

2. 研究成果

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

熊野灘周辺の世界統合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う。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する。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る。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する。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う。

(e) 令和5年度業務目的

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・改善を進めるとともに、3D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行う。令和4年度までに構築した海陸統合高精細マルチパラメータ3D構造モデルについて、対象領域を四国沖へ拡張する。また、観測データを用いたモデルの検証や改善、更新を行う。DONET観測点周辺の堆積層構造解析を引き続いて実施するとともに、3D構造モデルへの反映方法を検討する。自動震源決定システムの運用継続と並行し、過去の地震について新たな3D構造モデルを用いた震源再決定を進める。「異常な現象」把握に向けて、地震発生場所や地震活動指標評価のためのシステム構築を進める。

(2) 令和5年度の成果

①過去の探査や基盤観測データに基づく3D構造モデルの構築と検証

(a) 業務の要約

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のため、対象領域を四国沖へと拡張するとともに、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検討を進め、それらを反映した海陸統合3D構造モデルを構築した。海陸統合三次元S波速度構造および密度構造については、調査観測データやそれらに基づいて直接推定された構造情報との比較による検証を実施した。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の試作を開始した。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4年度までに開発を進めてきた構造探査データのレスリー関数解析手法の改良ならびに表面波解析によるS波速度構造推定方法の汎用化を進め、両手法による堆積層内の詳細S波速度構造モデルを多くのデータに適用するための準備を整えた。並行して、DONET観測点直下におけるS波速度構造推定のための処理を実施した。

(b) 業務の成果

1) P波速度構造モデル作成・更新とマルチパラメータ化及び検証方針の検討

令和4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3D構造モデル¹⁾の高精細化及び広域化のため、令和5年度は最新の反射法解析や屈折法解析結果に基づく速度構造情報及び地層境界面情報^{2),3)}等を取り入れた。これら複数の速度構造や地層境界面情報を用いたモデル統合に際して、作業方針の整理と必要な見直しを行い、新たな統合方針に従ったモデル更新と修正を実施した。

P波速度構造情報としては、

- i) 構造探査に基づく結果をまとめたもの
- ii) 自然地震トモグラフィに基づく結果^{4),5),6)}をまとめたもの
- iii) 海陸統合トモグラフィ結果⁷⁾
- iv) 全国1次地下構造モデル(JIVSM)⁸⁾

を使用することとした。J-SHIS地盤情報⁹⁾については、次節2)で述べる意見交換の場において、近い将来バージョンアップの動きがあり、その中でJIVSMとの統合が計画され

ているとの情報を得た。これを踏まえ、新しいバージョン公表後に統合対象とすることが適切と判断し、現時点での採用を見送った。

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。まず、上記 ii) 自然地震トモグラフィ結果をまとめた情報を優先して採用し、iii) 海陸統合トモグラフィ結果を参照情報として活用することで、対象領域全体を補間した統合モデルAを作成した。このモデルの陸域についてのみ、iv) JIVSMのLayer15までをそのまま採用することとして差し替え、Layer15付近(+5000ms)を遷移帯として、陸域深部で徐々に統合モデルAへ接合するよう線形的に補間した。このようにして求めたモデルを統合モデルBとする。次に、統合モデルBの陸域を維持しつつ、海拔0mから幅26kmを遷移帯とし、海域の地殻部は i) 構造探査に基づく結果をまとめたものへ接合するよう線形的に補間した。この際、海域モホ面付近(±1000ms)を遷移帯として、深部には徐々に統合モデルBへ接合するよう線形的に補間した。このような手順で得られたモデルを、現時点での最終的な統合モデルとした。なお、陸域の地形として国土数値情報の標高・傾斜度5次メッシュデータ(2011年度版)¹⁰⁾、海域はGEBCO¹¹⁾を一部修正したものを参照し、500m間隔のグリッドとして設定した。地層境界面として、地震探査で推定されている堆積層内の境界である音響基盤相当面、堆積層底面、海洋地殻上面(プレート境界面)、海洋モホ面を設定し、各層内の速度は入力構造情報に基づき補間した。なお、今年度のモデル構築において、水平方向のグリッド間隔は5kmとした。また、鉛直方向のグリッド間隔は層ごとに設定が異なるが、概ね1000ms程度とした。これらのグリッド間隔は計算時間を節約するために設定したものであり、今後、より詳細なスケールでの計算が必要である。得られた三次元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を適用することで、マルチパラメータ3D構造モデルを作成した。図2-1-①-2に、今年度構築したマルチパラメータ3D構造モデルを示す。上述の統合手順で入力した構造情報に基づく沈み込みの東西変化が反映されているが、特に西部断面では、各種モデルの統合による不連続が認められ、今後の検証が必要である。

令和4年度までに整備したマルチパラメータ3D構造モデルの検証のための環境を用いて、既存の三次元P波速度構造モデル¹²⁾を前述のマルチパラメータ化手法により変換することで求めたS波速度構造(以下、三次元S波速度構造)と密度構造(以下、三次元密度構造)モデルの検証を試行した。S波速度構造については、自然地震トモグラフィ解析結果^{4), 5), 6)}及び表面波解析に基づくモデル¹³⁾を比較対象とした。結果を図2-1-①-3に示す。解析解像度が十分にある浅部堆積層において両者は概ね整合するが、室戸岬沖のMRA01やMRG28など、観測点によっては両者の結果が異なる地点もある。プレート境界より深部では、ほとんどの観測点において、三次元S波速度構造モデルが自然地震トモグラフィ結果^{4), 5), 6)}に対して高速度となった。これらの差違については、今後の原因調査が必要である。密度構造については、三次元密度構造モデルから計算したブーゲー重力異常と実観測の重力データ¹⁴⁾を比較した(図2-1-①-4 右上及び左上)。紀伊半島沖における構造探査測線下の2D密度構造についても、計算したブーゲー重力異常と実観測の重力データ¹⁴⁾を対比した(図2-1-①-4 下)。両者の面的あるいは測線沿いの正負の変化傾向は概ね整合的であるが、変動幅の違いや地域的な特徴につ

いては今後さらに詳細に検証する必要がある。なお、以上の通り、評価結果をもとに構築したマルチパラメータ3D構造モデルと調査観測に基づく構造モデルとの比較結果は、海域や深さごとに異なる可能性がある。P波速度とS波速度や密度との関係は、元来、これらの複数の要素が複雑に関わっている可能性が高い。したがって、モデル構築に用いた経験式に基づく物性変換式の修正方法を容易に示すことは困難と判断されることから、本プロジェクト終了後も引き続き検討すべき課題とした。

令和4年度に引き続き、P波の3D構造モデルの確度（不確定性）や誤差などを適切に評価し、可視化することを念頭に、構造解析結果について示されている信頼性の情報を可能な範囲で収集した。自然地震トモグラフィの結果^{4),5),6)}については、信頼できる波線密度を有する部分のみを構造情報として採用した。しかし、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ため、信頼性に関する情報を画一的に取り扱うことは困難であり、今後の課題とした。

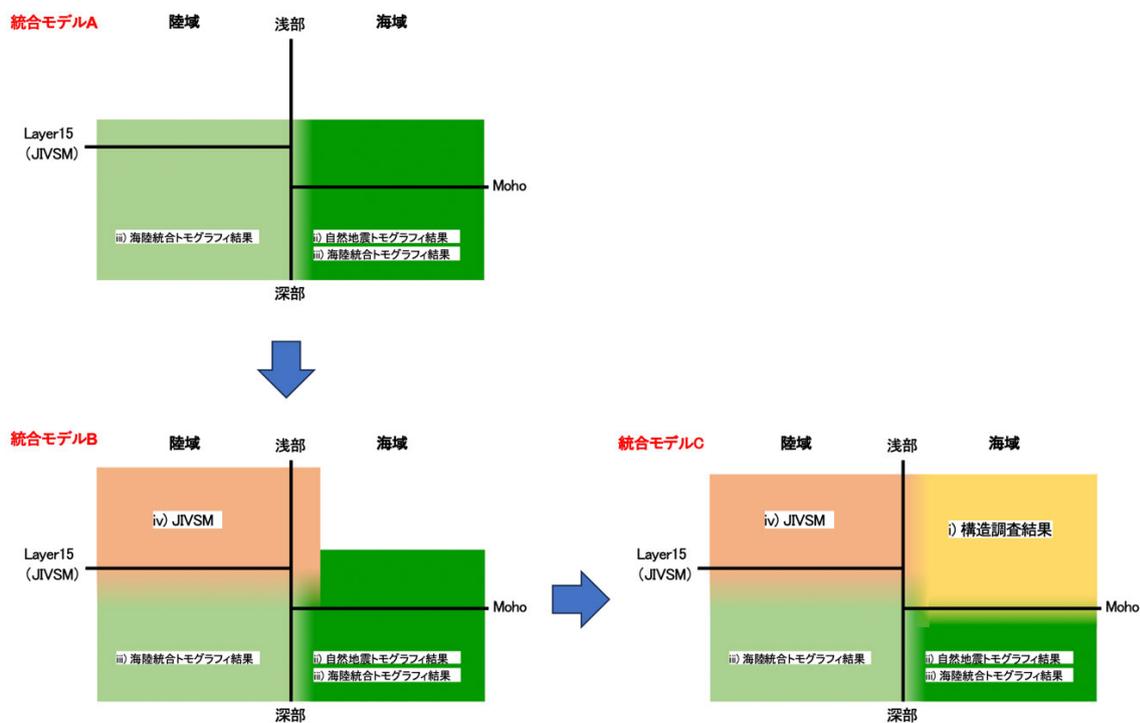


図 2 - 1 - ① - 1 モデル統合方針の模式図。

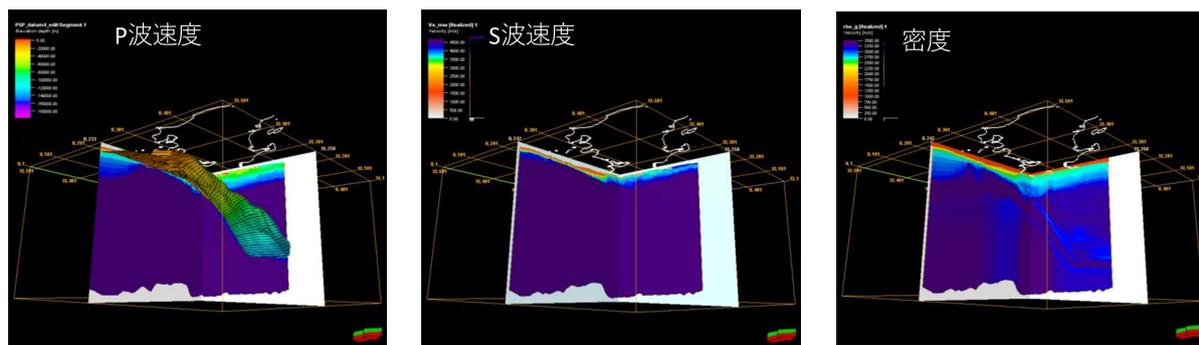
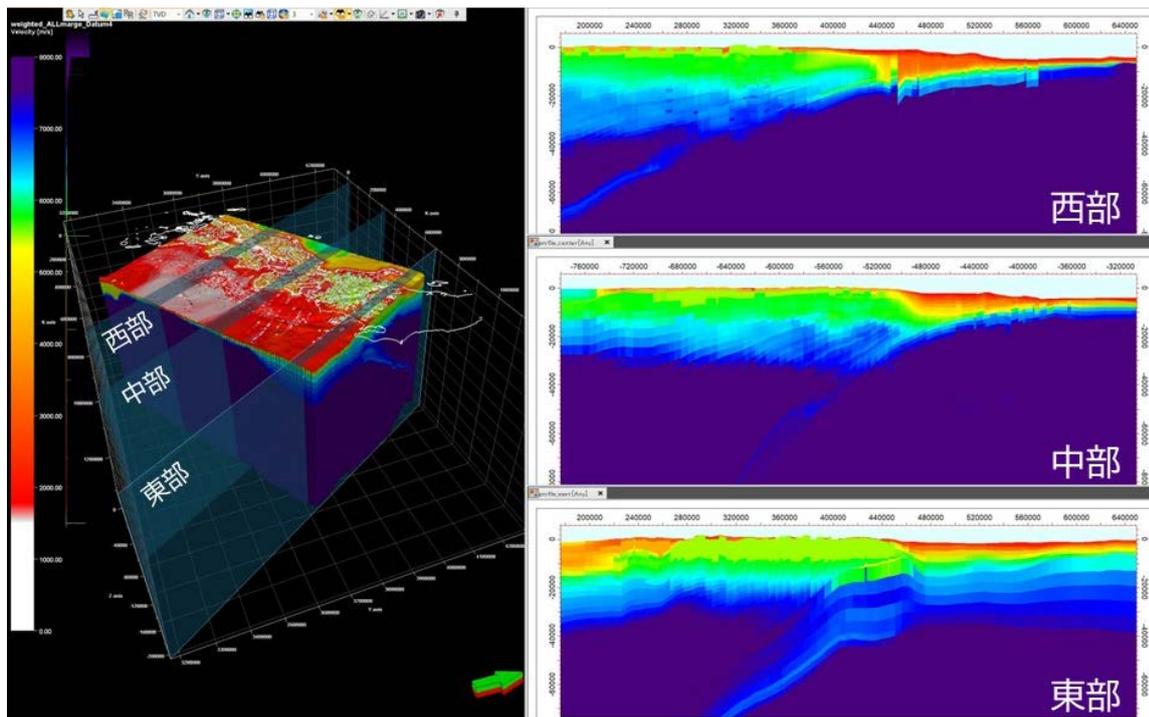
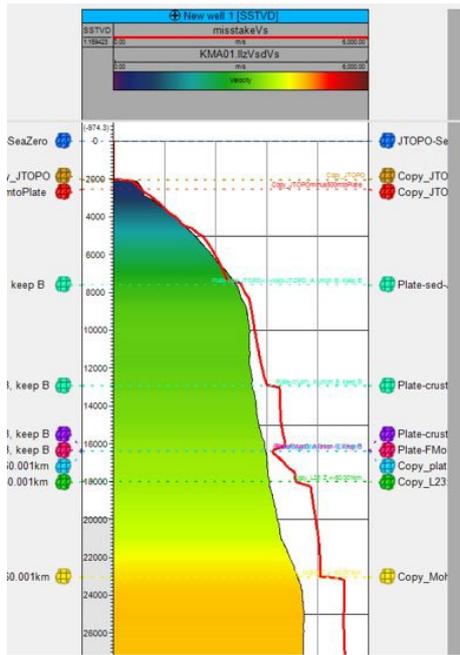


図 2-1-①-2 令和 5 年度に構築したマルチパラメータ 3D 構造モデル (左上) について、南海トラフ域の西部、中部、東部の 3 箇所を北東-南西方向に切った断面の P 波速度構造 (右上)。上述の 3D 構造モデルについて、左から順に三次元 P 波速度、S 波速度、密度構造の断面 (下) を表す。



DONET直下の1次元S波速度構造[Tonegawa et al. 2017]およびトモグラフィ結果[Yamamoto et al. 2022]との比較 深部構造については、断面図を 利用したTonegawa et al. (2017)と比較。 深部構造については、自然地震トモグラフィの結果[Yamamoto et al. 2022]と比較。

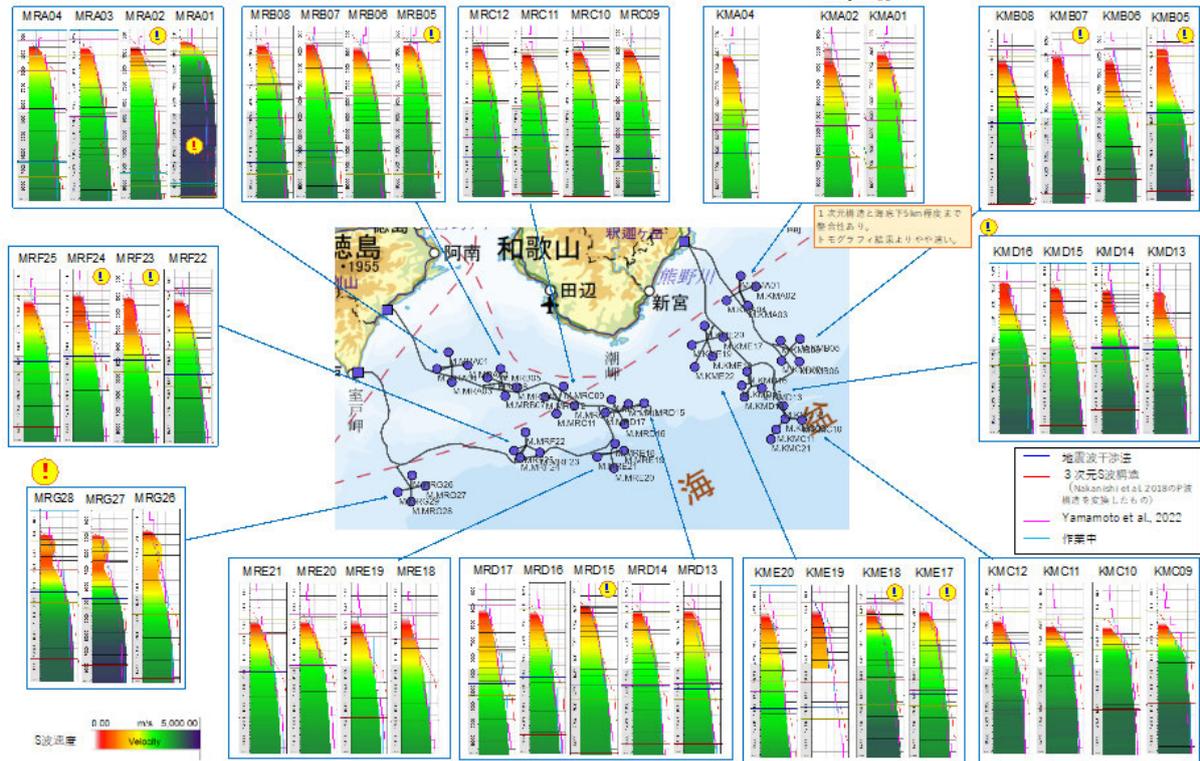


図2-1-①-3 3D構造モデルとして推定したS波速度構造と調査観測に基づいて直接推定されたS波速度構造との比較結果。上) DONET 1のKMA01観測点直下におけるS波速度構造比較結果。カラスケールで示した速度構造はTonegawa et al. (2017)¹³⁾による推定結果。赤線がNakanishi et al. (2018)¹²⁾の三次元P波速度構造モデルを本プロジェクトで整備したマルチパラメータ化手法でS波速度構造に変換した速度構造を示す。下) ほぼすべてのDONET観測点について(上)と同様に比較した結果。DONET観測点分布図の背景には、国土地理院「地理院地図」を用いた。

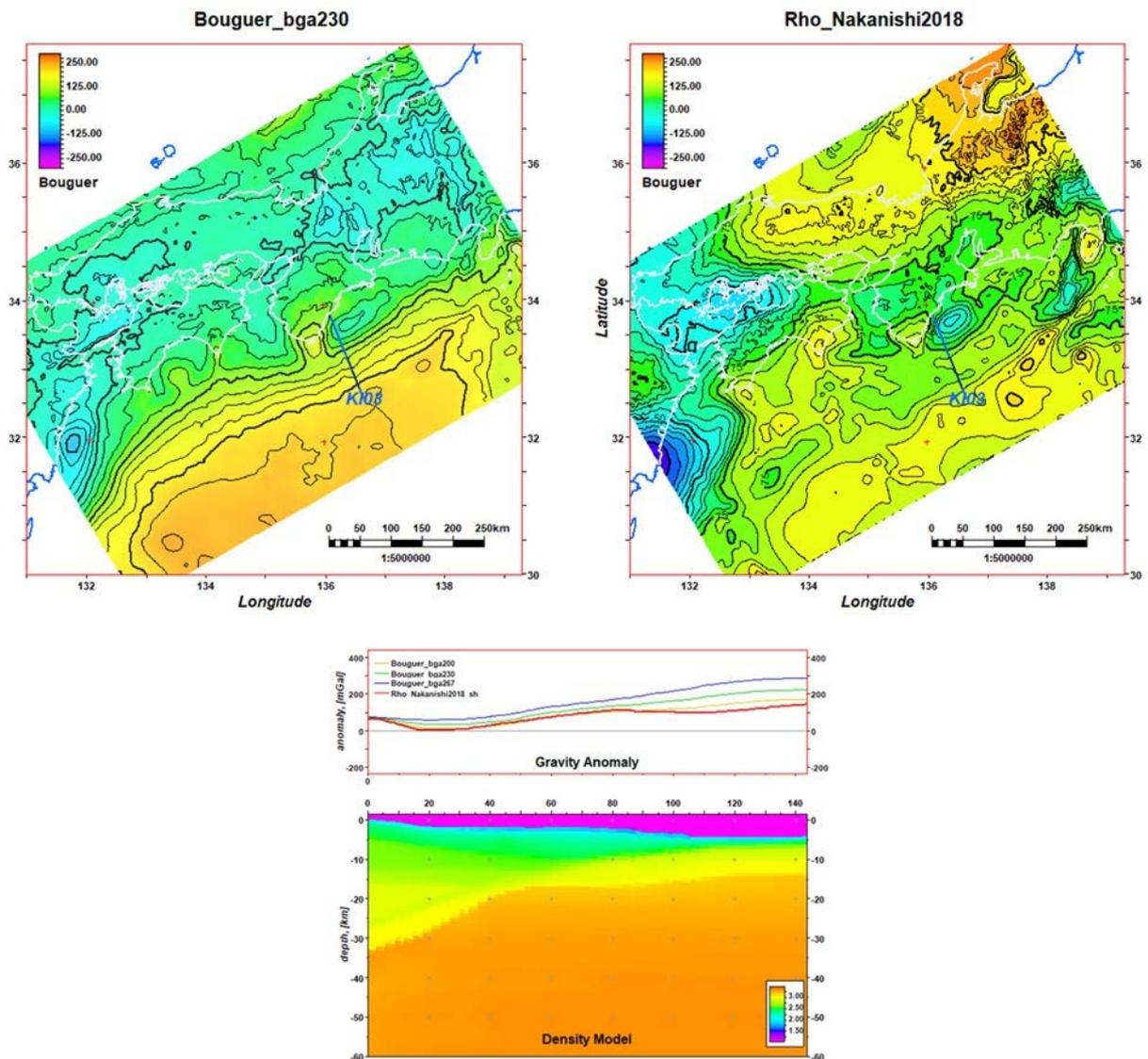


図 2-1-①-4 左上) 実観測によるブーゲー異常¹⁴⁾ (仮定密度 2.3g/cm³)。右上) 三次元密度構造モデルに基づく重力異常。下) 紀伊半島の構造探査測線 (上図中の青線。KI03) の 2D 密度構造モデルに基づく重力異常 (赤線) と実観測によるブーゲー異常¹⁴⁾ との比較結果。

2) 3D 構造モデル統合方針の検討

令和 3 年度から開始した 3D 構造モデル情報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。これまでに各コミュニティとの間で進めてきた情報共有や意見交換の結果、

- ・ 様々な用途向けに範囲及び分解能の異なる構造モデルが多数存在すること
- ・ いずれのモデルも一長一短の特徴を有するが、利用者にはその点が伝わりにくいこと
- ・ 使用するモデルに解析結果が依存することが多く、各々の結果を直接比較する際には十分な注意が必要であること
- ・ 現時点でいくつかの統合モデルが提案されているものの、具体的なモデル構築方法や

統合に使用されたデータ、モデル等の成果情報まで辿れない場合が多いこと

- ・それ故に何らかの共通モデルを構築し、コミュニティ間で共有することが必要であることを確認した。これらの点を踏まえ、まず、誤差や信頼性に関する情報が付された構造情報を用意することが望ましいという認識を共有した。誤差や信頼性の情報を整理するためには、モデル構築に用いられた既存の調査観測成果、情報、データ等を活用する必要があるが、それらの多くは、現状、適切に集約されているとは言い難い。そこで、「3D マルチスケール構造情報共通基盤」と題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全て収集・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（図2-1-①-5）を構築することが第一に取り組むべき課題である、という結論に至った。図2-1-①-6は、これらの議論を踏まえ、他のコミュニティ等と現況や課題に関する認識を共有するためのイメージ図として作成したものである。

本プロジェクトにおいては、今年度はこの課題の端緒として、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」のコア部分の試作として、ポータル网站的な枠組みを構築した（図2-1-①-7）。このシステムでは、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想定している。利用者が使いやすいデータの抽出や形式変換ツールの作成、メタデータの整備方法について、引き続き検討を進める必要がある。

以上の経過について、2024年2月及び3月に地震本部の委員会で話題提供を行った。

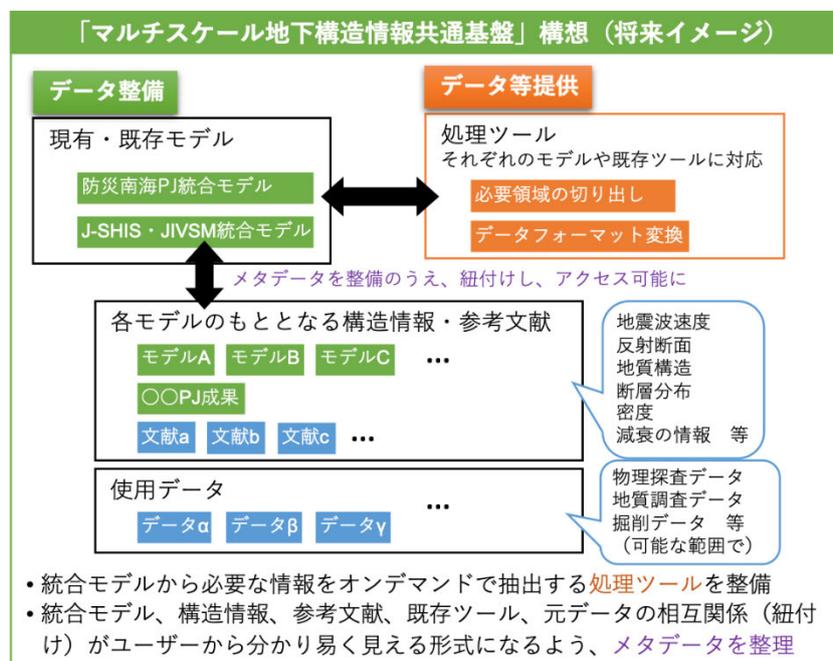


図2-1-①-5 3次元マルチスケール構造情報共通基盤の構成図



図 2-1-①-6 3次元マルチスケール構造情報共通基盤整備の目的や課題を整理したイメージ図

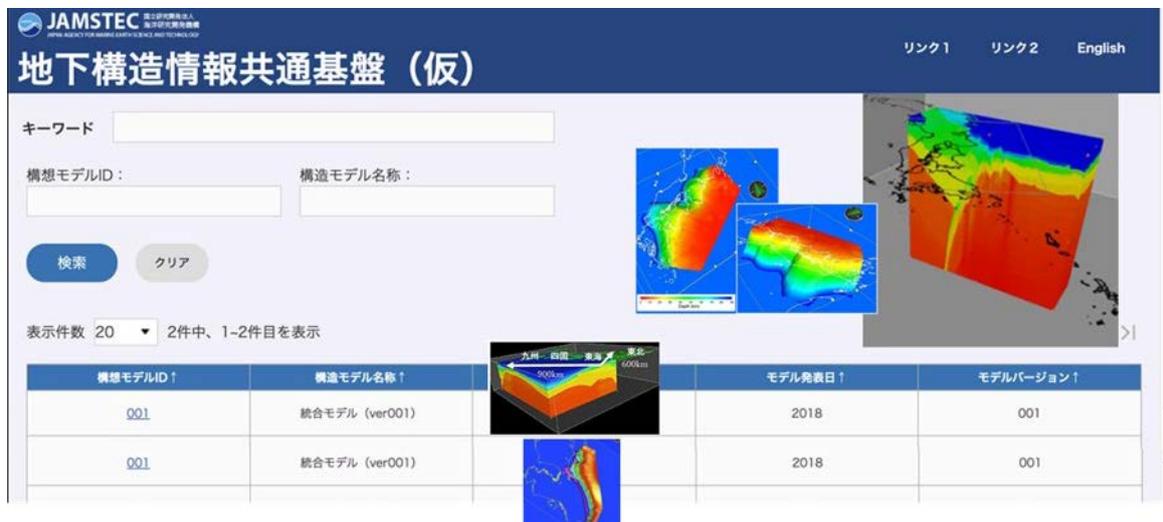


図 2-1-①-7 マルチスケール構造情報共通基盤プロトタイプのコア部分のトップページイメージ。JAMSTEC で現在公開中の南海トラフ三次元 P 波構造モデルとフィリピン海プレート形状モデルを例にした画面。

3) 浅部堆積層構造の推定方法の検討

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、PS 変換面をより安定的に抽出できるよう、令和 4 年度までに開発を進めてきた構造探査

データのレーシーバー関数解析手法¹⁵⁾を改良した。また、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¹⁶⁾のソフトウェア・コードの汎用化を進め、多くのデータに適用するための準備も整えた。その上で、両手法を適用可能な紀伊半島沖の構造探査測線(図2-1-①-8)を対象としたデータ処理に着手した。今後、両手法によるS波構造モデルと反射法断面やPS変換面分布を合わせて議論できる見込みであり、その結果として、トラフ軸付近、付加体、前弧海盆などそれぞれの場所における堆積層浅部の典型的なS波速度構造をより高い信頼性で見積もることができると期待される。測線に沿った観測点のレーシーバー関数と反射法断面図の対応について、図2-1-①-9に示す。

上記と並行して、DONET観測点直下におけるS波速度推定のための処理も進めた。具体的には、DONET海域で海洋研究開発機構が実施した過去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、上下動および水平動2成分のレーシーバーギャザーを作成した。データ品質は良好で、さまざまな屈折波や反射波が確認できた。また、DONET観測点直下で変換したと解釈されるPS変換波も複数確認でき、開発を進めてきた構造探査データのレーシーバー関数解析手法¹⁵⁾によってPS変換面の抽出ができると期待される。速報的な結果を図2-1-①-10に示す。なお、これまで手法開発に使用してきたデータはOBS向けに約80秒ごとにエアガン発震を行ったデータであったが、DONET近傍の構造探査は約20秒ごとにエアガン発震を行う反射法探査が主であるため、前のエアガン信号の残響によるノイズの汚染が目立つ問題がある。そのため、PS変換面の解釈においては、ノイズの残響を丁寧に除去しながら進める必要がある。

以上の結果を踏まえ、来年度は各DONET近傍の反射断面とDONET直下のレーシーバー関数解析結果をもとにDONET直下の浅層S波速度を見積もり、震源決定に重要なDONET観測点直下の堆積層補正值として整理していく。

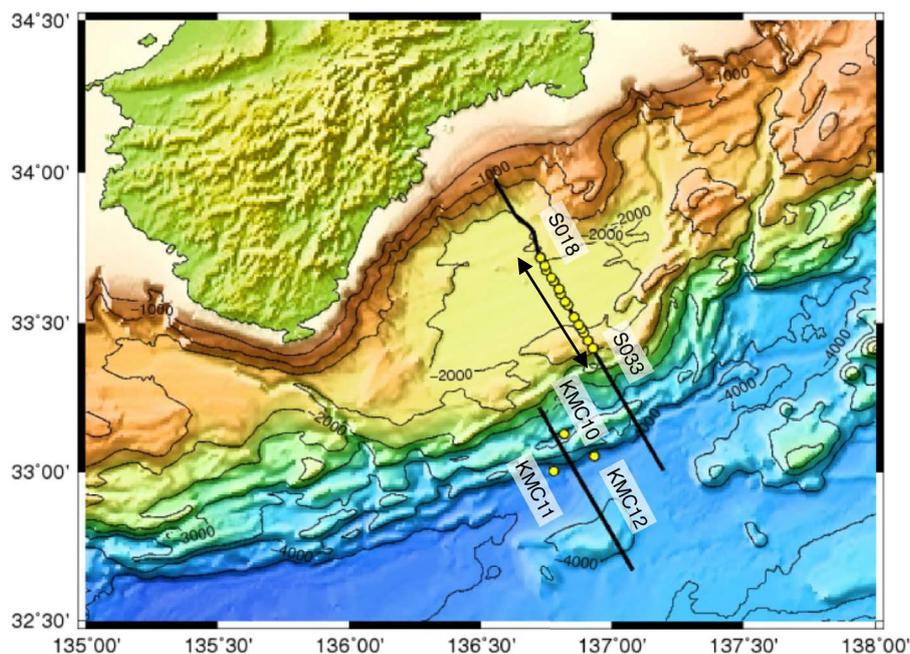


図2-1-①-8 解析に使用した地震探査測線(黒線)。地形には海洋情報研究センター刊行JTOP030v2を利用した。

南東

北西

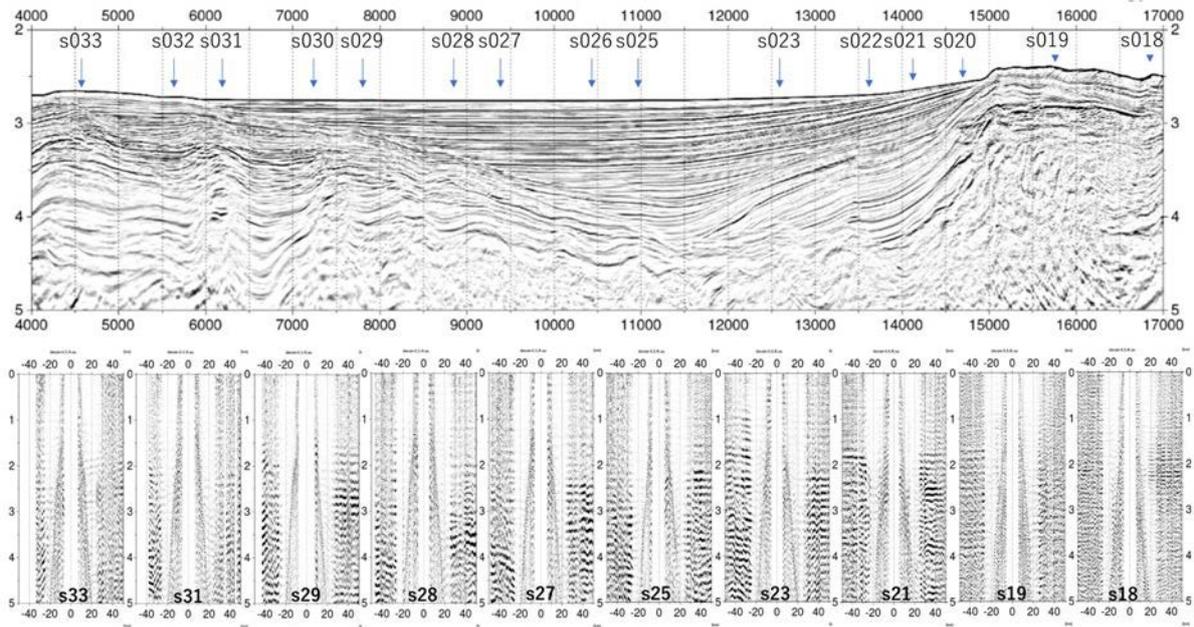


図 2-1-①-9 上) 紀伊半島沖の地震探査測線における反射法断面図。図②-1-①-8の矢印の範囲を表示。下) 同測線に沿った主な観測点のレーザー関数 (PS 変換面分布)。

南東

北西

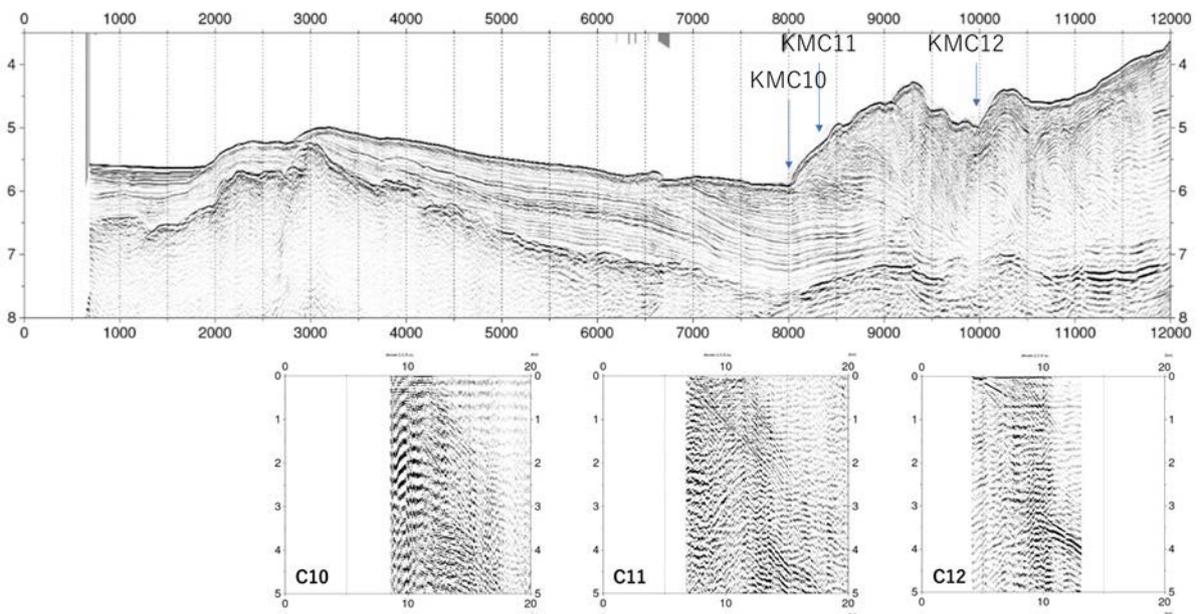


図 2-1-①-10 上) DONET 観測点近傍の地震探査測線における反射法断面図。下) 測線沿いに位置する DONET 観測点のレーザー関数 (PS 変換面分布)。

(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として、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検討を進めた。令和 4 年度のモデルの対象領域を四国沖へと拡張する際、それらを反映した海陸統合 3D 構造モデルとして新たに構築した。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、今後も検討や改良の必要がある。海陸統合三次元 S 波速度構造及び密度構造については、調査観測データやそれらに基づき直接推定された構造情報との比較による検証を実施した。解析解像度が十分にある浅部堆積層の S 波速度構造について、両者は概ね整合することを確認した。しかし、プレート境界より深部では、ほとんどの観測点で三次元 S 波速度構造モデルの方が調査観測データから直接推定された結果に対して高速度となっている特徴が認められた。この点については、今後の検証が必要である。P 波速度構造モデルの確度や誤差を評価するため、構造解析結果について示されている信頼性の情報を可能な範囲で収集し、一部の情報を三次元 P 波速度構造モデル構築に活用した。しかし、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ため、画一的な取り扱いについては今後の課題とした。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。さらに、構築したマルチパラメータ 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ため、本プロジェクト終了後にも引き続き検討すべき課題とする。

令和 3 年度から他のサブ課題等と開始した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のプロトタイプのコア部分作成に向けて、その枠組みの開発に着手した。利用者が使いやすいようなデータの抽出や形式変換ツールの作成、メタデータの整備については、来年度引き続き検討を進める必要がある。

マルチパラメータ化に向けた S 波速度構造の直接推定なら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 4 年度までに開発を進めてきた構造探査データのレーザー関数解析手法と表面波解析による S 波速度構造推定方法を併用して適用できる紀伊半島沖の構造探査測線について、レーザー関数解析による PS 変換面分布の空間的マッピングに着手した。来年度、表面波解析による S 波速度構造の推定結果との比較から、信頼性の高い S 波速度構造の推定を進める。さらに、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 4 年度 成果報告書 令和 5 年 5 月，1-20，2023.
- 2) 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.
- 3) 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 平成 20～24 年度 成果報告書 平成 25 年 5 月，1-397，2013.

- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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 2024-3-25), 2012.
- 9) 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 2024-3-25) .
- 10) 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 2024-3-25), 2011.
- 11) General Bathymetric Chart of the Oceans, Gridded Bathymetry Data (GEBCO_2022_Grid), <https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/>, (参照 2024-3-25), 2022.
- 12) 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.
- 13) 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.

- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Liu, X., Nakanishi, A., Fujie, G., T., Nakamura, Y., Obana, K., and Kodaira, S.: Shear velocity tomography using seismic noise interferometry from a linear OBS array off Kumano crossing Nankai Trough, SEG/AGU Geophysics of Convergent Margins Workshop, 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
Nankai Trough Reyleigh wave phase tomography using different time measurements for seismic noise interferometry from the DONET array (ポスター)	Xin Liu 仲西 理子 藤江 剛 利根川 貴志 中村 武史	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023.6	国内
Correlation between plate boundary structure and distribution of shallow slow earthquakes in the Nankai Trough (口頭)	新井 隆太 白石 和也 三浦 誠一 高橋 努 中村 恭之 藤江 剛 小平 秀一 海宝 由佳 濱田 洋平 Ma Yanxue	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023.5	国内
Seismic refraction imaging of plate boundary structures in the slow earthquake gap zone off western Kii Peninsula, Nankai Trough (口頭)	Qin, Y. Fujie, G. Kodaira, S. Nakamura, Y. Kimura, G. Kaiho, Y. No, T. Obana, K. Miura, S.	Mediterranean Geoscience Union Annual Meeting 2023	2023.11	国外

南海トラフ域の海陸統合 3次元地震波速度構造の 構築と検証（ポスター）	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	日本地震学会2023 年度秋季大会	2023. 11	国内
上盤プレート内の破砕帯 と弱いプレート間固着を 生み出す九州パラオ海嶺 の沈み込み構（口頭）	新井 隆太 白石 和也 中村 恭之 藤江 剛 三浦 誠一 小平 秀一 Bassette Dan 高橋 努 海宝 由佳 濱田 洋平 望月 公廣 仲田 理映 木下 正高 Ma Yanxue 橋本 善孝 沖野 郷子	日本地震学会2023 年度秋季大会	2023. 11	国内
南海トラフ熊野灘の付加 体詳細構造～OBS構造探査 データの再解析～（口 頭）	藤江 剛 白石 和也 佐藤 壮 中村 恭之 木村 学 小平 秀一	日本地震学会2023 年度秋季大会	2023. 11	国内
南海トラフにおける海上 反射法探査と海底地震計 広角反射法探査の統合的 データ解析（口頭）	白石 和也 藤江 剛 新井 隆太 中村 恭之	日本地震学会2023 年度秋季大会	2023. 11	国内
三重県南東沖における地 下構造と震源のPhysics- informed neural network におけるアンサンブル推 定（口頭）	縣 亮一郎 白石 和也 藤江 剛	日本地震学会2023 年度秋季大会	2023. 11	国内

<p>Weak plate coupling and upper plate fluid conduits caused by the ridge subduction in the westernmost Nankai subduction zone (ポスター)</p>	<p>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. Ma, Y. Hashimoto, Y. Okino, K.</p>	<p>AGU Annual Meeting 2023</p>	<p>2023.12</p>	<p>国外</p>
<p>High-resolution seismic imaging of plate boundary structures in the Nankai Trough by graph-space optimal transport based full waveform inversion using wide angle seismic refraction data (ポスター)</p>	<p>Qin, Y. Kimura, G. Fujie, G. Kodaira, S. Nakamura, Y. Miura, S.</p>	<p>AGU Annual Meeting 2023</p>	<p>2023.12</p>	<p>国外</p>
<p>Connection between geometrical and physical property changes with slow earthquake activity in the Nankai Trough revealed by dense seismic reflection data (ポスター)</p>	<p>Flores, Paul Caesar M. Kodaira, S. Kimura, G. Shiraishi, K. Nakamura, Y. Fujie, G. No, T. Kaiho, Y.</p>	<p>AGU Annual Meeting 2023</p>	<p>2023.12</p>	<p>国外</p>

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
Upper-plate conduits linked to plate boundary that hosts slow earthquakes	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. Ma, Y. Hashimoto, Y. Okino, K.	Nature Communication	2023.9	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

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処理システム（以下、本システム）の仮運用を継続した。仮運用においては、異なる2種類の3D構造モデルを用いていることから、過去の顕著な地震活動である2004年9月の紀伊半島南東沖の地震活動を対象として、構造モデルに依存した震源カタログの特徴の差違について検討した。この結果を踏まえ、地震波走時トモグラフィ解析に基づく3D構造モデルを用いて、地震発生場所ならびに地震活動推移の評価に用いる長期震源カタログを整備した。長期震源カタログの整備対象期間は、2003年1月から2024年2月とした。仮運用中の本システムにより得られる自動震源と長期地震カタログ及び他システムによる発震機構解情報を用いて地震活動評価に資する情報を作成することを念頭に、自動的に生成すべき情報の検討とその試作を進めた。

(b) 業務の成果

1) 3D構造モデルを用いた長期震源カタログ整備のための環境構築

本課題では、3D構造モデル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かつ高精度に把握出来るようにすることを目的としている。求めた最新の地震情報を過去の地震活動と対比する場合、参照する地震カタログも同じ速度構造モデル、同じ震源計算方法に基づいて計算されたものである必要がある。さらに、最終的に地震活動推移を可視化して表示するためには、長期にわたる過去の地震カタログは必須となる。そこで、今年度は本システムを用いて長期震源カタログの整備を進めることとし、まず、カタログ整備を効率的に実施するための環境構築を行った。

本システムはサーバ上に仮想マシン（Virtual Machine, 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な構成となっている。試験稼働中の本システムの自動処理では、異なるVM上で、地震波走時トモグラフィ解析に基づく構造（以下、トモグラフィモデル）¹⁾ならびに全国1次地下構造モデル（以下、JIVSM）²⁾を用いた震源計算を実施している。トモグラフィモデルは震源決定での利用実績が豊富なモデルだが、沖合の構造の解像度は十分ではない。また、構造の平滑化がされているため、沈み込むプレートとその周辺での地震波速度の差がそれほど明瞭ではないという特徴を有する。一方、JIVSMは長周期地震動計算のために整備されたモデルであり、グリッド（格子点）ごとの層境界の深さと各層における地震波速度等のパラメータを与えるフォーマットとなっており、層境界での地震波速度差が明瞭である。本システムで震源計算を行うためには、各グリッドにおける地震波速度情報が必要となるため、JIVSMについては必要なフォーマット変換を実施したうえで、トモグラフィモデルと同じ計算アルゴリズムを用いて震源位置の推定に用いている。いずれの3D構造モデルに対しても、防災科学技術研究所（以下、防災科研）が運用する高感度地震観測網

Hi-net において南海トラフ及びその周辺域でマグニチュード (M) 1.5 以上の地震を検知した場合に自動震源計算を開始する設定としている。なお、トモグラフィモデルに対しては 2021 年 2 月、JIVSM に対しては 2022 年 1 月から自動処理を開始した。

長期地震カタログ整備にあたっては、それら以前に発生した地震ならびに自動処理開始以降に発生した M1.5 未満の地震を対象に震源再計算を行う。これらの再計算を行うにあたって、自動処理に遅延等の悪影響が発生することのないようにしなければならない。そこで、本年度は、震源計算を行うサーバ上のメモリを 64GB から 128GB に増強したのち、震源再計算用に新たな VM を容易に立ち上げる手順を構築、適用することで震源再計算に活用した。

2) 長期震源カタログの整備

3 D 構造モデルを用いた震源計算結果の特徴を評価するため、紀伊半島南東沖で発生した地震活動を対象とした震源再計算を行った。この地域では、2004 年 9 月 5 日 19 時 7 分頃、沈み込むフィリピン海プレート内で Mw7.2 (防災科研 F-net による) の地震が発生して以降、地震活動が活発化した³⁾。図 2-1-②-1 に Mw7.2 の地震発生から 30 日間を対象として、様々な地震カタログに基づく震源分布を比較して示す。本システムでは、防災科研 Hi-net システムにより、1 D 速度構造を用いて求められた震源情報 (以下、Hi-net 震源) を初期震源として用いている。Hi-net 震源の分布を図 2-1-②-1 の 3 段目に示す。一部浅く決まった地震もあるが、深さ 30km 付近及びそれ以深に地震活動が集中している様子が分かる。同じく 1 D 速度構造に基づく気象庁一元化震源情報⁴⁾ では、主な地震活動が深さ 30~50km に分布するほか、深さ不明の地震が 0 km に多数表示されている (図 2-1-②-1 の最下段)。2004 年当時、この海域に地震・津波観測監視システム DONET は敷設されておらず、陸域に設置された観測点のデータのみで震源決定を行う必要があった。上記の 1 D 構造モデルに基づく震源分布の特徴は、震源直上にあたる沖合に地震観測点がないこと、速度構造モデルが適切ではないことといった理由のため、震源深さが精度良く決まらないことを反映している。

トモグラフィモデルに基づく震源計算結果は、図 2-1-②-1 の最上段に示すとおり、深さ 10~40km と全体的にやや浅い範囲に分布した。図中、2 種類のプレート上面モデル^{5), 6)}を実線で示した。トラフ軸に直交する A-B 断面を見ると、トラフ軸が考慮された水色線のプレートモデル⁵⁾に対し、その約 10km 深部にプレート上面と平行な地震分布が見えること、この活動の中に③で示した 9 月 7 日の Mw6.5 の地震が含まれることが特徴的である。また、トラフ軸に平行な C-D 断面を見ると、1 D 速度構造モデルを用いた震源分布においても最初の地震①よりも南西側 (C 側) で地震活動が活発であり、①の北東側がやや低調である傾向は見える。しかし、その深さが Hi-net 震源と気象庁震源で有意に異なっており、震源計算が不安定な様子が分かる。トモグラフィモデルでは、地震①の深さは Hi-net 震源と同等であるが、Mw7.5 の本震②を含む地震活動が浅くなった。一方、JIVSM を用いた震源計算を行ったところ、深さ 30km 付近及びそれ以深に集中していた地震活動が 30km 以浅に移動した様子は分かるが、トモグラフィモデルのように震源の集中は見られない (図 2-1-②-1 の 2 段目)。JIVSM は明瞭な速度変化を与えたモデルであるため、昨年度に検討を行った初動解のように波線の大きな曲がりの評

価する必要がある場合には有効に働くこともある。しかし、速度変化が明瞭であるがために、わずかな初期震源位置の違いであっても、その場所によって計算される波線経路が大きく変化しうる。このことは、震源位置推定の不確定性・不安定性を増大させ、震源分布の集中を阻害する要因のひとつとなっている可能性が高い。

本課題で整備する長期の地震カタログは、それ自体を統計解析に適用し、活動の特徴及びその変化を抽出するために使用するほか、自動処理により得られる現在の活動と過去の活動とを対比するために用いる。大地震後の余震活動は、通常、限られた領域で集中的に起こることを考慮すると、図 2-1-②-1 の結果からは、トモグラフィモデルに基づく震源カタログの方が長期カタログに適していると判断出来ること。以上から、今年度はトモグラフィモデルを用いた長期カタログの整備を実施することとした。

カタログの整備対象期間は、西南日本で防災科研 Hi-net の観測点分布が現在とほぼ同等となった 2003 年 1 月 1 日から 2024 年 2 月 29 日までとした⁷⁾。また、対象地震は防災科研 Hi-net による震源カタログのうち、震央位置が北緯 30.5 度～36.5 度、東経 129 度～140 度の範囲に含まれ、震源深さが 100km よりも浅いものとした。Hi-net システムにおいて手動再検測が行われた地震はその検測情報を、実施されていない比較的小さな地震については自動検測のデータを用いた。最終的に、震源カタログには、約 93,000 個の地震情報が登録された。図 2-1-②-2 に、本システムで構築した長期地震カタログに基づく震源分布を、震源の深さごとに示す。深さ 20km 以深 (c～f) において、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う地震活動を明瞭に確認することが出来る。図 2-1-②-3 には、長期地震カタログに登録された月別地震数を示す。フィリピン海プレート沈み込みに伴う顕著な地震活動について注釈を入れた。なお、2016 年 4 月頃及び 2020 年 4 月頃の顕著な活動は、それぞれ平成 28 年熊本地震並びに長野・岐阜県境付近で発生した陸側プレート内の浅い地震活動に対応する。構築した震源カタログは、サブ課題 3 と共有した。

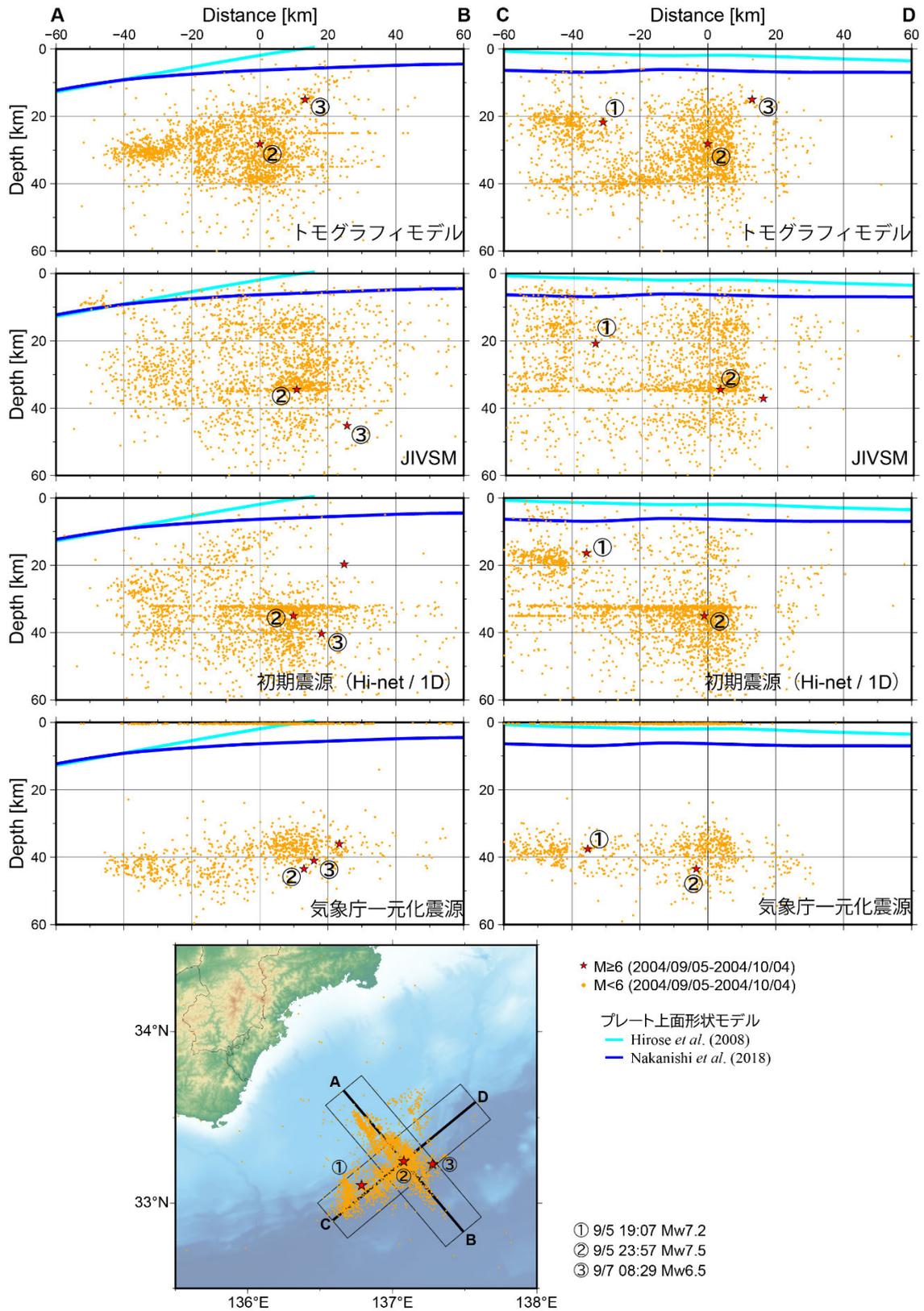


図 2-1-②-1 2004 年 9 月 5 日から 10 月 4 日に紀伊半島南東沖で発生した地震の震源分布。上段から順に、トモグラフィモデル及び JIVSM を用いて本システムで求めた震源分布、初期震源として用いた Hi-net 震源、気象庁一元化震源。赤星印は各カタログで M 6 以上となった地震を表す。断面線の位置を地図中に示す。

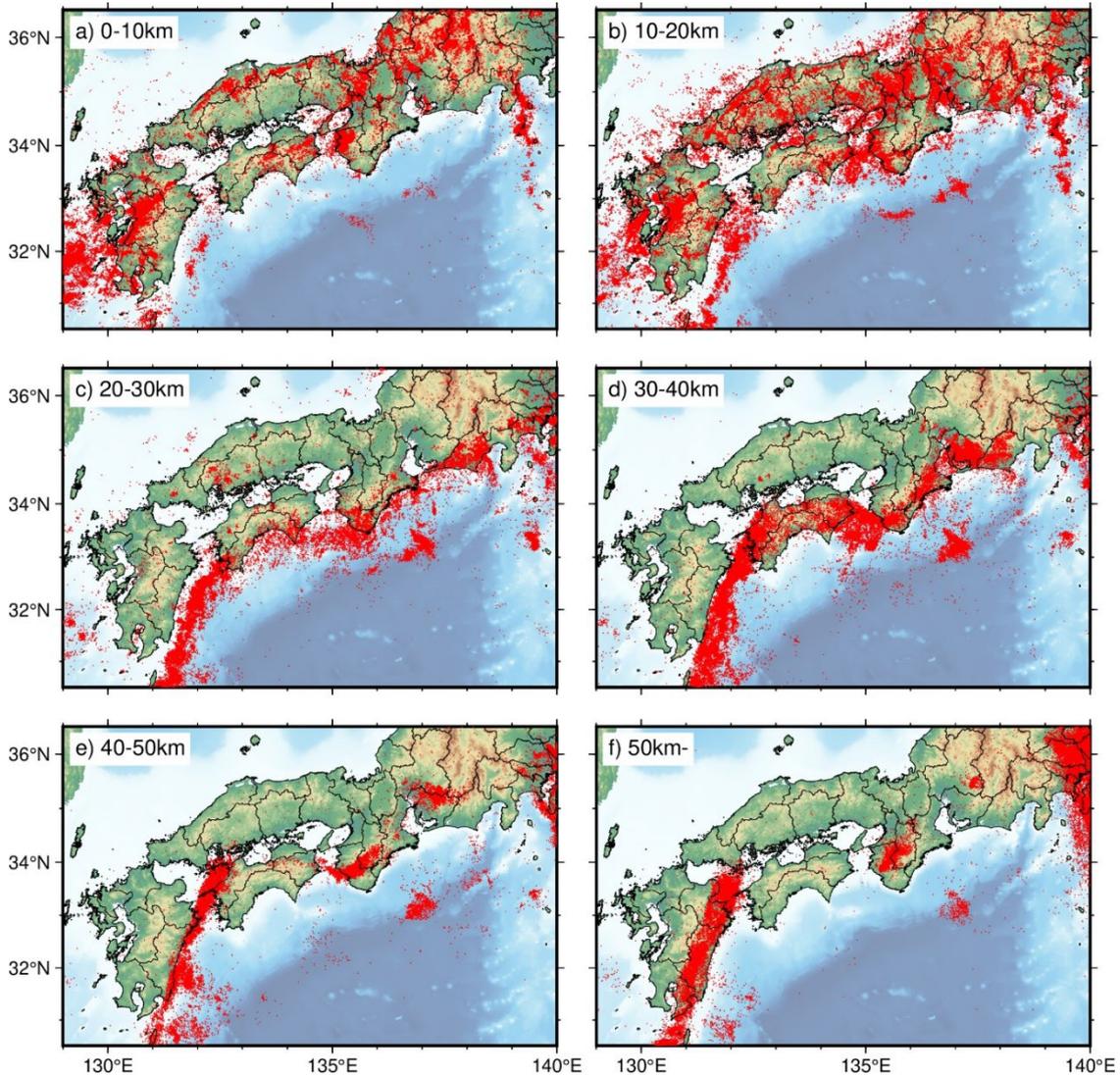


図 2-1-②-2 本システムにより再決定した深さ別の震源分布(2003年1月～2024年2月。M \geq 1.0)。

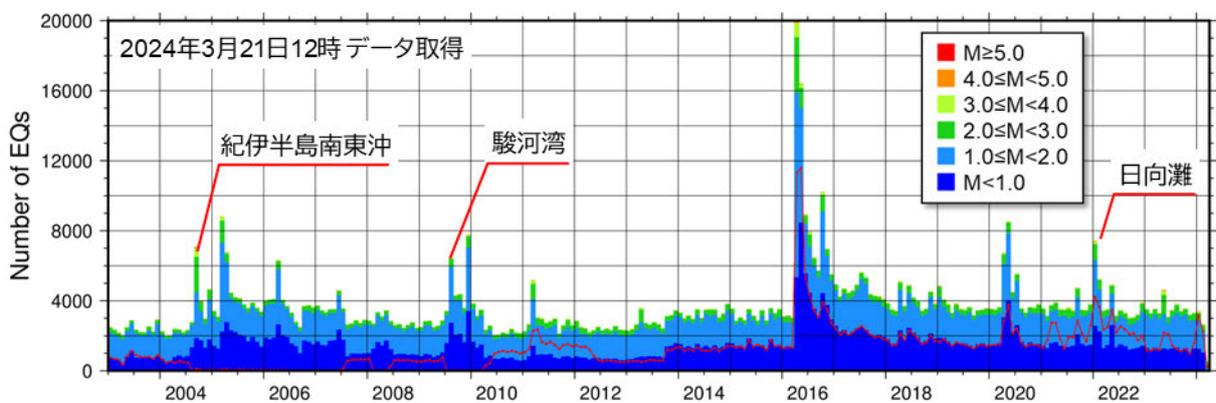


図 2-1-②-3 本システムにより構築した長期地震カタログの月別地震数。色は地震のマグニチュード (M) 範囲に対応する。赤線は防災科研 Hi-net システムにおける自動処理震源の数。フィリピン海プレートに関連する主な地震活動について、注釈を付与した。

3) 地震活動可視化に向けた検討

本課題では、3D構造モデルを用いた震源位置を自動的かつ逐次的に推定するだけでなく、長期の震源カタログを整備することで地震活動の変化を評価できるようにすることを目指している。また、一定規模以上の地震を検知した場合、気象庁が開催する「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」等への情報提供を念頭に、本システムや関連するシステムの処理結果を自動的に集約し、一覧表示する機能の構築を検討している。本年度は、後者の機能構築に向けて必要な情報の種類や表示方法の検討を行うとともに、プロトタイプシステムの構築に着手した。

まず、一定規模、例えばM5以上の地震（以下、本震）が発生した場合に、集約して表示すべき情報として、地震調査委員会臨時会資料等を参考に以下の項目を抽出した。

- ・ 本システムによる震源分布図及び鉛直断面図。陸側プレートと沈み込むフィリピン海プレートの間で発生する地震を念頭に、本震の発震機構解で推定される走向に直交する方位の断面を自動設定する。
- ・ 地震活動のM-T図及び時空間分布図。時間軸は本震発生前から参照時点（あるいは、1カ月等あらかじめ設定した最長期間）までを対象とする。
- ・ 以上の表示に使用した地震情報に基づくb値⁸⁾及びZ値⁹⁾の時空間分布図。
- ・ 防災科研F-netによるモーメント・テンソル(MT)解及び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)¹⁰⁾に関する情報。いずれも別システムで提供されており、あらかじめ設定した条件に基づき、本システムで求めた地震情報から抽出する。

本機能の構築に着手した2023年6月19日1時58分頃、大隅半島東方沖においてM4.7(気象庁による)の地震が発生した。M5に満たない地震であったが、これまでに構築した機能で取得可能な情報をサンプル的に集約し、2023年7月に開催された「第69回南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」に資料提出した。図2-1-②-4は震源分布の鉛直断面図であり、提出した資料にも同様の図面を添付した。断面図の方向は、3D-CMT解の走向と直交する方向に設定した。この地震は、1D構造モデルによる初動解が低角逆断層型であったものの、震源深さが約30kmとモデルから推定されるプレート上面深さ(約18km)^{5), 6)}よりも有意に深いこと(図2-1-②-4 右上)、M4級の余震の発震機構解(初動解)はやや正断層的であったことから、スラブ内地震の可能性を否定出来なかった。一方、トモグラフィモデルを用いて本システムにより再決定した本震の震源深さは23kmとなった。依然としてプレート上面深さよりも深いものの、本システムによる余震分布(図2-1-②-4 右下の赤丸及び橙丸)はプレート上面形状とほぼ平行に分布した。さらに、その深部延長には、2005年5月31日(気象庁M5.8)ならびに2022年10月2日(気象庁M5.9)の再決定震源が位置していた(図2-1-②-4 右下の緑丸)。地震調査委員会において、これらの地震はいずれもフィリピン海プレートと陸のプレートの間で発生した地震と評価されている^{11), 12)}。加えて、初動解では正断層的に求まっていた最大余震の3D-CMT解は低角逆断層型に求まったことから、今回の地震についても、フィリピン海プレートと陸のプレートの境界で発生した可能性が高いと判断出来る資料となった。

構築中の情報集約機能画面例を図2-1-②-5に示す。現状、各情報を個別に作成

しているため、使用したデータ範囲や地図表記等が十分に統一されていないほか、データベース等のラベルがそのまま表示されているといった課題がある。来年度以降、これらの課題に対応したうえで、各情報の取捨選択、レイアウトの検討等を実施し、より見やすい画面構成となるようにする予定である。

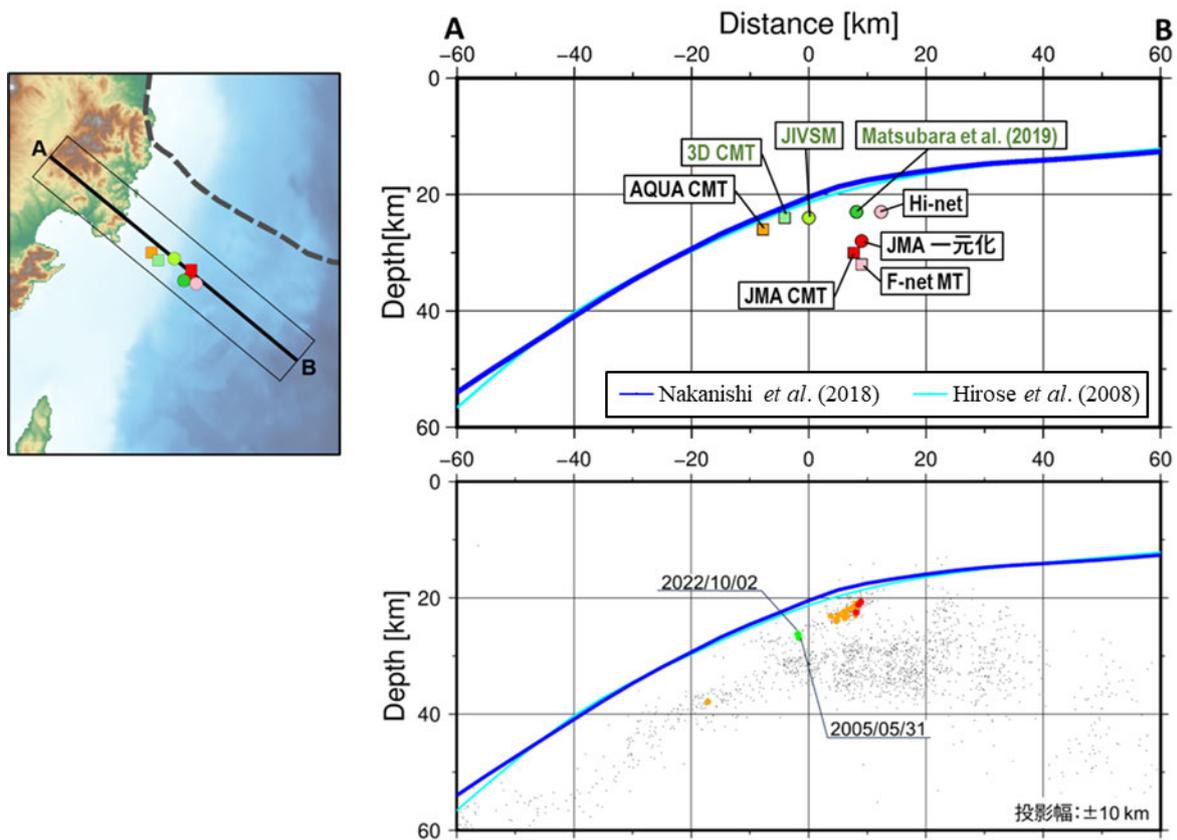


図 2-1-②-4 大隅半島東方沖における震源分布の比較。右上) 2023 年 6 月 19 日に発生した M4.7 の地震に対し、様々なカタログに登録された震源あるいはセントロイドの位置。黒字は 1 D 構造モデル、緑字は 3 D 構造モデルを用いた結果であることを表す。水色線⁵⁾及び青線⁶⁾は、フィリピン海プレート上面の位置を表す。右下) トモグラフィモデルを用いて、本システムにより再決定した震源の分布。2023 年 6 月 19 日及び 20 日に発生した地震のうち M4 以上の地震を赤丸、M1.5 以上の地震を橙丸で示す。緑丸は過去に発生し、フィリピン海プレートと陸のプレートの間で発生したと評価された M5 以上の 2 地震の震源位置を表す。灰色の点は長期カタログに登録された M1.5 以上の地震を表す。各図の断面線の位置は、左上地図中に示す。

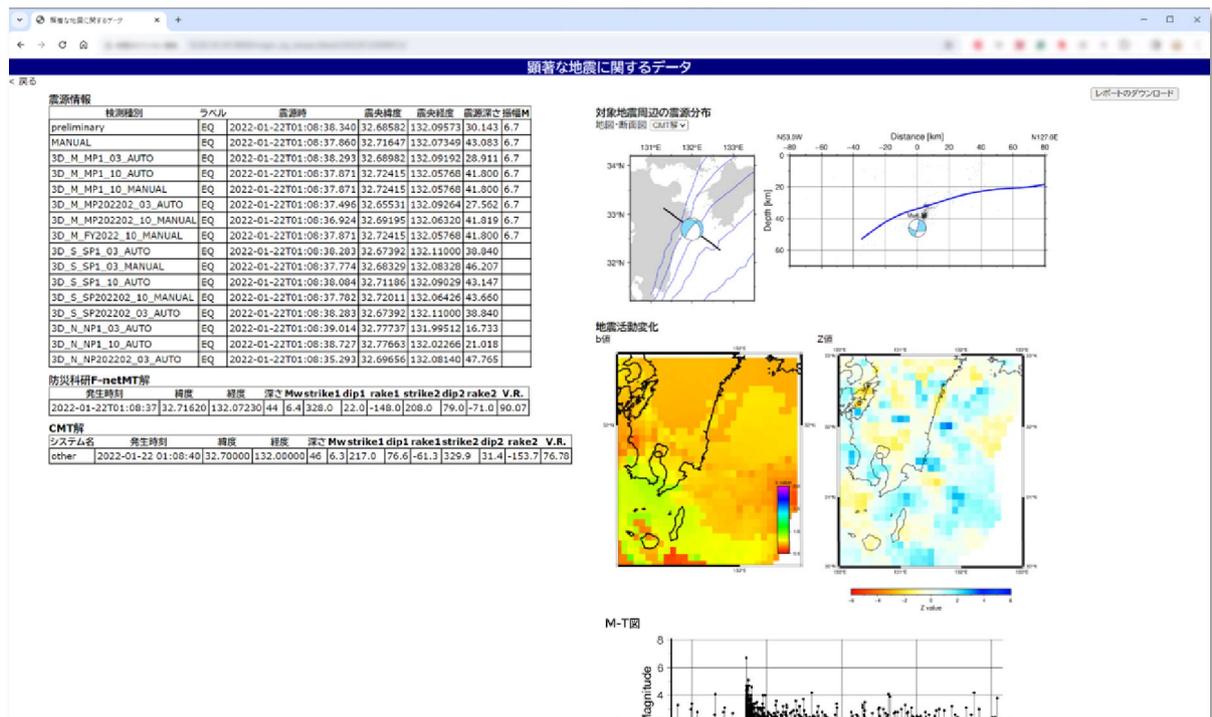


図 2-1-②-5 構築中の情報集約機能画面例。左に様々な条件での震源計算結果、右側上部から順に、本システムによる長期カタログを背景とする鉛直断面図及び 3D-CMT 解析による発震機構解、b 値及び Z 値の空間分布、b 値表示範囲の M-T 図が表示されている。

(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タログと対比・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、長期震源カタログ構築のための環境整備を進めた。次に、2 種類の 3D 構造モデルを用いて紀伊半島南東沖の地震活動の震源分布を再計算し、両モデルならびに 1D 構造モデルによる震源分布との特徴の違いの確認及び検討を行った。この結果を踏まえ、地震波走時トモグラフィ解析に基づく 3D 構造モデルを用いて、2003 年 1 月以降の南海トラフ及びその周辺の震源再決定を行うことにより、長期地震カタログを構築した。さらに、仮運用中のシステムにより得られる自動震源とこの長期地震カタログを用いて地震活動評価に資する情報を作成することを念頭に、自動的に生成すべき情報の検討とその試作を進めた。その過程において 2023 年 6 月に大隅半島東方沖で発生した地震を対象としていくつかのサンプル図面を作成し、気象庁の「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」に資料として提出した。この地震は、従来の 1D 構造モデルによる解析ではスラブ内地震と評価される可能性があったが、過去データを含め、3D 構造モデルを用いた解析を行うことにより、陸側プレートと沈み込むフィリピン海プレートの境界部で発生した地震である可能性が高いことを示した。

本システムでは、現在、Hi-net システムにおいてM1.5以上の地震が登録された場合に自動的に震源再計算を行うこととしている。地震活動把握を進める上では、より小規模の地震もカタログ化すべきであり、今年度はM1.5未満の地震について手動で再計算を行った。今後、自動震源計算の滞留が起きない程度に自動計算対象とするMの下限を下げる、微小地震は別のVMで処理するなどの仕組みを検討し、可能な限り自動でカタログが拡充される仕組みを構築しておくことが望ましい。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を進めているところである。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。

2024年1月1日に石川県能登地方で発生したM7.6の地震に関して、この地震後に地震活動が極めて活発化したことにより、Hi-net システムにおける地震検知力が著しく低下する事態が発生した。これは、本震を含めて規模の大きい地震が多発したことで、長期にわたる平均的な振動レベル (Long-time-average; LTA) が上昇したことにより、短時間の振動レベル (Short-time-average; STA) との比 (STA/LTA) で地震の発生を検知しづらくなったことが主因である。さらに、地震を検知したとしても、広い震源域で地震活動が活発化したことにより、読み取った位相に紐づく地震の判別が適切に行われず、すなわち異なる地震による位相をひとつの地震として震源決定を試み、失敗するという事例も多発した。本システムは、現状、Hi-net システムによる震源情報を初期震源として稼働させているため、南海トラフ沿いの大地震発生時にも同様の問題が発生する可能性がある。ただ、本システムは初期震源及び検測値の入力部には柔軟性を持たせている。現在、機械学習を用いた位相の読み取りや新たなアプローチによる地震判別に関する様々な技術^{13), 14), 15)}が開発されている。近い将来、旧来の STA/LTA 法に替わる初期震源提供システムへの換装を検討する必要がある。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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 2024-3-25), 2012.
- 3) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会: 紀伊半島南東沖の地震活動の評価 (平成16年9月6日), <https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2004/kii_1.pdf>, (参照 2024-03-25).

- 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
2024-03-21) .
- 5) 弘瀬 冬樹・中島 淳一・長谷川 昭：Double-Difference Tomography 法による西南
日本の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震2,
60, 1-20, doi: 10.4294/zisin.60.1, 2007.
- 6) 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.
- 7) 汐見 勝彦・小原 一成・針生 義勝・松村 稔：防災科研 Hi-net の構築とその成果,
地震2, 61, S1-S7, doi: 10.4294/zisin.61.1, 2009.
- 8) Gutenberg, B. and Richter, C. E.: Frequency of earthquakes in California,
Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185-188, 1944.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：2005年5月の地震活動の評価,
<https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2005/2005_05.pdf>, (参照
2024-03-21) .
- 12) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：2022年10月の地震活動の評価,
<https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/2022_10.pdf>, (参照
2024-03-21) .
- 13) Zhu, W. and Beroza, G. C.: PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic
arrival-time picking method, Geophys. J. Int., 216, 261-273, doi:
10.1093/gji/ggy423, 2019.
- 14) McBrearty, I. W. and Beroza, G. C.: Earthquake phase association with
Graph Neural Networks, Bull. Seismol. Soc. Am., 113, 524-547, doi:
10.1785/0120220182, 2023.
- 15) 関口 渉次：観測点から逆伝播する波面の重複点検出による簡易震源決定法, 地震
2, 76, 219-232, doi: 10.4294/zisin.2023-12, 2023.

(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三次元地震波速度構造に基づく初動発震機構解の推定（口頭）	汐見 勝彦 松原 誠 関口 渉次	日本地震学会2023年度秋季大会	2023.11	国内
Automatic Hypocenter Relocation System Using 3D Seismic Velocity Models for the Nankai Trough Area, Japan（ポスター）	Shiomi, K. Matsubara, M. Sekiguchi, S.	AGU Annual Meeting 2023	2023.12	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
観測点から逆伝播する波面の重複点検出による簡易震源決定法	関口 渉次	地震第2輯	2023.11	国内

(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