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	技術研究員	仲西 理子
国立研究開発法人 海洋研究開発機構	研究員	山下 幹也
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	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処理を行い、反射法地震探査断面(以下、「反射記録断面」)の 品質および深部イメージングの向上を図る。こうした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、断層およびその三次元的な空間分布を解釈・評価 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 場所を評価する。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、地震探査データ、 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(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・小笠原諸島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・小笠原諸島海域)をサブテーマ3に提供した。

6) 平成 30 年度:

収集した南海トラフ海域の反射法データの一部(東海沖・四国沖)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(暫 定版)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(南海トラフ海域の一部:東海沖〜熊野灘、室戸沖、宮崎 沖)をサブテーマ3に提供した。

7) 平成 31 年度(令和元年度):

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(東海沖〜熊野灘) 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、同海域全域の三次 元速度構造モデル(平成 30 年度モデルの見直し・改訂版)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 海トラフ海域全域)をサブテーマ3に提供する。

(2) 平成 30 年度の成果

(a) 業務の要約

平成30年度は南海トラフ海域を対象として、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、経済産業省より提供された基礎物理探査のデータから、昭 和46年度大陸棚石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「東海」(以下、『S46基礎物理探査 「東海」』)、昭和52年度大陸棚石油・天然ガス基礎調査基礎物理探査「下北―東海沖海 域」(以下、『S52基礎物理探査「下北―東海沖海域」』)および昭和58年度国内石油・天 然ガス基礎調査基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」(以下、『S58基礎物理探査「東 海〜熊野灘」「四国沖」』)を選択し、それらのうち東海沖および四国沖の測線長計約1,700 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やノイズを取り除く処理や、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、産総研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、 S46基礎物理探査「東海」について再処理できたMCSデータは全15測線のうち2測線のみで、 残りの13測線については重合後デジタルデータが存在せずフィルム断面図(測線長計約500 kmのアナログデータ)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。

南海トラフ海域全域に対し、三次元の速度構造モデル(暫定版)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、四万十層群相当層上限(以下、「四万十上限」)、フィリピン海プレート上面、地殻内反射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や海上保安庁他のOBS調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を構築した。また、平成29年度に構築した伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデルについて、速度情報を追加したうえで見直し・改訂作業を行い、再構築した。

東海沖~熊野灘、室戸沖および宮崎沖海域の反射法データ(一部再解析データ)を用い て、公刊文献、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、南海トラフ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データの再処理については、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、時間マイグレーション、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。

産総研のSCSデータについては、日本海海域のデータに対して長周期のノイズを除去する 事を目的として帯域通過フィルターの値を変更し、25~30 Hz以下の反射波を除去した。ま た、南海トラフ海域のデータに対して、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、南海トラフ海域全域での海底面、音響 基盤、フィリピン海プレート上面、地殻内反射面およびモホ面のホライズンデータを用い それぞれの境界面形状を作成し、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1km間隔、鉛直方向100m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JAMSTEC、海上保安庁、経済産業省 等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(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、本報告書に使用した図の一部は、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 30 年度は上述したように、S46 基礎物理探査「東海」、S52 基礎物理探査「下北 一東海沖海域」および S58 基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」のうち、約 1,700 km 分の MCS データ再処理作業と約 500 km 分のフィルム断面図(デジタルデータが存在 しない MCS 測線)に対するベクトル化(スキャン・デジタル化)作業を実施した。また、 産総研の SCS データについても再処理作業を実施した。

a) 再解析対象MCSデータの概要

再解析の対象となった S46 基礎物理探査「東海」、S52 基礎物理探査「下北―東海 沖海域」および S58 基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」の各調査における発震 記録例を図1(a)~図1(d)に、周波数成分解析例を図2(a)~図2(d)に示す。

以下に、各調査のデータ概要について記述する。

- S46 基礎物理探査「東海」と S52 基礎物理探査「下北―東海沖海域」(東海沖) 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(図1(a)、図1(b))に波浪ノイズはほとんど確認できない。周波数 成分解析例(図2(a)、図2(b))においても、8Hz以下の周波数成分がかなり 弱いことが確認できる。
- データ取得仕様によれば、S58 基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」(四国 沖)のフィールド記録にはローカットフィルターは適用されていないことになっているが、周波数成分解析例(図2(c)、図2(d))を見ると6Hz以下の周波 数成分がかなり弱いことが分かる。これに起因して、発震記録上(図1(c)、図 1(d))に波浪ノイズ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。
- 高周波数成分は、S46 基礎物理探査「東海」では概ね 60 Hz 程度まで(図2(a))、
 S52 基礎物理探査「下北―東海沖海域」(東海沖)と S58 基礎物理探査「東海~
 熊野灘」「四国沖」(四国沖)では概ね 75 Hz 程度まで確認できる(図2(b)、図2(c)、図2(d))。



図1(a) 発震記録例(S46基礎物理探査「東海」)



図1(b) 発震記録例(S52基礎物理探查「下北一東海沖海域」)



図1(c) 発震記録例(S58基礎物理探查「東海~熊野灘」「四国沖」)



図1(d) 発震記録例(S58基礎物理探查「東海~熊野灘」「四国沖」)



図 2 (a) 周波数成分解析例 (S46基礎物理探查「東海」)





b) MCSデータ再解析作業の概要

データ再処理作業は、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ー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。なお、 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。

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。突発的で比較的 振幅の強い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 F-X 速度フィルターを適用した。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 法を用いた。長周期多重反射波の抑制に は SRME 法を用いた。SRME 法は、複雑な海底地形でも多重反射波の抑制効果が高く、 反射波の損傷も小さく抑えられるため、全測線に適用した。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、S52基礎物理探査 「下北一東海沖海域」調査測線内の一部の区間のみ(選択範囲)に PSTMを適用した。 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、経済産業省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 フォーマット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。

c) MCSデータ再解析作業の詳細と結果

データ再解析のうち、再処理作業については、図3に示す処理フローに基づき実施 した。



データ再解析作業は、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。

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1に、標準解析の処理パラメータの詳細について示す。

r	-	_				
	Process	Parameters	東海~熊野灘」 四国沖」(四国沖)	└ ト北──東海泙海域」(東海沖)	│ 東海」	
-						
	Data Check					
2	Format Conversion			SEG-1 to SuperA format		
3	Geometry Application					
4	Irace Edit	Irace Edit		Manual		
		Despike		0 1 17 0 1		
		Method		Spike and Zero Search		
		Spike Search Gate Length		200 msec		
5	Signature Dephasing	Gun Signature	Use	Avaraged Sea Bottom Reflect	stion	
		Polarity	S	ea Bottom Reflector is positi	ve	
6	Bubble Attenuation	Gun Signature	A1	veraged Sea Bottom Reflection	on	
7	Preliminary Velocity Analysis	Method	C	Constant Velocity Scan Method		
		Analysis Interval	2000 m			
8	Pre-Stack Noise Attenuation	F-X Edit (1st)				
		Method		F-X Projection Filter	F-X Projection Filter	
		Spacial Gate Length	(not applied)	11 traces	11 traces	
		Time Gate Length		400 msec	400 msec	
		Thresfold Level		2.0	2.0	
		Frequency Range		0/6 - 120/130 Hz	0/6 - 120/130 Hz	
		F-X Edit (2nd)				
		Method		F-X Projection Filter	F-X Projection Filter	
		Spacial Gate Length	(not applied)	11 traces	11 traces	
		Time Gate Length	400 msec 2.0 0/2 - 6/16 Hz		400 msec	
		Thresfold Level			2.0	
		Frequency Range			0/2 - 6/16 Hz	
		F-X Velocity Filter				
		Domain			Shot Gather	
		Operator Mode			Reject	
		Operator Length	(not applied)		21 traces	
		Velocity Range			0 ~ 2600/2800 m/sec	
		Frequency Range			3/3 - 64/70 Hz	
		Tempolary AGC Gate Length			300 msec	
		F-X Prediction Filter				
		Domain	Shot Gather		CMP Gather	
		Operator Type	Two-Side		Two-Side	
		Operator Length	11 traces		11 traces	
		Gate Length	48 traces		24 traces	
		Time Gate Length	500 msec		500 msec	
		Time Gate Overlap Length	250 msec		250 msec	
		Tempolary AGC Gate Length	300 msec		300 msec	
9	Surface-related	Survay Type	2D	2D	2D	
	Multiple Elimination	Adaptive Subtraction(1st)				
		Domain	Common Channel	Common Channel	Common Shot	
				Common Shot (77-21_m)	*	
		Operator Length	200	200	200	
		Time Window	1500 msec	1500 msec 1000 msec (77-21 m)	1500 msec	
		Space Window	1000 traces	all traces	24 traces	
		Adaptive Subtraction(2nd)				
		Domain	Common Channel	Common Channel Common Shot (77-21 m)	Common Shot	
		Operator Length	48	48	48	
		Time Window	100 or 500 msec	100 msec	500 msec	
		Space Window	11 traces	11 traces	5 or 11 traces	
10	Radial Trace Deconvolution	Transformed Parameter				
		Velocity Range	-5500 ~ 5500 m/sec	-5500 ~ 5500 m/sec	-5500 ~ 5500 m/sec	
		Deconvolution Parameter				
		Gate Length	3000 msec	3000 msec	3000 msec	
		Operator Length	100 msec	100 msec	400 msec	
		Prediction Distance	48 msec	64 msec	64 msec	
		de				

表1 標準解析の処理パラメータ詳細

11	First Break Mute	Start Time	Sea Bottom - 15msec		
		Taper Length		8 msec	
		Sliding Velocity		1500 m/sec	
12	Amplitude Recoverv	Method	Geometrical Spreading + AGC		C
		AGC Gate Length	600 msec	600 msec	1000 msec
13	Deconvolution	Method	Surface (Consistent	Surface Consistent
		Mode	Time Ir	nvariant	Time Invariant
		Gate Start Time at 0m offset	Sea Bottom	n + 100msec	Sea Bottom + 100msec
		Gate Length	2000	msec	2000 msec
		Operator Length	350	msec	300 msec
		Prediction Distance	4 m	4 msec	
		Gate Sliding Velocity	1600 m/sec		1600 m/sec
		White Noise	1.0	005	1.005
14	CMP Sort	CMP Interval	25 m Unlimited		50 m
		Radius Limit			Unlimited
15	Line Merge				
16	Velocity Analysis	Method	C	Constant Velocity Scan Meth	
		Analysis Interval	1000 m		
17	NMO Correction	Stretch Factor		1.7	
18	Parabolic Radon Transform	Mode	Multiple Extraction	Τ	T
	(optional)	Reference Offset for Moveout	2750 m	(not applied)	(not applied)
		Transform Moveout Range	-150 ~ 750 msec		
		Filter Moveout Range	-150 ~ 100 msec		
19	Outside Mute	Base Time	Sea Bottom	– 100 msec	Sea Bottom – 100 msec
		Start Time	1000	msec	1000 msec
		Start Offset	100	00 m	1000 m
		Taper Length	100 msec		100 msec
		Sliding Velocity	2000 m/sec		1800 m/sec
20	Trace Scaling	Method		AGC	
		Gate Length	600 msec		
21	CMP Stack	Method	Normal Stack		
		Divisor Type	Normalized by Square Root of Numb		er of Fold
22	Datum Correction	Datum	Mean Sea Level	Mean Sea Level	Mean Sea Level
		Time Shift	15.33 msec	16.67 msec	16.67 msec
23	Signal Enhancement	Method	F-X Predi	ction Filter	F-X Prediction Filter
		Operator Length	7 CMPs		9 CMPs
		Gate Length	50 CMPs		50 CMPs
		Time Gate Length	1000 msec		1000 msec
		Time Gate Overlap Length	500 msec		500 msec
24	Band-pass Filter	Method	Time Variant		Time Variant
		Operator Length	300 msec		300 msec
		Gate Overlap Length	1000 msec		1000 msec
		Base Time	Sea Bottom		Sea Bottom
		Pass Band	10/10 - 60/60 Hz (0.0 - 1.5 sec)		10/10-60/60 Hz (0.0-1.5 sec)
			6/6 - 50/50 H	6/6 - 50/50 Hz (1.5 - 2.5 sec)	
			6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)		6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)
25	Trace Scaling	Method	Trace Sigma Scale		
26 Post-Stack Time Migration Method		T-X FD Migration			
		Approximation Angle	45 degree 4 msec Stacking Velocity		
		Extrapolation Step			
		Velocity Type			
		Velocity Scaling Factor	90 %		
27	Depth Conversion	Method	Vertical Stretch		

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、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(以下、「SEG-Y」)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。



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)

周波数成分解析例(図2(a)~図2(d))から、6Hz以下の周波数成分はかなり弱 く、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合す ることでウェーブレットを抽出した。ここで、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 バブル抑制処理 (Bubble Attenuation)

波形変換処理結果(図8、図9)を確認したところ、バブルと思われる繰り返し 波が顕著に認められたため、バブル抑制処理を適用した。バブル成分は後のデコン ボリューションにより抑制可能であるが、SRME に悪影響を及ぼす可能性があるため、 ここで抑制することとした。また、ここでは海底反射波形から抽出したウェーブレ ットにおいて、後続の繰り返し波を抑制するオペレータを設計し、これをフィール ド記録に適用した。抽出した海底面反射波形に対するバブル抑制処理例を図10に、 ニアトレース記録に対するバブル抑制処理の適用前後の比較を図11に示す。

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。



図10 海底面波形から抽出したウェーブレットのバブル抑制処理例



図11 ニアトレース記録に対するバブル抑制処理の適用前後の比較

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

重合前記録の品質向上を目的として、ノイズ抑制処理を適用した。まず、S46 基礎物理探査「東海」とS52 基礎物理探査「下北―東海沖海域」(東海沖)では、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。S46 基礎物理探査「東海」ではさらに、一部の発震記録に見られた線形ノイズを抑制するためにF-X 速度フィルターを適用した。最後に全調査に対し、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。

ここで、図 12~図 15 に重合前ノイズ抑制処理の適用結果の例を示す。図 12(a)~ 図 12(c)と図 13 は S46 基礎物理探査「東海」の例で、図 14(a)、図 14(b)および図 15 は S52 基礎物理探査「下北一東海沖海域」(東海沖)の例である。また、図 12(a) と図 14(a)は F-X エディットの発震記録での適用例、図 12(b)は F-X 速度フィルタ ーの発震記録での適用例、図 12(c)と図 14(b)は F-X 予測フィルターの発震記録で の適用例、図 13 と図 15 は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 している。

以上、F-X エディット、F-X 速度フィルターおよび F-X 予測フィルターを適用した ことでランダムノイズや線形ノイズが抑制され、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13 重合前ノイズ抑制処理適用前後の比較 (S46基礎物理探査「東海」重合記録)



図14(a) F-Xエディット適用例 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」発震記録)



図14(b) F-X予測フィルター適用例 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」発震記録)



図15 重合前ノイズ抑制処理適用前後の比較 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」重合記録)

③ 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、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 16~図 21 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。ここで、図 16~図 18 は深海域の例、図 19~図 21 は浅海域の例である。図 18 および図 21 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16 SRME法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 発震記録:深海域の例)



図17 SRME法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 重合記録:深海域の例)



図18 SRME法で予測された多重反射波の重合記録 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖):深海域の例)



図19 SRME法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 発震記録:浅海域の例)



図20 SRME法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 重合記録:浅海域の例)



図21 SRME法で予測された多重反射波の重合記録 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖):浅海域の例)

10 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。オフセットー時間領域 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、放射速度一時間領域 (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 22~図 27 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。ここで、図 22~図 24 は深海域の例、図 25~図 27 は浅海域の例である。図 24 および図 27 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22 RTD法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 発震記録:深海域の例)



図23 RTD法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 重合記録:深海域の例)



図24 RTD法で予測された多重反射波の重合記録 (S58基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」(四国沖):深海域の例)



図25 RTD法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 発震記録:浅海域の例)



図26 RTD法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 重合記録:浅海域の例)



図27 RTD法で予測された多重反射波の重合記録 (S58基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」(四国沖):浅海域の例)

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。

⑫ 振幅補償 (Amplitude Recovery)

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

13 デコンボリューション (Deconvolution)

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

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

ここで、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。

⑭ 共通反射点編集 (CMP Sort)

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

⑮ 測線接続 (Line Merge)

複数の測線に分けて取得されたデータについて、フォーマット変換(前述②)の 段階では接続が困難であ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。

16 速度解析 (Velocity Analysis)

定速度走査法 (Constant Velocity Scan) を用いて、1km ごと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 Om 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。 なお、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ー情報の誤差 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 28 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 の図を見ると、残差静補正適用後では、赤矢印で示した位置で海底面のがたつきや 形状変化が認められた。残差静補正処理テストの結果、全対象調査で海底面のがた つきや反射波の連続性の低下が確認されたため、本解析では残差静補正は適用しな いこととした。



図28 残差静補正適用前後の比較(重合記録)

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

SRME 法や RTD 法で抑制できなかった多重反射波を抑制するために、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に限り、PRT 法を適用することとした。

図 29~図 34 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。ここで、図 29~図 31 は深海域の例、図 32~図 34 は浅海域の例である。図 31 および図 34 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 (Dip Move Out 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。

ここでは、対象調査の受振点間隔が本解析の仕様の対象外であるため、DMO 補正 処理は適用しなかった。



図29 PRT法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) NMO補正後CMP記録:深海域の例)



図31 PRT法で予測された多重反射波の重合記録 (S58基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」(四国沖):深海域の例)



図32 PRT法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) NMO補正後CMP記録:浅海域の例)



図33 PRT法適用前後の比較 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖) 重合記録:浅海域の例)


図34 PRT法で予測された多重反射波の重合記録 (S58基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」(四国沖):浅海域の例)

19 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。

② 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。

② 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。

② 基準面補正 (Datum Correction)

基準面を平均海水面とするために、震源の深度、受振器ケーブルの深度および海水中の音速速度(1,500 m/sec)を参照して、基準面補正を行った。

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。

④ 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・バリアント型の帯域通過フィルターを適用した。図 35 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 36 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35 周波数成分解析の例



図36 帯域通過フィルター適用前後の比較(重合記録)

② 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 に出力した。

③ 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 ー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 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。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 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 37(a)と図 37(b)に、 重合後時間マイグレーション時間断面図の例を図 38(a)と図 38(b)に、重合後時間 マイグレーション深度断面図の例を図 39(a)と図 39(b)に示す。



図37(a) 重合時間断面図(S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」)の例



図37(b) 重合時間断面図(S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」)の例



図38(a) 重合後時間マイグレーション時間断面図 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」)の例



図38(b) 重合後時間マイグレーション時間断面図 (S58基礎物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」)の例



図39(a) 重合後時間マイグレーション深度断面図 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」)の例



図39(b) 重合後時間マイグレーション深度断面図 (S58基礎物理探査「東海〜熊野灘」「四国沖」)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。標準解析(前項i))における①から®の処理に続いて、以下の処理を実 施した。表2に、PSTM 解析の処理パラメータの詳細について示す。

	Process	Parameters	「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖)	「下北—東海沖海域」(東海沖)	「東海」
1-18	same as standard analysis				
19	PSTM Velocity Analysis	Step 1	(not applied)		(not applied)
		Method		Constant Velocity Scan Method	
		Analysis Interval		1000 m	
		Step 2			
		Method		Percentage Velocity PSTM Stack	
		Reference Velocity		Step1 Velocity	
		Analysis Interval		1000 m	
20	Pre-Stack Time Migration	Туре		Common Offset PSTM	
		Method		Kirchhoff	
		Offset Interval		100 m	
		Maximum Angle		60 degree	
21	Outside Mute	Base Time		Sea Bottom - 100 msec	
		Start Time		1000 msec	
		Start Offset		1000 m	
		Taper Length		100 msec	
		Sliding Velocity		2000 m/sec	
22	Trace Scaling	Method		AGC	
		Gate Length		600 msec	
23	CIP Stack	Method		Normal Stack	
		Divisor Type		Normalized by Number of Fold	
24	Datum Correction	Datum		Mean Sea Level	
		Time Shift		16.67 msec	
25	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	
26	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 - 2.5 sec)	
				6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)	
27	Trace Scaling	Method		Trace Sigma Scale	
28	Depth Conversion	Method		Vertical Stretch	

表2 PSTM解析の処理パラメータ詳細

19 PSTM速度解析 (PSTM Velocity Analysis)

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

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:標準解析の速度解析(前項i)の16)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。

2 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 PSTM 速度解析(上記¹¹¹¹) 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。

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。

② 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。

② CIP重合 (Common Imaging Point 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。

2 基準面補正 (Datum Correction)

基準面を平均海水面とするために、震源の深度、受振器ケーブルの深度および海水中の音速速度(1,500 m/sec)を参照して、基準面補正を行った。

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 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・バリアント型の 帯域通過フィルターを適用した。

⑦ 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、重合前時間マイグレーション時間断面図として SEG-Y に出力した。

深度変換(Depth Conversion)

標準解析の深度変換(前項i)の2の)と同様の手法で深度変換を実施し、重合前時間マイグレーション深度断面図として SEG-Y 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 40 に、重合前時間マイグレーション深度断面図の例を図 41 に示す。







図41 重合前時間マイグレーション深度断面図 (S52基礎物理探査「下北―東海沖海域」)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。標準解析(前項i))における①から®の処理に続いて、以下の処理を 実施した。表3に、MDRS 解析の処理パラメータの詳細について示す。

	Process	Parameters	「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖)	「下北—東海沖海域」(東海沖)	「東海」
1-18	same as standard analysis				
19	Band-pass Filter	Method	(not applied)	Space Time Invariant	(not applied)
		Operator Length		600 msec	
		Pass Band		6/8 - 120/125 Hz	
20	Trace Scaling	Method		AGC	
		Gate Length		600 msec	
21	Multi−dip CRS Scan	Number of CMPs		41 CMPs (1000 m)	
		CMP Offset Limit			
		Time (msec)		0, 1000	
		Offset (CMPs)		7, 41	
		Surface Velocity		1500 m/sec	
		Number of Dips		61	
		Dip interval		24 msec/km	
		N-Wave Curvature Range		-0.8 - 1.2	
		Semblance Window		32 msec	
		Stretch Limit		1.4	
		Guide Velocity		Stacking Velocity	
		Velocity Guide Scale Range		90 - 150%	
22	MDRS Stack	Dip Range		-500 ~ 500 msec/km	
		No.of Stack Subsection		2	
23	Datum Correction	Datum		Mean Sea Level	
		Time Shift		16.67 msec	
24	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	
25	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 - 2.5 sec)	
				6/6 - 40/40 Hz (3.0 - END sec)	
26	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 %	
27	Depth Conversion	Method		Vertical Stretch	

表3 MDRS解析の処理パラメータ詳細

19 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。

2 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。

② 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。

② 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。

② 基準面補正 (Datum Correction)

基準面を平均海水面とするために、震源の深度、受振器ケーブルの深度および海水中の音速速度(1,500 m/sec)を参照して、基準面補正を行った。

④ 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、標準解析の帯域通過フィ ルター(前項i)の(24)と同様のタイム・バリアント型の帯域通過フィルターを適用 し、MDRS 重合時間断面図として SEG-Y に出力した。 ③ 重合後時間マイグレーション (Post-Stack Time Migration)

標準解析の重合後時間マイグレーション(前項i)の20)と同様の手法で重合後時間マイグレーションを適用し、MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図として SEG-Yに出力した。

⑦ 深度変換 (Depth Conversion)

標準解析の深度変換(前項i)の2)と同様の手法で深度変換を実施し、MDRS 重合時間マイグレーション深度断面図として SEG-Y 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 42 に、MDRS 重合時間マイグレーション時間断面図の例を図 43 に、MDRS 重合時間マイグレーション 深度断面図の例を図 44 に示す。



図42 MDRS重合時間断面図(S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」)の例



図43 MDRS重合時間マイグレーション時間断面図 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」)の例



図44 MDRS重合時間マイグレーション深度断面図 (S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」)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と、S46 基礎物理探査「東海」の既存結果のベクトル化対象 測線である。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4に、ベクトル 化の処理パラメータの詳細について示す。

<u> </u>	Process	Parameters	「東海~能野灘」「四国沖」(四国沖)	「下北	「宙海」
	1100033	T al anic (CF3			· */#]
1	Scan and Vectorizing	Scan Target	Paper Section	Paper Section	Paper Section
2	Signal Enhancement	F-X Prediction Filter			
	-	Operator Length	7 CMPs		
		Gate Length	49 CMPs		
		Time Gate Length	1000 msec		
		Time Gate Overlap Length	500 msec		
3	Phase Compensation	Туре	Zero Phase Use Avaraged Sea Bottom Reflection Sea Bottom Reflector is positive		
		Wavelet			tion
		Polarity			ve
4	K Filter	Туре		Not	
		Wavelength	(not a	applie d)	10 (1/km)
		Operator Length			600 m
5	Zero Offset Demultiple	Method	Static Shift (Use Seafloor Reflection Time)		n Time)
		Filter Length		400 msec	
6	Post-Stack Time Migration	Method		T-X FD Migration	
		Approximation Angle		45 degree	
		Extrapolation Step		4 msec	
		Velocity Type	Stacking	Velocity (Reprocessing or Ext	traplation)
		Velocity Scaling Factor	90 %		
7	Band-pass Filter	Method	Space Time Invariant		
		Operator Length		1500 msec	
		Pass Band	2/4 - 120/125 Hz		
8	Depth Conversion	Method		Vertical Stretch	

表4 ベクトル化の処理パラメータ詳細

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 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 45 にウェーブレット抽出までの過程を、図 46 に位相補償適用前後の比較を示 す。図 46 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 47 (a) と図 47 (b) 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 47 (a) と図 47 (b) 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45 ベクトル化記録から抽出したウェーブレットの例



図46 位相補償適用前後の比較



図47(a) 再処理結果との比較(位相補償適用前)



図47(b) 再処理結果との比較(位相補償適用後)

④ Kフィルター (K Filter)

S46 基礎物理探査「東海」に対し、浅海域で顕著に見られたジッタリング(波のがたつき)を抑制する目的で、Kフィルターを適用した。

発震点間隔と受振点間隔の関係により、各 CMP でのオフセット分布に複数のパタ ーンが存在する場合がある。S46 基礎物理探査「東海」では発震点間隔が 50 m、受 振点間隔が 100 m であり、本来はオフセット分布のパターンは1 つであるが、既往 処理では2 つの発震記録を垂直重合したため発震点間隔は 100 m 相当となり、オフ セット分布は2パターン存在する。オフセット分布の違いに起因する重合トレース の品質の違いは浅海域でより顕著であり、反射面のがたつきとして現れる。このが たつきのことをジッタリングと呼ぶ。ジッタリングは空間方向に周期的に発生する ため、ノッチタイプのKフィルター(特定波数を抑制するフィルター)により抑制 可能である。

図 48 に、K フィルターの適用結果の例を示す。図中に赤丸で示した範囲がジッタ リングの顕著な領域であるが、本手法の適用により、がたつきが抑制されたことが 分かる。



図48 Kフィルター適用前後の比較(重合記録)

⑤ 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 49 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、本手法の適用により、多重反射波がほぼ抑制された ことが分かる。

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 に出力した。



図49 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)

標準解析の重合後時間マイグレーション(前項i)の3)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。なお、ベクトル化処理と同時に再処理も実施した測線については、再処理で求まった重合速度を採用した。S46 基礎物理探査「東海」で再処理が行えなかった 測線については、既存の紙の重合断面図に速度テーブルの記載が無かったため、交差する再処理測線から速度関数を外挿して用いた。

⑦ 帯域通過フィルター (Bandpass Filter)

一部の調査では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・バリアント型の帯域通過フィルターを適用し、 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 に出力した。

⑧ 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、重合後時間マイグレーション(上記⑥)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 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 50 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 51 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 52 に示す。



図50 ベクトル化処理の重合時間断面図(S46基礎物理探査「東海」)の例



図51 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 (S46基礎物理探査「東海」)の例



図52 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 (S46基礎物理探査「東海」)の例

d) SCSデータの再処理作業の詳細と結果

本作業は、産総研より借用した 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。

本年度はまず、本プロジェクト・アドバイザーからの要望・コメントに従い、平成 25・26 年度に再処理済みであった日本海海域の産総研測線 SCS データ(測線数 1,111、 測線長約 118,000 km) について、再度処理パラメータを見直し、主として長周期ノイ ズの除去を行った。平成 25・26 年度の再処理作業では、深部の反射波も考慮して長周 期の波長もできるだけ残す処理にしていた。しかしながら、SCS データを用いた断層 解釈においては、深部の反射波よりも浅部の反射波に注目することが多いことから、 今年度改めて長周期のノイズを除去し、浅部の反射波の解像度を上げる処理を実行す ることとした。この実際の作業においては、主に帯域通過フィルターで 25~30 Hz 以 下の反射波を除去し、さらにその他のパラメータについても再考し、再処理を行った (後述、図 54)。

本年度はさらに、上記同様の処理を南海トラフ海域(gh821:室戸岬沖、gh822:熊 野灘)の SCS データ(測線数 96、測線長約 8,500 km)に対しても行った。

また、既に産総研にて処理済みであった東海沖の調査測線(gh97/ga97:測線数 60、 測線長約7,700 km)の SCS データについても、座標に問題点が見受けられたため、再 処理を行った。具体的な問題として、特に5~10 shot 程度連続して同一の座標が入 力されていることから、産総研処理済みの SCS データをそのまま解釈ソフトウェアに インポートすると、反射記録断面内の反射波が正常に表示されない(図 53(a))。こ の問題を解決するために重複する座標を取り除き、除去した箇所に内挿した座標を補 完した。この結果、当該反射記録断面はすべて、図 53(b)のように改善された。



図53(a) 座標値が重複する反射記録断面(東海沖SCSデータ)の例



図53(b) 座標値重複除去・補完後の反射記録断面(東海沖SCSデータ)の例

本作業ではLandmark 社製 SeisSpace を使用し、以下に詳述するフォーマット変換、 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 54 に処理フローを示す。ここで、上述した測線長は、対象の SCS 調査の発震点間隔が距離ではなく一定時間であることから、測線数ごとの発震点 数から換算した数値である。ここでは、発震点間隔を 25 m として SCS データの再処 理を行った。



図54 産総研の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、25~30 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。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 AGC を適用した。

⑥ ミュート

反射記録断面を解釈する際に、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、断面内で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。

以上の処理フローに従って作成した時間断面図の例を図 55((a)、(b))に示す。

産総研の SCS データは、基礎物理探査や 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極めて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 54)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 55(a) 産総研の SCS 反射記録(時間)断面図の例 (上図:処理前、下図:処理後)



図 55(b) 図 55(a)赤枠内の拡大図(左図:処理前、右図:処理後)

これまでに、本プロジェクトにおいて再処理を行った産総研の南海トラフ海域(一部調査は南西諸島海域または伊豆・小笠原諸島海域に跨る)の SCS データ概要について、表5に示す。

調査名	測線数	Trace 数	測線長(km)
gh97 東海	60	307, 324	7,681.6
gh804	53	166, 979	4, 173. 15
gh792n3	108	521,027	13,025.68
gh802	50	108, 533	2, 713. 325
gh842n4	56	463, 428	11, 585. 7
gh851n3	39	272, 631	6, 815. 775
gh861n3	11	75,141	1, 878. 525
gh871n3	41	257, 558	6, 438. 95
gh881n3	36	218, 952	5, 473. 8
gh891n3	19	88,731	2, 218. 275
gh821	45	169, 436	4, 235. 9
gh822	51	177, 417	4, 435. 425
gh831n2MiyaZakiAB	111		12, 227. 7

表5 再処理を行った産総研の南海トラフ海域の SCS データ概要

(一部調査は南西諸島海域または伊豆・小笠原諸島海域に跨る)

2) 三次元速度構造モデルの作成

断層カタログ作成および断層モデル構築にあたり、様々な機関で取得された反射法 データやそれらの反射記録時間断面を用いた断層解釈結果については、統一された三 次元速度構造モデルを利用して、一様に時間ドメイン(時間軸、時間領域)から深度ド メイン(深度軸、深度領域)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ドメインの反射記録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(深度断面図の作成)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 30 年度は、平成 29 年度に作成した伊豆・小笠原海域(図 56)の三次元速度構造 造モデルの見直しと、南海トラフ海域全域(図 57)を対象に暫定的な三次元速度構造 モデルの作成を実施した。伊豆・小笠原海域の速度構造モデルについては、平成 29 年 度に使用した速度情報に加えて、新規入手の速度データ、および OBS 調査で得られた既 存の速度構造について更新情報が追加されたため、見直しを行い、再構築を行った。ま た、プレート形状についても、伊豆衝突帯周辺の複雑な構造を再現できるように設定し 直した。

三次元速度構造モデルを構築するにあたっては、反射法データの処理過程で使われ る重合速度、OBS 調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 56 伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデル作成領域(赤枠)



図 57 南海トラフ海域の三次元速度構造モデル作成領域(赤枠)

a)伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデルの再構築

平成 30 年度はまず、伊豆・小笠原海域の反射記録断面を用いて、海底面、音響基盤、 堆積層最下面、地殻内反射面およびモホ面に相当する反射波ホライズンを再解釈し、 プレート構造解釈について見直しを行い、再解釈した各ホライズンに基づき、三次元 層構造の作成を行った。次に、モデル化のための速度データとして反射法データや OBS データおよび既存論文情報などを使用して、各層構造に速度関数を与え、水平方向1 km間隔、鉛直方向100m間隔のグリッドで三次元速度構造モデルを作成した。最後に、 作成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。

上述した反射波ホライズンのうち、海底面と音響基盤については反射記録時間断面 (図 58)を用いて解釈し、堆積層最下面、地殻内反射面およびモホ面については OBS データ(二次元深度断面表示、図 59)を用いて解釈した。なお、ここでは音響基盤と 堆積層最下面を解釈する事で、堆積物を「sediment1」および「sediment2」の2層に 分けている(図 58)。即ち、sediment1と sediment2の境界が音響基盤である。

sediment1 については、音響基盤からの反射波が確認できる領域には反射法データ 処理の過程で得られる重合速度を適用し、反射法データのない領域には OBS 調査で得 られた速度を適用した。音響基盤より下位の sediment2 については、反射波が不明瞭 で連続性がないため、OBS 調査から得られた速度情報に基づき、火山性砕屑物に相当 する速度を適用した。また、堆積層最下面は、これら堆積層(sediment1 + sediment2) と上部地殻との境界と定義した。



図 58 反射記録時間断面上でのホライズン解釈の例 (緑線が海底面、マゼンタ線が音響基盤を示す。)



図 59 OBS データ(二次元深度断面表示)の例 (黒線が堆積層最下面、ピンク線が地殻内反射面、青紫線がモホ面を示す。) 海底面については全ての測線で追跡し、音響基盤については深部まで反射波が明瞭 に見えている MCS 測線を用いてそのホライズン解釈を行った。堆積層最下面、地殻内 反射面およびモホ面については、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 60)を基に作成した。



図 60 OBS 調査で得られた P 波速度(Vp) 情報の例

地殻内反射面は、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に対応すると考え、OBS 調査の速度情報や論文をもとに深度を決定し、情報のないエリアについては上位の堆積層最下面に平行となるように作成した。なお、上述の論文等では、上部地殻と下部地殻の境界において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、同様の速度ギャップの存在を取り入れたモデルとした。モホ面については、下部地殻とマントルとの境界で、地殻内反射面と同様にOBS 調査の速度構造や論文などの情報を参考に作成した。以上の各ホライズン構造から1 km グリッドの層構造を作成した(図 61(a)~(f))。

ここで、伊豆衝突帯においては、フィリピン海プレート側上部地殻はユーラシアプレート側上部地殻と衝突・付加している(Arai et al., 2009)ため、ユーラシアプレート側上部地殻からフィリピン海プレート側の伊豆・小笠原島弧の上部地殻は遷移的に連続している構造とした(図 62 右図)。伊豆・小笠原島弧の下に沈み込む太平洋プレートについても上部地殻、下部地殻およびマントルを設定した(図 62 左図)。



図 61(a) 三次元層構造(最上位は海底面の構造、奥方向が北)



図 61(b) 三次元層構造(最上位は音響基盤の構造、奥方向が北)



図 61(c) 三次元層構造(最上位は堆積層最下面の構造、奥方向が北)



図 61(d) 三次元層構造(最上位は地殻内反射面の構造、奥方向が北)



図 61(e) 三次元層構造(最上位はモホ面の構造、奥方向が北)



図 61(f) 三次元層構造(沈み込む太平洋プレートの構造、奥方向が北)



図 62 層構造概念図

地殻内反射面やモホ面の情報の多くは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や音響基盤は、反射法データに基づく時間ドメインのデータであ ったため、速度構造モデルの作成手順は以下のように進めた。まず、海水と sediment1 のみの三次元速度構造モデルを作成し、これを用いて、海底面と音響基盤を時間ドメ インから深度ドメインに変換する。次に、深度ドメインで速度構造モデルの作成を行 う。sediment1以下は、sediment2、上部地殻、下部地殻およびマントルに区分し、OBS 調査で得られた速度情報や既存論文などを参考に速度構造をそれぞれの層に適用し た。伊豆・小笠原海域の場合、プレート3枚(フィリピン海プレート・太平洋プレー ト・ユーラシアプレート)が複雑に関係した構造を形成しているため、各プレートに 分けて計算を実施した。最後に、全てのプレートの構造を統合し、マントルまで含め た最終的な三次元速度構造モデルを作成した。ここで、海水は 1,500 m/sec 一定値、 上部地殻は下面を 6,200 m/sec の速度とし、下部地殻は上面を 6,580 m/sec の速度と した。また、マントルの地震波速度は 8,000 m/sec で基本的には一定値とした。ただ し、伊豆・小笠原海域においては、高橋・他(2015)に基づき、島弧のモホ面下の地 震波速度が少し遅い 7,600 m/sec から 8,000 m/sec の値とした。

図 63 ((a)~(e)) に、今回再構築した三次元速度構造モデルを示す。



図 63(a) 再構築した伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデル(深さは 60 km)



図 63(b) 再構築した伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデル(深さは 60 km)



図 63(c) 再構築した伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデル(深さは 60 km)


図 63(d) 再構築した伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデル(深さは 60 km)



図 63(e) 再構築した伊豆・小笠原海域の三次元速度構造モデル(深さは 60 km)

b) 南海トラフ海域の三次元速度構造モデルの構築

南海トラフ海域の三次元速度構造モデルについて、平成30年度は、暫定版を作成した。今回新たに解釈を行った反射波ホライズンは、海底面および四万十帯の上面と定義した不整合面である。ここでは、この不整合面を音響基盤とした。沈み込むフィリピン海プレートの上面の形状、およびそれより下位の構造については Nakanishi et al. (2018)のモデルを取り入れた(図64)。現時点では、南海トラフ海域で独立した構造モデルであるが、今後、伊豆・小笠原海域と連続した構造モデルの構築を目指す。



図 64 南海トラフ域に適用された層構造設定 (Nakanishi et al., 2018)の本モデルへの適用

南海トラフ海域で作成した層構造(図 62 左図)のうち、sediment1 は堆積物であり、 反射法データの再解析で得られた地震波速度を利用した。sediment2 は付加堆積物で あり、反射波が明瞭に追えないため、OBS 調査で得られた地震波速度を適用した。上 部地殻および下部地殻はフィリピン海プレート側とユーラシアプレート側とで2種 類作成した。各層の地震波速度については、堆積物は1,600 m/sec から5,000 m/sec、 上部地殻は5,600 m/sec から6,500 m/sec、下部地殻は6,700 m/sec から5,000 m/sec、 マントルは8,000 m/sec 一定とした。なお、速度データは図 65 に示した Nakanishi et al. (2018)のデータを使用した。作成方法は伊豆・小笠原海域と変わらないが、グリ ッド間隔を水平方向1 km、垂直方向を2 km と粗めに設定した。それにも関わらず、作 成できた三次元速度構造モデルの深さは海水面下 10 km までと制限された。これは、 南海トラフ海域で解析に用いた速度データの量が多く、計算機が負荷に耐えられなか ったための措置で、今後改善する予定である。

図 66(a)~(f)に今年度作成した三次元層構造を示す。また、図 67 には三次元速度 構造モデル(暫定版)を示す。



(Nakanishi et al., 2018)



図 66(a) 三次元層構造(最上位は海底面の構造、左方向が北)



図 66(b) 三次元層構造(最上位は音響基盤の構造、左方向が北)



図 66(c) 三次元層構造(最上位は堆積層最下面の構造、左方向が北)



図 66(d) 三次元層構造(最上位は島弧側地殻内反射面の構造、 海側フィリピン海プレート沈み込み、左方向が北)



図 66(e) 三次元層構造(最上位は島弧側モホ面の構造、 海側フィリピン海プレート沈み込み、左方向が北)



図 66(f) 三次元層構造(沈み込むフィリピン海プレートの構造、左方向が北)



図 67 南海トラフ海域の三次元速度構造モデル暫定版(深さは 10 km)

3) 統一的断層解釈

a) 解釈対象海域の概要

平成30年度の断層解釈の対象は、南海トラフ周辺海域である。当該海域はフィリピン海プレートが北米プレートに沈み込んでいる領域で、東部の駿河湾より南西に分布 する駿河トラフから連続する、東海沖、紀伊半島沖、四国沖、宮崎沖に分布する南海 トラフが存在している(図68)。

当該海域においては、JAMSTEC はじめ、経済産業省、海上保安庁、産総研等の各種 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地震探査データを借用・収集し、それらを 断層解釈作業に供した。なお、断層の解釈・特定は東海沖から熊野灘、四国沖、宮崎 沖に至る前弧域を中心に行った。



図 68 南海トラフ海域解釈対象領域

b) 地形 · 地質概要 (図69)

南海トラフは西南日本から駿河湾にかけて延びる長さ約 700 km の細長い舟状海盆 である。南海トラフではフィリピン海プレート上の伊豆小笠原島弧と九州・パラオ海 嶺に囲まれた四国海盆が陸側のプレートに沈み込んでいる。水深は最大で約 4,900 m であり、日本海溝や伊豆・小笠原海溝といった他の日本周辺の海溝と比較すると浅く、 沈み込みの大部分である四国海盆の形成年代(30~15 Ma)が他プレートと比較して若 いことが影響していると考えられている。またトラフ底には 600 m 以上の厚い堆積物 が分布していることが知られている(0kino and Kato, 1995)。



図69 南海トラフ海域の地形

室戸岬から足摺岬にかけての四国沖では南西-北東方向の走向を持つ外縁隆起帯 が形成されており、その西側には前弧海盆が広がっている。その東側では南海トラフ 陸側斜面が形成されており、これまでの隆起と沈降を記録している。土佐ばえ海盆は、 室戸半島と紀伊半島の間に位置する土佐ばえと南土佐ばえに囲まれており、海底活断 層やスラストの存在が示唆されている東西約 10 km,南北約 2 kmの海盆である。土佐 ばえ海盆は 1946 年の昭和南海地震余震域の中心に位置しており、直下に確認されて いる海山と思われるフィリピン海プレート上の高まりは破壊伝播に対するバリアー の可能性が指摘されている(Kodaira et al., 2000)。この室戸岬沖では海底地形と しても付加体中に湾入地形が確認されている (Yamazaki and Okamura, 1989)。また 足摺沖や室戸岬といった陸側海岸線の張り出し部分陸側では海岸段丘の発達が報告 され、段丘の形成とプレート境界型地震や海底活断層との関係が議論されている(前 本,2006)。また南海トラフのプレート境界断層先端部では IODP 南海トラフ地震発生 帯掘削により掘削が行われ、地震性の高速すべりによる摩擦発熱が短時間にあったこ とが報告された(Sakaguchi et al., 2011)。さらにプレート境界断層の海側のトラ フ内において将来的なプレート境界断層の可能性があるプロトスラスト帯が海底地 形として線状に分布することが報告されている(Yamashita et al., 2017)。

c)海底地形図

i)海底地形編集の目的

南海トラフではフィリピン海プレートの沈み込みに伴って陸側斜面に厚い付加体 が広く分布しており、前縁断層から分岐断層など地形的な変形構造が確認できる。地 震探査断面から得られる地下構造情報は重要であるが、面的分布を調べるためには 海底地形との比較が不可欠である。南海トラフは JAMSTEC の調査船が回航中も数多 く航行(通過)する海域であり、同海域については常時地形データを取得している。 ただし、各調査航海において調査対象海域外の場合、取得した地形データについては 未処理のまま保存するため、JAMSTEC には膨大な未処理の海底地形データが存在して いる。そこでそれらの未処理データに着目し、日向灘のような調査航海が少ない海域 における海底活断層検出に向けた地形データの作成を行う。

ii) 海底地形編集の概要

平成 29 年度前半までに JAMSTEC の調査船舶が南海トラフを回航したデータをすべ て収集し、ノイズ除去や各種補正を行い既存の処理済み海底地形データとの統合を 行った。統合にあたっては微小変形構造抽出に向けた最適化を実施した。対象海域は 日向灘から四国沖にかけて編集作業を実施し、最終成果としては南西諸島海域から 銭洲海嶺を含む南海トラフ全域の地形図として統合する。

iii)利用データとその特徴

新たに得られた詳細データの特徴を生かして地形データを活用するため、赤色立 体地形図を用いて南海トラフ全域の海底地形イメージングを行った。以下に、赤色立 体地図作成に用いた水深データを示す。

- ▶ シービームデータ (JAMSTEC)
- ▶ 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)

赤色立体地図は従来の地図表現の問題点を排した新しい地形表現手法であり、特 に航空機レーザ計測などによって取得された詳細な数値地形モデル(DEM)データの 表現に適している。赤色立体地図の特徴は、大地形から微地形まで、様々なスケール の起伏を立体的に認識・判読できることにある。また、実体写真やアナグリフと異な り、2次元の正射画像であるため、地図とそのまま重ねあわせて、図上で距離や面積 の計測ができる点にある。なお、赤色立体地図の作成はアジア航測㈱の特許技術(特 許番号 :特許第3670274号、発明の名称:視覚化処理システム、視覚化処理 方法、及び視覚化処理プログラム)を用いた。

iv) 成果

図70に本業務で使用した未処理海底地形データを統合したものを示す。日向灘から足摺岬、室戸岬にかけて航跡が多数見られるのは大型船の航路に該当するためであり、その領域で特に海底地形の精度向上が見られた。図71に示した日向灘における航海データに含まれている未処理データではコース縁辺部に筋状のノイズや水深差が見られた。要因としては航行毎に水深値が異なるため段差が生じたことや、航跡の縁辺部のスキャン角補正で取り切れなかった高まりや凹みが筋となったことが推定される。これらのノイズの影響を考慮しながら編集を行ったデータを用いて作成した日向灘周辺の赤色立体地形図を図72に示す。赤色立体地図は地域の地形特性に応じて、考慮距離を変えることにより、フォーカスしたい波長の地形を際立たせることができる。大規模な地形の傾向を掴みたい場合には、考慮距離を大きくし、微起伏を詳細に判読したい場合には、考慮距離を小さくすることで対応した。最終的な赤色立体地形図の作成に際しては、考慮距離をピクセルの100倍(0.001度解像度の場合)で作成した。一方、赤色立体図では水深の絶対値がわからないため、水深に合わせた段彩色を重ね合わせることで地形の起伏に加えて水深情報も同時に表現できる海底地形図が完成した(図73)。



図 70 統合未処理海底地形データ



図 71 既存海底地形図と統合未処理データ (オレンジ、緑、紫ハッチ部)



図 72 日向灘周辺の赤色立体地形図



図 73 統合後の赤色立体地形図

- 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30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の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おり今後も活動する可能性があると判断できる。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がある。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 す可能性があると判断した。

南海トラフ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6に示すよう なランク付けを行った。

	複数測線	単数測線
海底地形変位あり	Ι	Ι"
海底地形変位なし	П	

表6 断層の確実度のランク付け

- 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 (通常堆積物の中まで)
 ランクB: Sediment 2 (四万十帯の中まで、または付加体を形成する断層)
 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7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7に基づくランク付けを行い、取り纏めた。

	А	В	С	D	
Ι	I A	I B	I C	I D	
Ι"	Ι"Α	I " B	I " C	I"D	
П	П А	П В	П С	II D	

表7 断層ランク付け一覧

iii)利用データとその特徴

南海トラフ海域の断層解釈作業に利用した反射法データは、JAMSTEC、経済産業省、 産総研および海上保安庁の公的機関、ならびに民間会社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、基礎物理探査や民間会社が保 有する主に石油探査用のものと、海上保安庁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 測線同士の交点では反射面が一致する場合が多い。

SCS データは産総研より提供された。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な反射波が得られる。

iv) 解釈ソフトウェア

平成 30 年度もこれまで同様、Landmark 社の地震探査解釈ソフトウェア DSG 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、および前項(c)海底地形図)で述べた 赤色立体地形図(図 73)を参照した。

○海洋地質図(産総研地質調査総合センター発行)

- ▶ 紀伊水道南方海底地質図(1976)
- ▶ 琉球島弧周辺広域海底地質図(1977)
- ▶ 西南日本外带沖広域海底地質図(1977)
- ▶ 室戸岬沖海底地質図 (1986)
- ▶ 土佐湾海底地質図(1987)
- ▶ 豊後水道南方海底地質図(1998)
- ▶ 駿河湾海底地質図(1999)
- ▶ 遠州灘海底地質図(2008)
- ▶ 日向灘海底地質図(2008)

e)解釈対象海域の応力パターン

断層の種類(正断層/逆断層/横ずれ断層)・規模・空間的分布を支配する主な要因として、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、南海トラフ海域における、主にトラフを境にして陸側のプレート(北米プレ ート)の広域的な応力パターン(図74、Terakawa and Matsu'ura, 2010)について述 べる。



(Terakawa and Matsu'ura, 2010に加筆)

図74 CMTデータインバージョン法解析による応力パターン

東海沖の遠州海盆には、南北方向から北西-南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型の応 カパターンが卓越し、沿岸には横ずれ断層型の傾向が示されている。紀伊半島南西沖 の熊野海盆から土佐海盆を経て足摺岬沖までの領域は、北西-南東方向に圧縮軸を持 つ横ずれ断層型の応力パターンが優勢である。同領域のトラフ軸沿いの応力パターン は、東部で南北方向の圧縮軸を持つ逆断層型が、西部では南北方向の引張軸を持つ正 断層型が卓越しており、パターンは一様ではなく、沈み込み帯における応力の複雑さ を示している。

宮崎沖の日向海盆においては東西方向から北西-南東方向に引張軸を持つ正断層型の応力パターンが優勢であるが、宮崎南部の都井岬沖から種子島沖の沿岸域に渡って北西-南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型と横ずれ断層型の応力パターンが卓越している。

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 75 に示す国立研究開 発法人防災科学技術研究所(以下、「NIED」)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 30 km 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75 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

南海トラフ周辺海域の断層分布は図 76 のように解釈され、概略として以下に述べる。

フィリピン海プレートが沈み込む北米プレートの前弧域の地質区分は、トラフ底か ら陸へ向かって、付加体、外縁隆起帯、前弧海盆、陸棚斜面、大陸棚と分類できる。 トラフ底では堆積物が圧縮され、トラフ軸に並走する複数の逆断層が発達し、外縁隆 起帯の南領域に帯状に分布している。遠州海盆から熊野海盆にかけての前弧海盆には 横ずれ断層成分を持つ逆断層、および逆断層が発達している。紀伊水道南方から日向 海盆にかけての前弧域は圧縮による変形が著しく、複雑な地形を呈し、褶曲構造や横 ずれ断層構造が発達する。



図76 南海トラフ周辺海域の断層分布図(暫定版:未解釈海域あり)

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) 駿河湾周辺海域

駿河トラフはフィリピン海プレートの北縁部に位置し、同プレートと北米プレートの境界として存在し、南海トラフまで連続する南北に延びる海底谷である(図 77)。 このプレート境界は陸上部で富士川河口断層帯として、駿河湾に流れ込む富士川の 河口付近から富士山南西山麓にかけて、ほぼ南北に延びる長さ約 20 km の断層帯と して評価されている(地震調査研究推進本部, 2010)。相模トラフの陸側斜面には石 花海北堆、石花海南堆、金洲ノ瀬のような地形的高まりが存在する。



図77 駿河湾周辺の断層分布

駿河湾南部では石花海北堆や石花海南堆の東側、陸側斜面とトラフ底との境界に 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。相模湾中部を東西に 横切る反射記録断面(図 78)では、陸棚上部の堆積層が東へ緩傾斜をなすが、石花 海北堆の高まりにかけて西傾斜に変化している構造が確認できる。沈み込みによる 圧縮構造は明瞭に表れていないが、石花海北堆が下部より押し上げられた様な変形 は確認することができる。



図78 駿河湾中部の反射記録断面(時間)

相模トラフ南端部は金洲ノ瀬の東、陸側斜面には崩壊地形が形成されており、この 地形からトラフ底まで横切る反射記録断面(図 79)でも海底地すべりによる滑落崖 や滑動土塊が確認できる。崩落土塊がトラフ軸を覆っている為に断層構造は不明瞭 となり、断層特定に至っていないが、相模湾中部と同様な構造を持つと想定される。



図79 駿河湾南部の反射記録断面(時間)

ii) 東海沖

南海トラフ東部において、1993年から1997年に実施された「日仏 KAIKO-Tokai 計 画」で取得されたマルチチャンネル音波探査データや高解像海底地形データ等によ って、フィリピン海プレートの沈み込みのテクトニクスや南海トラフ前弧域に発達 する断層が詳しく解析されてきた。調査結果は「東海沖の海底活断層」(東海沖海底 活断層研究会,1999)として出版され、以降の研究や調査においての基盤となってい る。「東海沖の海底活断層」によると、南海トラフのトラフ軸とほぼ平行な北東-南 西走向で西傾斜の逆断層が、トラフ底より前弧海盆の遠州海盆にまで分布しており、 トラフから陸に向かってそれぞれ、前縁断層系、東海断層系、小台場断層系、遠州断 層系と呼ばれている(図 80)。

東海沖の断層解釈に当たっては、上記の知見を基に、JAMSTEC や高密度に網羅する 基礎物理探査のデータを用いて解釈作業を実施した。

また、東海沖の南海トラフ前弧域は海底地形図の解像度が高く、地形判読によって 断層の連続性が明瞭に観察でき、前縁断層系、東海断層系、小台場断層系、遠州断層 系の断層群の詳細が確認できた(図 81)。





図80 東海沖海底活断層図(東海沖海底活断層研究会, 1999に加筆)

図 81 東海沖の断層分布

前縁断層は、トラフ軸に沿って長さが 15~30 km 程のしわ状のリニアメントで現 れ、トラフ底の堆積物や海洋性堆積物がプレートの沈み込みによる北西-南東方向 の圧縮によって変形・褶曲し、褶曲されたブロックが前弧陸側斜面に付加されていく 過程で発達している。東海断層系は外縁隆起帯の高まり基部に発達する逆断層で、海 底地形図でも明瞭な急崖として判読できる。反射記録断面では遡上する陸側ブロッ クの古付加体の基盤が新しい前縁の付加体の上位に位置するのが確認できる(図 82)。 小台場断層系は外縁隆起帯頂部である第二天竜海丘の南東斜面基部に逆断層として 特定される(図 83)。地形特徴から、天竜海底谷下にも潜在すると想定され、第二渥 美海丘の南斜面基部に現れ(図 84)、総長 70 kmに達する断層系である。遠州断層 系は天竜海底谷西側の遠州海盆の平坦面に大きく括って3段の面を形成しているの が海底地形から判読できる。地震探査断面では、それらの平坦面はフラワー構造を伴 う逆断層による撓曲構造によって形成されている(図 84)。この構造は安乗口海底 谷の西側まで確認でき(図 81)、遠州断層系がさらに西へ延長していると想定され る。



図82 東海沖東部の反射記録断面(時間)



図83 東海沖中部の反射記録断面(時間)



図84 東海沖西部の反射記録断面(時間)

iii) 熊野灘海域

熊野灘海域は前縁の付加体、発達した外縁隆起帯とその背後に熊野海盆が平坦面 を形成している。海底地形の解像度も高く、外縁隆起帯頂部では明瞭なリニアメント が東北東-西南西に発達している。外縁隆起帯の南斜面には複数本の逆断層が確認 され、連続する断層系とすると 100 km 以上に亘る構造と想定される。さらに熊野海 盆には熊野海段の隆起帯や、泥火山が断層構造に沿って存在していることが確認さ れた(図 85)。



図85 熊野灘海域の断層分布

外縁隆起帯南斜面に発達する逆断層は、南海トラフの分岐断層として Park et al. (2002)によって特定されている。図 86 は Park et al. (2002)の解釈と本プロジ

ェクトで解釈した断層である。隆起・傾動する陸側ブロックの古付加体の基盤が下盤 に位置する前縁の付加体に遡上するのが確認でき、さらに西に傾斜する断層深部が 海洋プレート基盤付近まで伸びているのが確認できる。同様の構造は熊野海盆南縁 に沿って確認でき(図 87)、南海トラフの分岐断層として広域に渡って発達してい る断層構造と考えられる。潮岬南東に位置する熊野海段は熊野海盆内に発達した隆 起帯で、基盤と共に被覆する堆積層を隆起させた構造を呈している。構造は最上位の 堆積層に一部覆われており、構造は明瞭だが活動度は低いと考えられる(図 87)。





図86 熊野海盆南縁付近の反射記録断面(時間)



図87 熊野灘西部の反射記録断面(時間)

(d) 結論ならびに今後の課題

1) データ再解析

平成30年度は、南海トラフ海域(東海沖・四国沖)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、経済産業省が取得した S46基礎物理探査「東海」、S52基礎物理探査「下北一東海沖海域」(東海沖)、S58基礎 物理探査「東海~熊野灘」「四国沖」(四国沖)のMCSデータ、ならびに産総研のSCSデー タであった。これらのうち、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)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、産総研の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30年度は、伊豆・小笠原海域の速度構造モデルの見直しと南海トラフ海域全域にお いての暫定的な速度構造モデルの作成の2つの作業を行った。反射法データを用いて、海 底面、音響基盤、地殻内反射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、反射法データの再処理過程で使わ れる重合速度、OBS調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。なお、今回作成した南海トラフ海域の速度構造モデルは暫定的なものであり、 来年度にはさらに速度情報などの新規入手データを追加し、伊豆・小笠原海域と統一され た層構造を作成し、モデルの再構築を行う予定である。

3) 統一的断層解釈

平成30年度は、南海トラフ海域の駿河湾、遠州灘、熊野灘、紀伊水道沖、四国沖、宮崎 沖の主に南海トラフ前弧域の断層解釈作業を行った。JAMSTECのデータをはじめ、基礎物 理探査(一部再解析実施)、民間会社の石油探査など当該海域を広域にカバーしたMCSデ ータに加え、産総研の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、南海トラフ海域での断層分布 図(図88)をマッピングするという成果を得ることができた。さらに、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。

南海トラフ海域の解釈対象領域のうち、東海沖から四国沖では、JAMSTECのトラフをま たぐMCSデータや、基礎物理探査による前弧域のMCSデータが高密度に存在し、解釈作業の 上で多くの情報を得ることができ、詳細な断層分布が明らかになった。足摺岬以西から宮 崎沖の領域はMCSデータ密度が粗く、SCSデータを主に使用した解釈となった。さらに日向 灘の海底地形の複雑さも影響して断層の連続性の読み取りが困難であった為、短い断層ト レースが分布する結果となった。今後、次年度に基礎物理探査MCSデータの再解析結果が 四国沖や紀伊半島沖に加わり解釈する予定である。新たに加わる解釈や本年度行った解釈 を見直すことによって断層の形状や連続性の読み取りの精度が上がり、断層傾向が明らか になることが期待され、断層モデル構築の基礎データとして有益な情報となると考える。



図 88 南海トラフ海域の断層分布図(暫定版:未解釈海域あり)

(e) 引用文献

- Arai R., T. Iwasaki, H. Sato, S. Abe, N. Hirata, Collision and subduction structure of the Izu-Bonin arc, central Japan, revealed by refraction/wideangle reflection analysis, Tectonophysics, 475, 438-453, 2009.
- 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.
- 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.

地震調査委員会,富士川河口断層帯の評価(一部改訂),地震調査研究推進本部,2010. 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.

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. Takahashi, A. Nakanishi, S. Miura, and Y. Kaneda, Subducted seamount imaged in the rupture zone of the 1946 Nankaido earthquake, Science, 289, 104-106, 2000.
- 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.
- 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., 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.
- 前杢英明,室戸半島の第四紀地殻変動と地震隆起,日本地質学会第113年学術大会見学 旅行案内書,地質学雑誌,112,Suppl.5-5,17-26,2006.

- 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(0Dr9)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.
- Nagumo, S., H. Kinoshita, J. Kasahara, T. Ouchi, H. Tokuyama, T. Asamuma, 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.
- Nakanishi A., N. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. O. Citak, T. Nakamura, K. Obana, S. Kodaira, Y. Kaneda. Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis, Geological Society of America Special Paper, 534, 1-18, 2018. 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.
- 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1
 3-15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.
- Okino, K. and Y. Kato, Geomorphological study on a clastic accretionary prism: The Nankai Trough, Island Arc, 4, 182-198, 1995.
- Park, J.-O., T. Tsuru, S. Kodaira, P. R. Cummins, and Y. Kaneda, Splay fault branching along the Nankai subduction zone, Science, 297, 2002.
- Sakaguchi, A., F. Chester, D. Curewitz, O. Fabbri, D. Goldsby, G. Kimura, C-F. Li, Y. Masaki, E. Screaton, A. Tsutsumi, K. Ujiie and A. Yamaguchi, Seismic slip propagation to the up-dip end of plate boundary subduction interface faults: Vitrinite reflectance geothermometry on Integrated Ocean Drilling Program NanTroSEIZE cores, Geology, 39, 395-399, doi:10.1130/G31642.1., 2011.
- 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.
- 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,宮嵜進,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.
- 東海沖海底活断層研究会、"東海沖の海底活断層"、東京大学出版会、1999.
- 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.
- Yamashita, M., S. Miura, G. F. Moore, A. Nakanishi, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Bathymetric imaging of protothrust zone along the Nankai Trough, Island Arc, e12233. https://doi.org/10.1111/iar.12233, 2017.
- Yamazaki, T. and Y. Okamura, Subducting seamounts and deformation of overriding forearc wedges around Japan, Tectonophysics, 160, 207-229, 1989.