

2.1 高精度な3D構造モデルに基づく自動震源決定システムの開発

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 「高精度な3D構造モデルに基づく自動震源決定システムの開発」

(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	センター長	藤江 剛
	主任研究員	仲西 理子
	グループリーダー	尾鼻 浩一郎
	(センター長代理)	
	グループリーダー	中村 恭之
	主任研究員	利根川 貴志
	主任研究員	新井 隆太
	主任研究員	白石 和也
	主任研究員	山本 揚二郎
	研究員	Yanfang Qin
	研究員	縣 亮一郎
	客員研究員	山下 幹也
	主任研究員	富士原敏也
	研究生/臨時研究補助員	Flores, Paul Caesar M
University of Hong Kong	Assistant Professor	Xin Liu
GNS Science	Marine Geophysicist	Dan Bassett
国立研究開発法人防災科学技術研究所	研究部門長	汐見 勝彦
	主任研究員	浅野 陽一
	主任研究員	植平 賢司
	主任研究員	木村 武志
	主任研究員	松原 誠
	主任研究員	田中 佐千子
	主任研究員	松澤 孝紀
	上席研究員	武田 哲也
	主任研究員	三好 崇之
	契約研究員	関口 渉次

(c) 業務の目的

マルチパラメータ化した三次元地下構造モデル（以下、マルチパラメータ3D構造モデル、あるいは3D構造モデル）ならびに海陸の観測データを用いた自動震源決定システムを構築し、南海トラフ及びその周辺の地震活動の現状を即時的に把握出来るようにすることを目的とする。3D構造モデルの構築にあたっては、様々な既往研究成果や最

新の地下構造研究成果を取り入れることで既に構築済みの三次元P波速度構造モデルを高精細化するとともに、S波速度や密度等を含めたマルチパラメータ化を行う。また、海底に設置された常設地震観測点直下の堆積層構造を詳細に評価し、震源決定の高度化に資する観測点補正値を求め、3D構造モデルに反映する。構築した3D構造モデルを自動震源決定システムに適宜採用することで、過去及び現在の地震活動を適切に把握する。構築した3D構造モデルは、本プロジェクトにおける基本モデルとして、他の研究課題と共有する。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 令和2年度：

熊野灘海域の速度構造モデルの更新の仕組みの構築及びDONET観測点の観測点補正値推定方法の検討を進めた。3D構造モデルを用いた自動震源決定システム構築に向け、既存モデルを用いた震源計算システムを整備した。

2) 令和3年度：

熊野灘周辺の海陸統合3D構造モデルの構築を進めた。ここまで構築した3D構造モデルについて、サブ課題1「地殻活動情報創成研究」内で共有するとともに、他のサブ課題との共有方法等について、プロジェクト内外の関係者と議論を開始した。自動震源決定システムに新しい3D構造モデルを反映する仕組みを構築し、解析結果の評価・検討を進めた。

3) 令和4年度：

熊野灘周辺を中心に既存の陸域構造情報も反映した3D構造モデルの更新を実施した。モデル構築、検証、改善の対象を紀伊水道域へも拡張するとともに、観測点補正値を3D構造モデルに反映する方法の検討を進めた。新たな3D構造モデルを自動震源決定システムに反映させるとともに、構築した震源カタログに基づいて地震発生場所の評価手法の検討に着手した。他の研究課題と共有した3D構造モデルについて、モデルの更新方針等について検討を行った。

4) 令和5年度：

3D構造モデルの構築対象領域を四国沖へ拡張するとともに、観測データを用いたモデルの検証や改善を進めた。過去データの再解析による長期震源カタログを整備するとともに、そのカタログを用いて地震発生場所の評価や地震活動解析手法の検討を実施した。他の研究課題と共有した3D構造モデルについて、新たに構築したモデルへの更新を行った。

5) 令和6年度：

前年度までに構築した3D構造モデルの見直しや検証を実施しつつ、東海沖及び日向灘沖への対象領域の拡張を行った。堆積層構造解析結果について、震源決定精度向上のための情報として整理した。前年度までに得られたモデルを自動震源決定システムに反映させた。地震活動を可視化して表現するシステムのプロトタイプを構築した。他の研究課題と共有した3D構造モデルについて、新たに構築したモデルへの更新を行った。

(e) 令和 6 年度業務目的

海陸を統合した高精細マルチパラメータ 3 D 構造モデルの更新及び 3 D 構造モデルを用いた震源カタログに基づく地震活動評価方法の検討を進める。これまでに構築した海陸統合高精細マルチパラメータ 3 D 構造モデルについて、対象領域を東海沖及び日向灘へ拡張する。観測データを用いたモデルの更新及び検証を行うとともに、モデルの誤差評価手法について検討する。DONET の観測点周辺の堆積層構造解析を引き続き実施し、震源決定精度向上のための情報として整理する。これまでに得られたモデルを自動震源決定システムに反映させる。過去に発生した地震の震源カタログを整備するとともに、それを用いた地震活動可視化システムのプロトタイプを構築する。

(2) 令和 6 年度の成果

①過去の探査や基盤観測データに基づく 3 D 構造モデルの構築と検証

(a) 業務の要約

令和 5 年度までに構築した海陸統合高精細マルチパラメータ 3 D 構造モデルについて、観測データを用いた P 波速度構造モデルの検証を行った。並行して、新たな観測や解析に基づく速度構造情報を構築中のモデルに取り込む方法の改良を進めた。モデル構築の対象領域を東海沖及び日向灘へ拡張するとともに、これまでに構築したモデルの更新を行い、海陸統合マルチパラメータ 3 D 構造モデルを構築した。令和 3 年度から継続している他のサブ課題担当者等とのモデル共有に関する議論に基づき、今後のモデル構築や利活用を想定した枠組みを試作した。震源決定の信頼性向上に不可欠な堆積層補正值の推定に向けて、令和 5 年度まで準備してきた構造探査データのレーシーバー関数解析手法の改良及び表面波解析による S 波速度構造推定方法の汎用化を進めるとともに、両手法を多くの海域観測データに適用し、堆積層内の詳細 S 波速度構造モデルの把握を進めた。

(b) 業務の成果

1) 3 D P 波速度構造モデルの作成・更新とマルチパラメータ化

令和 5 年度までに構築した南海トラフ域におけるマルチパラメータ 3 D 構造モデル¹⁾の高精細化及び広域化のため、今年度は、これまで収集した地形^{2), 3)}、地層境界面を含む構造情報^{4)~15)}を整理した上で、最新の反射法解析¹⁶⁾や未活用であった自然地震トモグラフィ解析¹⁷⁾の結果を新たに取り入れた。特に、沈み込むフィリピン海プレートの形状は、最新の反射法解析¹⁶⁾の導入により高精細化が実現された。また、令和 5 年度までに構築した 3 D P 波速度構造モデル¹⁾について、モデル構築に使用した構造情報の一つである海陸統合トモグラフィ解析⁵⁾で利用した制御震源の観測走時データに基づく検証結果、及び本章②項で述べる令和 5 年度までに構築したマルチパラメータ 3 D 構造モデル¹⁾を用いた震源決定の結果等を踏まえ、複数の速度構造モデルの統合の方針を見直し、新たな方針に従ってモデル構築を実施した。P 波速度構造情報としては、大きく以下の 3 つのカテゴリを使用することとした。

i) 構造探査に基づく結果をまとめたもの

ii) 地震トモグラフィ及び表面波解析による結果(海域^{11)~14)}、海陸統合⁵⁾、日本列島スケール¹⁷⁾)

iii) 全国 1 次地下構造モデル (JIVSM) ¹⁵⁾

J-SHIS 地盤情報 ¹⁸⁾については、3)節で述べる意見交換の場において更新作業中との情報を得た。これを踏まえ、新しいバージョンの情報が公表された後に差し替えることが適切と判断し、今年度も現在公開されている情報の採用を見送った。図 2-1-①-1 に P 波速度構造モデル統合方針の概要を示す。対象領域を海域浅部、海域深部、陸域浅部、陸域深部の 4 つに区分けし、各領域についてモデルを構築した上で、全域の 3 D 構造モデルとして統合する方法を採った。なお、構造探査に基づく結果の中には、時間領域の情報しか存在しない場合がある。そのため、モデル構築は全ての構造情報を時間領域に揃えた上で実施し、最後にモデルを深度変換する方式を採用した。海陸の構造を扱うため、基準面は海拔 0 m より 4500 m 上空に設定し、空気層は海水で補填した。海域浅部領域のモデル構築には、上述の P 波速度構造 i) 及び ii) を使用した。i)、ii) の海域トモグラフィ解析 ^{11)~13)} 及び表面波解析 ¹⁴⁾、海陸統合トモグラフィ解析 ⁵⁾、日本列島スケールのトモグラフィ解析 ¹⁷⁾ による結果の順に優先して活用するため、図 2-1-①-2 のフローに示すように、初めに、ii) の海陸統合トモグラフィ解析結果 ⁵⁾ について、日本列島スケールトモグラフィ解析結果 ¹⁷⁾ の変動の傾向を参照して (通常) Kriging 補間 ¹⁹⁾ を施した。日本列島スケールトモグラフィ結果 ¹⁷⁾ は深さ 5 km より浅い部分の解像度がないため、時間領域への変換に際して、深さ 5 km 未満は JIVSM¹⁵⁾ に差し替えた。補間方法の特性上、深い部分では元の日本列島スケールトモグラフィ結果 ¹⁷⁾ と乖離してしまう。これを避けるため、往復走時 20 秒より深い部分を日本列島スケールトモグラフィ結果 ¹⁷⁾ に置き換えた。以上によって作られた「補間モデル 2」の変動の傾向を参照し、海域トモグラフィ解析結果 ^{11)~13)} 及び表面波解析結果 ¹⁴⁾ に対して (通常) Kriging 補間 ¹⁹⁾ を実施した。上述と同じ理由で、往復走時 20 秒より深い部分を日本列島スケールトモグラフィ結果 ¹⁷⁾ に置き換えた後、作られた「補間モデル 4」の変動の傾向を参照し、上述の P 波速度構造 i) について、特に反射法速度解析の結果 ¹⁶⁾ を含めた構造探査に基づく成果をまとめたものを (通常) Kriging 補間 ¹⁹⁾ し、最終的な海域浅部の P 波速度構造モデルを作成した。海域深部領域の 3 D P 波速度構造モデルは、上述の「補間モデル 4」(図 2-1-①-2) となる。陸域浅部領域については、深さ 5 km 相当まで JIVSM¹⁵⁾ をそのまま採用した。陸域深部領域については、上述の P 波速度構造 i) のうち、海陸統合調査などで得られた陸域下の構造情報を中心に、「補間モデル 3」(図 2-1-①-2) の変動の傾向を参照して (通常) Kriging 補間 ¹⁹⁾ することでモデルを作成した。

以上の作業によって得られた 4 つの領域の 3 D P 波速度構造モデルについて、各領域の境界 (図 2-1-①-1 の黒線) に沿ってそれぞれ設定した遷移帯内 (図 2-1-①-1 の両矢印) で線形的に接合した。海陸の境界は海岸線とし、海岸線から 50 km 海側までを遷移帯とした。陸域浅部と深部の境界は深さ 5 km 相当の面とし、そこから深くなる方向に 2000 ms を遷移帯とした。海域浅部と深部の境界は、特に屈折法探査の分解能を考慮して海洋モホ面より 1000 ms 分下方の面とし、そこから 2000 ms を遷移帯とした。各遷移帯の区間で接するモデルを境界からの距離に従って線形的に補間することで、本プロジェクトの最終的な南海トラフの 3 D P 波速度構造モデルとした。得られた 3 D P 波速度構造モデルに対して、令和 2 年度に取りまとめた P 波速度から S 波速度や密度に変換するマルチパラメータ化手法 ²⁰⁾ を適用することで、マルチパラメータ 3 D

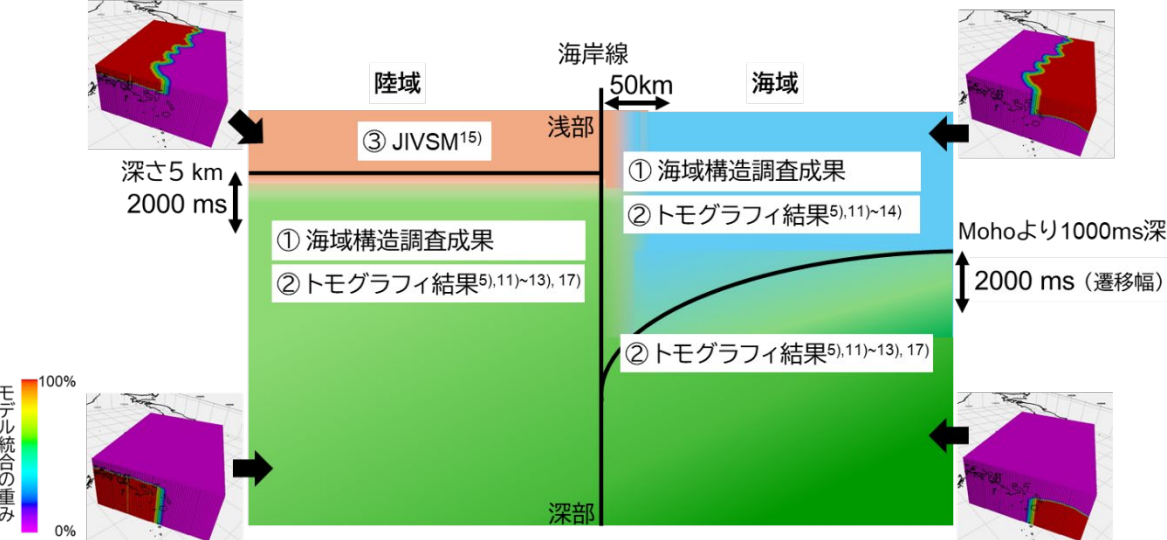


図 2-1-①-1 モデル統合方針の模式図

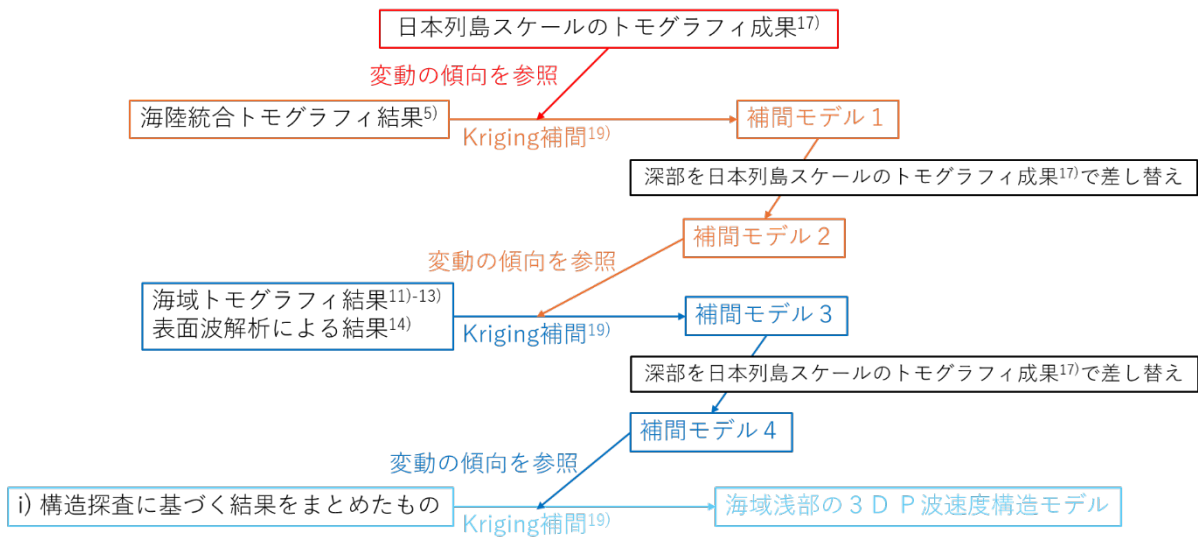


図 2-1-①-2 3D P波速度構造モデルの構築フロー（海域浅部領域の例）

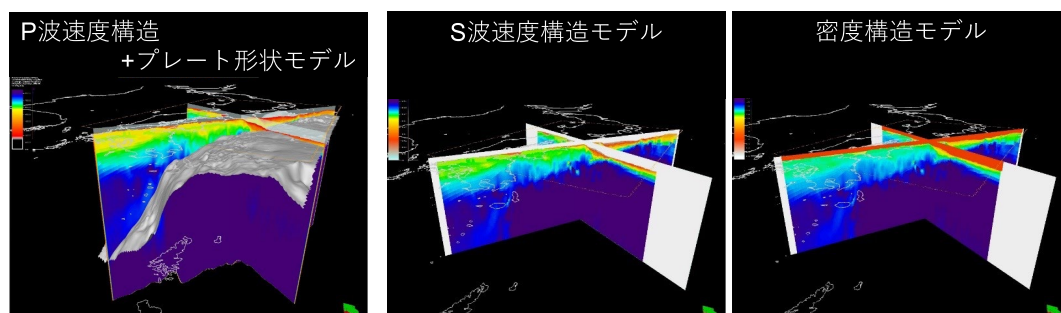


図 2-1-①-3 令和 6 年度に構築したマルチパラメータ 3D 海陸統合モデル。左から順に P 波速度構造及びフィリピン海プレート形状モデル、S 波速度構造モデル、密度構造モデルを表す。

2) 海陸統合マルチパラメータ 3D 構造モデル検証方法の検討と環境整備

3D P 波速度構造モデルの妥当性を検証するため、モデル構築に使用した構造情報の一つである海陸トモグラフィ解析⁵⁾に利用した制御震源の観測走時データと 3D P 波速度構造モデルから計算した理論走時^{21)~23)}を比較した。比較結果の一部を図 2-1-①-4 に示す。計算走時と観測走時の差の RMSE (二乗平均平方根誤差) は 0.3~0.4 s で、海陸トモグラフィ結果⁵⁾における制御震源についての計算走時と観測走時の差の RMSE (約 0.14 s) に比べて、0.15~0.25 s 大きい結果となった。

マルチパラメータ化した 3D S 波速度構造モデルの検証については、既存の 3D P 波速度構造モデル⁴⁾を令和 2 年度に取りまとめたマルチパラメータ化手法²⁰⁾により変換した 3D S 波速度構造を使用して実施してきた。3D S 波速度構造モデルの妥当性について昨年度検証した結果、プレート境界より深部では、ほとんどの観測点で 3D S 波速度構造モデルが海域地震トモグラフィ解析結果^{11)~13)}に対して高速度となる問題が認められた¹⁾。今年度、この問題の調査を進めた結果、経験式に基づく物性の変換式の実行上、部分的に問題があったことが原因であると判明したため、計算環境の修正を実施した。得られた結果を図 2-1-①-5 に示す。令和 5 年度に構築した 3D S 波速度構造モデル¹⁾について、海域地震トモグラフィ結果^{11)~13)}との比較結果を図 2-1-①-6 に示す。以上により、3D S 波速度構造モデルと調査観測から得られた S 波速度構造^{11)~14)}は海底下の深さ 5 km までは整合的であり、深部についても大きな違いがないことが確認できた。

3D 密度構造モデルの妥当性の検証については、モデルから計算した重力異常²⁴⁾とブーゲー重力異常の観測値²⁵⁾の比較を実施することを基本方針とし、令和 5 年度までに 3D 密度構造モデルから重力異常を計算するための検証環境を整備した。ただし、沈み込み帯周辺での重力異常の観測値には、沈み込むスラブによる長周期の影響が全体的に反映されているため、その影響を観測値から除去する必要がある。そこで、今年度は残差重力異常を計算する機能を検証環境に新たに追加し、使用することとした。図 2-1-①-7 に、令和 5 年度の 3D 密度構造モデル¹⁾から計算された重力異常とブーゲー異常の観測値²⁵⁾から求めた残差重力異常を示す。令和 5 年度の 3D 密度構造モデル¹⁾は、活

用した構造情報の信頼性から、深さ 60 km までを使用した。残差重力異常の計算²⁶⁾では局所的な構造不均質は保存される一方、沈み込むスラブの影響を含む海陸の構造の違いなどトラフ軸横断方向の平均的な特徴がすべて除去される。従って、残差重力異常と 3 D 密度構造モデルから計算された重力異常は必ずしも一対一に比較できるものではない。そこで、重力異常の観測値を用いた地殻構造解析の実例²⁷⁾に基づき、深さ 60 km より深い 3 D 密度構造モデルを考慮した解析環境を整備した。令和 5 年度の 3 D 密度構造モデル¹⁾の場合、このモデルをもとにスラブの厚さや陸側のマントルウェッジの構造をモデル化し、深さ 60 km より深い部分について計算した重力異常をブーゲー異常の観測値²⁵⁾から差し引く。この結果と深さ 60 km までの令和 5 年度の 3 D 密度構造モデル¹⁾から計算された重力異常とを比較した。この解析作業について、プレート形状やスラブの厚さ、マントルウェッジの範囲、スラブやマントルに設定する密度構造などを更新した際にもモデル化と重力計算に対応できる環境を整えた。重力異常の観測値を用いた構造解析は、3 D P 波速度構造の信頼性が高いことが前提である。そのため、実解析、及びその結果を経験式に基づく物性の変換式の修正に繋げる取り組みについては今後の課題とした。

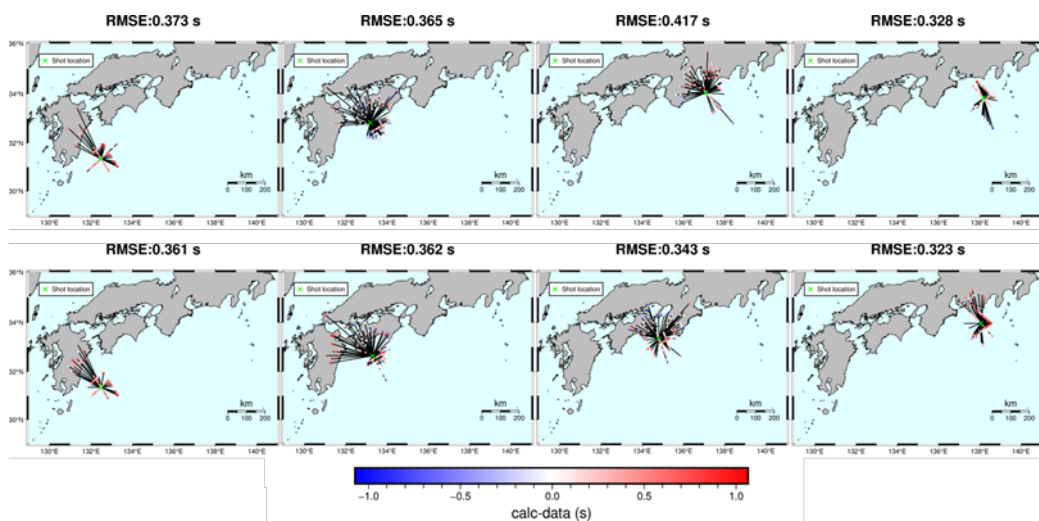


図 2-1-①-4 海陸トモグラフィ結果⁵⁾で利用した制御震源の観測走時データと、本研究で構築した 3 D P 波速度構造モデルから計算された対応する制御震源の理論走時の比較。各観測点での計算走時と観測走時の差を青から赤のカラースケールで示す。RMSE : Root mean square error (二乗平均平方根誤差)。

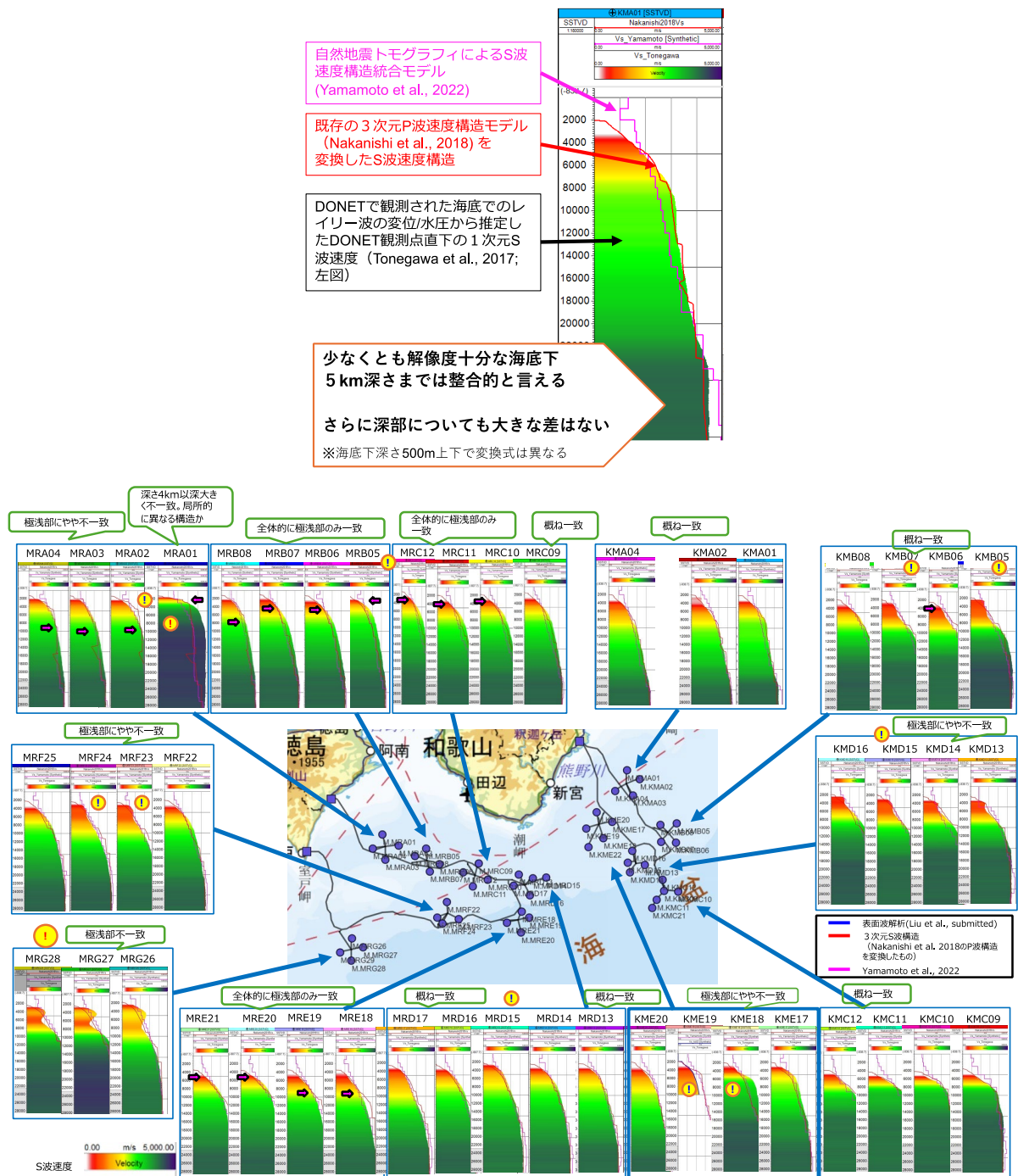


図2-1-①-5 3D構造モデルとして推定したS波速度構造と調査観測に基づいて直接推定されたS波速度構造^{11)~14)}との比較結果。上) DONET 1のKMA01観測点直下におけるS波速度構造比較結果。カラースケールで示した速度構造はTonegawa et al. (2017)¹⁴⁾による推定結果。赤線がNakanishi et al. (2018)⁴⁾の3D P波速度構造モデルを本プロジェクトで整備したマルチパラメータ化手法²³⁾でS波速度構造に変換した速度構造、マゼンタがYamamoto et al. (2022)¹³⁾の海域地震トモグラフィによる速度構造を示す。下) ほぼすべてのDONET観測点について(上)と同様に比較した結果。青線(KME19のみ)は、後述の表面波解析による近傍の測線下について推定されたS波速度構造²⁸⁾。

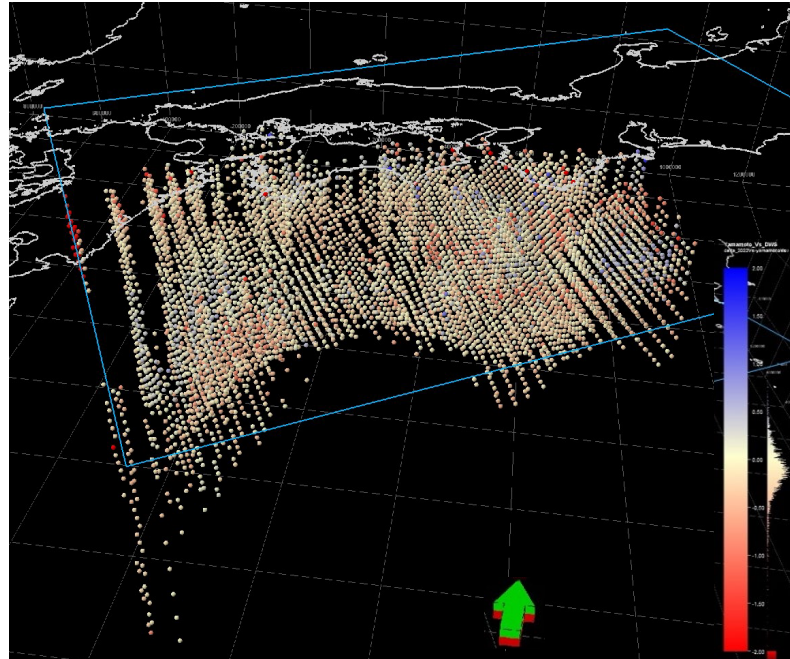


図 2-1-①-6 海域地震トモグラフィ^{11)~13)}による速度構造情報と令和 5 年度の 3D S 波速度構造モデル¹⁾との比較。右下カラースケールで速度の差を示す。

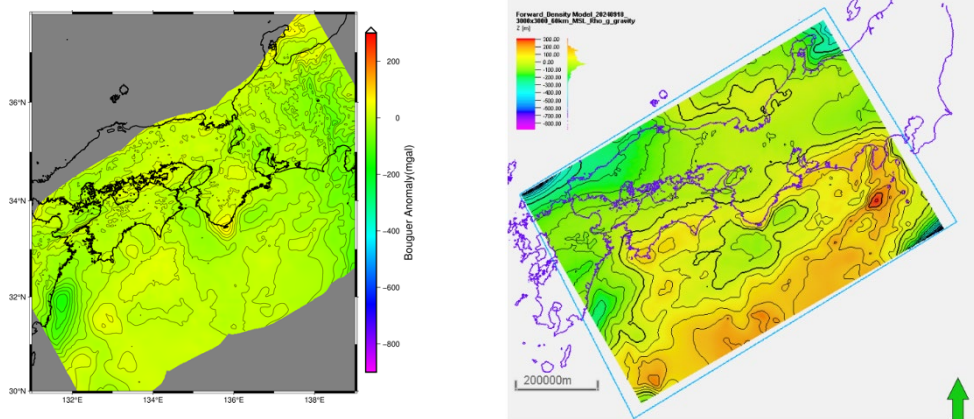


図 2-1-①-7 ブーゲー異常の観測値（仮定密度 2.3g/cm^3 ）²⁵⁾から求めた残差重力異常（左）と令和 5 年度の 3D 密度構造モデル¹⁾から計算された重力異常（右）。

3) 3D構造モデル構築・利活用方針の検討

令和3年度から開始した3D構造モデルのデータ仕様や精度、共有方法等の課題を確認する意見交換、勉強会を月1回程度の頻度で引き続き実施した。令和5年度までの議論の結果、「3Dマルチスケール構造情報共通基盤」と称する情報基盤を整備し、統合モデルとその根拠となった構造モデル等の関連情報を整理した上で一括管理するとともに、利用者が希望する情報に容易にアクセスできる仕組みを構築することを目指すことが重要であることを確認した¹⁾。これを受け、本サブ課題で構築したマルチパラメータ3D構造モデルとそれに関わる構造情報を取り扱った「3Dマルチスケール構造情報共通基盤」のコア部分の試作に着手することとなった。令和5年度に構築したポータルサイト的な枠組みでは、利用者が地域または海域、文献名、調査名などのキーワードによって構造情報や成果情報、データを検索することで希望の情報にアクセスできるほか、詳細なメタ情報からも関連情報やその入手方法に関する情報を得ることが可能な仕組みを、海洋研究開発機構で開発中のデータ連携基盤ソフトウェアを利用して試験的に構築した¹⁾。メタ情報はExcel, CSV, xml形式で管理しており、システム入出力が容易に可能である。今年度は対象とする地下構造モデルに関する情報として、モデル構築に使用した元データと調査などの情報、文献などを追加入力した(図2-1-①-8)。さらに、本サブ課題で構築したマルチパラメータ3D構造モデルとそれに関わる構造情報を対象とした処理ツールも試作した。この処理ツールにより、プレート形状モデルやマルチパラメータ3D構造モデルから、指定した領域のデータ切り出しとその領域内の補間、データフォーマット変換(テキスト、netCDF、VTK)を行うことが可能である。今回扱った構造情報は、本サブ課題で構築したマルチパラメータ3D構造モデル及びモデル構築に利用した既存の南海トラフ域の3D構造モデル⁴⁾、陸域地盤構造^{15), 18)}など公開中のデータ²⁹⁾であり、実際のモデル構築でも必要な機能を中心に開発ツールに導入した。本ツールは、現状、Linux環境上においてPython(v3.11以上)とGMT(The Generic Mapping Tools)が動作する環境にインストールしており、切り出しに必要なパラメータは専用ファイルを介して引き渡すことでソフトウェアを動作させる。将来的には、上述の構造モデルのメタ情報入手や検索が可能なポータルサイト上でのツールの利用を可能とする設計が必要である。これまでに試作した処理ツール類を関係者で試験的に利用しながら今後の仕様を検討しつつ、取り扱う構造情報の拡張方法の検討や「3Dマルチスケール構造情報共通基盤」を構築し維持する仕組み、体制を整えていくことが今後の課題である。

以上の経過について、2025年2月及び3月に地震本部の委員会では話題提供を行った。

ID	name	thumbnail	creator	publisher	release_year	summary	reference	reliability
001	南海トラフ域のプレート形状および3次元速度構造モデル	3D_Nakanishi2018.png	仲西理子 (JAMSTEC)	JAMSTEC	2018	東海・東南海・南海地震の運動性評価プロジェクト（平成20～24年度）で実施した屈折法探査成果をもとに、南海トラフ域のプレート形状モデルを含む3次元P波速度構造モデルを作成し、報告しました (Nakanishi+, 2018)。	Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Citak, S. O., Nakamura, T., Obana, K., Kodaira, S. and Kaneda, Y., "Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis.", <i>Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura</i> , 534, 69, 2018, https://doi.org/10.1130/2018.2534(04)	
004	防災南海Pモデル		仲西理子 (JAMSTEC)	JAMSTEC	2025	南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト（平成25～令和元年度）で実施した構造調査成果をもとに、既存の南海トラフ域のプレート形状モデルから南西諸島海溝域まで連続的につながるプレート形状モデルを作成し、報告しました (Reference(1))。さらに、Reference(2)で発表されたEC11, EC7, EC6, EC15, EC5の5測線のプレート形状を追加し、改めて南海トラフ～南西諸島海溝域のプレート形状モデルを作成しました。ここでは、以上の二つのモデル（報告書版及び報告書修正版）についてご紹介します。		
1	南海トラフ～南西諸島海溝域のプレート形状モデル	Nankai+Nansei=plate.png	仲西理子 (JAMSTEC)	JAMSTEC	2021			

ID	udl_model_name	udl_model_url	udl_model_summary	udl_model_ref	udl_model_thum
001	01JHPXH 南海トラフ東部 (JAMSTEC KR9806)	https://www.jamstec.go.jp/obsnms_db/j/vmodel/kr9806-1_obs2.sh.gif KR9806-1 Vp model	ifferences in the coseismic rupture process between the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes have been studied by many fault models. To understand what factors control coseismic rupture zones, it is important to investigate differences in deep crustal structures of the rupture zones between the 1944 and 1946 earthquakes. The previously published crustal structure of the rupture zone of the 1944 earthquake shows that the coseismic rupture extends to the Neogene-Quaternary accretionary prism. However, little is known about the structure of the rupture zone of the 1946 earthquake. To obtain a complete image of the seismogenic zone of the 1946 earthquake, a wide-angle seismic survey was performed across the presumed coseismic rupture zone of the 1944 earthquake from ocean to land. Our model for the crustal structure is based on ocean bottom seismographic data. The crustal structure appears characteristic for subducting oceanic crust and a Neogene-Quaternary accretionary prism bounded by an island arc crust. The Neogene-Quaternary accretionary prism reaches a maximum thickness of 7 km at 50 km distance landward from the deformation front. The subducting oceanic crust can be traced down to 35 km. The subduction angle becomes steeper landward, reaching up to 11° beneath the island arc crust. The depth of the top of subducting oceanic crust at the down-dip limit of the rupture zone is 10 km. ifferences in the coseismic rupture process between the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes have been studied by many fault models. To understand what factors control coseismic rupture zones, it is important to investigate differences in deep crustal structures of the rupture zones between the 1944 and 1946 earthquakes. The previously published crustal structure of the rupture zone of the 1944 earthquake shows that the coseismic rupture extends to the Neogene-Quaternary accretionary prism. However, little is known about the structure of the rupture zone of the 1946 earthquake. To obtain a complete image of the seismogenic zone of the 1946 earthquake, a wide-angle seismic survey was performed across the presumed coseismic rupture zone of the 1944 earthquake from ocean to land. Our model for the crustal structure is based on ocean bottom seismographic data. The crustal structure appears characteristic for subducting oceanic crust and a Neogene-Quaternary accretionary prism bounded by an island arc crust. The Neogene-Quaternary accretionary prism reaches a maximum thickness of 7 km at 50 km distance landward from the deformation front. The subducting oceanic crust can be traced down to 35 km. The subduction angle becomes steeper landward, reaching up to 11° beneath the island arc crust. The depth of the top of subducting oceanic crust at the down-dip limit of the rupture zone is 10 km.	Nakanishi, A., Takahashi, N., Park, J. O., Mura, S., Kodaira, S., Kaneda, Y., Hirata, N., Iwasaki, T., Nakamura, M. (2002). Crustal structure across the coseismic rupture zone of the 1944 Tonankai earthquake, the central Nankai Trough seismogenic zone. <i>Journal of Geophysical Research: Solid Earth</i> , 107, EPM2-1 - EPM 2-21. https://doi.org/10.1029/2001JB000424	
001	01JHQ0X 南海トラフ西部 (JAMSTEC KY9903)	https://www.jamstec.go.jp/obsnms_db/j/vmodel/ky9903-1_obs2.sh.gif KY9903 Vp model	ifferences in the coseismic rupture process between the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes have been studied by many fault models. To understand what factors control coseismic rupture zones, it is important to investigate differences in deep crustal structures of the rupture zones between the 1944 and 1946 earthquakes. The previously published crustal structure of the rupture zone of the 1944 earthquake shows that the coseismic rupture extends to the Neogene-Quaternary accretionary prism. However, little is known about the structure of the rupture zone of the 1946 earthquake. To obtain a complete image of the seismogenic zone of the 1946 earthquake, a wide-angle seismic survey was performed across the presumed coseismic rupture zone of the 1944 earthquake from ocean to land. Our model for the crustal structure is based on ocean bottom seismographic data. The crustal structure appears characteristic for subducting oceanic crust and a Neogene-Quaternary accretionary prism bounded by an island arc crust. The Neogene-Quaternary accretionary prism reaches a maximum thickness of 7 km at 50 km distance landward from the deformation front. The subducting oceanic crust can be traced down to 35 km. The subduction angle becomes steeper landward, reaching up to 11° beneath the island arc crust. The depth of the top of subducting oceanic crust at the down-dip limit of the rupture zone is 10 km. ifferences in the coseismic rupture process between the 1944 Tonankai and the 1946 Nankaido earthquakes have been studied by many fault models. To understand what factors control coseismic rupture zones, it is important to investigate differences in deep crustal structures of the rupture zones between the 1944 and 1946 earthquakes. The previously published crustal structure of the rupture zone of the 1944 earthquake shows that the coseismic rupture extends to the Neogene-Quaternary accretionary prism. However, little is known about the structure of the rupture zone of the 1946 earthquake. To obtain a complete image of the seismogenic zone of the 1946 earthquake, a wide-angle seismic survey was performed across the presumed coseismic rupture zone of the 1944 earthquake from ocean to land. Our model for the crustal structure is based on ocean bottom seismographic data. The crustal structure appears characteristic for subducting oceanic crust and a Neogene-Quaternary accretionary prism bounded by an island arc crust. The Neogene-Quaternary accretionary prism reaches a maximum thickness of 7 km at 50 km distance landward from the deformation front. The subducting oceanic crust can be traced down to 35 km. The subduction angle becomes steeper landward, reaching up to 11° beneath the island arc crust. The depth of the top of subducting oceanic crust at the down-dip limit of the rupture zone is 10 km.	Kodaira, S., Kurashimo, E., Park, J. O., Takahashi, N., Nakanishi, A., Mura, S., Iwasaki, T., Hirata, N., Ito, K., Kaneda, Y. (2002). Structural factors controlling the rupture process of a megathrust earthquake at the Nankai Trough seismogenic zone. <i>Geophysical Journal International</i> , 149, 815-835.	

図 2-1-①-8 3D マルチスケール構造情報共通基盤のコア部分として試作したメタデータの例。管理者がシステムに入力可能であり、ユーザは出力のみ可能。(上) 統合モデルについての例。(下) 既存の 3D P 波速度構造モデル⁴⁾に活用したモデルについての例の一部。

4) 浅部堆積層構造の推定

震源決定の信頼性向上に不可欠な堆積層補正值（浅層の S 波速度構造）の推定に向け、令和 5 年度までに紀伊半島沖の構造探査測線 KI03 を対象に進めてきた稠密リニアアレイ観測データを用いた表面波解析による S 波速度構造推定方法を、周辺の他の測線（KI04, KI05）に適用した。各測線の位置を図 2-1-①-9 に、結果の一部を図 2-1-①-10 に示す^{30), 31)}。並行して、構造探査データのレーシーバー関数解析手法³²⁾を表面波解析と同一測線上の近年の構造探査データ²⁹⁾に適用し、両手法による S 波速度構造モデルと反射法断面を合わせて比較した（図 2-1-①-11）。両手法による海域浅部堆積層の最浅部の S 波速度は、0.2～0.3 km/s で互いによく一致しており、レーシーバー関数解析を単独で DONET 観測点へ十分適用できることが確認できた。

海洋研究開発機構が DONET 海域で実施したこれまでの構造探査時のエアガン発震記録を各 DONET 観測点において切り出し、上下動及び水平動 2 成分のレーシーバーギャザーを作成した。このとき、DONET 観測点直下の PS 変換面が明瞭に抽出できるオフセット距離を各点で調整した。図 2-1-①-12 にレーシーバー関数解析の例を示す。各観測点で作

成したレシーバーギャザーを確認し、変換波が明瞭に認められるオフセット距離の範囲についてレシーバー関数を計算することで、変換面が明瞭に抽出できることが分かる。一方、探査測線上の構造が観測点を挟んで大きく変化するような地点では、変換面の抽出が困難である。一例を図 2-1-①-13 に示す。このような観測点では、観測点の両側の構造変化を考慮し、得られたレシーバー関数から変換面の連続性を確認しながら構造を解釈する必要がある。図 2-1-①-9 に示す探査測線とその近傍の DONET 観測点の組み合わせでレシーバー関数解析を実施し、各観測点直下の S 波速度構造（図 2-1-①-9）、0.3 km/s 未満の S 波速度を持つ堆積物の厚さ、P 波速度構造、 V_P/V_S 値を推定した（図 2-1-①-14）。

推定された浅部堆積層構造と前述のマルチパラメータ 3D 地下構造モデルの整合性の確認、マルチパラメータ 3D 地下構造モデルへの反映などの方針については、今後、引き続いて検討すべき課題である。

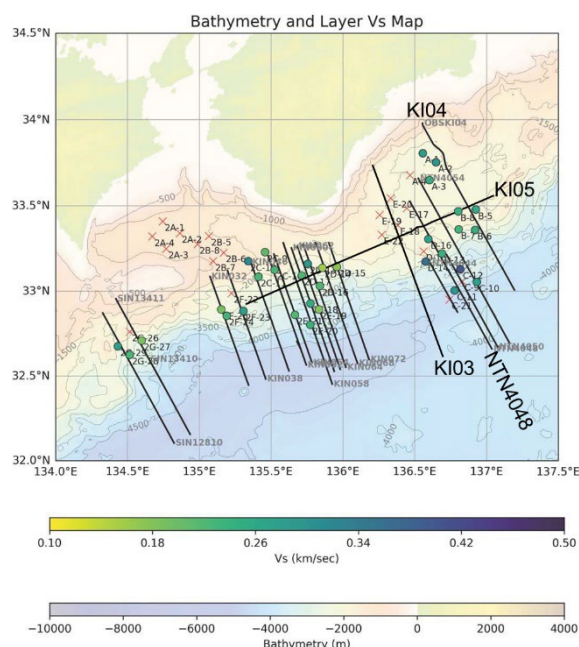


図 2-1-①-9 解析に使用した構造探査測線（黒線）²⁹⁾とレシーバー関数解析により推定された DONET 観測点直下の S 波速度構造。各観測点直下の S 波速度の値を地図下部上段のカラーズケールで示す。

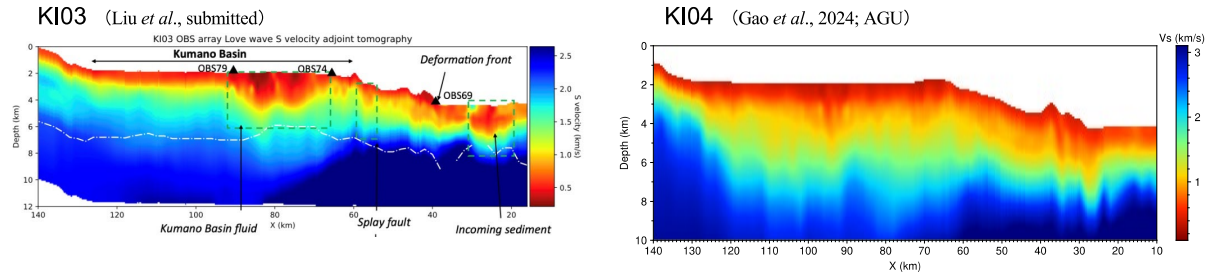


図 2-1-①-10 構造探査測線 KI03, KI04 のデータに適用した表面波解析により推定された S 波速度構造^{30), 31)}。S 波速度の値を構造断面の右側にカースケールで示す。測線配置は図 2-1-①-9 に示す。

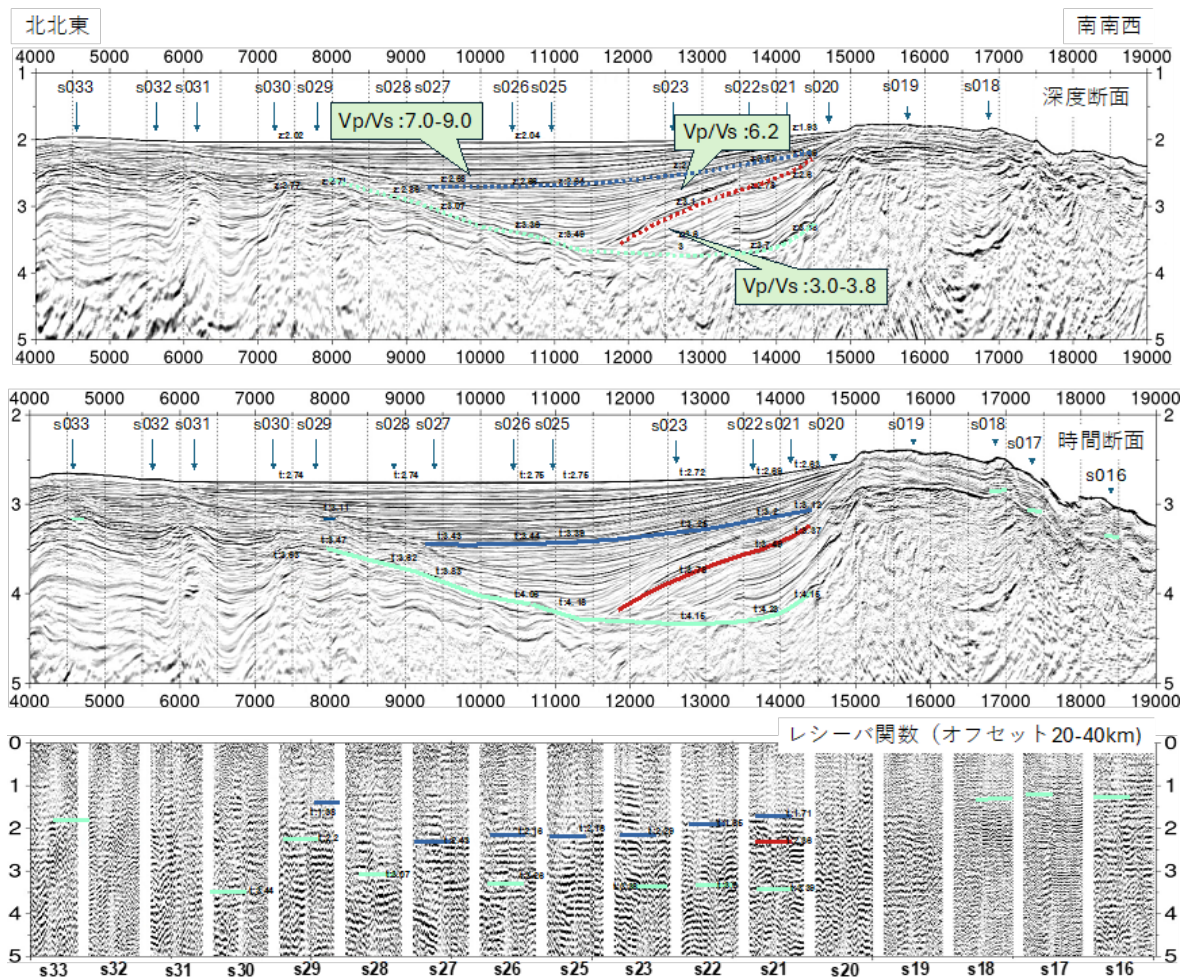


図 2-1-①-11 紀伊半島沖 KI04 測線についてのレーパー関数解析の結果。測線配置は図 2-1-①-9 に示す。上から順に、反射法地震探査による深度断面、時間断面、OBS データ²⁹⁾を用いたレーパー関数に解釈と結果を重ね合わせて示す。

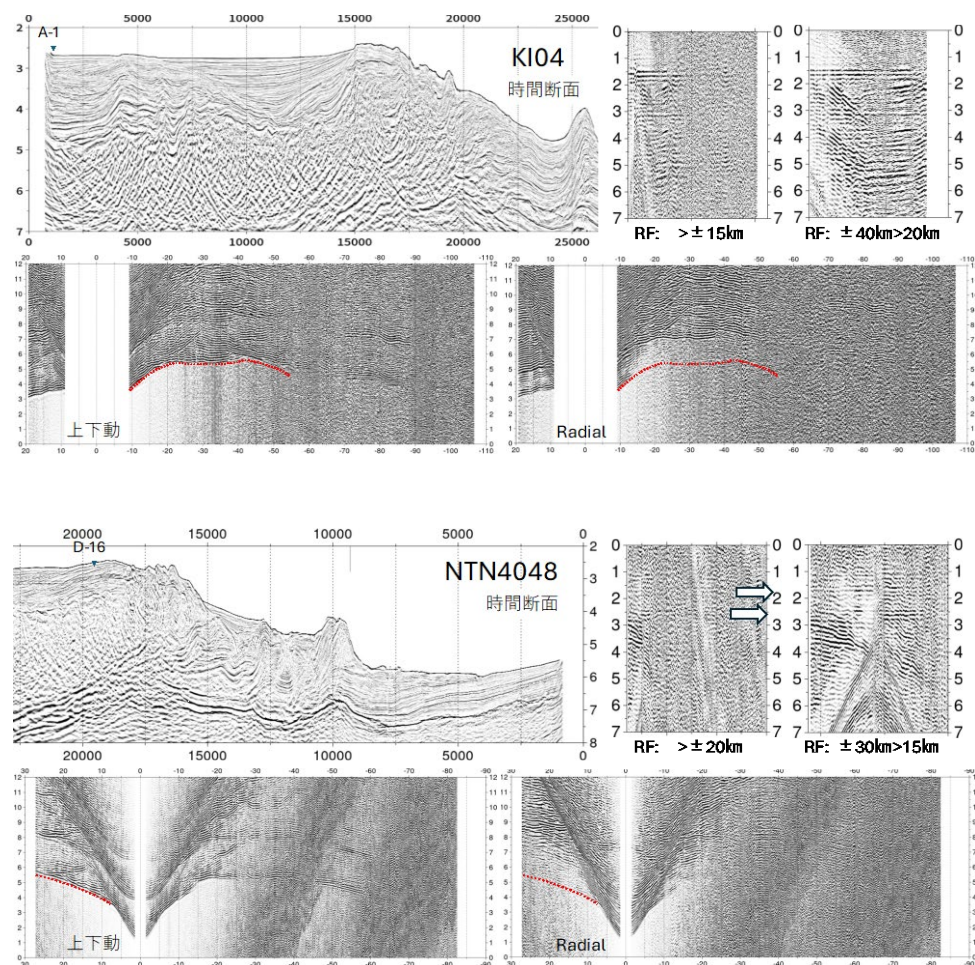


図 2-1-①-12 KI04、NTN4048 測線の構造探査データ²⁹⁾を使った DONET A-1 及び D-16 観測点でのレーシーバー関数解析例。構造探査測線と観測点の配置は図 2-1-①-9 に示す。各図上段左に近傍探査測線の反射法探査（時間断面）と DONET 観測点を測線に投影した位置を示す。下段は、探査測線に沿ったエアガン発震記録を DONET 観測点で切り出して作成した上下動（下段左）及び水平動 Radial 成分（下段右）のレーシーバーギャザーを示す。赤点線は明瞭な初動走時を表す。これらのレーシーバーギャザーの異なるオフセット距離範囲について計算したレーシーバー関数を上段右に示す。

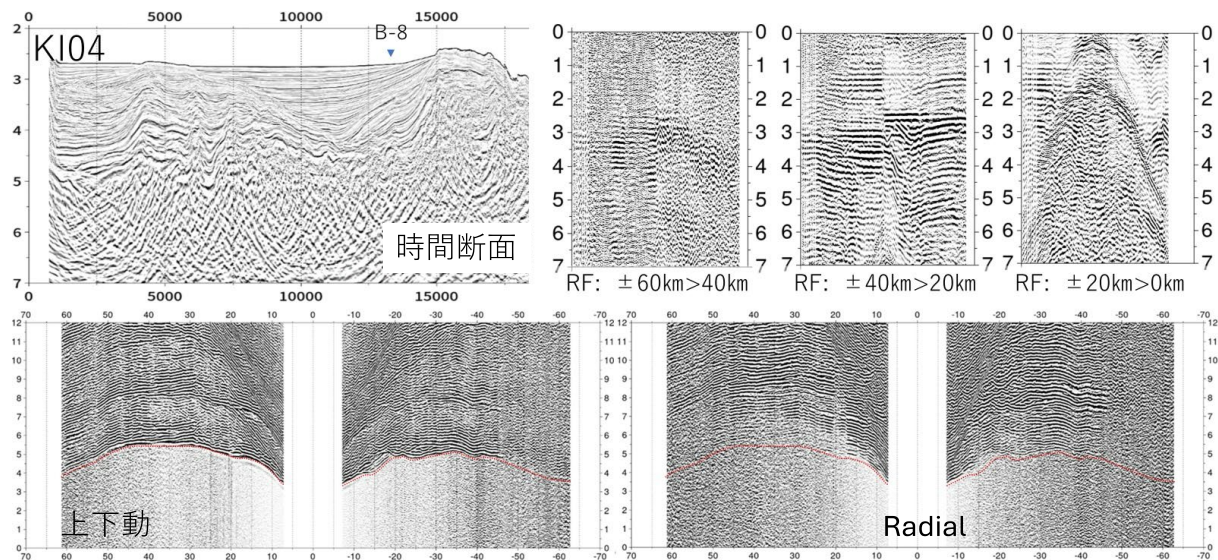


図 2-1-①-13 KI04 測線の構造探査データ²⁹⁾を使った DONET B-8 観測点でのレシーバー関数解析例。構造探査測線と観測点の配置は図 2-1-①-9 に示す。上段左に近傍探査測線の反射法探査(時間断面)と DONET 観測点を測線に投影した位置を示す。下段は、探査測線に沿ったエアガン発震記録を DONET 観測点で切り出して作成した上下動(下段左)及び水平動 Radial 成分(下段右)のレシーバーギャザーを示す。赤点線は明瞭な初動走時を表す。これらのレシーバーギャザーの異なるオフセット距離範囲について計算したレシーバー関数を上段右に示す。

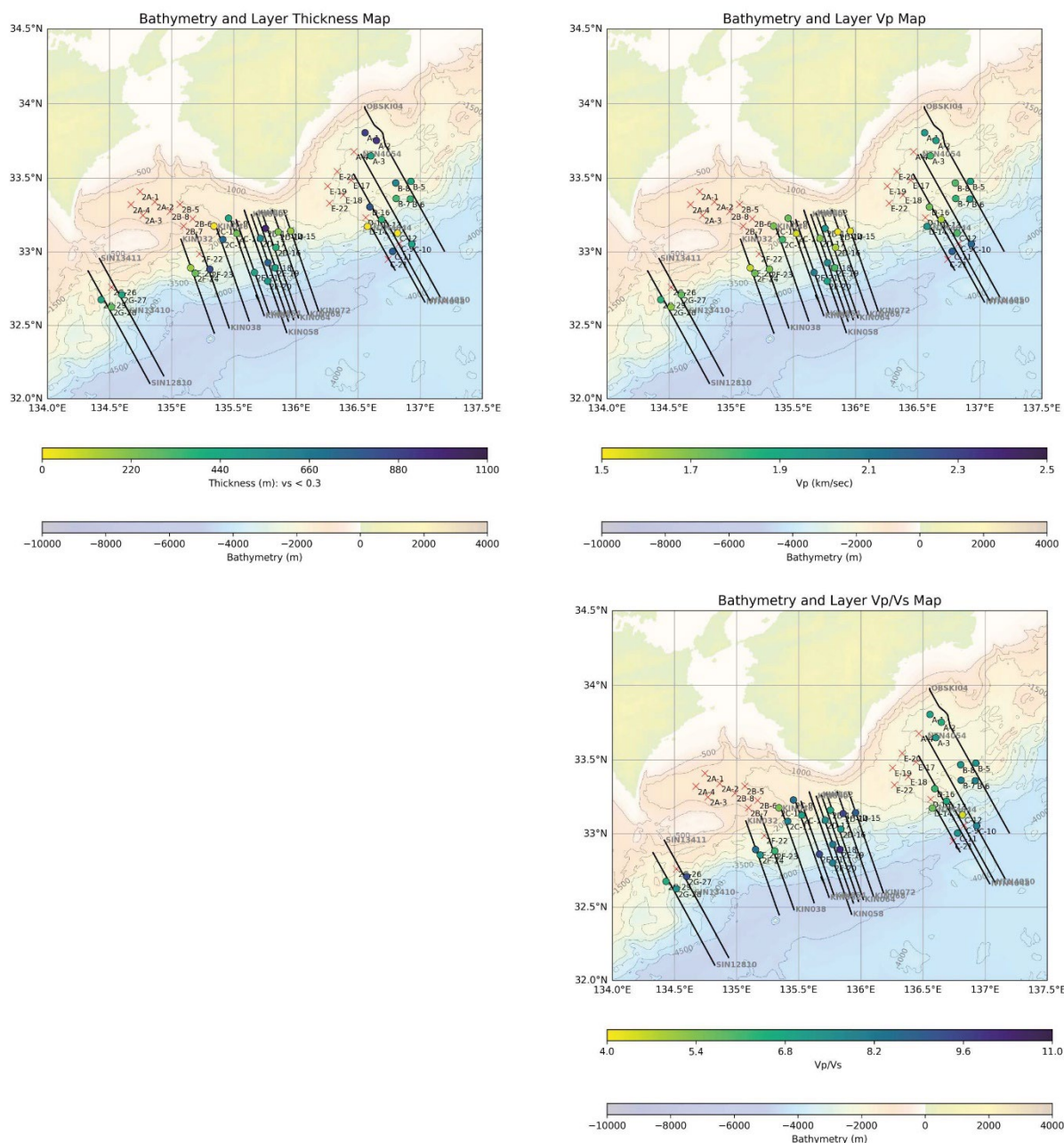


図 2-1-①-14 解析に使用した構造探査測線（黒線）²⁹⁾とレーザー関数解析により推定された DONET 観測点直下の 0.3 km/s 未満の S 波速度を持つ堆積物の厚さ（上段左）、P 波速度（上段右）及び V_P/V_S 値（下段）を各図下部上段のカラーズケールで示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ域におけるマルチパラメータ 3D 構造モデルの高精細化を目指し、令和 5 年度までに構築した 3D P 波速度構造モデルの検証結果や実際に自動震源決定システムでの処理結果を考慮した上で、新たな観測や解析に基づく速度構造情報を構築中のモデルに取り込む方法の改良を進め、モデルの更新を実施した。これにより、本年度の業務目的である海陸を統合した高精細マルチパラメータ 3D 構造モデルの更新並びに日

向灘及び東海沖へのモデル拡張は完遂した。ただし、モデルの構築に活用した地層境界面の選定、多様な構造情報の統合方針、パラメータ設定、具体的な補間方法については、今後も更なる改良や検討の必要がある。

今年度構築した3D P波速度構造モデルについて、制御震源の観測走時データに基づく検証方法を検討し、実際にその方法でモデルの妥当性について確認した。今年度構築した3D S波速度構造については、調査観測から直接推定された結果と大きな差はなく、変換式の妥当性が確認された。3D密度構造の検証については、本サブ課題で構築した3D密度構造モデルを用いた重力異常を計算し、ブーゲー異常の観測値と比較することを基本方針として環境整備を進めた。沈み込み帯周辺での重力異常の観測値には、沈み込むスラブによる長周期の影響が全体的に反映されていることを考慮に入れ、その影響を観測値から除去するための計算環境を整備した。これにより、今後のモデル更新時に、同等の検証を行うことが可能である。以上により、本年度の業務目的である観測データを用いたモデル更新及び検証の実施、モデルの誤差評価手法についての検討は完遂した。P波速度構造モデルの確度や誤差の評価については、データとして収集できる情報を整理したが、各構造情報によって信頼性の考え方や提示方法が異なることにより画一的な取り扱いが難しいことが判明したため、今後の新たな課題とした。マルチパラメータ3D構造モデルの検証・評価の具体的な方法についても検討が必要である上、今後実施を検討すべき、評価結果をもとに構築した3D構造モデルや経験式に基づく物性の変換式の修正は複数の問題が関わっているため容易に解決できるものではない。これらについては、本プロジェクト終了後も引き続き検討すべき課題である。ただし、今後のマルチパラメータ3D構造モデル更新に備え、参照するモデルの追加・更新やマルチパラメータ化に用いる経験式の修正、経験式の地域や構造区分ごとの割り当て方などは柔軟に対応できる環境を整備した。

令和3年度から他のサブ課題担当者等と開始したモデル共有に関する議論を継続するとともに、この議論に基づき、今後のモデル構築や利活用を想定した枠組みのプロトタイプのコア部分の試作を継続した。今年度は対象とする地下構造モデルに関する情報として、モデル構築に使用した元データと調査などの情報、文献などをメタデータとして追加入力した。さらに、本サブ課題で構築するマルチパラメータ3D構造モデルとそれに関わる構造情報を対象とした処理ツールも試作した。この処理ツールにより、プレート形状モデルや3D構造モデルから指定した領域のデータ切り出しとその領域内の補間、データフォーマット変換を可能とする環境の構築が完了した。将来的には、上述の構造モデルのメタ情報入手や検索が可能なポータルサイト上でのツール利用を可能とするような設計が必要である。今後の仕様を検討しつつ、扱う構造情報を拡張していくこと、「3Dマルチスケール構造情報基盤」を構築し、維持する仕組みやそのための体制を整えていくことが今後の課題である。

マルチパラメータ化に向けたS波速度構造の直接推定並びに震源決定の信頼性向上に不可欠な堆積層補正值推定に向けて、令和5年度までに進めてきた表面波解析によるS波速度構造推定方法を周辺の他の測線にも適用した。並行して構造探査データのレシーバー関数解析手法表面波解析と同一測線上について実施し、両手法による海域浅部堆積層の最浅部のS波速度の整合性を確認した。さらに、レシーバー関数解析をDONET観

測点へ適用し、DONET 観測点直下の P 波速度、S 波速度、 V_P/V_S 値、ならびに 0.3 km/s 未満の S 波速度を持つ堆積層の厚さについて空間的にマッピングした。これにより、本年度の業務目的である DONET 観測点周辺の堆積層構造情報の整理が完遂した。今後、これまでの調査観測データから直接推定された S 波速度構造や本サブ課題で構築した 3D S 波速度構造モデル等を参照しつつ、震源決定に資する DONET 観測点直下の堆積層補正值としてさらに整理していく必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人海洋研究開発機構：防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト 令和 5 年度 成果報告書 令和 6 年 5 月，
<https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nankai-bosai/nankai-bosai-r05/>，（参照 2025-3-21），2024.
- 2) 標高・傾斜度 5 次メッシュデータ，国土数値情報ダウンロードサイト，
<<https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-d.html>>，（参照 2025-3-19），2011.
- 3) General Bathymetric Chart of the Oceans, Gridded Bathymetry Data (GEBCO_2022_Grid)，
<https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/>，（参照 2025-3-19），2022.
- 4) Nakanishi A. et al.: Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis, in "Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura", ed. by T. Byrne, M. B. Underwood, III, D. Fisher, L. McNeill, D. Saffer, K. Ujiie, A. Yamaguchi, Geological Society of America Special Paper 534, 69-86, doi: 10.1130/2018.2534(04), 2018.
- 5) Arnulf, A. F., Bassett, D., Harding, A. J., Kodaira, S., Nakanishi, A., and Moore, G.: Upper-plate controls on subduction zone geometry, hydration and earthquake behavior, Nature Geoscience, 15, 143-148, doi: 10.1038/s41561-021-00879-x, 2022.
- 6) Qin Y., Fujie, G., Kodaira, S., Nakamura, Y., Kaiho, Y., No, T., Obana, K. and Miura, S.: High-density seismic refraction imaging of plate-boundary structures in the slow earthquake gap zone off western Kii Peninsula, Nankai Trough, Geophys. Res. Lett., 48, e2020GL089132, doi: 10.1029/2020GL089132, 2020.
- 7) 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人海洋研究開発機構：海域における断層情報総合評価プロジェクト 令和元年度 成果報告書 令和 2 年 5 月，
<https://www.jishin.go.jp/database/project_report/kaiiki/kaiiki-r01/>，（参照 2025-3-21），2020.
- 8) 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人海洋研究開発機構：東海・東南海・南海地震の連動性評価プロジェクト 東海・東南海・南海地震の連動性評価のための調

- 査観測・研究 平成 20～24 年度 成果報告書 平成 25 年 5 月,
 <https://jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/tokai_pro/h24/h24_1.pdf>, (参照
 2025-3-21) , 2013.
- 9) 海洋研究開発機構: 「浜岡原子力発電所耐震バックチェック評価のうち敷地周辺海域の地盤構造解析検討業務」に関する報告書 平成 23 年 3 月, 1-21, 2011.
 - 10) Nakamura, Y., Shiraishi, K., Fujie, G., Kodaira, S., Kimura, G., Kaiho, Y., No, T., and Miura, S.: Structural anomaly at the boundary between strong and weak plate coupling in the Central-Western Nankai Trough, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL098180, doi: 10.1029/2022GL098180, 2022.
 - 11) Yamamoto, Y., Obana, K., Takahashi, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., and Kaneda, Y.: Imaging of the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region, western Nankai Trough subduction zone, *Tectonophysics*, 589, 90-102, doi: 10.1016/j.tecto.2012.12.028, 2013.
 - 12) Yamamoto, Y., Obana, K., Takahashi, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., and Kaneda, Y.: Seismicity and structural heterogeneities around the western Nankai Trough subduction zone, southwestern Japan, *Earth and Planetary Science Letters*, 396, 36-45, doi: 10.1016/j.epsl.2014.04.006, 2014.
 - 13) Yamamoto, Y., Yada, S., Ariyoshi, K., Hori, T., and Takahashi, N.: Seismicity distribution in the Tonankai and Nankai seismogenic zones and its spatiotemporal relationship with interpolate coupling and slow earthquakes, *Progress in Earth and Planetary Science*, 9,32, doi: 10.1186/s40645-022-00493-4, 2022.
 - 14) Tonegawa, T., Araki, E., Kimura, T. Nakamura, T., Nakano M., and Suzuki, K.: Sporadic low-velocity volumes spatially correlate with shallow very low frequency earthquake clusters, *Nat. Commun.*, 8, 2048, doi: 10.1038/s41467-017-02276-8, 2017.
 - 15) Koketsu, K., Miyake, H., and Suzuki, H.: Japan integrated velocity structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake 28 Engineering*, Vol. 1-4,
 <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1773.pdf>, (参照 2025-3-19) , 2012.
 - 16) Shiraishi, K., Nakamura, Y., Arai, R., No, T., Kaiho, Y., Miura, R., Nakanishi, A., Miura, S., Fujie, G. and Kodaira, S.: Topography of the subducting basement throughout the entire Nankai Trough, submitted to *Scientific Reports*.
 - 17) Matsubara, M., Ishiyama, T., No, T., Uehira, K., Mochizuki, M., Kanazawa, T., Takahashi, N. and Kamiya S.: Seismic velocity structure around the sea of Japan with large events derived from seismic tomography for whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Earth, Planets and Space*, 74, 171, doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01724-0>, 2022.

- 18) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS 地盤情報，
<https://www.j-shis.bosai.go.jp/download>，（参照 2025-3-19）．
- 19) Deutsch, C.V. and Journel, A.G.: GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, New York, second edition. 369 pages, 1997.
- 20) 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人海洋研究開発機構：防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト 令和2年度 成果報告書 令和3年5月，<
https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nankai-bosai/nankai-bosai-r02/> （参照 2025-3-21）, 2021.
- 21) Sethian, J.: Fast marching methods. SIAM Review, 41(2):199-235, doi: 10.1137/S0036144598347059, 1999.
- 22) Treister, E. and Haber, E.: A fast marching algorithm for the factored eikonal equation. Journal of Computational Physics, 324, 210-225, 2016.
- 23) Ganster, K.: eikonalfm: Python module for solving the Eikonal equation using the fast marching method.
<https://github.com/kevinganster/eikonalfm>，（参照 2025-3-18），2023.
- 24) Parker, R.L.: The rapid calculation of potential anomalies, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 31, 447-455, 1972.
- 25) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：日本重力データベース DVD 版、2013.
- 26) Bassett, D., Sandwell, D. T., Filako, Y. and Watts, A. B.: Upper-plate controls on co-seismic slip in the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-oki earthquake, Nature, 531(7592):92-6., doi:10.1038/nature16945, 2016.
- 27) Bassett, D. et al: Crustal structure of the Kermadec arc from MANGO seismic refraction profiles, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121, 10, 7514-7546, doi:10.1002/2016JB013194, 2016.
- 28) Liu, X., Nakanishi, A., Fujie, G., Nakamura, Y., Obana, K., and Kodaira, S.: Abundant fluids in southern Kumano Basin linked to fluid source and shallow slow earthquakes at plate boundary in Nankai Trough, submitted to Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America
- 29) Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology: JAMSTEC Seismic Survey Database, <https://www.jamstec.go.jp/obsmcs_db/j/Nankai_3D_model-j.html>, <https://www.jamstec.go.jp/obsmcs_db/j/Nansei_plate.html>, doi: 10.17596/0002069, （参照 2025-3-19），2004.
- 30) Gao, L., Liu, X., Nakanishi, A., Wang, X., Zhanwen, L. and Fujie, G.: The shallow crustal S wave structure from ambient noise differential adjoint tomography in the Nankai Trough, AGU Annual Meeting, S31C-3237, 2024.
- 31) Liu, X., Wang, X., Nakanishi, A., Gao, L., Zhanwen, L. and Fujie, G.: Shear wave velocity tomography using ambient noise interferometry from a linear OBS array across the Kumano Basin, AGU Annual Meeting, S31C-3239, 2024.

- 32) 仲西理子, Xin Liu, Yanfang Qin, 藤江剛, 汐見勝彦, 小平秀一, 高橋成実, 中村武史: 南海トラフ域の海底地震計データを用いたS波構造推定の試み, 日本地震学会 2022 年秋季大会, 2022.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
南海トラフ域の3次元速度構造モデルに基づく高速走時計算のための physics-informed neural networkの構築（ポスター発表）	縣 亮一郎 馬場 慧 仲西 理子 中村 恭之	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024. 5	国内
Constructing a 3D multi-parameter model of the Nankai Trough（口頭発表）	仲西 理子 Yanfang Qin Xin Liu 藤江 剛 汐見 勝彦 小平 秀一 高橋 成実 中村 武史 富士原敏也	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024. 5	国内
Stochastic interpolation of subducted plate geometry at the Nankai trough（口頭発表）	高橋 努 仲西 理子	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024. 5	国内
海底地震計を用いた地震探査による熊野灘沖の地震波速度構造（ポスター発表）	藤中 達也 小平 秀一 新井 隆太 仲西 理子 海宝 由佳 三浦 亮 三浦 誠一 中村 恭之 藤江 剛	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024. 5	国内

Rapid hypocenter determination tool for the Nankai Trough subduction zone based on fast travel time calculation using physics-informed neural networks (口頭発表)	Agata, R. Baba, S. Nakanishi, A. Nakamura, Y.	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024. 9	国外
Monitoring of fast and slow earthquakes using DONET and distributed acoustic sensing data in the Nankai Trough, southwest Japan (ポスター発表)	Baba, S. Araki, E. Toh, A. Agata, R. Nakanishi, A.	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024. 9	国外
アイコナル方程式に基づく地震波到達時間計算の物理情報深層学習におけるスペクトルバイアス (口頭発表)	縣 亮一郎 馬場 慧 仲西 理子 中村 恭之	日本応用数理学会 2024年度年会	2024. 9	国内
HypoNet Nankai: 物理情報深層学習を用いた南海トラフ域での高速震源決定ツール (口頭発表)	縣 亮一郎 馬場 慧 仲西 理子 中村 恭之	日本地震学会 2024年度秋季大会	2024. 10	国内
海底地震計を用いた地震探査による熊野灘沖の地震波速度構造 (口頭発表)	藤中 達也 小平 秀一 新井 隆太 仲西 理子 海宝 由佳 三浦 亮 三浦 誠一 中村 恭之 藤江 剛	日本地震学会 2024年度秋季大会	2024. 10	国内

南海トラフ域の海陸統合 3次元マルチパラメータ 地下構造の構築と検証 (ポスター発表)	仲西 理子 Yanfang Qin Xin Liu 縣 亮一郎 富士原敏也 藤江 剛 汐見 勝彦 小平 秀一 高橋 成実 中村 武史	日本地震学会 2024年度秋季大 会	2024. 10	国内
DONETと分布型音響センシ ングのデータを用いた南 海トラフにおける地震・ スロー地震の自動解析 (ポスター発表)	馬場 慧 荒木 英一郎 藤 亜希子 縣 亮一郎 仲西 理子	日本地震学会 2024年度秋季大 会	2024. 10	国内
The shallow crustal S wave structure from ambient noise differential adjoint tomography in the Nankai Trough (ポスター 発表)	Gao, L. Liu, X. Nakanishi, A. Wang, X. Zhanwen, L. Fujie, G.	AGU Annual Meeting 2024	2024. 12	国外
Shear wave velocity tomography using ambient noise interferometry from a linear OBS array across the Kumano Basin (ポス ター発表)	Liu, X. Wang, X. Nakanishi, A. Gao, L. Zhanwen, L. Fujie, G.	AGU Annual Meeting 2024	2024. 12	国外
Rapid hypocenter determination tool for the Nankai Trough subduction zone based on physics-informed neural networks (ポスタ ー発表)	Agata, R. Baba, S. Nakanishi, A. Nakamura, Y.	AGU Annual Meeting 2024	2024. 12	国外

Construction of automatic hypocenter location system using offshore seismic network and distributed acoustic sensing data using submarine cables (口頭発表)	Baba, S. Araki, E. Toh, A. Agata, R. Nakanishi, A.	Underwater Technology symposium	2025. 3	国外
--	--	---------------------------------	---------	----

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Thick slab crust with rough basement weakens interplate coupling in the western Nankai Trough（査読あり）	Arai, R. Shiraishi, K. Nakamura, Y. Fujie, G. Miura, S. Kodaira, S. Bassett D. Takahashi, T. Kaiho, Y. Hamada, Y. Mochizuki, K. Nakata, R. Kinoshita, M. Hashimoto, Y. Okino, K.	Earth, Planets and Space	2024. 5	国外
Prevalence of mud diapirs in the Hyuga-nada subduction zone, southwest Japan, and its implications on hydrogeological processes（査読あり）	Arai, R. Shiraishi, K. Nakamura, Y. Fujie, G. Kioka, A. Kinoshita, M. Fukuchi, R.	Progress in Earth and Planetary Science	2025. 2	国外

Potential fluid migration process inferred from integrated active-source seismic imaging in the Nankai Trough subduction zone off Cape Muroto, Japan (査読あり)	Shiraishi, K. Fujie, G. Arai, R. Nakamura, Y.	Marine and Petroleum Geology	2025. 3	国外
---	--	------------------------------	---------	----

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

② 3D構造モデルを用いた自動震源決定処理システムの構築

(a) 業務の要約

3D構造モデルを用いた自動震源決定処理システム（以下、本システム）の仮運用を継続した。本課題で令和5年度に構築した3D構造モデルを本システムに実装し、日向灘及び紀伊半島南東沖を対象とした震源計算を試行するとともに、得られた震源計算結果について、他の震源カタログとの対比、検討を行った。仮運用中の本システムにより得られる自動震源と長期震源カタログを用いて地震活動評価に資する情報を作成し、2024年8月8日に発生した日向灘の地震後に臨時開催された気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」等への資料提供を行った。

(b) 業務の成果

1) 新たな3D構造モデルを用いた震源計算の試行

本課題では、南海トラフ及びその周辺で発生する地震の活動状況を迅速かつ精度良く把握出来るようになることを目指し、高精度な海陸統合3D構造モデルに基づいて自動的に震源位置を推定するシステムの整備を行ってきた。一方、主に海域で実施された構造探査結果と海陸の観測データに基づく地震トモグラフィ解析結果を統合、調整することで新たな3D P波速度構造モデルを構築するとともに、様々なデータに基づく関係式による変換により、3D S波速度構造モデルも整備している¹⁾。これにより、従来のモデルでは解像が十分ではなかったトラフ軸周辺を含む海陸統合3D構造モデルのプロトタイプが得られた。今年度は、令和5年度に構築した海陸統合3D構造モデル（以下、BN23モデル）を用いて、日向灘及び紀伊半島南東沖を対象とした震源再決定を行った。

本システムは、サーバ上に複数の仮想マシン（VM）を設定し、各 VM 上では異なる計算パラメータや構造モデルを用いて、完全に独立した震源計算を実施出来る構成となっている。また、地震ごとにひとつの ID、VM ごとに独自のサブ ID を指定した上で、全ての VM の処理結果をひとつのリレーショナルデータベース（RDB）に保存する。これにより、異なる VM での結果を互いに比較、検討することが容易となる構成となっている。試験稼働中の本システムの自動処理では、地震波走時トモグラフィ結果に基づく構造モデル（以下、トモグラフィモデル）²⁾を用いた震源計算を実施している。さらに、2003 年 1 月 1 日以降に発生したマグニチュード（M）1.0 以上の地震を対象としてトモグラフィモデルを用いた震源再決定を行うことにより、20 年以上の長期間にわたる震源カタログ（以下、長期震源カタログ）の整備も進めている¹⁾。したがって、トモグラフィモデルを用いた処理は継続させつつ、これとは異なる VM 上において、BN23 モデルを採用した震源計算を試行することとした。震源計算には、Pseudo-bending 法³⁾により、仮想震源と観測点間の走時を逐次計算する方法を用いた。試行対象は、防災科研が別途運用する一次元速度構造を用いた自動震源決定システム（以下、Hi-net システム）によって 2003 年 1 月から 2024 年 8 月に日向灘及び紀伊半島南東沖周辺で検知された M1.5 以上の地震とした。得られた震源再計算結果は、気象庁一元化震源⁴⁾や Hi-net システムによる震源、トモグラフィモデルを用いて求めた震源分布と比較した。図 2-1-②-1 に計算対象領域を赤枠で示す。

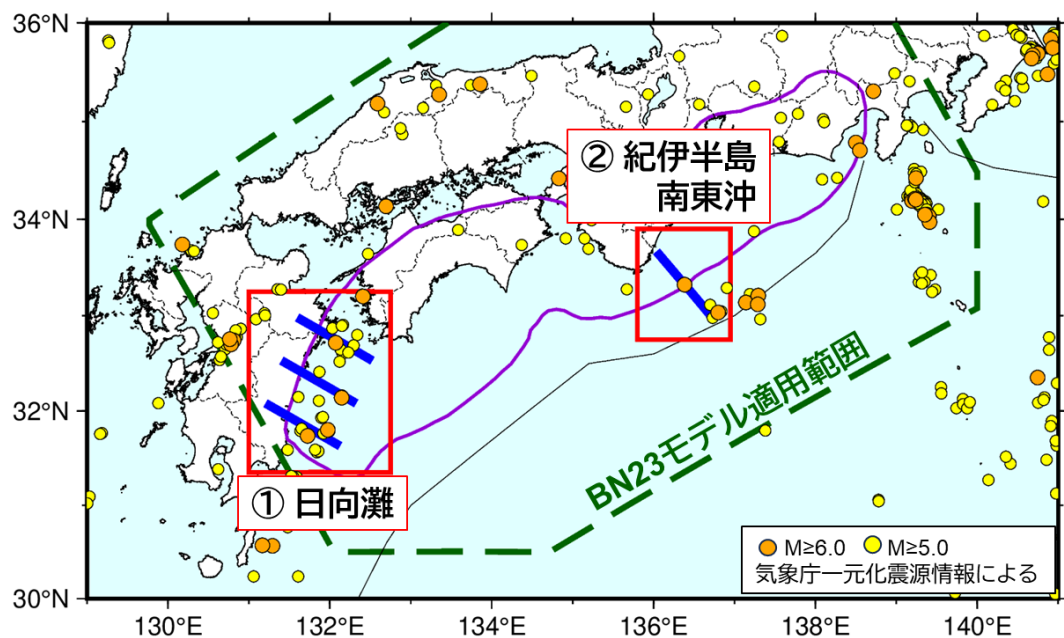


図 2-1-②-1 本課題で新たに構築した 3D 構造モデル（BN23 モデル）を用いて震源再計算を試行した範囲（赤枠）。青線は断面図を作成した測線の位置を、紫線は南海トラフ沿いの地震の想定震源域⁵⁾を表す。橙丸、黄色丸はそれぞれ気象庁による M6.0 以上及び 5.0 以上の地震の震央位置⁴⁾を表す。緑破線は、BN23 モデルの適用範囲を表す。

日向灘は、南海トラフ巨大地震想定震源域の中でもっとも地震活動が活発な地域である。本海域の北部では 2022 年 1 月 22 日に気象庁マグニチュード (Mj) 6.6 のスラブ内地震、中部では 2014 年 8 月 29 日に Mj6.0 のプレート間地震、南部では 2019 年 5 月 10 日に Mj6.3、2024 年 8 月 8 日に Mj7.1 のプレート間地震が発生した。このうち、2024 年 8 月の地震は、「南海トラフ地震臨時情報 (巨大地震注意)」が初めて発表された地震である。

本海域における震源分布を図 2-1-②-2 に示す。3D 構造モデルを用いた震源再決定の結果、海域の地震活動がやや陸側に移動する傾向がある。また、BN23 モデルを用いて再決定した震源は、日向灘北部を中心に全体的に浅くなる特徴が見られる。大分県から豊後水道にかけての地域や伊予灘の一部の深さ 60 km 以深で発生する地震活動について、BN23 モデルでは震源決定に失敗するケースが多々見られた。この地域では、地殻浅部構造として用いた全国一次地下構造モデル⁶⁾の速度変化が大きいため、波線経路を適切に評価できなかった可能性がある。今年度の 3D 構造モデル構築・更新においては、本結果をフィードバックに基づき、陸域浅部のモデル統合方針の見直しが行われた (図 2-1-①-1)。

図 2-1-②-3 に日向灘南部における地震活動の鉛直断面図を示す。断面の位置は左側の地図上に黒太線で示しており、断面線の両側 10 km 内に位置する地震を抽出し、投影した。この断面線では、距離約 20 km より右側が海域に相当する。Hi-net システムで求めた震源は、海域 (距離-20 km 付近) では深さ 10~50 km の範囲に大きくばらついて分布している。気象庁一元化震源においても、地震発生層の厚さは 30 km と厚い。この海域では沖合に地震観測点が無く、震源の西側 (九州側) でしか観測出来ない点に加え、九州パラオ海嶺がフィリピン海プレートとともに沈み込むことによる複雑な地下構造となっている⁷⁾ことから、1D 構造モデルを用いた震源計算は不安定になっている可能性がある。BN23 モデルを用いて計算した結果、沖合の地震活動はおおよそ 10~20 km 程度陸側に移動するとともに、30 km よりも深く決まっていた地震は軒並み 10 km 程度浅くなるなど、大きな移動を生じた。また、地震発生層の厚さも 20 km 程度となり、ややまとまる傾向が認められた。一方、トモグラフィモデルによる震源分布は Hi-net システムによる震源と明瞭な差異は見られない。図 2-1-②-4 に、日向灘南部におけるトモグラフィモデル及び震源計算に用いた BN23 モデルの P 波速度構造断面を示す。トモグラフィモデルでは沖合の浅部及び深部の構造が十分に解像されておらず、BN23 モデルに見られる深さ 20 km 以浅の低速度の層が考慮されていない。BN23 モデルを用いた場合、海底下のプレート境界付近及びスラブ内で発生した地震波が陸域の観測点に到達するためには、この低速度な層を通過することになる。この影響により上述した震源移動が発生したものと考えられる。同様の震源分布の変化は日向灘中部 (図 2-1-②-5) でも見られる。日向灘中部では、1D 構造モデル使用時に見られた距離-30 km、深さ 5~20 km のクラス的な地震活動が、距離-20 km、深さ 10~25 km に移動している。また、1D 構造モデルでは深さ 10~20 km 付近に陸側から海域に向けてほぼ平坦な地震活動が分布しているが、BN23 モデルによる震源分布を見ると、沈み込むフィリピン海プレートに向かって明瞭に傾き下がる分布として捉えられている。

日向灘北部の断面図を図 2-1-②-6 に示す。この断面図では、海岸付近で発生する地震の震央がわずかに陸域に移動する傾向が確認された一方、沖合の地震の震央移動は顕著では無かった。これは、九州に加えて、四国に位置する地震観測点が震源決定に強く寄与している影響によると考えられる。一方、距離 20 km 以遠の活動について、BN23 モデルを採用すると、震源が極端に浅くなる傾向が見られた。この断面線での P 波速度構造を図 2-1-②-7 に示す。両者の構造を比較すると、トモグラフィモデルで解像出来ていない沖合極浅部において、BN23 モデルでは P 波速度が 2 ~ 5 km/s 程度の低速度な層を設定していること、それ以外では両者は良く一致していることが分かる。図 2-1-②-4 に示す通り低速度な層は日向灘南部の方が顕著であるが、日向灘南部の震源決定は九州の観測点に依存しているため、この低速度な層の影響を受けにくい。これに対し、日向灘北部は、震源の北東方向に四国の観測点が位置している。南部よりも低速度の層厚が薄いものの、これらの観測点でこの低速度の層の影響を強く受けた可能性がある。

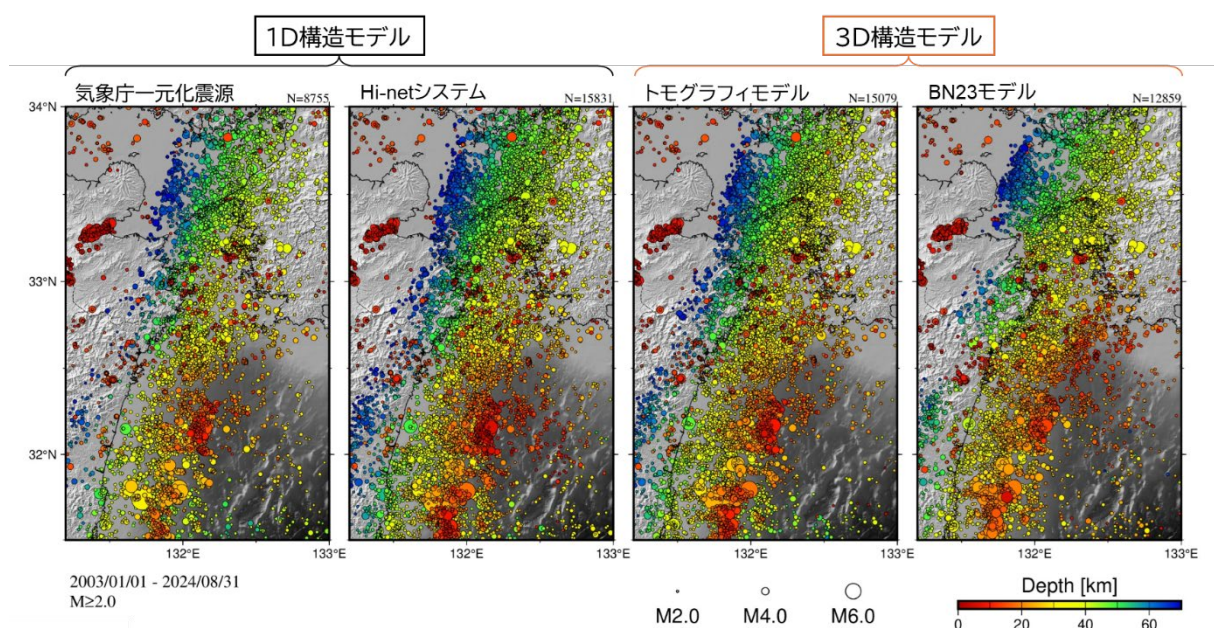


図 2-1-②-2 日向灘における震源分布。左から順に気象庁一元化震源、Hi-net システムによる震源、本システムにてトモグラフィモデル及び BN23 モデルを用いて再決定した震源の分布をそれぞれ示す。ここでは、2003 年 1 月から 2024 年 8 月までに発生した M 2.0 以上の地震を表示した。

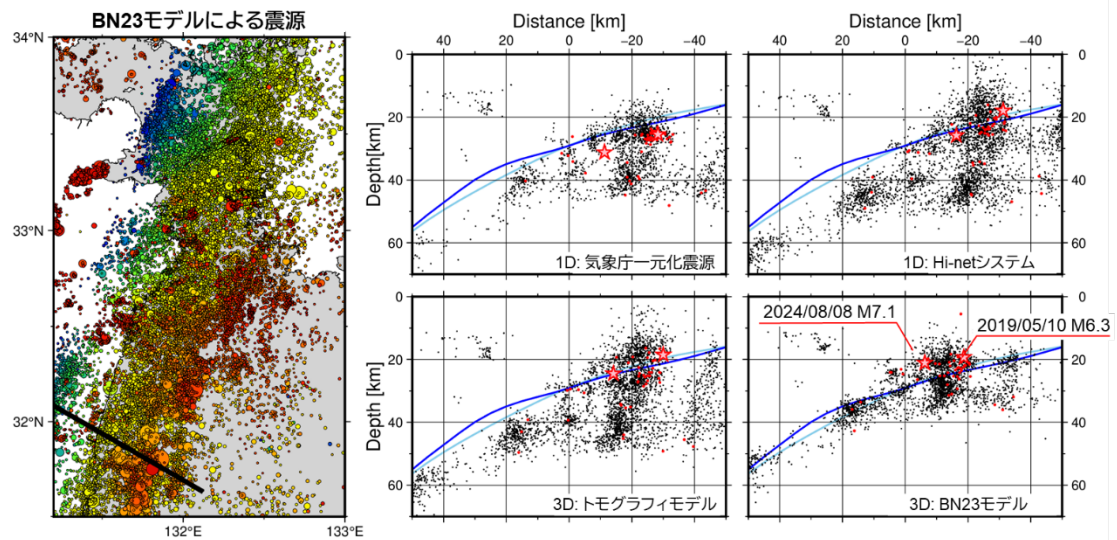


図 2-1-②-3 日向灘南部における各震源カタログの地震活動断面。断面の位置は左地図に黒太線で示す。各断面図には、断面線の両側各 10 km 幅に位置する震源情報を投影した。赤星、赤点、黒点はそれぞれM6.0 以上、M4.0 以上及びM1.5 以上の地震を表す。青線と水色線はそれぞれ本課題¹⁾及びNakanishi et al. (2018)⁸⁾によるプレート上面位置を表す。

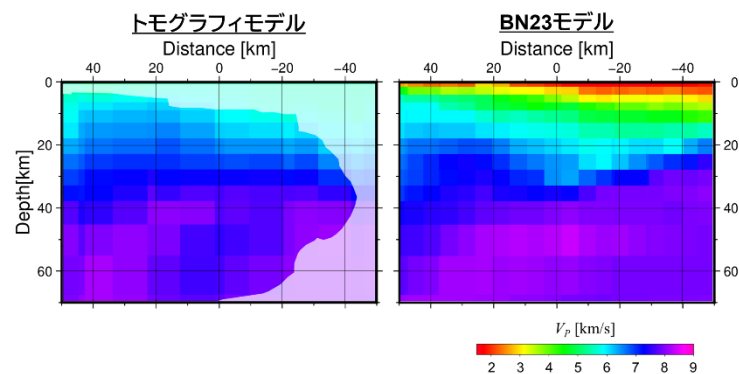


図 2-1-②-4 日向灘南部における P 波速度構造。左) トモグラフィモデル。右) BN23 モデル。断面の位置は図 2-1-②-3 と同じ。トモグラフィモデルで十分に解像されていない領域は配色を薄くして示した。

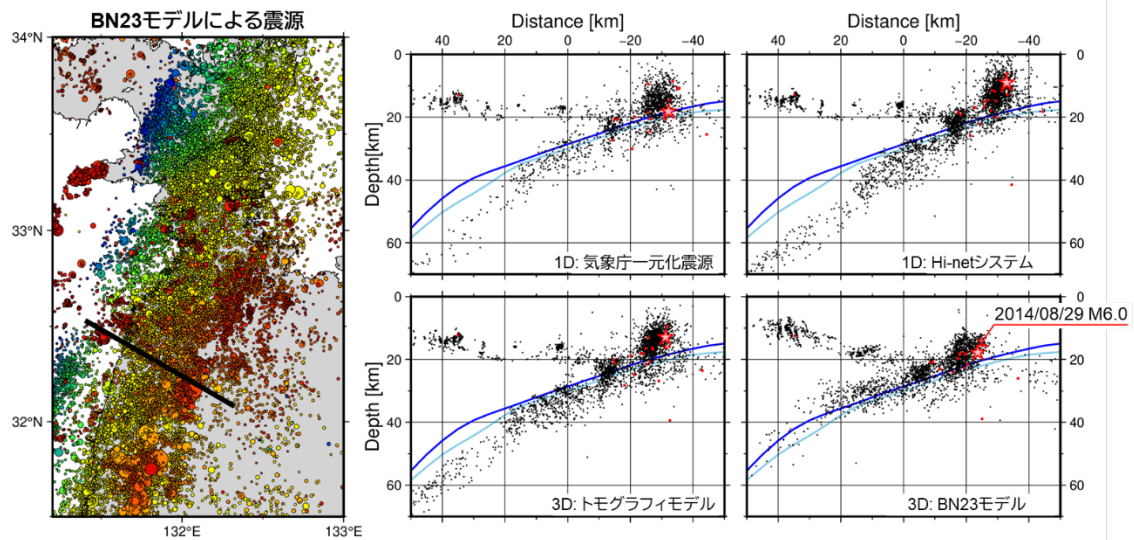


図 2-1-②-5 日向灘中部における各震源カタログの地震活動断面。表示方法は図 2-1-②-3 と同じ。

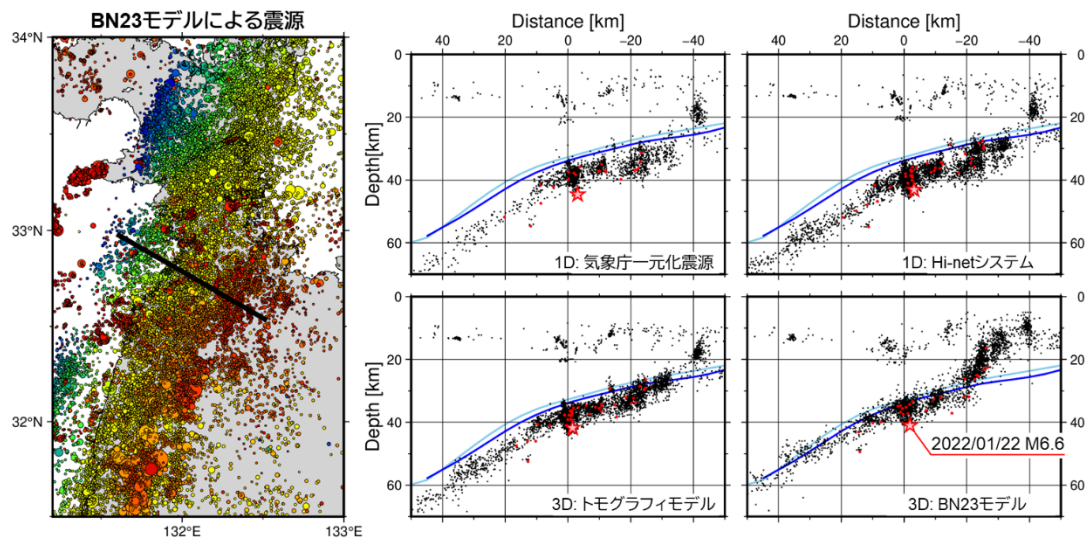


図 2-1-②-6 日向灘北部における各震源カタログの地震活動断面。表示方法は図 2-1-②-3 と同じ。

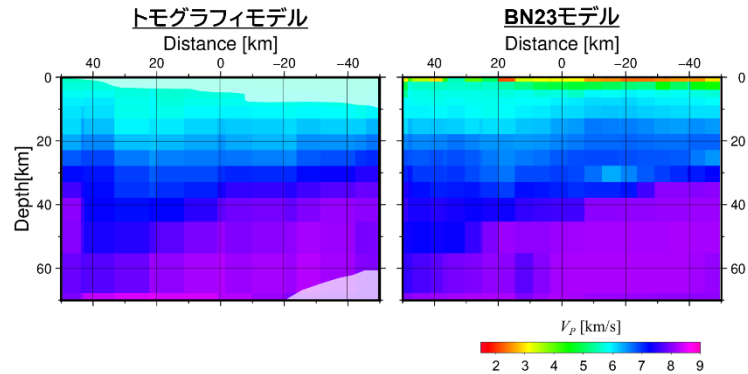


図 2-1-②-7 日向灘北部における P 波速度構造。左) トモグラフィモデル。右) BN23 モデル。断面の位置は図 2-1-②-6 と同じ。トモグラフィモデルで十分に解像されていない領域は配色を薄くして示した。

紀伊半島南東沖では、2016 年 4 月 1 日にプレート間で Mj6.5 の地震が発生した。気象庁一元化震源及び Hi-net システムでは、この地震の深さをそれぞれ 29 km、19 km と求めた。この深さは、震央周辺下のプレート上面の深さ（11 km 程度）^{1), 8)}より、有意に深い。一方、BN23 モデルを用いた再決定を行ったところ、深さは 13 km に求まった（図 2-1-②-8）。この結果は、地震調査委員会によるプレート間地震であるとの評価⁹⁾と矛盾しない。この地震後に活発化した地震活動は各図の距離-10 km 付近に表示されている。1D 構造モデルを用いたカタログは高角な震源分布を示しており、スラブ内の地震活動を示唆する結果となっているが、BN23 モデルを用いるとフィリピン海プレート上面に集中するクラスタ活動として求まった。

この海域では、2004 年 9 月 5 日に Mj7.1 及び 7.4 のプレート内地震が相次いで発生し、顕著な余震活動を伴った。図 2-1-②-8 の距離 30 km 以遠に関連する地震活動が見える。DONET 整備前の時期に発生した沖合の地震であることから、Hi-net システムでは震源位置を安定して推定することが出来ず、深さの値を固定することで震源決定されたイベントが多い。これらの地震について BN23 モデルを用いて再決定すると、深さ 15km 付近に明瞭なクラスタが確認出来るほか、深さ 30~40 km 付近にも顕著な活動が推定された。この地域における OBS を用いた詳細震源決定の結果によると、深さ 5~15 km と 15~25 km に地震活動が分布するとされている⁹⁾。この差異については、直上の観測点の有無の影響や観測点補正值の設定等を含めた再検討が必要である。なお、この海域におけるトモグラフィモデルは十分に解像されていないため、参考として示すのみに留める。

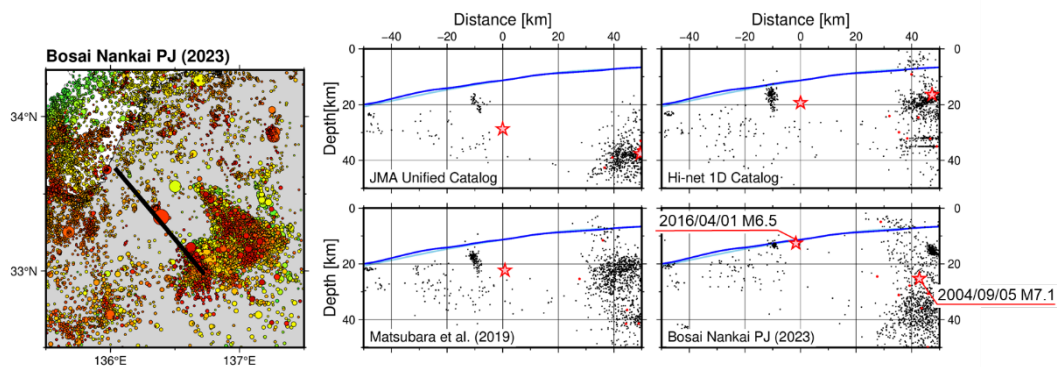


図 2-1-②-8 紀伊半島南東沖における各震源カタログの地震活動断面。表示方法は図 2-1-②-3 と同じ。

2) 地震活動の可視化と「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」用資料の作成

南海トラフ想定震源域周辺でM6.8 以上の地震が発生した場合、気象庁は「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」を招集し、その地震の規模及び発生場所等による地震活動の評価に基づき「南海トラフ地震臨時情報」を発表することとなっている。また、その情報発表までに要する時間は、トリガとなる地震発生から最短で2 時間程度とされている¹¹⁾。

本課題では、これまでに3 D 構造モデルを用いた自動震源決定システムにより、沖合で発生する地震に対し、従来の1 D 構造モデルを用いた震源よりも安定かつ高精度な震源位置を推定することが可能であることを示した。また、トモグラフィモデルを使って2003 年1 月以降に発生したM1.0 以上の地震の再計算を行うことにより、「長期震源カタログ」を整備するとともに、それらの情報を集約し、一覧表示する機能の構築を進めてきた。今年度はそれらの機能の連結性を強化することで、2024 年8 月8 日の日向灘の地震(Mj7.1)後に臨時に開催された南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会(以下、臨時会)に緊急の資料提供を行った。表2-1-②-1 に地震発生から臨時情報発表までの時系列を示す。

表 2-1-②-1 2024 年8 月8 日日向灘の地震(Mj7.1)発生後の概略タイムライン

概略日時	経過時間	
2024/8/8 16:43	—	日向灘を震源とする Mj7.1 の地震発生
17:00	17 分	「南海トラフ地震臨時情報(調査中)」発表
17:30	47 分	「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会(臨時)」開始
18:30	107 分	防災科研資料(第2報)提出:図2-1-②-9を含む
19:15	152 分	「南海トラフ地震臨時情報(巨大地震注意)」発表

臨時会開始から1 時間程度経過した頃に、Mj7.1 の本震発生から1.5 時間後までに発生した主な地震の震源分布を資料として臨時会に提出した。資料には、別システムで処

理を実施している 3D 構造モデルを用いたセントロイド・モーメント・テンソル解 (3D-CMT 解)¹²⁾ の情報を基本としつつ、3D-CMT 解の走向と直交する方向に自動設定した断面上に、本システムにより再決定された震源分布を示した図を含めた。資料の該当箇所を図 2-1-②-9 に抜粋して示す。本図は、過去の地震活動と比較することを目的として、長期震源カタログに含まれる活動を黒点で示している。長期震源カタログはトモグラフィモデルに基づいて整備されているため、作図にはトモグラフィモデルを用いた計算結果を採用した。A4 用紙 1 枚にまとめられた資料は、必要なデータを所定のフォルダに配置し、資料タイトルや表示に用いる地震活動期間等のパラメータを指定したファイルを用意した上で、1 行のコマンドを実行することで半自動生成される。

図 2-1-②-9 から、本震は青線で示したフィリピン海プレート上面モデルの直上に位置すること、その他の地震も、概ね青線に沿って太平洋側（断面図右側）で浅く、陸側（断面図左側）で深くなる傾向にあること、今回の地震活動は過去の活動の範囲内に位置することが分かる。本資料は「南海トラフ地震の想定震源域内における陸のプレートとフィリピン海プレートの境界の一部がずれ動いた」とする気象庁発表文¹³⁾作成に貢献した。

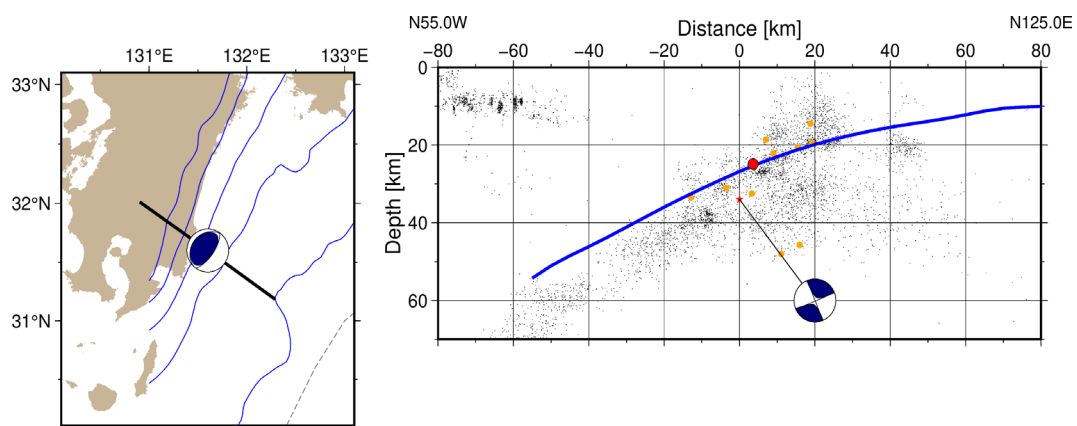


図 2-1-②-9 2024 年 8 月 8 日に発生した日向灘の地震後に臨時開催された「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」に提出した資料の一部。3D-CMT 解の走向から自動設定した断面（左図の太線）におけるプレート上面モデル⁸⁾と本システムで得られた震源情報を対比して示した。赤丸は本震、橙丸はそれ以外の M1.5 以上の地震、黒点は長期震源カタログに基づく、2003 年 1 月から本震発生までの地震活動を表す。赤星は 3D-CMT 解析によるセントロイド位置を表す。

同海域では 2025 年 1 月 13 日にも Mj6.6 の地震が発生した。この地震直後に臨時開催された南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会では、当該地震の Mw が 7 以上となるかが論点となったため、本システムの結果は提出していない。ただし、翌 2 月に開催された定例の南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会に、2024 年 8 月以降の地震活動に関する資料を作成し、提出した（図 2-1-②-10）。本資料についても、トモグラフィモデルに基づく震源カタログを採用した。

図2-1-②-10の左に示した地図では、2024年8月8日のMj7.1地震発生から2025年1月13日のMj6.6地震発生前まで（期間1）の地震を灰丸で、Mj6.6地震発生から2025年1月31日までの地震（期間2）を黒丸で示した。黒星は3D-CMT解析によって求めたセントロイド位置を表す。丸内の数字は3D-CMT解析を行った主な地震の番号（図2-1-②-10 右上）に対応し、それぞれの地震の本システムでの再決定位置を表す。図2-1-②-10右下部に2枚の断面図を示しており、断面の位置は左側の地図に示した。青線はプレート上面深度⁸⁾、赤丸はM5.0以上の地震を表す。黒丸及び橙丸は、それぞれ期間1、期間2に発生したM1.5以上の地震を表す。赤星は3D-CMTのセントロイドの位置で、CMT解と黒線で繋いだ。再決定震源とCMT解とは赤線で結んだ。

2025年1月の地震は2024年8月8日以降の地震活動の北端に位置しており、その後の地震活動はさらに北東に広がったことが分かる。また、赤丸で示したM5以上の地震の震源はプレート境界とよく一致している。なお、断面図を作成した活動の領域AとBの間に少し地震活動の空白があり、北側（領域B）の地震活動はプレート境界よりもやや高角に分布する傾向が見える。長期震源カタログ（黒点）の分布から、同様の地震活動が領域Aでも過去に観測されていたことが見えるが、2024年8月以降は該当する活動は見えない。これらの地震活動の発生場所の詳細な議論を行うためには、この地域における複雑な地下構造の影響を含め、より詳細な検討が必要である。

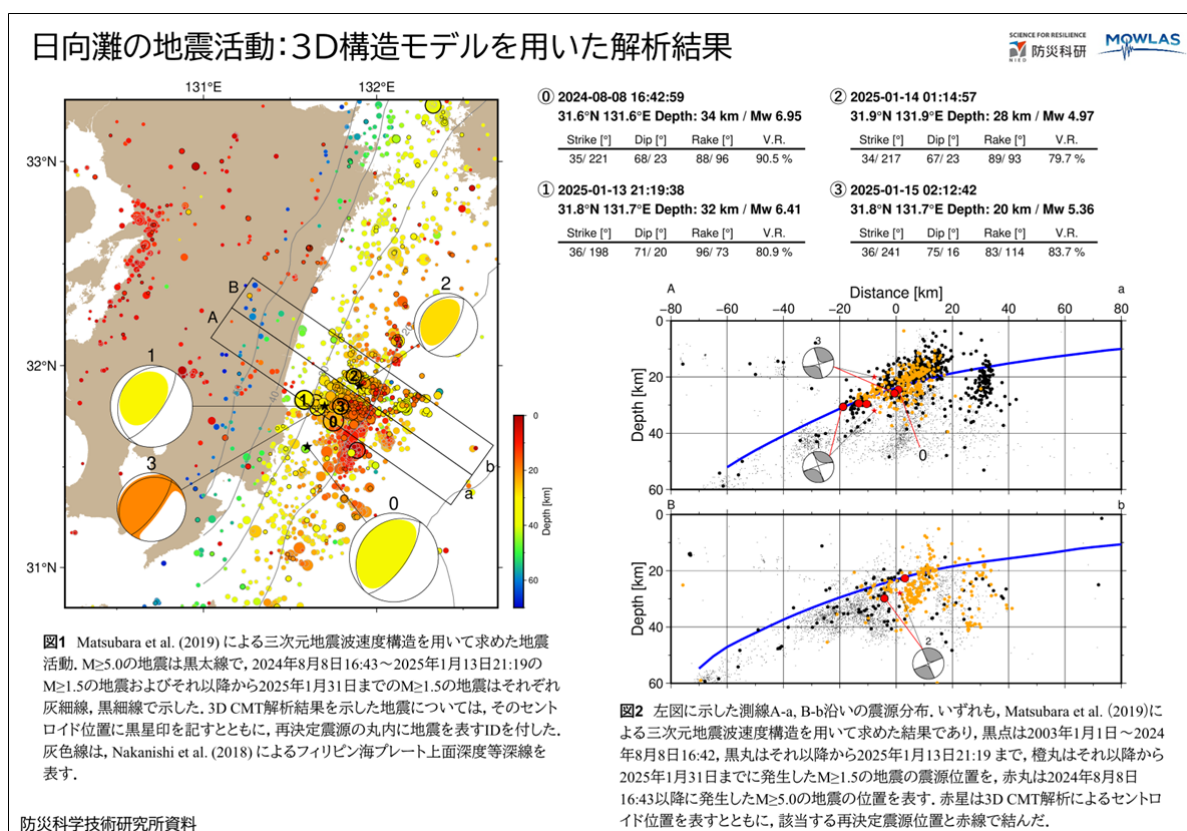


図2-1-②-10 2025年2月7日に開催された「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」に提出した日向灘の地震活動に関する資料。

本課題では、可視化の対象として、地震活動のM-T図や求めた震源情報に基づく地震活動度、例えばb値¹⁴⁾やZ値¹⁵⁾の時空間分布表示も検討してきた。しかし、自動処理に基づく本システムの結果を地震発生から数時間内に開催される臨時会での活動評価に使うためには、解析に使用可能な地震数が少なく、地震活動評価に有効な図面を自動作成することは極めて困難であった。地震の検知力の向上と併せ、表示範囲や配色といった見せ方を調整するための方法の検討が必要である。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ及びその周辺域で発生する地震の活動状況を適確かつ迅速に評価するためには、より現実に即した三次元地震波速度構造を用いて自動的に震源位置の推定を行うとともに、同じ計算条件で整備した過去の地震のカatalogと対比・検討する必要がある。今年度は、昨年度までに構築した3D構造モデルを用いた自動震源決定システムの仮運用を継続するとともに、本課題で新たに構築した3D構造モデルを用いた震源決定の試行を行った。得られた震源情報について、気象庁一元化震源などの震源Catalogとの対比を通じて、その特徴の確認及び検討を行った。一方、トモグラフィモデルを用いて整備した長期震源Catalog及び自動処理震源結果から、地震活動評価に資する情報を可視化するためのツール整備を進めた。その結果、2024年8月8日に日向灘で発生した地震(Mj7.1)直後に臨時開催された気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」に地震活動に関する資料を提出し、当該地震が陸側のプレートとフィリピン海プレートの間で発生した地震であるとの情報発表文作成に貢献した。また、2025年2月に開催された同会の定例会には、2025年1月13日に発生した地震(Mj6.6)以降の地震活動状況をまとめた資料を作成し、提出した。以上により、本年度の業務目的は完遂した。

南海トラフ海域において、日向灘はフィリピン海プレート沈み込みに伴う地震活動が最も活発な地域であるが、南部には九州パラオ海嶺が沈み込むなど、地下構造が複雑な海域でもある。この海域においては、新たな観測網である南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)の整備により、定常的な地震観測が実現する。今後はN-netの観測データを活用し、地下構造モデルの高精度化とそれに伴う震源決定精度の向上を進める必要がある。地震活動の可視化にあたって、本課題内でトモグラフィモデルに基づく長期震源Catalogを整備した。ただし、現在のトモグラフィモデルでは、海溝軸付近の地下構造は十分に解像されていないという課題がある。一方、本課題で構築した3D構造モデルは、構造探査データを活用することで、沖合の詳細な構造を反映したものとなっているが、観測点補正值等の観点において、震源決定に十分なチューニングを実施されたものとはなっていない。今後、3D構造モデルの震源決定への評価ならびにチューニングを進めるとともに、そのモデルを用いた長期震源Catalogの再整備を行うことが重要となる。地震活動の可視化については、システム化の端緒として試験的な作図の半自動化を実現し、2024年8月に発生した日向灘地震時には迅速な解析と資料提供を実現することが出来た。ただし、この地震は平日の夕方に発生したものであり、通常の勤務時間内での対応が可能であった。顕著な地震が発生した場合に地震活動情報を効果的に発信、活用するためには、特定のユーザの操作を必要としないことが望ましい。今後は、自動生成すべき情報とその見せ方について、より詳細な検討を進める必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 文部科学省研究開発局・国立研究開発法人海洋研究開発機構：防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト 令和5年度 成果報告書 令和6年5月,
<https://www.jishin.go.jp/database/project_report/nankai-bosai/nankai-bosai-r05/>,
(参照 2025-3-21) , 2024.
- 2) Matsubara, M., Sato, H., Uehira, K., Mochizuki, M., Kanazawa, T., Takahashi, N., Suzuki, K., and Kamiya, S.: Seismic velocity structure in and around the Japanese Island arc derived from seismic tomography including NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Seismic Waves – Probing Earth System*, IntechOpen, 1-19, doi: 10.5772/intechopen.86936, 2019.
- 3) Koketsu, K. and Sekine, S.: Pseudo-bending method for three-dimensional seismic ray tracing in a spherical earth with discontinuities, *Geophys. J. Int.*, 132, 339-346, doi: 10.1046/j.1365-246x.1998.00427.x, 1998.
- 4) 気象庁：地震月報(カタログ編),
<<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>>, (参照 2025-03-21) .
- 5) 内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会 中間取りまとめ(平成23年12月27日) ,
<https://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/chukan_matome.pdf>, (参照 2025-03-21) , 2011.
- 6) Koketsu, K., Miyake, H., and Suzuki, H.: Japan integrated velocity structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake 28 Engineering*, Vol. 1-4,
<https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1773.pdf>, (参照 2025-3-21) , 2012.
- 7) Yamamoto, Y., Obana, K., Takahashi, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., and Kaneda, T.: Imaging of the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region, western Nankai Trough subduction zone, *Tectonophysics*, 589, 90-102, doi: 10.1016/j.tecto.2012.12.028, 2013.
- 8) Nakanishi A. et al.: Three dimensional plate geometry and P wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis, in “Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura”, ed. by T. Byrne, M. B. Underwood, III, D. Fisher, L. McNeill, D. Saffer, K. Ujiie, A. Yamaguchi, *Geological Society of America Special Paper* 534, 69-86, doi: 10.1130/2018.2534(04), 2018.
- 9) 地震調査委員会：2016年4月の地震活動の評価,
<https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_04.pdf>, (参照 2025-03-21) , 2016.
- 10) Sakai, S., Yamada, T., Shinohara, M., Hagiwara, H., Kanazawa, T., Obana, K., Kodaira, S., and Kaneda, Y.: Urgent aftershock observation of the 2004 off the Kii Peninsula earthquake using ocean bottom seismometers, *Earth Planets Space*, 57, 363-368, doi: 10.1186/BF03352577, 2005.

- 11) 気象庁:「南海トラフ地震理事情報」等の提供開始について (令和元年5月31日),
https://www.jma.go.jp/jma/press/1905/31a/20190531_nteq_name.html, (参照 2025-03-21), 2019.
- 12) Takemura, S., Okuwaki, R., Kubota, T., Shiomi, K., Kimura, T., and Noda, A.: Centroid moment tensor inversions of offshore earthquakes using a three-dimensional velocity structure model: slip distributions on the plate boundary along the Nankai Trough, Geophys. J. Int., 222, 1109–1125, doi: 10.1093/gji/ggaa238, 2020.
- 13) 気象庁: 南海トラフ地震臨時情報(巨大地震注意)について(令和6年8月8日),
<https://www.jma.go.jp/jma/press/2408/08e/202408081945.html>, (参照 2025-03-21), 2024.
- 14) Gutenberg, B. and Richter, C. E.: Frequency of earthquakes in California, Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185-188, 1944.
- 15) Wiemer, S. and Wyss, M.: Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., 90, 859-869, doi: 10.1785/0119990114, 2000.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
南海トラフ周辺を対象とした新たな3次元地震波速度構造を用いた震源決定の試行（口頭）	汐見 勝彦 松原 誠 仲西 理子 藤江 剛 関口 渉次	日本地震学会 2024年度秋季大会	2024.10	国内
3次元地震波速度構造に基づく地震情報の迅速な把握と活用（ポスター）	汐見 勝彦 武村 俊介 松原 誠 木村 武志 関口 渉次	日本地震学会 2024年度秋季大会	2024.10	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし