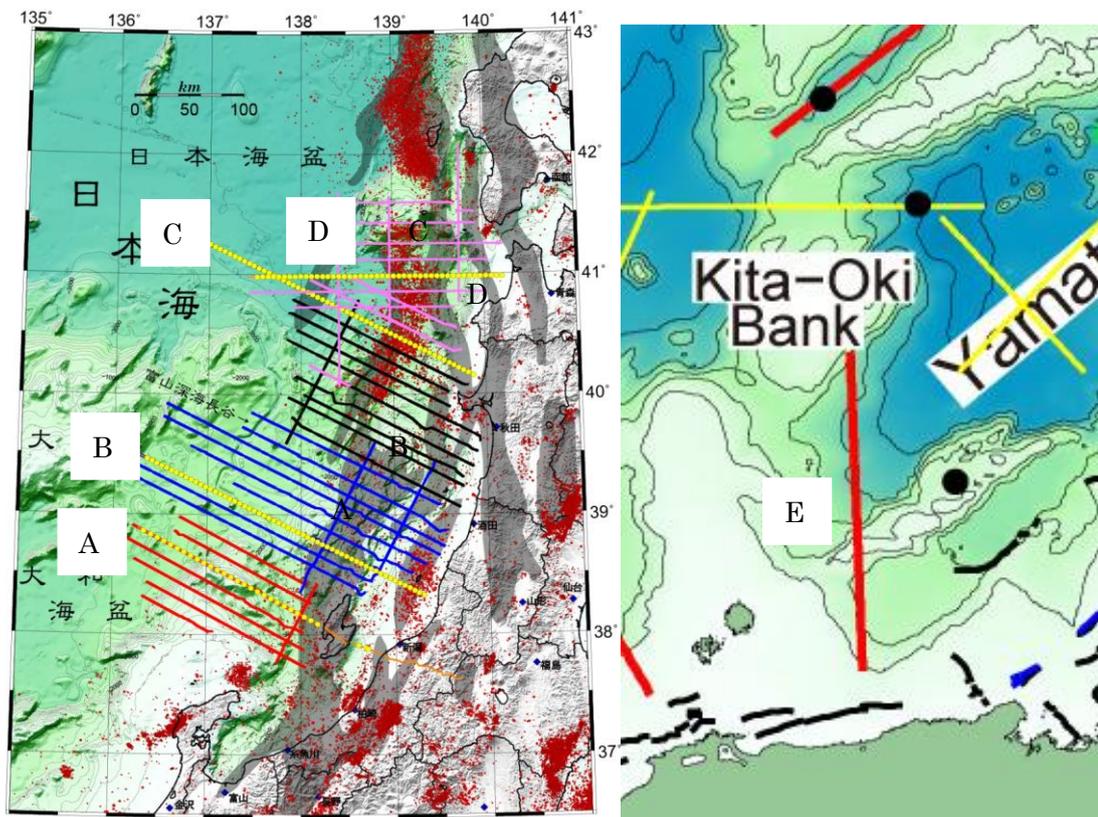


図33 ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究の中で実施された構造探査測線。黄色丸が海底地震計を示す。この4本を主に用いて、速度構造ボリュームを作成する。灰色はOkamura et al. (2007)が示したひずみ集中帯、赤点は気象庁一元化震源を示す。A, B, C, Dは図34に示した速度構造の便宜的な測線番号を示す。

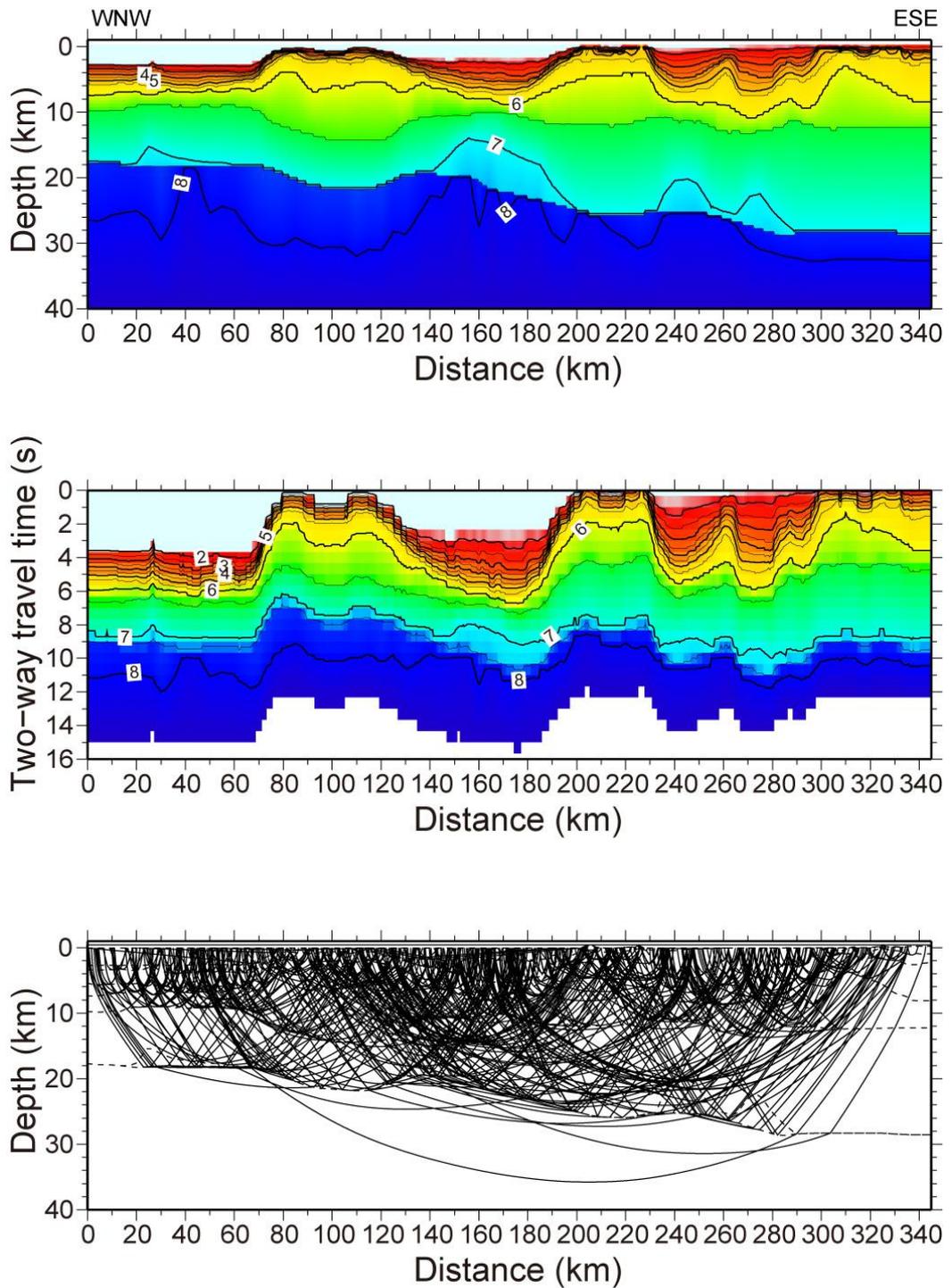


図 34-1 能登半島沖～佐渡島～越後平野に至る速度構造 (図 33 の B)。(上)速度構造。(中)時間断面に変換した速度構造。(下)速度構造の信頼区間を示す波線図。

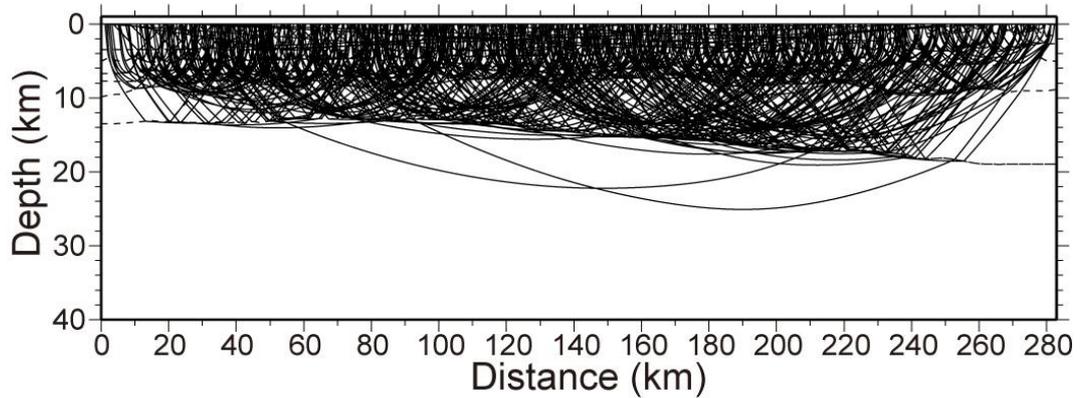
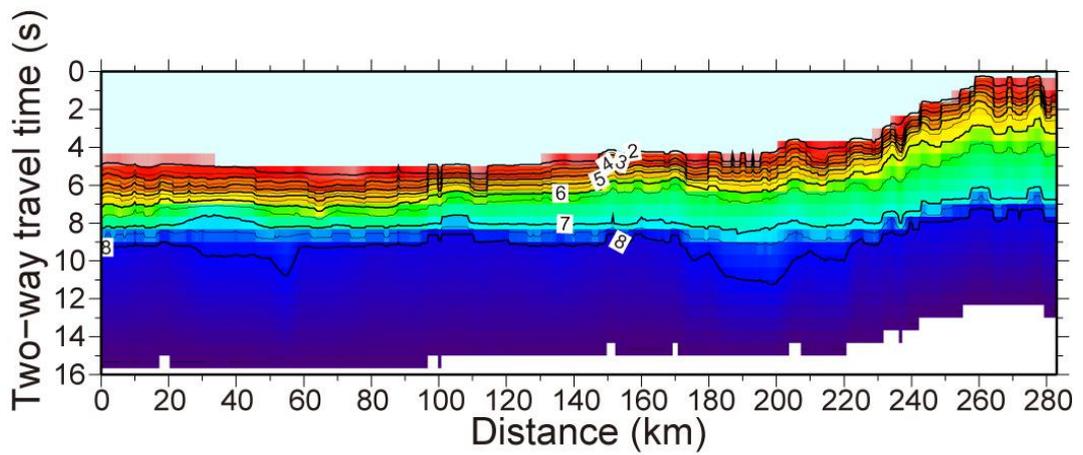
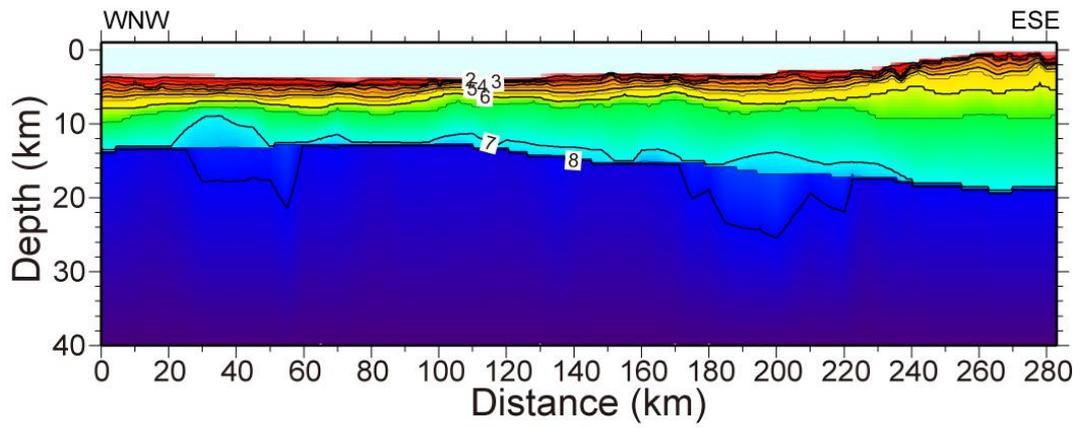


図 34-2 大和堆～栗島沖に至る速度構造 (図 33 の B)。(上) 速度構造。(中) 時間断面に変換した速度構造。(下)速度構造の信頼区間を示す波線図。

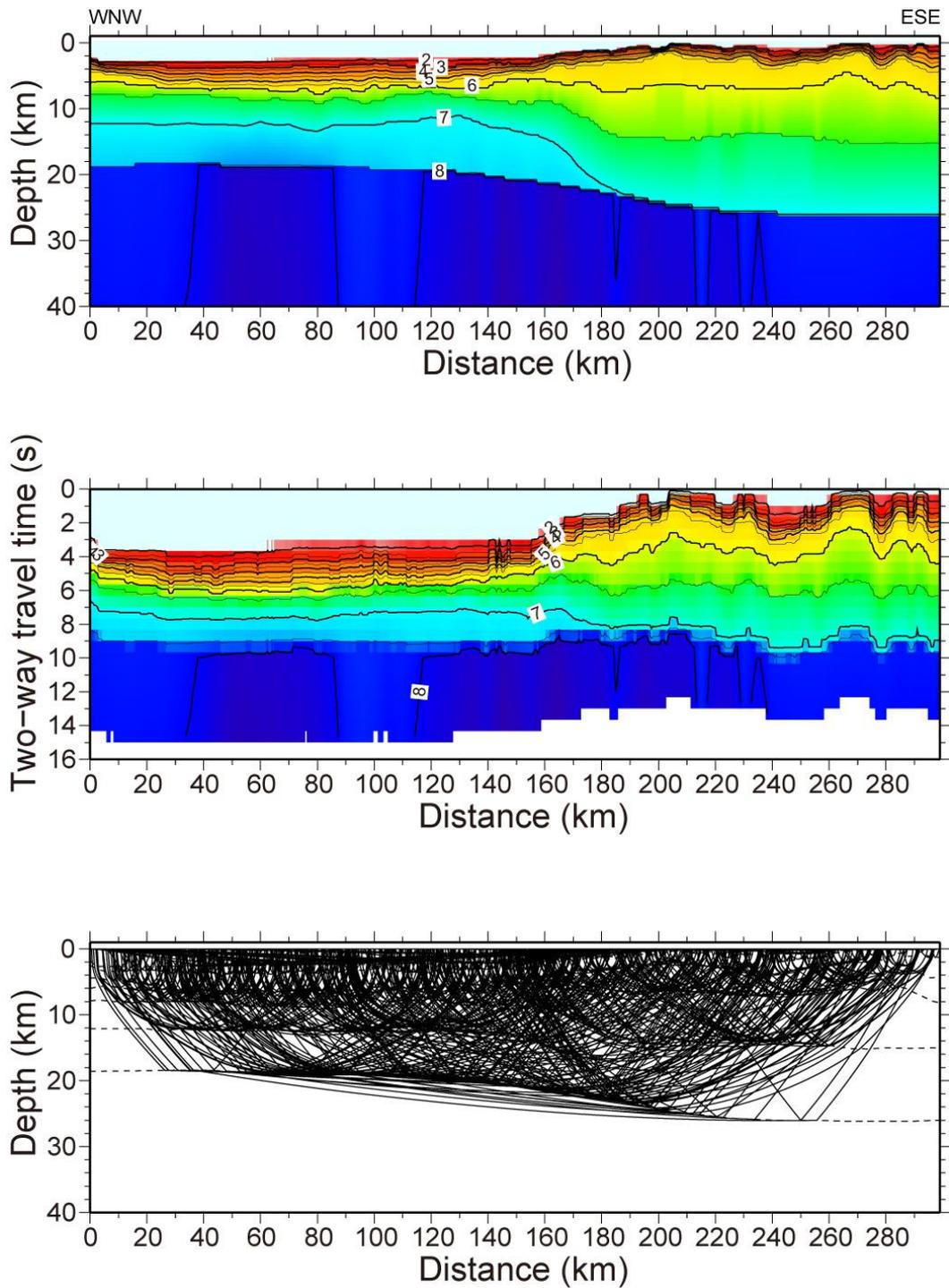


図 34-2 日本海盆～男鹿半島沖に至る速度構造 (図 33 の C)。(上) 速度構造。(中) 時間断面に変換した速度構造。(下) 速度構造の信頼区間を示す波線図。

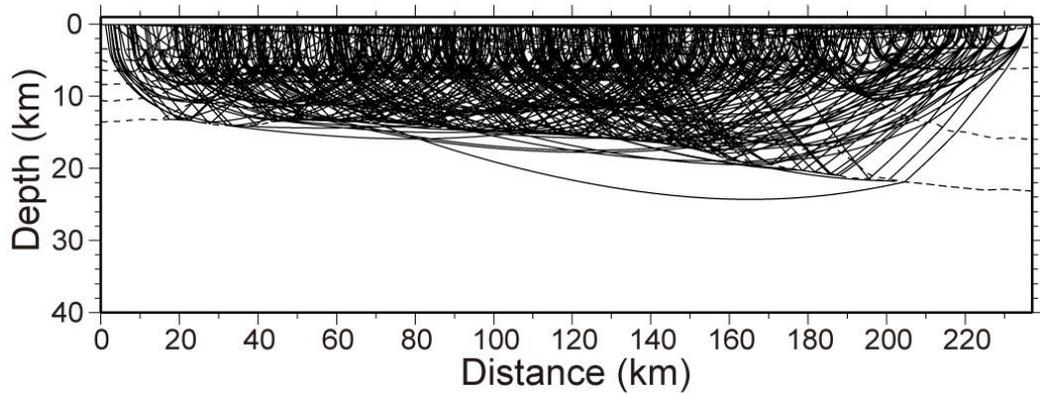
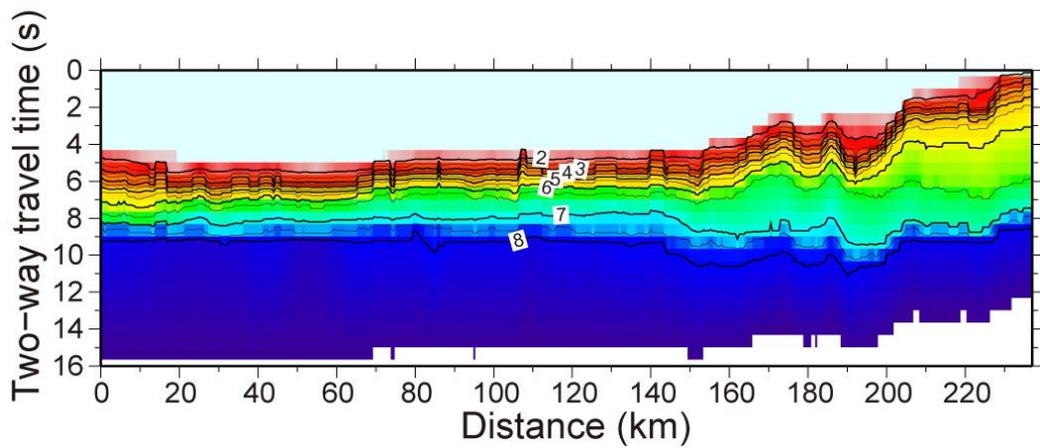
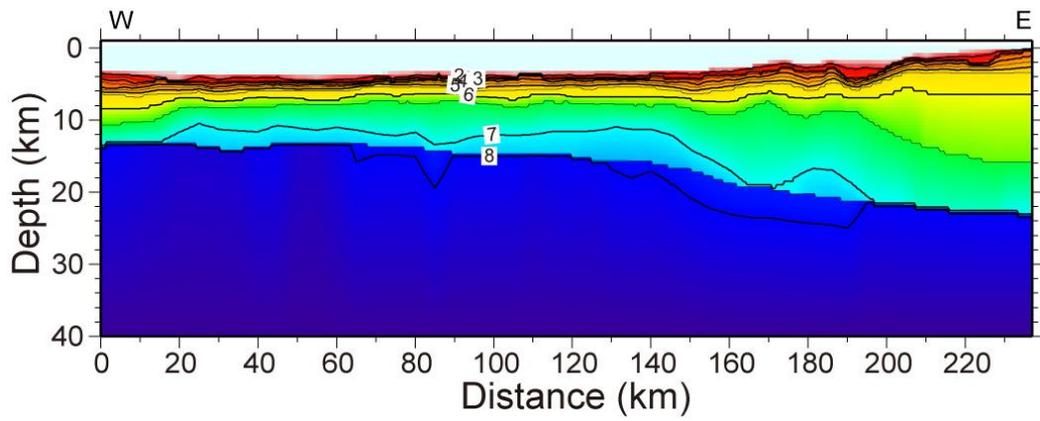


図 34-4 日本海盆～津軽半島沖に至る速度構造（図 33 の D）。（上）速度構造。（中）時間断面に変換した速度構造。（下）速度構造の信頼区間を示す波線図。

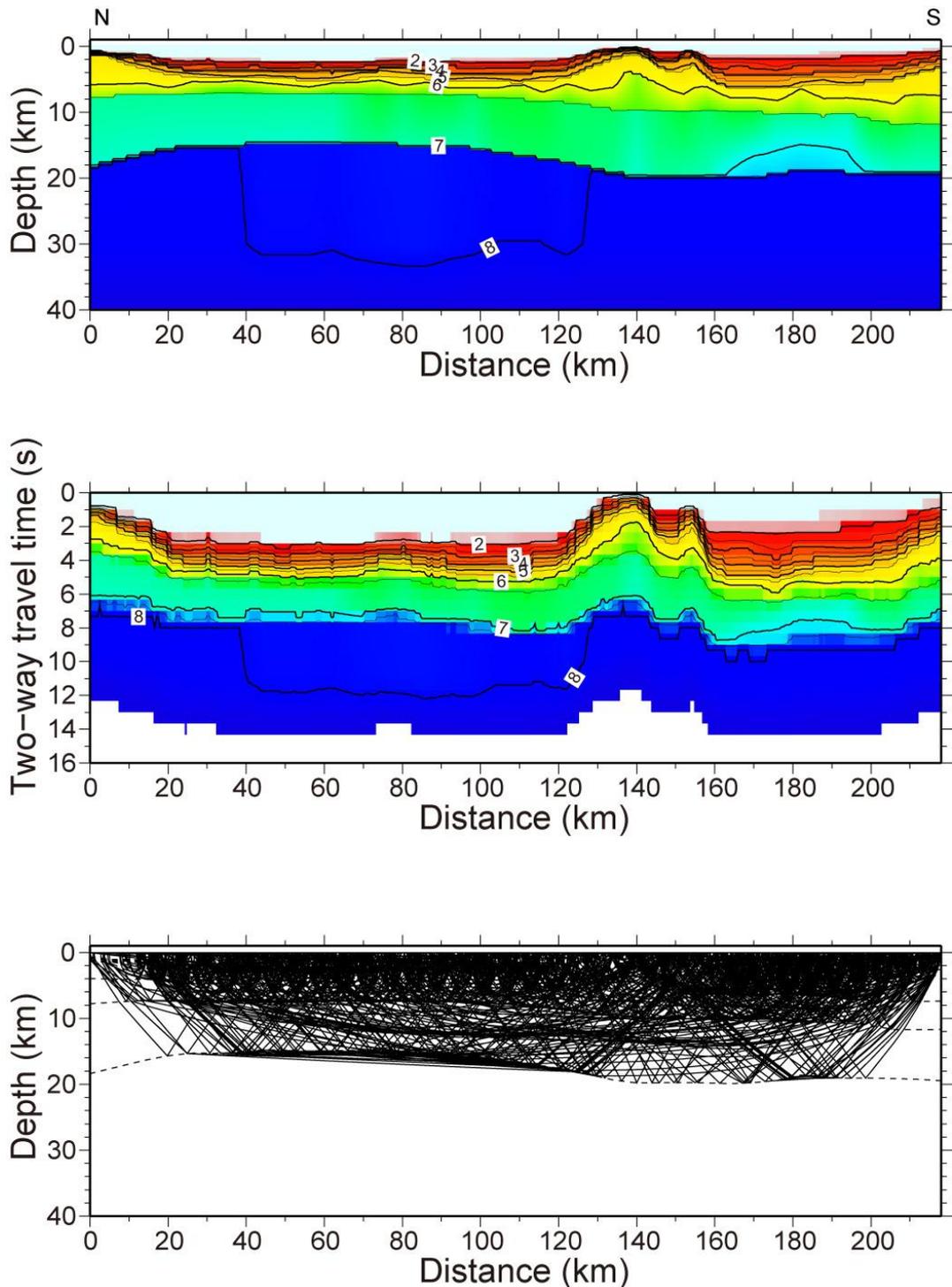


図 34-5 北隠岐堆～鳥取沖に至る速度構造 (図 33 の E)。(上)速度構造。(中)時間断面に変換した速度構造。(下)速度構造の信頼区間を示す波線図

### 3) 解釈

今年度はデータ借用についての各機関との調整とデータ収集、データ再処理と処理フローの策定に比重を置いたため、解釈の作業はあまり進んでいない。しかし、H26年度からの本格的な解釈作業に向けて、既往の解釈結果等の情報を収集した。例えば、日本海盆から大和海盆にかけては、西側の海盆域では正断層が、海盆より陸側ではインバージョンテクトニクスが発達し逆断層が分布することも明らかになっている (図 35)。また、海盆との境界域ではモホ面まで切るような大きな断層が発達して

おり（図 36）、これらが 1983 年の日本海中部地震の震源断層であったことが知られている。一方、1964 年の新潟地震など、沿岸に近いところでは、上部地殻内で断層が発達していることも見えてきている。これらの知見を生かし、現実の再処理済みのデータについて本格的な解釈を加えていく。

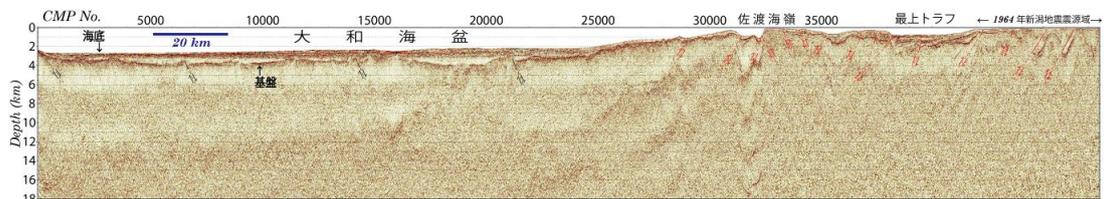


図 35 大和海盆～栗島沖に至る測線の反射記録断面と解釈（H25 年度ひずみ集中帯における重点的調査観測・研究の報告書より引用）。黒線は正断層、赤線は逆断層が発達している場所を示す。

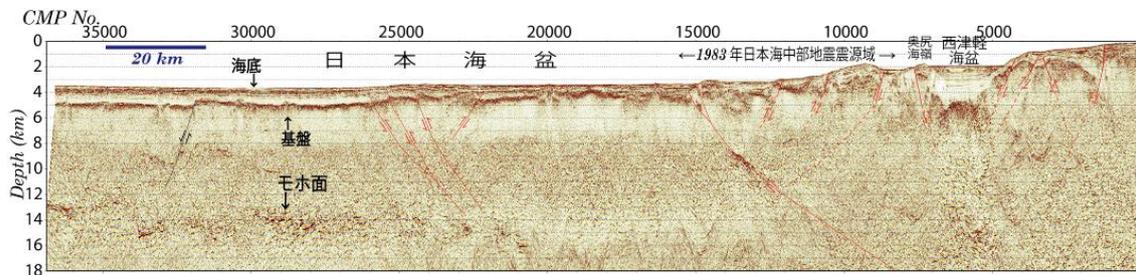


図 36 日本海盆～男鹿半島沖に至る測線の反射記録断面と解釈（H25 年度ひずみ集中帯における重点的調査観測・研究の報告書より引用）。黒線は正断層、赤線は逆断層が発達している場所を示す。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

古いデータのクオリティコントロールを終え、多重反射波除去を通じて十分な再処理の効果を出すことができた。シングルチャンネル反射データも記録の品質を向上させることができた。一連の処理フローを固めることができたことも今後につなげることができる。一方、予定通り日本海の半分の海域のデータ再処理が終えているものの、解釈は既往の解釈結果の収集にとどまっており、3次元速度構造ボリュームの構築もこれから本格化する必要がある。H26年度中の断層モデル構築に向けて、これらの作業を急ぐ必要がある。

#### (e) 引用文献

石油開発公団，昭和 48 年度大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北陸」調査報告書,1974

石油開発公団，昭和 49 年度大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北陸－山陰」調査報告書,1975

石油開発公団，昭和 51 年度大陸棚石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北海道西部

－新潟海域」調査報告書,1977

石油公団, 昭和 56 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「富山沖・北陸～隠岐沖・山陰沖」調査報告書,1982

石油公団, 平成 1 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「山陰～北九州沖」調査報告書, 1990

(独) 産業技術総合研究所, 響灘・見島沖海域 GH85-2 及び GH85-4 調査航海  
昭和 60 年度研究報告書 西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究 ー響灘・見島沖海域ー,1985

(独) 産業技術総合研究所, 日御碕沖・鳥取沖海域 GH86-2 及び GH86-4 調査航海  
昭和 61 年度研究概要報告書 西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究 ー日御碕沖・鳥取沖海域ー,1986

(独) 産業技術総合研究所, 経ヶ岬沖・ゲンタツ瀬海域 GH87-2 及び GH87-4 調査航海  
昭和 62 年度研究概要報告書 西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究 ー経ヶ岬沖・ゲンタツ瀬海域ー,1987

(独) 産業技術総合研究所, 能登半島周辺海域 GH88-2 及び GH88-4 調査航海  
昭和 62 年度研究概要報告書 西南日本周辺大陸棚の海底地質に関する研究 ー能登半島周辺海域ー,1987

仲西理子・高橋成実・山本揚二郎・高橋努・尾鼻浩一郎・小平秀一・金田義行, 構造研究に基づく南海トラフ域の 3 次元速度構造モデル, ブルーアース 2014 シンポジウム ポスター講演, 2014

ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト, 平成 21 年度成果報告書, 2009.

ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト, 平成 22 年度成果報告書, 2010.

ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト, 平成 23 年度成果報告書, 2011.

ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト, 平成 24 年度成果報告書, 2012.

松本剛, 笠原敬司, 平田賢治, 一北岳夫, フィリップ・ジャービス, 西澤あずさ, 倉本真一, 仲村明子他, プレート収束域における海底地下深部構造－MCS95 調査航海成果速報, JAMSTEC 深海研究, 第 12 号, 45-64, 1996

Yukinobu Okamura, Tatsuya Ishiyama, and Yukio Yanagisawa., Fault-related folds above the source fault of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake, in a fold-and-thrust belt caused by

basin inversion along the eastern margin of the Japan Sea,  
J.Geophys.Res.,112,BS03S08,doi:10.1029/2006JB004320, 2007

Henley, D.C., Coherent noise attenuation in the radial trace domain: introduction and demonstration,  
CREWES Research Report Vol. 11, 1999.

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), KR09-09 Cruise Report  
Intensive seismic study around the deformed zone in the eastern margin of the Japan Sea  
(Multichannel seismic reflection survey), 2009

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), KR10-10 Cruise Report  
Intensive seismic study around the deformed zone in the eastern margin of the Japan Sea  
(Multichannel seismic reflection survey), 2010

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), KR11-08 Cruise Report  
Intensive seismic study around the deformed zone in the eastern margin of the Japan Sea  
(Multichannel seismic reflection survey), 2011

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), KR12-10 Cruise Report  
Intensive seismic study around the deformed zone in the eastern margin of the Japan Sea & the  
Japan Trench, 2012

No, T., Sato, T., Kodaira, S., Ishiyama, T., Sato, T., Takahashi, N., and Kaneda, Y., The source  
fault of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake revealed by seismic imaging, Earth Planets Sci.  
Lett., accepted.

Verschuur, D.J., Berkhout, A.J., and Wapenaar, C.P.A., "Adaptive surface-related multiple  
elimination," Geophysics 57, 9, 1166-1177, 1992.