

### 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	高橋 成実
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	グループリーダー	鎌田 弘己
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	特任技術主任	眞保 敬
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	特任技術副主任	佐藤 伸明
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	特任技術副主任	勝山 美奈子
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	特任技術主事	新井 麗

(c) 業務の目的

統一的断層解釈を行うために収集した反射法地震探査データ（以下、「反射法データ」）等から、海底下最大10 km程度までの反射面の分布や地質構造を把握するため、ノイズ除去手法などの最新のデータ解析を加え、反射法地震探査断面（以下、「反射記録断面」）の深部イメージングの品質を向上させる。これらの再解析後の反射法データについては、管理用データベース・システム（以下、「管理DB」）に登録する。その後、管理DBに登録されたすべての反射法データを用いて、断層の解釈およびその三次元的な広がり进行评估する。さらに、三次元速度構造モデルを作成し、解釈した断層（の垂直方向）を時間領域から深度領域（時間軸から深度軸）に変換した後、その深部延長およびデタッチメントの場所进行评估する。また、解釈・深度変換した断層の中から主断層を選定し、その情報（断層カタログデータ）をサブテーマ3に提供する。なお、解釈結果については、客観性を保持するため、本プロジェクトのアドバイザーおよび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：

収集した日本海の反射法データの再解析を開始、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、既存の地質データ、反射法データ、構造解釈結果等を参考にしながら、断層の解釈作業を開始した。併せて、収集した日本海周辺の速度情報をもとに、同海域の三次元速度構造モデルの構築に着手した。

2) 平成 26 年度：

平成 25 年度に引き続き、収集した日本海の反射法データの再解析を行うとともに同海域の三次元速度構造モデルの構築、および断層解釈・評価作業を行った。その解

積・評価結果については、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1に提供した。また、深度変換後の断層カタログデータ（日本海）をサブテーマ3に提供した。

3) 平成 27 年度：

収集した南西諸島海域南部の反射法データの一部について再解析を行い、その結果と既存の地震探査データを用いて、同海域南部の三次元速度構造モデルの構築および断層解釈・評価作業を実施した。その解釈・評価結果については、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1に提供した。また、深度変換後の断層カタログデータ（南西諸島海域南部）をサブテーマ3に提供した。

4) 平成 28 年度：

収集した南西諸島海域北部の反射法データの一部について再解析を行い、その結果と既存の地震探査データを用いて、同海域北部の断層解釈・評価作業と三次元速度構造モデルの構築、ならびに同モデルと平成 27 年度に構築した同海域南部の速度構造モデルとの統合作業を実施した。その解釈・評価結果については、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1に提供した。また、深度変換後の断層カタログデータ（南西諸島海域北部）をサブテーマ3に提供した。

5) 平成 29 年度：

収集した伊豆・小笠原海域の反射法データの一部について再解析を行い、その結果と既存の地震探査データを用いて、同海域の三次元速度構造モデルの構築および断層解釈・評価作業を実施した。その解釈・評価結果については、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1に提供した。また、深度変換後の断層カタログデータ（伊豆・小笠原海域）をサブテーマ3に提供した。

6) 平成 30 年度：

収集した（および収集予定の）南海トラフ海域の反射法データの一部について再解析を行い、その結果と既存の地震探査データを用いて、同海域（一部）の三次元速度構造モデルの構築および断層解釈・評価作業を実施する。その解釈・評価結果については、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1に提供する。また、深度変換後の断層カタログデータ（南海トラフ海域の一部）についてはサブテーマ3に提供する。

7) 平成 31 年度：

平成 30 年度に引き続き、南海トラフ海域の反射法データの一部について再解析を行い、その結果と既存の地震探査データを用いて、南海トラフ海域全域の三次元速度構造モデルの構築および断層解釈・評価作業を実施する。その解釈・評価結果については、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1に提供する。また、深度変換後の断層カタログデータ（南海トラフ海域）についてはサブテーマ3に提供する。

## (2) 平成 29 年度の成果

### (a) 業務の要約

平成29年度は伊豆・小笠原海域を対象として、反射法データの再解析、三次元速度構造モデルの構築および統一的断層解釈作業を実施した。

反射法データの再解析では、経済産業省からJOGMECを通じ提供されたJOGMEC基礎物理探査のデータから昭和54年度大陸棚石油・天然ガス基礎調査「伊豆七島海域，小笠原諸島海域」を選択し、そのうち測線長計約3,900 kmのマルチチャンネルサイスミック（以下、MCS）データを対象とした。主として、断層解釈の際に問題となる種々の多重反射を取り除く処理や、様々なデータ取得仕様による波形を統一的にする波形変換処理を実施した。また、AISTのシングルチャンネルサイスミック（以下、「SCS」）データについてもノイズ除去等の再処理を行った。なお、JAPEXからもMCSデータを収集したが、これらは全てフィルム断面図（測線長計約2,500 kmのアナログデータ）のみであったため、ベクトル化処理を行いデジタルデータに変換した。

伊豆・小笠原海域に対し、三次元の速度構造モデルを構築した。モデル構築にあたり、まず、反射波ホライズンとして海底面、堆積層と上部地殻との境界（以下、「音響基盤」）、太平洋プレート上面、フィリピン海プレート上面、コンラッド面およびモホ面を解釈・推定し、同海域の地質構造・プレート構造を把握した。これらの構造に対し、反射法データの再処理過程で得られた重合速度と、JAMSTECやJCG他のOBS探査で得られた速度データを適用することで、三次元の速度構造モデルが完成した。

伊豆・小笠原海域の反射法データ（一部再解析データ）に対し、公刊文献、JOGMEC基礎物理探査の調査報告書等を参照しながら、断層の解釈を行った。断層の分布については、同海域の赤色立体地形図を参照しながら、トレースした。さらに、同定した全ての断層に対し、三次元速度構造モデルを用いて深度変換し、断層カタログをデータベース化した。

### (b) 業務の実施方法

基本的なMCSデータの再解析については、データチェックの後にフォーマット変換、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、各種多重反射波解析、振幅補償、デコンボリューション、Common Mid Point（以下、CMP）ソート、1 km間隔の速度解析の後にNormal Move Out（以下、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、の内容で順に実施した。特に、多重反射波解析については、海水面に起因する長周期多重反射波を抑制するSurface-Related Multiple Elimination（以下、SRME）、および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（以下、RTD）を用いた。なお、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（フィルム断面図）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に変換し、さらにフィルム上に記載された速度情報を使い、重合後マイグレーション処理を実施した。

AISTのSCSデータについては、トレースの連続性に着目したフィルター解析を実施した。また、フィールドデータに対して、フォーマット変換、振幅補償、帯域通過フィルター、

F-X予測フィルター、トレースエディット、ミュートを実施した。

三次元速度構造モデルの構築においては、まず、伊豆・小笠原海域全域での海底面、解釈した音響基盤、太平洋プレート上面、フィリピン海プレート上面、コンラッド面およびモホ面のホライズンデータを用いsurfaceを作成し、層構造を構築した。次に、各層構造に対し、速度情報として反射法データの再処理過程で得られた重合速度やOBS調査で得られた速度データから速度関数を与え、水平方向1 kmグリッド、鉛直方向100 m 間隔の三次元速度構造モデルを構築した。最後に、本モデルを用いて、反射法データおよび断層面の深度変換を行った。

断層解釈作業においては、赤色立体地形図、既存の解釈結果、文献、既往調査報告書等を参照しながら、再解析した反射法データに加え、近年JOGMEC、JAMSTEC、JCGによって取得された再解析の必要がない高品質の反射法データを使用した。実際には、調査実施時期や調査仕様の異なる様々な反射記録断面図（時間断面）を用いて解釈を行い、上述の三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た。その後、反射記録断面上で解釈した断層を海底地形や地質構造の特徴、断層上端・下端の位置・深度に従ってランク分けし、最終的に断層の空間的な連続性・分布を評価、同定したうえで、断層カタログを作成した。

なお、報告書に使用した図の一部は、描画ツールGeneric Mapping Tool（以下、GMT；Wessel and Smith, 1991）を利用して作成した。

## (c) 業務の成果

### 1) データ再解析

平成 29 年度は、JOGMEC 基礎物理探査のデータ（約 3,900 km の MCS 測線）に対する再処理作業と、JAPEX より提供されたフィルム断面図（デジタルデータが存在しない約 2,500 km の MCS 測線）に対するベクトル化（スキャン・デジタル化）作業、ならびに AIST の SCS データに対する再処理を実施した。

#### a) 再処理データの概要

表 1 にデータ再処理の対象となった JOGMEC 基礎物理探査・昭和 54 年度「伊豆七島海域、小笠原諸島海域」の概要、表 2 にその調査仕様を示す。また、図 1 にはベクトル化対象の調査海域および測線図（JAPEX 小笠原沖・七島沖）、図 2 には調査測線における発震記録の例を示す。

以下に、再処理対象調査のデータ概要について記述する。

- 再処理対象調査では、データ取得時に 8 Hz 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。
- 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は見られず、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。

表1 データ再処理対象のJOGMEC基礎物理探査概要

調査名 (基礎物理探査)	測線数	測線長 (km)	発震点 数	発震点 間隔(m)	受振器 間隔 (m)	サンプリング 間隔 (msec)	記録長 (sec)
伊豆七島海域, 小笠原諸島海域 (1979)	26	3,978	79,586	50	50	4	5

表2 データ再処理対象のJOGMEC基礎物理探査仕様

調査名	伊豆七島海域, 小笠原諸島海域
取得年度	1979
旧測線名	79-x測線
新測線名	IO79-x測線
Survey Bessel	M/V KAIYO
Recording	
Instrument	TI DFS/V
Record Length(sec)	5
Sample Rate(msec)	4
Number of Channel	48
Low Cut Filter	8Hz (18db/oct)
High Cut Filter	64Hz (70db/oct)
Tape Format	SEG-B
Source	
Gun Type	BOLT Air Gun
Shot Point Interval(m)	50
Gun Volume(cu.in)	1570
Gun Pressure(psi)	2000
Gun Depth(m)	10
Receiver	
Instrument	Streamer Cable(SEC)
Receiver Interval(m)	50
Nearest Channel Offset(m)	377
Cable Length(m)	2300
Cable Depth(m)	15
Navigation	
Instrument	TELEDYNE TDL-601
Primary	LORAN-C system
Secondary	SATELLITE system (MAGNAVOX 702A/GEO II)

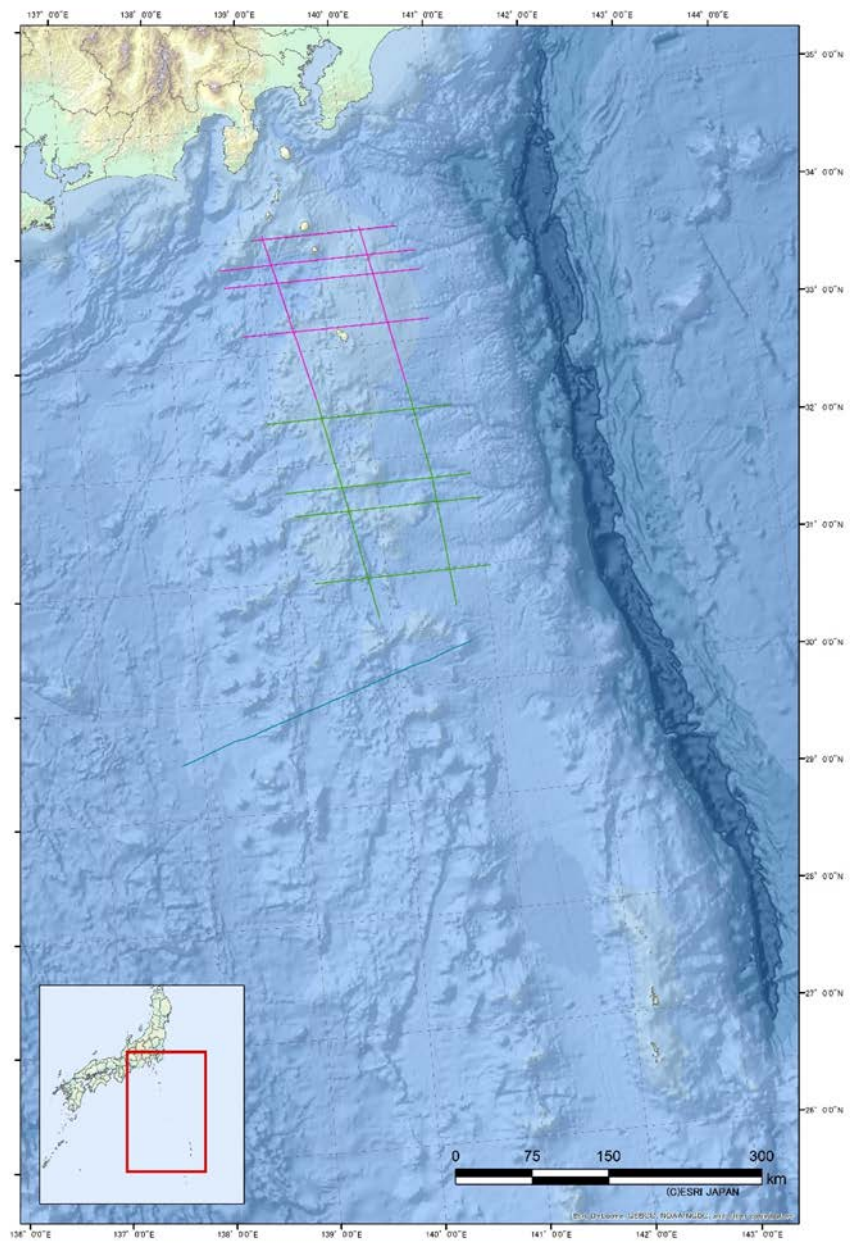


図1 ベクトル化対象測線図

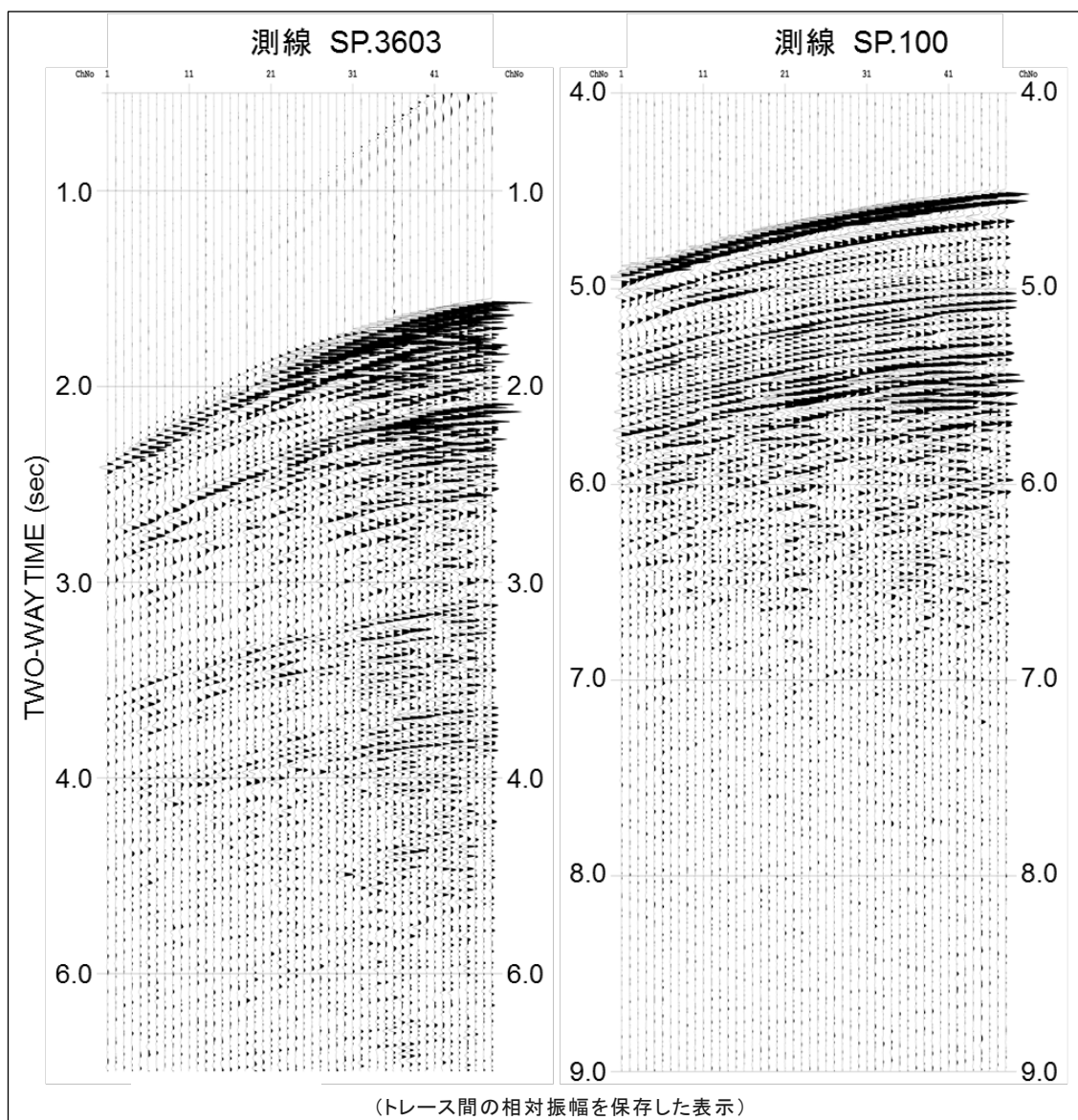


図2 発震記録の例

b) データ再処理作業の概要

本データ再処理は、株式会社地球科学総合研究所（以下、「JGI」）の処理ソフトウェア SuperX を用いて実施された。各種処理項目のうち重合前時間マイグレーションについては、TECHCO 社のソフトウェア SUMMIG を用いた。ここではまず、各調査のデータ品質を考慮して最適な処理結果が得られるように、処理フローおよび処理パラメータを決定した。

本再処理作業では、海域活断層のジオメトリ把握と可視化の観点から、解釈上の必要に応じて一部のデータに対し、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 解析（以下、「MDRS 解析」）の追加解析（特殊解析）を実施した。

古い年代の再処理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%を超えている場合は、対象測線をデータ再処理

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および深度変換を実施した。また、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再処理に大きな支障となる場合には、同様の対応を取った。

表3に標準解析の対象となった調査測線一覧とその詳細について、表4に特殊解析の対象となった調査測線一覧とその詳細について示す。

表3 標準解析対象のJOGMEC基礎物理探査測線詳細

プロジェクト/測線名		発震点数	欠損数	欠損率	CMP数			測線長(km)			ベクトル化	
仕様書上の有効測線長の割合					データ解析	既往デジタル	ベクトル化	SP測線	重合測線	ベクトル化		
対象測線全体		79586	4626	5.81%	156932	0	95350	3978.00	3922.93	2383.55	2383.55	60%
(注) マージ後測線とオリジナル測線では名前が異なる												
S54「伊豆七島海域, 小笠原諸島海域」		79586	4626	5.81%	156932	0	95350	3978.00	3922.93	2383.55	2383.55	
マージ後測線名	オリジナル測線名	26			15							
IO76-1		5841	2	0.03%	11728			292.00	293.18			
IO79-2_m	(マージ)				18052		18052		451.28	451.28		○
	79-2	2081	0	0.00%				104.00				
	79-2-1	781	0	0.00%				39.00				
	79-2-3	6341	327	5.16%				317.00				
IO79-3	79-3	3521	372	10.57%	7088		7088	176.00	177.18	177.18		○
IO79-4_m	(マージ)				17528				438.18			
	79-4	5401	18	0.33%				270.00				
	79-4-3	3401	0	0.00%				170.00				
IO79-5_m	(マージ)				6848		6848		171.18	171.18		○
	79-5	3501	615	17.57%				175.00				
	79-5-2	221	0	0.00%				11.00				
IO79-5-1	79-5-1	2781	6	0.22%	5608			139.00	140.18			
IO79-6_m	(マージ)				12054				301.33			
	79-6	5201	7	0.13%				260.00				
	79-6-1	901	0	0.00%				45.00				
	79-6-3	221	0	0.00%				11.00				
IO79-6-2	79-6-2	5281	251	4.75%	10608		10608	264.00	265.18	265.18		○
IO79-7_m	(マージ)				10248		10248		256.18	256.18		○
	79-7	4501	710	15.77%				225.00				
	79-7-1	701	0	0.00%				35.00				
IO79-7-2	79-7-2	1401	0	0.00%	2848			70.00	71.18			
IO79-8	79-8	4261	0	0.00%	8568			213.00	214.18			
IO79-B_m	(マージ)				24618		24618		615.43	615.43		○
	79-B	4761	2	0.04%				238.00				
	79-B-1	5101	458	8.98%				255.00				
	79-B-2	2661	3	0.11%				133.00				
IO79-B_m	(マージ)											
IO79-D_m	(マージ)				12800		12800		319.98	319.98		○
	79-D-1	5101	1388	27.21%				255.00				
	79-D-2	901	389	43.17%				45.00				
	79-D-4	601	0	0.00%				30.00				
IO79-D	79-D	1601	0	0.00%	3248			80.00	81.18			
IO79-D-3	79-D-3	2521	78	3.09%	5088		5088	126.00	127.18	127.18		○



表4 特殊解析対象のJOGMEC基礎物理探査測線詳細

プロジェクト/測線名	発震点数	CMP数	測線長(km)	特殊解析(PSTM, MDRS)				PRT	PSTM	MDRS
				データ解析	重台測線	開始CMP	終了CMP			
仕様書上の有効測線長の割合								21%	5%	3%
対象測線全体	79586	156932	3922.93			11202	280.00	735.53	175.00	105.00
(注) マージ後測線とオリジナル測線では名前が異なる										
S54「伊豆七島海域、小笠原諸島海域」	79586	156932	3922.93			11202	280.00	735.53	175.00	105.00
マージ後測線名	オリジナル測線名	26	15					3	1	1
I076-1		5841	11728	293.18						
I079-2 m	(マージ)		18052	451.28						
I079-3	79-3	3521	7088	177.18						
I079-4 m	(マージ)		17528	438.18						
I079-5 m	(マージ)		6848	171.18						
I079-5-1	79-5-1	2781	5608	140.18						
I079-6 m	(マージ)		12054	301.33						
I079-6-2	79-6-2	5281	10608	265.18				○		
I079-7 m	(マージ)		10248	256.18				○		
I079-7-2	79-7-2	1401	2848	71.18						
I079-8	79-8	4261	8568	214.18				○		
I079-B m	(マージ)		24618	615.43	1	7001	7001	175.00	○	
I079-B m	(マージ)				300	4500	4201	105.00		○
I079-D m	(マージ)		12800	319.98						
I079-D	79-D	1601	3248	81.18						
I079-D-3	79-D-3	2521	5088	127.18						

以下に、主な処理項目について記述する。

i) 複合型ノイズ抑制処理

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。一部の発震記録では探鉱機に由来するパルスノイズが見られたため、これを抑制する目的でパルスノイズ抑制処理を適用した。また、一部の発震記録では突発的で比較的振幅の強いノイズが見られたため、これを抑制する目的でF-X エディットを適用した。さらに、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。なお、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。

ii) 複合型多重反射波抑制処理

対象海域では海底深度が大きく変化することから、長周期多重反射波、短周期多重反射波およ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RTD (Radial Trace Deconvolution) 法を用いた。長周期多重反射波の抑制にはSRME (Surface-Related Multiple Elimination) 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放物線ラドン変換 (Parabolic Radon Transform、以下、「PRT」) 法を検証し、効果が見られた場合はそれを適用

することとした。さらに、反射波と多重反射波の分離精度を向上し多重反射波の抑制効果を高めるために、高分解能型の PRT 法を用いた。対象調査において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正しく取得できないため、波動方程式に基づく SRME 法や周期性に基づく RTD 法では、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 法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。

### iii) 重合前時間マイグレーション

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、重合前時間マイグレーション (Pre-Stack Time Migration、以下、「PSTM」) を適用した。ここでは、JOGMEC 基礎物理探査測線内の一部の区間のみ (選択範囲) に PSTM を適用した (表 4)。ただし、測線端ではマイグレーションの口径 (アパチャー) の影響により品質が低下するため、実際の PSTM の解析作業では、選択範囲にこの影響が及ばないように測線全体を解析対象とし、処理結果から対象範囲を抜き出すこととした。

### iv) MDRS (Multi-dip型Common Reflection Surface) 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、Common Reflection Surface (以下、「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。さらに、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。ここでは、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。

### v) ベクトル化処理

再処理対象測線においてデータ欠損が多く解析から除外された測線のうち、重合時間記録がデジタルデータとして残存していない場合と、JAPEX より提供された既存結果については、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処理を実施した。また、再処理対象測線においてデータ欠損率が小さくても、重合記録上に連続的なデータ欠損が見られる場合には、同様の対応を取った。なお、再処理対象測線におけるベクトル化処理の適用測線については、原則としてデータ再処理は行わないが、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、データ再処理も併せて実施した (表 3、表 4)。

c) データ再処理の詳細と結果

本再処理作業については、図3に示すデータ処理フローに基づき実施した。この再処理作業は、標準解析、PSTM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。なお、以下で処理番号が(\*\*)で記載された項目は、検討の結果、ここでは適用しなかった処理を意味する。

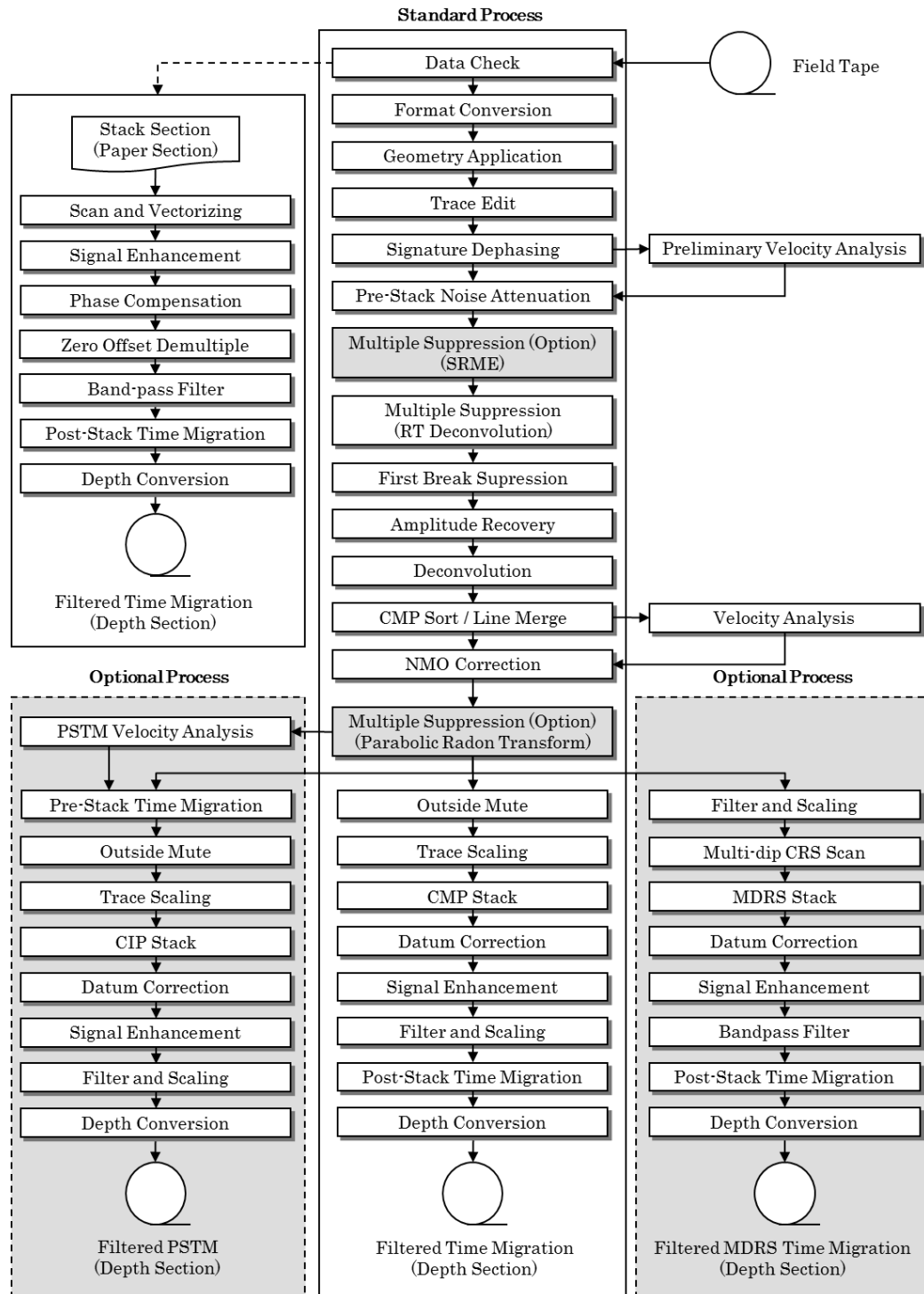


図3 データ処理フロー

## 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。表 5 に、標準解析の処理パラメータの詳細について示す。

### 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処理の対象とした。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ついては、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。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については、この段階で補正した。

### ③ 測線情報の入力 (Geometry Application)

発震点、受振点および 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原発震記録として SEG-Y フォーマット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、処理対象から除外するとともに、パルスノイズ抑制処理を併せて適用した。ここで、図 4 に不良記録の例を、図 5 にパルスノイズ抑制処理の適用例を示す。図 4 の赤点線枠で示した時間にデータ欠損が見られるが、これは探鉱機エラーに起因するものと考えられる。このような発震記録は処理対象から除外した。図 5 では 1 サンプルのパルスノイズが見られるが、これは探鉱機の電気ノイズに起因するものと考えられ、パルスノイズ抑制処理により、パルスノイズが除去されたことが確認できる。

表5 標準解析の処理パラメータ詳細

	Process	Parameters	S54「伊豆七島海域, 小笠原諸島海域」
1	Data Check		
2	Format Conversion		SEG-Y to SuperX format
3	Geometry Application		
4	Trace Edit	Trace Edit	Manual
		Despike	
		Method	Spike and Zero Search
		Spike Search Gate Length	200 msec
5	Signature Dephasing	Gun Signature	Use Avaraged Sea Bottom Reflection
		Polarity	Sea Bottom Reflector is positive
6	Preliminary Velocity Analysis	Method	Constant Velocity Scan Method
		Analysis Interval	2000 m
7	Pre-Stack Noise Attenuation		
	F-X Edit (1st)	Method	F-X Projection Filter
		Spacial Gate Length	11 traces
		Time Gate Length	400 msec
		Thresfold Level	2.0
		Frequency Range	6/6 - 120/130 Hz
	F-X Edit (2nd)	Method	F-X Projection Filter
		Spacial Gate Length	11 traces
		Time Gate Length	400 msec
		Thresfold Level	2.0
		Frequency Range	2/2 - 6/16 Hz
	F-X Prediction Filter	Domain	Shot Gather
		Operator Type	Two-Side
		Operator Length	11 traces
		Gate Length	48 traces
		Time Gate Length	500 msec
		Time Gate Overlap Length	250 msec
		Tempolary AGC Gate Length	300 msec
8	Surface-related	Survay Type	2D
	Multiple Elimination	Adaptive Subtraction(1st)	
		Operator Length	200
		Time Window	1500 msec
		Space Window	48 traces
		Adaptive Subtraction(2nd)	
		Operator Length	48
		Time Window	100 msec
		Space Window	11 traces
9	Radial Trace Deconvolution	Transformed Parameter	
		Velocity Range	-5500 ~ 5500 m/sec
		Deconvolution Parameter	
		Gate Length	3000 msec
		Operator Length	400 msec
		Prediction Distance	64 msec
10	First Break Mute	Start Time	Sea Bottom - 15msec
		Taper Length	8 msec
		Sliding Velocity	1500 m/sec
11	Amplitude Recovery	Method	Geometrical Spreading + AGC
		AGC Gate Length	600 msec
12	Deconvolution	Method	Surface Consistent Type
		Mode	Time Invariant
		Gate Start Time at 0m offset	Sea Bottom + 100msec
		Gate Length	2000 msec
		Operator Length	400 msec
		Prediction Distance	4 msec
		Gate Sliding Velocity	1600 m/sec
		White Noise	1.005
13	CMP Sort	CMP Interval	25 m
		Radius Limit	Unlimited
14	Line Merge		
15	Velocity Analysis	Method	Constant Velocity Scan Method
		Analysis Interval	1000 m
16	NMO Correction	Stretch Factor	1.7
17	Parabolic Radon Transform (optional)	Type	High Resolution
		Mode	Multiple Extraction
		Reference Offset for Moveout	2800 m
		Transform Moveout Range	-150~1500msec or -150~750msec
		Filter Moveout Range	-300 ~ 200 msec

18	Outside Mute	Base Time	Sea Bottom - 100 msec
		Start Time	1000 msec
		Start Offset	1300 m
		Taper Length	100 msec
		Sliding Velocity	2000 m/sec
19	Trace Scaling	Method	AGC
		Gate Length	600 msec
20	CMP Stack	Method	Normal Stack
		Divisor Type	Normalized by Square Root of Number of Fold
21	Datum Correction	Datum	Mea Sea Level
		Time Shift	16.67 msec
22	Signal Enhancement	Method	F-X Prediction Filter
		Operator Length	7 CMPs
		Gate Length	50 CMPs
		Time Gate Length	1000 msec
		Time Gate Overlap Length	500 msec
23	Band-pass Filter	Method	Time Variant
		Operator Length	300 msec
		Gate Overlap Length	1000 msec
		Base Time	Sea Bottom
		Pass Band	10/10 - 60/60 Hz (0.0 - 1.5 sec)
			6/6 - 50/50 Hz (1.5 - 3.0 sec)
			6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)
24	Trace Scaling	Method	Trace Sigma Scale
25	Post-Stack Time Migration	Method	T-X FD Migration
		Approximation Angle	45 degree
		Extrapolation Step	4 msec
		Velocity Type	Stacking Velocity
		Velocity Scaling Factor	90 %
26	Depth Conversion	Method	Vertical Stretch

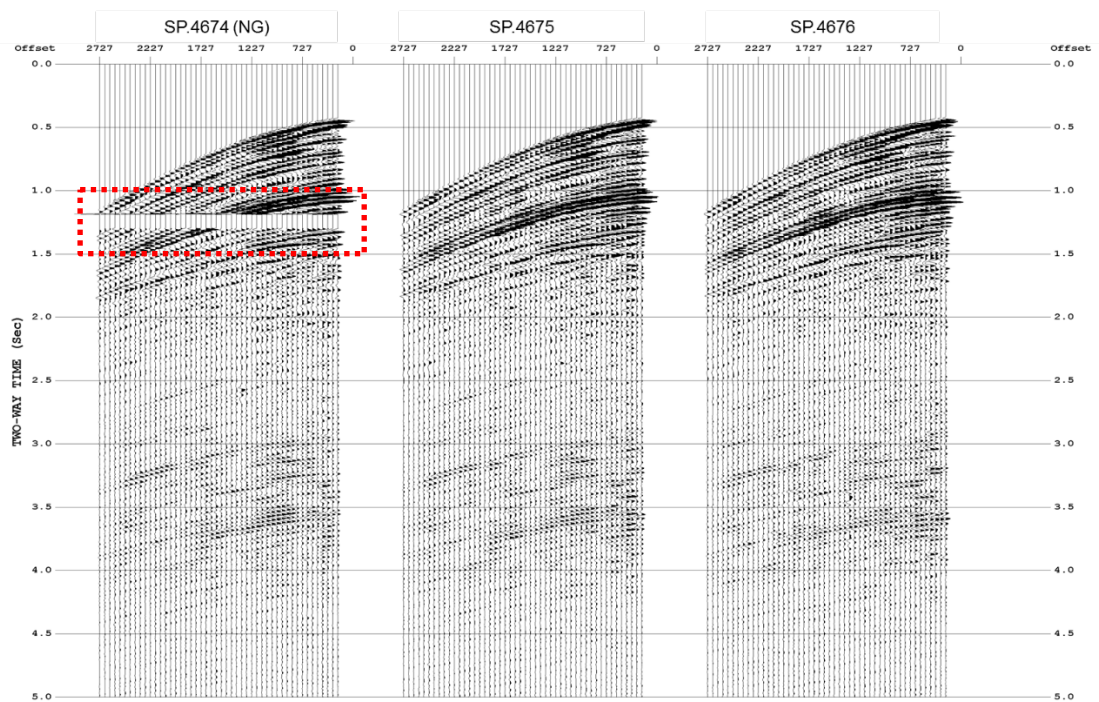


図4 不良記録の例

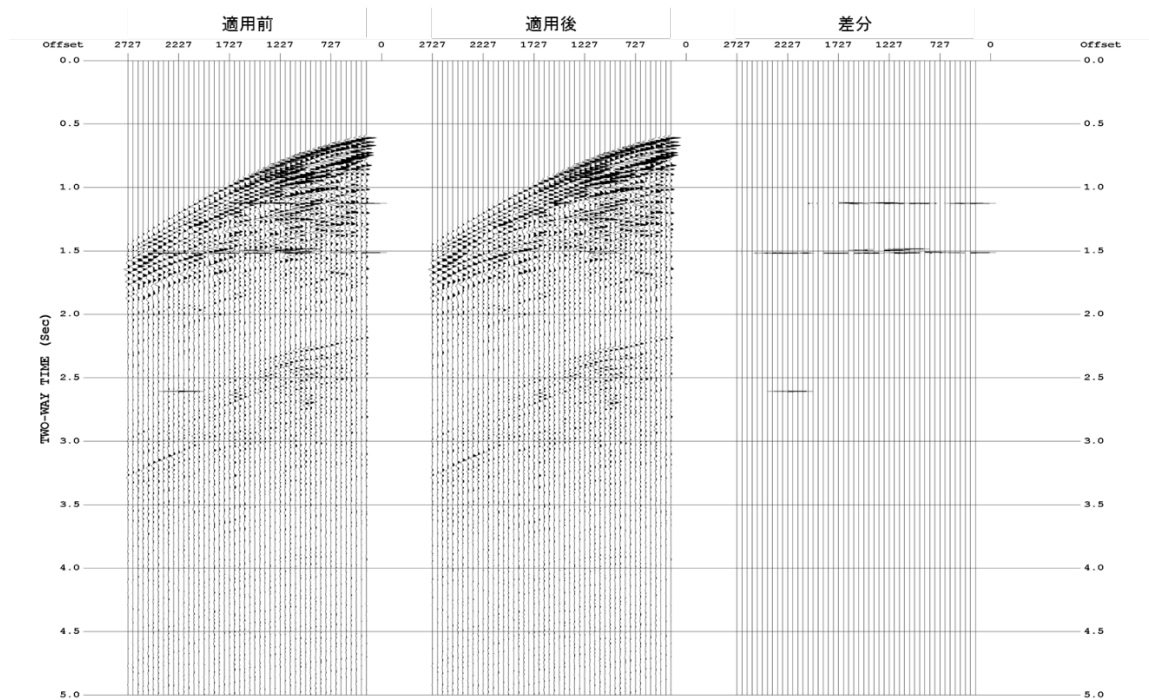


図5 パルスノイズ抑制処理の適用例

(\*\*) プレフィルター (Pre-filter)

対象調査では、データ取得時に8 Hzのローカットフィルターが適用されており、低周波数ノイズはほとんど確認できなかったため、ここでは帯域通過フィルターは適用しなかった。

⑤ 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。

対象調査では、適切なエアガン震源波形（以下、「ガン波形」）観測記録は存在せず、エアガンの容量および配置の詳細情報の記載が既存報告書にはなく、また、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ね合わせることでウェーブレットを抽出した。

以下、図6にウェーブレット抽出までの過程、図7に抽出した海底面反射波形に対する波形変換処理例、図8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、図9に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を示す。

なお、ここで用いたウェーブレットには、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、波形変換処理と後続のデコンボリューション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。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ため、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は、海底面反射波が正のピークとなる。

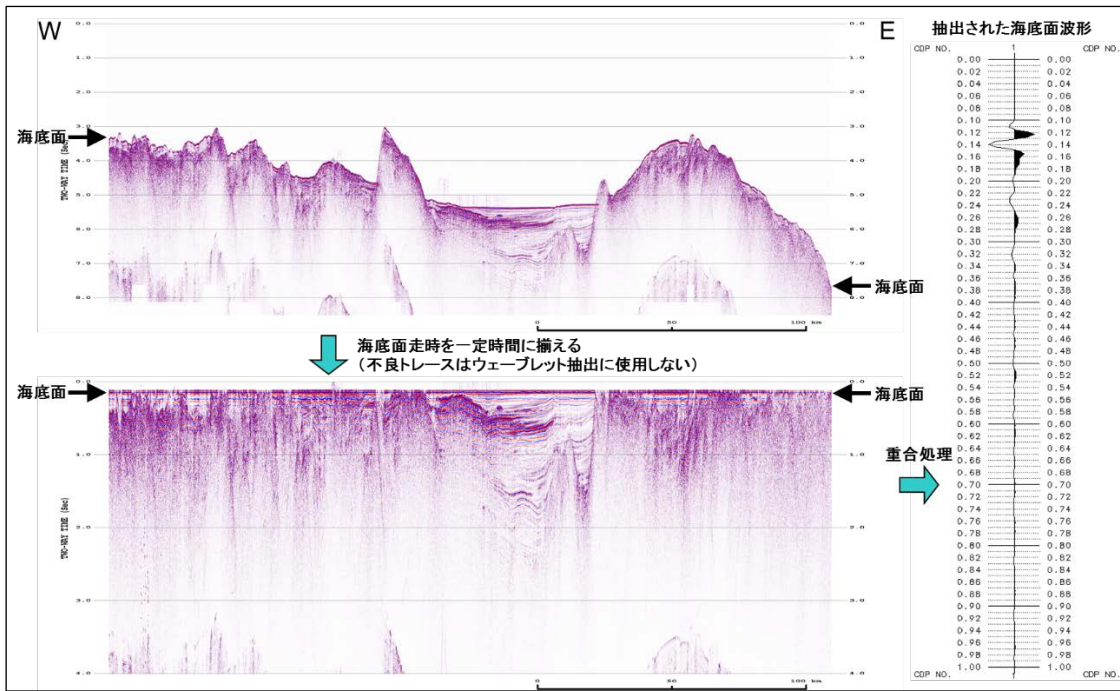


図6 海底面波形から抽出したウェーブレットの例

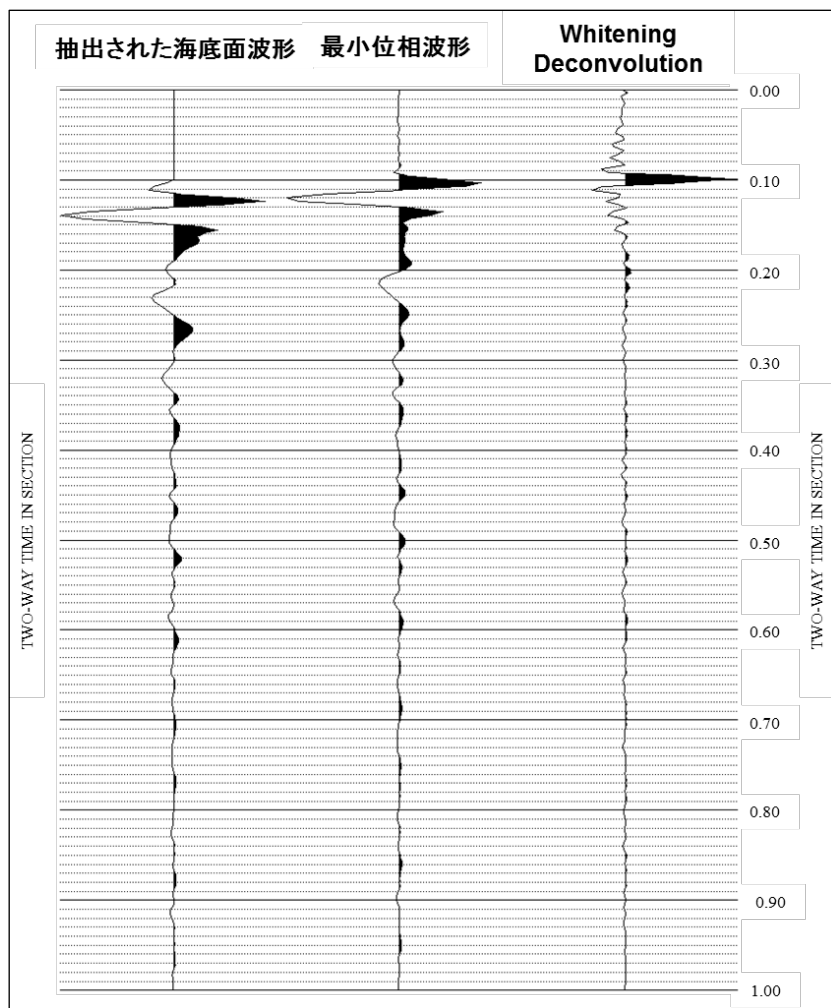


図7 海底面波形から抽出したウェーブレットの波形変換処理の例



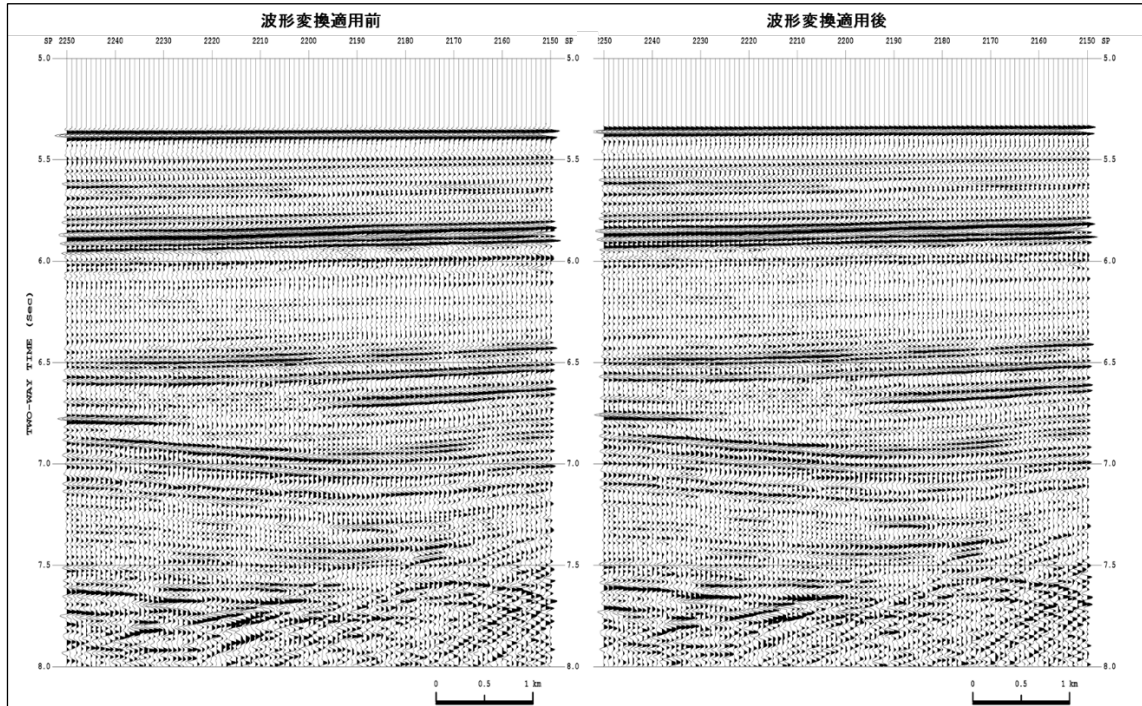


図8 ニアトレース記録に対する海底面反射波形を用いた最小位相変換処理の例

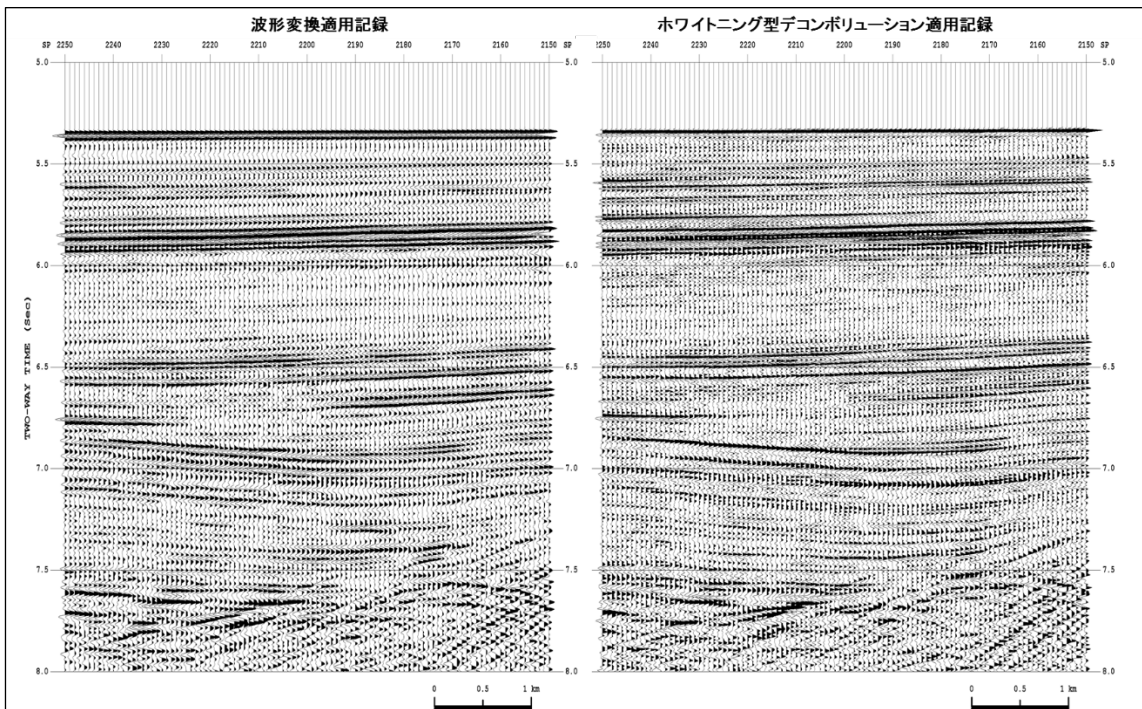


図9 ホワイトニング型デコンボリューションの適用例

⑥ 予備的な速度解析 (Preliminary Velocity Analysis)

定速度走査法 (constant velocity scan) を用いて、2 km ごとに予備的な速度解析を行った。ここで得られた速度については、ノイズ抑制処理における一時的な速度のほか、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た。

⑦ 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。まず、一部の発震記録に見られた突発的で比較的振幅の強いノイズを抑制するために、F-X エディットを適用した (図 10)。次に、ランダムノイズを抑制し、相対的に S/N 比を向上させる F-X 予測フィルターを全調査に対し適用した (図 11)。

ここで、図 12 に重合前ノイズ抑制処理適用前後での重合記録の比較を示す。ランダムノイズが抑制されたことで、僅かではあるが、海底面付近の分解能や深部の S/N 比の改善が見られた。

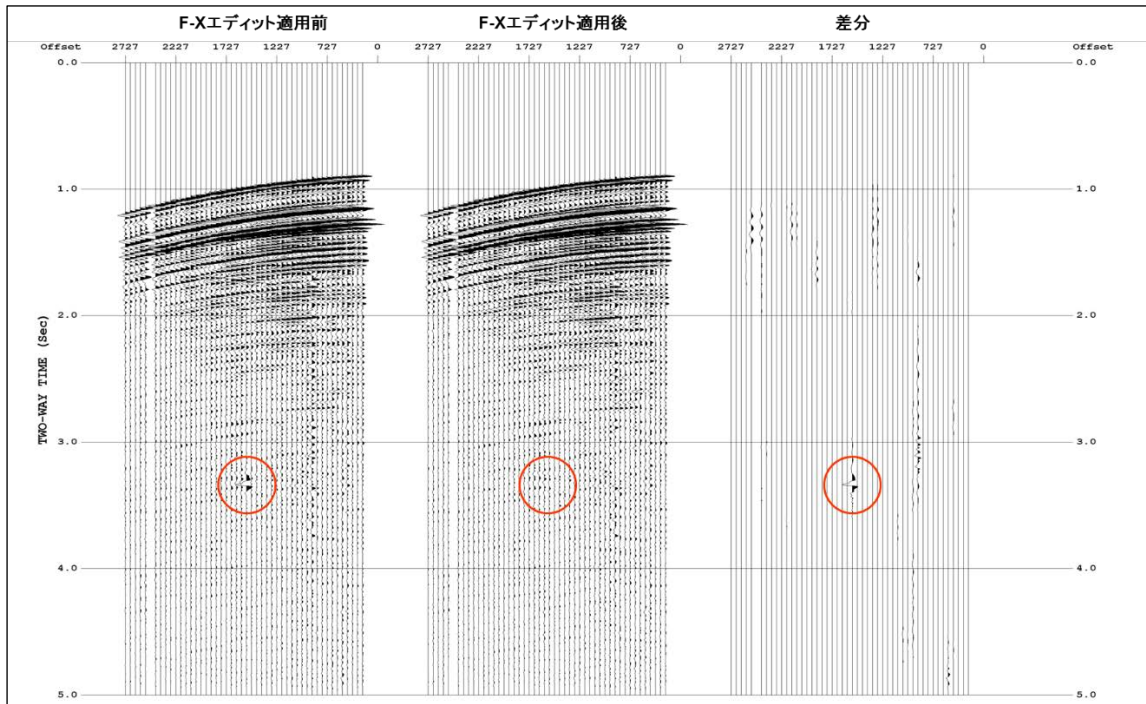


図10 F-Xエディット適用例 (発震記録)

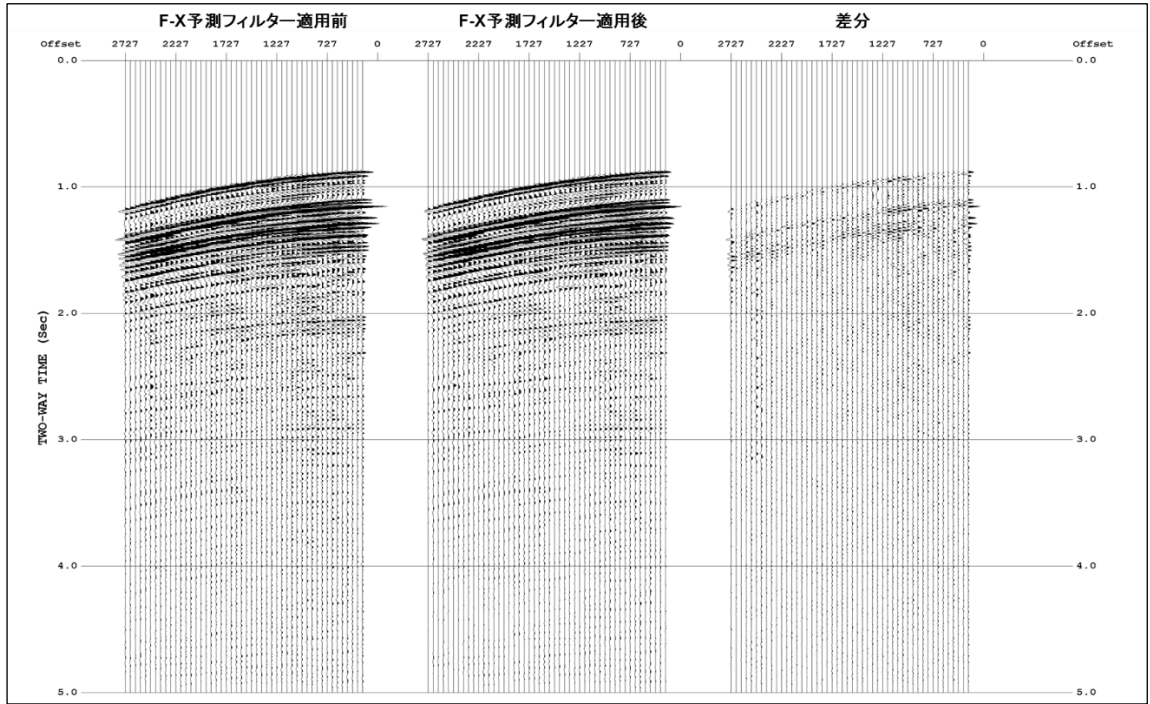


図11 F-X予測フィルター適用例（発震記録）

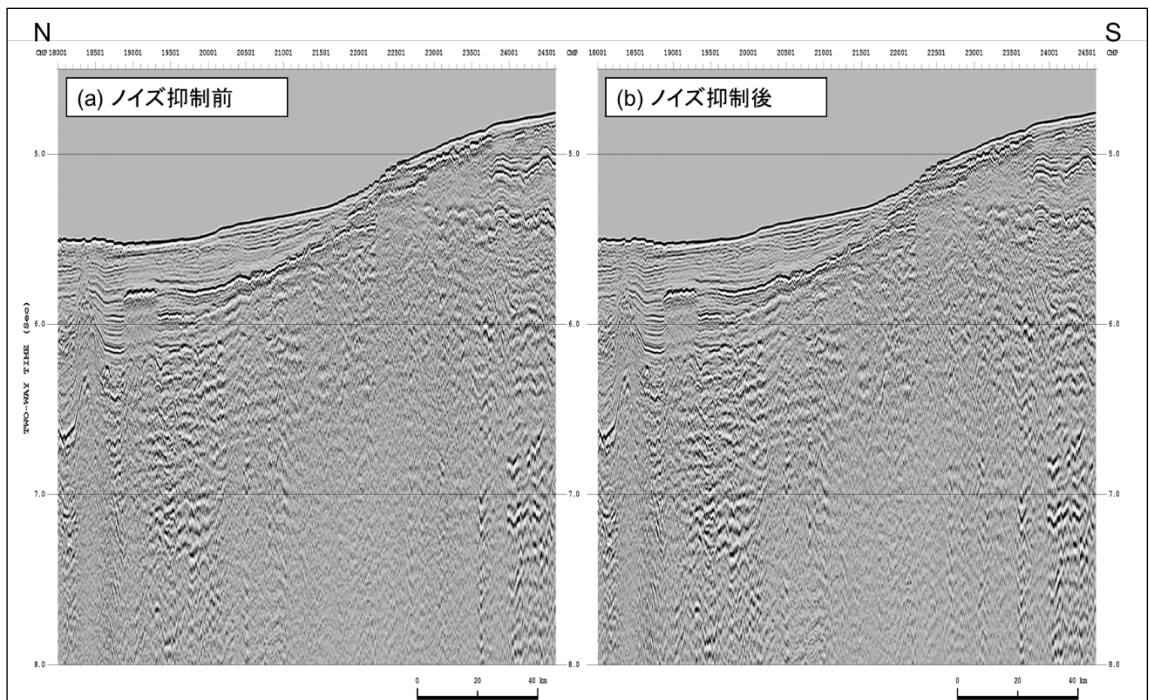


図12 重合前ノイズ抑制処理適用前後の比較（重合記録）

⑧ SRME (Surface-Related Multiple Elimination)

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 法を適用した。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、Surface-related 型（波線経路に海面での反射を含むタイプ）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 13～図 15 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 13 は発震記録上での記録の比較を示し、図 14 は重合記録上での比較を示している。図 15 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。

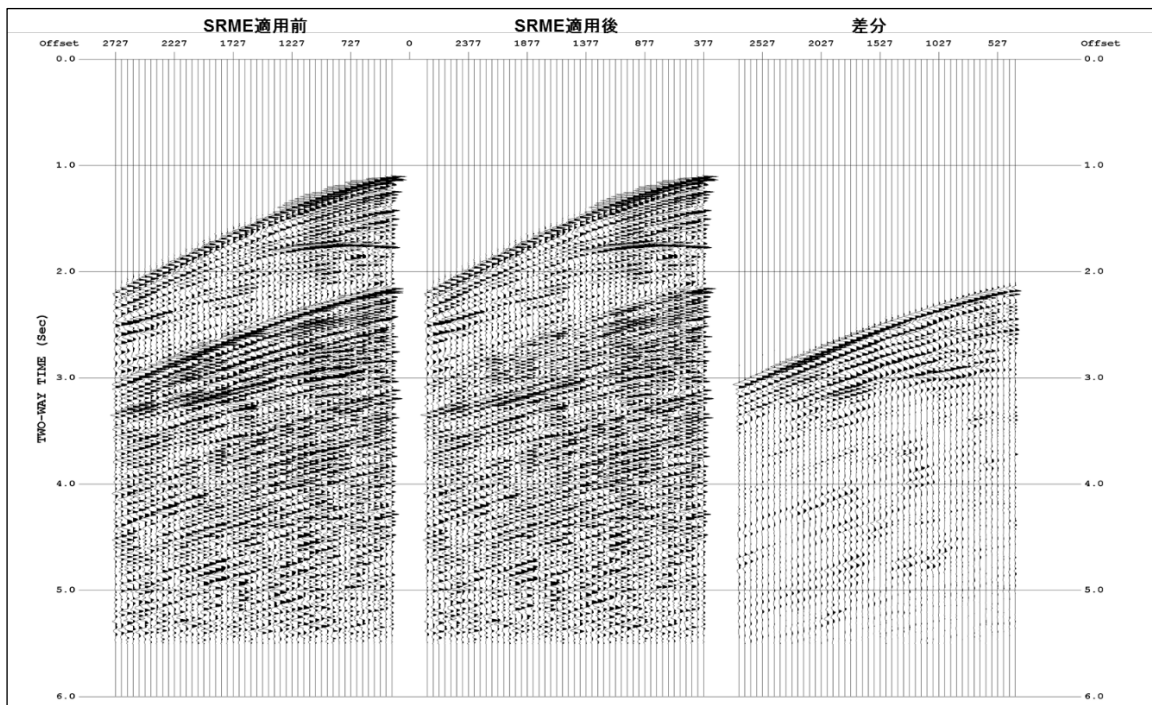


図13 SRME法適用前後の比較（発震記録）

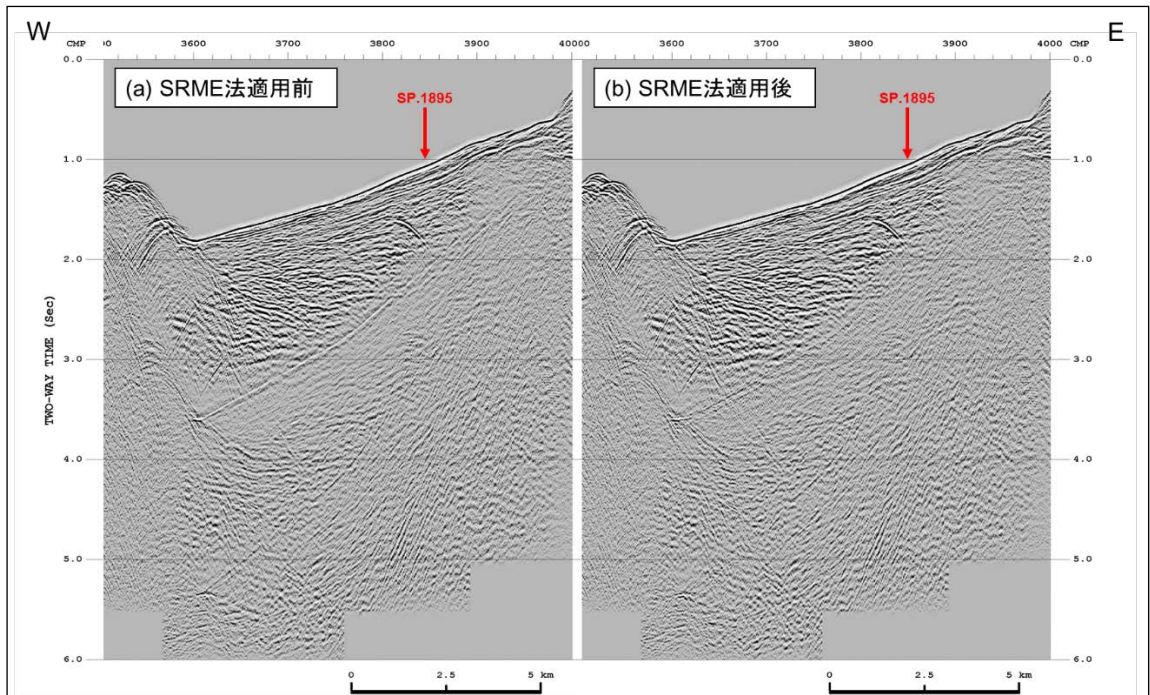


図14 SRME法適用前後の比較（重合記録）

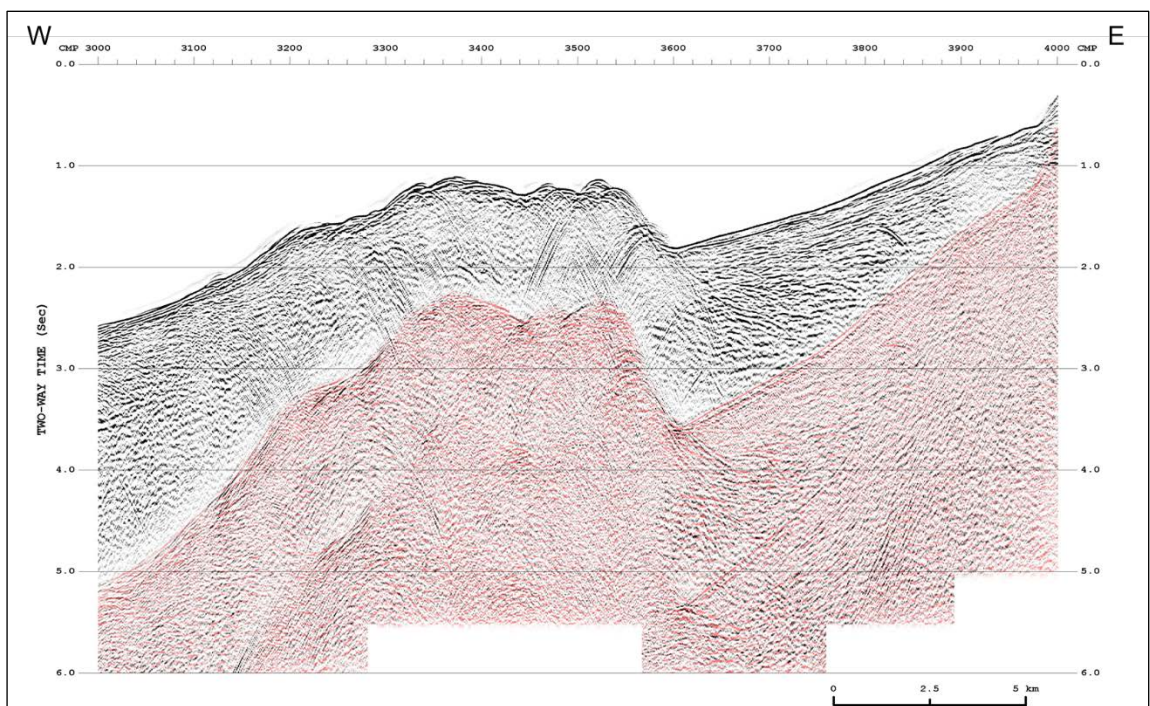


図15 SRME法で予測された多重反射波の重合記録

⑨ RTD (Radial Trace Deconvolution)

短周期多重反射波を抑制するために、RTD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、以下、RT 領域）の記録が得られる。ここで、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 16～図 18 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 16 は RTD 法適用での発震記録の差異を示し、図 17 は重合後で RTD 法適用前後の違いを示している。図 18 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。

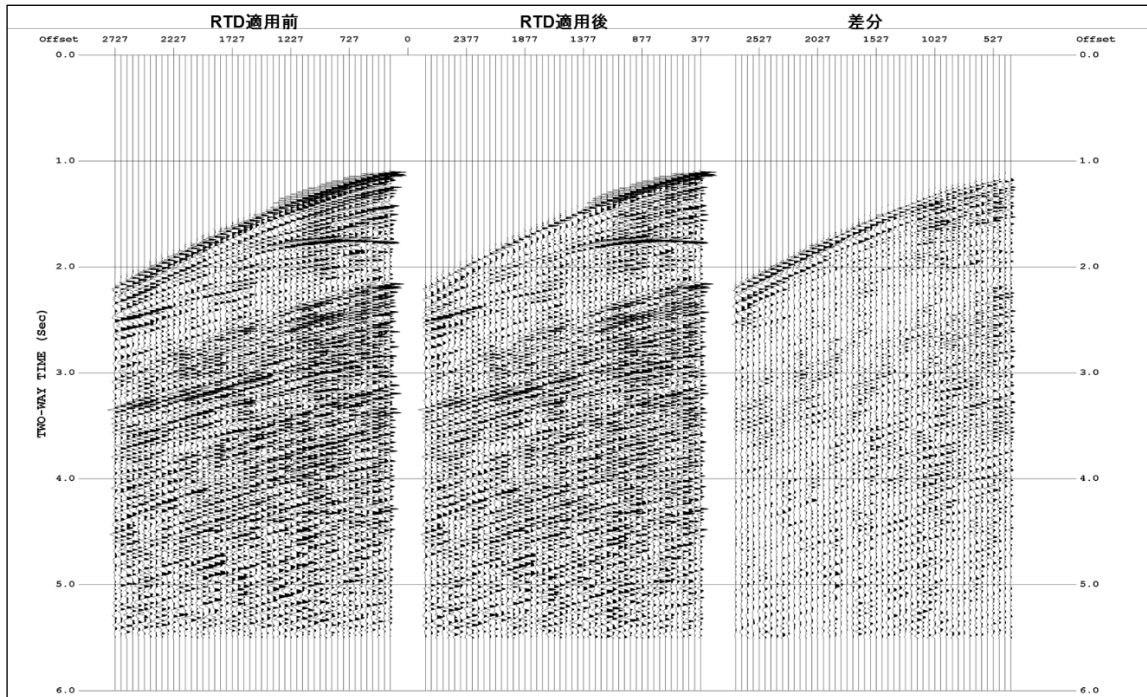


図16 RTD適用前後の比較（発震記録）

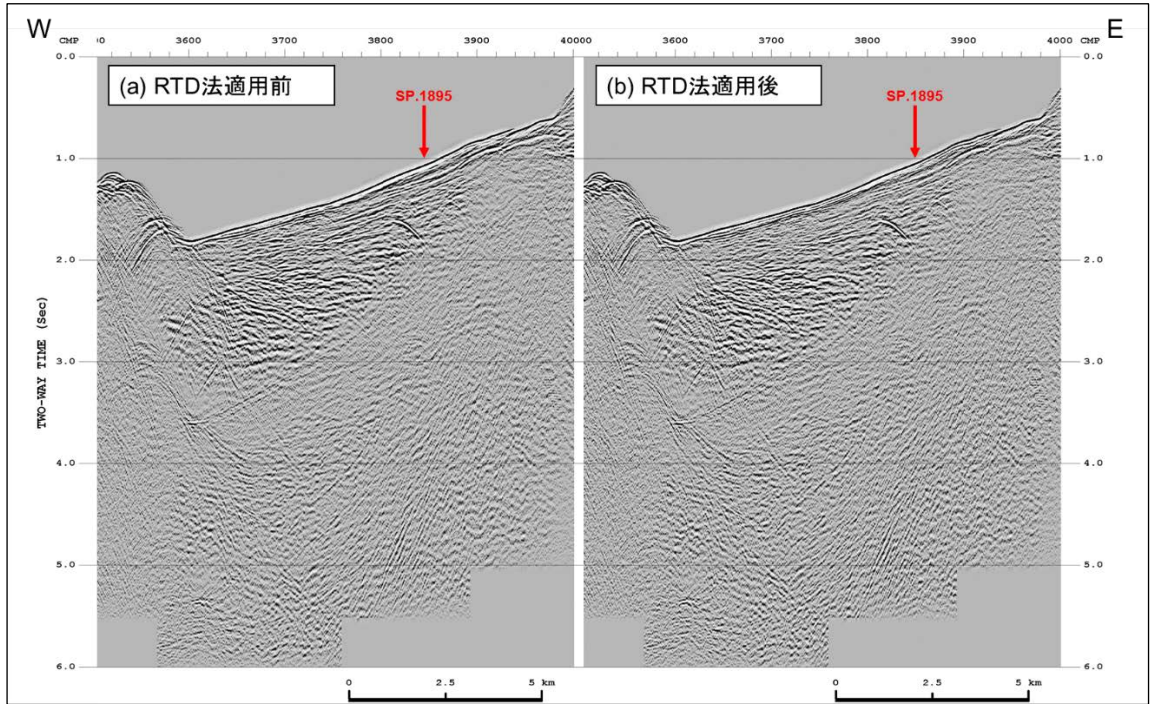


図17 RTD法適用前後の比較（重合記録）

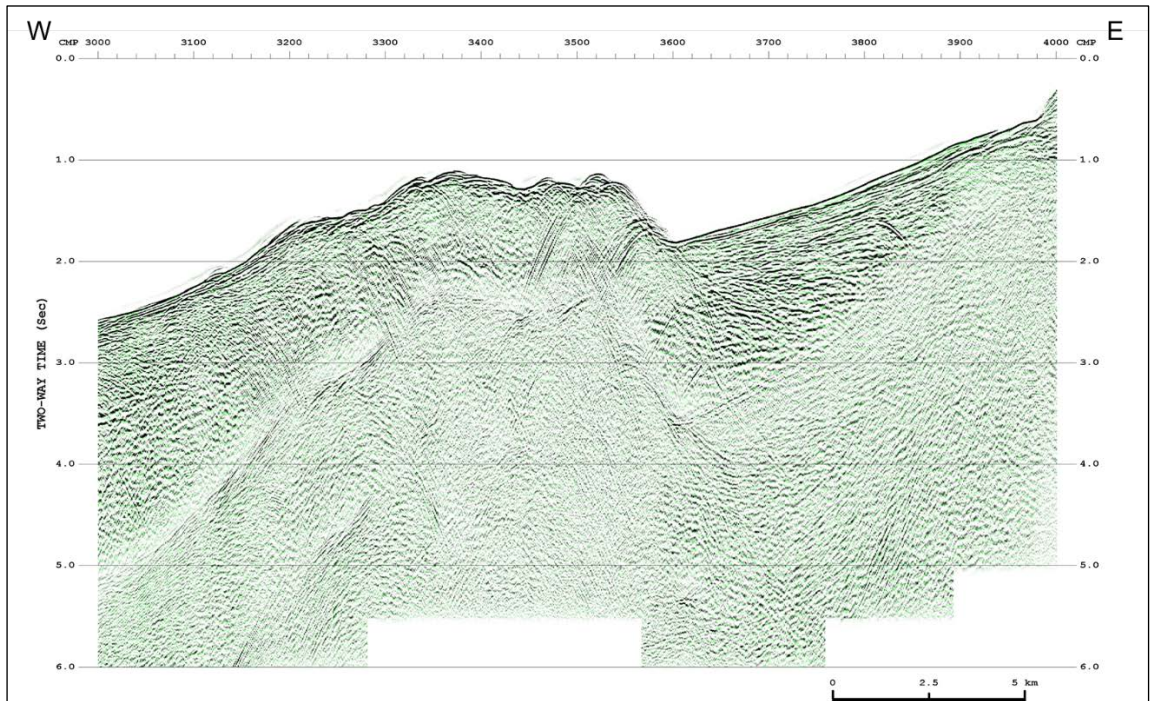


図18 RTD法で予測された多重反射波の重合記録

⑩ 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。

⑪ 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 600msec の自動振幅補正 (AGC) を適用した。

⑫ 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。

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

ここで、 $F(t)$  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。

本解析では、波形の安定性の向上を目的として、SC デコンボリューション (Surface Consistent Deconvolution) を適用した。この手法では、周波数領域において各トレースのスペクトルについて、全解析対象ウィンドウ内データの平均スペクトルからの差異を発震点、受振点、CMP、オフセットの4成分に分解する。その後、各トレースについて、平均スペクトル、発震点成分および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し適用した。

⑬ 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。

⑭ 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フォーマット変換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。なお、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 100 m 程度までで接続結果に問題がなければ、測線接続を行った。表 3 に、接続後の測線情報を示す。

#### ⑮ 速度解析 (Velocity Analysis)

定速度走査法 (Constant Velocity Scan) を用いて、1 km ごとに速度解析を行った。

#### 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 0 m 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。

#### (\*\*) 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、受振点ごとに算出し、時間シフト量として補正する残差静補正処理をテストした。

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、発震点位置などのジオメトリ情報の誤差が残差静補正により補正される可能性もあるため、残差静補正処理を試みた。

図 19 に、残差静補正の適用前後での重合記録 (測線の一部) の比較例を示す。この図の測線は、残差静補正処理による変化が最も大きかった測線のひとつであるが、残差静補正処理適用により重合記録に改善は見られなかった。ここで示した測線以外でもテストを実施したが、多少の違いは見られるものの改善は見られなかった。これについては、対象調査では反射波の連続性が高く、残差静補正処理による補正の余地が小さいことに起因すると考えられる。したがって、対象調査において、残差静補正による改善効果は期待できない。過去の業務では残差静補正処理により、海底面のがたつきや反射波の連続性低下が生じるケースも多数見られたことから、残差静補正処理の適用には品質低下の危険性が伴うことも考慮して、本解析では残差静補正は適用しないこととした。

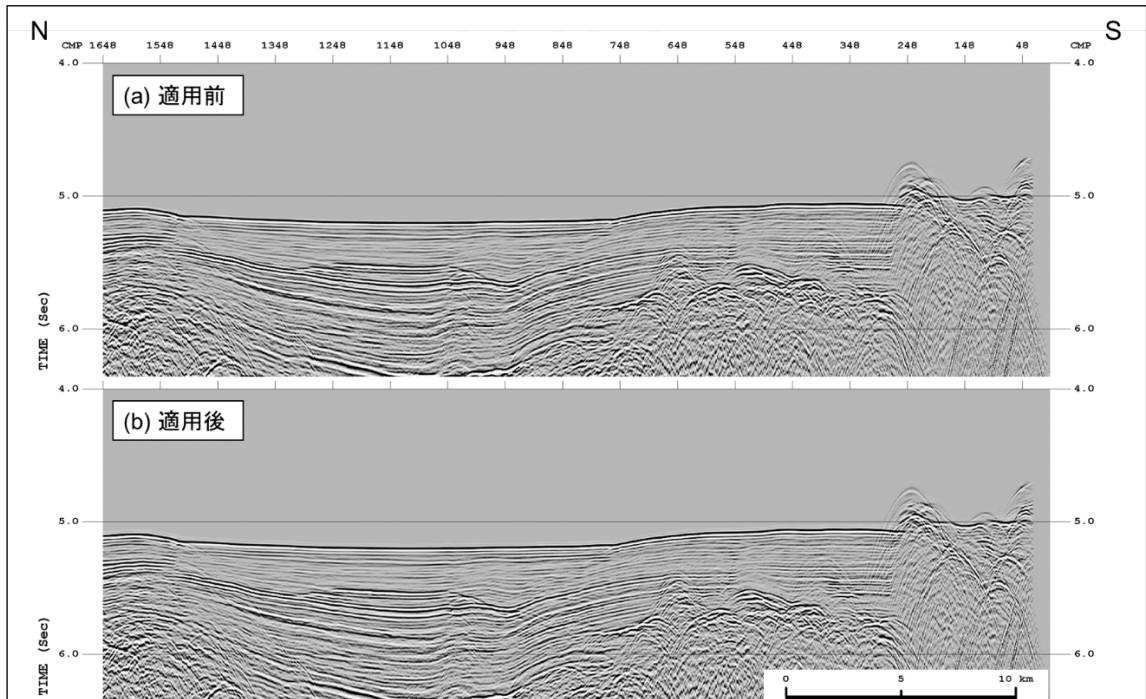


図19 残差静補正適用前後の比較（重合記録）

⑰ 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、PRT 法を適用した。

PRT 法では、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。ここでは、全測線で適用テストを実施したところ、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（表 4）に限り、PRT 法を適用することとした。

図 20～図 22 に、PRT 法による多重反射波抑制処理の適用結果の例を示す。図 20 と図 21 はそれぞれ、発振記録と重合記録において PRT 法適用による差異を比較している。図 22 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、青色が予測された多重反射波成分である。

なお、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、後述の追加処理（PSTM 解析、MDRS 解析）の入力記録とした。

(\*\*) 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ることができる。

本解析の仕様では、DMO 補正はその精度を確保するため、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。したがって、対象調査の受振点間隔は全て 50m であるため、ここでは DMO 補正処理は適用しなかった。

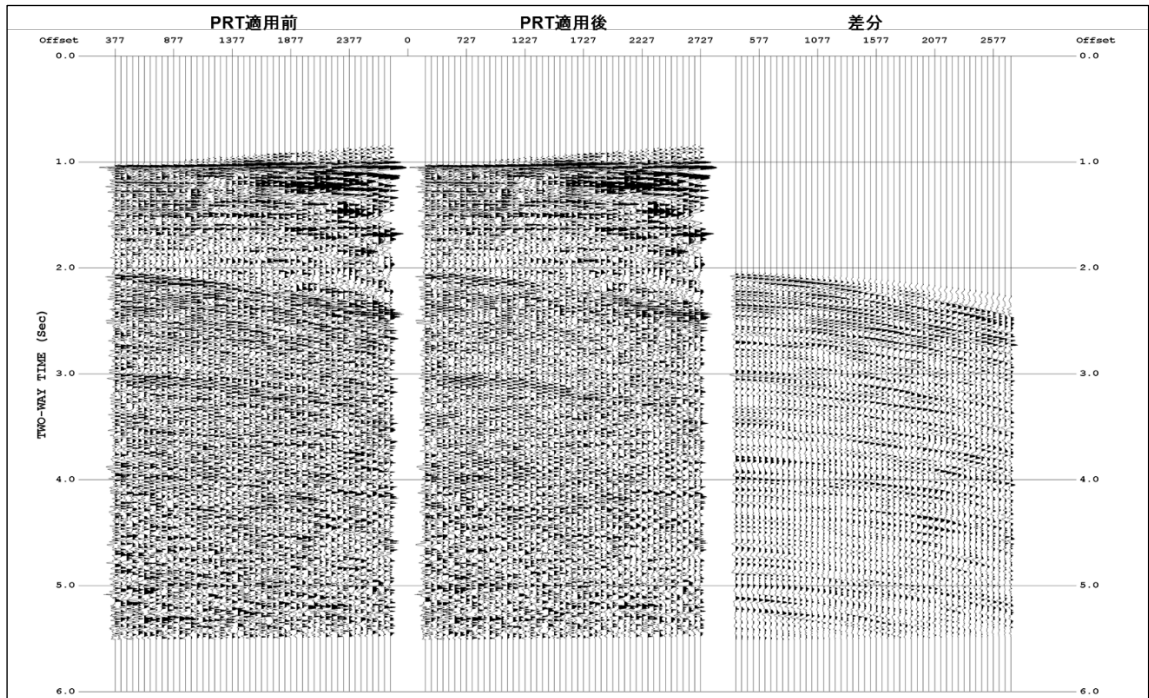


図20 PRT適用前後の比較（発震記録）

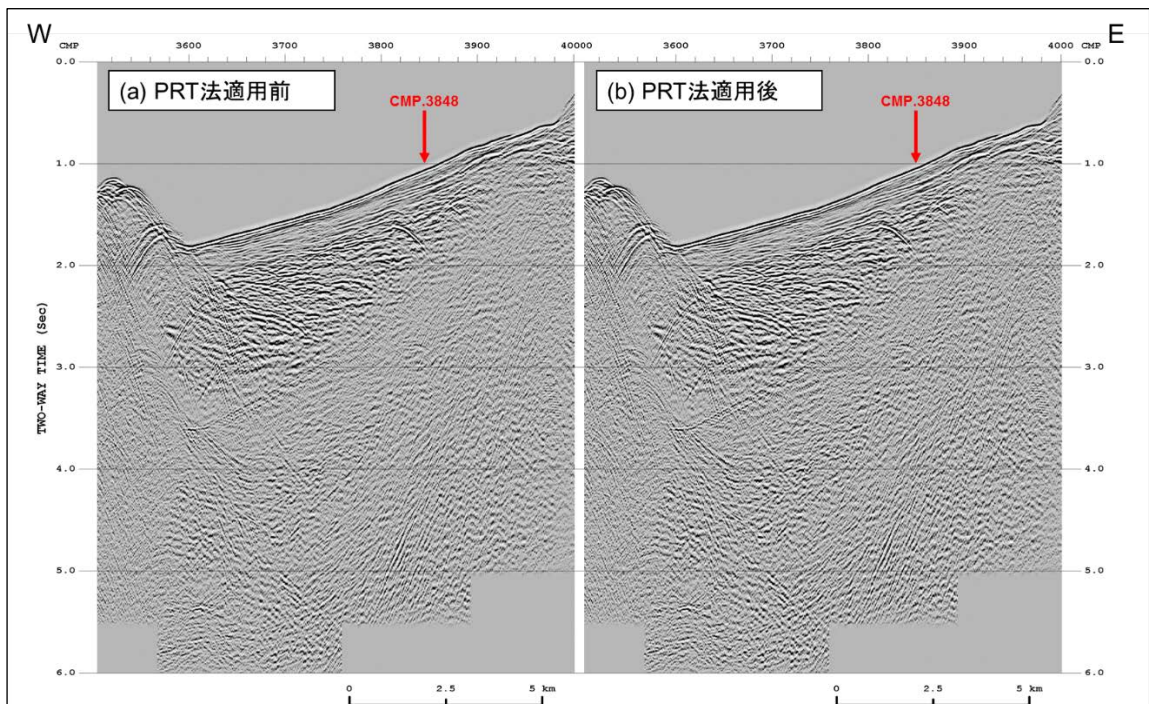


図21 PRT法適用前後の比較（重合記録）

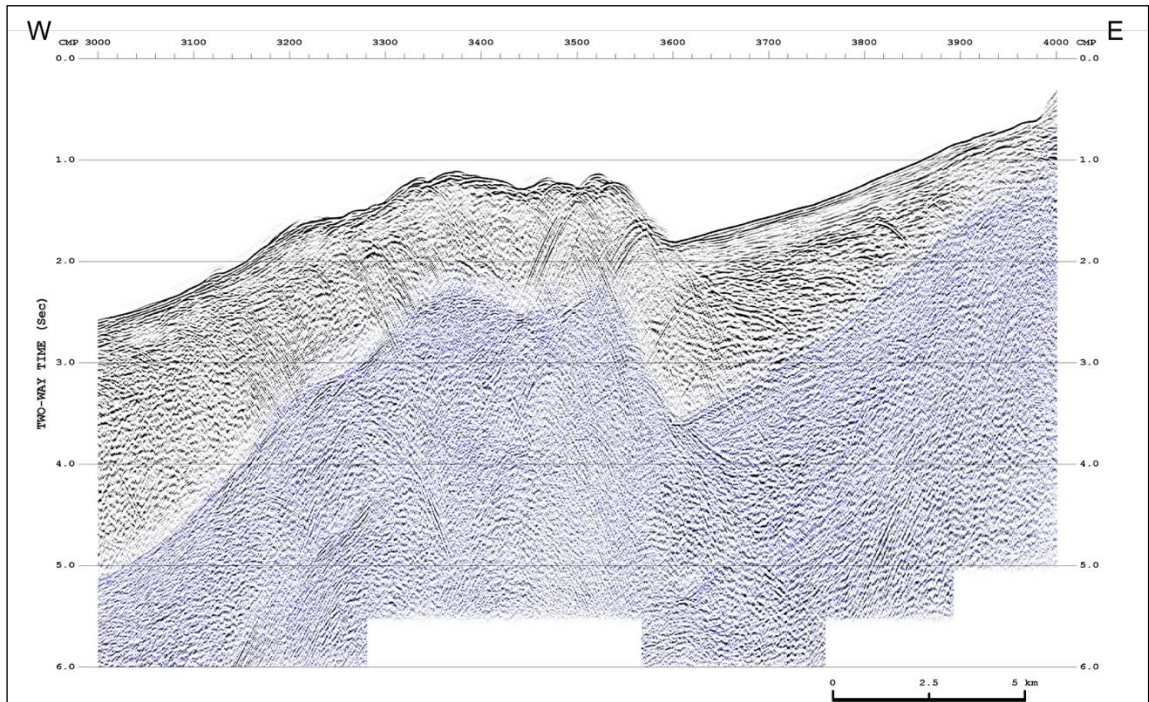


図22 PRT法で予測された多重反射波の重合記録

⑱ アウトサイドミュート (Outside Mute)

NMO 補正に伴う波形の伸長およびフェア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。

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 600 msec 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、水平重合処理を実施した。

㉑ 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 (1,500 m/sec) を参照して、基準面補正を行った。

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 比を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。

㉓ 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。図 23 に周波数成分

解析の例を示す。図中の赤線は、設定した周波数帯域を表す。また、図 24 に帯域通過フィルター適用前後の重合記録の比較を示す。

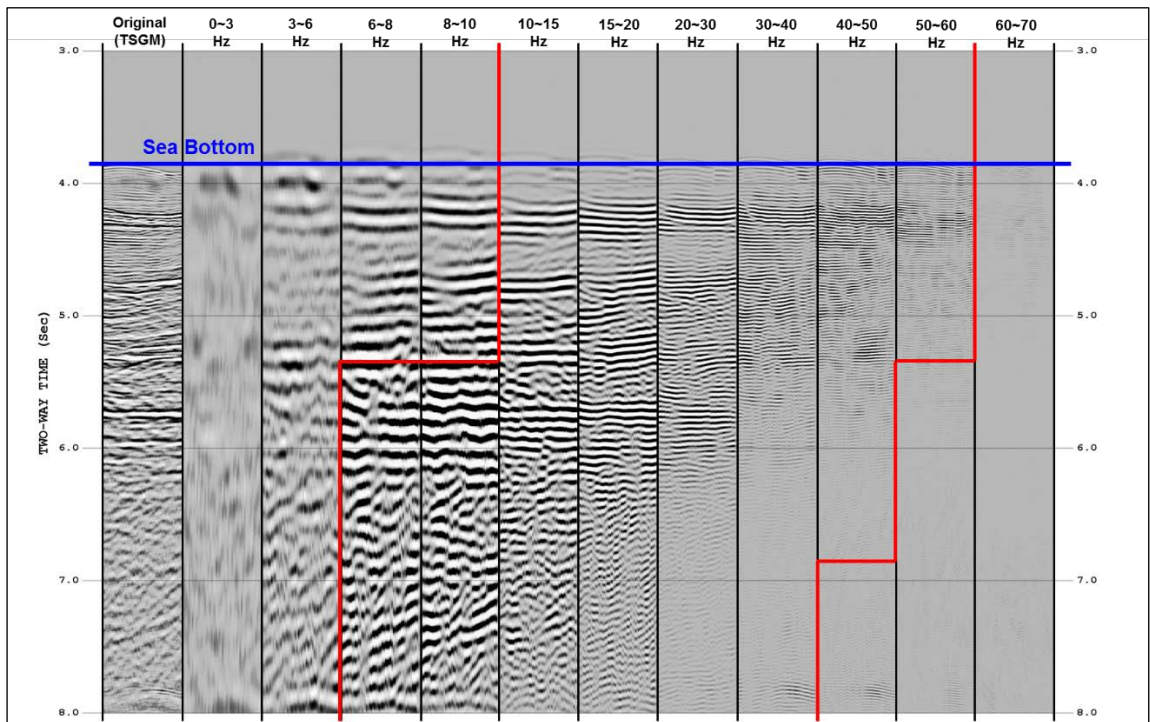


図23 周波数成分解析の例

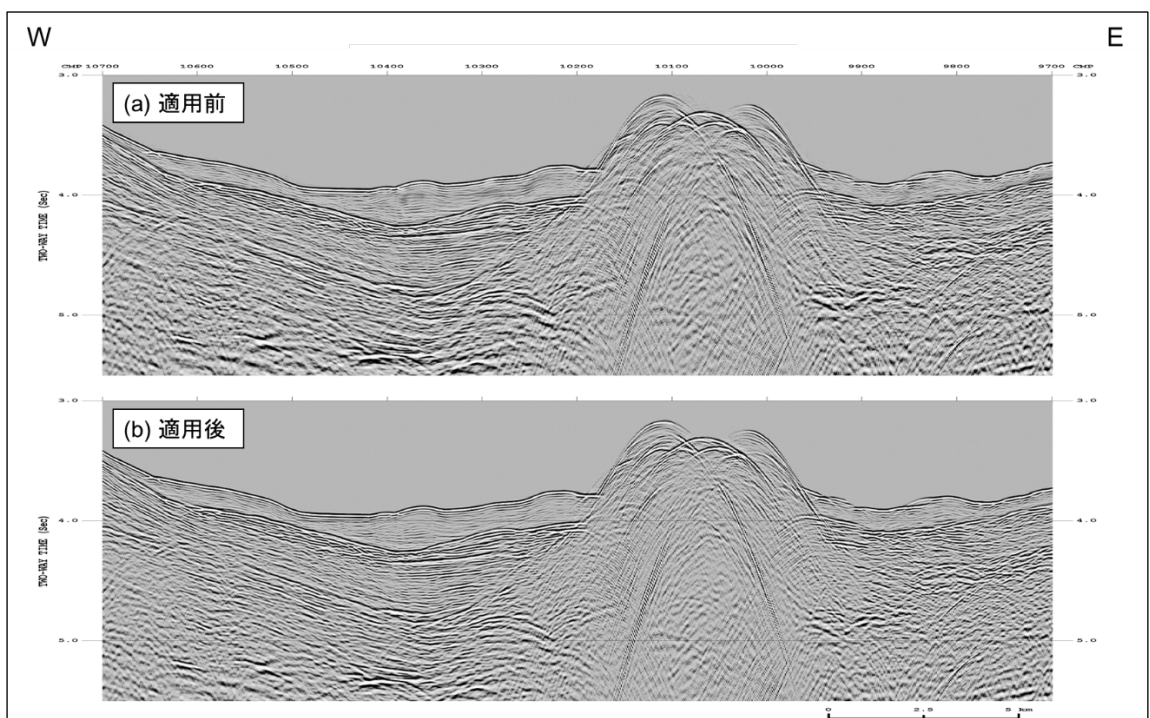


図24 帯域通過フィルター適用前後の比較（重合記録）

④ 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、重合時間断面図として SEG-Y フォーマットファイルに出力した。

⑤ 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。したがって、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。ここでは、マイグレーション処理の手法として、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については、重合速度を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、重合後時間マイグレーション時間断面図として SEG-Y フォーマットファイルに出力した。

⑥ 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。ここでは、深度変換速度として、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 フォーマット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 25 に、重合後時間マイグレーション時間断面図の例を図 26 に、重合後時間マイグレーション深度断面図の例を図 27 に示す。

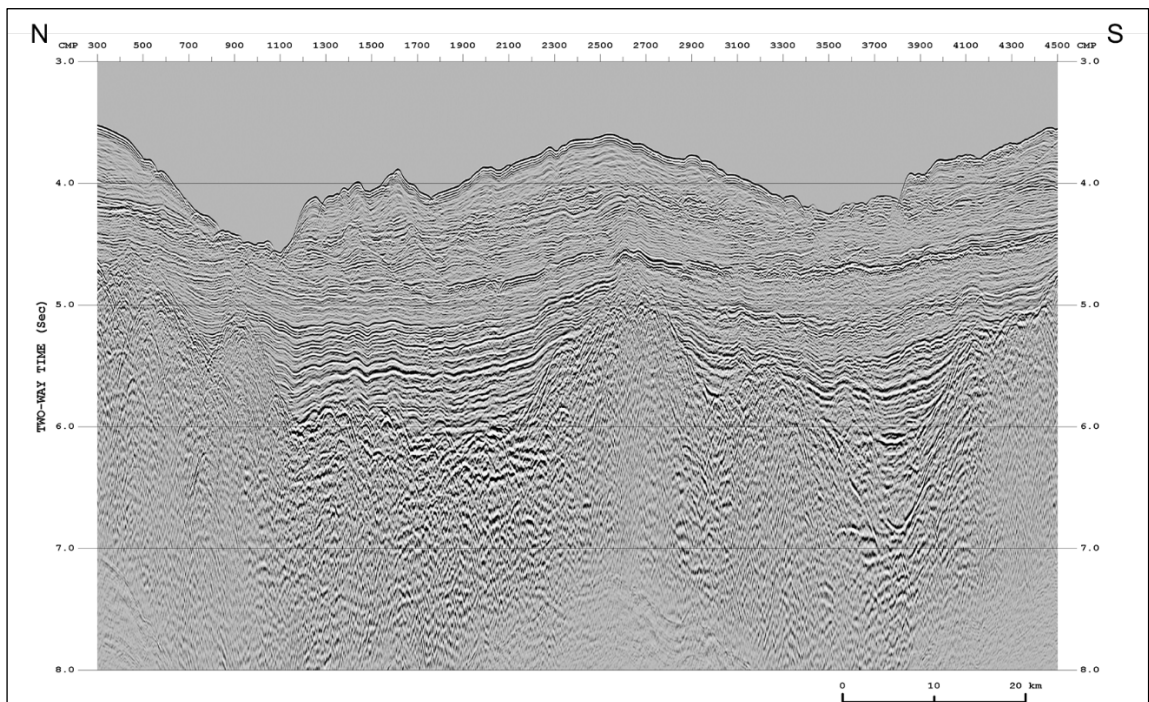


図25 重合時間断面図の例

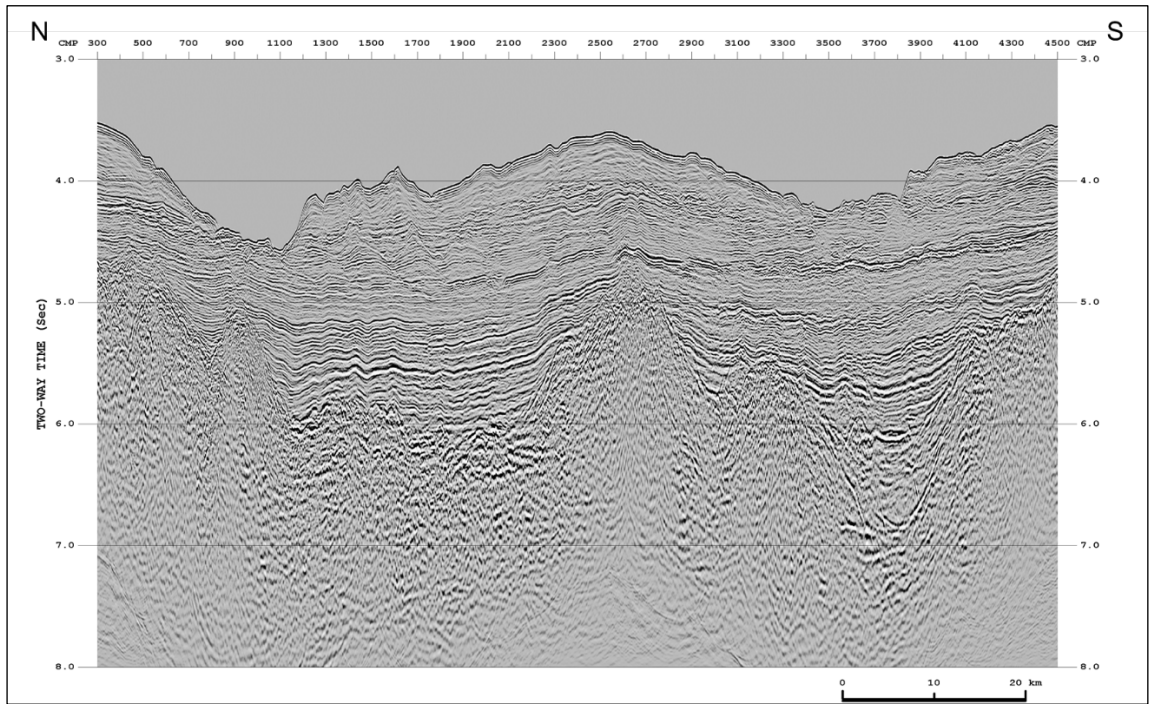


図26 重合後時間マイグレーション時間断面図の例

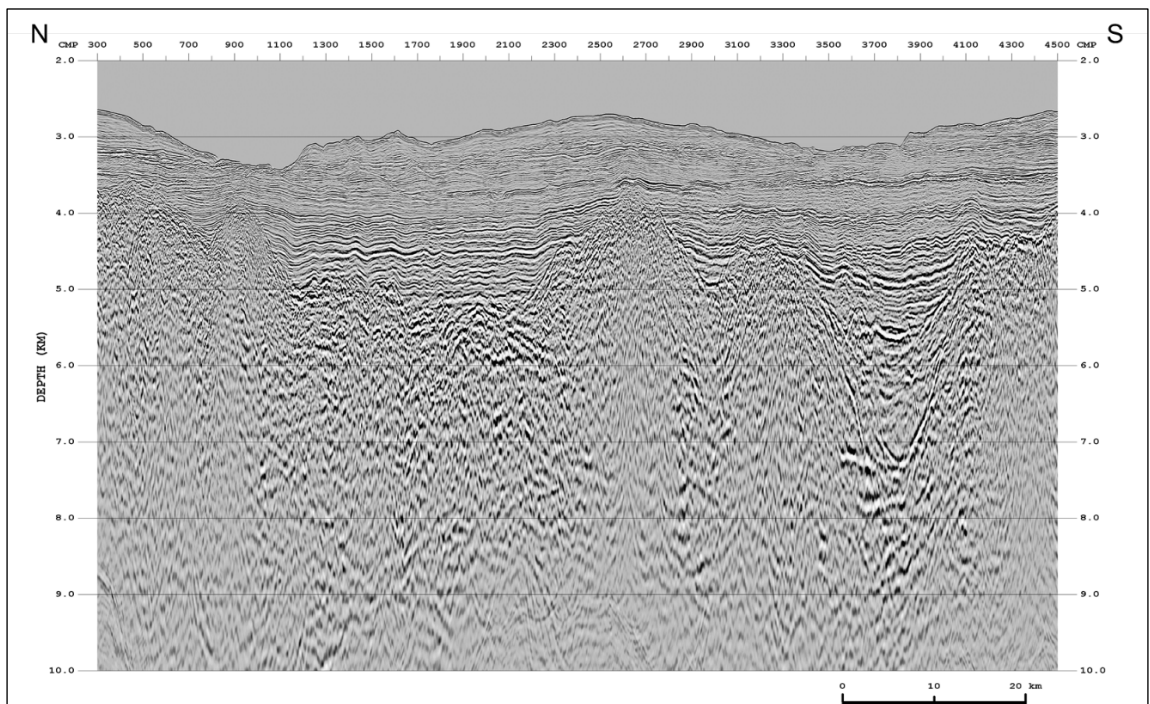


図27 重合後時間マイグレーション深度断面図の例

ii) PSTM解析

PSTM 解析は、重合前時間マイグレーションの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から⑰の処理に続いて、以下の処理を実施した。表6に、PSTM 解析の処理パラメータの詳細について示す。

表6 PSTM解析の処理パラメータ詳細

	Process	Parameters	S54「伊豆七島海域, 小笠原諸島海域」 IO79-B_m
1-17	same as standard analysis		
18	PSTM Velocity Analysis	Step 1	
		Method	Constant Velocity Scan Method
		Analysis Interval	1000 m
		Step 2	
		Method	Percentage Velocity PSTM Stack
		Reference Velocity	Step1 Velocity
19	Pre-Stack Time Migration	Analysis Interval	1000 m
		Type	Common Offset PSTM
		Method	Kirchhoff
		Offset Interval	100 m
20	Outside Mute	Maximum Angle	75 degree
		Base Time	Sea Bottom - 100 msec
		Start Time	1000 msec
		Start Offset	1300 m
		Taper Length	100 msec
21	Trace Scaling	Sliding Velocity	2000 m/sec
		Method	AGC
22	CIP Stack	Gate Length	600 msec
		Method	Normal Stack
23	Datum Correction	Divisor Type	Normalized by Square Root of Number of Fold
		Datum	Mean Sea Level
24	Signal Enhancement	Time Shift	16.67 msec
		Method	F-X Prediction Filter
		Operator Length	7 CMPs
		Gate Length	50 CMPs
		Time Gate Length	1000 msec
25	Band-pass Filter	Time Gate Overlap Length	500 msec
		Method	Time Variant
		Operator Length	300 msec
		Gate Overlap Length	1000 msec
		Base Time	Sea Bottom
		Pass Band	10/10 - 60/60 Hz (0.0 - 1.5 sec)
			6/6 - 50/50 Hz (1.5 - 3.0 sec)
	6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)		
26	Trace Scaling	Method	Trace Sigma Scale
27	Depth Conversion	Method	Vertical Stretch

⑱ PSTM速度解析 (PSTM Velocity Analysis)

PSTM 処理に最適な速度を得るため、1 km 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。

- 手順1 : 重合速度を近似PSTM速度としてPSTM処理を適用
- 手順2 : PSTM適用時の速度で逆NMO補正を適用
- 手順3 : 「i)標準解析」の「⑱速度解析」と同様の手法で速度解析を実施
- 手順4 : 求まった速度を用いてPSTM処理を適用

速度が収束するまで、上記手順2から手順4を繰り返し実行した。



なお、急傾斜構造では、近似 PSTM 速度（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。このことから、ここでは速度の精度向上を図るため、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。各スケール速度から得られた PSTM 断面図上で最適なイメージを示す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。

⑱ 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⑱で求めた速度を用いて、重合前時間マイグレーションを実施した。ここでは手法として、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。

⑳ 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。

㉑ 振幅調整（Trace Scaling）

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

㉒ 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中の音速速度（1,500 m/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 比を向上させる 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 フォーマットファイルに出力した。

②⑦ 深度変換 (Depth Conversion)

「i)標準解析」の「②⑥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 フォーマット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 28 に、重合前時間マイグレーション深度断面図の例を図 29 に示す。

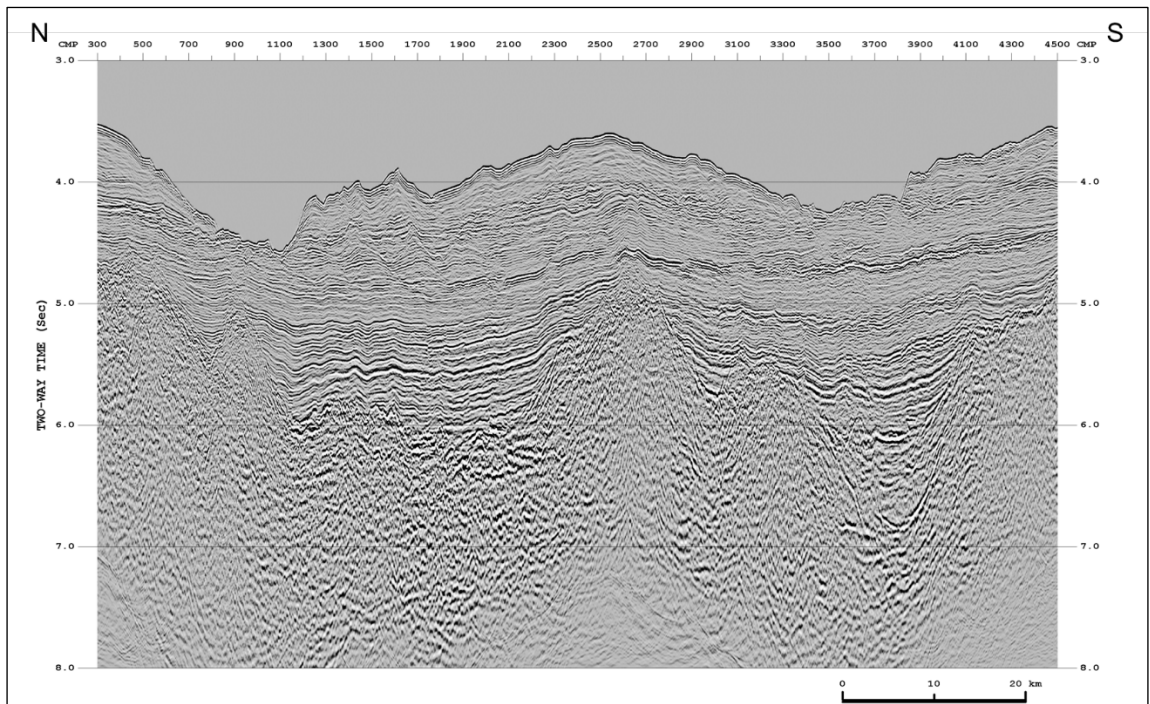


図28 重合前時間マイグレーション時間断面図の例

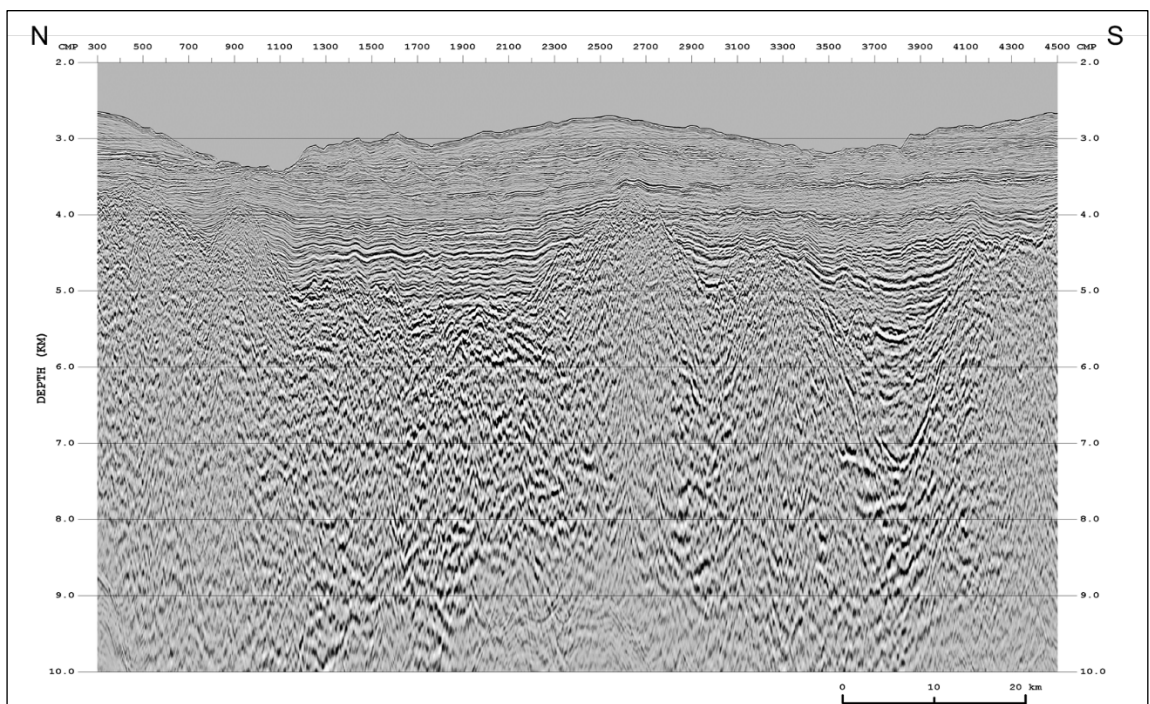


図29 重合前時間マイグレーション深度断面図の例

iii) MDRS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から⑰の処理に続いて、以下の処理を実施した。表7に、MDRS 解析の処理パラメータの詳細について示す。

表7 MDRS解析の処理パラメータ詳細

	Process	Parameters	S54「伊豆七島海域,小笠原諸島海域」 IO79-B_m
1-17	same as standard analysis		
18	Band-pass Filter	Method Operator Length Pass Band	Space Time Invariant 600 msec 6/8 - 120/125 Hz
19	Trace Scaling	Method Gate Length	AGC 600 msec
20	Multi-dip CRS Scan	Number of CMPs CMP Offset Limit Time (msec) Offset (CMPs) Surface Velocity Number of Dips Dip interval N-Wave Curvature Range Semblance Window Stretch Limit Guide Velocity Velocity Guide Scale Range	41 CMPs (1000 m)  0, 8000 7, 41 1500 m/sec 61 24 msec/km -0.8 - 1.2 64 msec 1.4 Stacking Velocity 75 - 150%
21	MDRS Stack	Dip Range No.of Stack Subsection	-400 ~ 400 msec/km 2
22	Datum Correction	Datum Time Shift	Mean Sea Level 16.67 msec
23	Signal Enhancement	Method Operator Length Gate Length Time Gate Length Time Gate Overlap Length	F-X Prediction Filter 7 CMPs 50 CMPs 1000 msec 500 msec
24	Band-pass Filter	Method Operator Length Gate Overlap Length Base Time Pass Band	Time Variant 300 msec 1000 msec Sea Bottom 10/10 - 60/60 Hz (0.0 - 1.5 sec) 6/6 - 50/50 Hz (1.5 - 3.0 sec) 6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)
25	Post-Stack Time Migration	Method Approximation Angle Extrapolation Step Velocity Type Velocity Scaling Factor	T-X FD Migration 45 degree 4 msec Stacking Velocity 90 %
26	Depth Conversion	Method	Vertical Stretch

⑱ 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

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。

⑲ 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 600 msec の AGC を適用した。

## ⑳ マルチディップCRSスキャン (Multi-dip CRS Scan)

CRS 法は、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。しかしながら、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。以下にその手順を述べる。

- 手順 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
- 手順 2 : 求まった 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
- 手順 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。

## ㉑ MDRS 重合 (MDRS Stack)

アトリビュートパネルのうち、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ごと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。

## ㉒ 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 (1,500 m/sec) を参照して、基準面補正を行った。

## ㉓ 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 比を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。

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、「i)標準解析」の「②③帯域通過フィルター」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 フォーマットファイルに出力した。

②⑤ 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

i)標準解析の②⑤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。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 フォーマットファイルに出力した。

②⑥ 深度変換 (Depth Conversion)

i)標準解析の②⑥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 フォーマット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 30 に、MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図の例を図 31 に、MDRS 重合時間マイグレーション深度断面図の例を図 32 に示す。

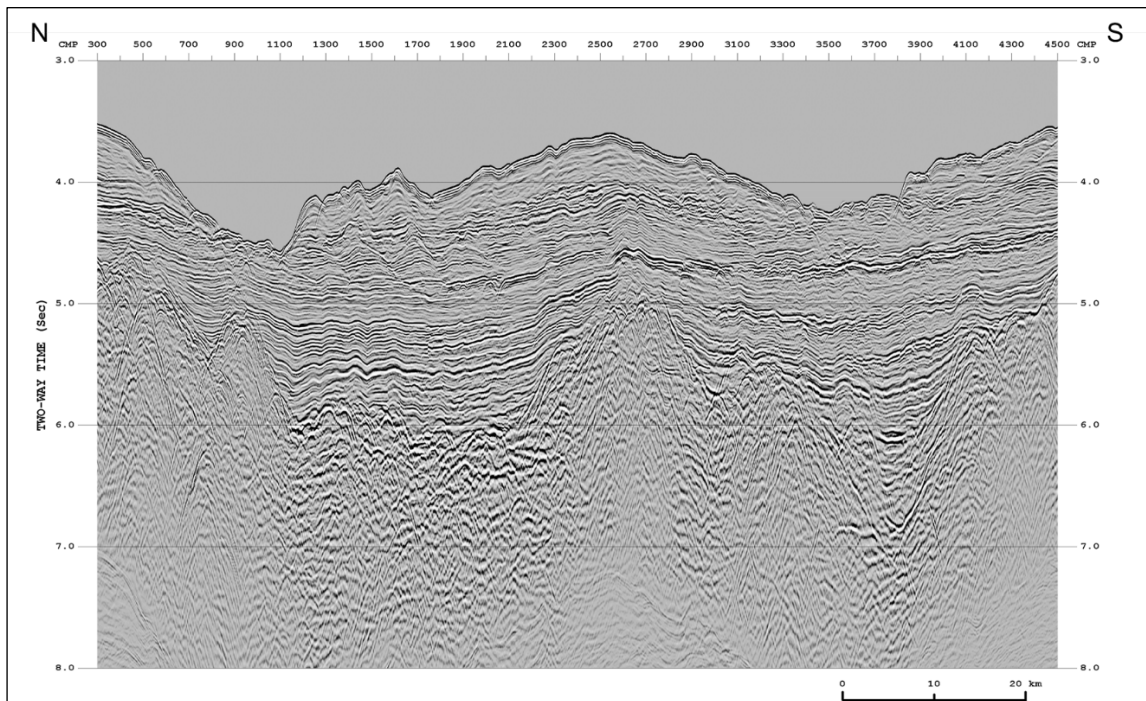


図30 MDRS重合時間断面図の例

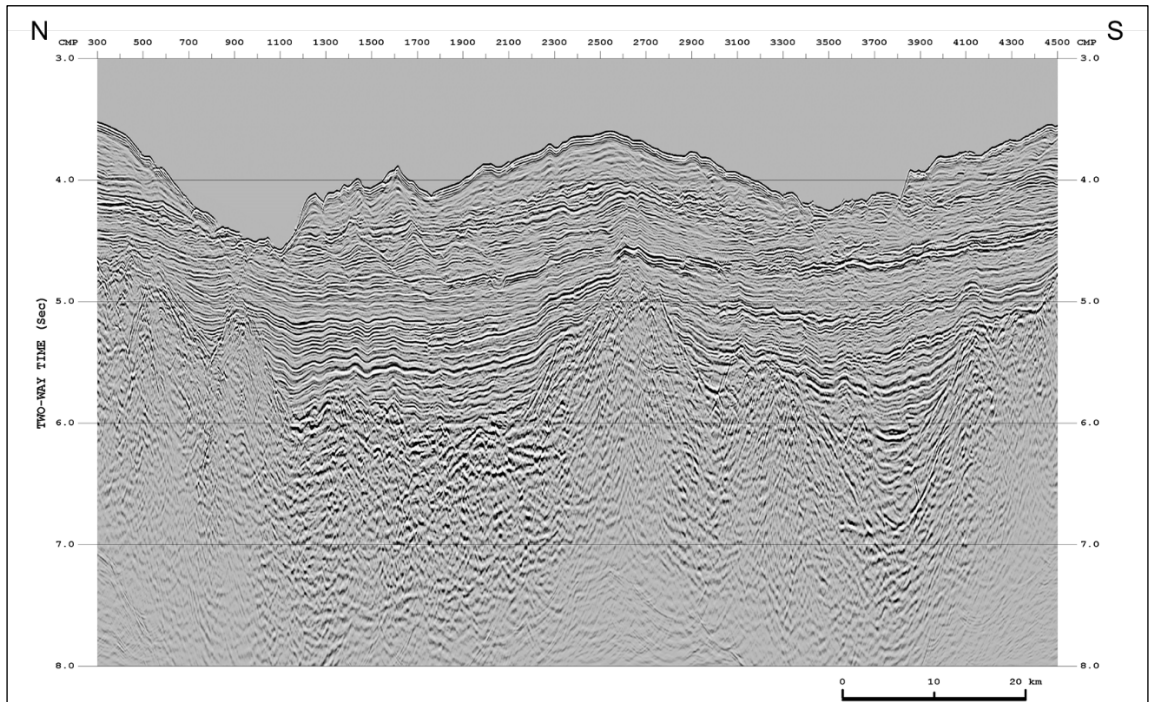


図31 MDRS重合時間マイグレーション時間断面図の例

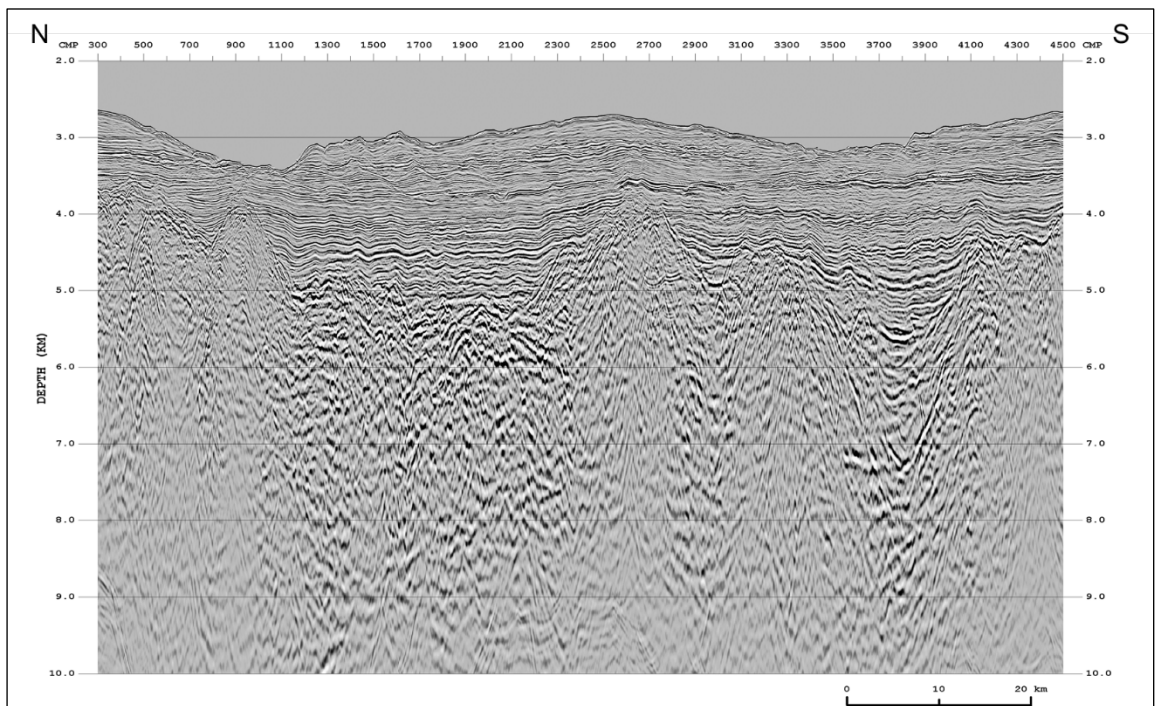


図32 MDRS重合時間マイグレーション深度断面図の例

iv) ベクトル化処理

ベクトル化処理は、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処理である。本処理の対象測線は、再処理対象測線のうち、データ欠損が大きくデータ再処理結果の重合記録上にデータ欠損が見られた測線（表 3）と、JAPEX から提供された既存結果のベクトル化対象測線（図 1）である。なお、再処理対象測線のうちベクトル化処理対象測線については、データ欠損範囲が限定的だったため、データ再処理も併せて実施した。表 8 に、ベクトル化の処理パラメータの詳細について示す。

表8 ベクトル化の処理パラメータ詳細

Process	Parameters	S51小笠原沖76、S56七島沖81、S57七島沖82	S54「伊豆七島海域、小笠原諸島海域」
1 Scan and Vectorizing	Scan Target	Film Section	Paper Section
2 Signal Enhancement	F-X Prediction Filter		
	Operator Length	7 CMPs	11 CMPs
	Gate Length	49 CMPs	70 CMPs
	Time Gate Length	1000 msec	1000 msec
	Time Gate Overlap Length	500 msec	500 msec
3 Phase Compensation	Type	Zero Phase	
	Wavelet	Use Avaraged Sea Bottom Reflection	
	Polarity	Sea Bottom Reflector is positive	
4 Zero Offset Demultiple	Method	Static Shift (Use Seafloor Reflection Time)	
	Filter Length	400 msec	
5 Band-pass Filter	Method	Space Time Invariant	
	Operator Length	500 msec	
	Pass Band	8/10 - 45/50 Hz	
6 Post-Stack Time Migration	Method	T-X FD Migration	
	Approximation Angle	45 degree	
	Extrapolation Step	4 msec	
	Velocity Type	Stacking Velocity (Reprocessing)	
	Velocity Scaling Factor	90 %	
7 Depth Conversion	Method	Vertical Stretch	

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フィルムあるいは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 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。さらに、ベクトル化されたトレースデータに対して、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 比を向上させる F-X 予測フィルターを適用した。

③ 位相補償 (Phase Compensation)

ベクトル化処理でデジタル化した記録を、本再処理結果と位相が整合するように、位相補償を適用した。

ベクトル化処理は、既存図面をデジタル化する処理であるため、既存結果の位相がそのまま反映される。既往処理では、ガン波形に基づく波形変換処理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、再処理結果と位相が整合していない可能性が高い。実際に、ベクトル化処理と併せて再処理を実施した



測線で両結果の位相を比較したところ、位相にずれが見られたため、本再処理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、ベクトル化した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、この波形に基づきゼロ位相化処理を適用した。データの極性については、海底面反射波が正のピークとなるように設定した。

図 33 にウェーブレット抽出までの過程を、図 34 に位相補償適用前後の比較を示す。図 34 内の赤線は、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。ここで、位相の確認のため、図 35 と図 36 にそれぞれ、位相補償適用前後でのベクトル化処理結果と再処理結果との比較を示す。図 35 と図 36 は、ベクトル化処理結果と再処理結果を鏡像の位置関係で表示したものであり、図面中央の縦線が同一 CMP 位置を表す。これらの図から、位相補償適用により、再処理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。

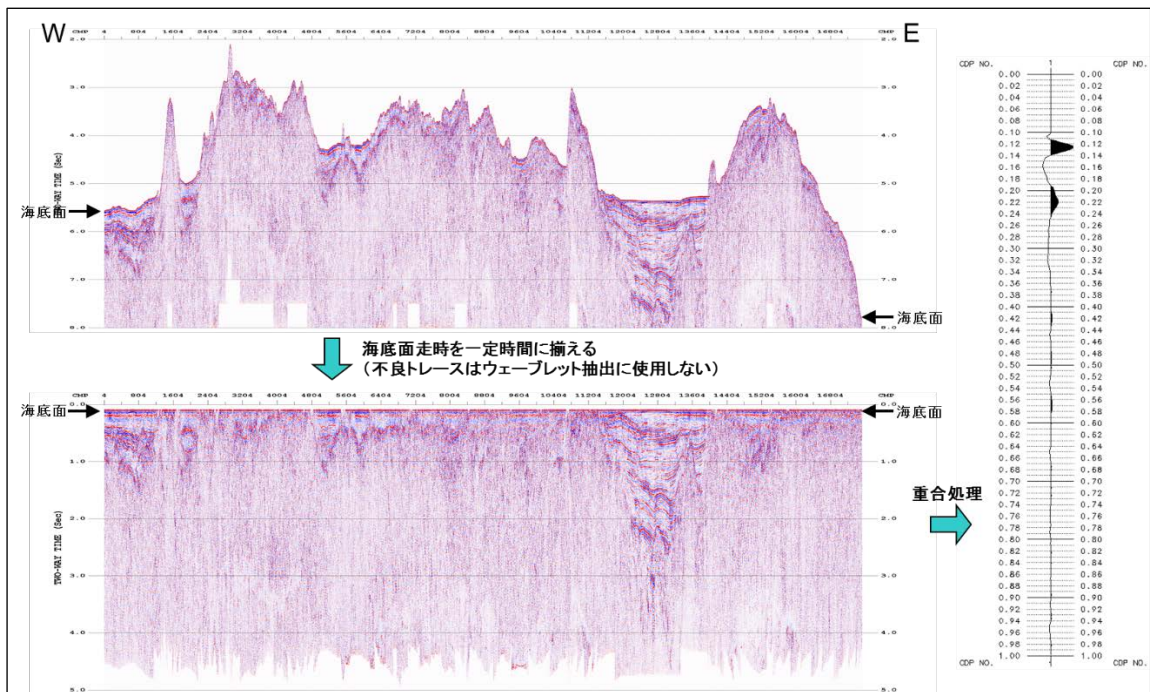


図 33 ベクトル化記録から抽出したウェーブレットの例

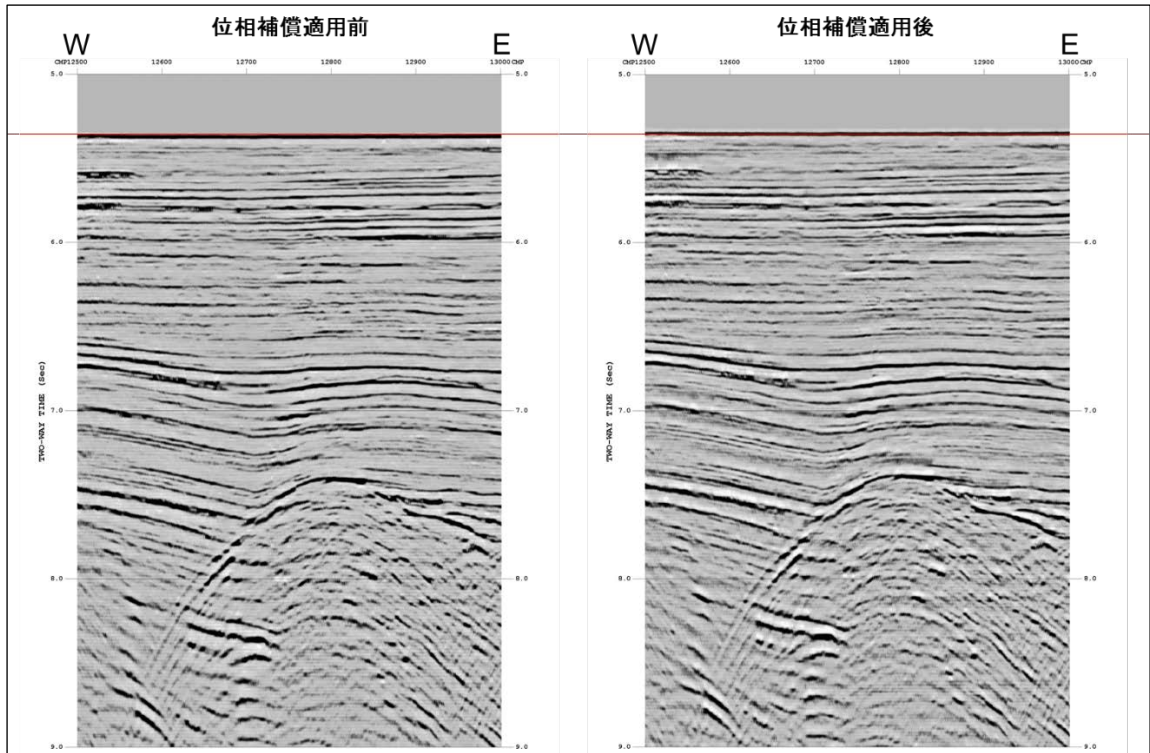


図34 位相補償適用前後の比較

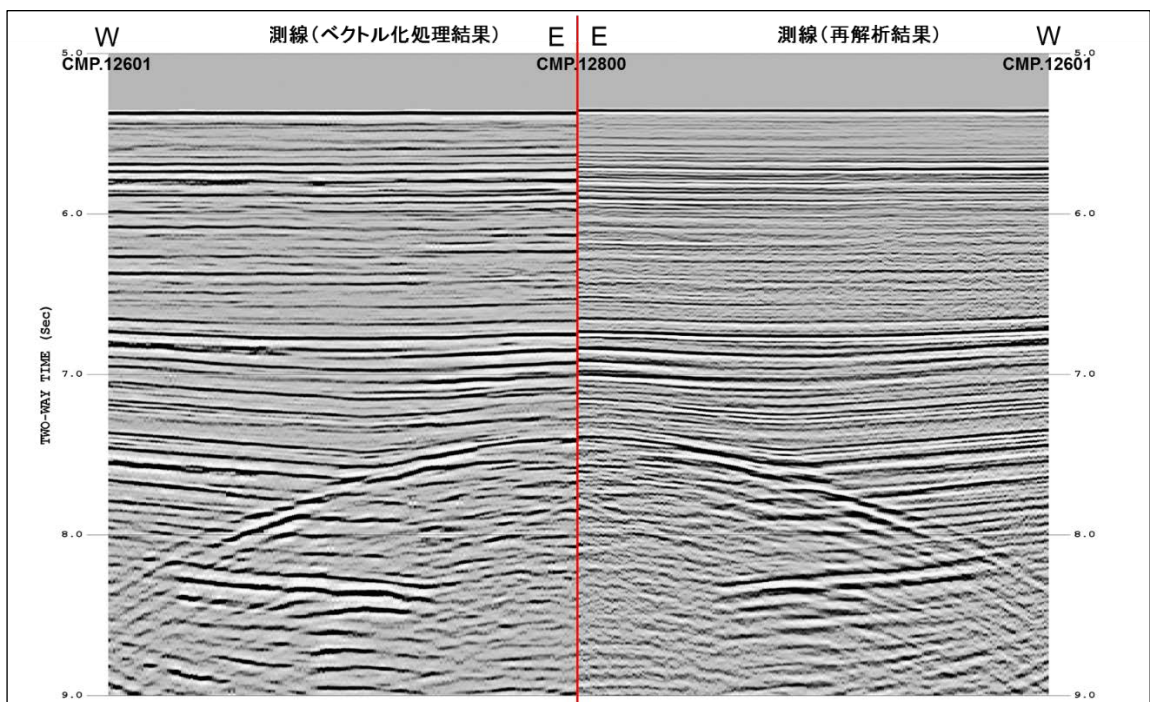


図35 再処理結果との比較 (位相補償適用前)

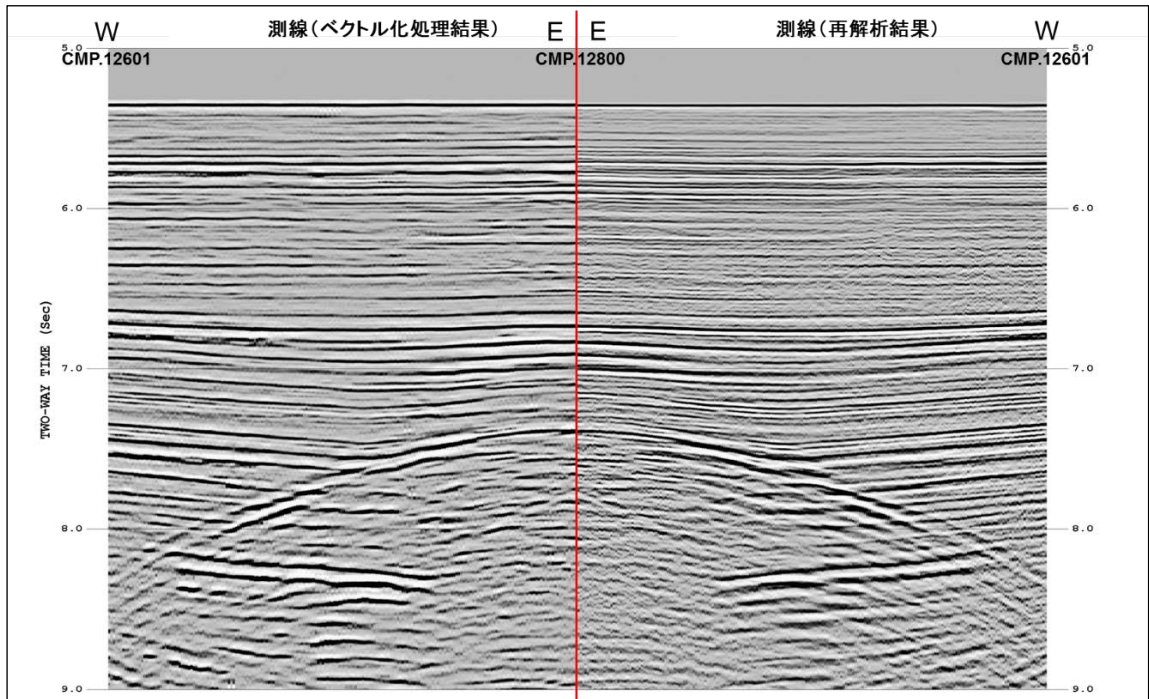


図36 再処理結果との比較（位相補償適用後）

④ 重合後多重反射波抑制処理（Zero Offset Demultiple）

ベクトル化処理は、既存図面をデジタル化する処理であり既存結果がそのまま再現されるため、既存断面図上の多重反射波もそのまま再現される。ここでは、海底面に起因する多重反射波が顕著な測線に対して、重合後多重反射波抑制処理を適用した。

重合後多重反射波抑制処理は、重合断面図における多重反射波の周期性に基づいて、多重反射波を予測し抑制する。ここでは、海底面の読み取り走時を用いて時間シフトを行うことで、多重反射波を予測した。

図 37 に、重合後多重反射波抑制処理の適用結果の例を示す。図中の赤矢印は多重反射波の位置を示しているが、本手法により多重反射波がほぼ抑制されたことが分かる。

⑤ 帯域通過フィルター（Bandpass Filter）

一部の調査において低周波数ノイズが確認されたため、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。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 フォーマットファイルに出力した。

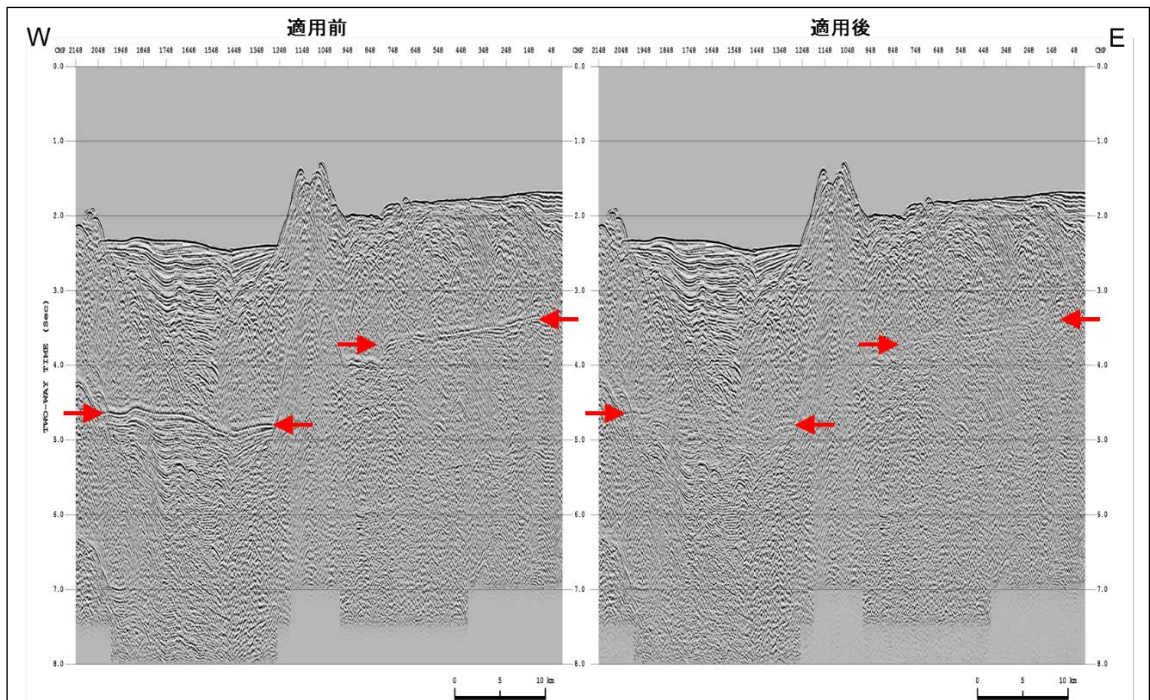


図37 重合後多重反射波抑制処理の適用前後の比較（重合記録）

⑥ 重合後時間マイグレーション（Post-Stack Time Migration）

「i）標準解析」の「㊥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については、各調査の状況に合わせて採用した以下の速度情報を空間方向に平滑化し、スケーリングして用いた。JOGMEC から提供された基礎物理探査データでは、対象測線で再処理を実施しているため、再処理で求めた重合速度を採用した。一方 JAPEX から提供された既存結果では、既存のフィルムの重合断面図に速度テーブルが記載されていたため、この速度情報を採用した。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時間断面図として SEG-Y フォーマットファイルに出力した。

⑦ 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。深度変換速度については、「⑥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 フォーマット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 38 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 39 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 40 に示す。

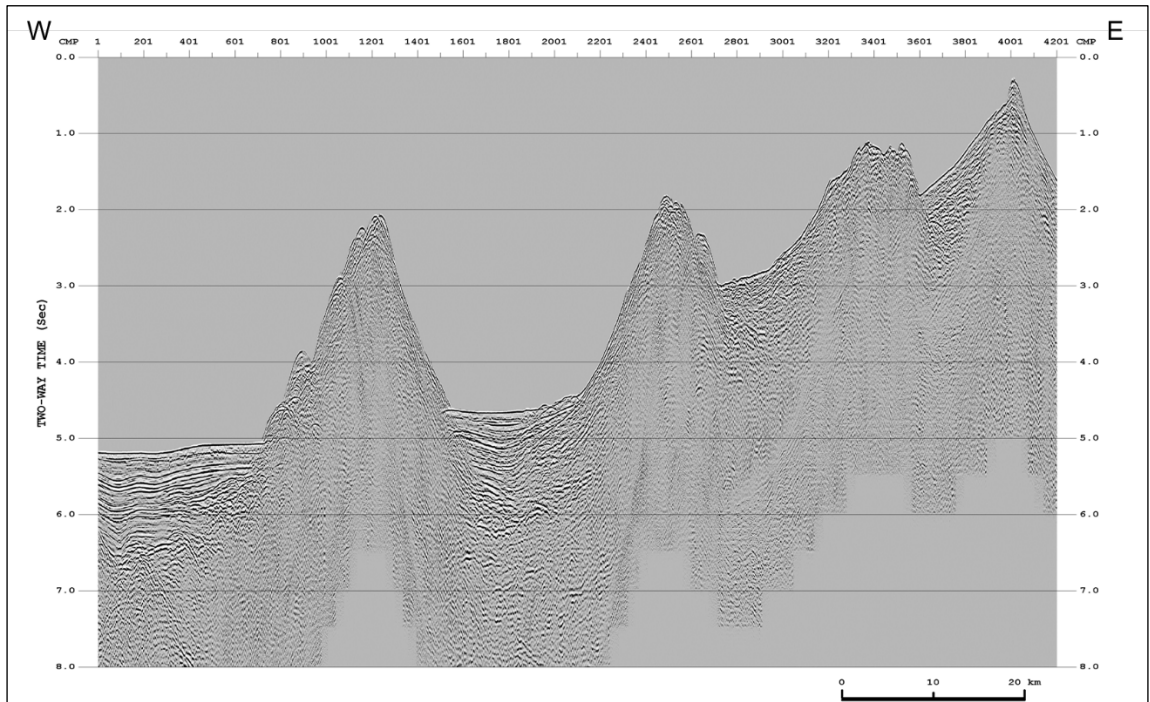


図38 ベクトル化処理の重合時間断面図の例

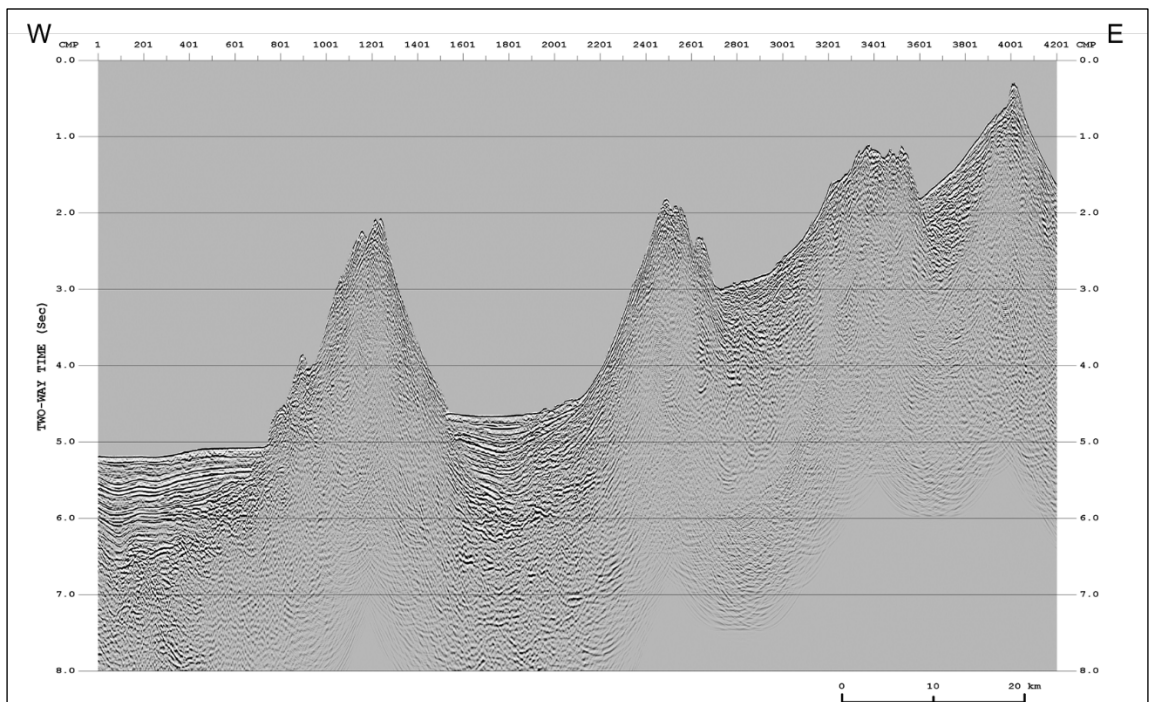


図39 ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション時間断面図の例

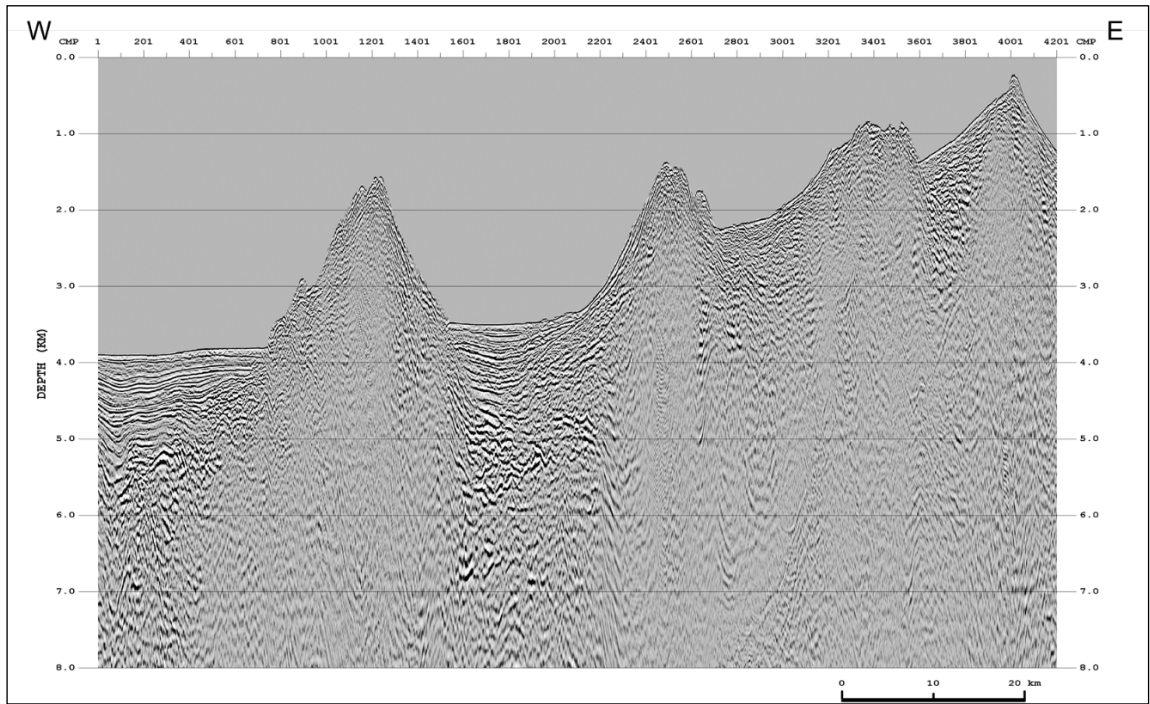


図40 ベクトル化処理の重合後時間マイグレーション深度断面図の例

d) SCSデータの再処理

本作業は、AISTより借用したSCSデータについて再処理を行い、断層や地質構造の解釈に使用する際の利便性を向上させることが目的である。

伊豆・小笠原海域のAISTのSCSデータは、10調査・473測線で総測線長は約62,000 kmにもおよぶ。これらのうち、1調査については既に海底面よりも上部のミュートが行われており再処理の必要は無かったが、残りの9調査の413測線・測線長約54,300 kmについて再処理を実施した。なお、測線長については、測線数ごとの発振点数から換算した。また、今回対象とした調査の発振点間隔は距離ではなく、一定時間である（発振が一定時間間隔ごとに行われている）ため、再処理の際、発振点間隔は25mとした。

今回処理したSCSデータの仕様は、以下のとおりである。

- ・ 受振点数 : 1
- ・ 発振点間隔 : 25 m
- ・ 総発振点数 : 2,480,304
- ・ 総測線長 : 約62,000 km
- ・ サンプル間隔 : 2 msec

今回使用した測線の中には、位置情報が水深情報（後述118ページ記載の水深データリスト参照）と合わない部分があり、そのような測線については、再処理は行ったが解釈には使用しないこととした。

本作業ではLandmark社製SeisSpaceを使用し、フォーマット変換、トレースエディット、帯域通過フィルター、F-X予測フィルター、振幅補償およびミュートを実施した。図41に処理フローを示す。

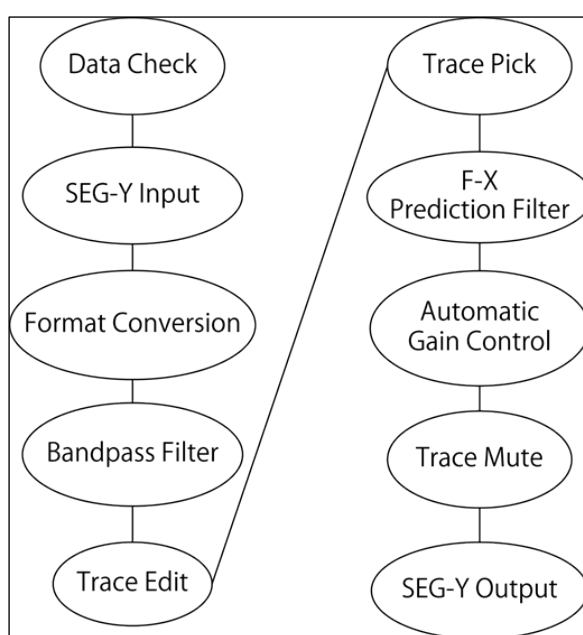


図41 AISTのSCSデータに対する処理フロー

① データチェックおよびフォーマット変換

既存データのチェックを行い、調査ごとにノイズやデータの欠損などを確認した。確認後、SeisSpace で使用できる形式にフォーマット変換を行った。

② トレースエディット

データ欠損のあるチャンネルを除去して、以降の処理に影響が出ないようにした。また、海底面のデータテーブルの作成を行い、この後のミュート処理で使用するミュートテーブルを作成した。

③ 帯域通過フィルター

今回処理した調査の中には全体的に低周波のノイズがのった測線があり、これらについては帯域通過フィルターを用いて、ノイズの除去を行った。ここでは、5 Hz 以下の低周波部分についてフィルターをかけて除去したが、一部の調査測線については除去し切れなかったため、より高周波成分の 8 ~ 10 Hz 以下についてもフィルターを適用した。なお、事前に周波数解析を行い、本処理が反射波に影響の無いことを確認している。

④ F-X予測フィルター

本処理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、ランダムノイズの抑制のために適用した。

⑤ 振幅補償

減衰した振幅を補償し、データの振幅の一様性を回復するため、ゲート長 800 msec の自動振幅補正 (AGC) を適用した。

⑥ ミュート

解釈に使用する際に、海底面より上位にノイズがあると見づらく解釈効率に影響するため、海底面より上位部分をミュートした。本処理により、断層解釈、海底面や地質ホライズンなどの追跡が容易となる。

以上の解析手順に従って作成した時間断面図の例を図 42~図 45 に示す。

伊豆・小笠原海域において網羅的に存在する AIST の SCS データは、JOGMEC や JAMSTEC などの MCS データと比べて、断面深部の反射波は不明瞭となるものの測線数が大変多くかつ測線密度も高いため、断層の空間的分布の解析 (断層追跡) には不可欠である。また、断面の浅部においては明瞭な反射波が認められるため、海底面付近の地層のずれの確認に有用である。上記のフロー (図 41) に従って処理した結果、堆積層内の変形や層序を解釈しやすい断面を得ることができた。



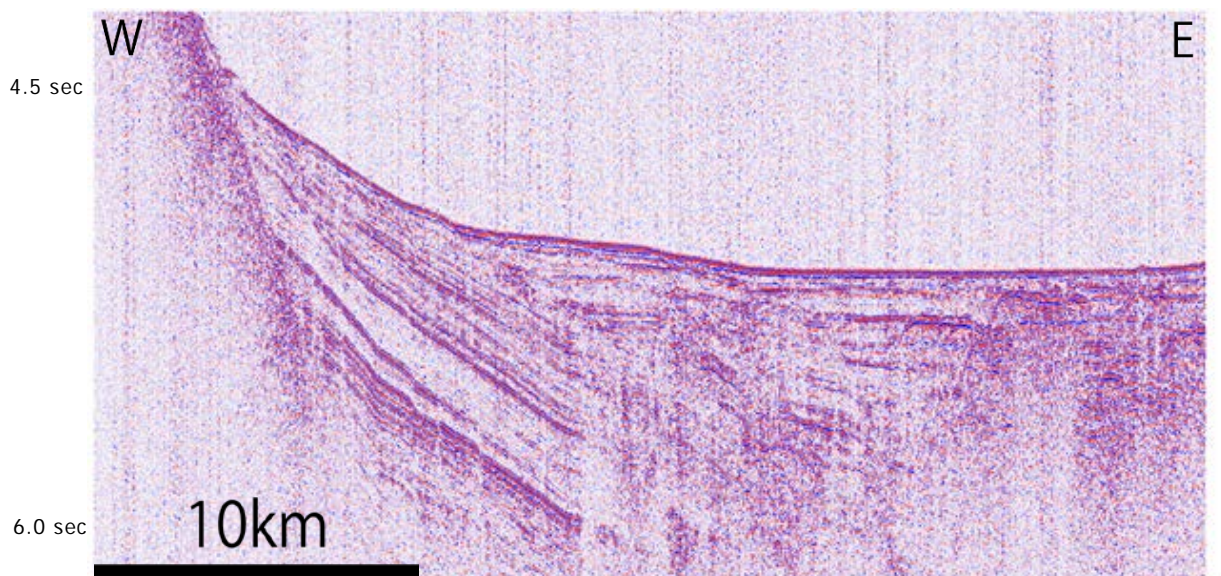


図 42 AIST の SCS 時間断面図の例 (処理前)

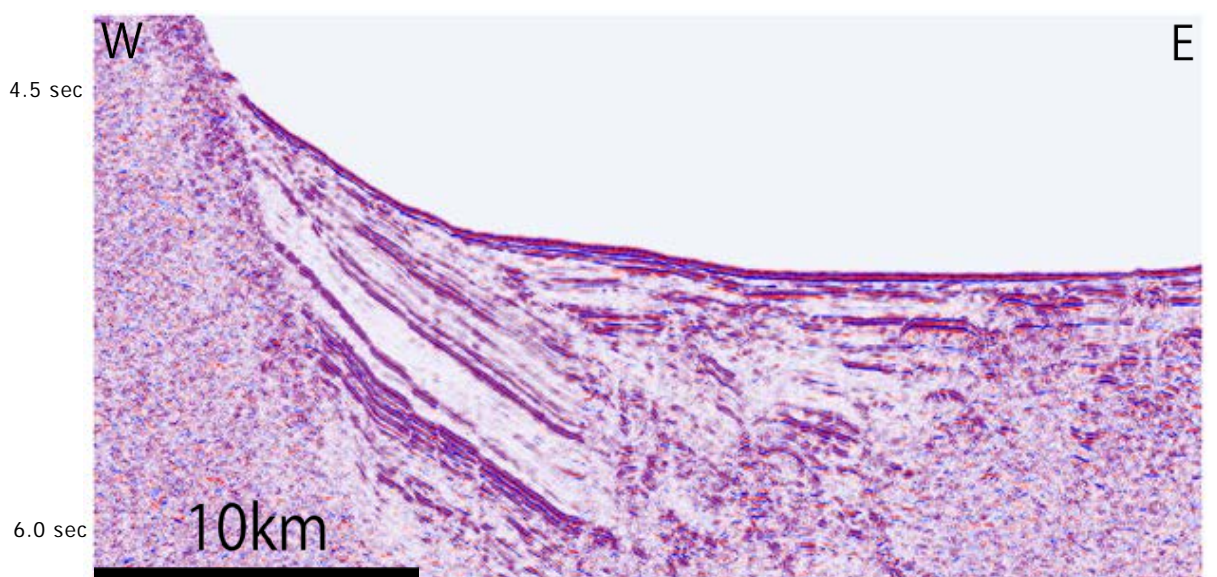


図 43 AIST の SCS 時間断面図の例 (処理後)

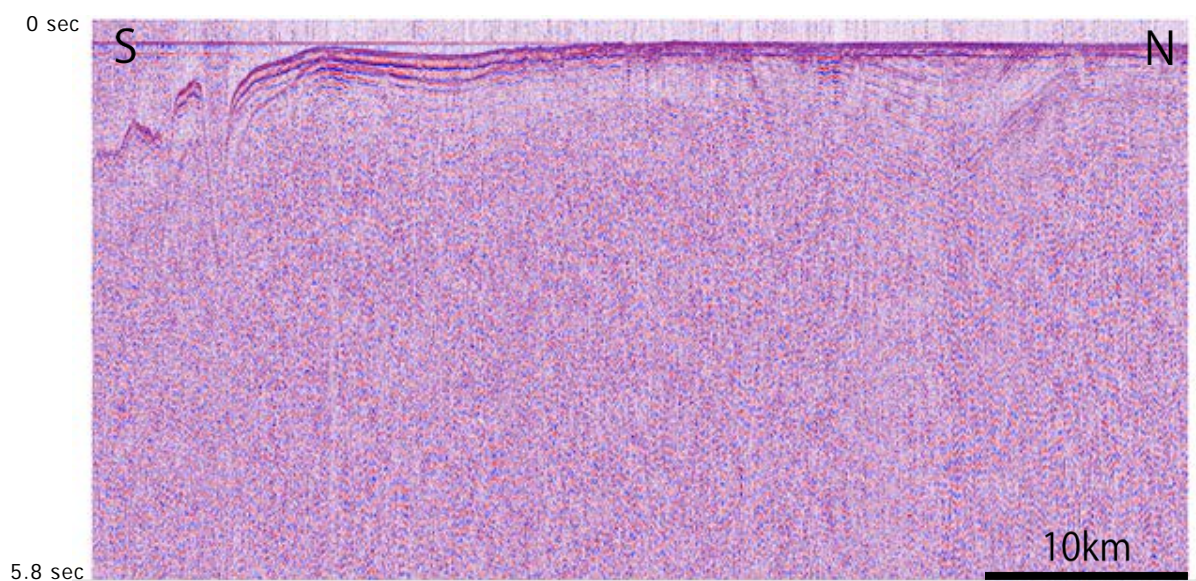


図 44 AIST の SCS 時間断面図の例 (処理前)

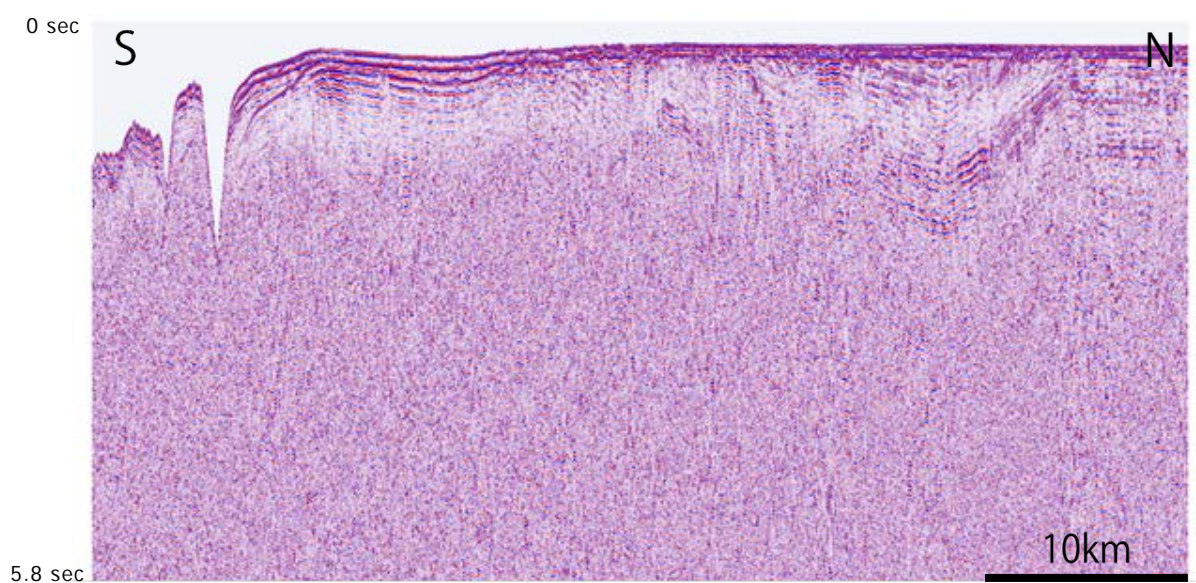


図 45 AIST の SCS 時間断面図の例 (処理後)

## 2) 三次元速度構造モデルの作成

様々な機関で取得された反射法データについて、統一された速度構造モデルを利用して、一様に時間ドメインから深度ドメインへと変換を行うことが必要である。速度構造モデルを作成することで、過去に取得され現在時間断面しか存在しない MCS データや SCS データについても、それぞれ深度ドメインへの変換（深度断面の作成）が可能となる。また、速度構造モデルにより断層情報（形状や深さ方向への広がり等）を時間ドメインから深度ドメインに変換することで、断層の詳細な評価や断層モデルについて議論することができる。

平成 29 年度は、伊豆・小笠原海域全域（図 46）を対象とし、まず、海底面、音響基盤面、コンラッド面およびモホ面の反射波ホライズン、ならびにフィリピン海プレートと太平洋プレートの構造について解釈を行った。その後、これらのホライズン解釈結果に基づき三次元の層構造を作成し、各層構造に速度関数を与え、水平方向 1 km グリッド・鉛直方向 100 m 間隔の解像度で、三次元速度構造モデルを作成した。なお、速度データとしては、反射法データの処理過程で使われる重合速度、OBS 探査で得られた速度情報、および論文などで公表されている速度情報を使用した。最後に、構築した三次元速度構造モデルを用いて、反射法データおよび断層情報の深度変換を行った。

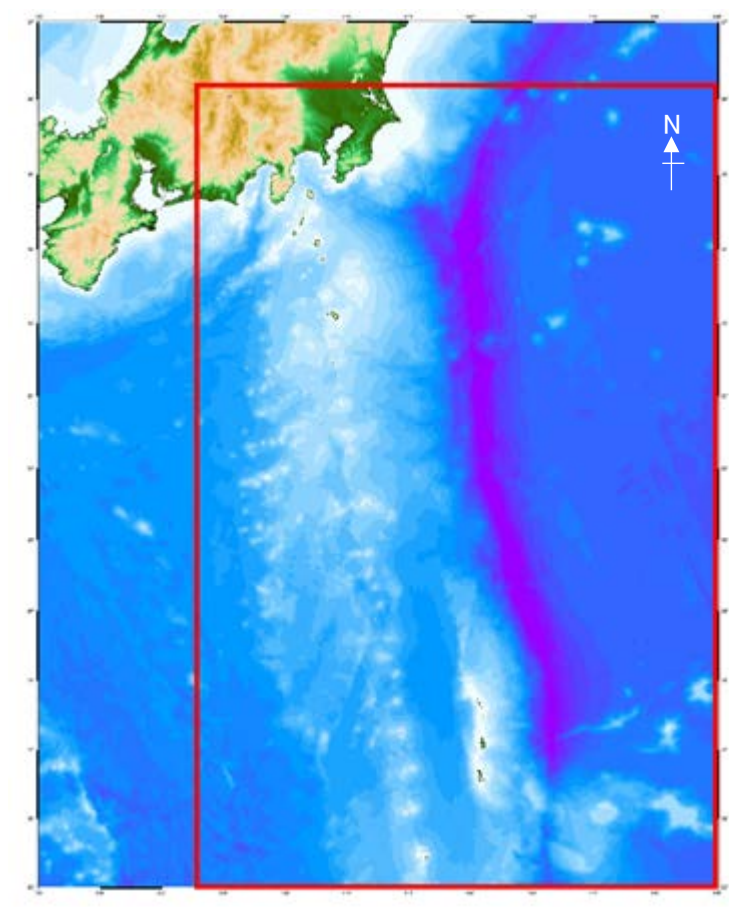


図 46 三次元速度構造モデル作成領域（赤枠）

a) 反射波ホライズン解釈及び地質構造・プレート構造解釈（層構造の作成）

JAMSTEC、JOGMEC、AIST、JCG などの様々な機関から提供された反射法データを使用し、まず、海底面および音響基盤面の解釈を行った（図 47）。海底面については全ての測線で追跡し、音響基盤面については深部まで反射波が明瞭に見える MCS 測線で解釈を行った。

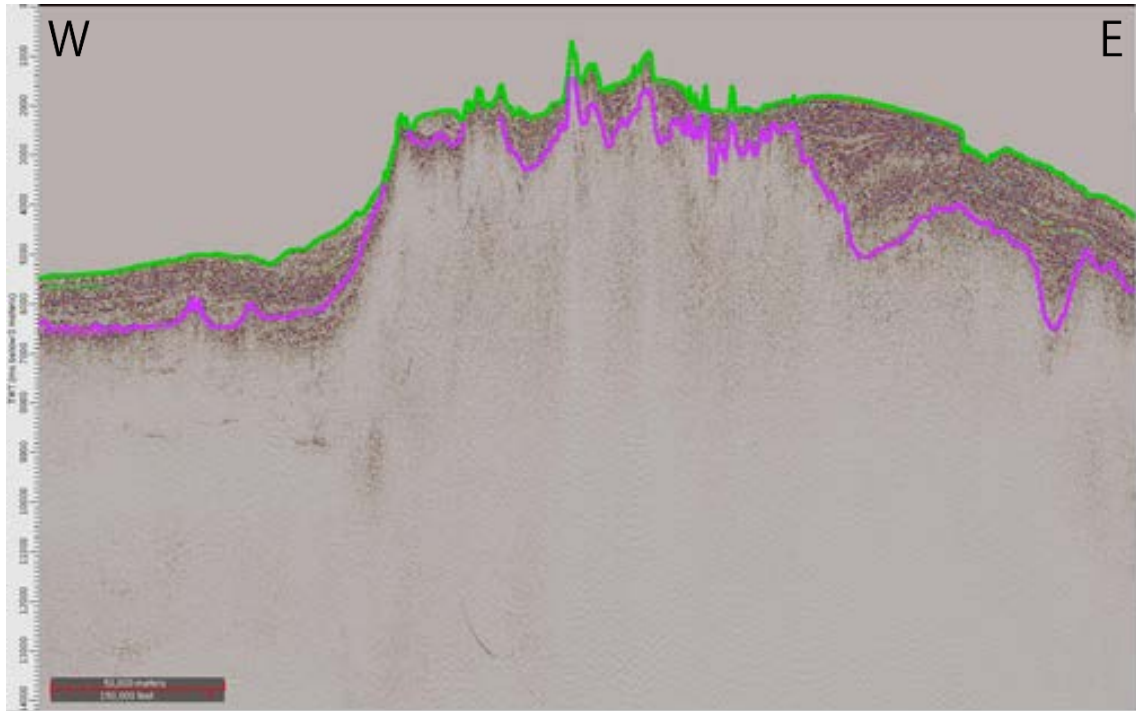


図 47 反射記録断面上でのホライズン解釈の例  
（緑線が海底面、紫線が音響基盤面を示す）

音響基盤面以深のコンラッド面およびモホ面の構造については、既存の論文（Hirata et al., 1991、Iwasaki et al., 1990、金田, 2014、金田・他, 2015、木崎編, 1985、Kodaira et al., 1996、Kodaira et al., 2002、Kodaira et al., 2007、Kodaira et al., 2008、Kodaira et al., 2010、松本・他, 2007、Nagumo et al., 1986、Nakahigashi et al., 2012、Nishizawa et al., 2011、野田・他, 2007、及川・他, 2008、Sato et al., 2013、田賀・他, 2008、Takahashi et al., 2009、Takahashi et al., 2011、高橋・他, 2015、田中・他, 2007、Terakawa and Matsu'ura, 2010、徳山・他, 2001）や地殻構造探査として実施された OBS 調査測線の速度データ（図 48）を基に作成した。ここで、コンラッド面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定義し、その深度構造については OBS 調査の速度情報や論文を基に決定し、情報のないエリアのコンラッド面については上位の音響基盤面に平行となるように作成した。モホ面は下部地殻とマントルとの境界であり、その深度構造についてはコンラッド面と同様に、OBS 調査の速度構造や論文などの情報を参考に作成した。

これらの各ホライズンの構造解釈結果から、1 km グリッドの層構造を作成した(図 49～図 54)。

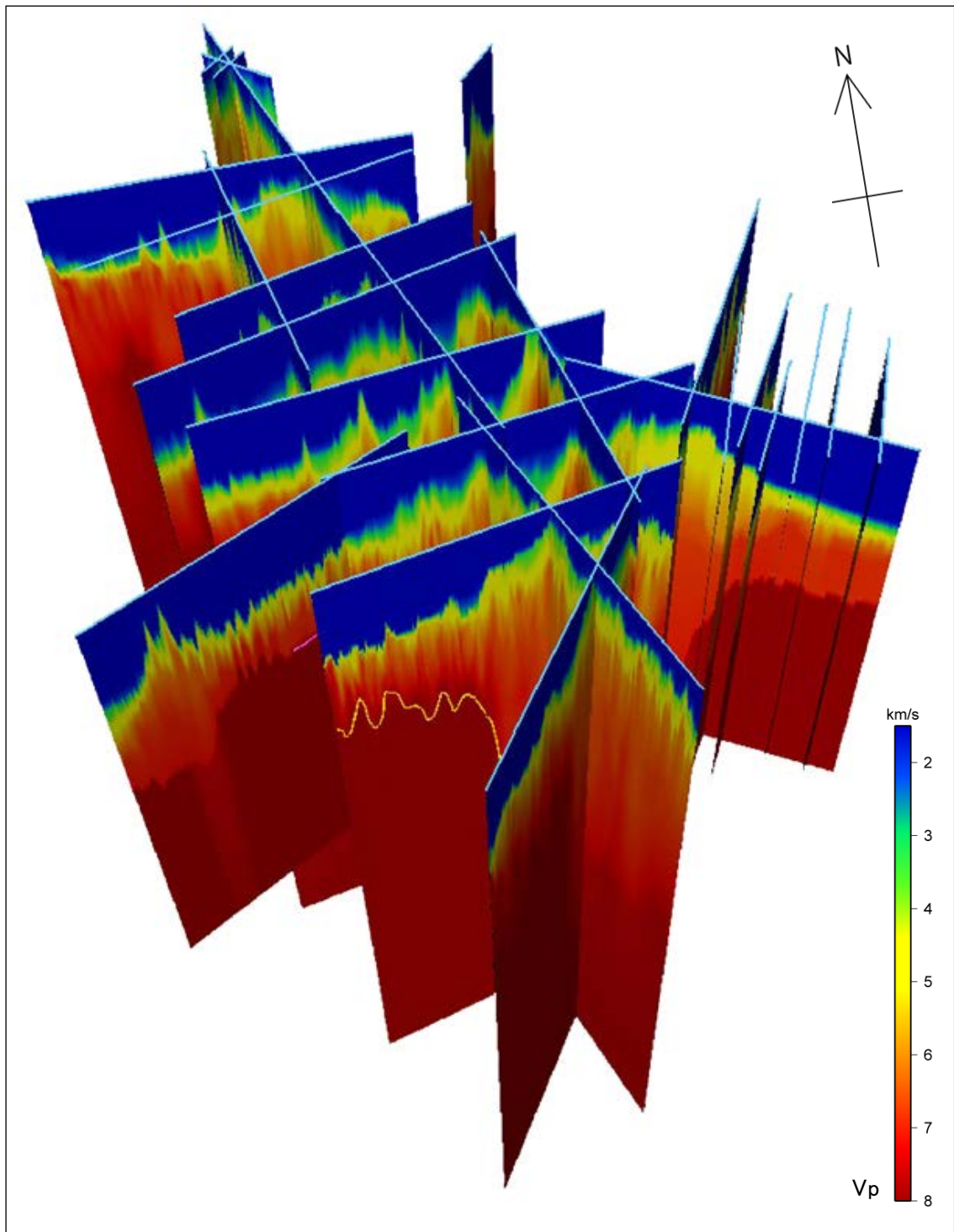


図 48 OBS 調査で得られた P 波速度 ( $V_p$ ) 情報の例

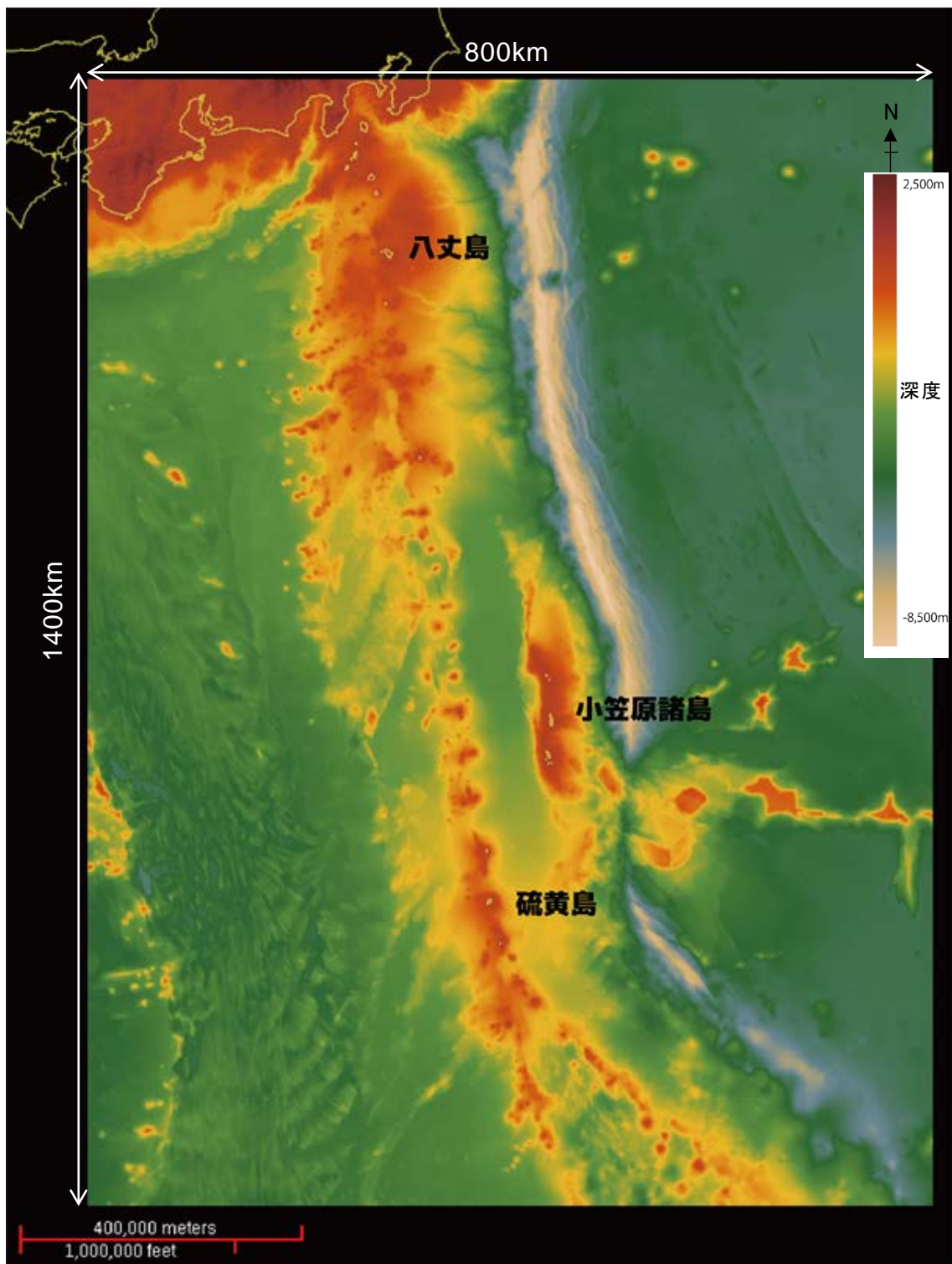


図 49 海底面のホライズン解釈結果から作成した層構造平面図

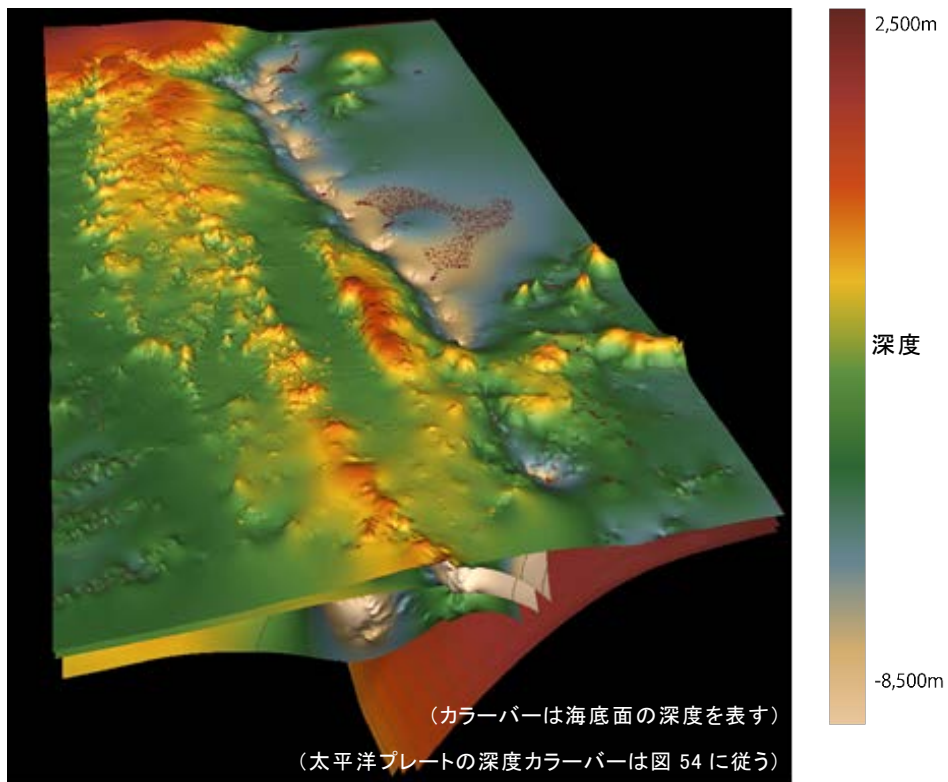


図 50 三次元層構造（最上位は海底面の構造、奥方向が北）

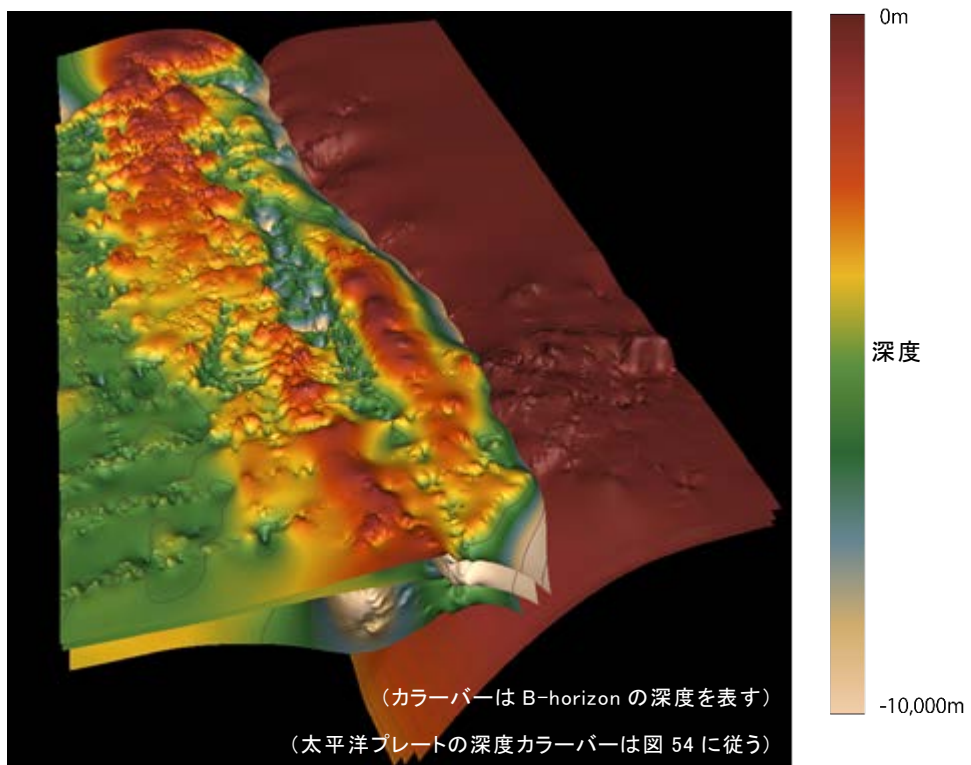


図 51 三次元層構造（最上位は音響基盤面の構造、奥方向が北）

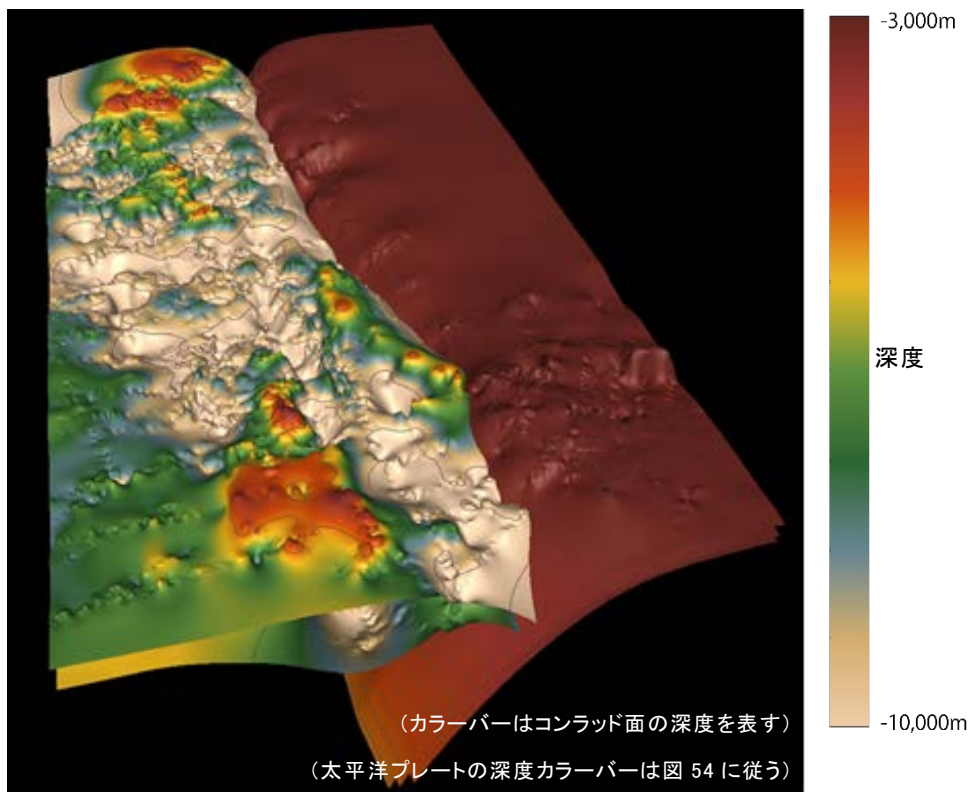


図 52 三次元層構造（最上位はコンラッド面の構造、奥方向が北）

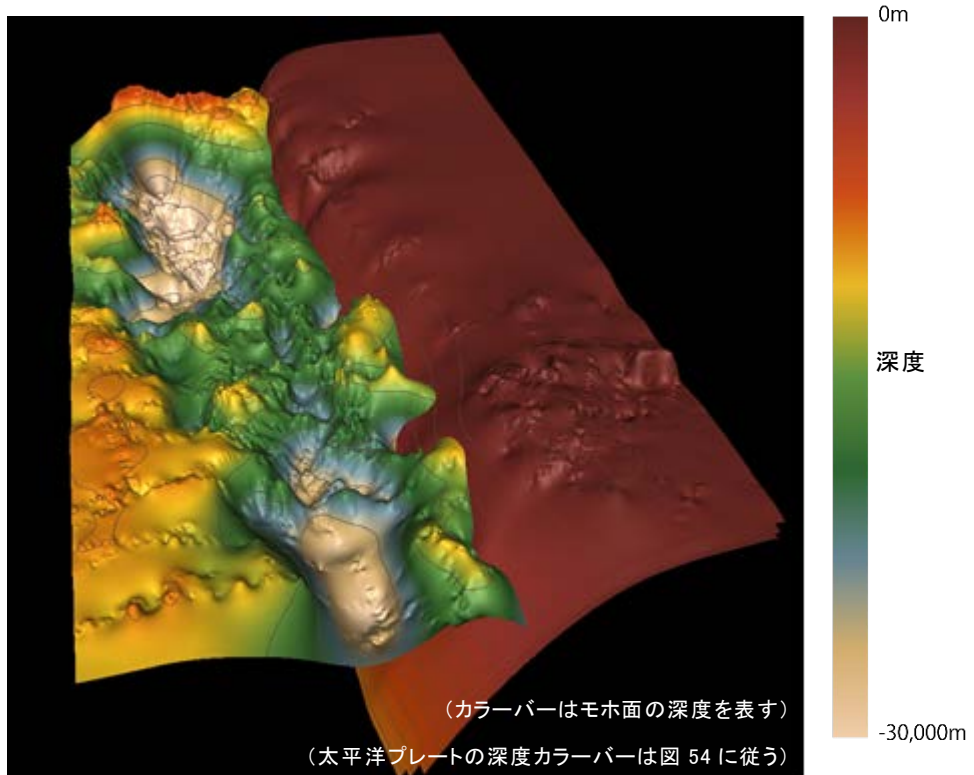


図 53 三次元層構造（最上位はモホ面の構造、奥方向が北）



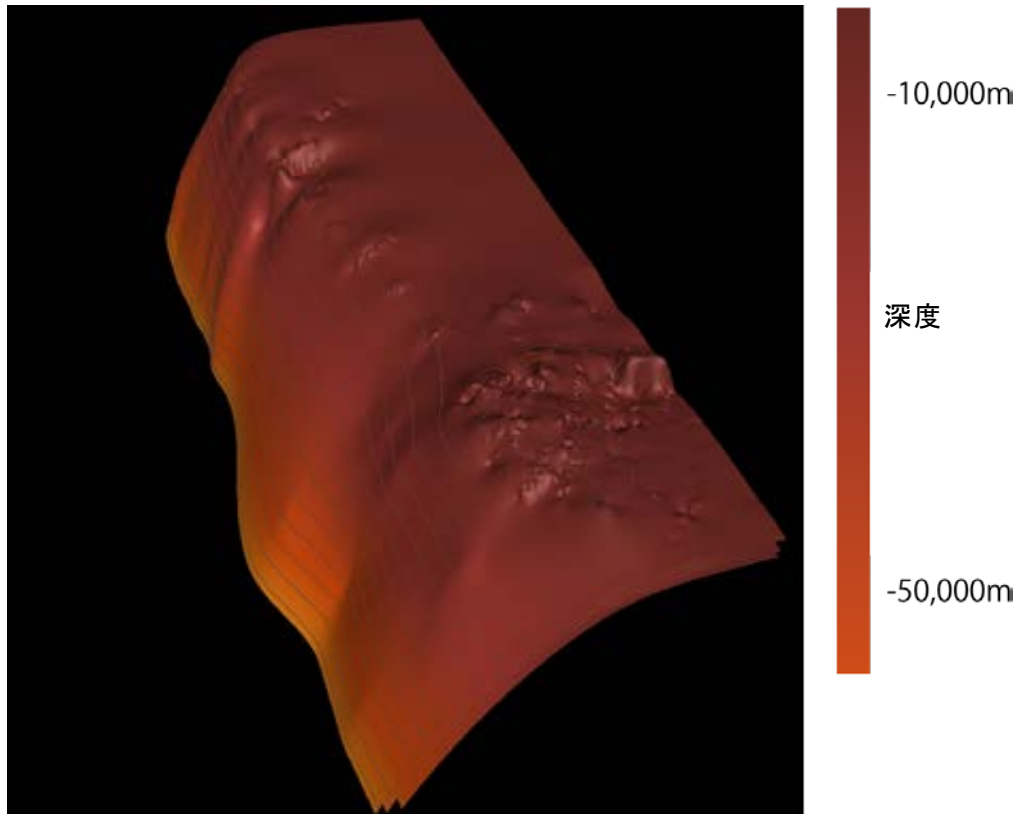


図 54 沈み込む太平洋プレートの構造（奥方向が北）

b) 速度構造モデルの作成

作成した各ホライズンの層構造に基づき、伊豆・小笠原海域におけるフィリピン海プレート側と太平洋プレート側とで、2種類の速度構造を作成した（図 55）。ここでは、フィリピン海プレートとユーラシアプレートはそれぞれの堆積層と上部地殻を互いに共有しているという仮定のもと、ユーラシアプレート側の上部地殻については設定していない。したがって、速度の層構造は図 55 に示すように、フィリピン海プレート側で下位より、マントル・下部地殻（コンラッド面[C-horizon-1]ーモホ面[Moho-2]間）・上部地殻（音響基盤面[B-horizon]ーコンラッド面[C-horizon-2]間）・堆積層（海底面ー音響基盤面[B-horizon]間）・海水、太平洋プレート側で下位より、マントル・下部地殻（コンラッド面「C-horizon-1ーモホ面[Moho-1]間）・上部地殻（上部地殻上限ーコンラッド面[C-horizon-1]間）・堆積層（海底面ー上部地殻上限間）・海水となっており、太平洋プレート側の上部地殻・下部地殻・マントルがフィリピン海プレートの下に沈み込む構造を呈している。なお、作成した速度モデルの境界は、地震波速度の差異に注目して設定したため、必ずしも地質的な境界とは一致しない場合もある。

ここでは、各層の速度について OBS 速度情報や既存論文(Hirata et al., 1991 等)などを参考に、Sea Water を 1,500 m/sec 一定値、上部地殻下面を 6,200m/sec、下部地殻上面を 6,580 m/sec と仮定した。また、マントルの地震波速度については 8,000 m/sec 一定値と仮定した。

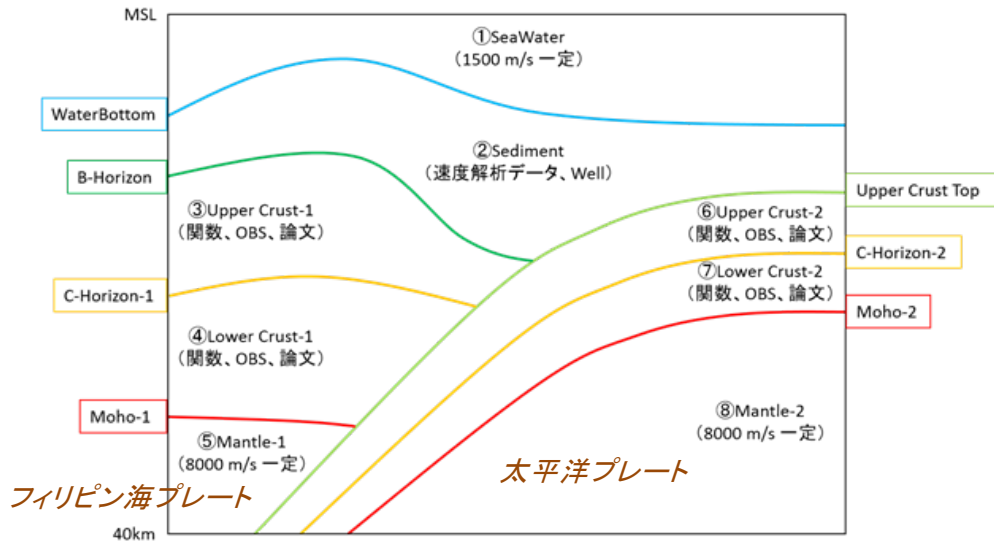


図 55 地震波速度の層構造概念図

引き続き、以下の要領にて三次元速度構造モデルの作成を行った。コンラッド面やモホ面の情報の多くが深度ドメインのデータであるのに対し、今回解釈を行った海底面と音響基盤面は時間ドメインのデータであったため、この2つのホライズンを深度変換するために、ここでは2段階に分けて速度構造モデルを作成した。まず、海水 (Sea Water) と堆積層 (Sediment) のみの速度モデルを作成し、このモデルを使用して時間ドメインであった海底面および音響基盤面を深度ドメインに変換した。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した。このようにして作成した速度構造モデルを、最終三次元速度構造モデル (図 56) とし、反射法データおよび断層情報の深度変換に供した。

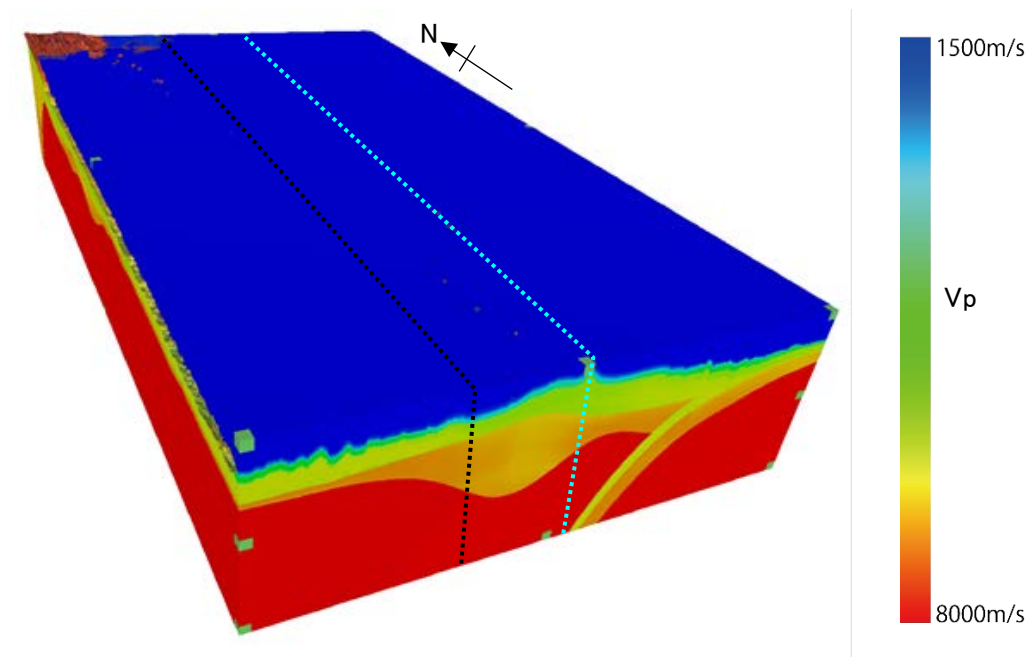


図 56 作成した三次元速度構造モデル

また、図 57 と図 58 にはそれぞれ、最終三次元速度構造モデル（図 56）を中央やや西側で切った断面、中央やや東側で切った断面を示し、西から東にかけて速度構造が変化している様子がモデル化されている。

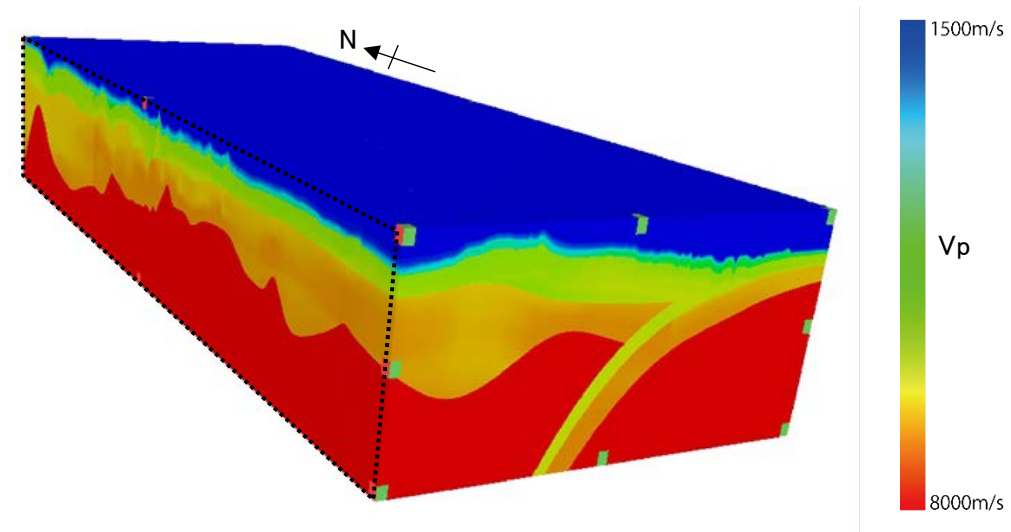


図 57 三次元速度構造モデル（中央やや西側部分：図 56 黒点線の断面表示）

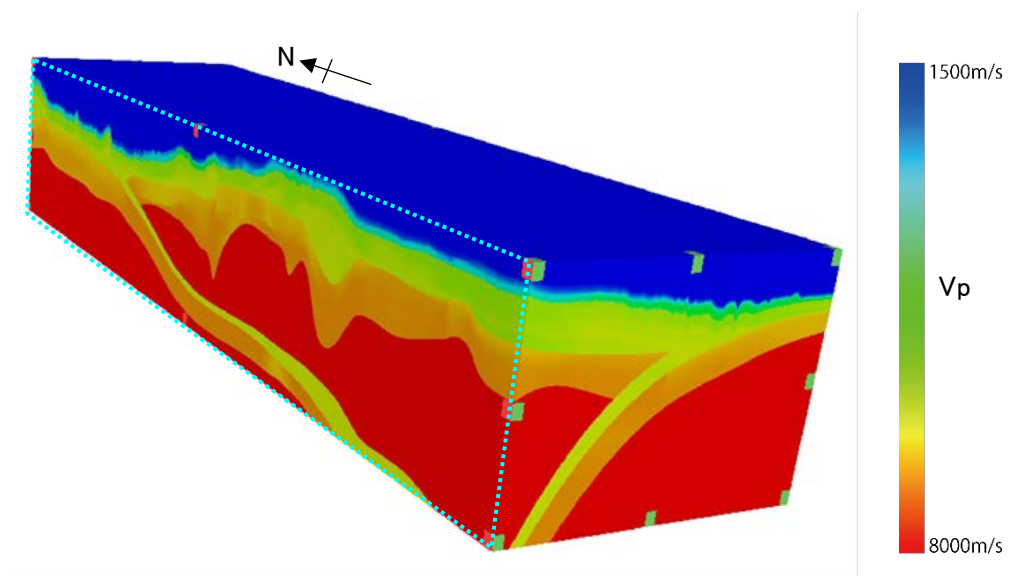


図 58 三次元速度構造モデル（中央やや東側部分：図 56 水色点線の断面表示）

### 3) 統一的断層解釈

#### a) 解釈対象海域の概要

平成 29 年度の断層解釈の対象は、伊豆・小笠原諸島周辺海域である。伊豆諸島は伊豆大島、八丈島、青ヶ島等の有人島、および鳥島や孀婦岩等の無人島を含む島嶼からなる。小笠原諸島は父島や母島を含む小笠原群島と、最南に有人島の硫黄島を含む火山列島から構成される（図 59）。当該海域はフィリピン海プレート、北米プレートおよび太平洋プレートの 3 つのプレートが存在する領域で、その北部で相模トラフと三重会合点を経て、さらに南へ伸びる伊豆・小笠原海溝がプレート境界として知られている。

当該海域においては、JAMSTEC はじめ、経済産業省/JOGMEC、JCG、AIST 等の各種公的機関および民間企業が長年調査・探査してきており、ここでは、各機関により取得・保有されている数多くの地質データや反射法データを借用・収集し、それらを断層解釈作業に供した。なお、断層の解釈・特定は、主として相模湾、房総沖、伊豆・小笠原弧島弧域および伊豆・小笠原海溝域の 4 海域別に行った。

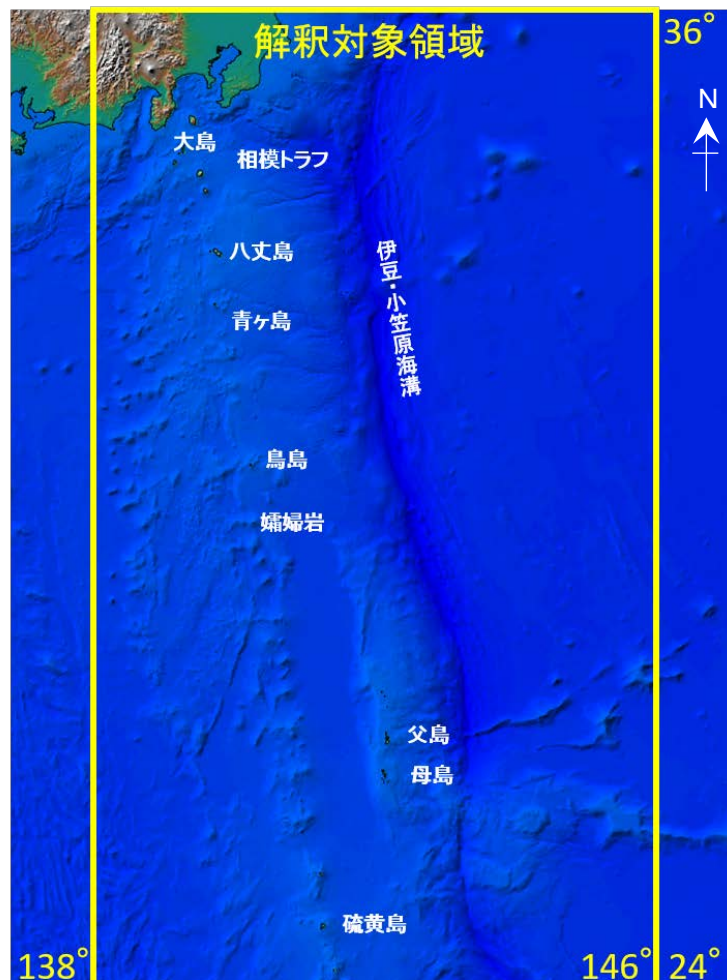


図 59 伊豆・小笠原海域解釈対象領域

b) 地形概要

伊豆・小笠原弧の地形について、図 60 の赤色立体地形図を参照し、以下にその概要を述べる。

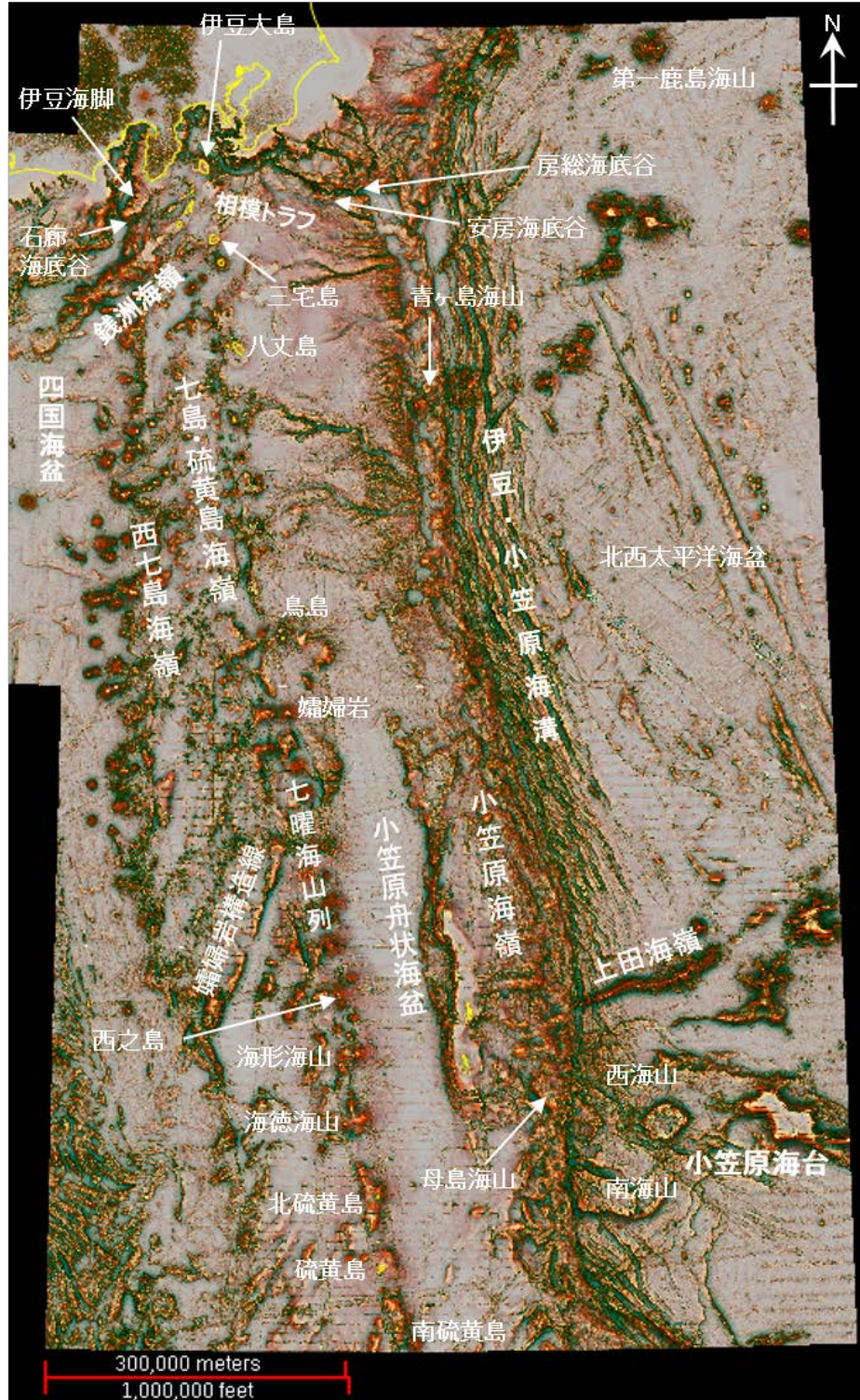


図60 伊豆・小笠原弧の地形

伊豆・小笠原弧はフィリピン海の東縁に位置し、北は本州中部の高まりに、南はマリアナ弧へ続く（図 60）。島弧の規模は、南北延長約 1,100 km、幅 300~400 km に達し、その大きさは本州に匹敵する。島弧の東側には水深 9,000 m を超える伊豆・小笠原海溝が並走し、北西太平洋海盆と四国海盆を分けている。伊豆・小笠原弧には、東から小笠原海嶺、七島・硫黄島海嶺および西七島海嶺の三列の海嶺列と、その間を隔てるトラフと海盆（リフト）が帯状に配列する。小笠原海嶺は、島弧の南半分に位置する前弧の非火山性海嶺であり、西側に直線的な急崖を有する。現在の火山フロントである七島・硫黄島海嶺は、活動的な火山列からなり、伊豆大島、三宅島、八丈島をはじめとする伊豆諸島から鳥島、西之島、海形海山、海德海山を経て、北硫黄島、硫黄島、南硫黄島へと連なる。さらに西側に位置する西七島海嶺は、密に存在する火山が全体で海嶺を形成しており、その北部で雁行状に配列する火山が特徴的である。大局的な地形的特徴に注目すると、伊豆・小笠原弧は火山フロントを境に、東側は前弧、西側は背弧に大別され、前弧は背弧に比べると地形がなだらかで、火山が存在しない。一方、背弧は断続する西七島海嶺に象徴されるような複雑な地形を示し、多くの火山を有する。

#### c) 地質概要

伊豆・小笠原弧の地質について、「日本の地形 4 関東・伊豆小笠原」（貝塚・他編, 2007）を参照し、以下にその概要を述べる。

伊豆・小笠原弧の陸上にみられる最も古い岩石は古第三紀層であり、島弧としては新しく、その形態は島弧地形の一典型を示す。伊豆・小笠原海溝は、北端を第一鹿島海山、南端を小笠原海台によって区切られる。同海溝の陸側斜面は前弧の一部であり、そこに青ヶ島海山や母島海山など特異な海山や海丘が存在する。これらの海山については、実際に超塩基性岩の蛇紋岩が採取されていることもあり、海洋プレートの沈み込みによりかんらん岩が水と反応して蛇紋岩化し、上昇して形成されたと考えられている。伊豆・小笠原前弧の南部には小笠原海嶺があり、その頂上には古第三紀の火山活動によって形成された島弧火山である小笠原群島が存在する。火山フロントに位置する第四紀の火山島と海山は七島・硫黄島海嶺をなし、北端の伊豆大島から南端の南硫黄島までほぼ一列に並んでいる。火山フロント西側（七島・硫黄島海嶺と西七島海嶺の間）には、小規模の海盆や海丘群が多数存在する。このゾーンは幅約 100 km で南北に延び、断続する凹地は背弧海盆形成の初期段階、すなわち島弧のリフティングにより形成されたと考えられている。このリフト帯に位置するスミスリフトは、南北に伸長する水深 2,000~2,300 m の海盆で、南北に延びる正断層群によって東西を限られている。また、海盆内にも南北に延びる正断層が多数認められる（岡村・他, 1991）。なお、海盆内で実施された深海掘削（ODP Leg 126, 1989）により、軽石層を主体とする厚さ数百 m の堆積層が確認されており、このことから同海盆周辺域では 50~100 万年前に活発な火山活動があったと考えられている。西七島海嶺は、伊豆半島から南へ北緯 27 度付近まで、長さ約 750km にわたって発達する主に海山からなり、特徴として北東-南西方向あるいは東北東-西南西方向の海山列が雁行する。西七島海嶺北端には、北東-南西方向に海山列が伸長する最大規模の銭州海嶺が

あり、銭州海嶺の北には石廊海底谷を隔てて、北東－南西方向～北北東－南南西方向に伊豆半島・伊豆海脚の高まりが並ぶ。これらの海山の多くは第三紀火山とされており、このように雁行配列する火山列は島弧の端によく見られ、プレートの斜めの沈み込みによる前弧と背弧の運動の違いによって生じたシワと考えられている。西七島海嶺南部では、北北東－南南西方向に伸びるトラフや海底谷が顕著で、これらは孀婦岩構造線と並行している。背弧域の火山群は、1,700 万年前から 300 万年前に東西圧縮の地殻応力場の下で雁行海山列が形成された後、伸張場に転じてリフト活動とともに活発となったと考えられている。西七島海嶺の西縁には南北に伸びる急崖、さらにその西側には四国海盆エプロン斜面が存在し、同斜面は起伏の激しい四国海盆とは対照的に堆積物に覆われた平坦な地形を示す。

相模トラフは、伊豆・小笠原弧を含むフィリピン海プレートが東北日本側のプレートの下に沈み込むプレート境界である。ただし、相模トラフの西縁では、伊豆半島が東北日本弧に接していることから、プレート境界部では沈み込みではなく、衝突が起きていると考えられている。また、相模トラフの中軸は、伊豆半島の付け根の衝突域を経て、相模湾の北西－南東方向に延びる深部トラフ底から房総半島南方の沖合を東南東に流下する房総海底谷と、さらにその南を流下する安房海底谷へと連続すると考えられている。

フィリピン海プレートは、現在の観測より、東北日本側のプレートに対し相対的に西北西方向に進んでおり、北西－南東方向のトラフ軸と斜交して移動していることが分かっている。このことから、相模湾中央部においてもプレートが沈み込んでいるのではなく、かつて沈み込んだプレートが現在抜け出している可能性が考えられている（中村・島崎，1981）。

#### d) 解釈方法

##### i) 断層の特定

本プロジェクトでは、断層特定の第一の基準を海底面下の地質構造における変位（堆積層のずれや撓曲など）の有無とし、第二の基準を海底地形における変位の有無とした。ただし、反射法データの測線密度が粗く、隣り合う測線でも連続した地質構造であるかどうか判断するのが困難な場合や、断層が無数に存在するような特徴がある場合は、空間的な発達や分布域を特定することができない。そのような場合は、海底地形図を用いてリニアメントをマッピングする方法で特定できた断層の空間的連続性を判断した。

特定した断層に対し、断層面として空間的に連続するか否かを判断するために、以下の基準を設定した。

- 断層が反射記録断面上で明確に確認できる。
- 地質構造から、同じ断層と認識できる。
- 断層による海底地形の変位が 1 測線でのみ確認、且つ 20km 以内に測線が無い場合、海底地形図の地形特徴（リニアメント等）を参考にして延長し、断

層と認定する。

- 海底面まで変位は達するが、海底地形に変位が無い断層は2本以上の測線が必要である。
- 断層面と判断できる場合、断層両端の延長は海底地形図の地形特徴（リニアメント等）を参考に延長する。
- 小規模な構造特徴を追跡するのではなく、既存の地質図や海底地形で認識できる大構造の断層を特定する。
- 反射記録断面で海底面直下の構造が不明瞭であっても、断層によるものと判断できる明瞭な地形特徴がある場合は、断層と特定する。
- 測線が無い海域では断層を特定しない。

以上の条件に当てはまる断層面を特定し、平成29年度の成果とした。

## ii) 断層のランク付け

本プロジェクトでは特定した断層モデルを作成する観点で、その断層が活断層であるか否か、が重要な判断基準となる。断層による変位が海底地形に現れている場合は、断層が現在も活動していて今後も活動する可能性があるとは判断できる。一方、海底地形の変位が少なく平坦になっている場合は、海底地形の変位が削剝されるほど長期間活動がなかったことを示しているか、横ずれ断層の可能性もある。また、海底地形に変位が無くとも、断層が海底面付近まで延びている場合は、活動を繰り返す可能性があるとは判断した。

伊豆・小笠原諸島海域で特定した断層は縦ずれの成分が大きく、変位が海底地形に現れている。したがって、同海域の断層についてはさらに「断層面の確実度」、「複数の解釈断層による空間的連続性を認定したものなのか」、「ひとつの解釈断層から地形特徴を参考に延長したものなのか」を活断層の判断基準として加え、表9に示すようなランク付けを行った。

表9 断層の確実度のランク付け

	複数測線	単数測線
海底地形変位あり	I	I”
海底地形変位なし	II	

ランク I : 複数の反射記録断面で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 I” : 1つの反射記録断面で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 : 複数の反射記録断面で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。

また、断層がどの深度まで延びているかのランクについて、層序区分で判定した。



ランク A : Sediment 1 (通常堆積物内に見られる不整合面より浅い堆積物の中まで)

ランク B : Sediment 2 (通常堆積物内の不整合面と音響基盤の間の堆積物の中まで)

ランク C : Upper Crust (上部地殻の中まで)

ランク D : Lower Crust (下部地殻の中まで)

表 10 は、断層に対し、その確実度 (I / I" / II) と延び (A/B/C/D) を考慮してランク付けした一覧表である。ここでは、断層と認定したすべての解釈断層に対し、表 10 に基づくランク付けを行い、取り纏めた。

表 10 断層ランク付け一覧

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

### iii) 利用データとその特徴

伊豆・小笠原諸島海域の断層解釈作業に利用した反射法データは、JAMSTEC、JOGMEC、AIST および JCG の公的機関、ならびに JAPEX から提供されたものであり、MCS データと SCS データがある。

MCS データには JAMSTEC で取得されたものをはじめ、JOGMEC 基礎物理探査や JAPEX が保有する主に石油探査用のものと、JCG が保有する大陸棚調査用のものがある。MCS データの特徴は、以下のとおりである。

- ✓ 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できる。
- ✓ データ処理の過程で、速度情報の入手が可能である。
- ✓ 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。

SCS データは AIST より提供された。その特徴は、以下のとおりである。

- ✓ ゼロオフセットへの補正がなされていないので、浅海部のデータでは、海底面が実際より深く出て、同地点における MCS データとのずれが大きい。
- ✓ 海底面からのマルチプル (多重反射波) の影響が顕著で、特に浅海域で取

得されたデータでの地層解釈が困難となる。一方、水深の深い所では比較的良好的な反射波が得られる。

断層の認定作業では、海底地形図などの海底地形データと反射記録断面が示す海底の起伏が一致もしくは類似することが不可欠であり、そこにずれがある場合は断層の同定が困難となる。今回使用した SCS データの中には、図 61 のように、日本近海 30 秒グリッド水深データ (JTOP030) と反射記録断面上 (gh79332) で見られる海底の起伏が一致せず、両者に大きなずれが認められるものがあった。このようなケースでは、反射記録断面上で断層が確認できる場合でも海底地形との対比が難しく、今回はそれらの反射法データを利用した断層の認定作業は実施しなかった。このずれの原因については、データの取得年代が 70 年代と古いこともあり、収集した反射法データのナビゲーション情報に不備があったと考えられる。

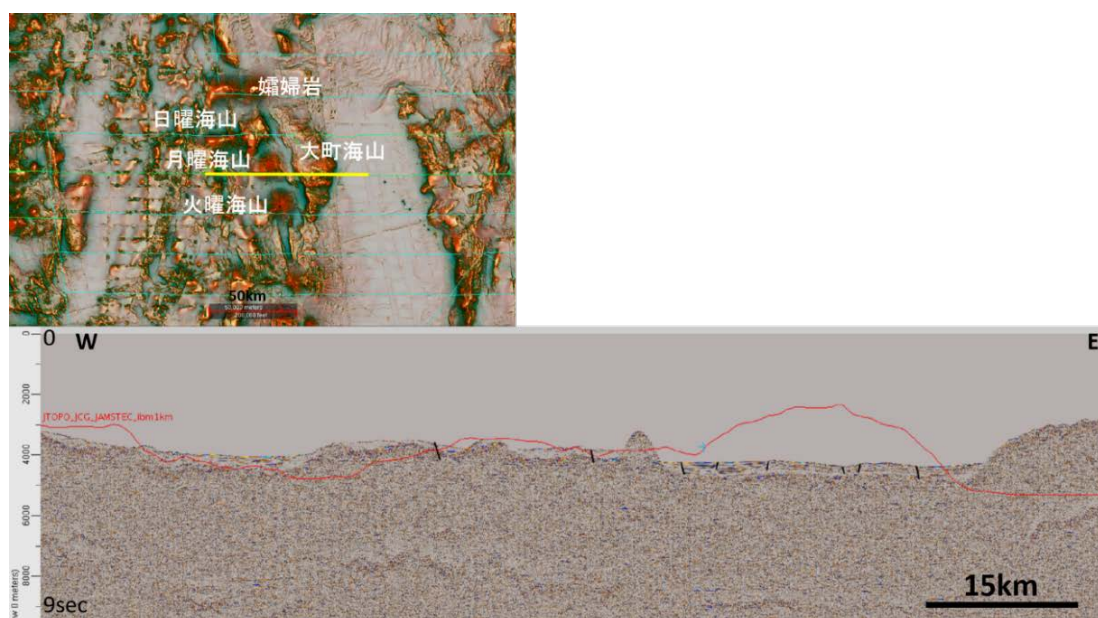


図61 水深データ (JTOP030) と SCS データ (gh79332) が示す海底地形のずれ  
(上図の黄線は SCS 断面図 (下図) の位置を示し、断面図上の赤線は水深データを示す。)

#### iv) 解釈ソフトウェア

平成 29 年度もこれまで同様、Landmark 社の地震探査解釈ソフトウェア DecisionSpaceGeoscience を用いて、断層解釈を行った。

#### v) 使用した資料等

断層解釈にあたっては、以下の海洋地質図、水深データおよび赤色立体地形図 (図 62) を参照した。なお、赤色立体地形図は、以下の水深データをもとに作成された海底地形図である。

○海洋地質図（産業技術総合研究所地質調査総合センター発行）

- 相模灘及付近海底地質図（1976）
- 西南日本外帯沖広域海底地質図（1977）
- 日本海溝千島海溝南部およびその周辺広域海底地質図（1978）
- 小笠原島弧北部広域海底地質図（1982）
- 小笠原島弧南部及びマリアナ島弧北部広域海底地質図（1982）
- 房総半島東方海底地質図（1983）
- 八丈島北東方海底地質図（1985）
- 駿河湾海底地質図（1999）

○水深データ

- シービームデータ（(国研)海洋研究開発機構）
- 水深グリッドデータ（海上保安庁）
- 日本周辺の500mメッシュ海底地形データ（J-EGG500）（海上保安庁）
- JODC 統合水深データセット（J-BIRD）（海上保安庁）
- 海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ（(一財)日本水路協会）
- マルチビームデータ（NOAA：アメリカ海洋大気庁）
- SRTM15 Plus（NOAA：アメリカ海洋大気庁）
- GEBCO-2014（GEBCO：General Bathymetric Chart of the Oceans）

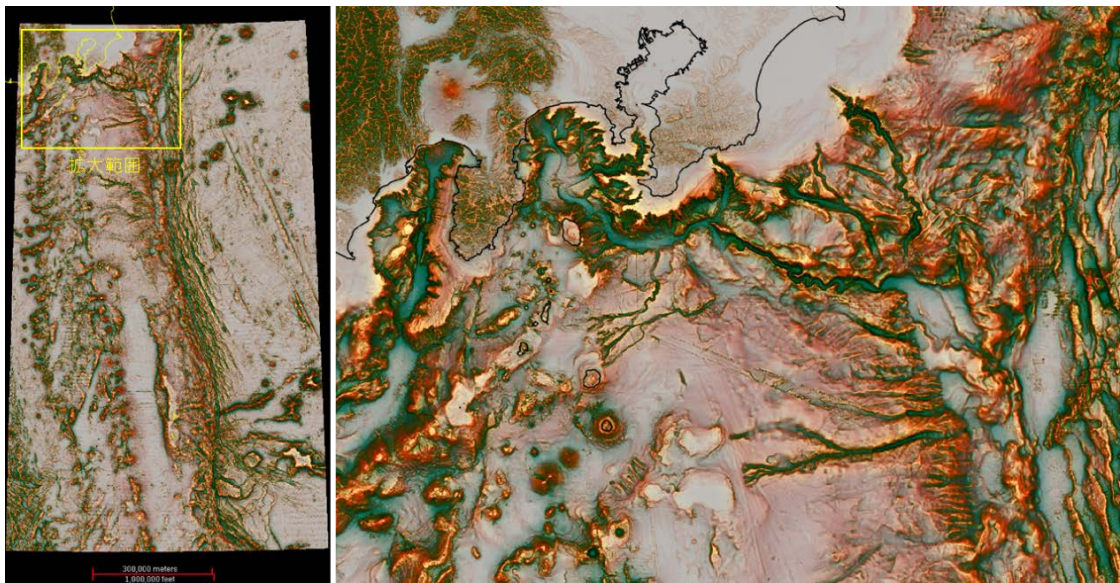


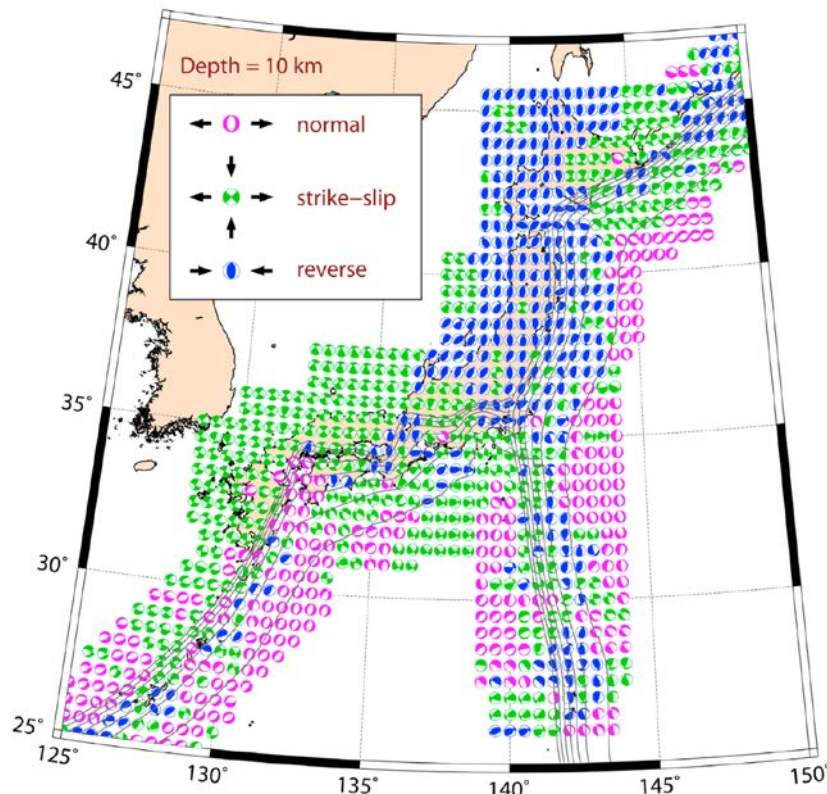
図 62 赤色立体地形図（伊豆諸島周辺海域～房総沖の例）

海底地形データを赤色立体地形図の手法で表示したこの地形図は、斜度をグレースケールで表し、崖や谷などの地形の起伏を明暗で識別できるようにしたものであり、この図を平面的に見ても地形が容易に判読できる。別の手法で作成された地形図として陰影図があるが、この図は方向依存性が高く、特定の地形だけを強調、または無視できてしまう。したがって、斜度によって地形を表す赤色立体地形図は地形判読

のより適当な手法であると考えられる。また、赤色立体地図をアナグリフ等と組み合わせることで、反射記録断面で解釈した断層の微小な変位も平面図上で認識でき、断層の空間的な広がりを特定できるようになった。

e) 解釈対象海域の応力パターン

断層の種類（正／逆断層、横ずれ断層）・規模・空間的分布を支配する主要な要因として、地殻にかかる応力（Tension/Compression）の大きさ・方向が挙げられる。以下に、伊豆・小笠原諸島周辺海域における広域的な応力パターン（図 63、Terakawa and Matsu'ura, 2010）について述べる。



(Terakawa and Matsu'ura, 2010)

図63 CMTデータインバージョン法解析による応力パターン

相模トラフを含む相模湾～房総沖には、北西－南東から東西方向に圧縮軸を持つ横ずれ断層の応力パターンが卓越している。この応力場は相模トラフを北縁とし、伊豆大島から神津島、新島のある銭洲海嶺の南方までの領域で同様のパターンで分布している。

火山フロントである八丈島・青ヶ島～鳥島周辺、および北緯 30 度より南の火山フロントとその背弧域ではそれぞれ、東西方向の張力軸、北西－南東方向の張力軸を持つ正断層や横ずれ断層の応力パターンが支配的である。

しかし、それらの傾向は一様ではなく、北緯 27 度より南の硫黄島海嶺周辺では北西－南東方向の逆断層型と横ずれ断層型の応力パターンが卓越する。さらに、海溝軸

より西の沈み込み帯においても東西方向に圧縮軸をもつ逆断層型と横ずれ断層型の応力パターンが支配的で、このパターンは小笠原海嶺にまで及んでいる。

一方、海溝軸海側では、ほぼ東西方向から北東-南西方向の張力軸をもつ正断層型の応力パターンが優勢となる。

ここでは、このような応力パターンを理解する上で、さらに図 64 に示す防災科学技術研究所が提供する 1997 年～2016 年の 20 年間に発生した F-net による地震のメカニズム解から深度 10km 以浅のデータを参考にして、地震活動と整合する断層解釈を行った。

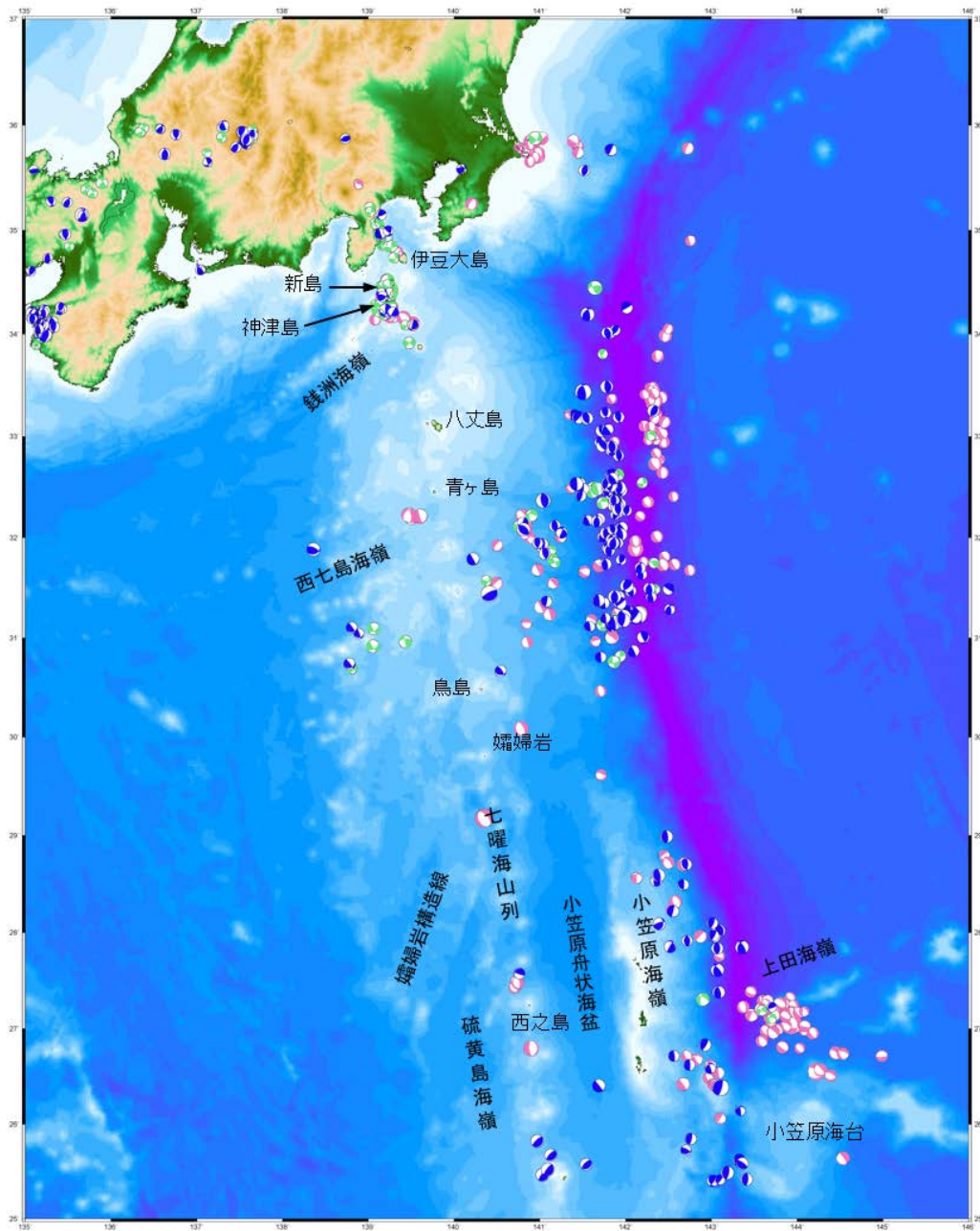


図64 F-net（防災科学技術研究所）による地震のメカニズム解

f) 断層解釈結果

伊豆・小笠原海域南部の断層分布について、図 65 と図 66 のように解釈され、次のように概観できる。

海溝陸側斜面では、太平洋プレートの沈み込みによる圧縮応力の影響で逆断層が付加体に発達している。一方、海溝海側斜面では太平洋プレートが沈み込むために湾曲し、同プレート表面に張力により形成されたと考えられる正断層が発達する。火山フロントから背弧域では、島弧成長に関連して背弧側のリフティング活動により発達する正断層が優勢となる。

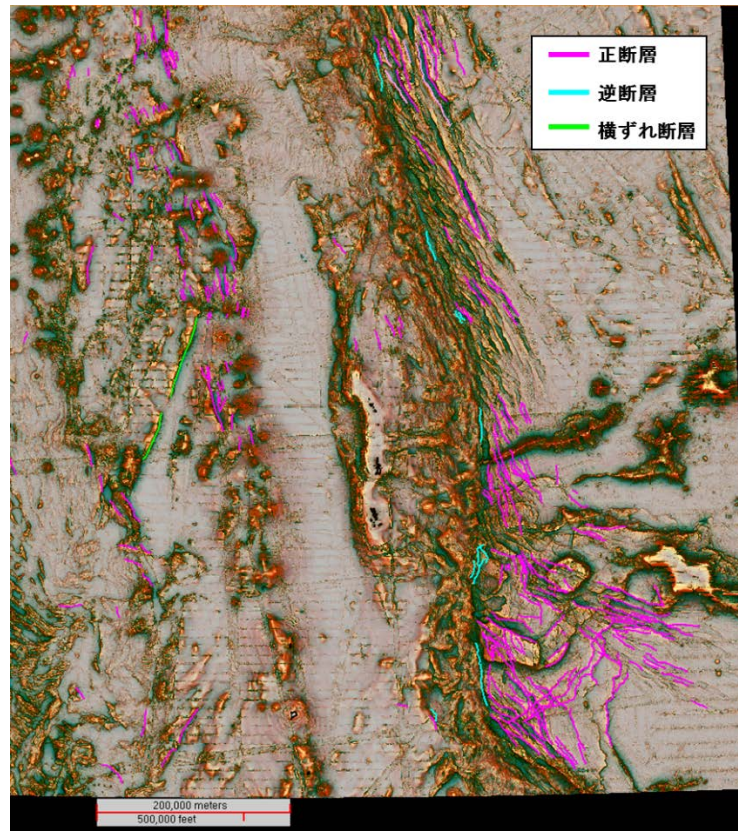


図65 伊豆・小笠原海域南部の断層分布

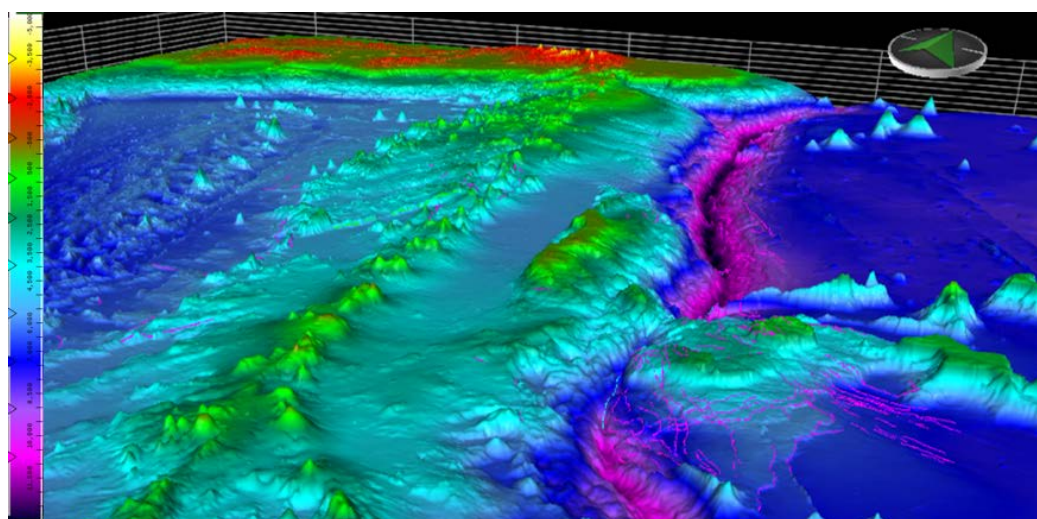


図66 伊豆・小笠原海域南部の断層分布（3D表示）

以下に、各海域別に、地質・プレート構造および断層解釈結果について述べる。

i) 相模トラフ

相模湾にはほぼ中心部に北西－南東方向の相模トラフ中軸が分布しており、トラフの海側はトラフ底より緩やかな斜面を呈し、陸側は沖ノ山堆列の急崖となっており、トラフ海側陸側両斜面により非対称な地形を成している（図 67）。なお、ここでのフィリピン海プレート上面と考えられる反射面はトラフに向かって北東に傾斜しているが、トラフ軸より陸側の三浦海丘の下では不明瞭になっており、同プレートの沈み込んだ後の構造は認められない（図 68）。Sato et al. (2005) は、相模湾岸地殻構造探査による反射記録断面を用いて、相模湾域のフィリピン海プレート上面が 4 km から 11 km の深さの北東に傾斜する反射波（図 69 の断面図の黒矢印）にイメージングされることを示した。このような構造探査を主とした先行研究を参考に、相模湾内のプレート構造や運動に伴って発達する断層構造を解釈した。

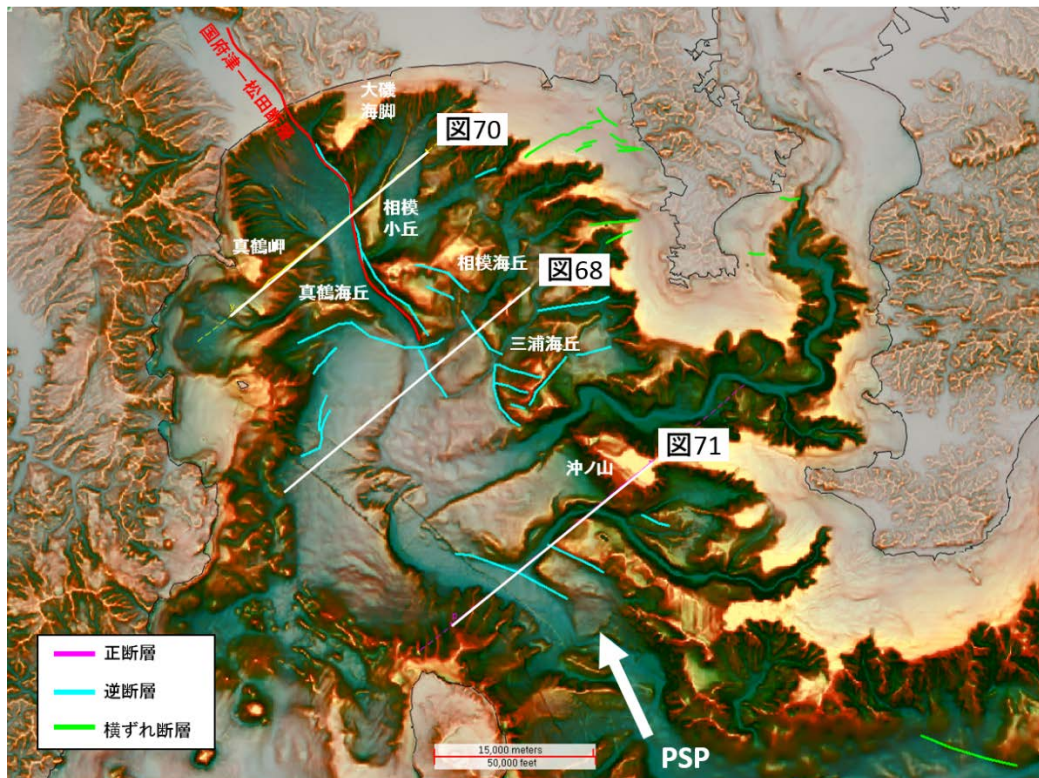


図67 相模湾の断層分布

(白矢印はフィリピン海プレートのトラフにおける相対的な移動方向を示す。) (Nishimura, 2011)

(国府津－松田断層の位置は、地震調査委員会 (2015) による。)

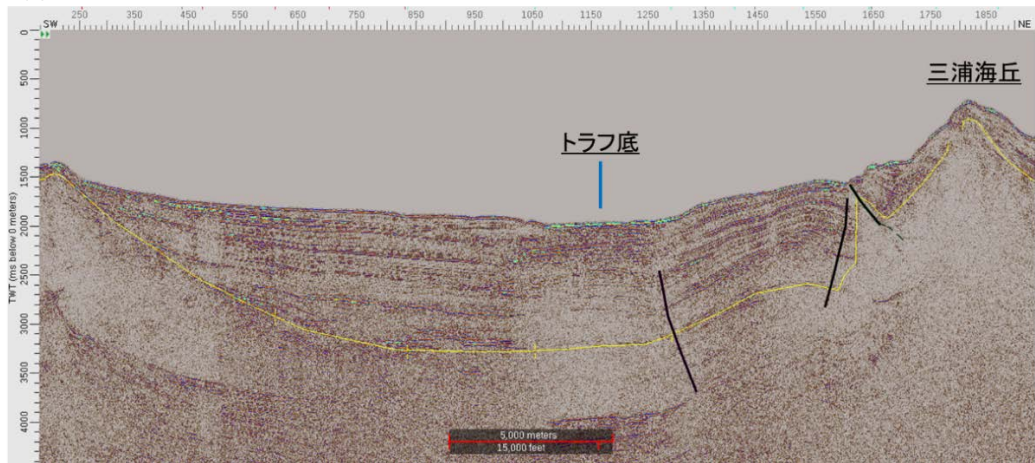
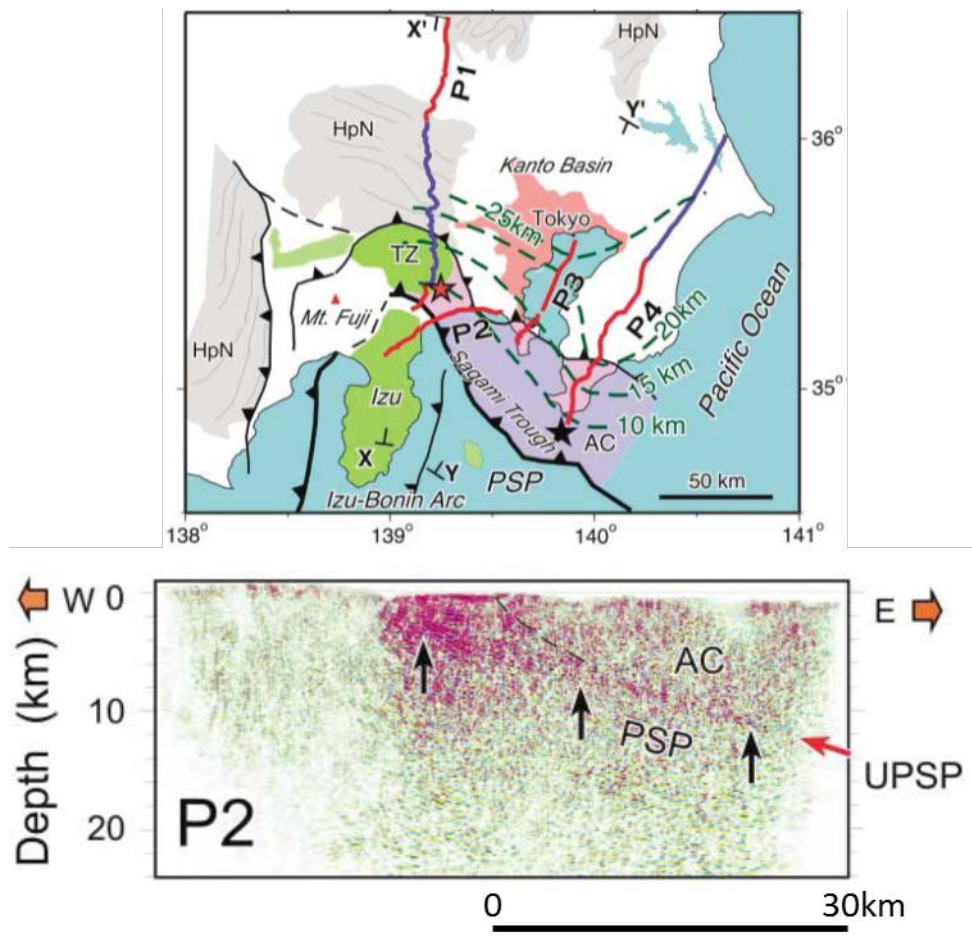


図68 相模湾中部の反射記録（時間）断面図



Sato et al. (2005)による図を一部修正

図 69 相模湾岸地殻構造探査 P2 測線と反射断面

(上図の緑破線はフィリピン海プレートの上面の等深線を示す。)

沖ノ山堆列の北西延長には、フィリピン海プレートと東北日本側プレートの沈み込み境界から分岐したと考えられる国府津－松田断層の海域延長部が存在する（地震調査委員会，2015）。この海域では、大磯海脚から相模海丘まで北北西－南南東



方向に伸長する北西側隆起の逆断層が国府津—松田断層に相当すると考えられる（図70）。沖ノ山堆列の相模海丘や三浦海丘等の高まりにも北西—南東から西北西—東南東走向の逆断層構造が複数発達しており、急峻な地形を形成している。これらの逆断層構造は、国府津—松田断層と同じく、プレート境界近傍の堆積層にプレートの沈み込みによる圧力が生じて変形・隆起し、形成されたと考えられる。また、トラフ底直下には堆積層を緩やかな南西傾斜に変形させる構造が認められることから（図70、図71）、トラフ近傍でプレートの沈み込みによる圧力が働いている可能性が示唆される。

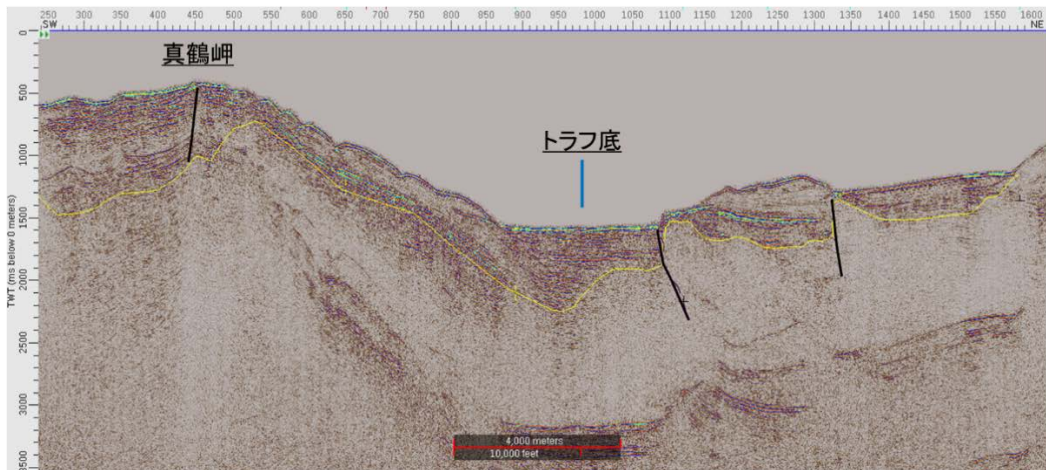


図70 相模湾北部の反射記録（時間）断面図

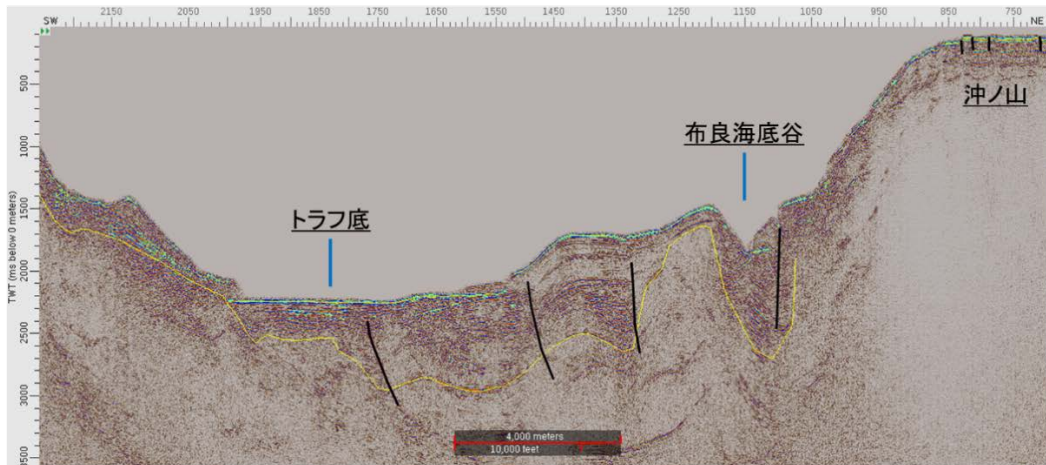


図71 相模湾南部の反射記録（時間）断面図

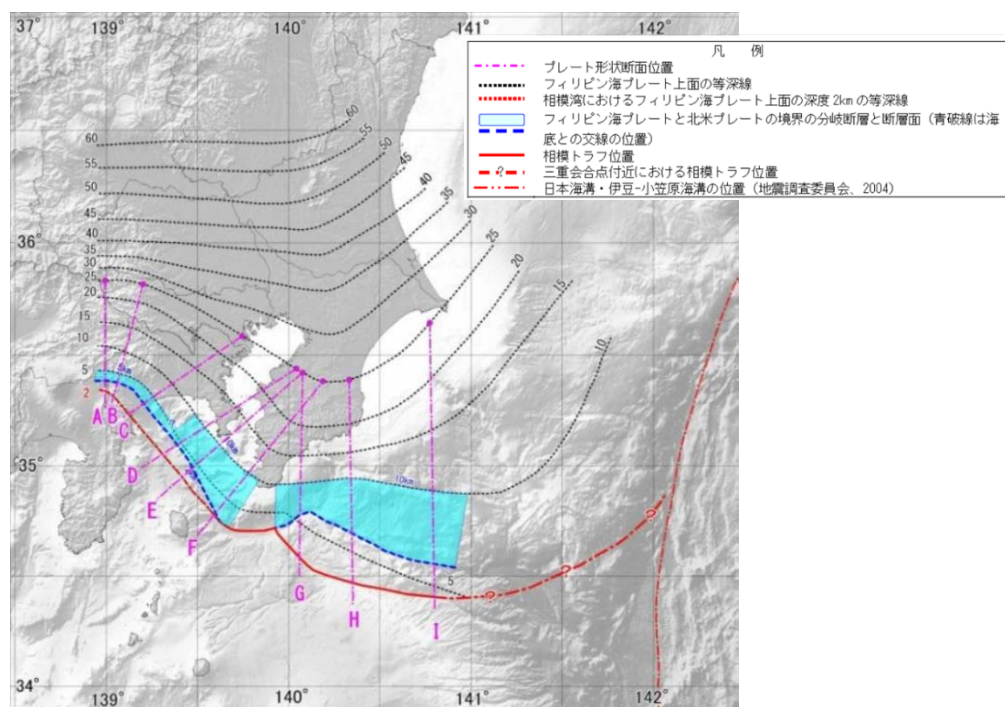
トラフ沿いに明瞭に現れている地形は、フィリピン海プレートが東北日本側のプレートに向かって北へ沈み込んでいた時代に発達した断層によって形成されたもので、その構造トレンドは東—西ではなく北西—南東の傾向を示している。これについては、本州に衝突する島弧の地殻が東側で薄くなることや北西—南東方向のトラフ軸などが要因となり、沈み込み方向と斜交しながら構造が発達したと考えられる。

現在のフィリピン海プレートの相模トラフにおける相対的な運動方向については、N25°Wを示すことが Loveless and Meade (2010) や Nishimura (2011) によって明らかにされている。つまり、フィリピン海プレートの沈み込む方向と相模トラフの軸はほぼ平行しており、このことから沖ノ山堆列の付加された地塊は N25°W 方向に圧縮を受けていると考えられる。また、No et al. (2014) は、真鶴海丘南斜面基部の断層はフィリピン海プレートが同海丘の軸に垂直に沈み込んだ際に発達したもので、海丘西側が S 字に屈曲した成因は現在の相模トラフにおける N25°W 方向のプレートの相対運動によるものと結論づけている。さらにこの断層は、国府津－松田断層の南端部分を取り込んで同断層を吸収している（合流し1つになっている）可能性があるとしている。これらについては、本断層解釈においても褶曲構造を示す東北東－西南西方向の逆断層が確認されていることから、相模湾周辺海域で現在のプレート運動のテクトニクスによる断層活動が存在する可能性があるといえる。

## ii) 房総沖

房総沖周辺海域の断層分布を特定するためには、フィリピン海プレートと東北日本側のプレートの境界やそのテクトニクスの理解を深めることが重要である。

房総沖にはプレート会合三重点があり、房総半島南方沖に発達してきた相模トラフはさらに東へ延び、伊豆・小笠原海溝と合流する。首都直下地震モデル検討会(2013)によると、相模トラフは房総半島南方から南へ凸の弧を描き、北東方向へ延びて伊豆・小笠原海溝へ合流し、フィリピン海プレートは北西方向に緩やかに傾斜している(図72)。本作業では、フィリピン海プレートの基盤反射面(プレート上面に対応する反射波)を読み取り、プレート上位に発達する断層または構造を解釈した。



(首都直下地震モデル検討会, 2013)

図72 フィリピン海プレート上面の形状と分岐断層

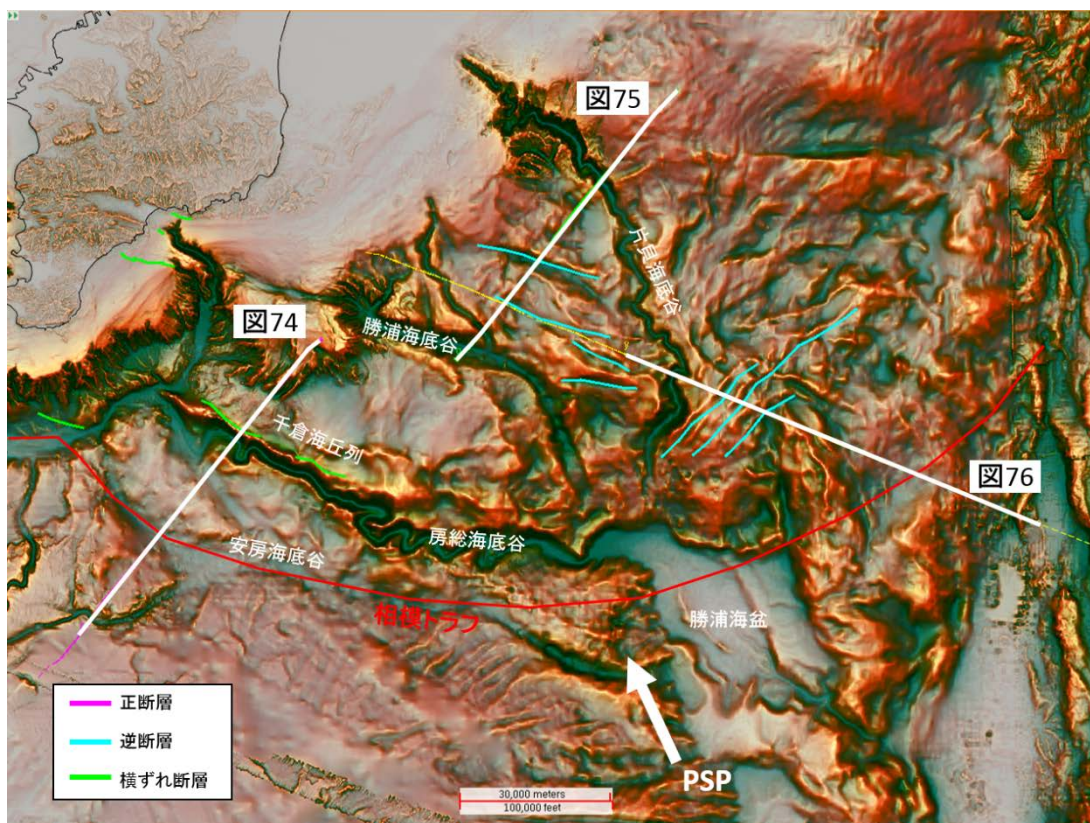


図73 房総沖の断層分布

(白矢印はフィリピン海プレートのトラフにおける相対的な移動方向を示す。) (Nishimura, 2011)

(相模トラフの位置(赤線)は、首都直下地震モデル検討会(2013)による。)

房総沖海域の赤色立体地形図(図73)を判読すると、相模トラフ沿いには房総海底谷と安房海底谷が存在する。前者は、急峻な谷壁を持ち蛇行しながら流下する谷であるのに対して、後者は、緩やかな斜面を持つ浅い谷である。ここで、トラフを北東-南西方向に横切る測線(図74)を見ると、フィリピン海プレート上面の反射波が北東方向に傾斜しており、被覆する堆積物はトラフ中軸に向かって厚くなり、プレート収束域で楔形の構造が発達している。安房海底谷直下では緩やかな褶曲構造が発達しており、プレートの沈み込みによって堆積層内に圧力(圧縮応力)が生じていると考えられる。また、房総海底谷では、谷の両岸の隆起地塊(千倉海丘列等)を含む海底面下の構造が堆積構造は勿論、圧縮構造も判読できないほど変位を受けている。これは圧縮場で形成された付加体が横ずれの変位を受けたものと考えられ、移動するプレートの上に横ずれ型の断層活動があることを示唆している。

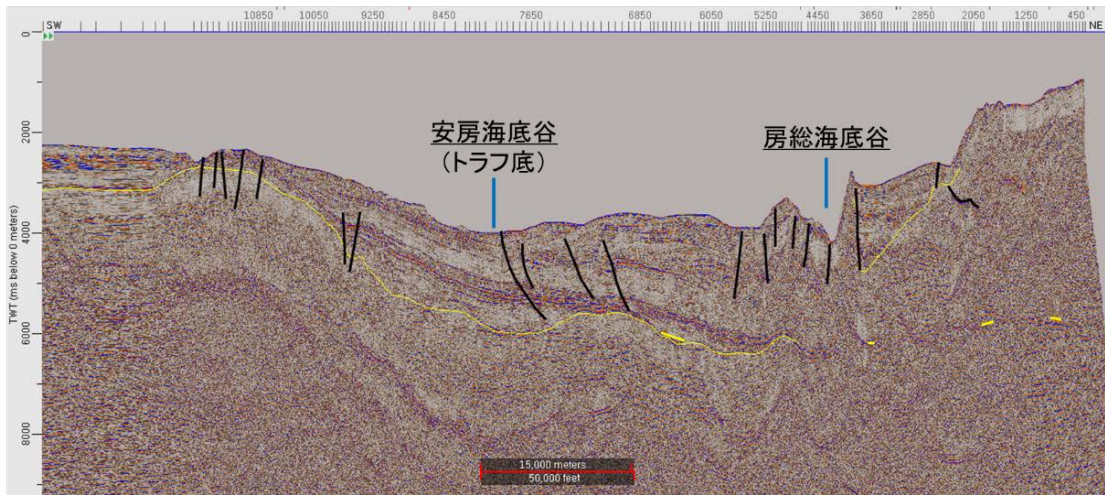


図74 相模トラフを横切る反射記録（時間）断面図

房総沖の前弧域には、東南東方向に流下する勝浦海底谷と南東方向に流下する片貝海底谷がある。双方の海底谷は、房総海底谷に合流する約 30 km 手前で流路を南方へ曲げられており、周囲の構造の影響を受けたものと考えられる。また、両海底谷に挟まれた領域では西北西－東南東方向の背斜軸をもつ褶曲構造が発達しており（図 75）、勝浦海底谷もこの褶曲構造に支配された流路を成しているが、片貝海底谷の東側は西側の構造とは相違し、北東－南西方向の背斜軸をもつ褶曲構造と逆断層が発達している（図 76）。これらの海底谷の流路が南方へ屈曲した原因は、北西－南東方向の圧縮応力により周辺の地塊が押し上げられ、南東方向に流下していた谷が流路を塞がれ、南方へ曲げられたためと考えられる。図 76 の反射記録断面には、逆断層の下端に西へ緩やかに傾斜する強い反射面（黄色線）が現れており、これがプレート境界からの分岐断層と考えると、図 72 の青破線で示された分岐断層はさらに北東に延長し、断層長が増長する可能性がある。

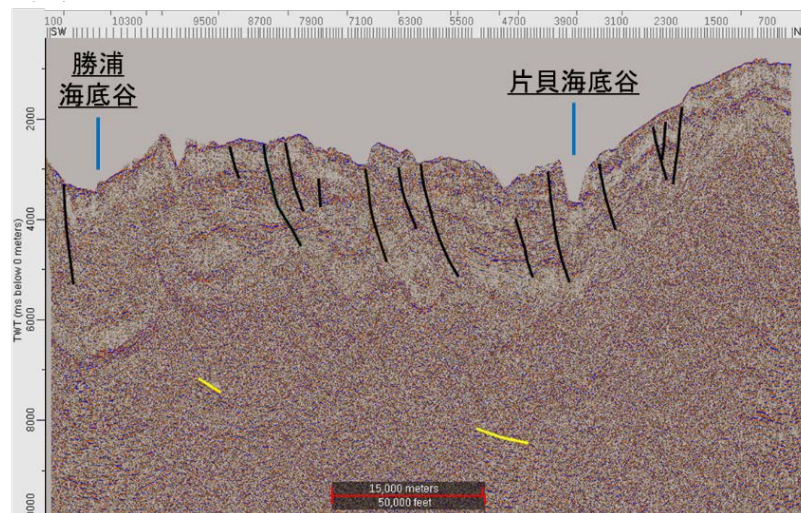


図75 前弧域を横切る反射記録（時間）断面図

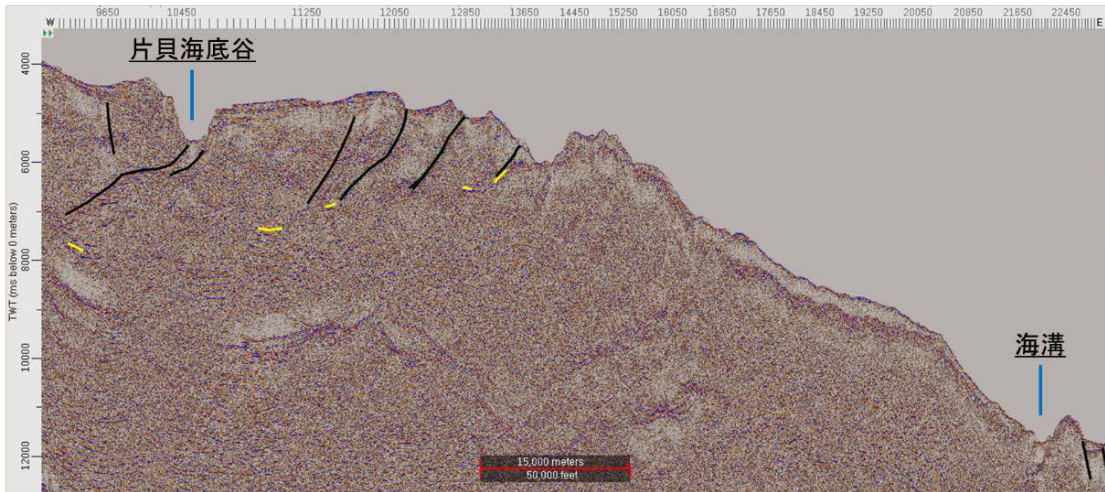


図76 前弧から海溝陸側斜面の反射記録（時間）断面図

iii) 火山フロント～背弧域（伊豆諸島海域）

八丈島、スミスカルデラ、鳥島および孀婦岩までの火山フロントのすぐ背弧側には、東西を正断層によって区切られ、南北に細長く断続的に凹地（グラベン）が存在する（図77）。

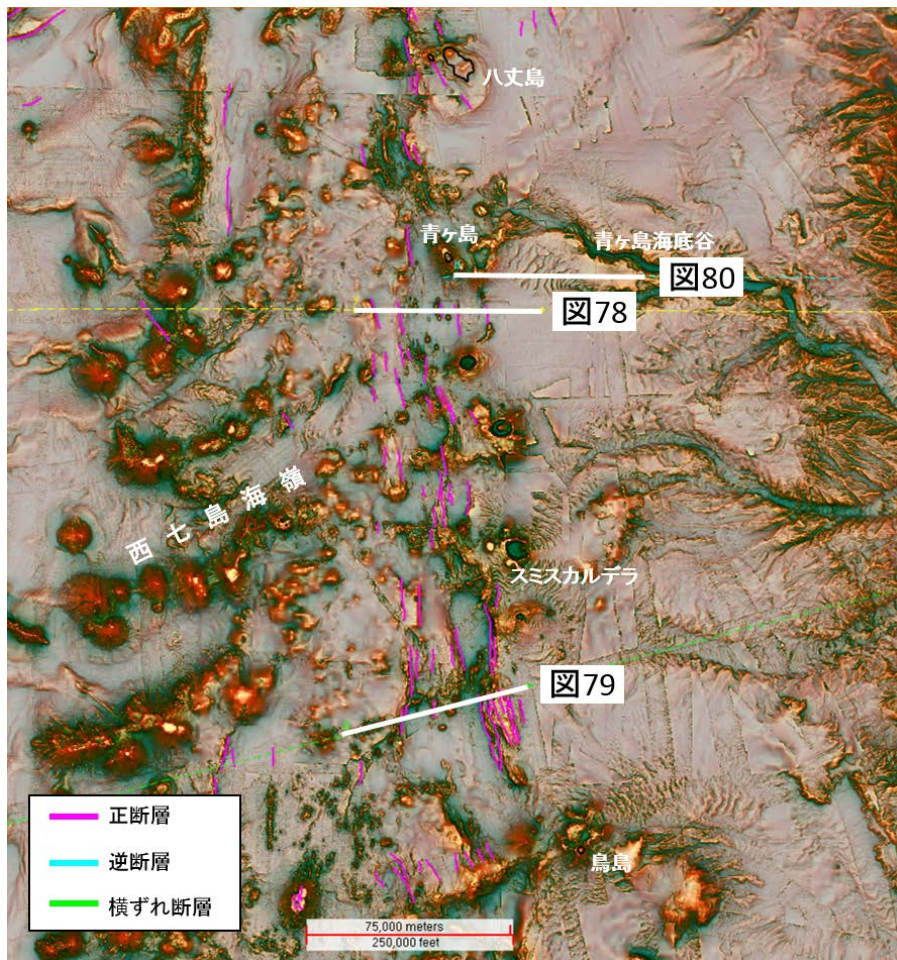


図77 伊豆諸島周辺海域の断層分布

赤色立体地形図（図 77）において、海底面に現れた正断層によるこうしたステップ状の地形（凹地）を判読することができる。これらの正断層は長さが 10 km 未満の小規模なものが多く、それらが密に分布し、リフトを形成している。

いずれの海盆も低地は堆積物で覆われているが、堆積層内には断層による累積変位が見られることから、現在もリフト活動は進行していると考えられる（図 78、図 79）。また、背弧凹地には、火山活動によって火山岩が断層面に沿って貫入して形成された南北方向のリニアメントを持つ火山群が認められ、青ヶ島に代表される火山島や海山が発達している。

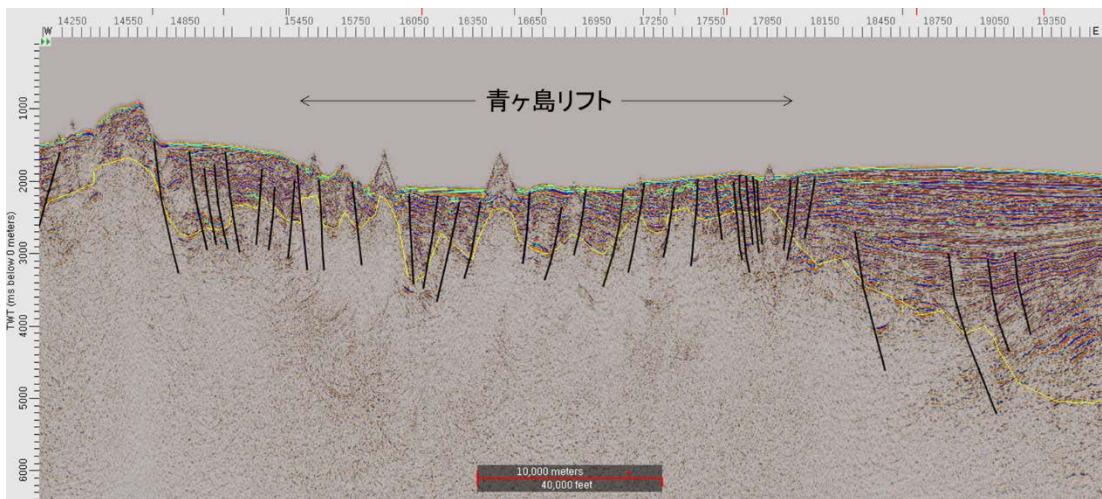


図78 青ヶ島リフトを横切る反射記録（時間）断面図

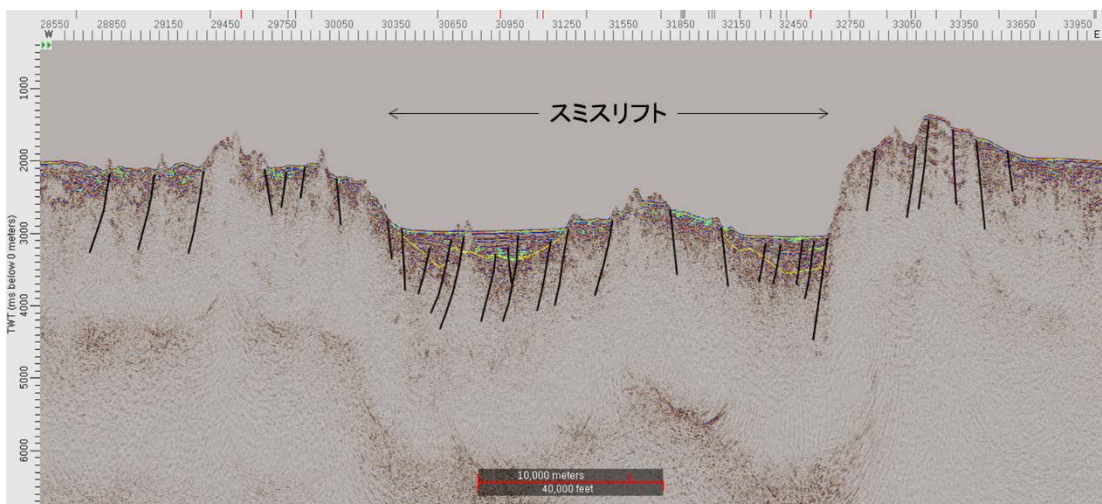


図79 スミスリフトを横切る反射記録（時間）断面図

青ヶ島東方の青ヶ島海底谷が東へ流下する前弧域には、東傾斜の正断層によってハーフグラベンが発達している（図 80）。これらの正断層群や厚い堆積物は、漸新世の島弧発達に伴う背弧拡大によるもので、過去に伸張場であったことを示している（高橋・他，2015）。

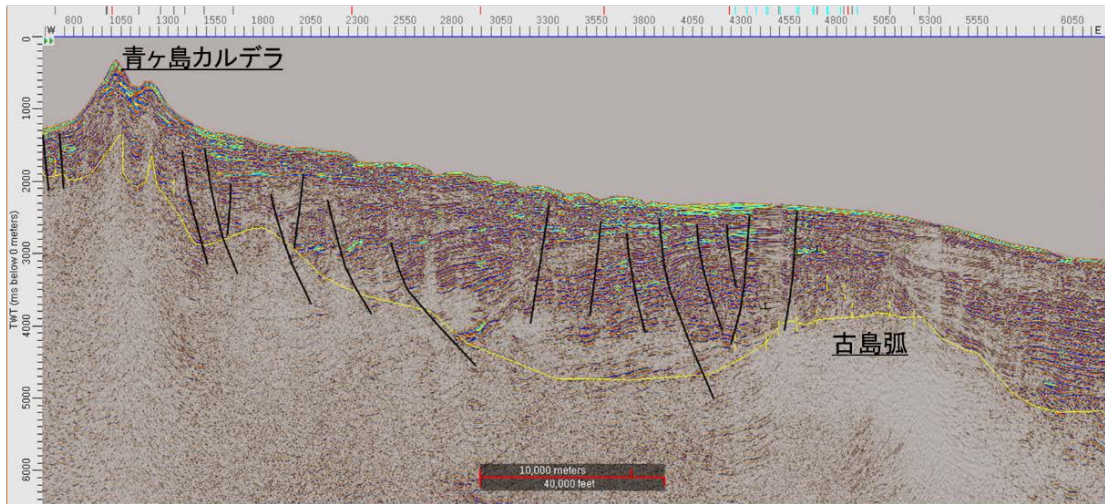


図80 前弧域を横切る反射記録（時間）断面図

iv) 火山フロント～背弧域（孀婦岩以南）

海底地形図の解像度が比較的良好であったことから、火山フロントでは、海底面の変位が明瞭に観察できる七曜海山列を中心に、北北西－南南東走向に並走する直線的な正断層群が確認された（図 81、図 82）。

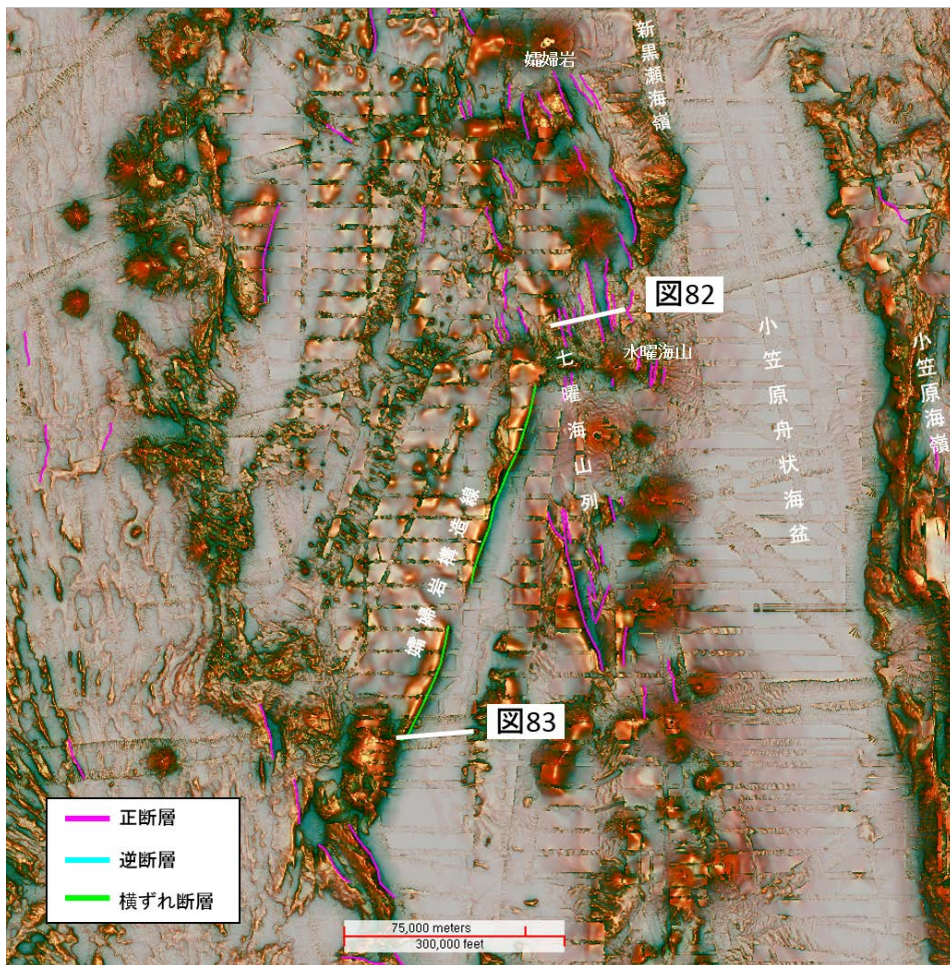


図81 小笠原海嶺周辺の断層分布

これらの正断層は、主として上盤が東側で、長さが10~20 km（最長70 km）と小規模なものが多い。また、海山周辺には、長さ10 kmに満たない断層も多く存在し、正断層が数 km 以下の間隔で密に分布している。これらの断層が、図 82 の反射記録断面において、海山の縁をなす（海山を切る）海底面の変位として認められる。

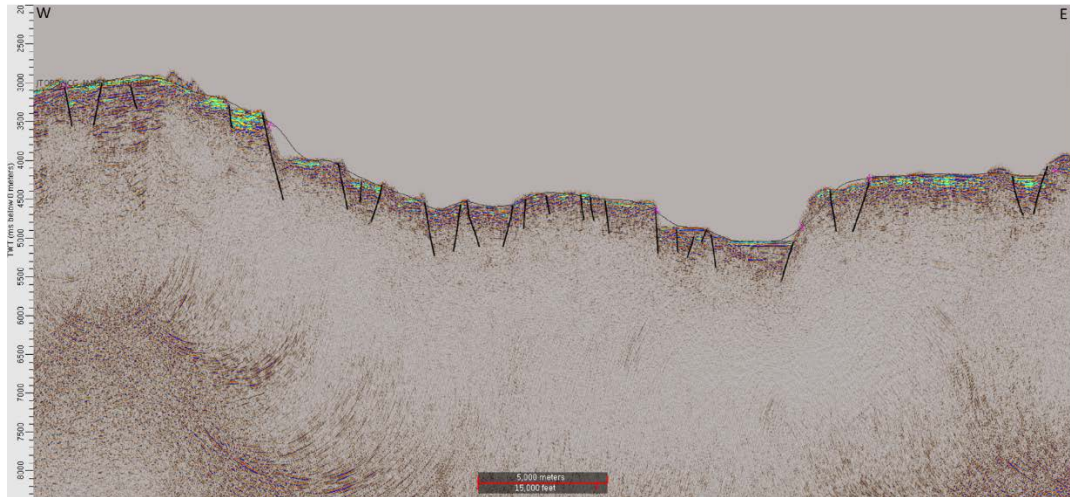


図 82 水曜海山北側の反射記録（時間）断面図

孀婦岩構造線は、その西部で背弧雁行山脈群の南端を限り、東部で新黒瀬海嶺の南端および小笠原海嶺の北端を限っている。火山フロントを構成する火山群の分布は、孀婦岩構造線にほぼ平行する北北東-南南西方向の直線的な構造にコントロールされているように見える。反射記録断面図上（図 83）では、正断層性の変位を伴う断層として確認でき、フラワー構造のように副次断層を複数伴うため、横ずれ断層の可能性も考えられる（図 81、図 83）。

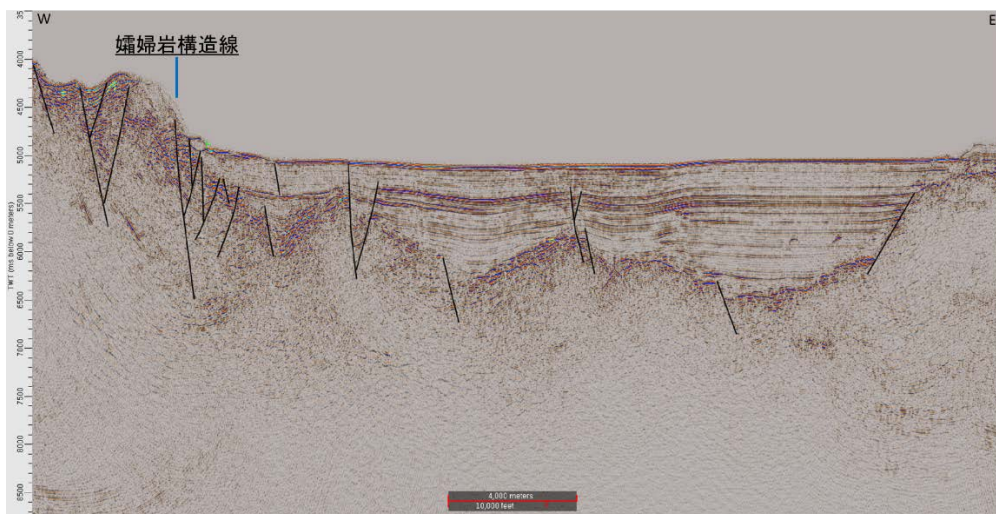


図 83 孀婦岩構造線の反射記録（時間）断面図



v) 伊豆・小笠原海溝

伊豆・小笠原海溝の海側斜面には、海溝軸より東側の幅 60~80 km の範囲に長さ 20~50 km (最長 150 km 以上) の正断層が密に発達する(図 84、図 85)。これらの正断層は、走向が南-北から北北西-南南東方向であり、海溝軸の方向にほぼ一致するため、プレート境界近傍での沈み込むプレートの湾曲により、プレート表面に張力が生じて形成されたと考えられる。また、この正断層群により、海底には幅 3~5 km の地塁・地溝が多く発達しており、伊豆・小笠原海溝海側斜面の海底地形を特徴づけている。なお、上田海嶺の南側では 2010 年に、マグニチュード 7.4、震源の深さが 8 km の地震が発生しており、この地震は今回確認された断層群と同じ傾向を示す北西-南東走向の正断層に起因するものと推測されている(気象庁, 2010)。

伊豆・小笠原海溝の海溝陸側斜面、特に海溝底と陸側斜面との境界には、プレートの沈み込みに関連した逆断層の存在が想定される。泉・他(2015)は、北緯 27 度 30 分から 29 度 30 分の間に、海底地形に地すべりによって修飾された幅数 km 以下のステップ(階段状の地形)が海溝軸に平行に複数発達することから、大規模な逆断層が存在する可能性を示唆した。今回収集した反射法データのうち、海溝軸を横切る反射記録断面(図 86)において、海溝陸側斜面基部にこのような長さ 10~35 km の逆断層が確認できる。

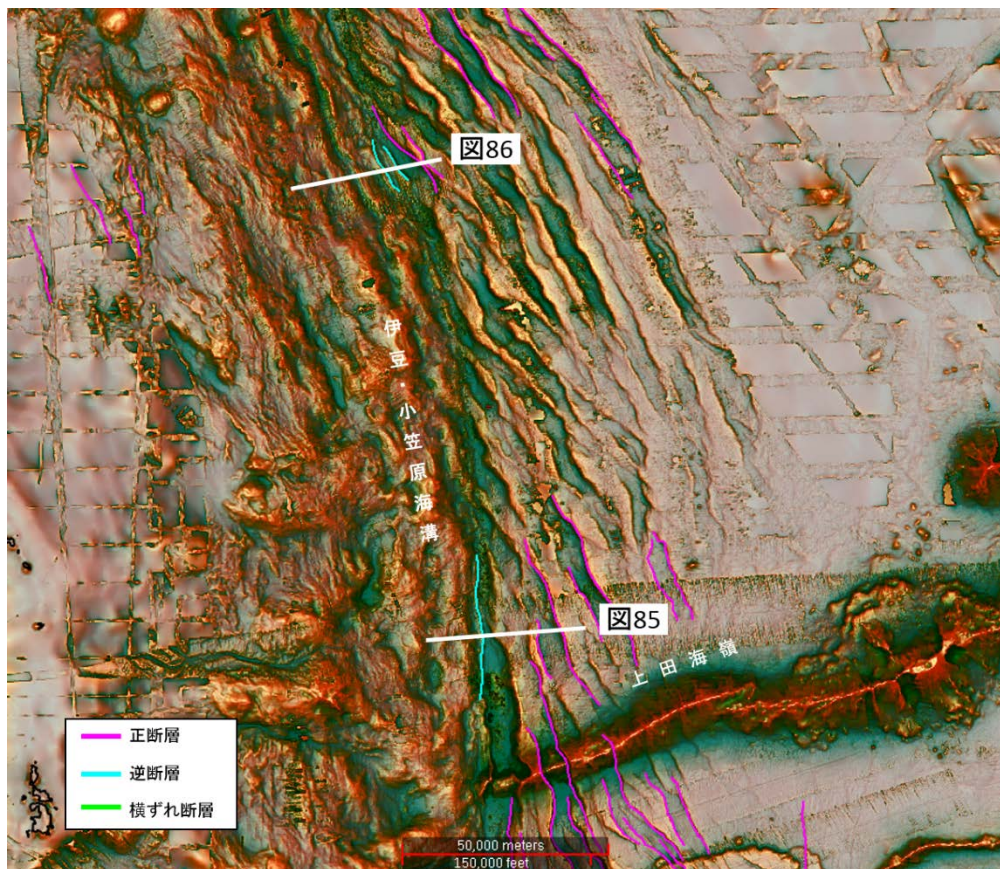


図84 伊豆・小笠原海溝周辺の断層分布

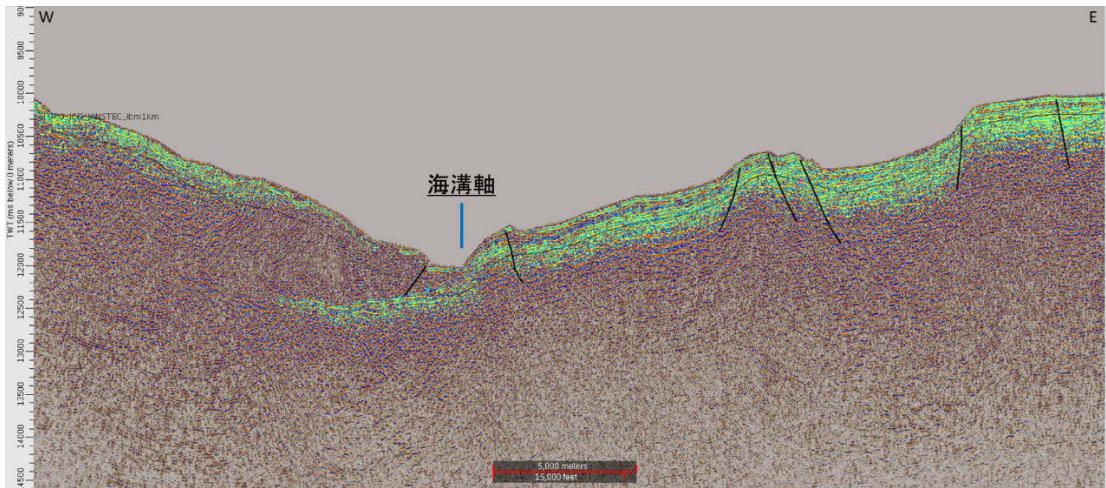


図85 海溝海側斜面の反射記録（時間）断面図

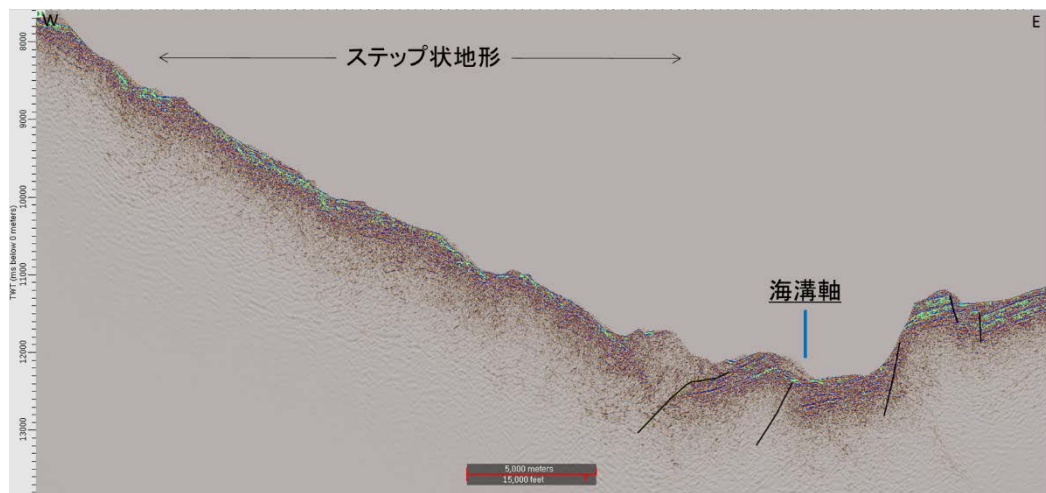


図86 海溝陸側斜面の反射記録（時間）断面図

vi) 小笠原海台周辺海域

小笠原海台は、伊豆・小笠原海溝とマリアナ海溝の会合部において、沈み込む太平洋プレート上に位置する大型の海山である。小笠原海台の西部は、伊豆・小笠原弧と衝突しており、フィリピン海プレート下への沈み込みに伴い、その一部が陸側斜面基部に付加されている。一方、海溝海側の小笠原海台周辺海域では、海底を变形させる多数の正断層が発達する。それらの断層は発達する領域によって走向が異なり、以下の3タイプ（A、B、C）に分類できる（図87）。

- A：海溝軸にほぼ平行な走向を持ち、海溝軸から東側80 km前後までの領域に分布する断層群（図88）
- B：北西－南東から西北西－東南東方向の走向を持ち、西海山の北側から東南東方向に大洋底まで分布する断層群（図88）
- C：北東－南西方向の走向を持ち、南海山の東縁から東側100 kmの領域に分布する断層群（図89）

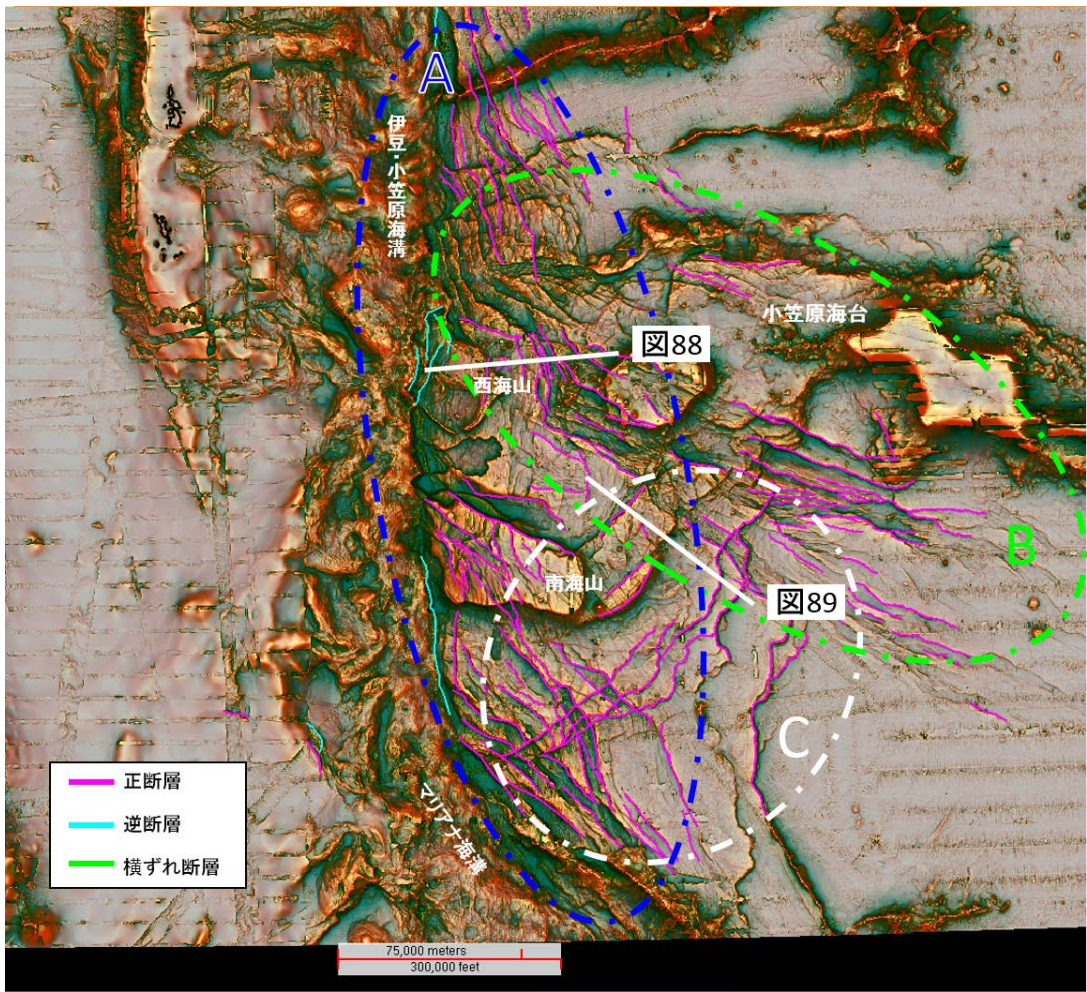


図87 小笠原海台周辺の断層分布

(青楕円は断層タイプA、緑楕円はタイプB、白楕円はタイプCを示す。)

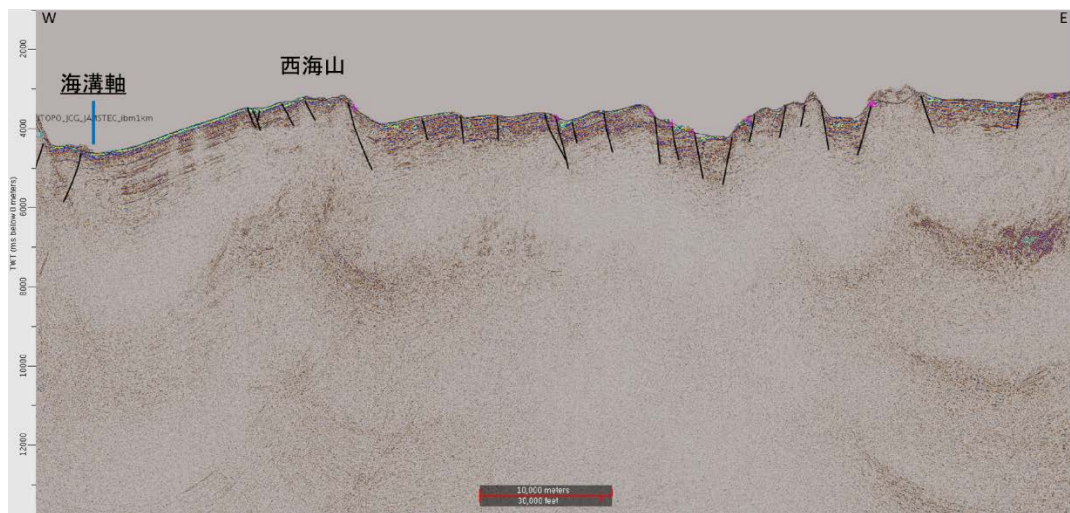


図88 小笠原海台の反射記録（時間）断面図

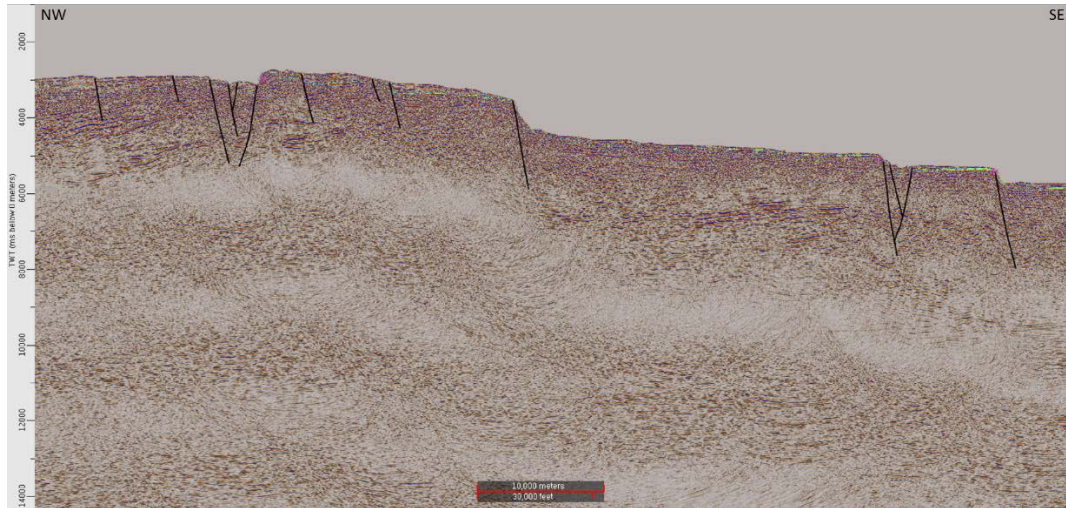


図89 小笠原海台の反射記録（時間）断面図

いずれの断層群も正断層により構成されており、この海域における広域応力場(図 63) と地震の発震機構(図 64) に整合的である。Aのタイプは、伊豆・小笠原海溝の海側斜面ほぼ全域で共通して認められ、沈み込む太平洋プレートの曲げ張力に起因する断層と考えられる。一方、BとCのタイプは、海溝軸に対して高角度の走向を持ち、海溝軸から離れた領域にまで分布する点で、Aとは異なる。BとCの成因については不明であるが、それらの断層は小笠原海台と島弧の衝突によって生じたプレート境界の屈曲部に位置し、異なる方向の沈み込み境界(伊豆・小笠原セグメントとマリアナセグメント)に向かうプレートのベンディング(湾曲)を受けて海台周辺はドーム状に隆起しているため、このような構造配置がこれらの断層形成に大きく関係していると考えられている(森下, 2009)。

#### vii) 小笠原海嶺

小笠原海嶺において、反射法データが少なく海底地形図の解像度も低いため、特定できた断層数は7と少ない。特に小笠原群島周辺は、反射法データの測線間隔が10~25 km (MCS データの間隔は30~100 km) と粗く、測線上で断層が確認されたものの、断層の同定には至っていない。

小笠原海嶺は、全体として緩やかに東に傾斜しており、その西縁には水深4,000 mの小笠原舟状海盆と境をなす比高3,500 mの直線的な急崖が連なる。また、海嶺西縁は正断層により構造的に低い位置にあると考えられているが、今回の断層解釈作業ではそれが確認できなかった。

小笠原海嶺北部には、長さが10~20 km、北北東-南南西走向の正断層が分布する(図 90、図 91)。海嶺北部の緩傾斜面では南北~北北西-南南東方向のリニアメントを多数確認できるため、今回同定した断層と同規模以上の断層が分布する可能性がある。

海嶺の西側に存在する小笠原舟状海盆は、前弧のリフトが開始した後期始新世から第四紀までの堆積物によって厚く埋積されており(星・他, 2015)、海底地形にリニアメントは認められず、海底面に变形を及ぼすような断層は同定されなかった。

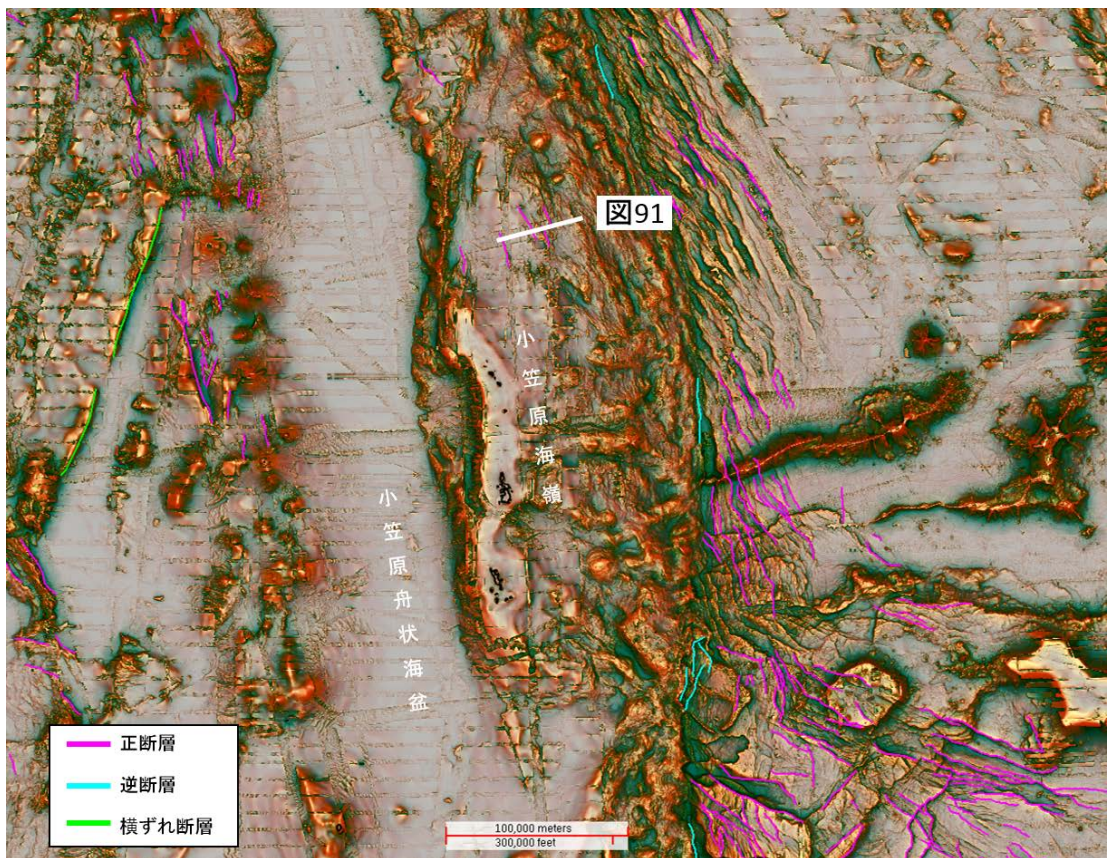


図90 小笠原海嶺周辺の断層分布

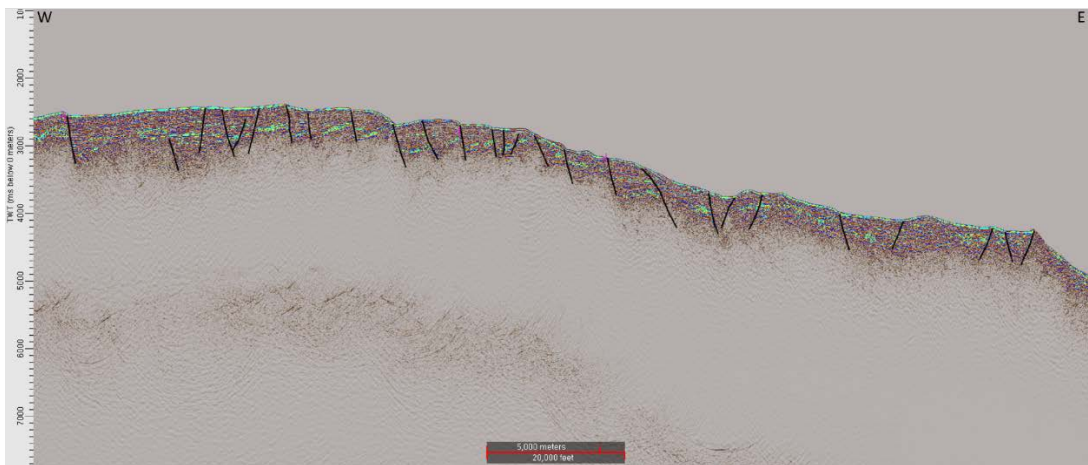


図91 小笠原海嶺北部の反射記録（時間）断面図

#### (d) 結論ならびに今後の課題

##### 1) データ再解析

平成29年度は、伊豆・小笠原諸島海域の既往探査データの再解析（MCS/SCSデータ再処理・ベクトル化）を実施した。対象となったデータは、JOGMECが1979年度に取得した基礎物理探査のMCSデータ、AISTのSCSデータ、およびJAPEXから提供された七島沖と小笠原沖のMCSのフィルム断面図であった。これらのうち、JOGMEC基礎物理探査のデータについてはこれまで同様のデータ再処理フローに基づき実施し、MCSデータの品質向上を図ることができた。データ欠損箇所（重合記録紙面あり）やJAPEXのフィルム断面図については、ベクトル化処理を行い、フィルム・紙イメージからデジタル化の処理を実施した。また、AISTのSCSデータについてもノイズ除去等の処理を実施し、データ品質の向上を図った。これらの再解析により、高品質の反射法データをデータベース化することができ、また同データを断層解釈へ提供し、効率的作業の実施に貢献した。

##### 2) 三次元速度構造モデルの構築

平成29年度は、伊豆・小笠原海域全域を対象とした三次元速度構造モデルの構築を行った。反射法データを用いて、海底面、音響基盤面、コンラッド面およびモホ面を解釈し、フィリピン海プレートと太平洋プレートを含む三次元の層構造を作成し、さらに各層構造に速度関数を与えることによって、速度構造モデルを構築した。速度データとしては、反射法データの処理過程で使われる重合速度、OBS探査で得られた速度情報、および論文などで公表されている速度情報を使用した。

速度情報が得られるOBS調査は、小笠原海台周辺および小笠原海盆周辺で多く実施されているものの、それ以外の海域では少ないか、もしくは全く実施されていない。また、反射法データ再処理を実施した測線も、一部の海域に偏っている。特に、伊豆七島周辺や太平洋プレート側の小笠原海台を除いた海域については、ほとんど速度に関するデータが存在しない。したがって、今回の三次元速度構造モデルは、データ・情報量が極めて偏在している中で作成されたものであり、今後、OBS調査が当該海域で実施され速度データが新規に入手できれば、その都度、モデルを精度の高いものへと改良・更新していく必要がある。

##### 3) 統一的断層解釈

平成29年度は、相模湾、房総沖、伊豆諸島、小笠原諸島および伊豆・小笠原海溝周辺海域の非常に広範囲に亘る断層解釈作業を行った。JAMSTECのデータをはじめ、JOGMEC基礎物理探査（一部再解析実施）、JCGの大陸棚調査、JAPEXの石油探査（ベクトル化実施）など当該海域を広域にカバーしたMCSデータに加え、AISTのSCSデータも併せて、解釈に十分有効なデータを収集でき、それらを使用して断層を特定することができた。その結果として、伊豆・小笠原諸島海域での断層分布図（図92）をマッピングするという成果を得ることができた。

既往の海底地形調査や構造調査において断層のマッピングはこれまでも報告されているが、今回データ再処理や正確な座標系の変換作業を行ったことで、断層の深部の形状

やその空間的広がりが明らかになり、より位置データに依拠した正確な情報を示すことができた。なお、当該海域で特定された断層については、ランク分けを行いデータベース化した。これらは断層モデル構築の際に、モデルの規模や連動パターンの検討に有効に利用できると思われる。

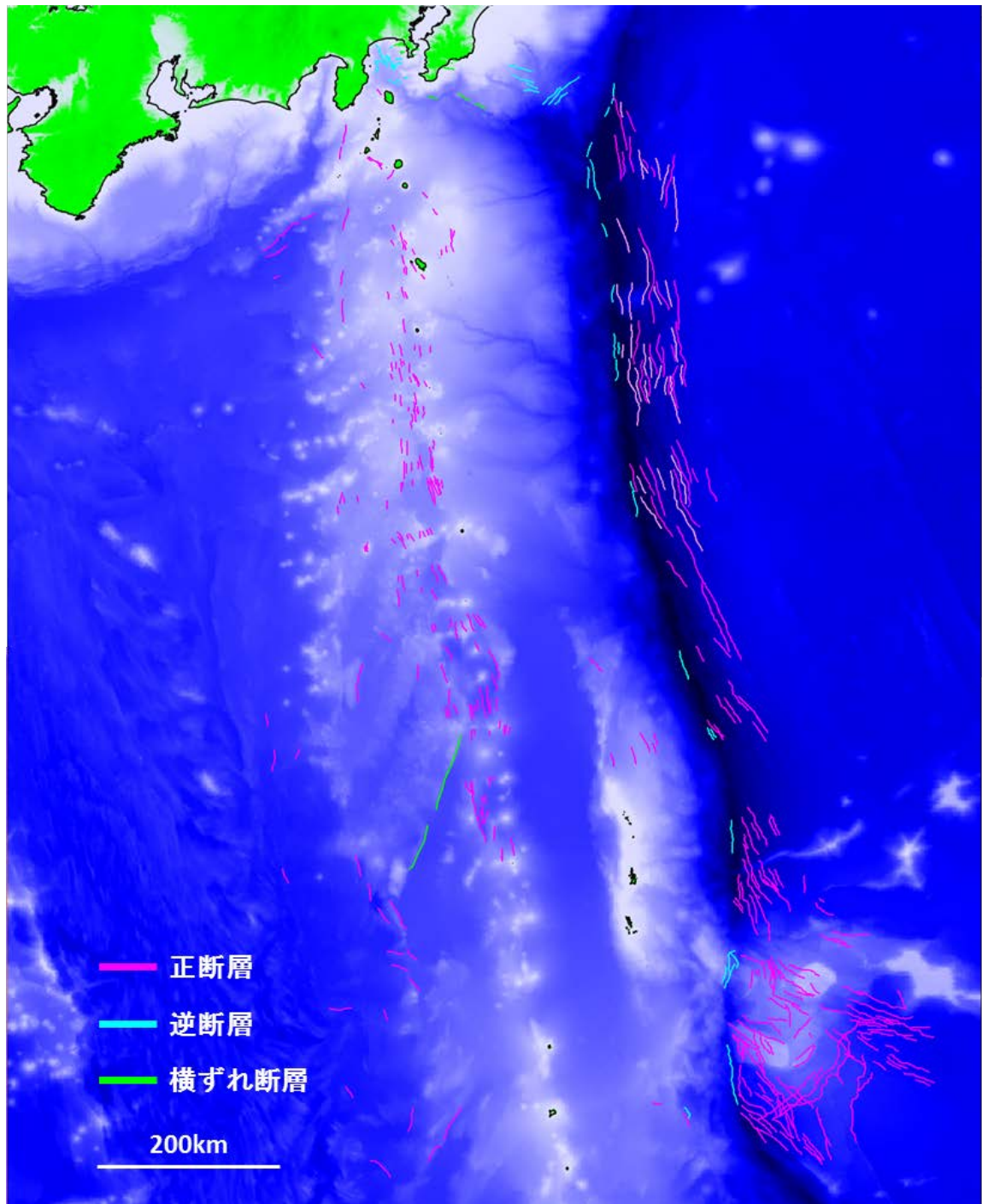


図 92 伊豆・小笠原海域の断層分布図

表11は、平成29年度の断層解釈結果を、海域別に要約したものである。

表 11 伊豆・小笠原諸島海域における断層解釈結果

海域	断層数	断層の特徴・傾向
相模湾	33	相模トラフの陸側に横ずれ成分を持つ逆断層が発達
房総沖	16	相模トラフの陸側にプレート境界からの分岐断層が発達、トラフ底には横ずれ断層が発達
火山フロント／背弧域	199	北部では背弧リフトを形成する正断層が発達、南部では海底火山山体に正断層が発達
伊豆・小笠原海溝	224	太平洋プレート内に正断層が海溝と同方向に発達

今回の解釈対象領域には、反射法地震探査測線密度の低いエリアが存在した。測線が全くないエリアでは、海底地形には明瞭なリアメントが現れておりそれが断層である可能性があっても、断層特定に至っていない。今後、最近の新規に取得された新しい調査データが加わり解釈することで、新たな断層分布が明らかになるとともに、既往の断層の形状や位置データの精度が上がるなど、ここで構築された断層データベースの更新が行われれば、断層モデルのさらなる詳細検討にも有益になると考える。

(e) 参考文献

- Hirata, N., H. Kinoshita, H. Katao, H. Baba, Y. Kaiho, S. Koresawa, Y. Ono, and K. Hayashi, Report on DELP 1988 Cruises in the Okinawa Trough, Part3. Crustal structure of the southern Okinawa Trough, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 66, 37-70, 1991.
- 星 一良, 柳本 裕, 秋葉文雄, 神田慶太, 反射法地震探査解釈による伊豆・小笠原弧堆積盆の地質構造と発達史, 地学雑誌, 124(5), 847-876, 2015.
- Iwasaki, T., N. Hirata, T. Kanazawa, J. Melles, K. Suyehiro, T. Urabe, L. Moller, J. Makris, and H. Shimamura, Crustal and upper mantle structure in the Ryukyu Island Arc deduced from deep seismic sounding, Geophys. J. Int., 102, 631-651, 1990.
- 泉 紀明, 西澤あずさ, 及川光弘, 木戸ゆかり, 後藤秀照, 渡辺満久, 鈴木康弘, 中田 高, 150m グリッド DEM から作成した伊豆・小笠原海溝周辺の 3D 海底地形, 海洋情報部研究報告, 52, 2015.
- 地震調査委員会, 塩沢断層帯・平山-松田北断層帯・国府津-松田断層帯(神縄・国府津-松田断層帯)の長期評価(第二版), 地震調査研究推進本部, 2015.



- 貝塚爽平, 小池一之, 遠藤邦彦, 山崎晴雄, 鈴木毅彦編, 日本の地形4 関東・伊豆小笠原, 東京大学出版会, 2007.
- 金田謙太郎, 小笠原海台南東海域における下部地殻内低速度構造, 海洋情報部研究報告, 海上保安庁, 2014.
- 金田謙太郎, 西澤あずさ, 及川光弘, 太平洋プレート北西部およびフィリピン海プレートにおける大規模な地震波速度構造探査, 地学雑誌, 124, 787-811, 2015.
- 気象庁, 平成22年12月地震・火山月報(防災編), 2010.
- 木崎甲子郎編, 「琉球弧の地質史」, 沖縄タイムス社, 11-18, 1985.
- Kodaira, S., T. Iwasaki, T. Urabe, T. Kanazawa, F. Egloff, J. Makris, and H. Shimamura, Crustal structure across the middle Ryukyu trench obtained from ocean bottom seismographic data, *Tectonophysics*, 263, 39-60, 1996.
- Kodaira, S., N. Noguchi, N. Takahashi, O. Ishizuka, and Y. Kaneda, Evolution from forearc oceanic crust to island arc crust: a seismic study along the Izu-Bonin forearc, *J. Geophys. Res.*, 115, 2010.
- Kodaira, S., T. Sato, N. Takahashi, S. Miura, Y. Tamura, Y. Tatsumi, Y. Kaneda, New seismological constraints on growth of continental crust in the Izu-Bonin intra-oceanic arc, *Geology*, 35, 1031-1034, 2007.
- Kodaira, S., T. Sato, N. Takahashi, M. Yamashita, T. No, and Y. Kaneda, Seismic imaging of a possible paleo-arc in the Izu-Bonin intraoceanic arc and its implications for arc evolution processes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, 2008.
- Kodaira, S., K. Uhira, T. Tsuru, H. Sugioka, K. Suyehiro, and Y. Kaneda, Seismic image and its implications for an earthquake swarm at an active volcanic region off the Miyakejima-Kozu-shima, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 2002.
- Loveless, J. P. and M. J. Meade, Geodetic imaging of plate motions, slip rates, and partitioning of deformation in Japan, *Journal of Geophysical Research*, 115, B02410, DOI:10.1029/2008JB006248, 2010.
- 松本正純, 野田直樹, 西下厚志, 河原木一, 小澤誠志, 田中喜年, 飯塚正城, 金田謙太郎, 斉藤昭則, 熊川浩一, 加藤正治, 泉紀明, 南鳥島周辺海域(MTr7, MTr5), 九州・パラオ海嶺(SPr11, KPr6), 及び大東海嶺(ODr9)における精密地殻構造探査概要, 海洋情報部技報, 海上保安庁, 2007.
- 森下泰成, 小笠原海台の島弧への衝突, 水路新技術講演集, 23, 2009.
- Nagumo, S., H. Kinoshita, J. Kasahara, T. Ouchi, H. Tokuyama, T. Asamura, S. Koresawa, and H. Akiyoshi, Report on DELP 1984 Cruises in the Middle Okinawa Trough, Part2. Seismic Structural Studies, *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 61, 167-202, 1986.
- Nakahigashi, K., M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Yamada, R. Hino, T. Sato, K. Uehira, …… and T. Kanazawa, P-wave velocity structure in the southernmost source region of the 2011 Tohoku earthquakes, off the Boso Peninsula, deduced by an ocean bottom seismographic survey, *Earth Planets and Space*, 2012.

- 中村一明, 島崎邦彦, 相模・駿河トラフとプレート沈み込み, 科学, 51, 490-498, 1981.
- Nishimura, T., Back-arc spreading of the northern Izu-Ogasawara (Bonin) Islands arc clarified by GPS data, *Tectonophysics*, 512, 60-67, 2011.
- Nishizawa, A., K. Kaneda, and M. Oikawa, Backarc basin oceanic crust and uppermost mantle seismic velocity structure of the Shikoku Basin, south of Japan, *Earth Planets Space*, 63, 151-155, 2011.
- No, T., N. Takahashi, S. Miura, M. Yamashita, Y. Kido, and S. Kodaira, Deformation of the Manazuru Knoll in Sagami Bay, central Japan, associated with subduction of the Philippine Sea plate, *Planets Earth and Space*, 66:109, 2014.
- 野田直樹, 松本正純, 小澤誠志, 田中喜年, 及川光弘, 阿部則幸, 丸山章子, 杉村哲也, 小山あずさ, 南鳥島北西方海域における精密地殻構造探査～2005年度第13-15次大陸棚調査～MTr6測線, 海洋情報部技報, 海上保安庁, 2007.
- 及川光弘, 道順茂, 田中喜年, 野田直樹, 倉持幸志, 小笠原海台周辺における地殻構造探査(0Gr15測線及び0gmA - 0GmF測線)の速報, 海洋情報部技報, 海上保安庁, 2008.
- 岡村行信, 村上文敏, 西村昭, スミスリフトの第四紀後期の堆積過程と断層運動, 地学雑誌, 100(4), 464-474, 1991.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, ……., S. Harder, Earthquake Source Fault Beneath Tokyo, *Science*, 309(5733), 2005.
- Sato, T., G. Fujie, S. Kodaira, K. Shiraishi, S. Abe, and E. Asakawa, Crustal imaging by pre-stack depth migration using integrated data from MCS and OBS survey, *Proc. of the 11th SEGJ International Symposium*, 2013.
- 首都直下地震モデル検討会, 首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書図表集, 内閣府, 2013.
- 田賀傑, 西下厚志, 木場辰人, 福山一郎, 河本行弘, 加藤正治, 熊川浩一, 九州パラオ海嶺南部及び小笠原海台周辺における精密地殻構造探査, 海洋情報部技報, 海上保安庁, 2008.
- Takahashi, N., S. Kodaira, Y. Tatsumi, M. Yamashita, T. Sato, Y. Kaiho, S. Miura, T. No, K. Takizawa, and Y. Kaneda, Structural variations of arc crusts and rifted margins in the southern Izu-Ogasawara arc-back arc system, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, 2009.
- 高橋成実, 小平秀一, 佐藤壮, 山下幹也, 海宝由佳, 三浦誠一, 野徹雄, ……., 金田義行, 伊豆・小笠原島弧の速度構造, 地学雑誌, 124, 813-827, 2015.
- Takahashi, N., M. Yamashita, S. Kodaira, S. Miura, T. Sato, T. No, K. Takizawa, Y. Tatsumi, and Y. Kaneda, Rifting structure of central Izu-Ogasawara (Bonin)

- arc crust: Results of seismic crustal imaging, Springer book, Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin, 2011.
- 田中喜年, 小澤誠志, 宮寄進, パレスベラ海盆メガムリオン域における精密地殻構造調査～2005年度第9-11次大陸棚調査(SPr6, SPr8及びSPr9測線)～, 海洋情報部技報, 海上保安庁, 2007.
- Terakawa, T. and M. Matsu'ura, The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, *Tectonics*, 29, 2010.
- 徳山英一, 本座栄一, 木村政昭, 倉本真一, 芦寿一郎, 岡村行信, 荒戸裕之, ……., 向山建二郎, 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*, 13, 27-53, 2001.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, Free software helps map and display data, *Eos Trans. AGU*, 72, 441, 445-446, 1991.