

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
国立研究開発法人海洋研究開発機構	グループリーダー代理	高橋 成実
国立研究開発法人海洋研究開発機構	調査役	及川 信孝
国立研究開発法人海洋研究開発機構	特任技術副主幹	清水祥四郎
国立研究開発法人海洋研究開発機構	特任技術副主幹	安藤 五郎
国立研究開発法人海洋研究開発機構	特任技術主事	新井 麗
国立研究開発法人海洋研究開発機構	特任技術主事	勝山美奈子
国立研究開発法人海洋研究開発機構	特任技術主任	田中 恵介

(c) 業務の目的

統一的断層解釈を行うために収集された反射法探査データ等から、海底下最大10～20km程度までの反射面の分布を把握するため、ノイズ除去手法などの最新のデータ解析を加え、深部イメージングの品質を向上させる。DBに登録後、断層の解釈、及び断層の3次元的な広がり进行评估する。その後、深さ方向を時間軸から深度軸に変換するための3次元速度構造を作成して解釈した断層を深度領域に変換し、その中から主断層を選定しサブテーマ（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、アドバイザー、評価助言委員の方々から意見を頂き、適宜改訂する。

(d) 7ヵ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、今後の解析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。併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：

南西諸島海域のデータの再解析と解釈を行い DB に登録する。3 次元速度構造モデ

ルの構築を開始する。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て改訂する。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とともに、適宜必要に応じて改訂を行う。また、断層モデルは適宜サブテーマ(3)に提供する。

5) 平成 29 年度：

南西諸島海域のデータの再解析と解釈をとりまとめ DB に登録する。3 次元速度構造モデルを構築する。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て適宜改訂を行い、サブテーマ(3)に提供する。

6) 平成 30 年度：

伊豆小笠原海域のデータの再解析と解釈を行い DB に登録する。3 次元速度構造モデルの構築を開始する。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て改訂する。また、断層モデルは適宜サブテーマ(3)に提供する。

7) 平成 31 年度：

南海トラフ域のデータの再解析と解釈を行い DB に登録する。3 次元速度構造モデルの構築を開始する。解釈結果はアドバイザーからの助言を得て改訂し、断層モデルは適宜サブテーマ(3)に提供する。また、情報展開のためのシステムを試作する。

(2) 平成 26 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 25 年度に引き続き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実施した。データの再解析については、主に能登半島沖東方～北海道西部にかけての海域で、石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）のマルチチャンネル反射法データ（MCS データ）のうち、測線長計約 15,000 km を実施した。また石油資源開発株式会社（JAPEX）から提供されたデータのうちデジタルデータが存在しない約 1,500 km に対してはベクトル化解析を行い、デジタルデータを作成した。産業技術総合研究所（AIST）のシングルチャンネル反射法探査データ（SCS データ）についても解析を行った。

また、日本海海域において速度構造モデルを構築した。作成方法についても議論し、処理フローを作成した。速度構造モデルを作成するにあたり、反射法地震探査の処理過程で使われる重合速度も使用した。日本海においては OBS 調査測線が少ないが、反射法地震探査のデータを使用することで、速度に関する情報を増やすことができた。

解釈を開始するに当たり、昨年度は地震探査（以下“震探”）データ、坑井データ他、文献等々の収集を図り、能登半島より西側の海域の一部震探データに対して、断層解釈の際に問題となる種々多重反射を取り除く処理、様々なデータ取得仕様を統一的な波形とする波形変換処理等の再処理を実施した。今年度の対象海域は、対馬沖から稚内沖に至る日本海全域であったが、解釈作業は、昨年度に再処理の済んでいた能登半島の西側海域から始め、その後、東側の海域に移って実施した。

(b) 業務の実施方法

本年度実施した基本的なマルチチャンネルデータの再解析フローの内容は、データチ

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解析、簡易速度解析の後にノイズ抑制解析、各種多重反射解析、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解析した。特に多重反射波解析については、海水面に介在する長周期多重反射波を抑制する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RadialTrace Deconvolution (RTD) を用いた。デジタルデータが存在しない測線については、重合断面図をスキャナーで読み取りベクトル化解析によりデジタルデータを作成した。

AIST等の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解析が中心である。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。

海洋研究開発機構 (JAMSTEC) データ (2014年 「日本海地震・津波調査プロジェクト」 KR14-08航海) 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。船上処理の段階ではあるが、主なデータ解析は、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解析、多重反射波除去解析、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。多重反射波除去解析も行っており、記録断面の品質は確保されているとして、解釈資料にそのまま使用することとした。

解釈資料としては、これらの再解析したデータに加え、JOGMECとJAMSTECの近年取得された再解析を必要としないデータを合わせて解釈作業に使用した。解釈作業にあたっては、既存の解釈結果や文献も参考に解釈を進めた。

3次元速度構造構築については、日本海海域の全域で海底面、A-horizon、B-horizonの解釈を行い、surfaceを作成し、層構造を作成した。日本海を2つの領域に分けた後、反射法地震探査データやOBS調査データ及び坑井の速度データなどを使用して、基本となる速度キューブを作成した。その速度キューブに層構造を当てはめ、各層構造に様々な情報から速度ファンクションを与え、速度構造モデルを作成した。速度構造モデルは水平方向1kmグリッド、鉛直方向100m間隔の解像度で作成した。作成した速度構造モデルを用いて、反射法地震探査データ及び断層情報の深度変換を行った。

解釈作業は、調査実施期間の異なる反射断面を用いるため、時間断面上で解釈を加え、統一的な3次元速度構造モデルを用いて深度変換し、断層の形状を確認して、最終的な断層解釈とした。読み取った後、断層の空間的な連続性を同定することになるが、解釈の際に地形や地質構造の特徴、断層下端の位置に従ってラベリングし、その特徴の連続性を判断の基準とした。空間的に同定した断層分布は、日本海における大規模地震に関

する調査検討会（事務局：国土交通省、内閣府、文部科学省）（以下、日本海検討会）の海域断層ワーキンググループにおける検討断層位置図（以下、ワーキンググループ断層図）や各県が実施した断層調査の報告書電力会社による報告書との整合性を確認した。

（c）業務の成果

1) データ再解析

本年度は、JOGMEC、JAPEx 及び AIST データの内、能登半島より東側海域のデータの再解析を検討し、解釈資料へとつなげた。ここではそれぞれのデータのクオリティと再解析内容について具体的に記述する。処理内容自体は、平成 25 年度と同様であるが、テクトニクスや堆積環境等の違いにより、実施した様々な処理パラメータを詳細に検討し、各海域に最適なパラメータを採用した。

a) 再解析を実施した既往探査データの概要

今回の再解析の対象測線の範囲は、一部調査の測線が能登半島西方まで延びるが、ほぼ能登半島東方～北海道西部のエリアである。表 1 に JOGMEC の再解析対象となった 15 調査の概要を示す。

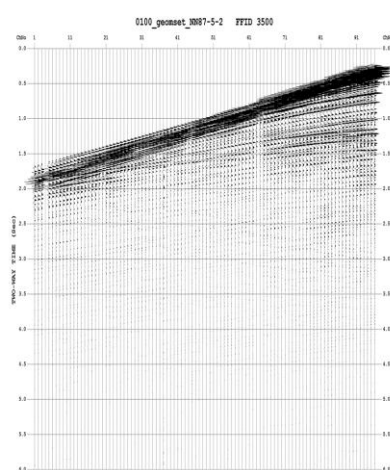
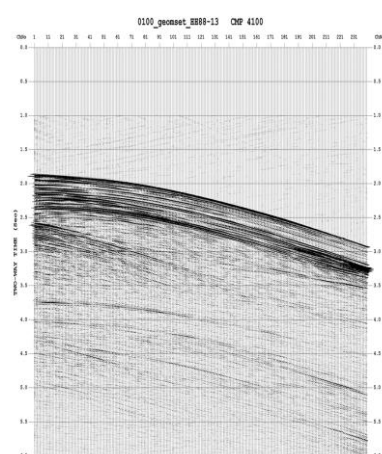
本年度の JOGMEC データについては、陸域と水深約 30m 以浅の沿岸海域を結ぶ浅海域の調査も再解析データに含まれるため、便宜的に陸域～浅海域を対象とした調査を浅海調査、それ以外の調査を深海調査と記述する。

深海調査の発震記録をみると、「富山沖(1981)」「北海道西部～新潟海域(1976)」「石狩～礼文島(1970)」「秋田～山形～新潟陸棚エアガン(1969)」の 4 調査ではデータ取得時に 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。「北海道西部～北東部海域(1988)」ではデータ取得時のローカットフィルターは 3Hz と上記調査よりも低く、「西津軽～新潟沖(1987)」「大和堆(1985)」ではローカットフィルターは適用されていないため、これら 3 調査では一部の発震記録で Swell Noise と思しき低周波ノイズが見られる。また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についてはほとんどの記録で見られず品質は良好であるが、一部の記録では傾斜ノイズが見られる。深海調査の発震記録例を図 1 (a)、(b) に示す。

浅海調査のデータ概要は以下の通りである。陸域受振点の記録は、環境ノイズの影響により海域に比較して S/N が悪いことが確認できる。陸域および海陸接続域での発震記録では、表面波と思しき線形ノイズが卓越しており、一部の記録では反射波の識別を困難にしている。海域発震点の記録では、短周期の多重反射波が見られる。また海域の一部の発震記録では、パルスノイズが見られる。浅海調査の海陸接続測線では、陸域と海域でノイズの状況が大きく異なるため、陸域と海域で異なるノイズ抑制解析を適用する必要がある。浅海調査における発震記録の例を図 2 (a)、(b) に示す。

表 1 再解析対象調査名

調査名	測線数	測線長(km)	発震点数	発震点間隔(m)	受振器間隔(m)	Sampling間隔(msec)	記録長(sec)
北海道西部～北東部海域(1988)「北海道西部」	86	2,684	107,431	25	12.5	4	8
西津軽～新潟沖(1987)	112	4,197	167,973	25	25	4	8
大和堆(1985)	40	3,711	148,478	25	25	4	5
富山沖(1981)「富山沖」	22	955	38,215	25	50	4	5
北海道西部～新潟海域(1976)「青森西部」	9	605	12,103	50	50	4	5
北海道西部～新潟海域(1976)「大和堆」	6	699	13,980	50	50	4	5
石狩～礼文島(1970)	35	1,912	19,150	100	100	4	5
秋田～山形～新潟陸棚エアガン(1969)	27	847	8,495	100	100	4	5
天北浅海域(1996)	5	153	6,122	25	25	4	8
新潟～富山浅海域(1992)	4	115	4,589	25	25	4	8
新潟～富山浅海域(1991)	2	89	3,573	25	25	4	8
新潟～富山浅海域(1990)	4	102	4,088	25	25	4	8
秋田～青森浅海域(1989)	3	58	2,309	25	25	4	8
秋田～青森浅海域(1988)	3	46	1,857	25	25	4	8
秋田～青森浅海域(1987)	3	39	1,572	25	25	2	6

図 1(a) 発震記録例
「西津軽～新潟海域」(1987)図 1(b) 発震記録例
「北海道西部～北東部海域」(1987)

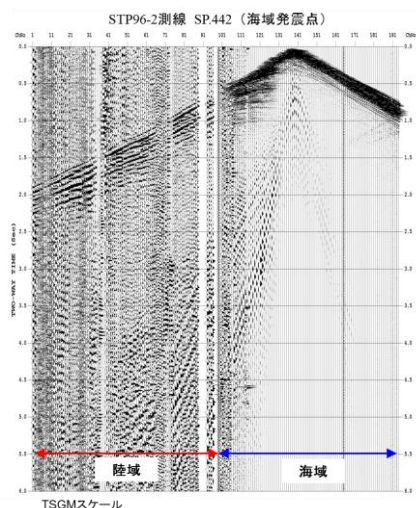


図 2(a) 発震記録例（海域発震）
「天北浅海域」（1996）

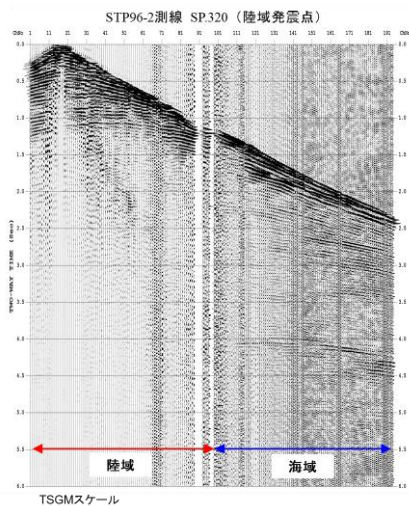


図 2(b) 発震記録例（陸域発震）
「天北浅海域」（1987）

AIST データは、GH77、GH78、GH89、GH90、GH91、GH92、GH93、GH94、GH95、GH96、GH98、GH99 調査航海で取得されたデータで、一部マルチチャンネルデータが存在するがそのほぼすべてがシングルチャンネルデータである。

b) 再解析概要

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解析、重合前時間マイグレーション (PSTM) 解析、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、一部に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率が 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、残存しない場合は重合後記録断面図のベクトル化解析で作成されたデジタルデータを用いて、重合後の信号強調解析、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。主な解析項目について以下にまとめる。

複合型ノイズ抑制解析

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解析を検討し、適用した。浅海調査以外（以後、深海調査）では、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。低周波数の強振幅ノイズが見られた調査では F-X エディットを、線形ノイズが確認された調査では速度フィルターを適用した。浅海調査では、深海調査に比較してノイズの影響が大きいため、深海調査で採用した手法に加えて多くの手法を試みた。探鉱機に由来するノイズを抑制するためにパルスノイズ抑制解析を、海域において震源由来のノイズを抑制する目的で受振記録での F-X 予測フィルターを、屈折初動とその繰り返しを抑制する目的で線形ラドンフィルターを適用した。ノイズ抑制手法の選択およびパラメータの決定においては、反射波を損傷しな

いように細心の注意を払った。

複合型多重反射波抑制解析

深海調査の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解析を検討し適用した。短周期多重反射波の抑制には、標準解析で適用される RTD 解析を用いた。長周期多重反射波の抑制には、SRME 解析を用いた。SRME 解析は、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、仕様上は追加解析であったが全測線に適用することとした。ただし、SRME 解析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、放物線ラドン変換(Parabolic Radon Transform、PRT)解析を検証し、効果が見られた場合は適用することとした。ところで、深海調査ではニアオフセットギャップが大きく、浅海域では海底面反射波が取得できないため、波動方程式に基づく SRME 法や周期性に基づく RTD 解析では、海底面に起因する 1 回目の短周期多重反射波の抑制は困難である。このようなケースでも走時差に基づく PRT 解析では、短周期多重反射波の抑制効果が期待できるため、この手法を検証し、効果が見られた場合は適用することとした。昨年度の解析結果から、PRT 解析が効果を発揮するのは受振点間隔が小さい調査であり、受振点間隔が 50m 以上ではエイリアジングの影響により PRT 解析の誤差が大きくなると考えられるため、PRT の対象調査を決定する際には受振点間隔を考慮することとした。PRT 解析の適用測線を表 2 に示す。なお、本解析では SRME 解析を海域調査の全測線に適用したため、複合型多重反射波抑制解析の対象測線長は PRT の適用測線長のこととなる。

重合前時間マイグレーション(PSTM)解析

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、PSTM を適用した。この解析の適用測線を表 2 に示す。

Multi-dip 型 CRS (MDRS) 解析

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 解析を適用した。CRS 解析では、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 解析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アルゴリズム(MDRS

解析)を採用し、深部反射波イメージングの高精度化を図った。この解析の適用測線を表 2 に示す。

表 2 PRT, PSTM, MDRS 処理適用測線

S63 北海道西部～北東部	PRT	PSTM	MDRS
測線名	16		
HH88-1			
HH88-2	○		
HH88-3			
HH88-4	○		
HH88-5			
HH88-6	○		
HH88-7	○		
HH88-8			
HH88-9			
HH88-10			
HH88-11			
HH88-12	○		
HH88-13	○		
HH88-14	○		
HH88-A			
HH88-B			
HH88-C	○		
HH88-D	○		
HH88-E	○		
HH88-F			
HH88-G			
HH88-H			
HH88-I	○		
HH88-J	○		
HH88-K	○		
HH88-L	○		
HH88-M	○		
HH88-N	○		

S62 西津軽～新潟沖	PRT	PSTM	MDRS
測線名	34	24	6
NN87-1	○	○	
NN87-2	○		
NN87-3	○		
NN87-4	○		
NN87-5	○	○	
NN87-6	○		
NN87-6A	○		
NN87-7	○	○	
NN87-8	○	○	○
NN87-8-2			
NN87-9		○	
NN87-10	○	○	
NN87-11	○	○	
NN87-12	○		
NN87-13	○	○	
NN87-14	○	○	
NN87-15	○	○	
NN87-16	○	○	
NN87-17	○	○	
NN87-18	○	○	
NN87-19		○	
NN87-2			
NN87-21	○	○	
NN87-22			
NN87-23			
NN87-24	○	○	○
NN87-25	○	○	○
NN87-A	○		
NN87-B	○		
NN87-C	○	○	○
NN87-D	○	○	○
NN87-E	○	○	○
NN87-F	○	○	
NN87-G	○		
NN87-H	○		
NN87-I	○		
NN87-J		○	
NN87-K			
NN87-L	○		
NN87-L-1	○		
NN87-M	○	○	
NN87-N		○	
NN87-O			
NN87-O-2			
NN87-P			
NN87-Q			
NN87-Q-1			
NN87-R			

ベクトル化解析

解析対象測線においてデータ欠損が多くデータ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と、JAPEX から提供された既存結果のうち重合後デジタルデータが存在しない測線については、フィルムあるいは紙面で残存する CMP 重合断面図をスキャナーで読み取り SEG-Y データを生成するベクトル化解析を実施した。ベクトル化解析の適用測線では、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。解析対象測線でベクトル化解析の適用測線を表 3 に示す。

表 3 ベクトル化解析の適用測線

調査名	測線名
S51 北海道西部～新潟海域	HN76-D
S56 富山沖	TT81-1
	TT81-3
	TT81-4
	TT81-5
	TT81-A
	TT81-B
S60 大和堆	YA85-4
	YA85-5
	YA85-7
	YA85-B
S62 西津軽～新潟沖	NN87-G
	NN87-H
	NN87-I
	NN87-J
	NN87-K
	NN87-N
	NN87-Q

c) 深海調査データ再解析詳細

深海調査のデータ解析作業は、図 3 に示すデータ解析フローに基づき実施された。この解析作業は、標準解析、PSTM 解析、MDRS 解析、ベクトル化解析の 4 つに大別できる。以下に各段階での解析内容を解析作業ごとに示す。

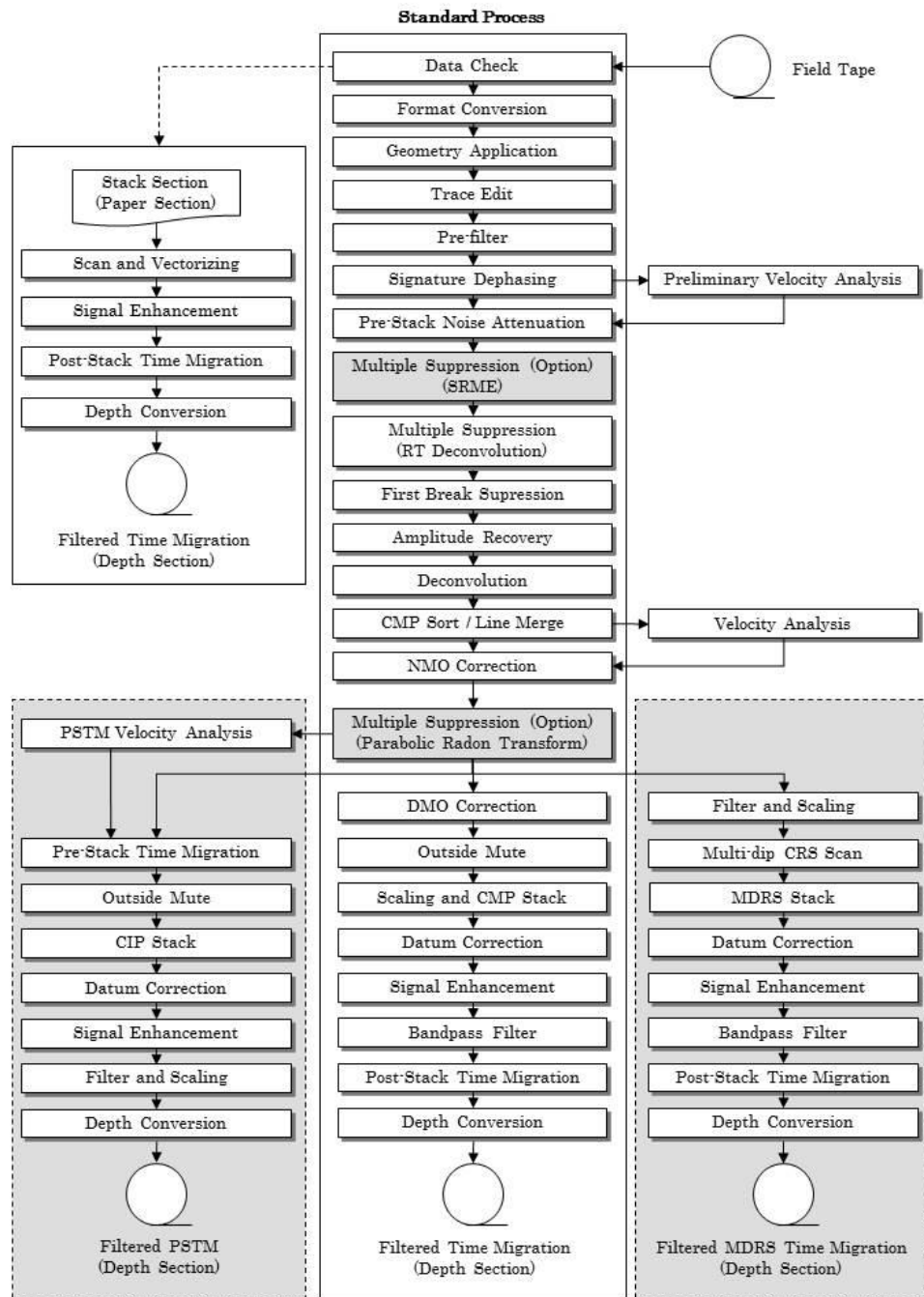


図3 データ解析フロー。PSTM解析とMDRS解析は一部に適用した。

i) 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(オブザーバーズログ)

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から内部フォーマット (SuperX フォーマット) への変換を行った。「西津軽～新潟沖 (1987)」ではテープに保存されたデータは CMP 編集後の記録であったため、トレースヘッダーの情報に基づき発震記録を再構築した。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、以降の解析に悪影響を及ぼす不良記録を読み取り、解析対象から除外するとともに、パルスノイズ抑制解析を併せて適用した。

5. プレフィルター (Pre-filter)

低周波数ノイズが確認された一部の調査では、波形変換解析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。「北海道西部～北東部海域 (1988)」ではデータ取得時のローカットフィルターは 3Hz と低く、「西津軽～新潟沖 (1987)」 「大和堆 (1985)」ではローカットフィルターは適用されていない。これら 3 調査では一部の発震記録で低周波数ノイズが確認されたため、帯域通過フィルターを適用した。

6. 波形変換解析 (Signature Dephasing)

各種ウェーブレットを用いて、最小位相変換を適用した。ここでは以下の優先度に従い、ウェーブレットを設定した。

- ・ エアガン震源波形観測記録：「西津軽～新潟沖 (1987)」
- ・ 合成エアガン波形：「北海道西部～北東部海域 (1988)」
- ・ ニアトレース記録から抽出した海底反射波形：その他の調査

「西津軽～新潟沖 (1987)」では、データ取得時と同一のエアガン構成及び発震深度によるファーフィールド震源波形記録が存在したため、これを用いた。波形変換解析では、ケーブルゴーストを付加したウェーブレットを用いて、最小位相変換を適用した。エアガン波形を用いた波形変換解析例を図 4 に、ニアトレース記録に対する最小位相変換の適用例を図 5 に、波形変換解析適用記録にホワイトニング型デコンボリューシ

ョンを適用した例を図 6 に示す。

「北海道西部～北東部海域(1988)」では、適切なエアガン震源波形観測記録は存在しなかったが、エアガンの容量及び配置の詳細情報が既存報告書に記載されていたため、Oakwood Computing Associates 社のエアガン波形シミュレーションソフトである Gundalf™を用いてエアガン波形を作成した。波形変換解析では、震源ゴーストとケーブルゴーストを含めた合成エアガン波形を用いて、最小位相変換を適用した。上記以外の調査では、適切なエアガン震源波形観測記録は存在せず、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く、シミュレーションソフトを使用したガン波形の作成もできなかったため、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。

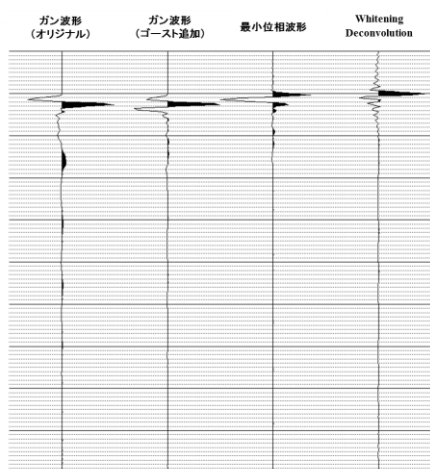


図 4 エアガン波形を用いた波形処理例

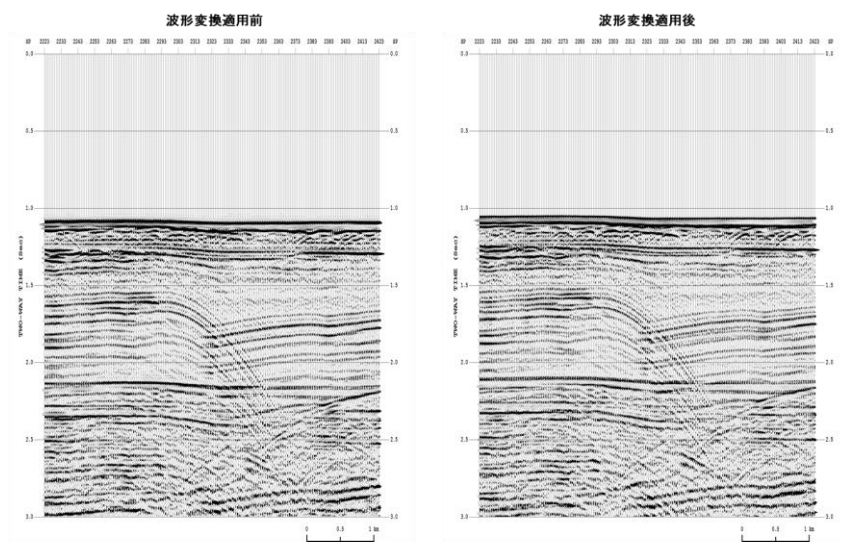


図 5 波形変換処理適用前後のニアトレース記録の比較。「西津軽～新潟沖」(1987)。

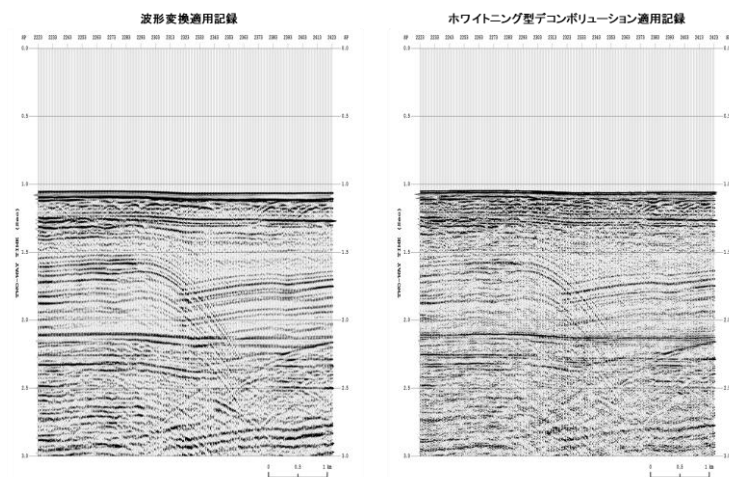


図6 波形変換処理適用記録
へのデコンボリューション適
用例。「西津軽～新潟沖」(1987)。

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

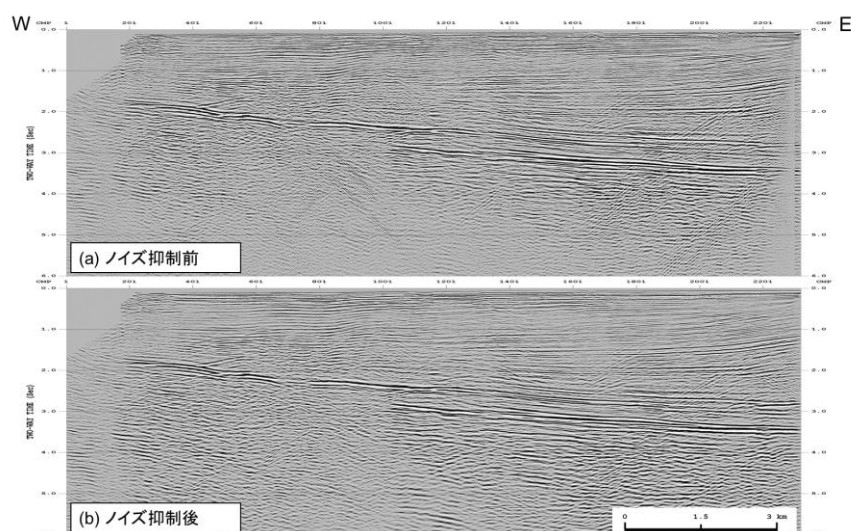
定速度走査法 (constant velocity scan) を用いて 2km 毎に予備的な速度解析を行った。ここで得られた速度は、ノイズ抑制解析における一時的な速度の他、各解析の適用前後の結果を重合記録上で比較・確認するために用いた。

8. 重合前ノイズ抑制解析 (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解析を適用した。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。低周波数の強振幅ノイズが確認された調査では F-X 速度フィルターに先立ち、F-X エディットを適用した。ノイズ抑制解析は以下の手順で実施された。

- ・ F-X エディット (発震記録)
- ・ F-X 予測フィルター (発震記録)
- ・ F-X 速度フィルター (発震記録)

重合前ノイズ抑制解析適用前後での重合記録の比較例を図7に示す。ランダムノイズや線形ノイズが抑制されたことで、特に深部で S/N の改善が見られたため、上記の



重合前ノイズ抑制解析
を全測線に適用すること
とした。

図7 重合前ノイズ抑制処
理適用前後の重合記録比
較。「北海道西部～北東部
海域」(1988)。

9. Surface Related Multiple Elimination (SRME) 解析

海水面を介在する長周期多重反射波を抑制するために、SRME 解析を適用した。SRME 解析は、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 8(a)～(c)に、SRME 解析による多重反射波抑制解析の適用結果の例を示す。グレースケール記録が SRME 解析適用後の重合記録、赤色が予測された多重反射波成分である。

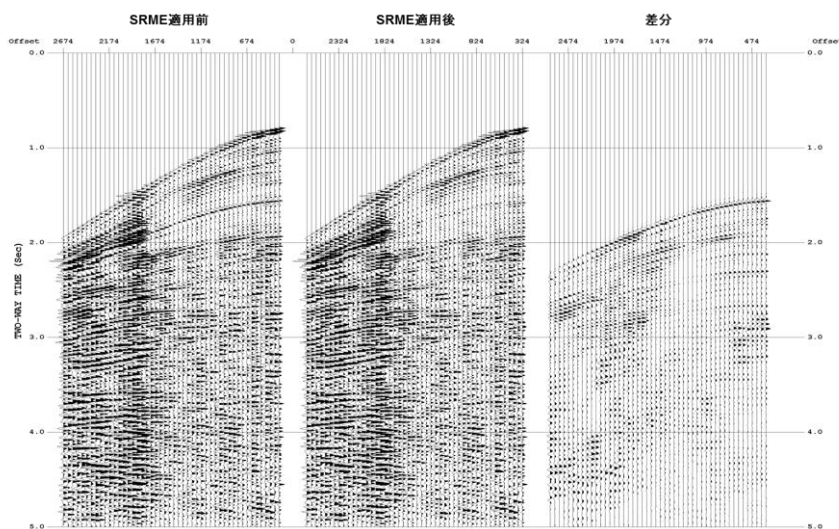


図 8 (a) SRME 解析適用前後の発震記録の比較。「北海道西部～新潟海域」調査 (1976)。

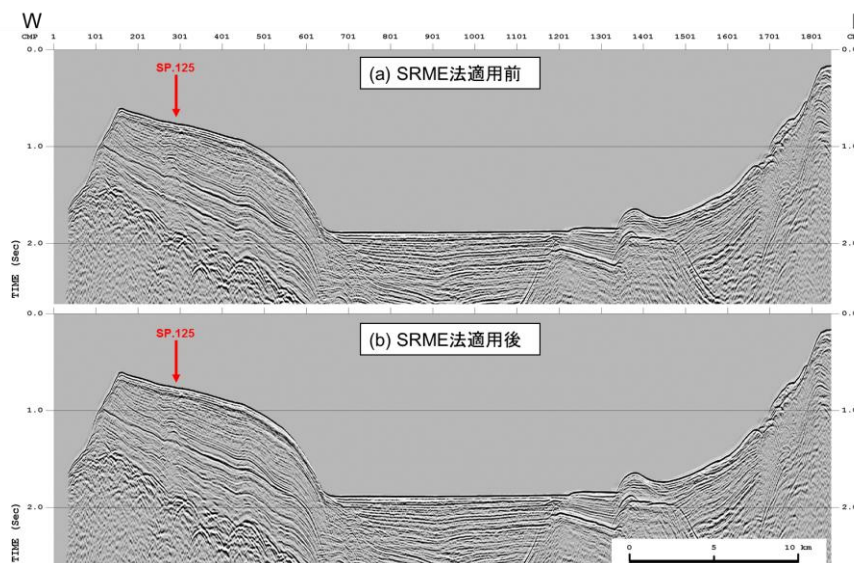


図 8 (b) SRME 解析適用前後の重合記録の比較。「北海道西部～新潟海域」調査 (1976)。

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

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 midpoint）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解析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 にする補正解析であり、この解析によって 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 (Parabolic Radon Transform, PRT) 解析

SRME 解析や RTD 解析で抑制できなかった多重反射波を抑制するために、PRT 解析を適用した。PRT 解析では、NMO 補正後の 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、「北海道西部～北東部海域

(1988)」と「西津軽～新潟沖(1987)」の一部の測線で抑制効果が確認できたため、効果の見られた測線に限り、PRT 解析を適用することとした。図 9(a)～(b)に、PRT 解析による多重反射波抑制解析適用前後の、NMO 補正後 CMP 記録および重合記録の比較結果を示す。

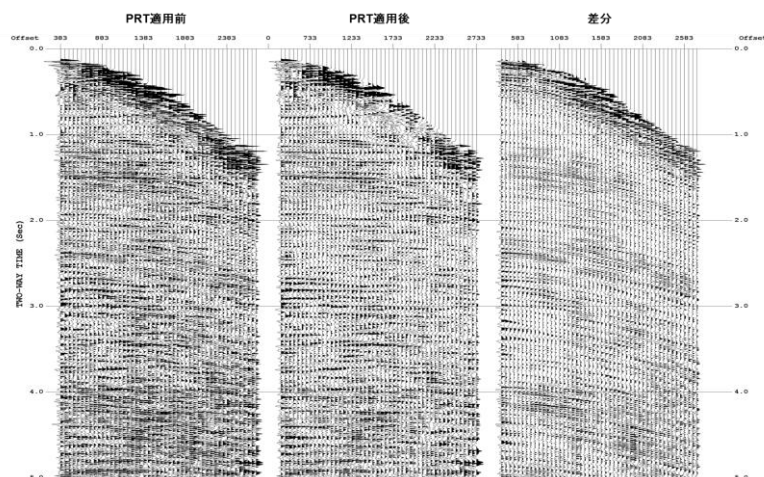


図 9(a) PRT 解析適用前後の NMO 後 CMP 記録の比較。「西津軽～新潟沖」(1987)。

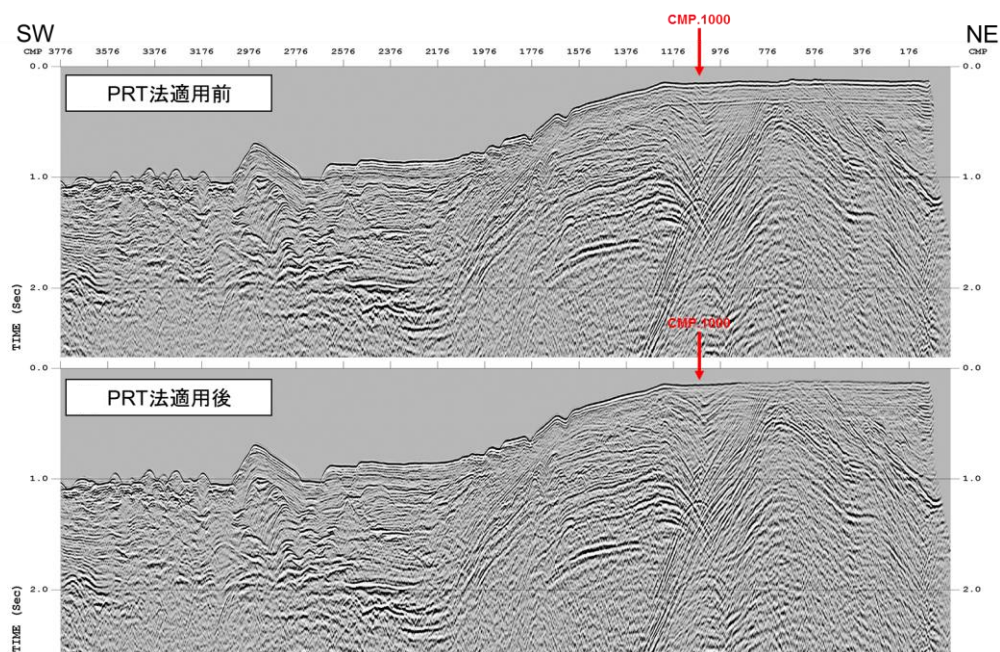


図 9(b) PRT 解析適用前後の重合記録の比較。「西津軽～新潟沖」(1987)。

この時点の記録に、重合速度で逆 NMO 補正を適用した結果を、後述の追加解析 (PSTM 解析、MDRS 解析) の入力記録とした。

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 補正の解析対象調査は深海調査では「北海道西部～北東部海域(1988)」「西津軽～新潟沖(1987)」および「大和堆(1985)」の 3 調査に限られる。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。

- ・ DMO 補正を適用
- ・ 重合速度で逆 NMO 補正を適用
- ・ 「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。

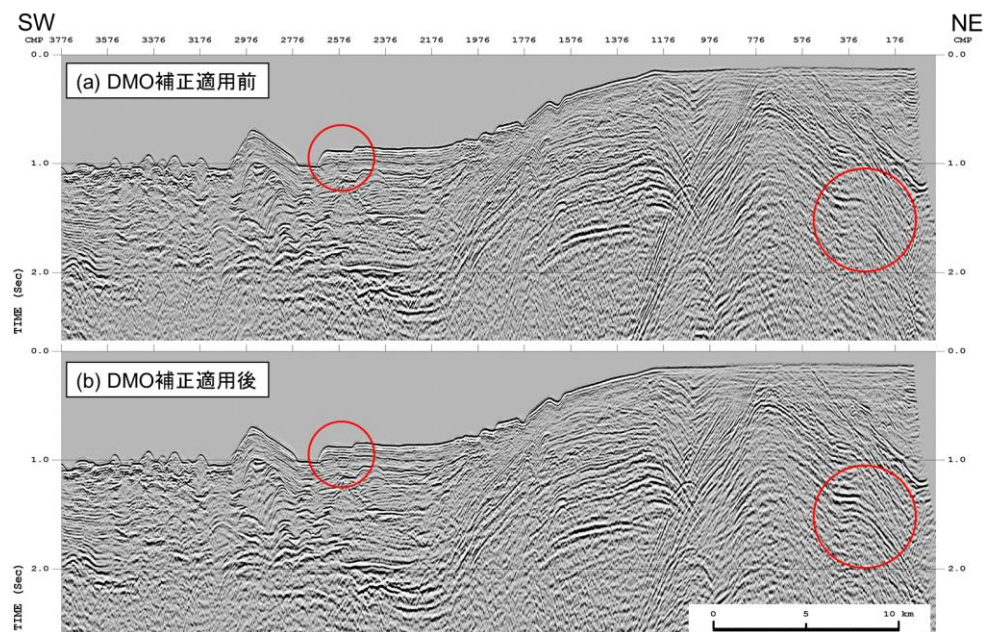


図 10 DMO 補正処理適用前後の重合記録の比較。「西津軽～新潟沖」(1987)。

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、水平重合解析を実施した。

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。傾斜ノイズが顕著な調査では、傾斜ノイズ抑制解析を併せて適用した。

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。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。

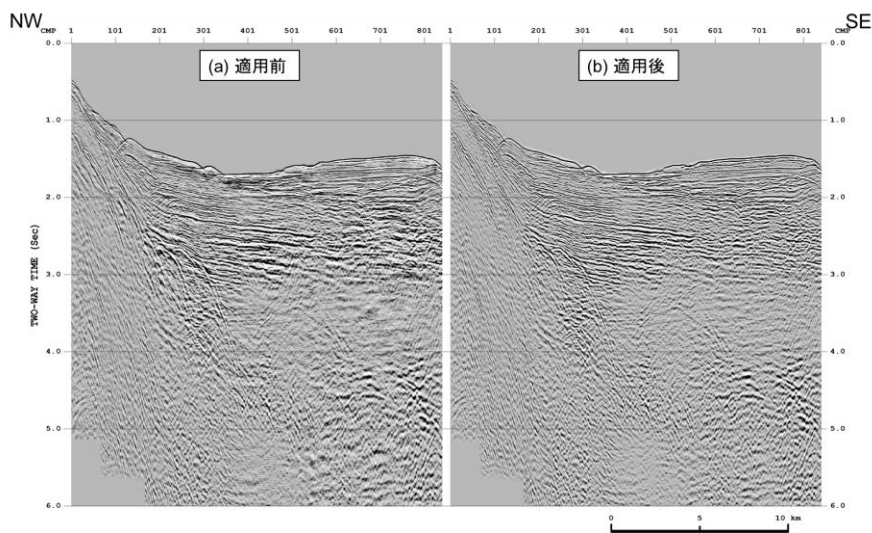


図 11 帯域通過フィルター適用前後の重合記録の比較。
「富山沖」(1981)。

26. 振幅調整 (Trace Scaling)

空間方向の振幅バランスの悪い調査については、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、重合時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

27. 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解析がマイグレーション解析である。マイグレーション解析の手法としては、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。

28. 深度変換 (Depth Conversion)

深度変換速度を用いて、Vertical Stretch 解析による深度変換を実施した。深度変換速度は、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用いた。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。

以上の解析手順により作成された重合時間断面図の例を図 12 に、重合後時間マイグレーション時間断面図の例を図 13 に、重合後時間マイグレーション深度断面図の例を図 14 に示す。

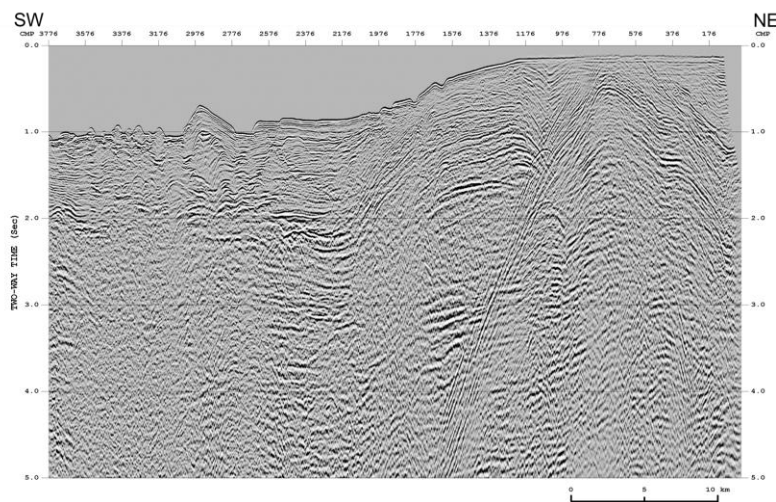


図 12 重合時間断面図。「西津軽～新潟沖」(1987)。

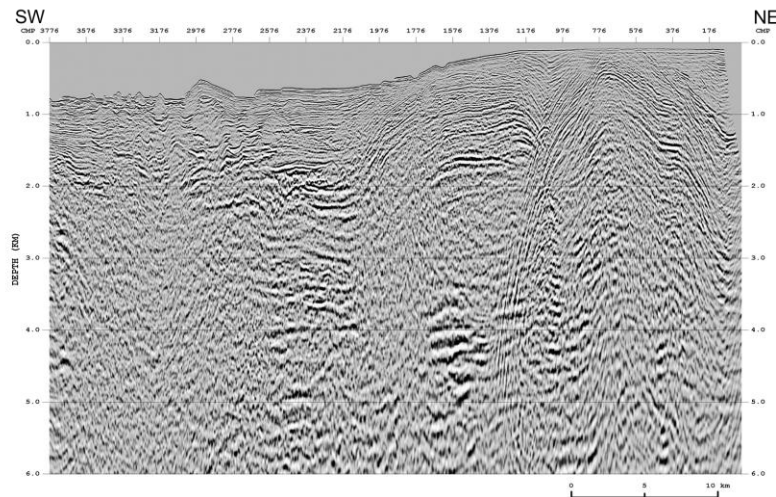


図 13 重合後時間マイグレーション時間断面図。「西津軽～新潟沖」(1987)。

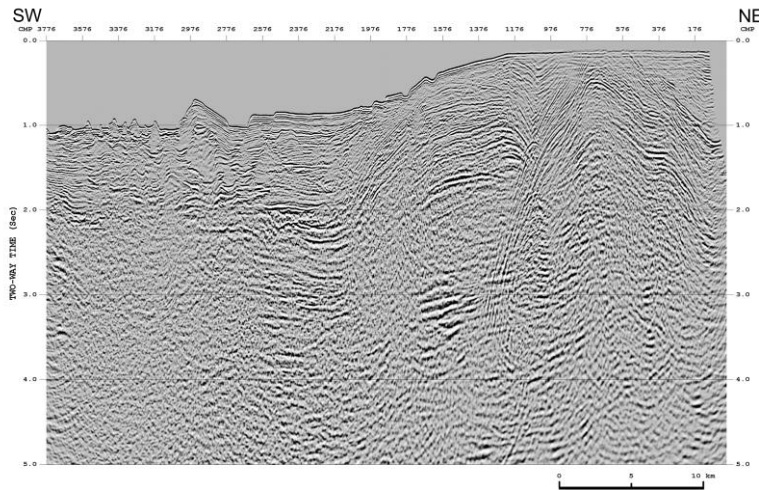


図 14 重合後時間マイグレーション深度断面図。
「西津軽～新潟沖」(1987)。

ii) Pre-Stack Time Migration (PSTM)解析

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。i) 標準解析の 1. から 18. の解析に続いて以下の解析を行った。

19. PSTM 速度解析 (PSTM Velocity Analysis)

PSTM 解析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 DMO 速度を近似 PSTM 速度として PSTM 解析を適用
- ② PSTM 適用時の速度で逆 NMO 補正を適用
- ③ 「i) 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 求まった速度を用いて PSTM 解析を適用

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（対象測線が「西津軽～新潟沖(1987)」に限られるため DMO 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。そのため、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 解析適用後の共通イメージ点 (CIP) アンサンブルに対して、水平重合解析を実施した。

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中の音速速度 (1500m/sec) を参照して基準面補正を行った。

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、トレースシン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)

「i) 標準解析」の「28. 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。

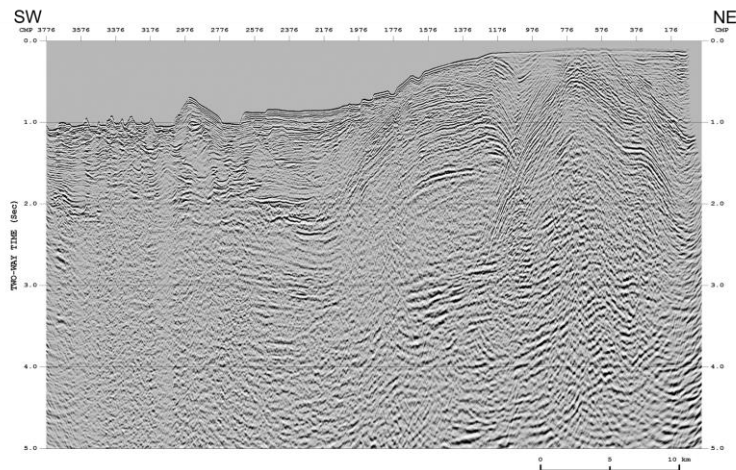


図 15 重合前時間マイグレーション時間断面図。「西津軽～新潟沖」(1987)。

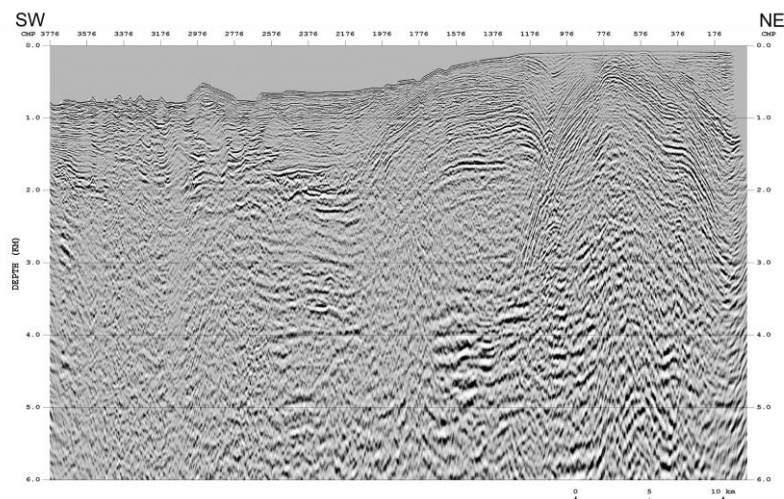


図 16 重合前時間マイ
グレーション深度断面図。
「西津軽～新潟沖」(1987)。

iii) MDRS (Multi 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。「i) 標準解析」における 1～18 の解析に続き以下の解析を実施した。

19. 帯域通過フィルター (Bandpass Filtler)

MDRS 解析の前解析として、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 解析の前解析として、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 CRS Scan)

CRS(Common Reflection Surface)解析は CMP 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解析することで、従来の CMP 重合解析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 解析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解析を実施

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、これをア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中の音速速度 (1500m/sec) を参照して基準面補正を行った。

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)

「i) 標準解析」の 27. 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)

「i) 標準解析」の「28. 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、MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図の例を図 18、MDRS 重合時間マイグレーション深度断面図の例を図 19 に示す。

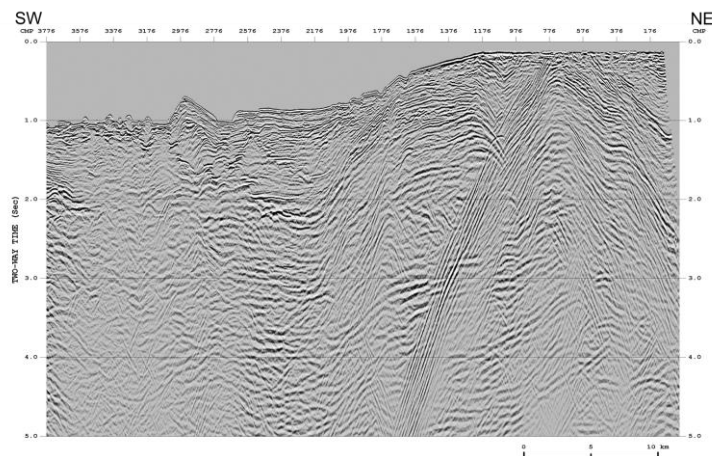


図 17 MDRS 重合時間断面図。
「西津軽～新潟沖」(1987)。

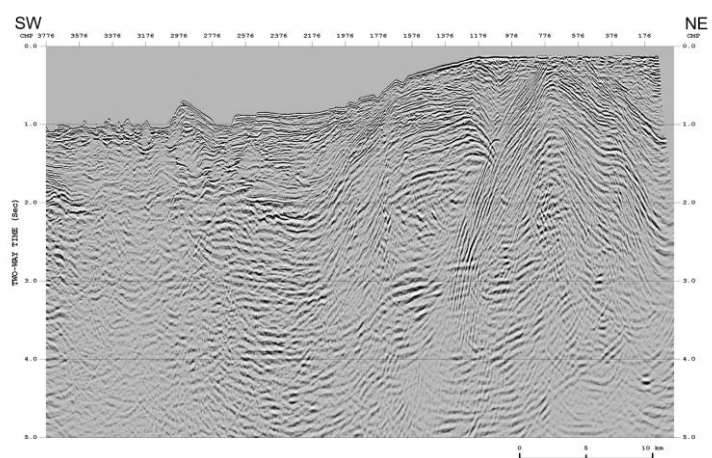


図 18 MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図。「西津軽～新潟沖」(1987)。

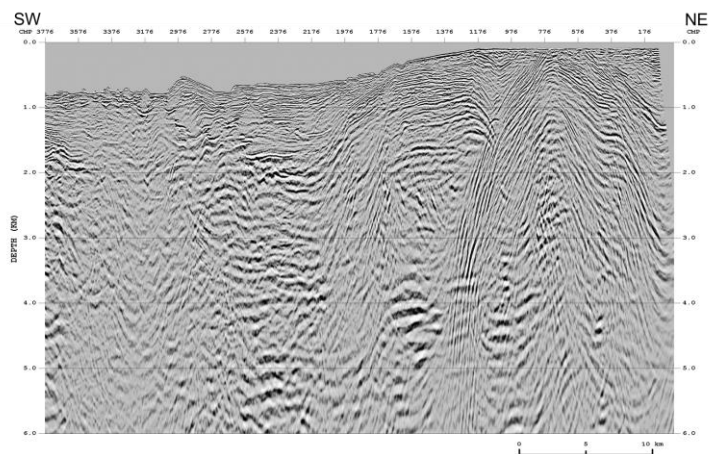


図 19 MDRS 重合時間マイグレーション深度断面図。「西津軽～新潟沖」(1987)。

iv) ベクトル化解析

ベクトル化解析は、フィルムあるいは紙面で残存する 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解析である。対象測線は、解析対象測線でデータ欠損が大きくデータ再解析の除外となったもののうち、重合時間記録がデジタルデータとして残存していない測線と、JAPEX から提供されたベクトル化対象測線である。

① スキャンとベクトル化解析 (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解析を行い、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。

③ 位相補償 (Phase Compensation)

ベクトル化解析でデジタル化した記録を本再解析結果と位相が整合するように、位相補償を適用した。ベクトル化解析は既往図面をデジタル化する解析であるため、既往結果の位相がそのまま反映される。既往解析ではガン波形に基づく波形変換解析を適用していないため基本波形は最小位相波形ではなく、ホワイトニングデコンボリューションを適用していてもゼロ位相波形にはならない。そのため、再解析結果と位相が整合していない可能性が高い。実際に、ベクトル化結果と再解析結果の位相を測線交差位置で比較したところ「富山沖(1989)」では再解析結果と海底面および各反射波の位相はほぼ整合していたものの、それ以外の調査では位相にずれが見られたため、「富山沖(1989)」以外の調査については、本再解析結果と位相が整合するように位相補償を適用した。位相補償としては、ベクトル化した記録上で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、この波形に基づきゼロ位相化解析を適用した。この際に海底面反射波が正のピークとなるように、符号を反転した。CMP 重合断面図のデジタルデータが残存している調査についても、同様の位相補償を適用した。

ウェーブレット抽出までの過程を図 20(a)に、位相補償適用前後の比較を図に示す。図 20(b)での赤線は、位相補償適用前の記録の右端での海底面反射波の立ち下がり時間を表しているが、位相補償適用後の記録の右端では海底面反射波のピーク位置に対応しており、正しくゼロ位相化された結果と考えられる。位相の確認のため、位相補償適用前後での再解析結果との比較結果を図 21(a)と(b)に示す。図 21(a)と(b)は、ベクトル化解析結果の NN87-G 測線と再解析結果の NN87-12 測線の交差位置で両測線を接続表示したものであり、図面中央の縦線が交差位置を表す。位相補償適用により、再解析結果との反射波出現時間の整合性が向上したことが確認できる。この時点の結果を、ベクトル化解析の重合時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

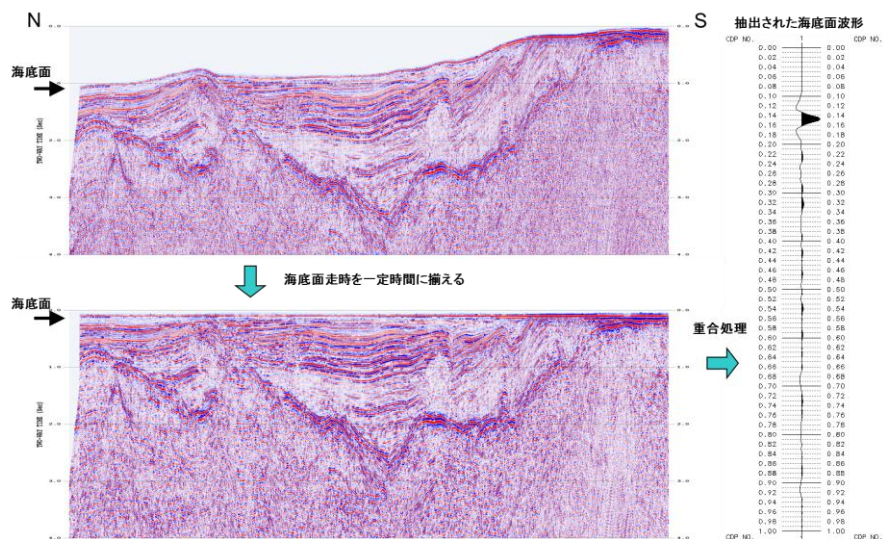


図 20(a) ベクトル化記録から抽出したウェーブレットの例。「西津軽～新潟」(1987)。

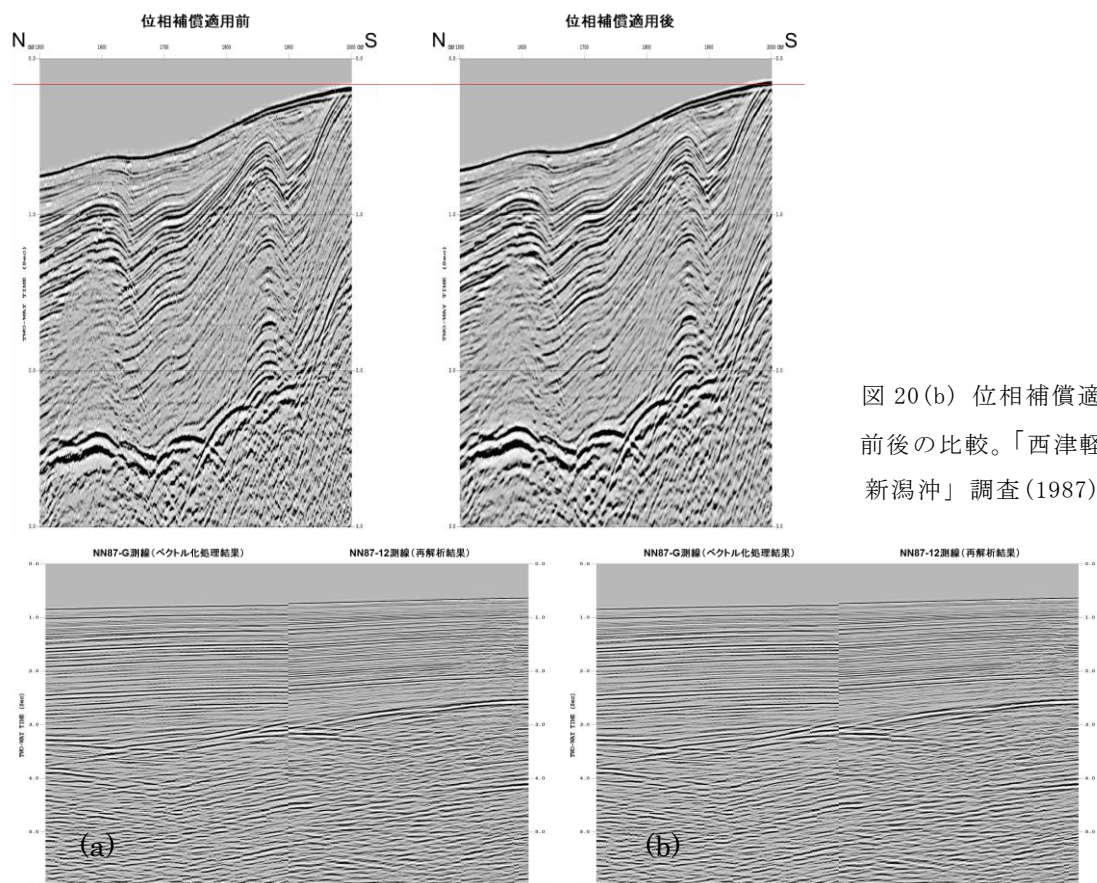


図 20(b) 位相補償適用前後の比較。「西津軽～新潟沖」調査(1987)。

図 21 再解析結果との比較図。「西津軽～新潟沖」調査(1987)。(a) 位相補償適用前 (b)位相補償適用後。

④ 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

「i) 標準解析」の「27. 重合後時間マイグレーション」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既存のフィルムまたは紙の重合断面図に記載された速度テーブルを読み取り、空間方向に

平滑化した速度関数をスケールリングして用いた。この時点の記録を、ベクトル化解析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。

⑤ 深度変換 (Depth Conversion)

深度変換速度を用いて、Vertical Stretch 解析による深度変換を実施した。深度変換速度は「3. 重合後時間マイグレーション」で参照した速度を空間方向に平滑化した速度関数を用いた。この時点の記録を、ベクトル化解析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解析の重合時間断面図の例を図 22 に、ベクトル化解析の重合後時間マイグレーション時間断面図の例を図 23 に、ベクトル化解析の重合後時間マイグレーション深度断面図の例を図 24 に示す。

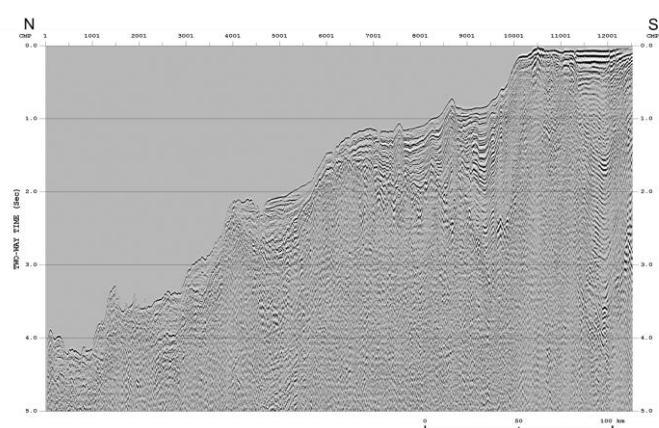


図 22 ベクトル化解析の重合時間断面図。「西津軽～新潟海域」調査(1987)。

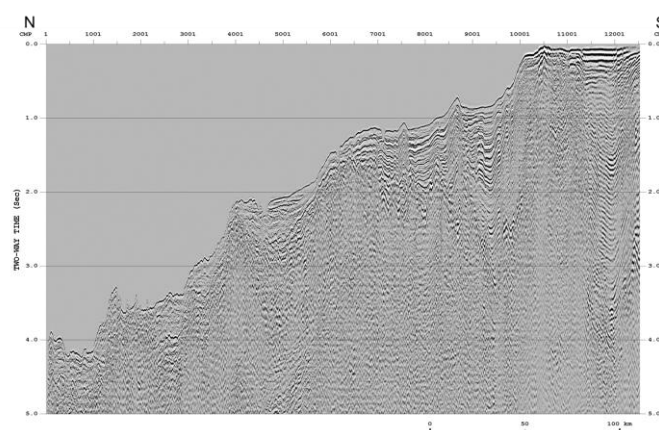


図 23 ベクトル化解析の重合後時間マイグレーション時間断面図。「西津軽～新潟海域」調査(1987)。

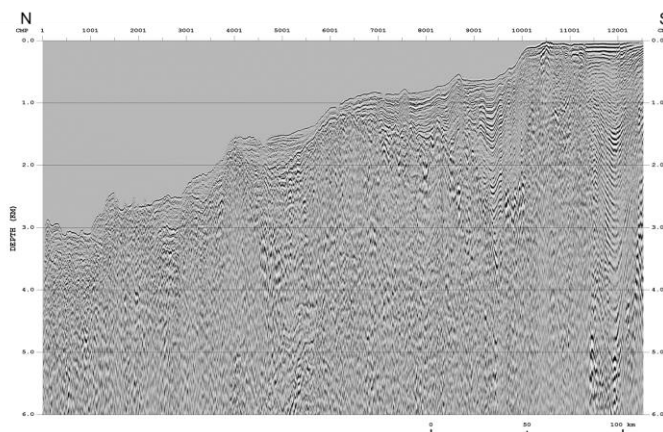


図 24 ベクトル化解析の重合後時間マイグレーション深度断面図。「西津軽～新潟海域」調査(1987)

d) 浅海調査データ解析詳細

浅海調査のデータ解析作業では、海陸接続域固有の問題が存在する。浅海調査データ取得の概要と問題点を図 25 に示す。浅海調査固有の問題点としては次が挙げられる。

- ① 異種受振器・異種震源間の位相補償（波形変換解析、位相補償）
- ② 浅海調査固有のノイズへの対応（複合型ノイズ抑制解析）
- ③ 表層の影響への対応（表層補正解析）

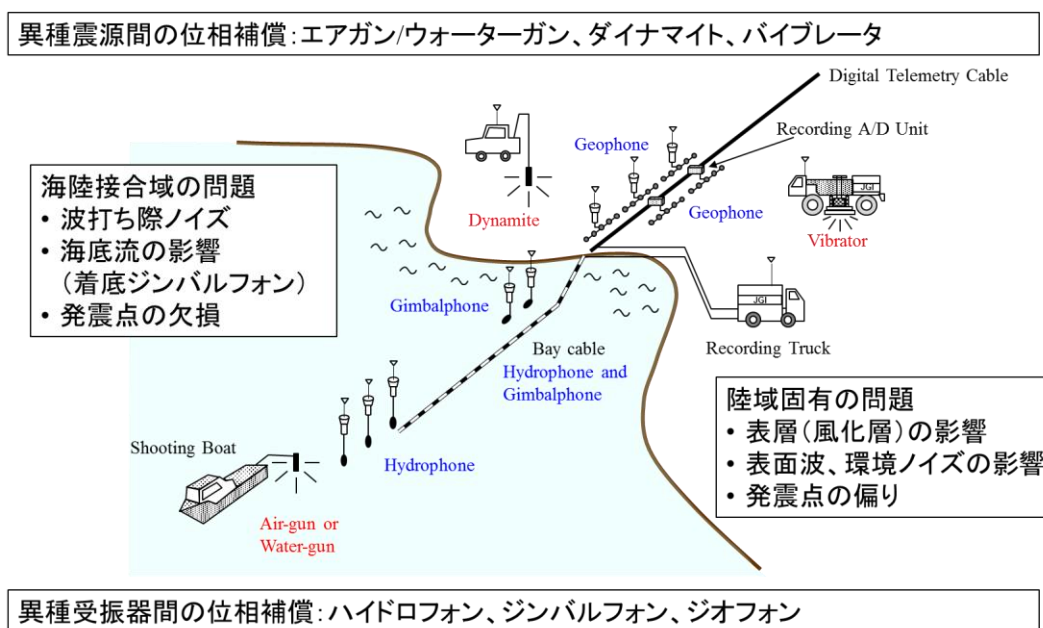


図 25 浅海調査データ取得概要と問題点

これらの問題点を考慮してデータ解析フローを構築した。浅海調査のデータ解析作業におけるデータ解析フローを図 26 に示す。データ解析フローには、標準解析と、ベクトル化解析（実際は既存デジタルデータの重合後解析）の 2 つが記載されている。以下に各段階での解析内容を解析作業ごとに示す。

i) 標準解析

標準解析は、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である（図 26）。

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。

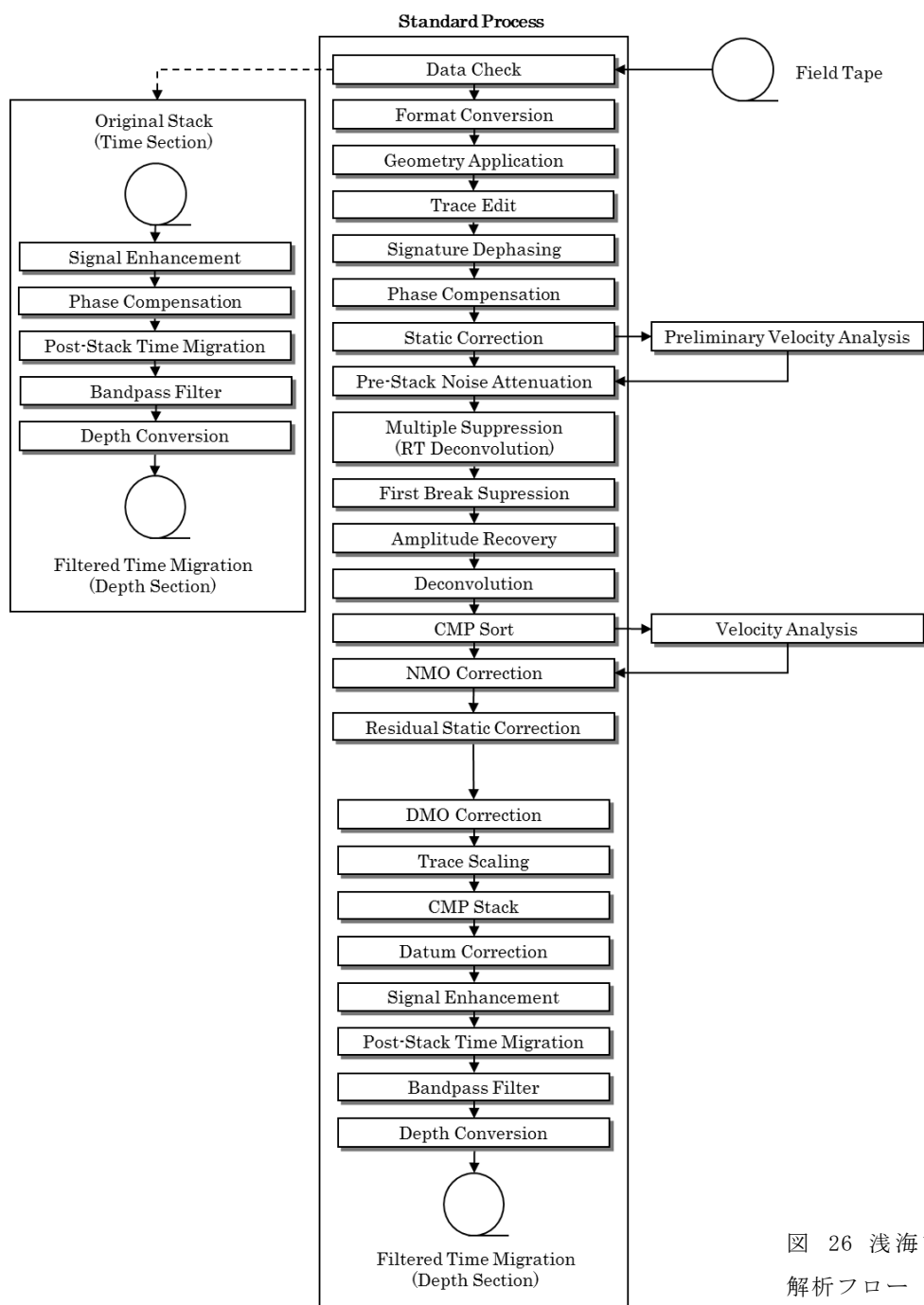


図 26 浅海調査データ
解析フロー

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から JGI 内部フォーマット (SuperXフォーマット) への変換を行った。「新潟～富山浅海域」の SNT90-A と SNT91-A、SNT92-A の 3 測線、「秋田～青森浅海域」の SAA88-A と SAA89-A の 2 測線については、この段階で測線を接続した。

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、局所座標系に変換し

た値である。各調査における局所座標原点は以下のように設定した。

天北浅海域 (500000, 5000000)

新潟～富山浅海域 (270000, 4150000)

秋田～青森浅海域 (400000, 4300000)

この時点の結果を、データ解析に使用した原発震記録として 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、以降の解析に悪影響を及ぼす不良記録を読み取り、解析対象から除外するとともに、パルスノイズ抑制解析と強振幅ノイズ抑制解析を併せて適用した。

5. 波形変換解析 (Signature Dephasing)

震源波形を用いた最小位相変換を適用した。海域発震記録に対しては、ガン震源波形観測記録のウェーブレットを用いて、最小位相変換を適用した。解析対象である全ての浅海調査で、データ取得時と同一のガン構成及び発震深度によるファーフールド震源波形記録が存在したため、これを用いた。海域受振器の記録に対しては、ケーブルゴーストを付加したウェーブレットを用いて、最小位相変換を適用した。浅海調査の海域では、異なるタイプの受振器が使用されているため、受振器のタイプに合わせてケーブルゴーストを付加する必要がある。図 27 に新潟～富山浅海域(1990)での波形変換解析例を示す。ハイドロフォンとジンバルフォンでゴーストを付加したガン波形が異なることが分かる。

「天北浅海域(1996)」では一部でバイブレータ震源が用いられているため、バイブレータ波形として補助チャンネルに記録されていたクラウド波形を用いて、これを最小位相に変換するオペレータを設計し、バイブレータ記録に適用した。海域受振器の記録に対しては、受振器ゴーストを付加したクラウド波形を用いて、最小位相変換を適用した。図 28 に最小位相変換解析の例を示す。

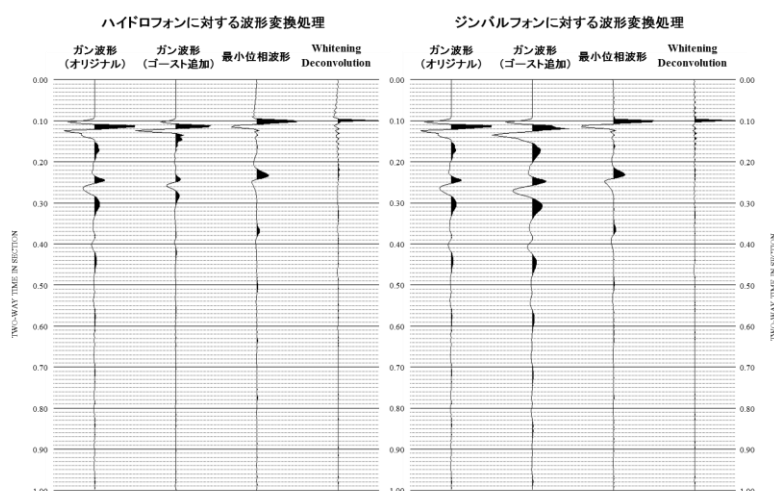


図 27 エアガン波形を用いた波形変換解析例。「新潟～富山浅海域」調査(1990)。

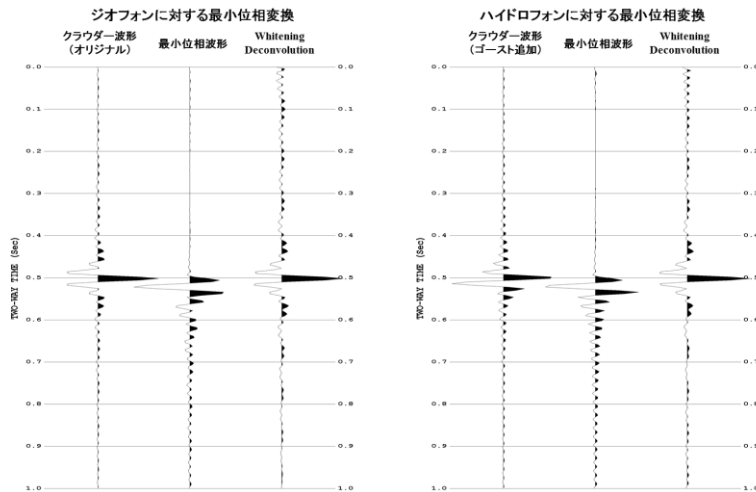


図 28 クラウドー波形を用いた最小位相変換解析例。「天北浅海域」調査 (1996)。

6. 位相補償 (Phase Compensation)

異種受振器間および異種震源間での位相差を検証し、必要に応じて位相補償を実施した。

位相補償後の極性は、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ため、ホワイトニング型デコンボリューションを適用した記録では、海底面反射波が正のピークとなる。

7. 静補正 (Static Correction)

静補正を適用した。静補正は、陸域において表層厚や表層速度、表層基底層速度の変化に起因する影響を取り除く表層補正と、標高変化の影響を取り除く標高補正から成る。静補正の適用に際しては、基準面 (Datum; 本解析では Mean Sea Level に設定) に対して直接補正を行うのではなく、この解析段階では CMP 毎に設定される浮動基準面 (Floating Datum) へ補正を行い、後述の「基準面補正」の段階で浮動基準面から基準面への補正を行う。

表層補正は陸域発震・陸域受振の記録を対象とし、会話型屈折初動解析システム『iRAS』を使用して 2 層構造を仮定したタイムターム法による表層補正を実施した。表層補正值は表層媒質を基底層媒質で置き換えた場合の時間差を補正する値であり、タイムターム値 (表層を波が伝わる時間)、表層速度 (V_w) および基底層速度 (V_{sw}) により求まる。そのうちタイムターム値と基底層速度はタイムターム法により求まるが、表層速度はこの手法では求まらないため、本解析では既往解析を参考に表層速度を 800m/sec と設定した。海陸接続域で静補正值が不連続にならないように、海岸線から海側へ滑らかにゼロになるようにタイムターム値と基底層速度を調整した。

表層補正解析例を図 29(a) に示す。これらの図で赤い点は発震点における値を、青い点は受振点における値を表している。上段の図は屈折初動解析からインバージョンにより求めたタイムターム値であり、中段の図が表層および基底層速度である。下段の図がタイムターム値と速度分布から求めた表層の深度構造を表す。Loc. 400 が海岸線でありここから東側でのみ表層補正解析が実施された。

標高補正值は、受振点または発震点の基準面から見た標高を、標高補正速度で割っ

た値である。標高補正速度は海域では 1500m/sec、陸域では表層補正により表層媒質が基底層媒質に置き換えられたため基底層速度を用いた。浮動基準面は、CMP 内のオフセット距離 1500m までのデータの平均標高値と平均基底層速度を用いて定義した。

タイムターム法による表層補正の適用前後の重合解析結果を図 29(b)に示す。CMP. 780 付近から東側が陸域であるが、表層補正適用により反射波の連続性が向上していることが確認できる。

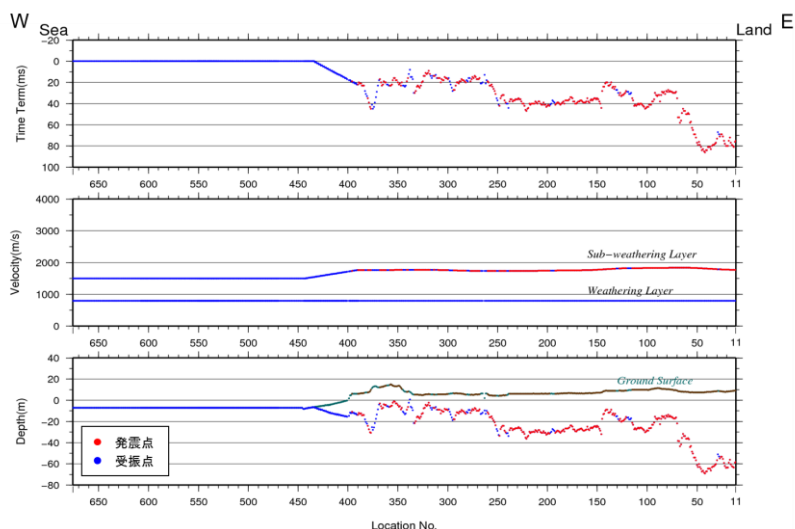


図 29(a) 表層補正解析例。「天北浅海」調査(1996)

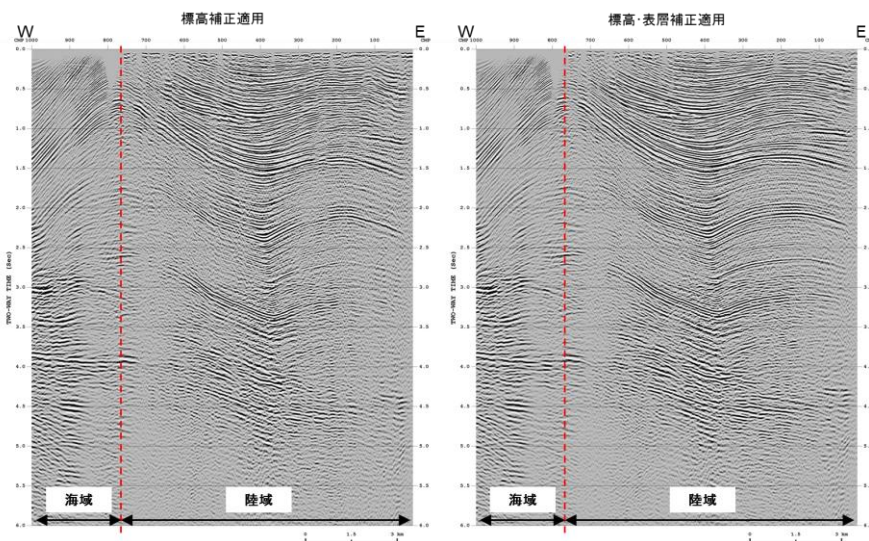


図 29(b) 表層補正適用前後の重合断面図の比較。「天北浅海」調査(1996)。

8. 予備的な速度解析 (Preliminary Velocity Analysis)

定速度走査法(constant velocity scan)と定速度重合法(constant velocity stack)を用いて 2km 毎に予備的な速度解析を行った。反射波の空間方向の連続性を考慮するため、全 CMP で定速度重合法を行う Long CVSK 法を併用した。ここで得られた速度は、ノイズ抑制解析における一時的な速度の他、各解析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。

9. 重合前ノイズ抑制解析 (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解析を適用した。ノイズ抑制解析は以下の手順で実施された。

- ① F-X 予測フィルター (発震記録)
- ② F-X 予測フィルター (受振記録、海域のみ)
- ③ F-X 速度フィルター (発震記録)
- ④ 線形ラドンフィルター (発震記録、海域のみ)

海域では発震点が等間隔なため、受振記録上で F-X 予測フィルターが適用可能である。浅海域の一部で震源由来のノイズが確認できたため、受振記録での F-X 予測フィルターを適用した。図 30(a)ではこのようなノイズが抑制されたことが確認できる。浅海域の一部の発震記録で屈折初動とその繰り返しが顕著だったため、線形ラドンフィルターを適用した。図 30(b)では線形ノイズが抑制され、浅部反射波が明瞭になっていることが確認できる。

重合前ノイズ抑制解析適用前後での重合記録の比較例を図 30(c)に示す。線形ラドンフィルターの適用により、浅部の傾斜ノイズが抑制され、反射波が明瞭となったことが分かる。ランダムノイズや線形ノイズが抑制されたことで、深部で S/N の改善が見られる。

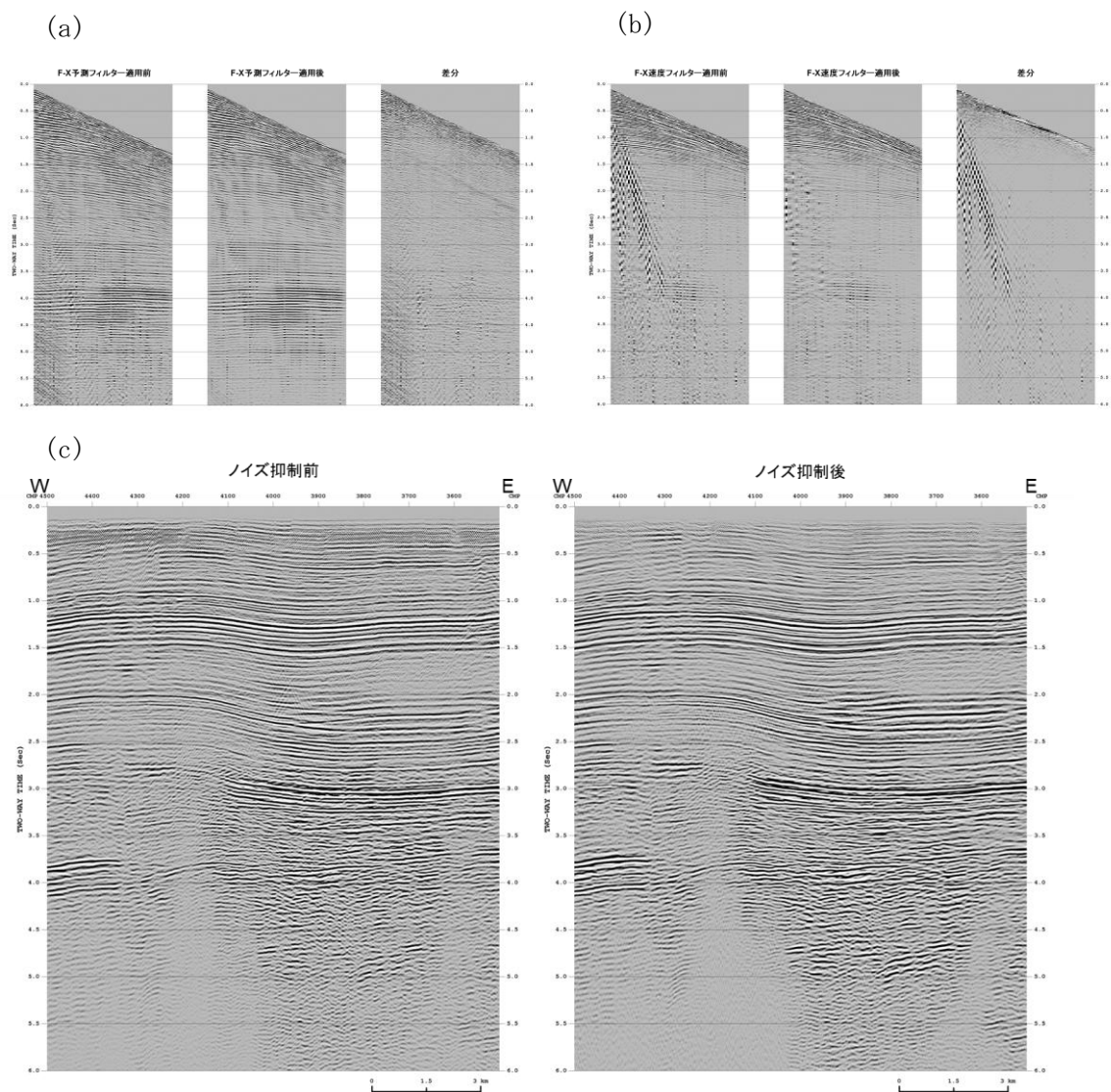


図 30 フィルター適用例。「天北浅海域」調査(1996)。(a) F-X 速度フィルター適用例 (b) 線形ラドンフィルター適用例 (c) 重合前ノイズ抑制処理適用前後の比較。

10. Radial トレースデコンボリューション (Radial Trace Deconvolution)

短周期多重反射波が見られたため、これを抑制するために RTD 解析を適用した。図 31(a)、(b)、(c)に、RTD 解析による多重反射波抑制解析の適用結果の例を示す。図 31(c)は、RTD 解析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 解析適用後の重合記録、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。このよう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。

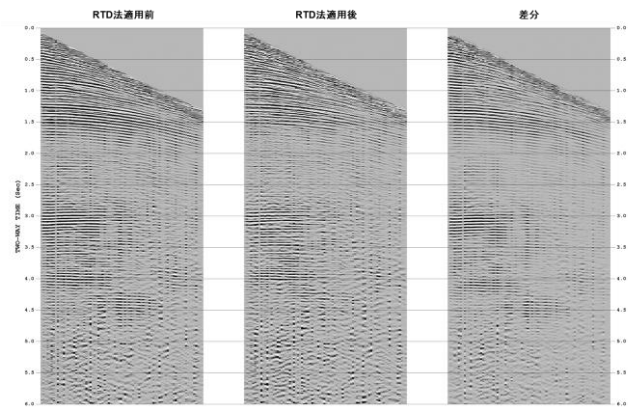


図 31(a) RTD 解析適用前後の発震記録の比較。「天北浅海域」調査(1996)。

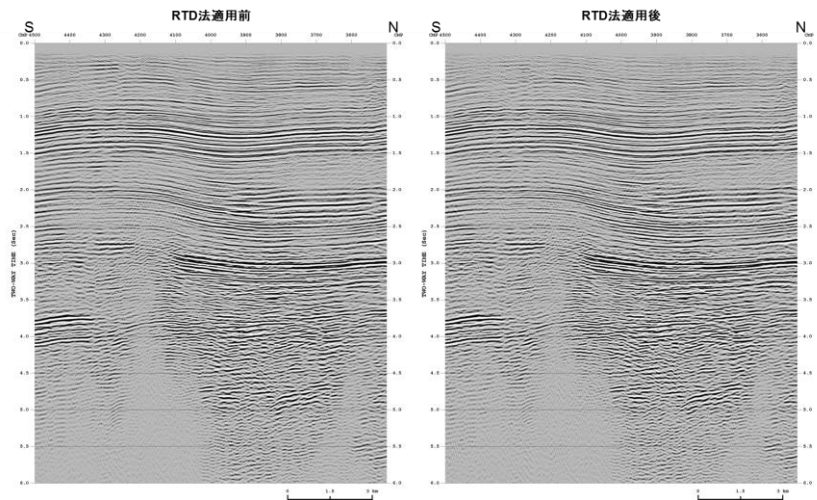


図 31(b) RTD 解析適用前後の重合記録の比較。「天北浅海域」調査(1996)。

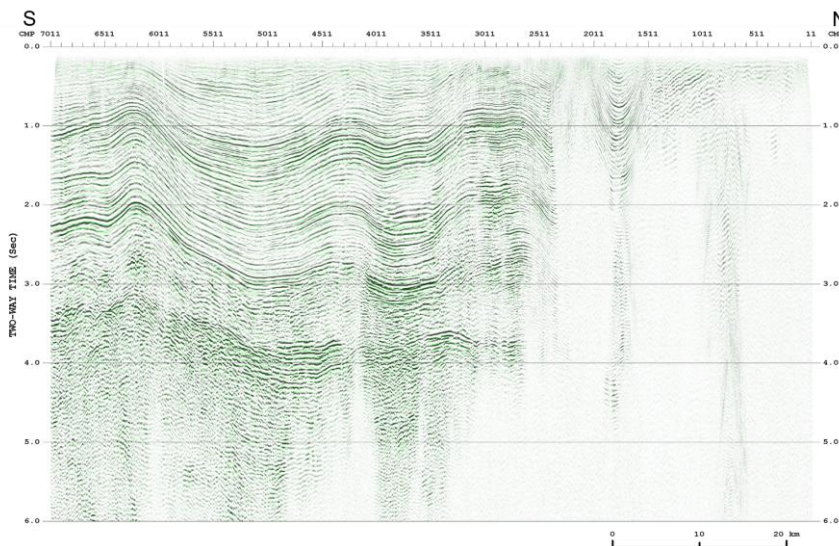


図 31(c) RTD 解析で予測された多重反射の重合記録。「天北浅海域」調査(1996)。

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。振幅補償テストを実施したところ、深海調査と同様の球面発散振幅補償を適用すると極浅部の振幅が弱まることから、ゲート長 1000msec の自動振幅補正 (AGC) のみを適用することとした。

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。通常のデコンボリューションは、震源波形や地層効果、記録系といった諸特性の推定・除去をトレース単位で行うが、一般に陸域の記録は S/N が悪く、オペレータ推定の誤差が大きくなるため、波形を歪ませる要因となる。これを解決するために、浅海調査に対しては SC デコンボリューション (Surface Consistent Deconvolution) を適用した。SC デコンボリューションは、周波数領域での各トレースの平均スペクトルからのずれを発震点・受振点・CMP・オフセットの 4 成分に分解し、各トレースで平均スペクトル・発震点成分・受振点成分を用いてデコンボリューションオペレータを設計する。4 成分分解は統計的に計算されるため、通常のデコンボリューションに比較してノイズに強い性質を持つ。また、発震点・受振点毎にオペレータを設計するため、異種受振器と異種震源に起因する差異の適切な補正が期待できる。

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 midpoint) を共通とするトレースの集合 (CMP ギャザー) に編集した。

15. 速度解析 (Velocity Analysis)

定速度走査法 (constant velocity scan) と定速度重合法 (constant velocity stack) を用いて 1km 毎に予備的な速度解析を行った。反射波の空間方向の連続性を考慮するため、全 CMP で定速度重合法を行う Long CVSK 法を併用した。

16. 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 にする補正解析であり、この解析によって 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。

17. 残差静補正 (Residual Static Correction)

各 CMP 内の反射波到達時間のばらつきを、統計的手法により発震点、受振点毎に算出し、時間シフト量として補正する残差静補正解析を適用した。残差静補正は表層の影響を補正する手法であるため一般に海域では適用されないが、浅海域では海底面の性状が空間方向に変化する場合があり、残差静補正により品質が改善するケースがあ

る。また、異種受振器間あるいは異種震源間で時間シフトが生じている場合、残差静補正によりこれを補正することが可能であるため、陸域だけでなく海域にも適用を試みた。残差静補正の適用前後での重合記録の比較例を図 32 に示す。赤の点線の位置が海岸線であり、西側が海域、東側が陸域である。この図を見ると、陸域のみならず海域においても反射波の連続性が大きく改善したことが確認できる。解析対象の全測線で改善が確認されたことから、本解析では浅海調査には残差静補正を適用することとした。

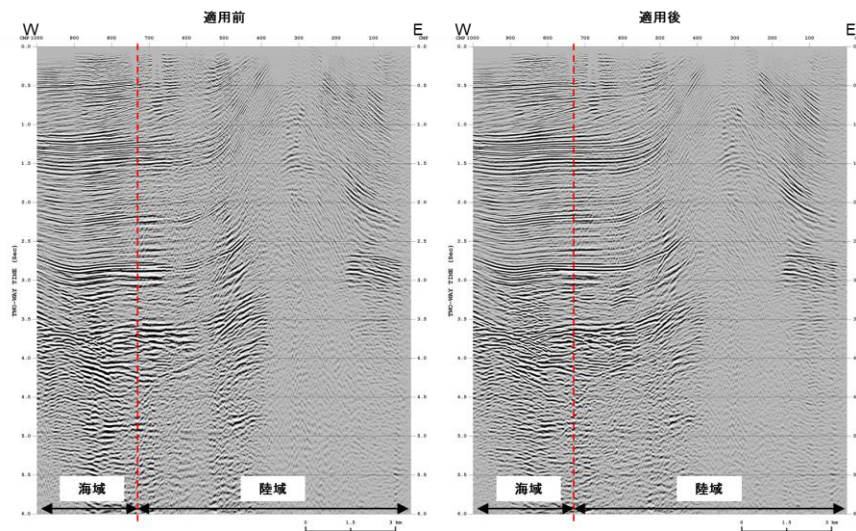


図 32 残差静補正適用前後の重合記録の比較。「天北浅海域」調査(1996)。

18. 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 以下の記録を対象としているため、浅海調査では全調査が DMO 補正の解析対象となる。浅海調査では、陸域で発震点分布に偏りが見られるものの、測線全体ではオフセット分布は概ね均質であるため、深海調査と同様に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 「(15) 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 33 に示す。赤丸で示した箇所では僅かではあるが改善が見られる。

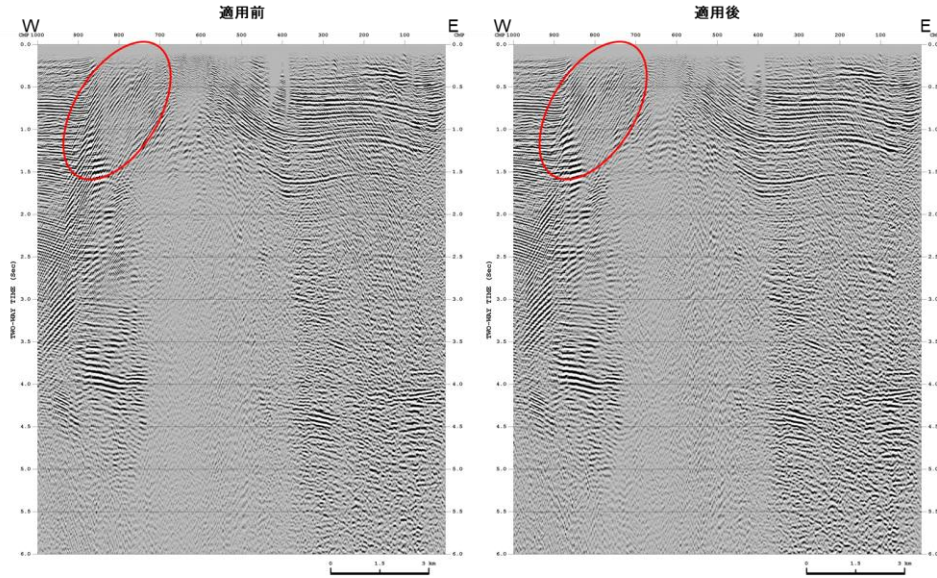


図 33 DMO 補正処理適用前後の重合記録の比較。「天北浅海域」調査(1996)。

19. 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 1000msec の AGC を適用した。

20. 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解析を実施した。

21. 基準面補正 (Datum Correction)

浮動基準面から基準面への補正を行った。基準面は平均海水面 (Mean Sea Level : MSL) とした。

22. 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。

この時点の記録に後述の「24. 帯域通過フィルター」を適用した結果を、重合時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

23. 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解析がマイグレーション解析である。マイグレーション解析の手法としては、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 速度を空間方向に平滑化した速度関数を用いた。

24. 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。帯域通過フィルター適用前後の重合記録の比較を図 34 に示す。周波数成分解析結果での赤線は、設定した周波数帯域を表す。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。

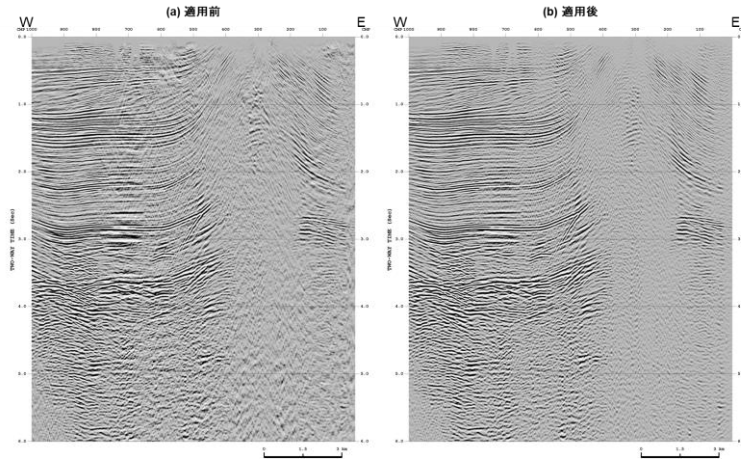


図 34 帯域通過フィルター適用前後の重合記録の比較。「天北浅海域」調査(1996)。

25. 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。深度変換速度は、DMO 速度を空間方向に平滑化した速度関数を用いた。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。

以上の解析手順により作成された重合時間断面図の例を図 35 に、重合後時間マイグレーション時間断面図の例を図 36 に、重合後時間マイグレーション深度断面図の例を図 37 に示す。

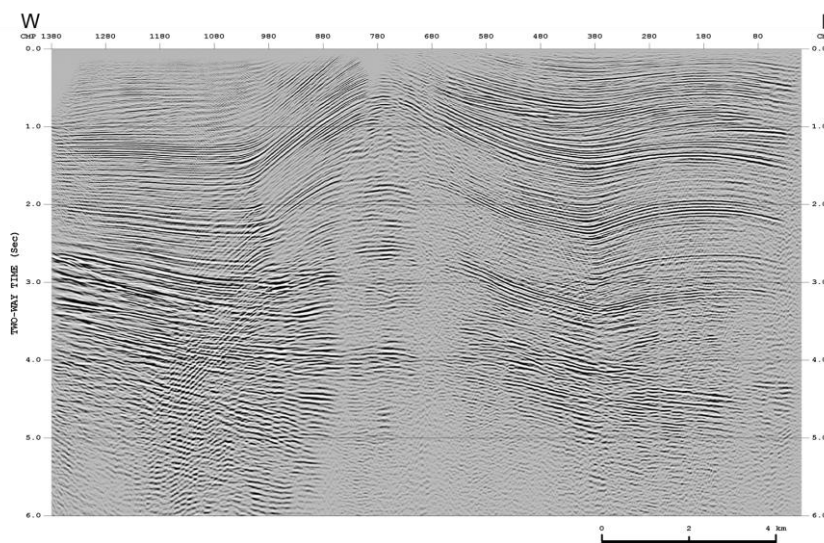


図 35 重合時間断面図。「天北浅海域」調査(1996)。

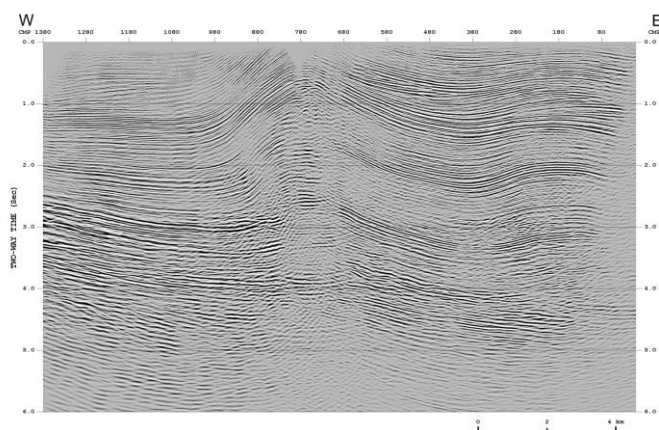


図 36 重合後時間マイグレーション時間断面図。「天北浅海域」調査(1996)。

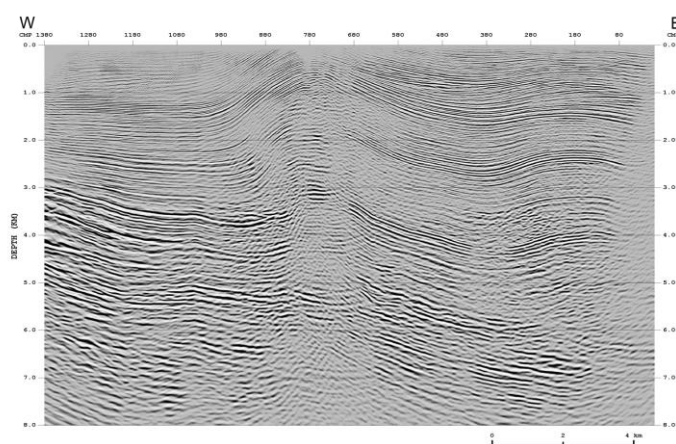


図 37 重合後時間マイグレーション深度断面図。「天北浅海域」調査(1996)。

ii) 浅海調査 「秋田～青森浅海域(1987)」の海域測線

浅海調査のうち「秋田～青森浅海域(1987)」の海域測線である SAA87-A 測線では、データ欠損が大きく断面図上でもデータ欠損の影響が見られたが、対象測線では重合後時間記録がデジタルデータとして残存していたため、既存デジタルデータから重合後解析を下記の通り実施した。

1. 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。

2. 位相補償 (Phase Compensation)

深海調査では、ベクトル化解析でデジタル化した記録を本再解析結果と位相が整合するように位相補償を適用したことから、浅海調査でも同様の位相補償の必要性を検証した。対象調査の既存解析では、ガン波形に基づく波形変換解析と位相補償、ホワイトニングデコンボリューションが適用されているため、基本波形はゼロ位相であると考えられ、同様にゼロ位相化された再解析結果との位相差は、極性の定義を除けば存在しないものと考えられた。

SAA87-A 測線はデータ欠損が見られるものの有効データが十分に存在するため、再解析も実施しており既存結果との比較が可能である。既存結果の位相を検証する

ため、この再解析結果と既存結果の重合記録を比較した結果を図 38 に示す。赤線で示した縦線は CMP. 800 の位置を表しており、左側が既存結果、右側が再解析結果である。既存解析では本再解析とは極性の定義が逆のため、既存結果については極性を反転している。この図から、両者の位相はほぼ完全に一致していることが確認できる。以上から、既存デジタルデータの位相補償は極性反転のみを適用することとした。この時点の結果に後述の「4. 帯域通過フィルター」を適用した結果を、ベクトル化解析の重合時間断面図として SEG-Y ファイルに出力した。

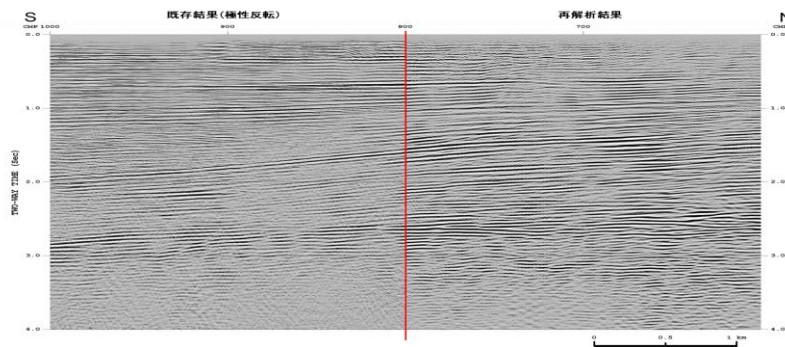


図 38 既存結果と再解析結果の重合記録の位相比較。「秋田～青森浅海域」調査(1987)。

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

「i) 標準解析」の 23. 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ため、その DMO 速度を空間方向に平滑化した速度関数を用いた。

4. 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

「i) 標準解析」の 24. 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、ベクトル化解析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。

5. 深度変換 (Depth Conversion)

「d) i) 標準解析の 25. 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、ベクトル化解析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解析の重合時間断面図を図 39 に、重合後時間マイグレーション時間断面図を図 40 に、重合後時間マイグレーション深度断面図を図 41 に示す。

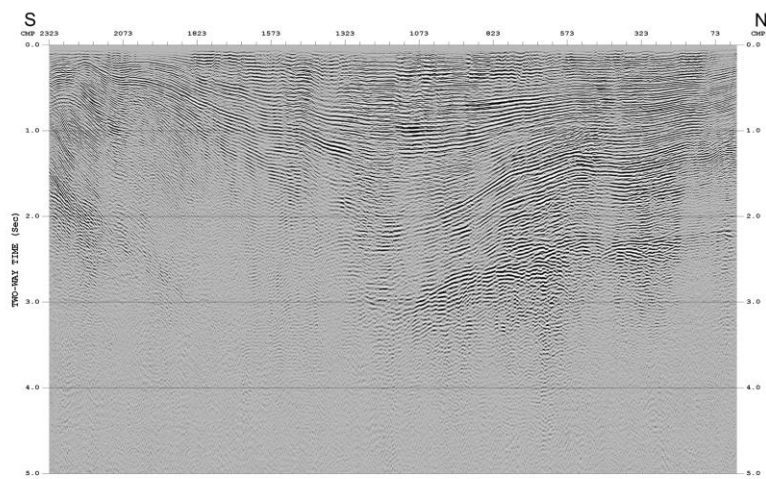


図 39 ベクトル化解析の重合時間断面図。「秋田～青森浅海域」調査(1987)。

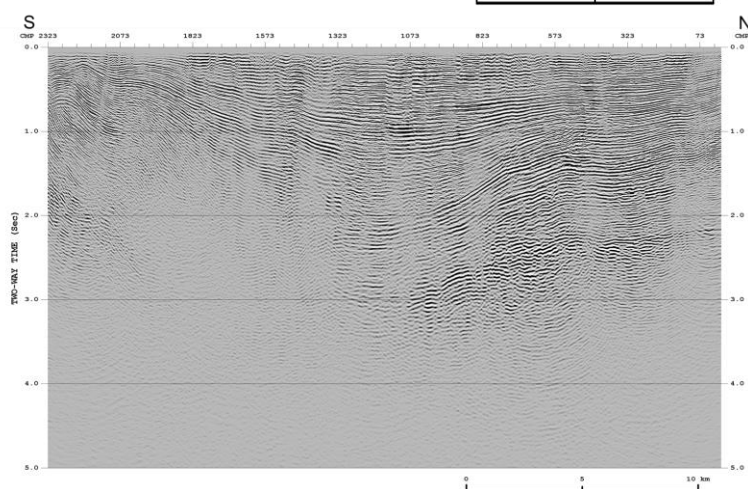


図 40 ベクトル化解析の重合後時間マイグレーション時間断面図。「秋田～青森浅海域」調査(1987)。

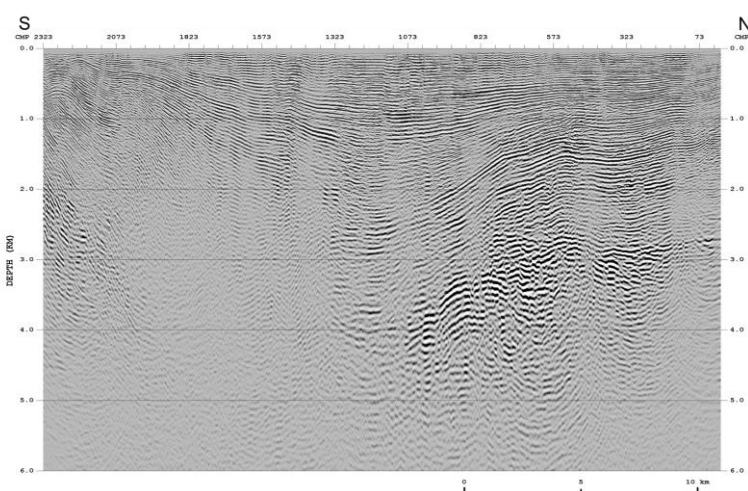


図 41 ベクトル化解析の重合後時間マイグレーション深度断面図。「秋田～青森浅海域」調査(1987)。

e) AIST 既往探査データの解析

AIST のシングルチャンネルのオリジナルデータを平成 25 年度に確立したシングルチャンネルデータ解析フローに基づき (図 42)、品質を向上させた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。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解析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解析は反射断面の品質向上には有益である。

この解析の結果、堆積層内の変形や層序もよく確認できた。解析例を図 43 に示す。

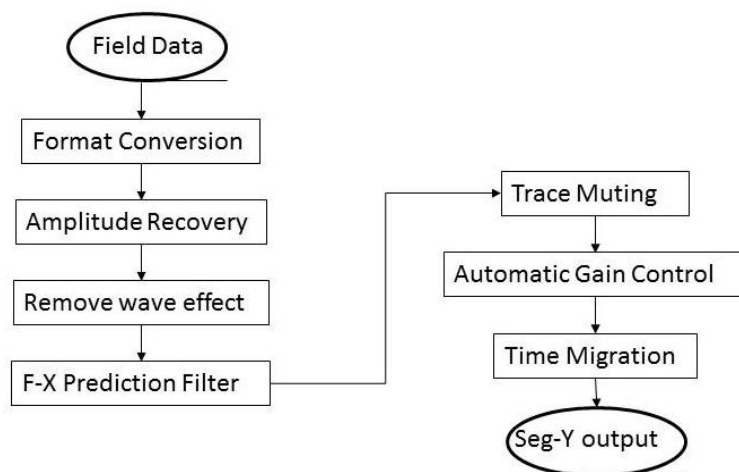
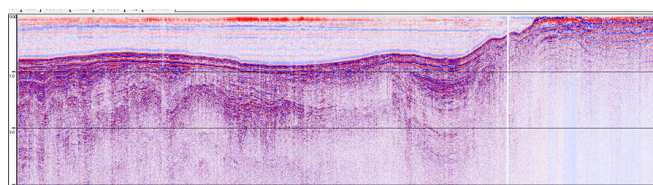


図 42 シングルチャンネルデータの解析フロー

解析前



解析後

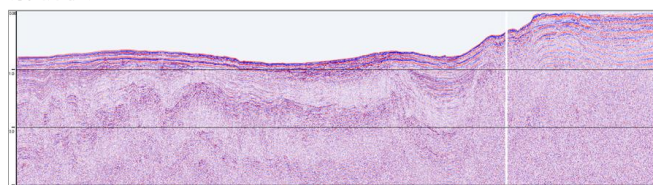


図 43 解析前後の記録例

2) 海域における速度構造モデルの作成

石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、産業総合研究所（AIST）、海上保安庁などの様々な機関から提供された反射法探査データ、OBS 調査データ及び坑井の情報を使用し、ホライズンの解釈を加えて、3 次元速度構造モデルを構築した（図 44）。速度構造モデルを作成するにあたり、効率性を考えて、日本海を東部と西部の 2 つの領域に分けた（図 45）。なお、東部と西部で別々に計算を行なって速度モデルを作成したが、両者の境界付近については重なる領域を設置し、接合が取れるようにした。海底面（図 46）、A-horizon（図 47）、B-horizon（図 48）

の解釈を行った。A-horizon として主に日本海の広い地域に形成されている中新世の不整合面を追跡した。B-horizon は堆積層と上部地殻との境界と定義した。堆積層は A-horizon を境として、Sediment1 と Sediment2 の 2 つに分けた。海底面はシングルチャンネルデータを含む全ての測線で解釈を行ない、海底面以下の A-horizon、及び B-horizon は深部まで反射波が明瞭に見えているマルチチャンネルデータ測線で解釈を行った。B-horizon 以下の C-horizon 及び Moho 面については本プロジェクトのデータは使用せず、既存の論文などで使用されているデータを基にして作成した。C-horizon は上部地殻と下部地殻の境界にあると考えられる速度ギャップの箇所とし、論文をもとに深度を決定し、情報のないエリアは上部の B-Horizon に添う形になるように作成した(図 49)。Moho 面は下部地殻とマントルとの境界で、他のプロジェクトのデータや人工衛星 (GOCE) による重力マップを参考に作成した(図 50)。この各 horizon から 1km グリッドの surface を作成した。 Horizon 解釈時には反射法探査データ以外にも海底地質図や水深図なども参考にし、矛盾しない結果となるように解釈を行なった。作成した速度モデルは、地震波速度の差異に注目して境界を設定したため、必ずしも地質的な境界とは一致しない場合もある。

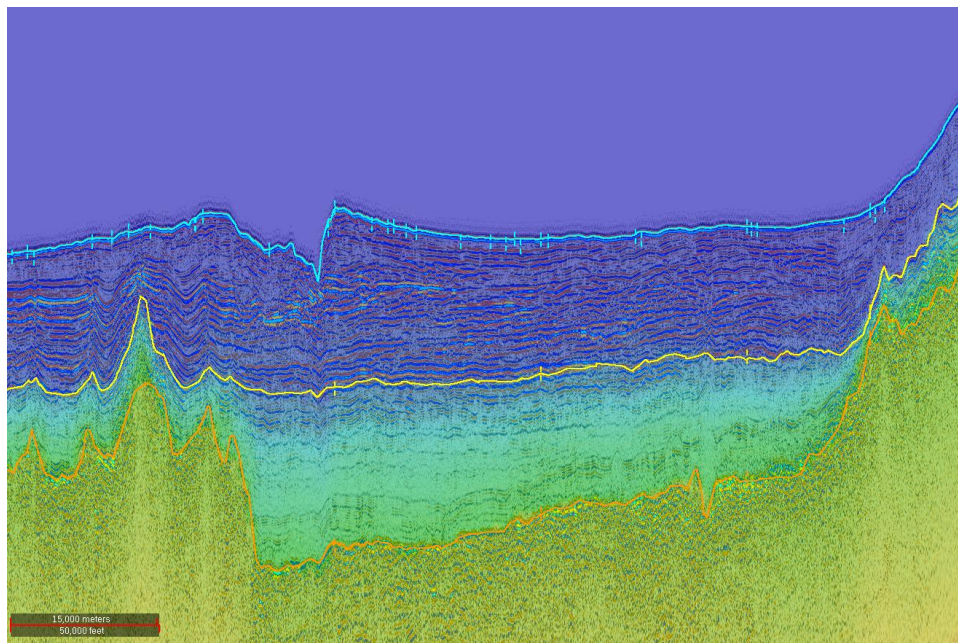


図 44 反射法地震探査データ上での Horizon 解釈の例。青線が海底面、黄線が A-horizon、橙線が B-horizon を示す。

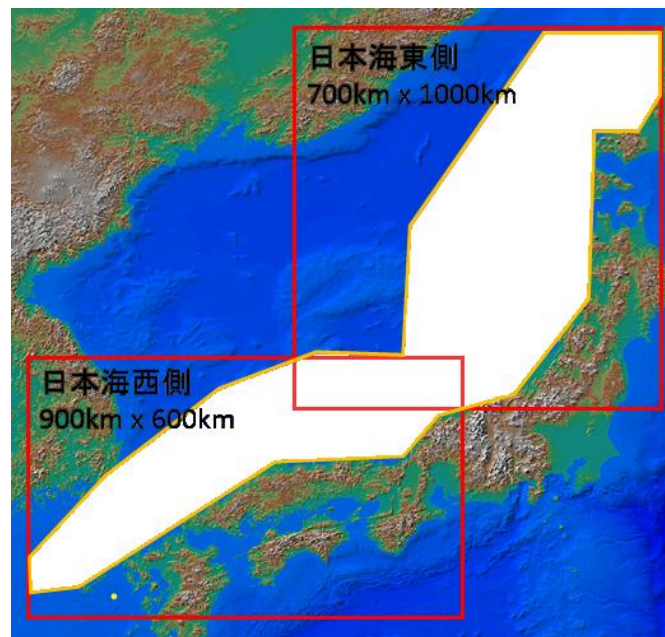


図 45 赤枠は速度構造モデルの作成領域を示し、オレンジの枠は物理探査データの測線の範囲を示す。

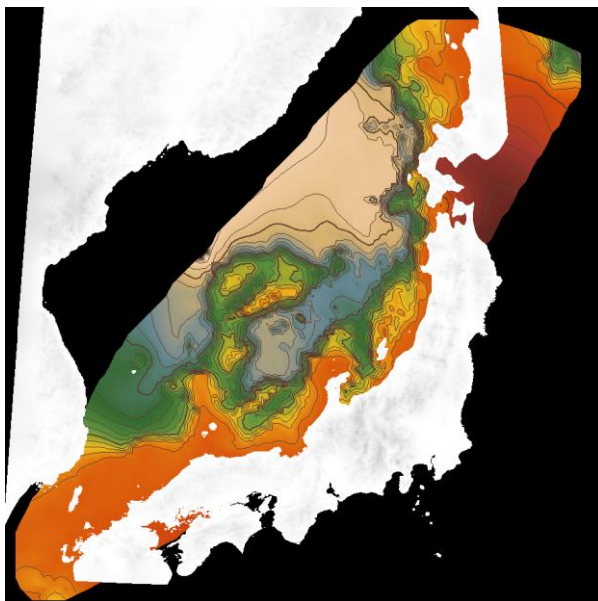


図 46 海底面の解釈範囲

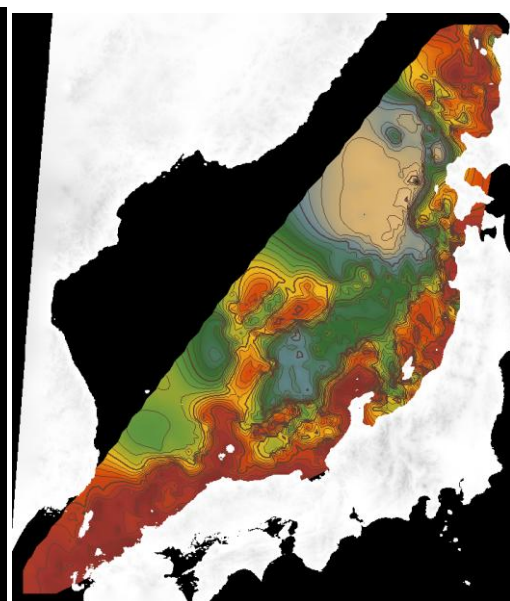


図 47 A-horizon の解釈範囲

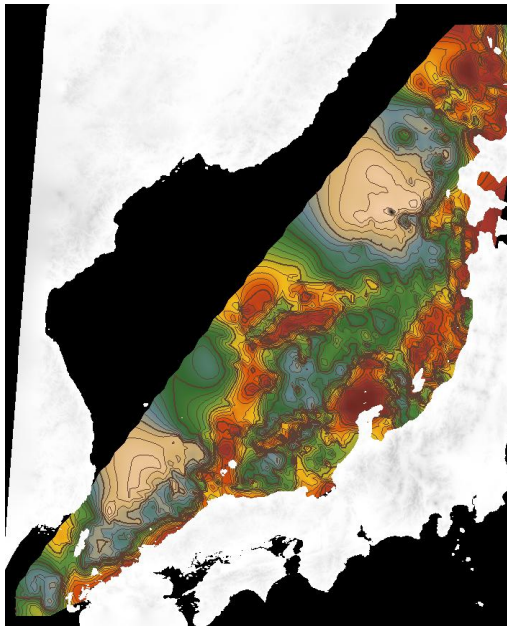


図 48 B-horizon の解釈範囲

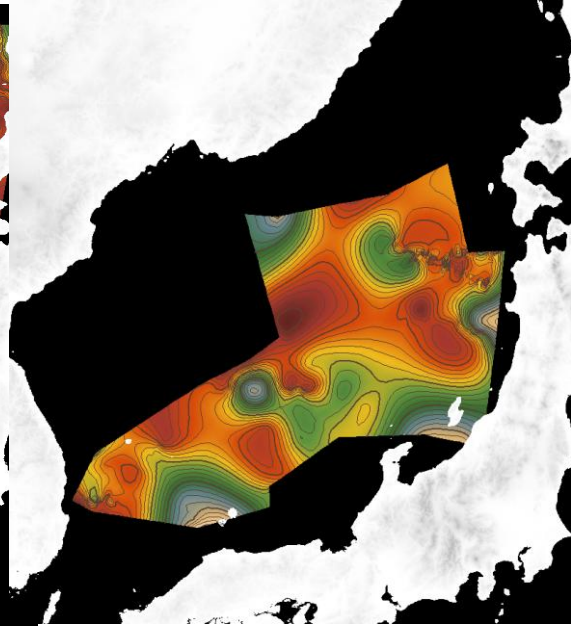


図 49 論文を基にした C-horizon で作成した surface

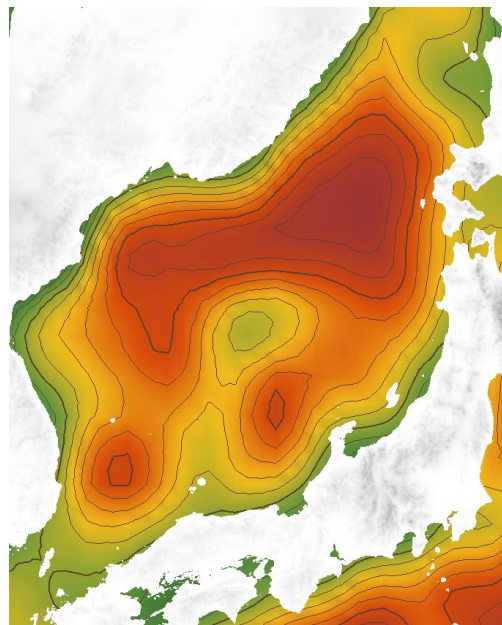


図 50 Moho 面

3次元速度構造を構築するフローを図 51 に示す。まず、ベースとなる速度キューブ（速度モデル 1）を作成した。この速度キューブは反射法探査データの再処理の際に得られる DM0 処理時の速度データや OBS 調査で作成された速度を用いて作成した。また、坑井のデータを用い速度のキャリブレーションを行った。作成した速度キューブはスムージングを行ない、特異な変化が無いようにした。

Sediment1 の速度構造は反射法物理探査データの再処理過程で作成された DM0 処理時の速度データ、及び OBS 速度データを使用し、坑井の速度データを用いてキャリブレーションを行った。

作成した各 surface を速度キューブに当てはめ、層構造 (Sea Water、Sediment1、Sediment2) を作成する。Sediment1 は速度モデル 1 の値をそのまま用い、Sediment2 は計算式を用いた速度を入力する。Sediment2 の速度は、マルチチャンネルデータ上であっても反射波が明瞭に見えない場合があるため、反射法地震探査の速度データは使用せず、上面は Sediment1 の基底速度となるようにし、下面は 4700m/sec とするように速度関数 K を求めて計算を行なって決定した ($V=V_{A\text{-horizon}}+K*(Z-Z_{A\text{-horizon}})$)。 K は場所によって異なるため、 K の分布を示す $K\text{-map}$ を作成し、計算に用いた。Sediment2 以下はこの時点では一定値を入力している。これによってできた速度キューブを速度モデル 2 とする。

速度モデル 2 により、時間ドメインであった海底面、A-horizon、B-horizon を深度ドメインに変換する。その後、マントルまでの最終速度モデルを深度ドメインで作成する。この時、Sediment2 以下を上部地殻、下部地殻、マントルに区分し、論文を参考にした計算式を用いて速度構造を求めた。まず、上部地殻は下面を 6390m/sec とし、速度関数を 0.23 として計算を行なった ($V=6390+0.23*(Z-Z_{C\text{-horizon}})$)。下部地殻は上面を 6580m/sec とし、速度関数を 0.06 として計算を行なった ($V=6580+0.06*(Z-Z_{\text{Moho}})$)。上部地殻と下部地殻の境界には速度ギャップの存在が示唆されており、本プロジェクトの速度構造モデルにおいても、速度ギャップの存在するモデルとした。また、マントルの地震波速度は 8000m/sec 一定値とした。このようにして作成した速度構造モデルを最終速度構造モデルとした (図 53)。図 54 から図 66 までは、3 次元速度構造の断面例を示す。

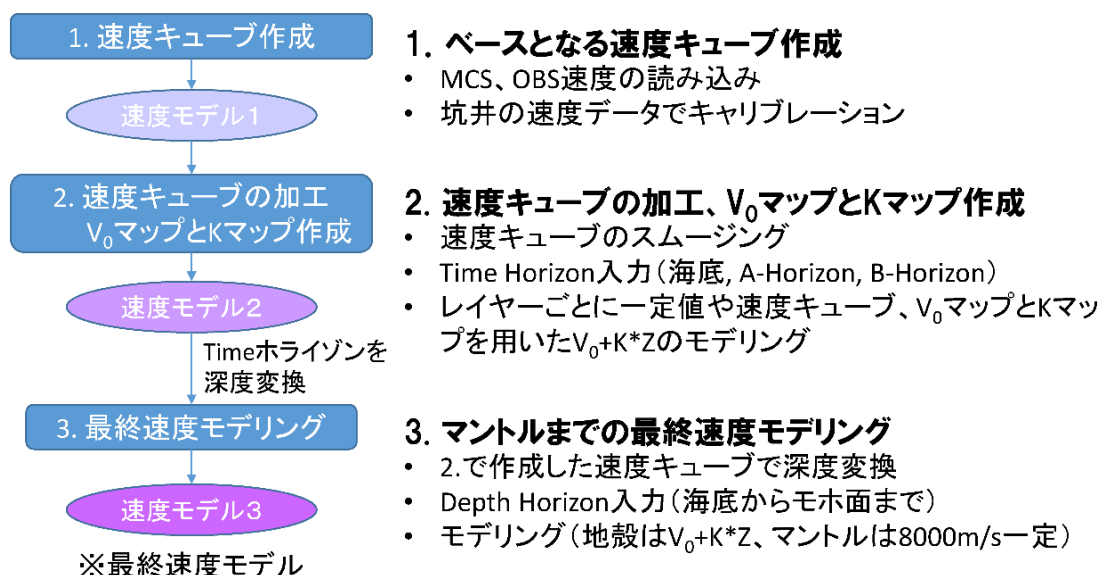


図 51 速度構造モデルの処理フロー図

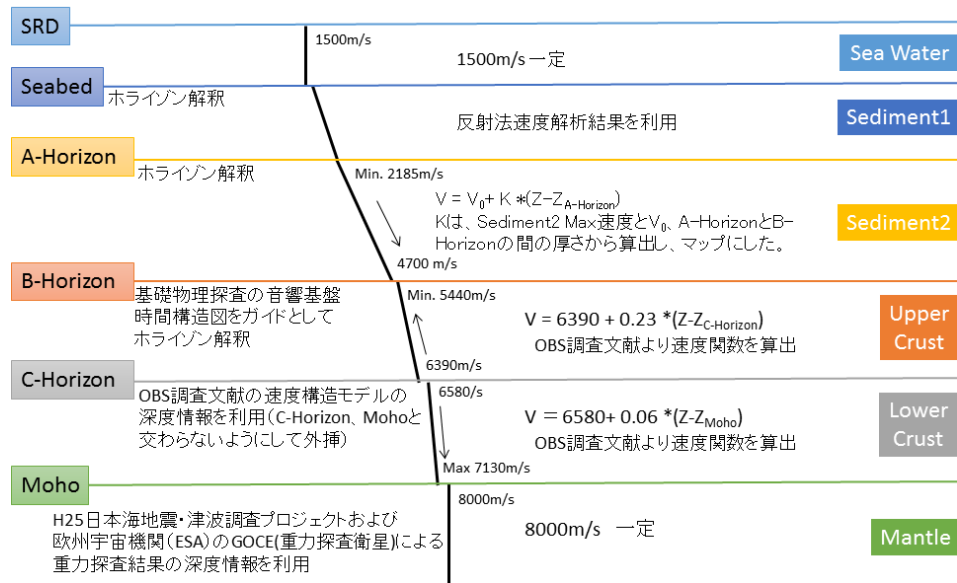


図 52 速度構造の層構造図

続いて、この最終速度構造モデルを使用して反射法地震探査データ及び断層情報の深度変換を行った。深度変換を行なうことで、断層の見かけの傾斜や形状などが変化する。これは、水平方向に地層構造や地震波速度が一定でないため起こるもので、図 66 や図 67 のように変化する。深度変換をした後に解釈を行った断層をそれぞれ表示して確認したが、おおむね問題なく深度変換が完了していることが確認できた。

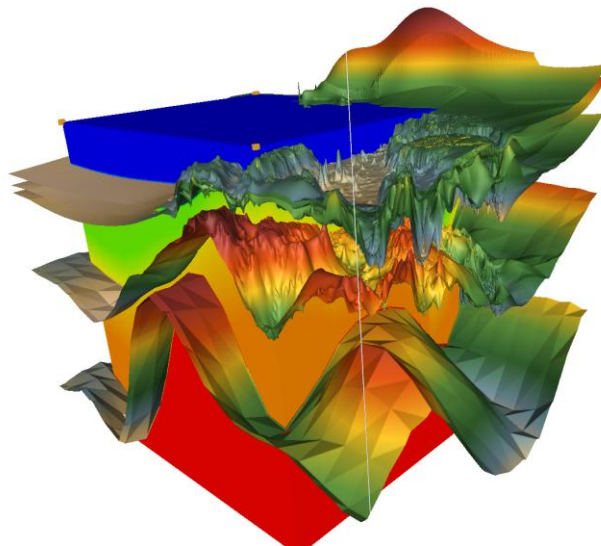


図 53 速度構造モデル概観。3次元で速度キューブと surface を表示させた。日本海の東部。

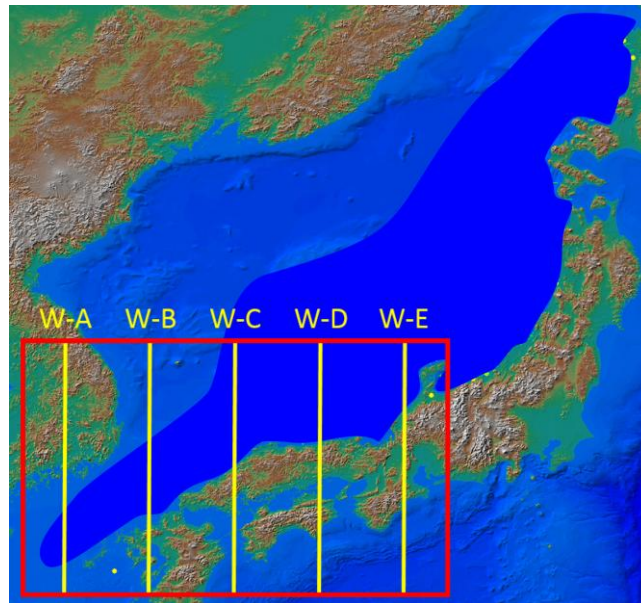


図 54 速度構造モデルの断面測線位置図(西側)

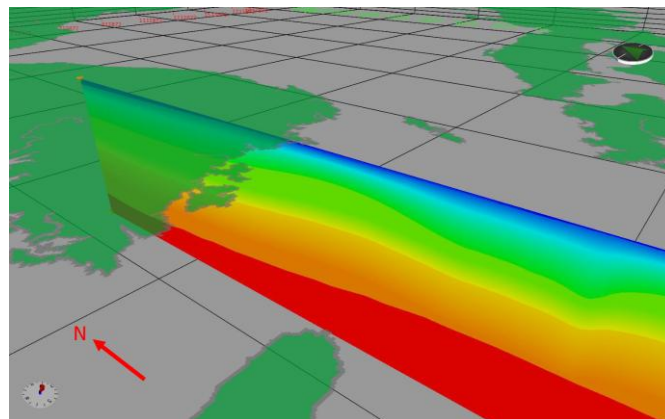


図 55 速度構造モデルの W-A 測線断面図

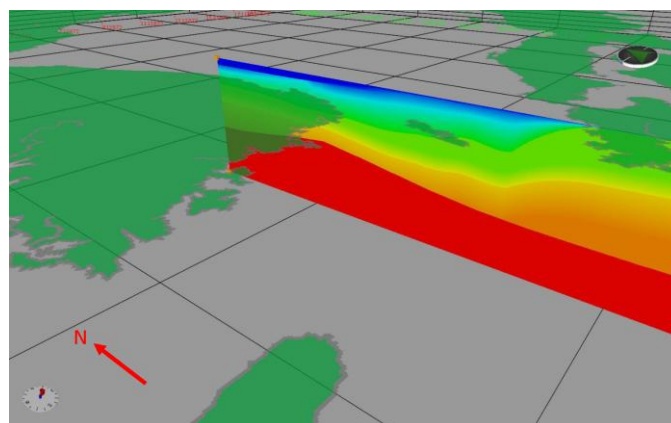


図 56 速度構造モデルの W-B 測線断面図

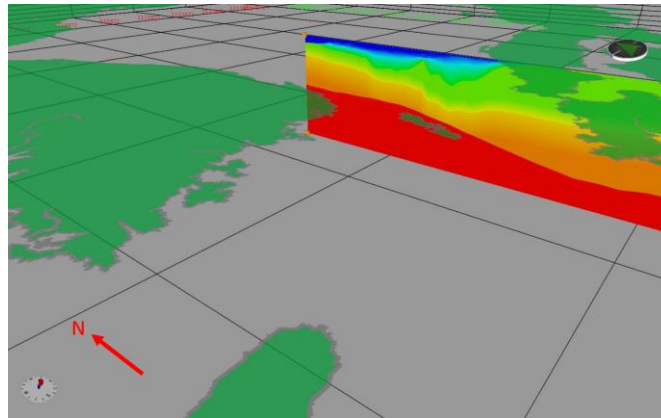


図 57 速度構造モデルの W-C 測線断面図

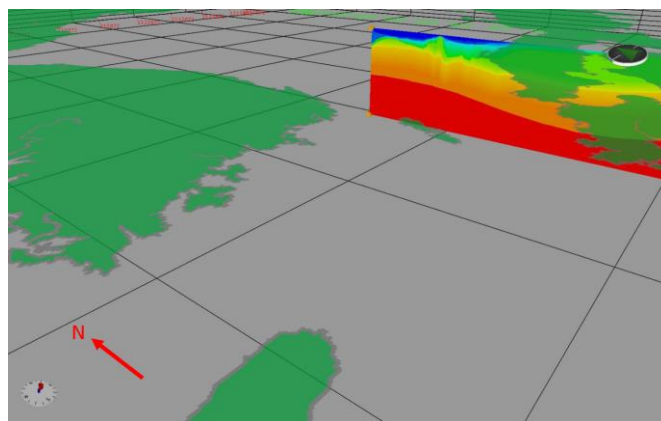


図 58 速度構造モデルの W-D 測線断面図

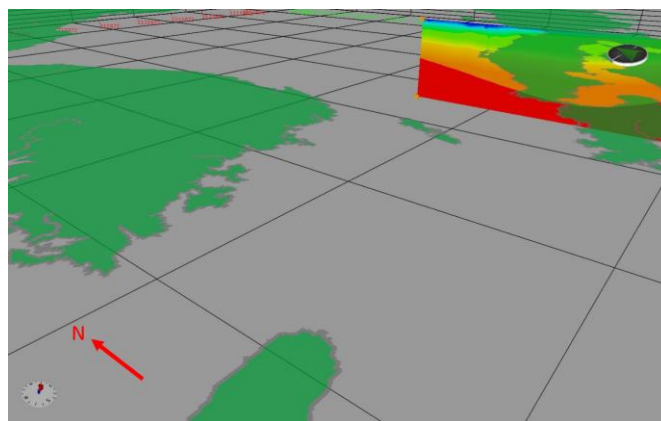


図 59 速度構造モデルの W-E 測線断面図

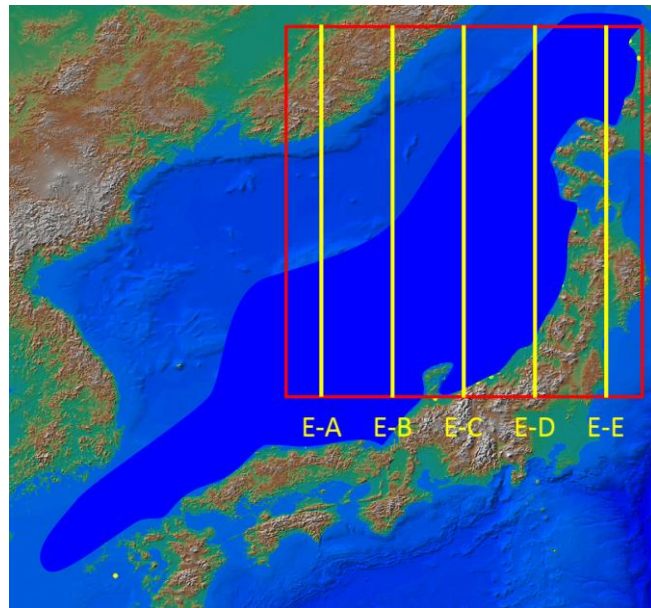


図 60 速度構造モデルの断面測線位置図(東側)

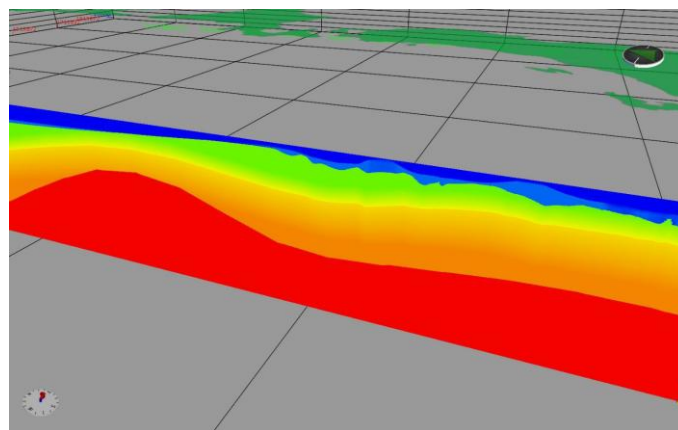


図 61 速度構造モデルの E-A 測線断面図

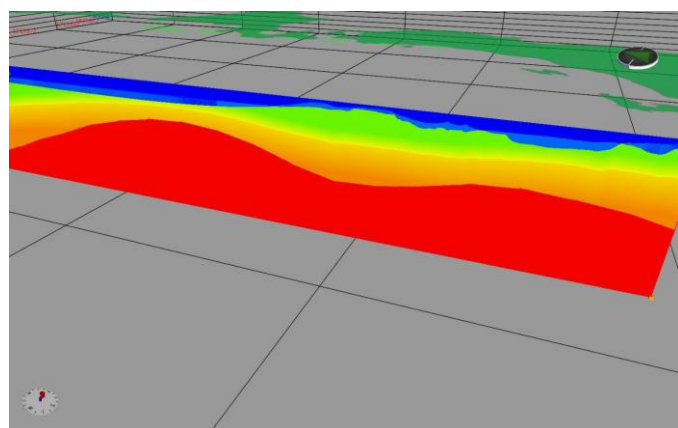


図 62 速度構造モデルの E-B 測線断面図

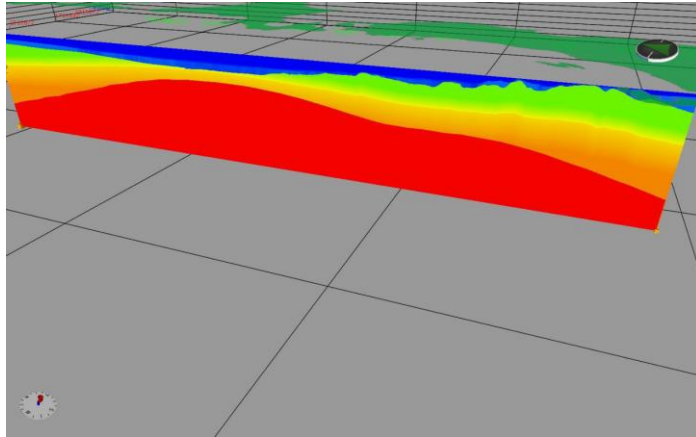


図 63 速度構造モデルの E-C 測線断面図

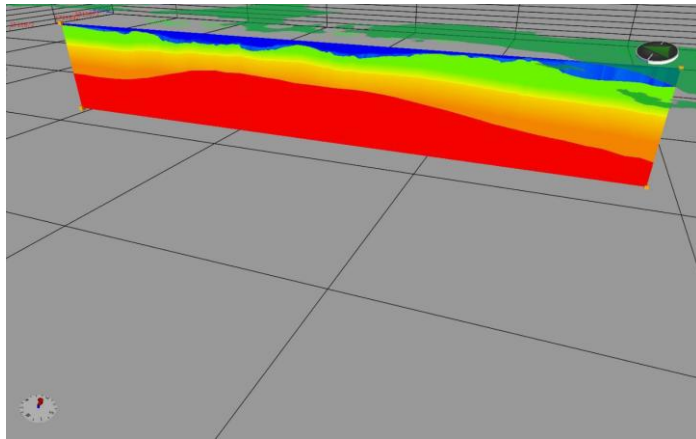


図 64 速度構造モデルの E-D 測線断面図

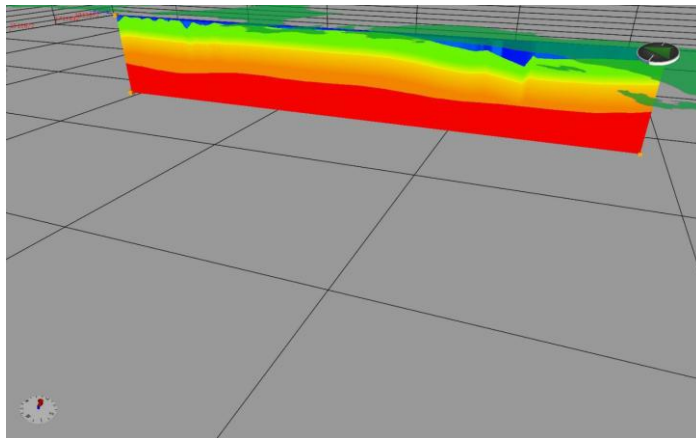


図 65 速度構造モデルの E-E 測線断面図

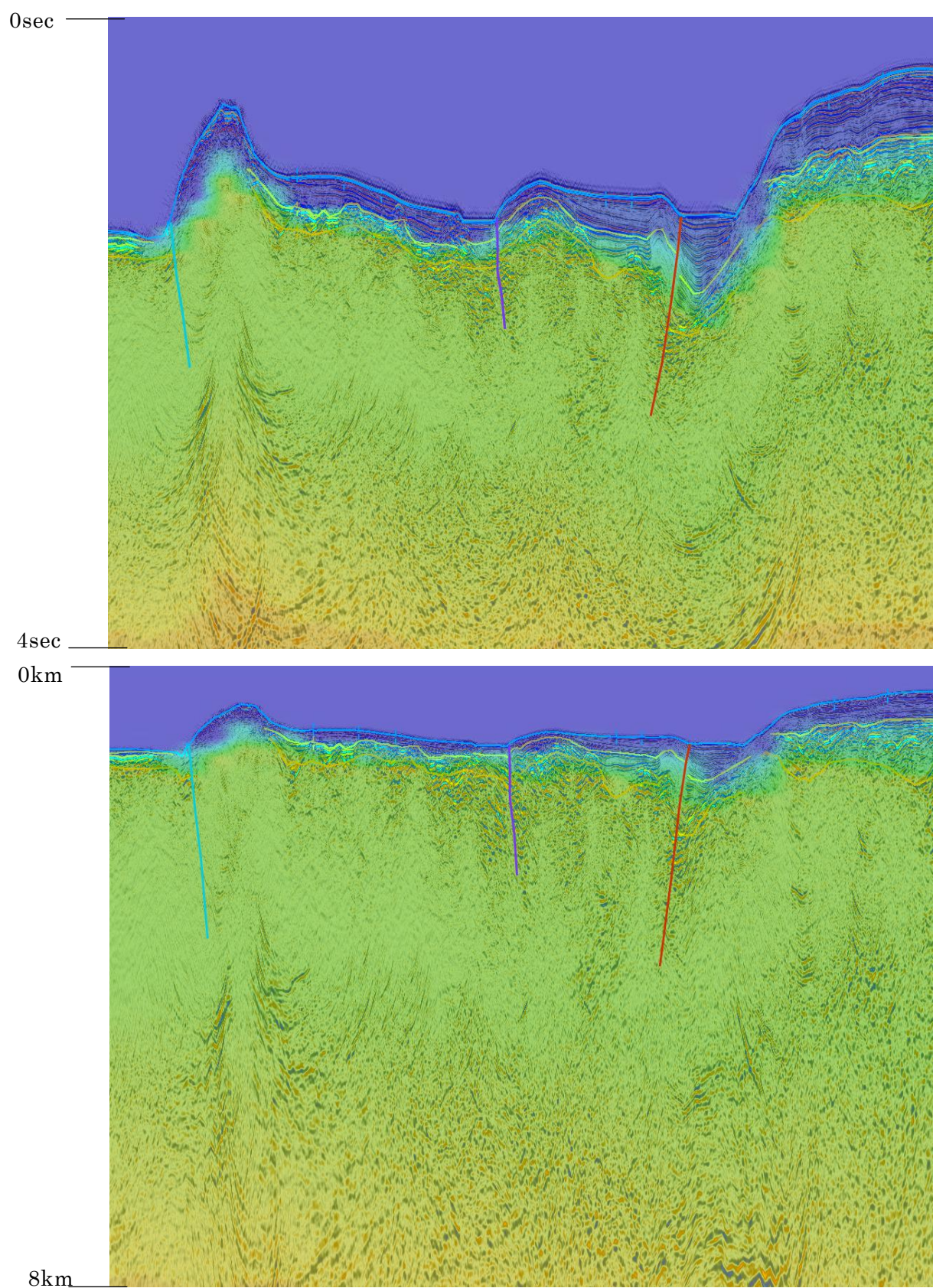


図 66 地震探査断面図および断層の深度変換前後。上は時間断面。下は深度断面。

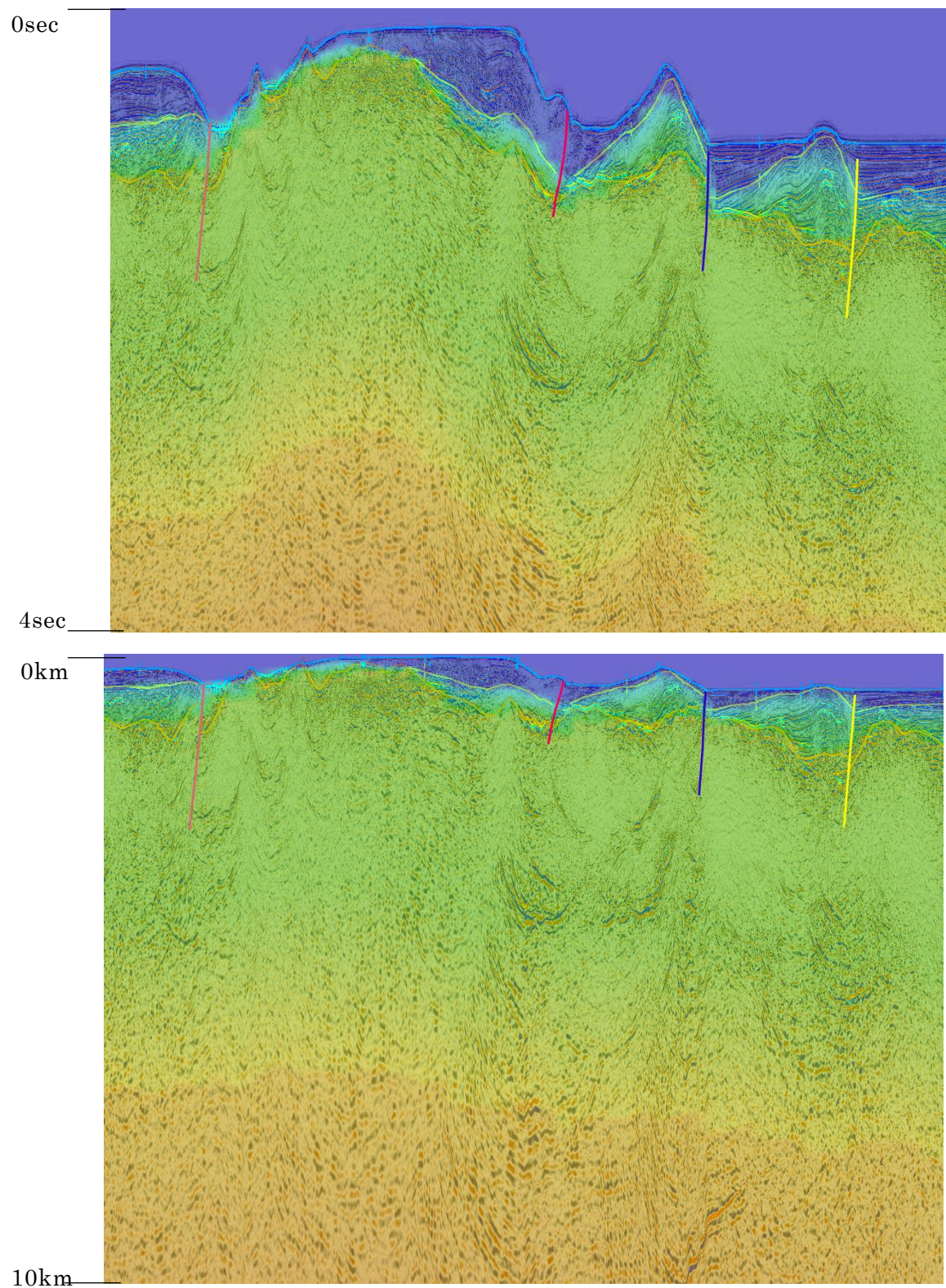


図 67 地震探査断面図および断層の深度変換前後。上は時間断面。下は深度断面。

3) 解釈と断層リスト作成

(a) 解釈基準策定

断層解釈にあたり、まず基準を同定することが必要である。断層として特定する基準は以下とした。

- 地質構造（堆積層内での変位、撓曲など）に変位がある
- 且つ、海底地形の変位が見られる

今回の断層解釈作業で最も重要な事は、特定した断層が断層面として連続するかを判断する事にある。この解釈作業で求まった断層情報は防災科学技術研究所（NIED）に提供される。NIED は、特定された断層から、想定される地震の規模、津波の大きさをモデル計算し、地震調査研究推進本部の評価のための基礎データを作成する。断層面を特定する基準は以下のように設定した。

- 断層が震探断面上で明確に認定出来る
- 地質構造から、同じ断層と認識出来る
- 新規断層の場合、連続して 3 測線以上の震探断面で確認出来る

なお、既存の報告書等で解釈されて断層の位置とほぼ同じ位置にある場合は、連続して 2 測線で確認出来る場合も例外として特定した。以上の条件を満たした断層面を特定し、平成 26 年度の成果とした。

断層評価では、断層の活動性評価を目的とはしていないが、地震動や津波のシミュレーションを実施するため、活断層であるかの判断が必要となり、その判断基準の策定も求められた。断層が海底面まで延びていて、海底面の地形に変位があれば、極めて最近まで断層が動いていたことと判断出来る。そこで、今回特定した断層面は、海底面まで断層が延びているかを基準に、ランク付けを行った（表 4）。

ランクⅠ：堆積層内の地質構造に変位があり、且つ、海底地形にも変位がある。

ランクⅡ：堆積層内の地質構造に変位があるが、海底地形には変位が見られない。
次に、断層がどの深度まで延びているかを、図 68 を例とするような断面図上で判断した。

ランク A：Sediment 1（中新世の不整合面）

ランク B：Sediment 2（音響基盤）

ランク C：Upper Crust（上部地殻）

ランク D：Lower Crust（下部地殻）

以上、2 種類の判断から、表 3-1 に示すランク付けを全ての断層面に対して行った。

表 4 断層ランク付け一覧

	A	B	C	D
I	I A	I B	I C	I D
II	II A	II B	II C	II D

以下に断層解釈、及びそのランク付けの例を示す。

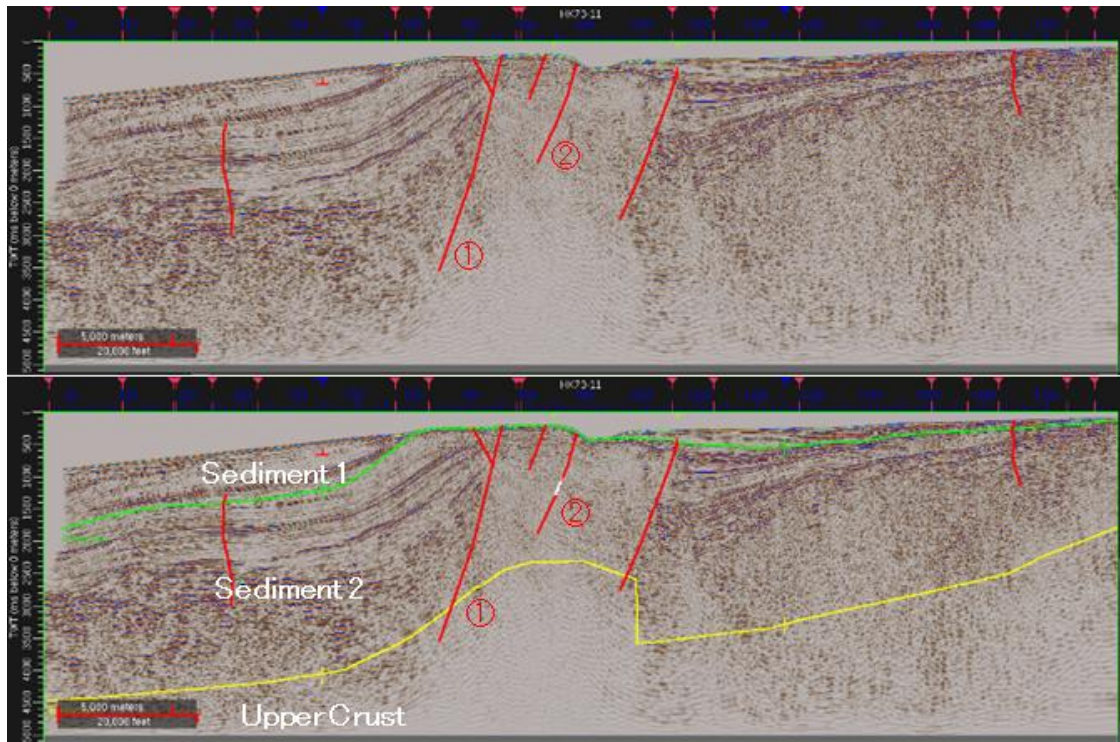


図 68 断層の延びによる分類の例。①海底地形の変位あり。断層の延びは Upper Crust 内まで⇒I C、②海底地形の変位あり。断層の延びは Sediment2 内まで⇒I B となる。

活断層である可能性がある海底まで達している断層については、解釈を行うに際し、日本海における応力場を理解する必要がある。Terakawa and Matsu'ura (2010) によると、図 69 に示す通り、能登半島付近を境界として、応力場が異なっている事がわかる。即ち、能登半島西側では、横ずれ断層、東側では圧縮場による逆断層が支配的である。この結果から、震探断面図を利用した断層解釈結果も同様の特徴が確認できた場合、断層の連続性を含めて空間分布を整理することとした。

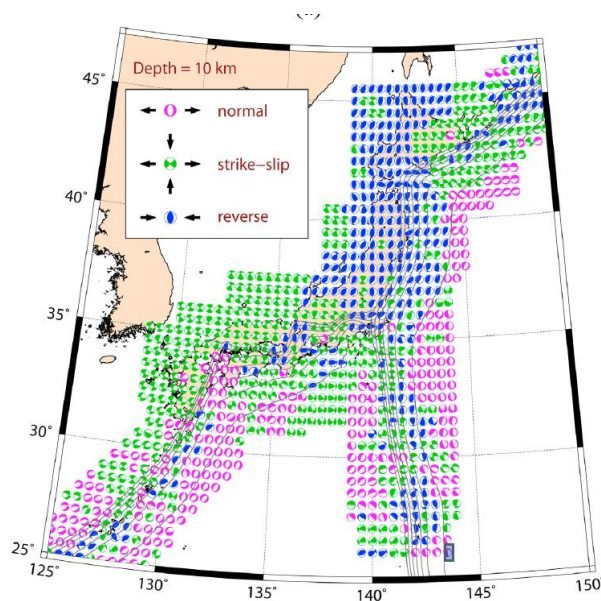


図 69 日本周辺の応力パターン (Terakawa& Matsu'ura (2010))

(b) 使用データ

使用するデータには、主にシングルチャンネルサイスミック（SCS）と、主に石油探査用に使われるマルチチャンネルサイスミック（MCS）の 2 種類がある。各データの特徴は以下の通りである。

(1) SCS (Single-Channel Seismic)

- 測線密度が細かい
- 震源の周波数帯域が高く、高分解能であり、浅部に特化した解釈に有効
- シングルチャンネルのデータのため、反射法地震探査の処理が殆ど出来ず、速度情報得られない
- ゼロオフセットへの補正がされていないので、海底面が傾斜している場合、SCS 測線同士の交点で反射面に時間差が見られる
- 震源エネルギーが小さいので、深部のイメージ取得が困難である

(2) MCS (Multi-Channel Seismic)

- 震源エネルギーが大きく、且つ重合効果で、深部までのイメージを取得出来る
- 反射法地震探査の処理過程で速度情報の入手が可能
- ゼロオフセットへの補正がされているので、急斜面を除き、MCS 同士の交点では反射面が一致する場合が多い
- 調査測線の密度が粗い
- 震源の周波数帯域が相対的に低く、データの分解能が低い
- 調査海域全体でのデータ取得が行われていない

このように、利用したデータには各々特徴があるため、2 種類のデータの利点を活かして主として SCS データは断層の位置特定に使用し、MCS データは断層の形態の把握にも活用して、断層の有無を決定した。尚、断層を特定する際、ほぼ全てのデータを活用した。

(c) 解釈断層

(1) 断層分布の特徴と整理

下記の図 70 は、今回の断層解釈で判明した海域断層と陸上の活断層を重ね合わせた図面である。この図面から、一部の陸上の活断層が、海域まで延長していることも確認できた。九州北部の断層群や、新潟県の角田弥彦断層があげられる。表 5 には、平成 26 年度の断層解釈作業で特定された断層の数を海域別に纏めた。この作業では、全体で、237 の断層面を特定した。

また、各断層の特徴を記述した図 71 のようなテンプレートを作成した。このテンプレートには、断層の典型的な特徴を示す代表的な震探断面図も添付し、1 枚のテンプレートで、断層の特徴が理解出来るように心掛けた。最終的には、データベース上で検索できるような機能を持つこととなる。

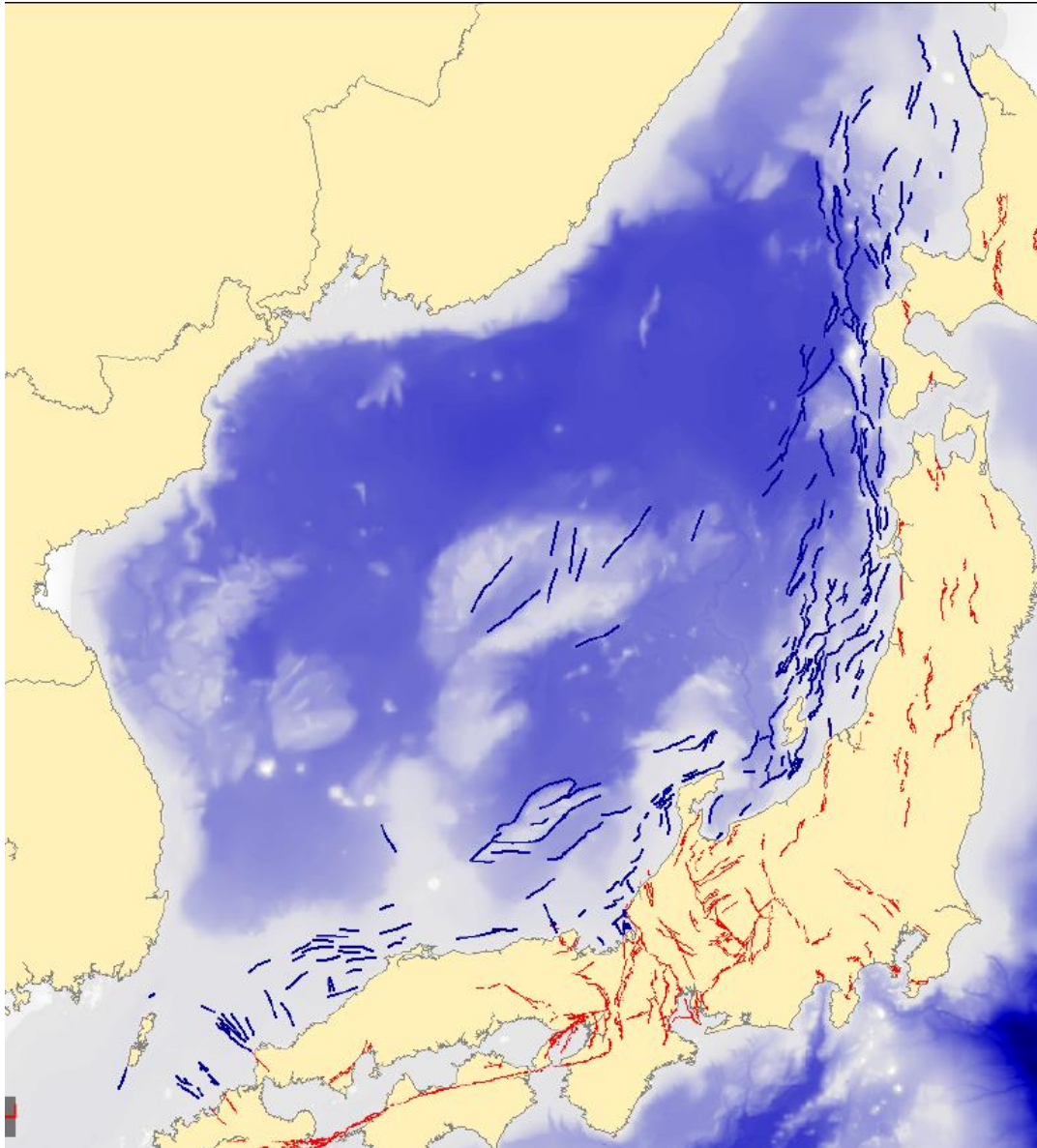


図 70 陸上活断層（赤色）と海域断層（青色）分布図
 海域断層は、今回の作業で特定された断層面

表 5 日本海での断層面の数（海域別）

海域名	断層面数	海域名	断層面数
北西九州沖	12	隠岐海嶺	10
山口沖	11	大和堆	10
島根沖	20	新潟沖	35
鳥取沖	2	山形沖	12
京都沖	3	秋田沖	24
福井沖	11	青森沖	15
石川沖	19	北海道西方沖	48
富山沖	5		

解釈者ステータス	終了
----------	----

海域	青森西方海域
----	--------

断層名	AOM-09	
実施年度及び担当者	2014年 清水	
更新年度及び担当者	未更新	
特徴	レベル	I D
	タイプ	逆断層
	走向／傾斜	南－北／東傾斜
	長さ	約 55km
	最大比高	9 km (EMJS1205)
	使用された測線数	MCS 4本、SCS 8本
	代表的な測線名	EMJS1205
参考資料	ワーキンググループ断層図	
Remarks	日本海中部地震の震源断層	
	MCSでは、海底下3秒まで断層による反射が認められる	
	SCSでは、海底の変位のみ認識出来る	

管理者記入欄

管理者ステータス	例:チェック済、作業依頼、など
最終チェック日	2015年3月10日
前回チェック日	
管理者コメント	

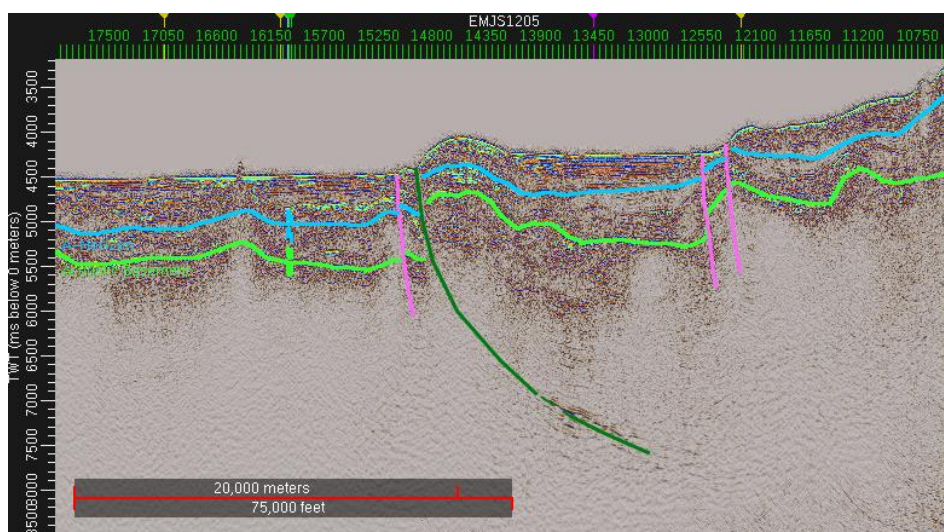


図 71 断層解釈作業例。(上) テンプレート、(下) 対象断層 (図中の緑線)。
 水色 : A Horizon、黄緑色 : B Horizon、桃色 : 特定出来なかった段層、
 緑色 : 特定された断層面

(2) 各海域の断層の特徴

1. 対馬周辺海域

対馬周辺海域では、高密度の SCS データが存在せず、且つ MCS の測線間隔も広いため、断層の有無の確認では重力データや地質構造を参考にした。2本の MCS で同じ形態の断層が確認され、且つ、重力データから対馬に沿って西側に堆積盆が存在することが推定されたので、対馬西側の 2 本の MCS と、島の南西部の測線 1 本を使い、長い正断層の存在を推定した。同海域では電力会社が反射法地震探査を実施しており、その報告書に対馬西側の断層様子海が示されている(図 72 参照)。そこで、対馬西側の断層は、2 つに別けて解釈するのが妥当であると判断した。

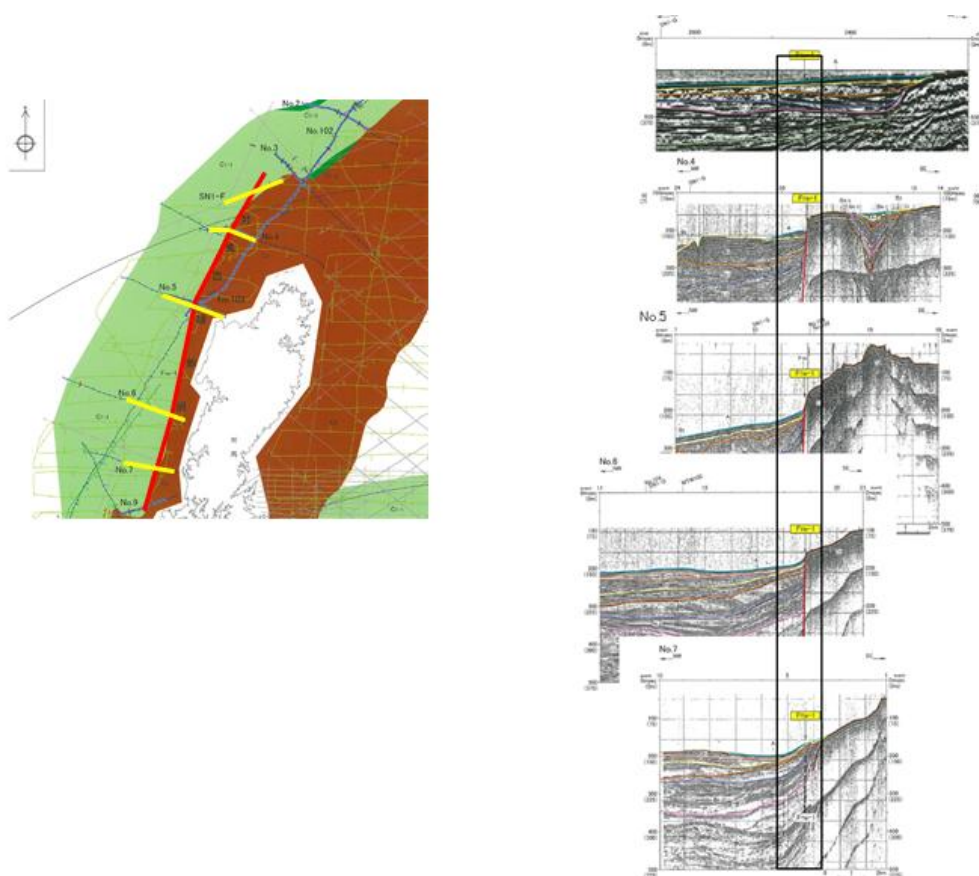


図 72 対馬周辺の断層分布（九州電力報告書より引用）。薄緑色は堆積層、茶色は基盤隆起帯を示す。右側の断面図は、左の黄色で示された測線の震探断面である。なお、断層部分が図の中心となるように各図面をずらして表示。

2. 福岡～山口沖

この海域では、応力場から判断すると、横ずれ断層が発達していると考えられる。横ずれ断層の場合、断層に平行な測線では、その変化を見出すことが非常に難しい。断層を垂直方向に横切る測線では、多少、地層の変化等を見る事が出来る可能性がある。

ここでは、断層解釈の経過を示す。図 73 には、この海域の測線、及び測線で解釈された断層上端の位置が示されている。図 74 は、図 73 から測線情報を取り除いた図面である。この図から解ることは、測線上に断層が分布している事、断層が無いエリアには、測線が無い事等であって、断層の位置だけでは、断層面を解釈出来ないことが解る。最終的には、図 75 に示す断層面が認められたが、電力会社の報告書に記載された断層、ワーキンググループ断層図を参考にした。

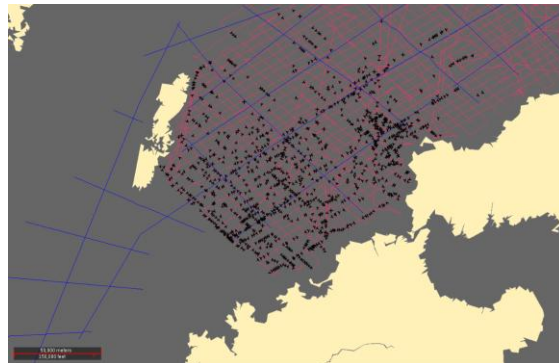


図 73 測線と断層位置

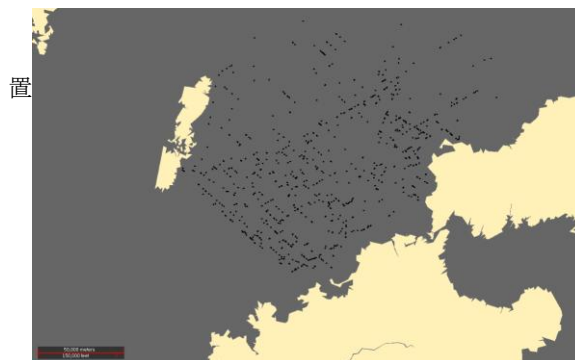


図 74 解釈された総ての断層位置

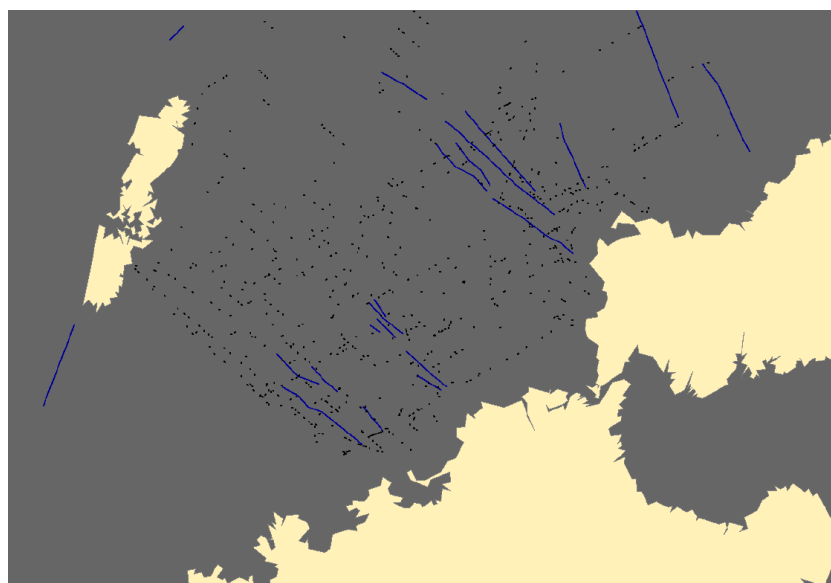


図 75 特定された断層（北西九州～山口沖）。

3. 山陰沖

山陰沖は、比較的断層活動が低い海域である。図 76 は、この測線の深度断面図であり、図 76(下)は、深度断面図に速度構造を重ねた表示である。この断面図で解るとおり、断層は堆積層の深部や、基盤に発達しており、断層のタイプも正断層である。これは、現在の応力場とは異なっており、過去の断層活動と考えられる。また、浅部にも数条の連続性が不明な断層が認められるが、落差も殆ど無く、活発な上下変位を伴った断層活動が続いていたとは考えられない。一方、海岸線近傍では、横ずれ断層が発達している。図 77 は、SCS の時間断面図であるが、ここでは 1927 年に発生した北丹後地震の震源エリアで発達した断層が海域へ延長していると思われる箇所に、横ずれ断層（黄色）が特定された。ここに示した断層は、連続して特定された断層の 1 例に過ぎず、他の測線でも特定された断層は、その傾斜が微妙に異なったケースもあり、多数の小規模な断層が雁行状に延びた断層群と解釈するのが妥当と思われる。

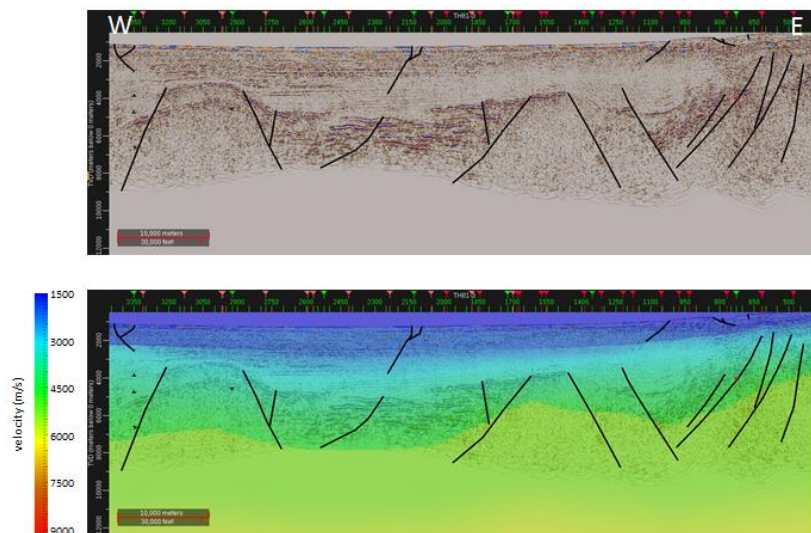


図 76 山陰沖の深度断面例。(上) 反射断面上の断層解釈、(下) 速度構造上の断層解釈。

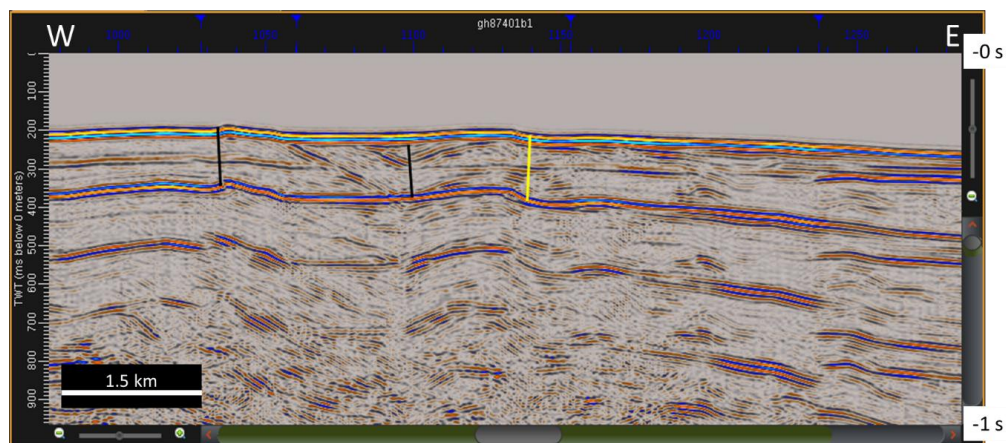


図 77 北丹後地震の海域断面図 (SCS 時間断面図)。黄色が当該断層を示す。

4. 若狭湾

この海域では、SCS が湾内まで実施されているが、MCS が殆ど無く、断層特定は海底面直下の細部までの結果となった。それでも沖合の東北東-西南西方向の断層と湾内の北西-南東方向の断層がいくつか特定できた。海底地形の情報として、JHA 海底地形デジタルデータがあったため、海底の屈曲率を示すアトリビュートを作成した（図 78）。その結果、海底の地形変化を顕在化することで、震探断面図と海底地形により断層上端の位置を特定しやすくなった。

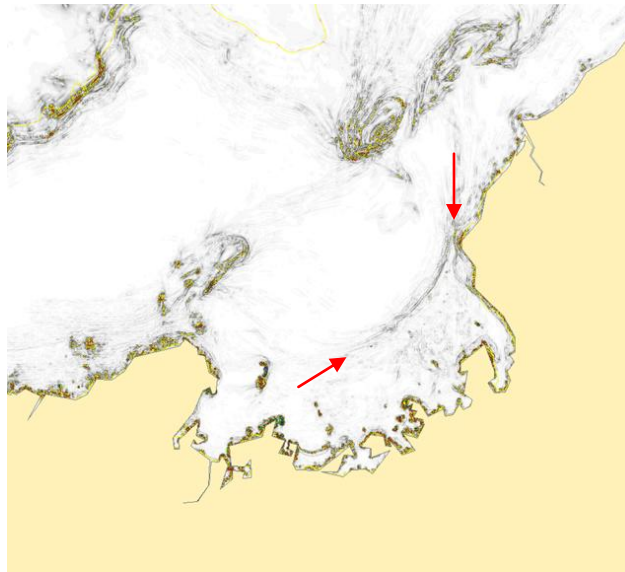


図 78 若狭湾の海底地形。赤矢印：海底地形及び震探データで特定された断層面の位置を示す。

5. 大和堆

この海域では、初めて断層解釈が実施されたが、40～50km と震探データの間隔が粗く、断層解釈（図 79）は出来るものの、同じ断層であるかの特定には海底地形を参考にしている。最終的には海底地形を参考に 10 の正断層面を特定したが、他の海域に比較すると反射記録断面が少ないため、解釈結果の信頼性は乏しい。

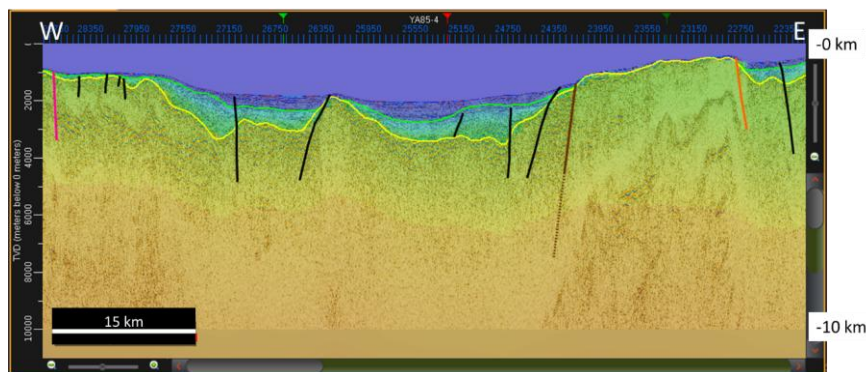


図 79 大和堆の典型的な深度断面図例。背景色は P 波速度を示す（カラスケールは図 76 と同様）。

6. 新潟沖

佐渡島を含む新潟沖の海域で、35 の断層面が特定された（図 80）。35 の断層面は、全て逆断層で、佐渡島とほぼ同様の走向（北北東～南南西）を示す。この走向は、海底地形にも顕著に現れている。

角田付近まで南北に延びている断層（黄色）は、陸上の活断層マップ上に見られる断層の延長部にあたり、角田弥彦断層の海側延長部に相当すると考えられる。

図 81 は、1964 年の新潟地震の震源近傍の震探断面図（深度及び時間）である。海底まで延びる複数の高角な逆断層が特徴的である。

図 82 は、新潟から佐渡島の南西に延びる測線で中越沖地震の震源域を横断する深度断面図である。この断面図上では 6 の逆断層面が確認出来る。殆どの断層が海底まで延びていて、海底にも断層による地形変化が明らかである。尚、断面図上に示された断層の色は、図 81 に示された断層の色と共通で、同じ色は連続する断層であることを示す。

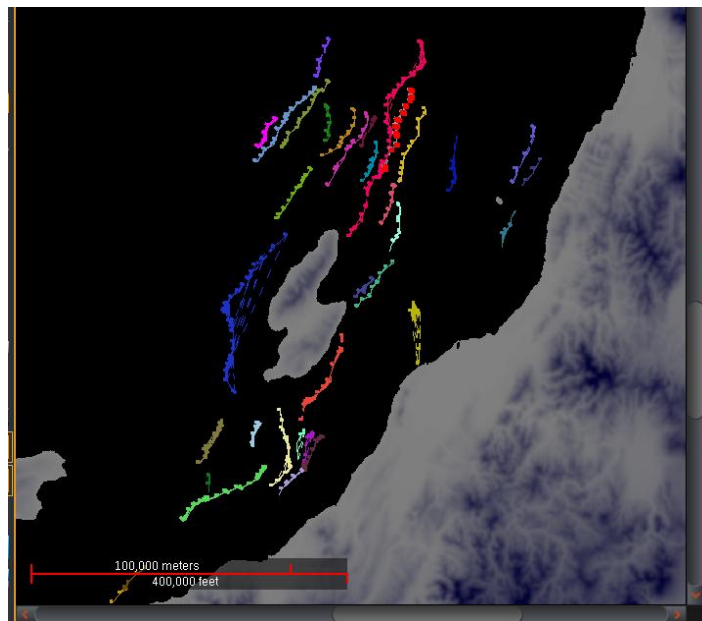


図 80 新潟沖海域断層マップ

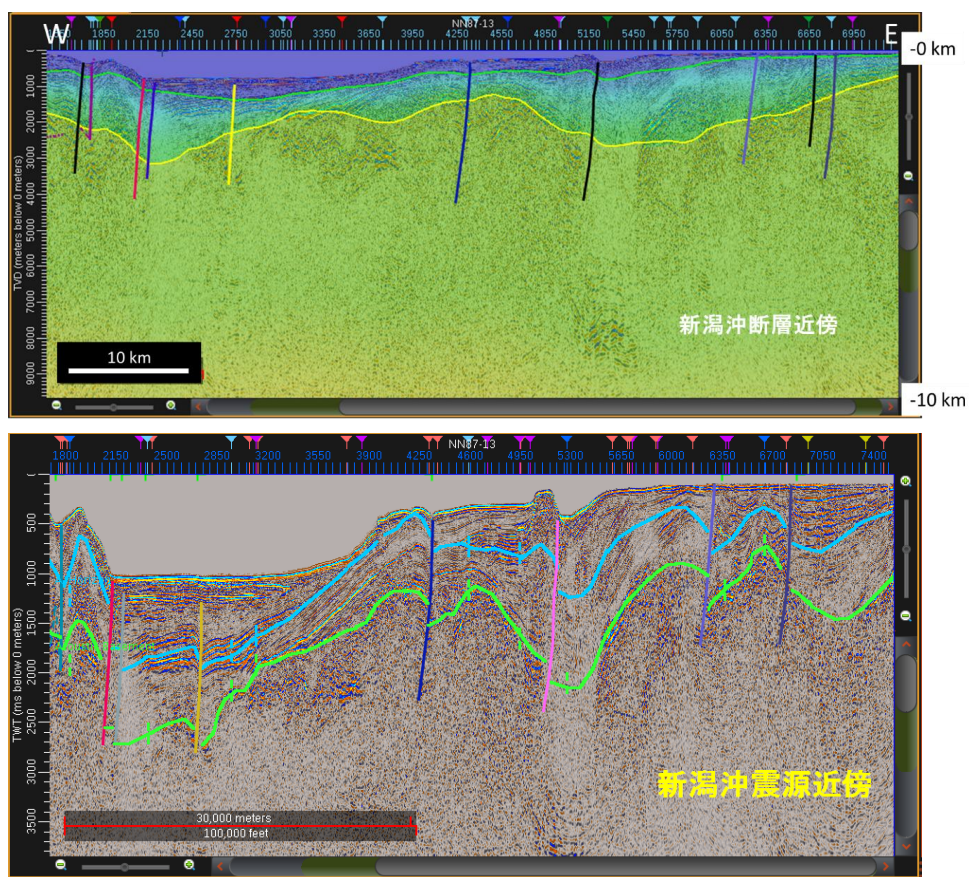


図 81 新潟地震震源近傍反射断面。(上) 深度断面。背景色は P 波速度を示す (カラスケールは図 76 と同様)。(下) 時間断面。

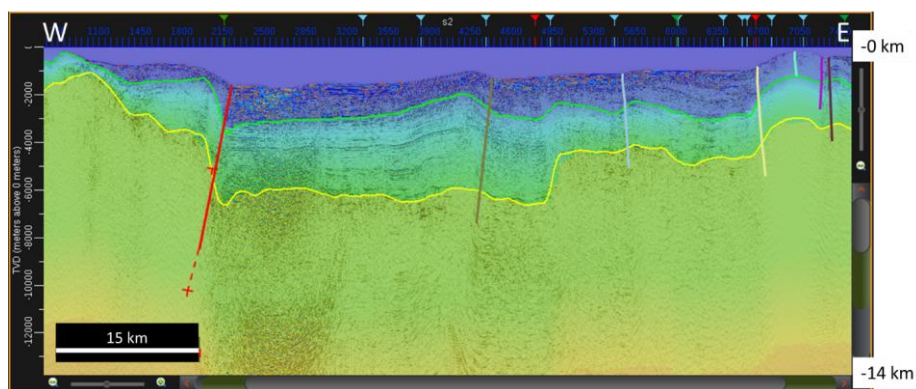


図 82 中越沖地震震源域の深度断面図。カラスケールは図 76 と同様。

7. 山形沖

山形沖では、12 の断層面が認定され、全ての断層が逆断層で、且つ、西傾斜を示している。断層の走向は一般的に海岸線に並行で、北北東－南南西に延びている(図 83)。この海域は、海岸線の沖合を除き、堆積層が非常に薄く、断層の形態は、海底地形に反映されている。今回認定された断層では、すべての断層において MCS データを使った解釈が行われた。そのため、断層の深度方向の延びは、信頼性がある。図 84 は、今回認定された断層を横切る MCS の断面図である。この断面図で解るとおり、断層は、非常に薄い堆積

層を貫き、音響基盤から深部に達している。断層下端の同定は難しいが、上部地殻に至ることが判明した。

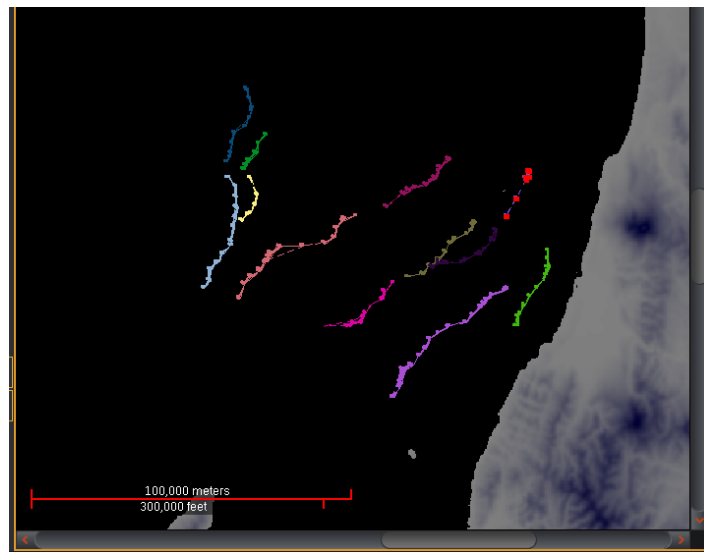


図 83 山形沖断層図。

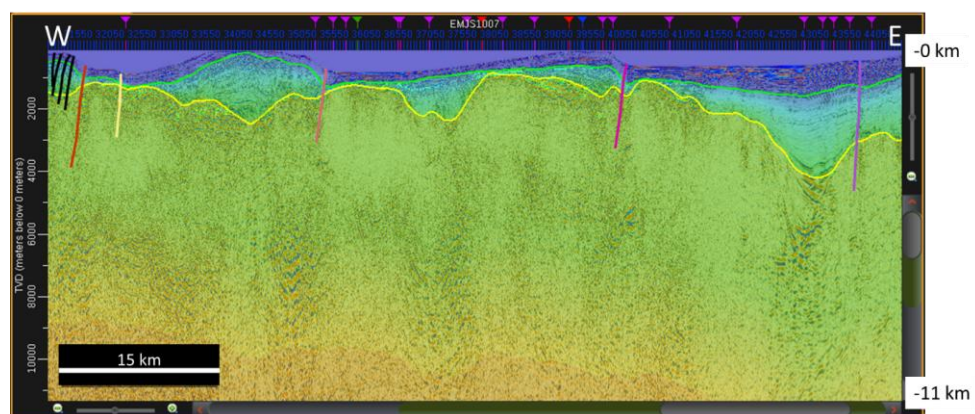


図 84 山形沖の深度断面図。カラースケールは図 76 と同様。

8. 秋田沖

秋田沖では、24 の断層面が特定され、全てが逆断層、また 21 が西傾斜を示した(図 85)。断層の走向は、ほぼ海岸線に並行の北北東～南南西である。図 86 は、秋田沖の東西測線の断面図である。

この断面図での特徴は、海岸近くに約 5km の深さの堆積盆が海岸線と並行に存在するが、その沖側(西)では堆積層が極端に薄くなり、基盤が浅部まで上昇してくる。

図 87 と図 88 は、男鹿半島を挟んだ 2 本の東西測線(時間断面図)である。図 87 が北側の測線で、図 88 が南側の測線である。この両測線の断面図から、断層の向き、形態等が明らかに違っているが、男鹿半島周辺を境に、類似したテクトニクスでも断層の発達過程が異なっている可能性もある。沖合には、北北東～南南西に延びる断層群があるが、これら断層は、大陸棚と西側の大

洋底の境界に発達した断層群と解った。

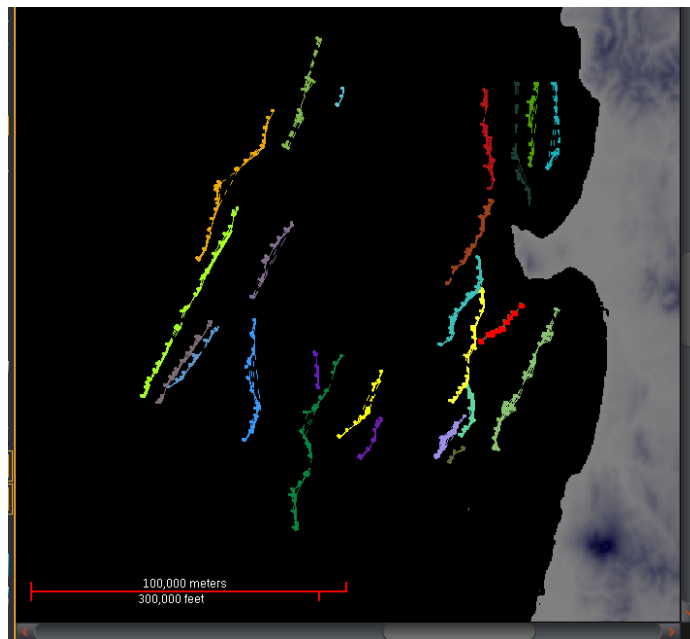


図 85 秋田沖断層図。

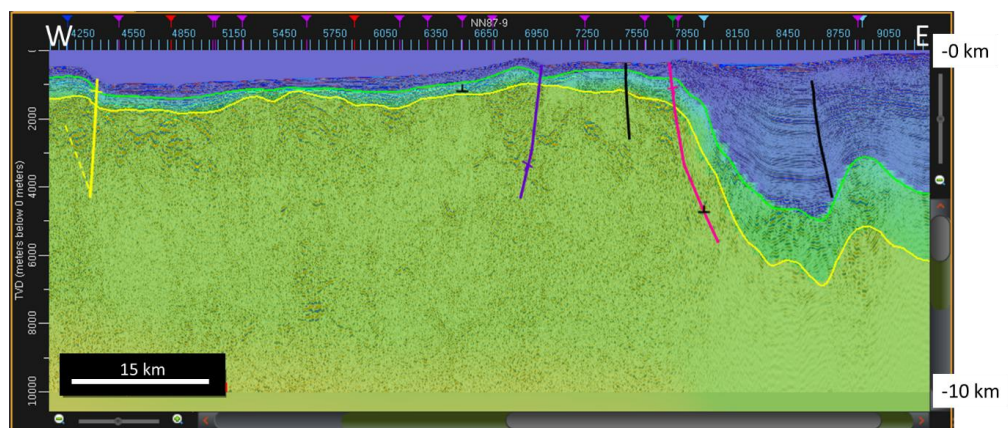


図 86 秋田沖の東西方向の測線に沿った典型的な深度断面図。カラスケールは図 76 と同様。

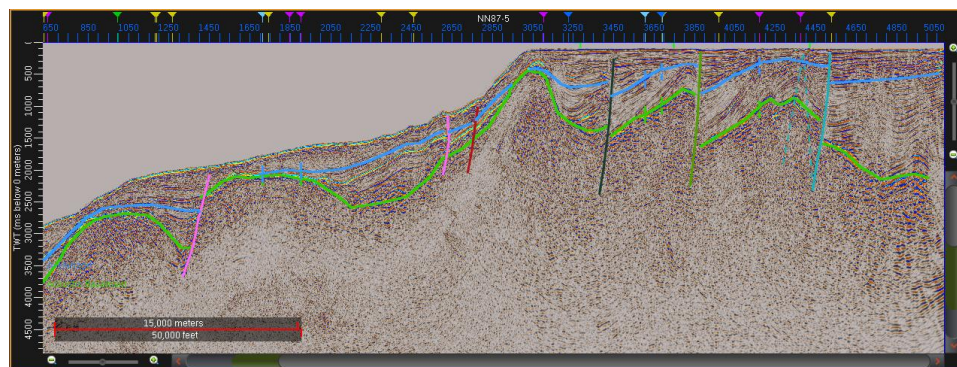


図 87 男鹿半島北側東西測線の時間断面図。

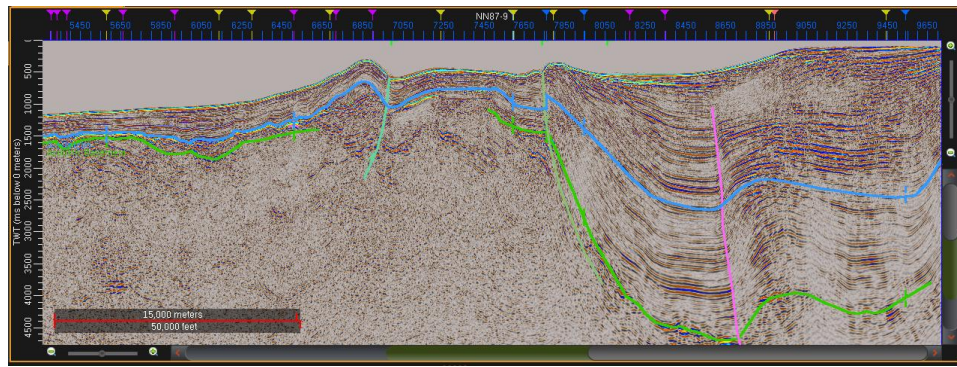


図 88 男鹿半島南側東西測線の時間断面図。

9. 青森沖

青森沖では 15 の断層面が認められ、全て逆断層と解釈された。これらの内、図 89 に示す海岸線に近い 8 つの断層は、ほぼ南北の走向を示し、その傾斜方向は、東西それぞれ 4 つとなっている。各断層は、MCS によって確認されており、比較的深い上部地殻下方まで読み取ることができた。また、これらの断層は、海底地形でも断層により落差が顕著なため、海底地形図からも解釈する事が出来る。一方、図 89 の沖合にある断層は、ほぼ北北東－南南西の走向を示すが、傾斜方向はまちまちである。

この海域で最も特徴的な断層として、AOM-09 が上げられる。この断層は、1983 年 5 月 26 日に発生した日本海中部地震の震源域に位置するが、今回の解釈作業では、断層の長さが南北方向に約 55km である事まで確認できた。EMJS1205 測線（図 90）は、この断層を横切る典型的な震探断面図である。この測線は、MCS のデータで、且つ、震源としてのエアガンの容量が非常に大きいので、深部までの反射波を取得出来ている。ひずみ集中帯調査観測プロジェクトでも確認できているが、この断面図を含め、この断層の空間的な連続性を確認することができた。反射法地震探査から得られる重合速度、坑井データ、及び OBS からの速度情報を基に作成した速度構造モデルを使って、この断層を深度変換した場合、約 15km の深さまで延びており、上部地殻と下部地殻の境界を越えてモホ面まで達している事が判明した。更に、断層を 3D で表示した場合の見え方を図 91 に示した。

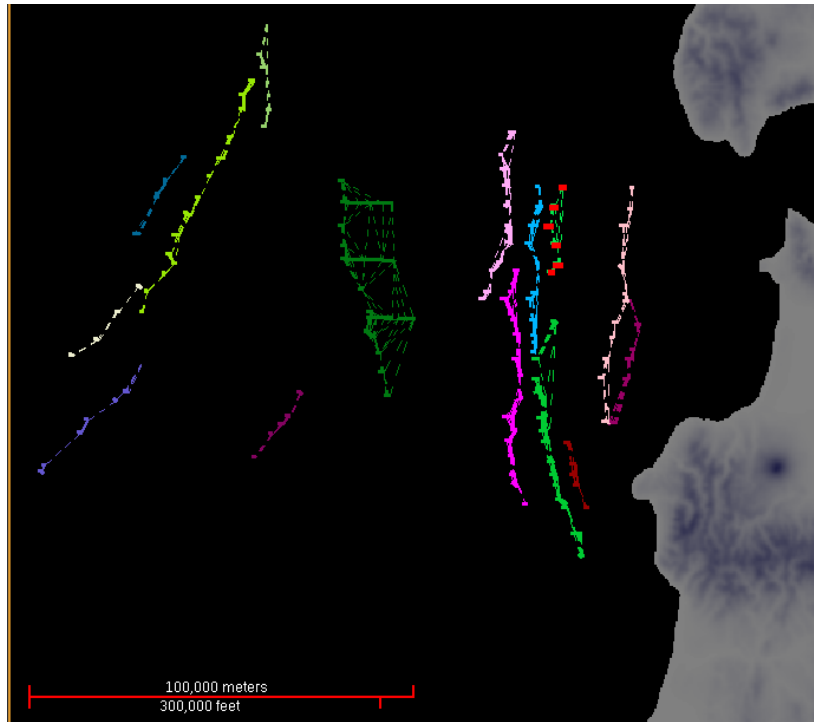


図 89 青森沖断層図。

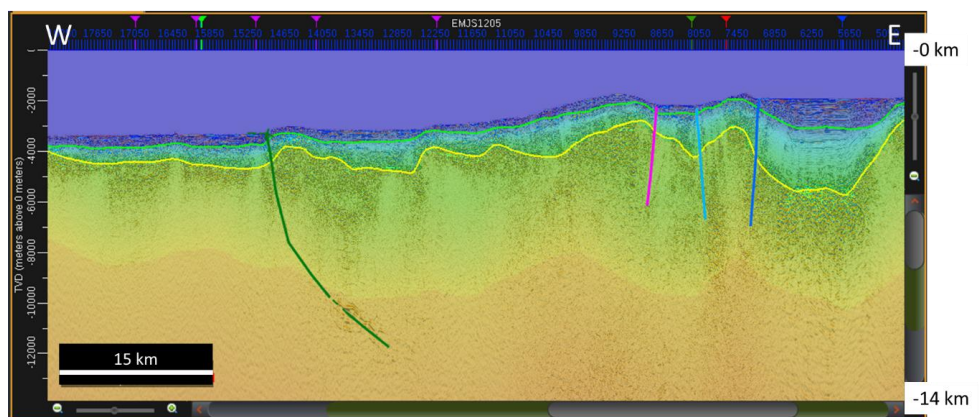


図 90 深度断面図上の AOM-09：日本海中部地震震源近傍の断層。

カラスケールは図 76 と同様。

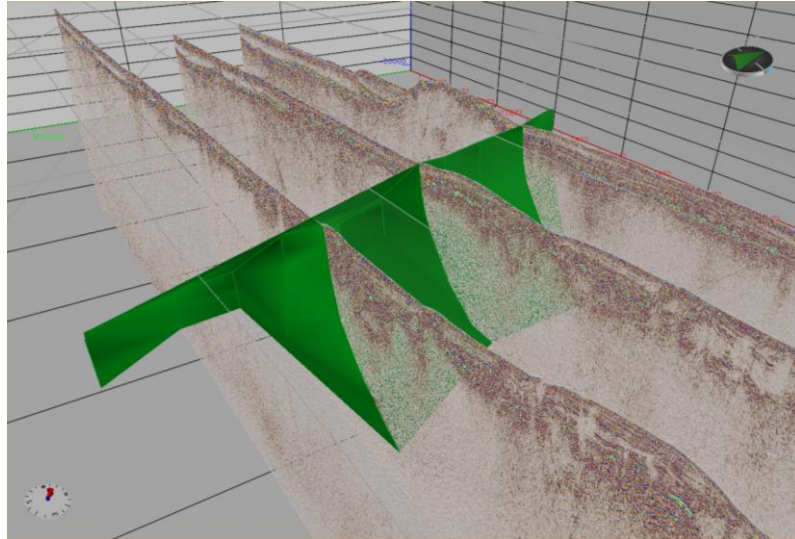


図 91 AOM-09 断層の 3D キューブ表示。

10. 北海道西方海域

北海道西方沖では、45 の断層面が確認された(図 92)。この図によれば、渡島半島から積丹半島の沖合にかけて、数多くの断層があり、この海域がテクtonics的に活発であることが推察出来る。一方、天北から稚内の沖合では、海底まで延びるような新たな断層が殆ど無く、断層活動が比較的低い(図 93)。主な活動域は、約 100km 沖の積丹半島より北側延長部に見られる。

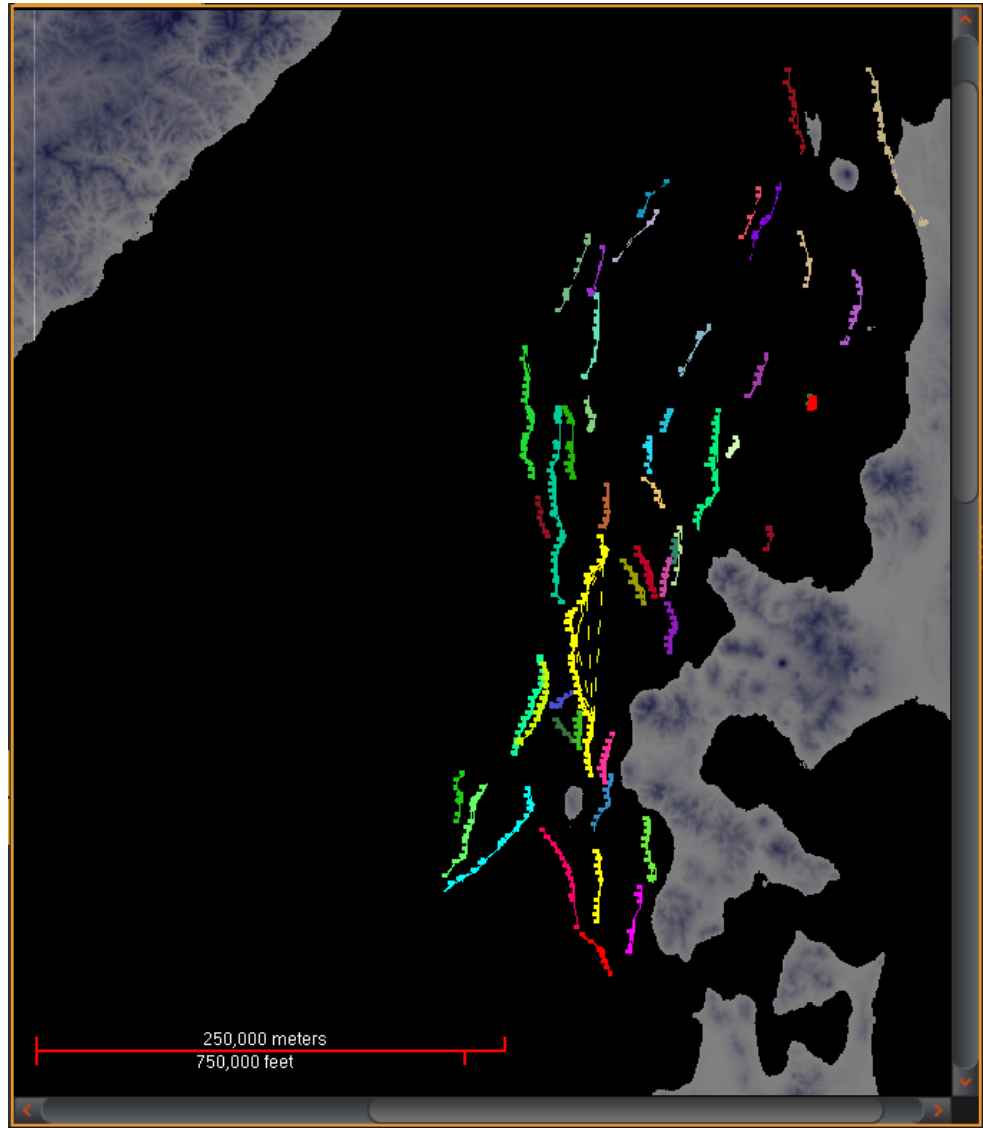


図 92 北海道西方沖断層図。

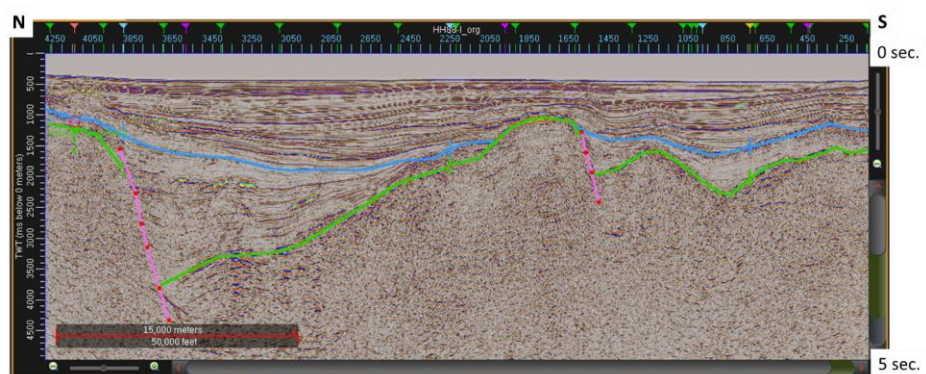


図 93 天北沖合の時間断面図。

奥尻島周辺は 1993 年の北海道南西沖地震の震源域が位置しているが、この地震断層とみられる断層が特定できた。加藤他 (1994) によると、この地震のメカニズムは、P 波初動、CMT 解析から、2 つの逆断層解が得られている。図 94 の震探断面図は、この震源周辺を横断しているが、共役関係の 2 つの断層が認められた。また、この 2 つの並行した断層は、今回の解釈結果から、ほぼ南北方向に約 50km 長連続していることが確認できた。この結果は、加藤他 (1994) の報告と非常に調和的である。

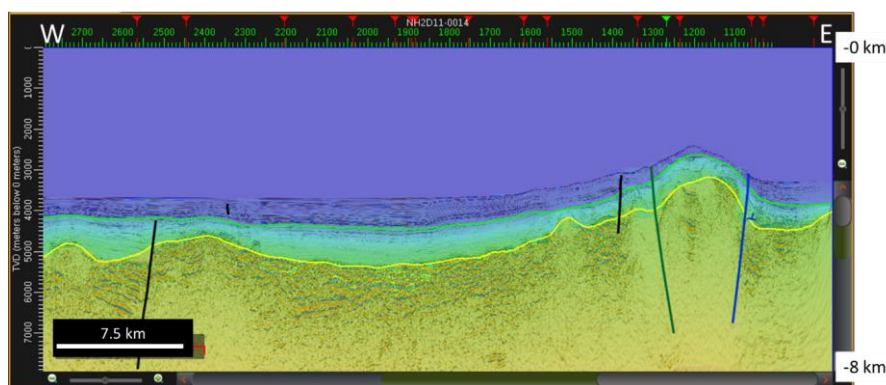


図 94 北海道南西沖地震の震源近傍の深度断面図。右側に互いに共役の 2 条の断層を確認することができる。カラースケールは図 76 と同様。

石狩湾から天北沖にかけての海域は、他の海域と比較し、陸に近い海域での断層分布は相対的に少ない。この海域では、一部に中新世以前には発達した正断層が見られるのみである。一方、陸より 100km 以上離れた積丹半島北部では、逆断層が発達しており、図 95 に示す断層は、1940 年に起きた北海道西方地震の震源近傍に位置している。

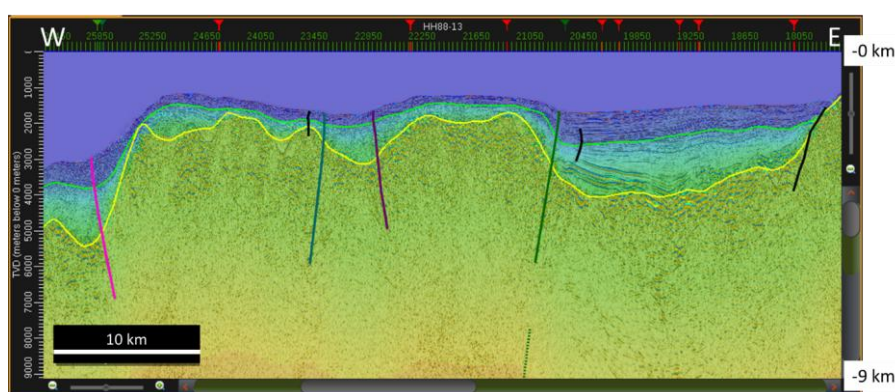


図 95 北海道西方沖地震の震源近傍の深度断面図。カラースケールは図 76 と同様。

稚内沖から南方にはほぼ海岸線に沿った巨大な背斜構造が発達しており、その最大傾斜角に沿って、逆断層が発達している（図 96）。更に南下すると、陸上に同様な褶曲構造が海陸接合部での震探断面図（図 97）でも認められるため、この断層が北海道の陸上域まで延びていることを確認した。



図 96 稚内沖の東西方向の時間断面図。明瞭な背斜構造と堆積層内に発達する褶曲構造が確認できる。

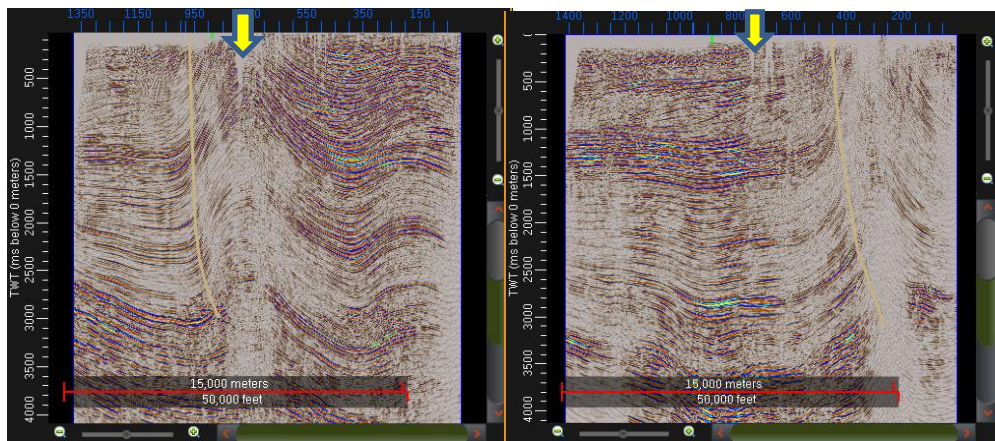


図 97 海陸接合部の時間断面図。黄色矢印は海岸線の位置を示す。左は北側、右図が南側に測線が位置し、南側では断層が陸域に位置することを確認した（左が海側、右が陸側）。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成26年度は、平成25年度に引き続き日本海海域の既往探査データの再解析を実施したが、AISTのシングルチャンネル反射データについては、平成25年度の解析フローに基づき効率的に解析を進めてデータ品質の向上を図ることができた。また、JOGMECのマルチチャンネルの古いデータについては、主に多重反射波除去にクオリティコントロールの重点をおいて解析を行った結果、十分な品質向上が得られ再解析の効果を得ることができた。

平成27年度は南西諸島海域の既往探査データの再解析を予定しているが、当該海域のJOGMECの調査測線は各測線が長大であるものの、各測線の間隔が粗いため、断層解釈になるべく支障をきたすことがないよう民間会社のデータを含め各機関の既往探査データの測線配置を検討し、効果的に解釈ができるような測線を選択し再解析を進めることが必要と考えられる。

日本海海域は東部、西部の二つの領域に分け、速度構造モデルを作成した。この速度

構造モデルを使い、断層の深度変換を実施したが、おおむね満足の行く結果が得られた。今後、日本海海域のデータの追加が予定されているが、当初からの計画どおり、新規データが追加されれば順次改訂を行なっていく予定である。

西は対馬沖から東は稚内沖までの非常に広範囲な日本海全域の断層解釈作業を行った。解釈に使った震探断面図は、データ取得の年代、使われた機材の仕様、調査そのものの仕様に違いがあり、様々な見た目も異なるデータを使っての解釈作業であったが、最新のデータ処理技術を使って、データの再処理を施したことが解釈に有効であった。その結果、日本海海域での断層分布図（図 98）をマッピングすることができた。日本海検討会でもワーキンググループ断層図を作成したが、データ再処理や、様々なデータの正確な座標系の変換作業を行ったことで、より位置データに依拠した正確な位置を示すことができた。断層自体のランク分けも実施し、震源モデル構築の際に、空間的な広がり of 検討には有益であると考ええる。今年度の断層解釈結果を海域別に要約すると、以下のとおりである。

- 九州西方～山口沖 横ずれ断層
- 山口～島根沖 撓曲に伴う断層
- 鳥取沖 正断層（堆積層下部まで達する断層確認）
- 鳥取～京都 横ずれ断層
- 隠岐海嶺～大和堆 正断層（海底から上部地殻まで達する断層を確認）
- 敦賀湾～能登周辺 逆断層（海底から上部地殻まで達する断層を確認）
- 富山、新潟～北海道西方海域 逆断層（海底から上部地殻まで、日本海盆内はモホ面まで達する断層を確認）

この結果は、Terakawa and Matsu'ura（2010）が示した地震による日本海での応力パターンと調和的であり、活断層の可能性が高い断層をリスト化することができた。なお、解釈結果は、今後データベース化する事によって、利用し易く、且つ、更なる成果の更新に対応出来るようにする予定である。また、今回特定した 237 の断層面について、テンプレートを作成したが、更新履歴を記載する箇所もあり、今後新しい調査データが加わって断層分布の位置精度や連続性の検討が進む際には、比較的容易に検討に入ることができるように配慮した。今後、データベース化を早めると共に、更新履歴等が記載可能なシステムを作り、新たに加わる調査データを適宜取り込める形にしたい。北海道の稚内沖から天北地域で示したような陸域の活断層との連続性の確認が今後重要になると考えられる。

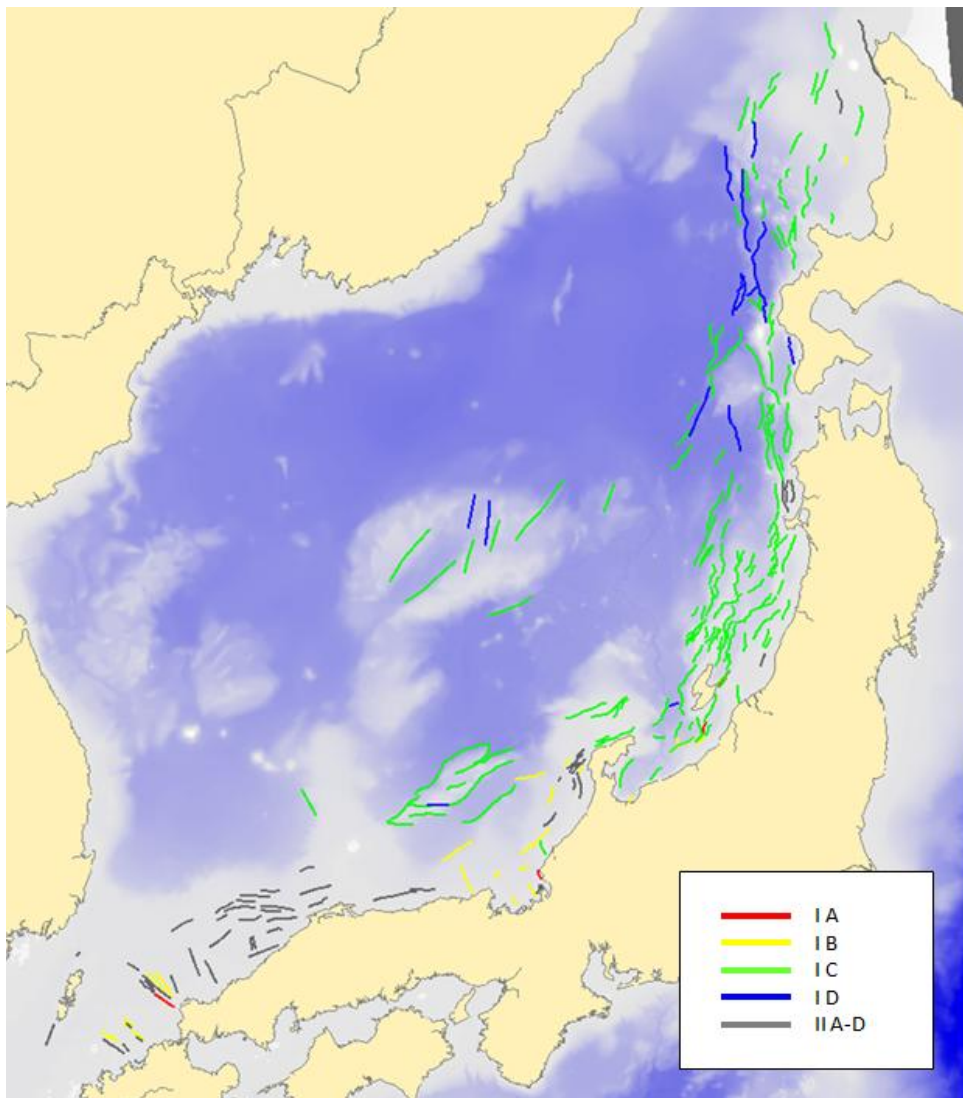


図98 ラベルごとに分類した断層の空間分布。ラベルの付け方は本文参照。

(e) 引用文献

石油開発公団， 昭和 44 年度大陸棚・石油天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「秋田・山形・新潟陸棚エアガン」調査報告書，1970

石油開発公団， 昭和 45 年度大陸棚・石油天然ガス資源基礎調査 基礎物理探査「石狩～礼文島」調査報告書，1971

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， 昭和 57 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「後志沖」「十勝～釧路沖」「オホーツク海」調査報告書，1983
- 石油公団， 昭和 60 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「大和堆」調査報告書，1986
- 石油公団， 昭和 62 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～青森浅海域」調査報告書，1988
- 石油公団， 昭和 62 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「西津軽～新潟沖」調査報告書，1988
- 石油公団， 昭和 63 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～青森浅海域」調査報告書，1989
- 石油公団， 昭和 63 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「北海道西部～北東部」調査報告書，1989
- 石油公団， 平成元年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「秋田～青森浅海域」調査報告書，1990
- 石油公団， 平成 2 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「新潟富山浅海域」調査報告書，1991
- 石油公団， 平成 3 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「新潟富山浅海域」調査報告書，1992
- 石油公団， 平成 4 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「新潟富山浅海域」調査報告書，1993
- 石油公団， 平成 8 年度国内石油・天然ガス基礎調査 基礎物理探査「天北浅海域」調査報告書，1997
- 産業技術総合研究所， 昭和 53 年度「日本海中部」調査航海，1977
- 産業技術総合研究所， 昭和 52 年度「日本海西部及び九州西方」調査航海，1977
- 産業技術総合研究所， 昭和 60 年度「九州及び山口北方海域」調査航海，1985
- 産業技術総合研究所， 昭和 61 年度「島根鳥取沖海域」調査航海，1986

産業技術総合研究所, 昭和 63 年度「能登半島周辺海域」調査航海, 1988

産業技術総合研究所, 平成 元年度「東北沖日本海」調査航海, 1989

産業技術総合研究所, 平成 2 年度「東北沖日本海（佐渡）」調査航海, 1990

産業技術総合研究所, 平成 3 年度「東北沖日本海（秋田）」調査航海, 1991

産業技術総合研究所, 平成 4 年度「東北沖日本海」調査航海, 1992

産業技術総合研究所, 平成 5 年度「東北沖日本海」調査航海, 1993

産業技術総合研究所, 平成 6 年度「北海道西方日本海（渡島）」調査航海, 1994

産業技術総合研究所, 平成 7 年度「北海道西方日本海（積丹）」調査航海, 1995

産業技術総合研究所, 平成 8 年度「北海道西方日本海（石狩）」調査航海, 1996

産業技術総合研究所, 平成 10 年度「北海道西方日本海（手塩）」調査航海, 1998

産業技術総合研究所, 平成 11 年度「北海道西方日本海（奥尻）」調査航海, 1999

T. W. Chung, N. Hirata, R. Sato, Two-dimensional P- and S- wave velocity structure of the Yamato Basin, the Southeastern Japan Sea, from refraction data collected by an ocean bottom seismographic array, *Journal of Physics the Earth*, vol.38, 1990

N. Hirata, H. Tokuyama, T. W. Chung, An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Sea of Japan: the final stage of back-arc spreading, *Tectonophysics*, 165, 303-314, 1989

N. Hirata, B. Y. Karp, T. Yamaguchi, T. Kanazawa, K. Suyehiro, J. Kasahara, H. Shiobara, M. Shinohara, H. Kinoshita, Oceanic crust in the Japan Basin of the Japan Sea by the 1990 Japan-USSR Expedition, *Geophysical Research Letters*, vol.19, No.20, 2027-2030, 1992

H. Katao, Seismic structure and formation of the Yamato Basin, *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo*, vol.63, 51-86, 1988

加藤茂・浅田昭・春日茂, 富山トラフの変動地形と地質構造, *地学雑誌*, 99-1, 1990

加藤健二・都司嘉宣（1994）：1993 年北海道南西沖地震の断層要素の推定とその津波の特性、地震研究所彙報 Vol.69 39-66

H. J. Kim, H. T. Jou, H. M. Cho, H. Bijwaard, T. Sato, J. K. Hong, H. S. Yoo, C. E. Baag, Crustal structure of the continental margin of Korea in the East Sea (Japan Sea) from deep seismic sounding data: evidence for rifting affected by the hotter than normal mantle, *Tectonophysics*, 364, 2003

H. J. Kim, S. J. Han, G. H. Lee, S. Huh, Seismic study of the Ulleung Basin crust and its implications for the opening of the East Sea (Japan Sea) , *Marine Geophysical Reserches*, 1998

E. Kurashimo, M. Shinohara, K. Suyehiro, J. Kasahara, N. Hirata, Seismic evidence for stretched continental crust in the Japan Sea, *Geophysical Research Letters*, 1996

W. J. Ludwig, S. Murauchi, R. E. Houtz, Sediments and Structure of the Japan Sea, *Geological society of America Bulletin*, vol.86, 651-664, 1975

K. Nakahigashi, M. Shinohara, E. Kurashimo, T. Yamada, A. Kato, T. Takanami, K. Uehira, Y. Ito, T. Iidaka, T. Igarashi, H. Sato, R. Hino, K. Obana, Y. Kaneda, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Kanazawa, Seismic structure of the source region of the 2007 Chuetsu-oki earthquake revealed by offshore-onshore seismic survey: Asperity zone of intraplate earthquake delimited by crustal inhomogeneity, *Tectonophysics*, 2012

K. Nakahigashi, M. Shinohara, T. Yamada, K. Uehira, K. Mochizuki, T. Kanazawa, Seismic structure of the extended continental crust in the Yamato Basin, Japan Sea, from ocean bottom seismometer survey, *Journal of Asian Earth Science*, 2013

A. Nishizawa and A. Asada, Deep crustal structure off Akita, eastern margin of the Japan Sea, deduced from ocean bottom seismographic measurements, *Tectonophysics*, 306, 1999

T. No, T. Sato, S. Kodaira, T. Ishiyama, H. Sato, N. Takahashi, Y. Kaneda, The source fault of the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake revealed by seismic imaging, *Earth and Planetary Science*, 2014

佐藤壮, 篠原雅尚, 末広潔, B. Y. Karp, R. G. Kulinich, 伊勢崎修弘, エアガン海底地震計探査による日本海北大和トラフの P 波速度構造, *地震*, 第 53 巻, 2001

T. Sato, M. Shinohara, B. Y. Karp, R. G. Kulinich, N. Isezaki, P-wave velocity structure in the northern part of the central Japan Basin, Japan Sea with ocean bottom seismometers and airguns, *Earth Planets Space*, 56, 501-510, 2004

T. Sato, N. Takahashi, S. Miura, G. Fujie, D. H. Kang, S. Kodaira, Y. Kaneda, Last stage of the Japan Sea back-arc opening deduced from the seismic velocity structure using wide-angle data, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol.7, 2006

T. Sato, T. Sato, M. Shinohara, R. Hino, M. Nishino, T. Kanazawa, P-wave velocity structure of the margin of the southeastern Tsushima Basin in the Japan Sea using ocean bottom seismometers and airguns, *Tectonophysics*, 412, 2006

T. Sato, T. No, S. Kodaira, N. Takahashi, Y. Kaneda, Seismic constraints of the formation process on the back-arc basin in the southeastern Japan Sea, *Journal of Geophysical Research: solid Earth*, 2014

M. Shinohara, N. Hirata, H. Nambu, K. Suyehiro, T. Kanazawa, H. Kinoshita, Detailed crustal structure of northern Yamato Basin, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, vol.127/128, Part.2, 1992

Terakawa and Matsu'ura, The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, vol. 29, DOI:10.1029/2009TC002626, 2010

西坂弘正, 篠原雅尚, 佐藤利典, 日野亮太, 望月公廣, 笠原順三, 海底地震計と制御震源を用いた北部大和海盆, 秋田沖日本海東縁部海陸境界域の地震波速度構造, *地震*, 第 54 巻, 2001

徳山他, 日本周辺海域中新世最末期以降の構造発達史, *海洋調査技術*, 第 13 巻 第 1 号, p. 27-53, 2001

九州電力株式会社, 玄海原子力発電所 対馬周辺海域における海上音波探査結果, 2013

九州電力株式会社, 玄海原子力発電所 警固断層帯及び壱岐北東部断層群周辺海域における海上音波探査結果, 2013

日本海における大規模地震に関する調査検討会 海底断層ワーキンググループ 報告書, 2014