

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	藤江 剛
	主任研究員	仲西 理子
	特任研究員	Xin Liu
	臨時研究補助員	田中 恵介
	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
	副主任研究員	新井 隆太
	副主任研究員	白石 和也
	副主任研究員	山本 揚二郎
	研究員	Yanfang Qin
	招聘主任研究員	山下 幹也
国立研究開発法人防災科学技術研究所	副部門長	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
	主任研究員	武田 哲也
	主任研究員	三好 崇之
	主幹研究員	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る。構築した震源カタログに基づき、地震発生場所の評価や地震活動解析手法の確立を進める。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。

5) 令和6年度：

前年度までに構築した3D構造モデルの検証や更新を実施しつつ、堆積層構造解析結果のモデルへの反映、東海沖及び日向灘沖への対象領域の拡張を行う。モデルの誤差評価手法を開発する。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とともに、地震活動を可視化して表現するシステムを構築する。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4年度業務目的

熊野灘周辺の世界統合高精細マルチパラメータ3D構造モデルを更新しつつ、解析対象を紀伊水道域へ拡張する。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、地震発生場所の評価や地震活動解析手法の検討を進める。

令和3年度に引き続きDONETの観測点直下の堆積層構造推定のための解析を実施する

とともに、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、モデル構築、検証、改善の対象を紀伊水道域へ拡張する。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、構造モデルを更新したことによる震源決定への影響を評価する。自動震源決定システムの運用を継続するとともに、構築済みの震源カタログに基づき、地震発生場所の評価や地震活動解析手法の検討を行う。

(2) 令和 4 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、熊野灘から紀伊水道域を中心とした海域の新たな観測や解析に基づく速度構造情報及びこれまで未活用だった陸域の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モデルの構築を実施した。構築中の 3D 構造モデルの状況に基づき、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を発展させ、今後のモデル構築や利活用の方向性、そのための枠組みについての意見交換を行った。マルチパラメータ化に向けた S 波速度構造の直接推定のために、令和 3 年度から引き続き複数の新たな手法を既存構造探査データに適用する試みを実施し、DONET の観測点直下の補正值として活用可能な堆積層内の詳細 S 波速度構造モデルの構築を進めた。

(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 3 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、広域化のため、令和 4 年度は新たに紀伊水道域付近における最新の反射法解析結果に基づく速度構造情報^{2), 3), 4)}及び地層境界面情報⁵⁾等を取り入れた。さらに、全国一次地下構造モデル⁶⁾、J-SHIS 地盤情報⁷⁾や地震波走時トモグラフィ解析の結果⁸⁾等を参考情報として活用することで、陸側の P 波速度構造モデルを更新した(図 2-1-①-1)。これら新たな情報を組み入れるため、令和 3 年度モデルの層序(図 2-1-①-2 左)⁹⁾に、全国一次地下構造モデル⁶⁾の Layer 7 までの情報をとり入れたほか、海域の地震波反射断面に基づき Sediment (堆積層) 内に構造境界面を追加した。また、主に海域の屈折法探査の成果から解釈される Sediment 下面(図 2-1-①-2 左の(3))については、全国一次地下構造モデル⁶⁾の Layer 13 との対応から両者の面を統合したモデルを作成した。同様に、それぞれ、図 2-1-①-2 (左)の境界面に対応する全国一次地下構造モデル⁶⁾の境界面をそれぞれ統合して新たな境界面を作成した。全国一次地下構造モデル⁶⁾の Layer 7 より深い速度構造情報については、図 2-1-①-2 (左)の模式図の各層の設定速度の条件に基づいて、これまでに収集した海域の地震探査に基づく構造情報、及び上述の新たな海域の構造情報を用いて空間的に補間した。

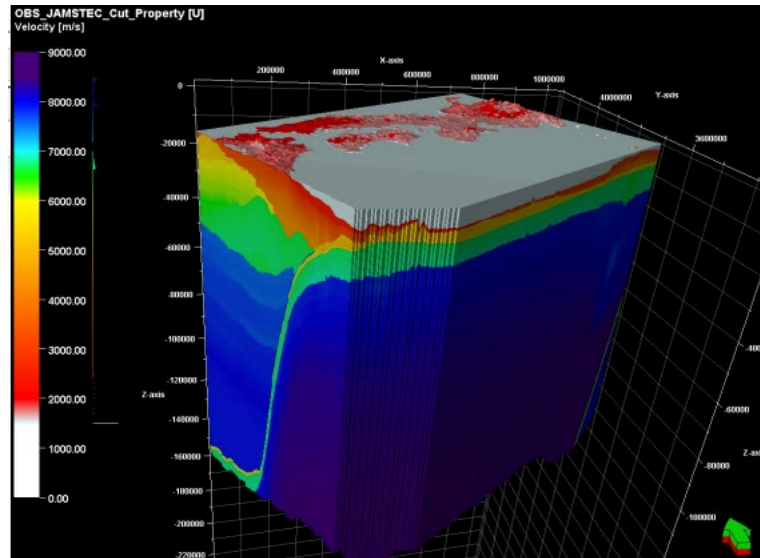


図 2-1-①-1 令和 4 年度に構築した陸側を含む 3 D の P 波速度構造モデル。

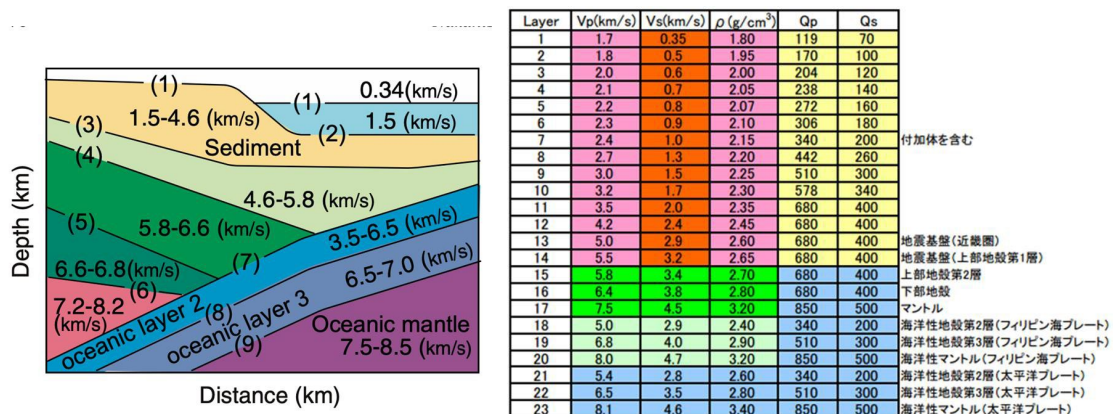


図 2-1-①-2 (左) 既存 P 波速度構造モデルの層序⁹⁾を表す模式図、(右) 全国一次地下構造モデル⁶⁾の層構造と物性値。

反射法地震探査の解析結果の一部は、時間領域(往復走時)の解析結果しかいないため、P 波速度構造情報は時間領域で統合した上で、深さ領域の P 波速度構造モデルに変換した。さらに、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 3 D 構造モデルを作成した。

また、令和 3 年度に引き続き、マルチパラメータ 3 D 構造モデルの検証に必要な作業環境の整備を実施した。具体的には、実観測の重力データと、P 波速度構造から変換して構築した 3 D 密度構造モデルに基づく重力異常値を比較し、モデル改善に必要な環境整備を進めた。また、実観測に基づく S 波速度構造モデルと、P 波速度構造から変換して構築した 3 D S 波速度構造モデルを比較できるような環境を整えた。さらに、P 波の 3 D 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、データ取得、構造解析、モデル統合まで、ステップごとの不確定性や誤差などについて状況を整理し、今後の課題や実装方法などについての検討を重ねた。

2) 3D構造モデル統合方針の検討

本サブ課題で作成する南海トラフ域を対象としたマルチパラメータ3D構造モデルは、他のサブ課題も含めた統一モデルとして多方面で活用されることを目指している。そのため、令和3年度から、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を他のサブ課題担当と定期的実施しており、それに沿って3D構造モデルを整備する検討を進めてきた。今年度は、本プロジェクトの他サブ課題関係者や地震調査研究推進本部（地震本部）の浅部及び深部地盤構造モデル構築関係者に加えて、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（第2次）」のコミュニティ断層モデルの構築を担う研究者も交え、月1回程度の頻度でミーティングを実施した。各課題でのモデル構築に対する具体的な取り組み状況の共有のほか、先行する海外での事例も参考にしつつ、構築するモデルの活用や将来の発展の方向性について意見交換を重ねた。本サブ課題における陸域と海域の構造情報の統合にあたって、陸域の浅部・深部地盤構造モデル作成で進めている取り組みから共有された情報を、実際の3D構造モデル構築の参考情報として活用した。また、本意見交換を通じ、各モデルは地震研究を進めるための共通の情報基盤として重要であることを互いに確認した。特に、地下構造情報を集約したマルチスケールの地下構造情報共通基盤の整備を実現するためには、本プロジェクトを含めた様々な研究プロジェクトの成果を連携する必要があるとともに、関係者が作業を分担し、かつ継続的に関わる必要があるという共通認識に至った。そして、モデル構築を担う研究者だけでなく、ユーザの積極的な参加・協力が重要との観点から、多方面のコミュニティへの発信を目的とした概念図を作成した（図2-1-①-3）。

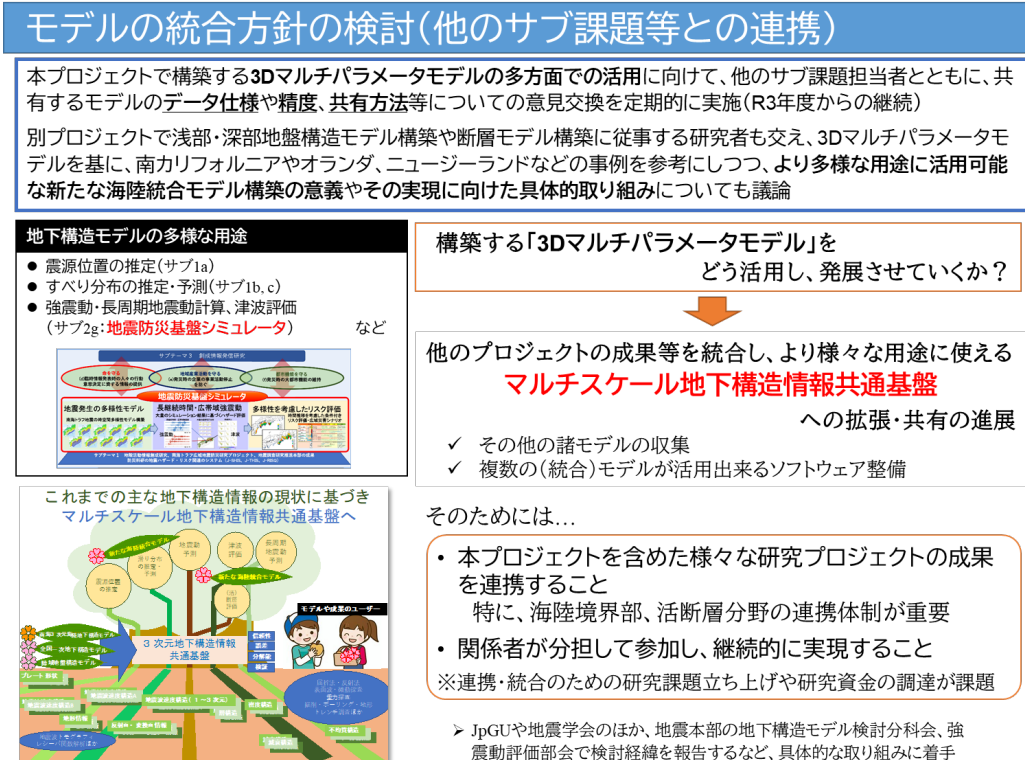


図2-1-①-3 3D構造モデル統合方針の検討

これらの経過について、2022 年 5 月には日本地球惑星科学連合 2022 年大会で報告するとともに、2022 年 6 月、11 月と 2023 年 3 月には地震本部の委員会で話題提供を行った。

3) 浅部堆積層構造の推定方法の検討

令和 3 年度に引き続き、震源決定の信頼性向上に不可欠な堆積層補正値を推定する解析手法の開発・改善を進めた。令和 2 年度までに手法の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を用いた浅部堆積層の S 波速度構造推定方法の課題は、レーシーバー関数によってイメージングされた PS 変換面の解釈(同定)が難しく、定量的に S 波速度を議論することが難しいことであった。そこで、令和 4 年度は PS 変換面の同定に資する拘束条件とするべく、新たに表面波を用いた S 波速度の直接推定方法の開発を進めた。海底地震計データを用いた表面波による S 波速度モデリング手法については、Tonegawa et al. (2013)¹⁰⁾等の多数の先行研究があるが、自然地震観測に向けて面的かつ疎らに設置された海底地震計データを用いたこれらの先行研究では、深度方向、水平方向とも空間分解能が低く、反射法地震探査でイメージングされるような高い解像度で堆積層の S 波速度構造の議論をすることは難しい。そこで、本サブ課題では構造探査用に密に直線上に設置した海底地震計アレイ(以下、リニアアレイと呼ぶ)で観測したノイズデータを用いて、地震波干渉法により抽出した表面波による逆解析によって詳細な S 波速度構造を構築する取り組みを進めた。構造探査では、海底地震計の設置後すぐにエアガン(人工震源)を用いた構造探査を実施し、探査終了後すぐに海底地震計を回収してしまうため、ノイズを用いた表面波解析に用いることができる期間が短く、干渉法解析には不向きと考えられていた。

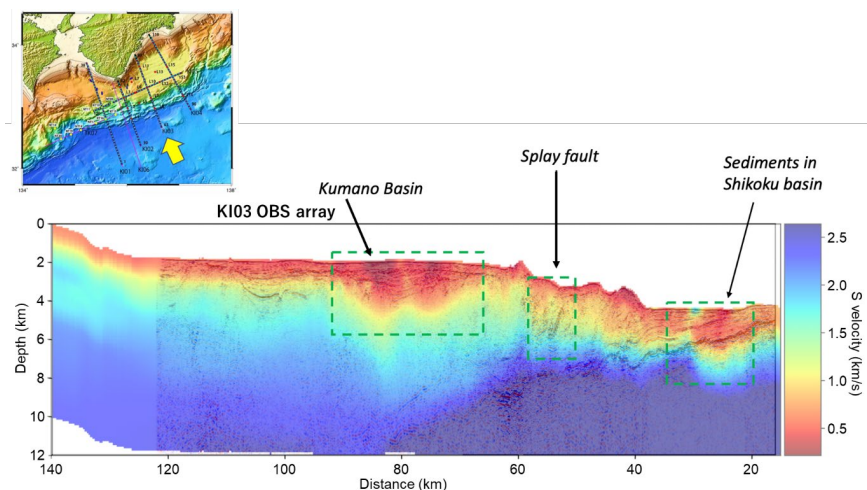


図 2-1-①-4 左上地図の矢印で示す屈折法地震探査測線に沿った海底地震計アレイで観測されたノイズデータから表面波を抽出し、逆解析により推定した S 波速度構造。同海域で取得した反射法地震探査データに重ねて表示した。緑破線の領域(熊野海盆、分岐断層、沈み込み口周辺)の堆積層構造内で、顕著な S 波速度の低下が認められる。

しかし、構造探査用リニアアレイの様に観測点間距離が 5 km 程度と短い場合は、一週間程度のノイズ観測期間があれば S 波速度解析に耐え得る表面波が抽出でき、さらにリニアアレイの利点を生かした逆解析によって 2 次元 S 波速度構造も構築できることが分かった。求まった S 波速度構造は、反射法地震探査による地震波反射断面 (P 波反射断面) の堆積層と整合的な様相を示し、堆積層内の S 波速度の推定値として使うことができると期待される (図 2-1-①-4)¹¹⁾。

このようにして求めた S 波速度構造モデルは、レシーバー関数解析でイメージングした PS 変換面分布とよい形状の一致を示すことから、PS 変換面の解釈 (同定) に活用することも可能である。レシーバー関数解析と比較すると、表面波解析による S 波速度構造は解像度に劣ることは否めないが、両手法は相補的であり、併用することで信頼性の高い堆積層内 S 波速度構造を構築できると考えられる。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフにおける高精度なマルチパラメータ 3 D 構造モデルの高精細化として、令和 3 年度に構築した熊野灘周辺のマルチパラメータ 3 D 構造モデル¹⁾に反映させた速度構造情報に加え、これまで未活用だった熊野灘周辺から紀伊水道域までの海域を中心とした新たな構造探査成果や陸域構造情報等を参考にして、南海トラフ域の 3 D 構造モデルを更新した。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、補間方法については今後も改良や検討を進める必要がある。海陸統合 3 D 構造モデルの構築の中で参考にした J-SHIS 地盤情報⁷⁾については、同じく参考にした全国一次地下構造モデル⁶⁾との接合方法に検討が必要となった。J-SHIS 地盤情報⁷⁾のバージョンアップの動きも鑑み、また陸域地盤構造モデルの構築課題との連携も視野に入れ、今後の課題とする。P 波速度構造モデルの確度や誤差を評価するため、モデル構築のステップごとの不確定性等に関する情報を整理し、今後の実装方法等についての検討を進めた。さらに、マルチパラメータ 3 D 構造モデルの検証にあたっては、P 波速度から変換式 (経験則) を用いて求めた他のパラメータ (S 波速度、密度) と、実観測に基づいて独立に求めた S 波速度構造情報や重力データの比較を行うための環境を整えた。これらの点について引き続き検討を行うとともに、取り組みの具体化を進める必要がある。

サブ課題間連携等を進めることを目的としたモデル統合方針の検討を令和 3 年度に引き続き行った。特に、本プロジェクトで作成するモデルへの陸域地盤構造情報の取り込みについて情報共有を実施し、そこでの議論に基づいて海陸統合 3 D 構造モデルの構築を進めた。また、将来にわたって効率的にモデルの統合や更新を進めていくためには、構造情報のユーザも含めた検討が必要との結論にも至った。ここでの議論を踏まえ、モデル統合の整備や活用の体制、運用面での課題も意識しながら、本研究プロジェクトでのモデル構築を進める必要がある。

令和 3 年度に引き続き、震源決定の信頼性向上に不可欠な堆積層補正値を推定する解析手法の開発・改善として、新たに表面波を用いた S 波速度の直接推定方法の開発を進めた。令和 2 年度までに手法の開発を進めてきた構造探査データのレシーバー関数解析手法による成果との比較により、両者を併用した今後の解析方法の方針について整理した。これに基づき、今後、同一測線での解析結果の比較、さらにマルチパラメータ 3 D

構造モデルの構築に用いている変換式によるS波速度とも比較し、どのように信頼性の高い堆積層内S波速度構造を推定していくか検討することが課題である。

(d) 引用文献

- 1) 仲西 理子・Qin Yanfang・藤江 剛・汐見 勝彦・小平 秀一・高橋 成実・中村 武史：Constructing a 3D seismic S-wave velocity model of the Nankai Trough, 日本地球惑星科学連合 2021 年大会, SCG49-P06, 2021.
- 2) 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, 2021.
- 3) 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 behaviour, *Nature Geoscience*, 15, 143-148, doi: 10.1038/s41561-021-00879-x, 2022.
- 4) Bassett, D., Arnulf, A. Kodaira, S., Nakanishi, A., Harding, A., and Moore, G.: Crustal structure of the Nankai subduction zone revealed by two decades of onshore-offshore and ocean-bottom seismic data: Implications for the dimensions and slip behavior of the seismogenic zone, *J. Geophys. Res.*, 127, e2022JB024992, doi: 10.1029/2022JB024992, 2022.
- 5) 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.
- 6) 地震調査研究推進本部：全国一次地下構造モデル（暫定版），
<https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki_data/>,（参照 2023-3-31）, 2012.
- 7) 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 2023-3-31）.
- 8) 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.
- 9) 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.

10) Tonegawa, T., Fukao, Y., Nishida, K., and Sugioka, H.: A temporal change of shear wave anisotropy within the marine sedimentary layer associated with the 2011 Tohoku-Oki earthquake, J. Geophys. Res., 118, 607-615, doi: 10.1002/jgrb.50074, 2013.

11) 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
Toward the construction of a common 3D multi-scale and multi-parameter model by integrating various seismic velocity structure model（口頭）	仲西 理子 前田 宜浩 森川 信之 先名 重樹 高橋 成実 中村 洋光 藤原 広行 汐見 勝彦 太田 雄策 堀 高峰 小平 秀一	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022. 5	国内
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（ポスター）	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	日本地震学会 2022 年秋季大会	2022. 10	国内

Shear velocity tomography using seismic noise interferometry from a linear OBS array off Kumano crossing Nankai Trough (口頭)	Xin Liu Ayako Nakanishi Gou Fujie Takashi Tonegawa Yasuyuki Nakamura Koichiro Obana Shuichi Kodaira	SEG/AGU Geophysics of Convergent Margins Workshop	2022. 7	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
Structural anomaly at the boundary between strong and weak plate coupling in the Central-Western Nankai Trough	Nakamura, Y. Shiraishi, K. Fujie, G. Kodaira, S. Kimura, G. Kaiho, Y. No, T. Miura, S.	Geophysical Research Letters	2022. 5	国外
Crustal structure of the Nankai subduction zone revealed by two decades of onshore-offshore and ocean-bottom seismic data: Implications for the dimensions and slip behavior of the seismogenic zone	Bassett, D. Arnulf, A. Kodaira, S. Nakanishi, A. Harding, A. Moore, G.	Journal of Geophysical Research, Solid earth	2022. 10	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自動震源決定処理システム（本システム）の仮運用を継続した。地震発生場所の評価に資するため、3D構造モデルに基づく発震機構解（初動解）計算機能を実装し、その動作検証を行った。この際、海域で発生する地震活動に対して3D構造モデル使用の効果を評価するため、従来のトモグラフィモデルに加えて、全国1次地下構造モデルをグリッド化したモデルを用いた震源計算環境を新たに構築した。また、計算に用いるモデルを確認、対比するための3D構造モデル可視化機能やデータベース管理機能を構築した。3D構造モデルを用いた震源長期カタログ整備等に資するため、新たな震源計算環境の整備を行うとともに、長期カタログに基づく地震発生場所評価方法や地震活動変化の可視化方法の検討に着手した。

(b) 業務の成果

1) 3D構造モデルを用いた初動解計算機能の実装と検証

本課題では、3D構造モデルを用いて整備した長期地震カタログに基づいて、地震活動を可視化して表現するシステムの構築を目指している。地震活動変化の特徴を表現する指標のひとつとして、グーテンベルグ・リヒター則の b 値の時空間変化が注目されているが、 b 値には震源深さ依存性や発震機構解依存性が存在する^{1), 2)}。 b 値の変化として地震活動の変化を適切に把握するためには、地震がどのような応力場のもとで、どこで発生したかを適確に評価し、正しく分類しなくてはならない。そのためには、震源の位置に加えて、適切な発震機構解を知る必要がある。しかし、南海トラフ周辺の海域で発生するプレート境界付近の地震に対して1D構造モデルを用いると、震源から観測点に向けて放出される地震波の射出角を適切に評価出来ないため、正しい初動解を推定出来ないことが知られている。実際、このような地震では初動解とモーメントテンソル(MT)解とが有意に異なる³⁾。そこで、今年度は3D構造モデルに基づいて初動解を計算する機能を構築し、試験運用中の本システムに実装した。

本機能を検証するため、Takemura et al. (2016)によって1D構造モデルによる初動解とMT解に有意な差があるとして示されている5地震について、発震機構解の推定を実施した。図2-1-②-1及び表2-1-②-1に解析対象とした地震の諸元を示す。なお、前述の通り1D構造モデルに基づく初動解とMT解の差違は沈み込むフィリピン海プレートの影響が大きいと考えられる。一方、試験稼働中の本システムで使用している3D構造モデルはトモグラフィ解析によって求められた地震波速度構造⁴⁾であり、沖合の構造の解像度は十分ではなく、後述するとおり、沈み込むプレートとその周辺での地震波速度の差がさほど明瞭ではない。そこで、プレートが明瞭な速度差を持ってモデル化されている全国1次地下構造モデル(Japan Integrated Velocity Structure Model, JIVSM)⁵⁾を本システムの3D構造モデルとして試験的に採用し、初動解計算への影響を評価することとした。なお、JIVSMはグリッド(格子点)ごとの層境界の深さと各層のパラメータ(地震波速度等)を与えるフォーマットとなっている。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、昨年度構築したツールを用いて構造モデルの変換を行った。

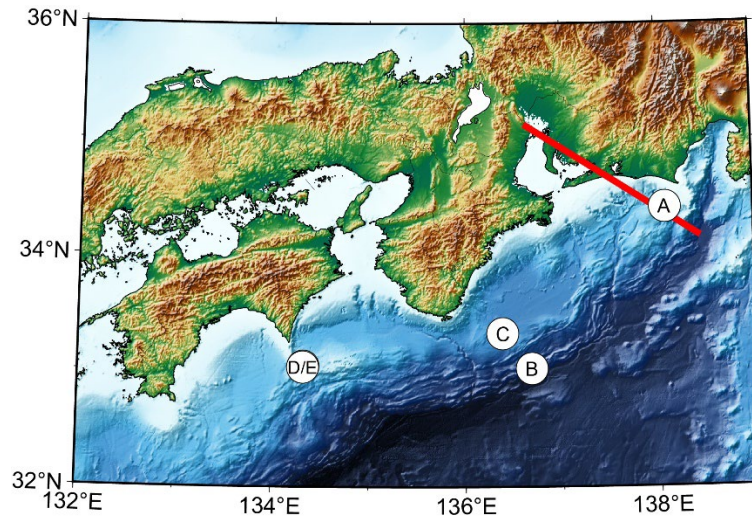


図 2-1-②-1 初動解の評価対象とした地震の震源分布。図中の A～E は表 2-1-②-1 に対応する。また、赤線は図 2-1-②-2 の断面線の位置を表す。

表 2-1-②-1 初動解の評価対象とした地震。震源情報は防災科研 F-net による

	震源時刻	震源位置			Mw
		緯度 [°N]	経度 [°E]	深さ [km]	
A	2011.08.12 04:37:45	34.4087	138.0827	11	4.5
B	2011.03.12 22:11:02	33.0202	136.6840	5	4.7
C	2016.04.01 11:39:07	33.3233	136.3832	14	5.8
D	2009.07.23 00:47:34	33.0413	134.3250	14	4.7
E	2009.07.22 23:51:02	33.0330	134.3215	20	5.0

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。また、VM ごとに独自のサブ ID を指定することで、全ての VM の処理結果をリレーショナルデータベース (RDB) に保存し、その結果を互いに比較、検討することが可能である。JIVSM を 3D 構造モデルとして震源位置及び初動解を計算するにあたっては、専用の VM を立ち上げ、本評価を行った。

まず、解析に用いる 3D 構造モデルの違いによる計算結果への影響を評価するため、震源が比較的陸に近い地震 A を対象として、JIVSM とトモグラフィ両方のモデルで初動解の計算を行った。1D 構造モデルに基づく防災科研 Hi-net 初動解並びに 3D 構造モデルに基づく CMT (3D-CMT) 解析結果^{6),7)}と併せて図 2-1-②-2 に示す。また、同図には、図 2-1-②-1 に赤線で示した測線における P 波速度構造も示した。この地震の 3D-CMT 解は北西-南東圧縮の低角逆断層型を示し、その深さはフィリピン海プレート上面深度とほぼ等しいことから、陸と海のプレート間で発生した地震と評価される。一方、1D 構造モデルに基づく Hi-net 初動解は南北伸張の正断層型を示し、その震源深

さは 26 km であったため、この結果からのみではスラブ内地震と誤判定されうる。トモグラフィモデルを用いた結果は、Hi-net 初動解と比べて反時計回りにわずかに回転することで駿河トラフの走向と調和的な結果となったが、発震機構解としては依然として 3D-CMT 解とは有意に異なり、震源深さも 24 km とやや深い。一方、JIVSM を用いた結果では、低角逆断層成分が見られるとともに、震源深さも 8 km と浅くなった。図 2-1-②-2 の右側に計算に用いた P 波速度構造の断面図を示す。最上部に示すトモグラフィモデルでも駿河トラフ側（右側）から伊勢湾側（左側）に傾斜する高速度層としてフィリピン海プレートが表現されている。この高速度なプレートの存在により発震機構解の走向方向の回転が導かれたと考えられる。一方、JIVSM 並びに JIVSM から変換した 3D 構造モデルと比べると、トモグラフィモデルでは深さ 30~40 km に $V_P = 7$ km/s 以上の比較的高速度な媒質が広く分布し、プレートとその浅部構造の間の速度変化が JIVSM ほど明瞭ではない。結果として、3D-CMT 解よりも 1D 構造モデルと類似した解が得られたと考えられる。

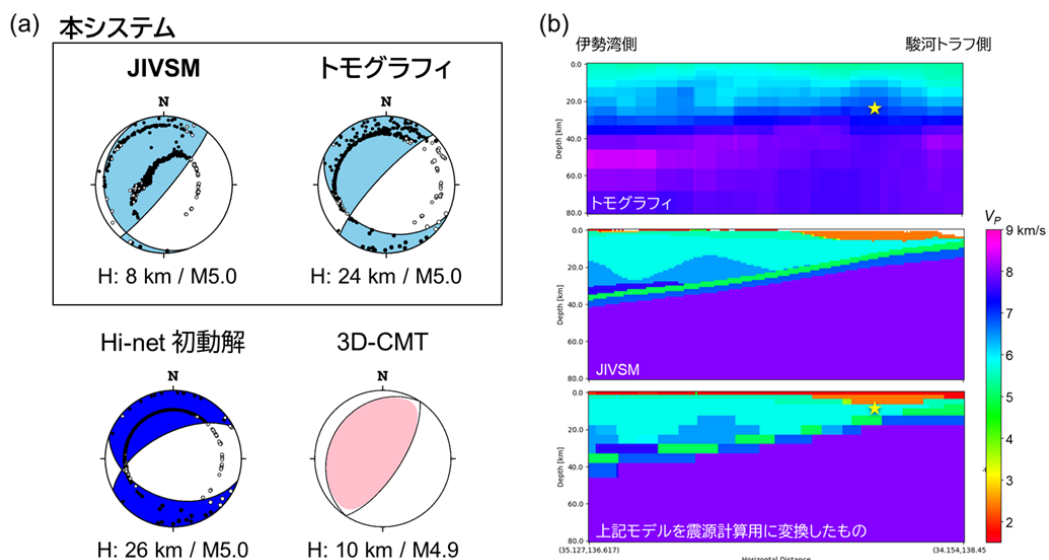


図 2-1-②-2 (a) 地震 A の発震機構解。左上は JIVSM、右上はトモグラフィモデルを用いて本システムで求めた初動解（水色）。左下は 1D 構造モデルに基づく防災科研 Hi-net による初動解（青色）。右下は 3D-CMT 解析結果⁷⁾（桃色）。各発震機構解下部には、それぞれの解析により得られた震源（セントロイド）深さ及びマグニチュードを表す。(b) 計算に用いた P 波速度構造の鉛直断面図。断面線の位置は、図 2-1-②-1 に示す。断面図中の星印は、それぞれのモデルで求めた震源の概略位置を表す。

次に、解析対象とした地震のうち、最も規模の大きい地震 C について、JIVSM に基づく構造を用いて本システムにより求めた初動解ならびに他の様々なカタログによる解

を図 2-1-②-3 に示す。この地震は、地震本部により、沈み込むフィリピン海プレートと陸のプレートとの境界で発生した地震と評価されている⁸⁾。3D-CMT 解⁷⁾及び 1 D 構造モデルに基づく気象庁 CMT 解⁹⁾は北西-南東圧縮の低角逆断層型であり、セントロイド深さは震央付近のフィリピン海プレート上面深度（約 11 km）¹⁰⁾と整合的な結果となっている。また、1 D 構造モデルに基づく防災科研 AQUA-CMT 解、防災科研 F-net による MT 解は、いずれもやや高角であるものの、北西-南東圧縮の逆断層型で求まった。一方、Hi-net 初動解は北西-南東伸張の正断層型、深さ 18km として求まっており、前述の地震 A 同様、1 D 構造モデルに基づく初動解からはスラブ内地震と誤判定されうる結果となっている。本システムの解析結果は、Hi-net 初動解同様、北西-南東伸張の正断層型であるが、傾斜角は Hi-net 初動解が 24° であるのに対し、本システムの結果は 10° と大幅に低角な解となった。また、推定された震源深さも 13km とやや浅く求まった。本システムで得られた初動解単独でプレート境界付近で発生した地震と評価することはやや困難ではあるが、震源深さならびに低角な傾斜角から、当該地震がプレート境界付近で発生した地震の可能性を残す結果となった。

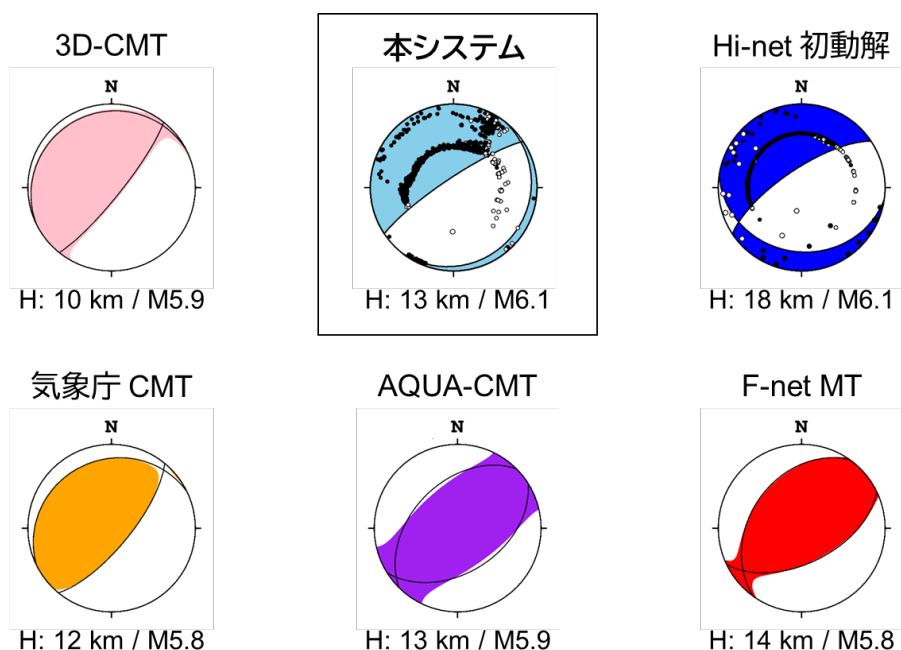


図 2-1-②-3 地震 C に対する発震機構解。左上から順に、3D-CMT 解析結果⁷⁾、JIVSM に基づく本システムによる初動解、防災科研 Hi-net による初動解、気象庁による CMT 解⁹⁾、防災科研 AQUA-CMT 解、防災科研 F-net による MT 解を表す。各発震機構解下部には、それぞれの解析により得られた震源（セントロイド）深さ及びマグニチュードを表す。

その他の地震 B、D 及び E の結果を図 2-1-②-4 に示す。3 D 構造モデルを用いたとしても、これらの地震のように震央近傍に観測点が存在しない場合、解の任意性が高くなる点は避けられない。地震 D 及び E に対して本システムで得られた震源深さは約 17km であり、1 D 構造モデルによる震源深さ（23km）よりも浅くなったものの、プレー

ト上面深度（約 12km）¹⁰⁾よりもまだ有意に深い。3D-CMT 解は低角逆断層型だが、セントロイド深さは 16km である。これらの結果から、地震 D 及び E はプレート境界付近で発生した地震である可能性が高いものの、スラブ内地震である可能性を棄却し難い結果となった。このような地震の場合は、余震活動と併せた評価が必要である。地震 B は、F-net MT 解や 3D-CMT 解から、トラフ軸付近で発生したスラブ内地震と評価される。3D 構造モデルを用いた本システムの解析においても、北西－南東方向の伸張場は確認出来るため、プレート間地震の可能性は低いことが評価可能である。しかし、震源深さを 35km と推定しており、MT 解/CMT 解との差違が大きい。地震発生当時、最も近い観測点の震央距離は約 70km であった。遠方の観測点のみを使用する場合、構造モデルの精度に関わらず、震源深さの拘束力は弱くなる。本システムにおける初期震源には、1D 構造モデルによる震源深さ 32km が設定されていたが、拘束力が弱いためにこの値から大きく変更出来ず、適切な震源深さの推定に至らなかったと推察される。現在、紀伊半島南東沖には DONET が整備されており、比較的震央近くでの地震観測データが得られる状況になっている。今後、DONET データと本課題にて構築される高精細な 3D 構造モデルを用いることによって、震源深さ精度向上の程度を改めて調査する必要がある。

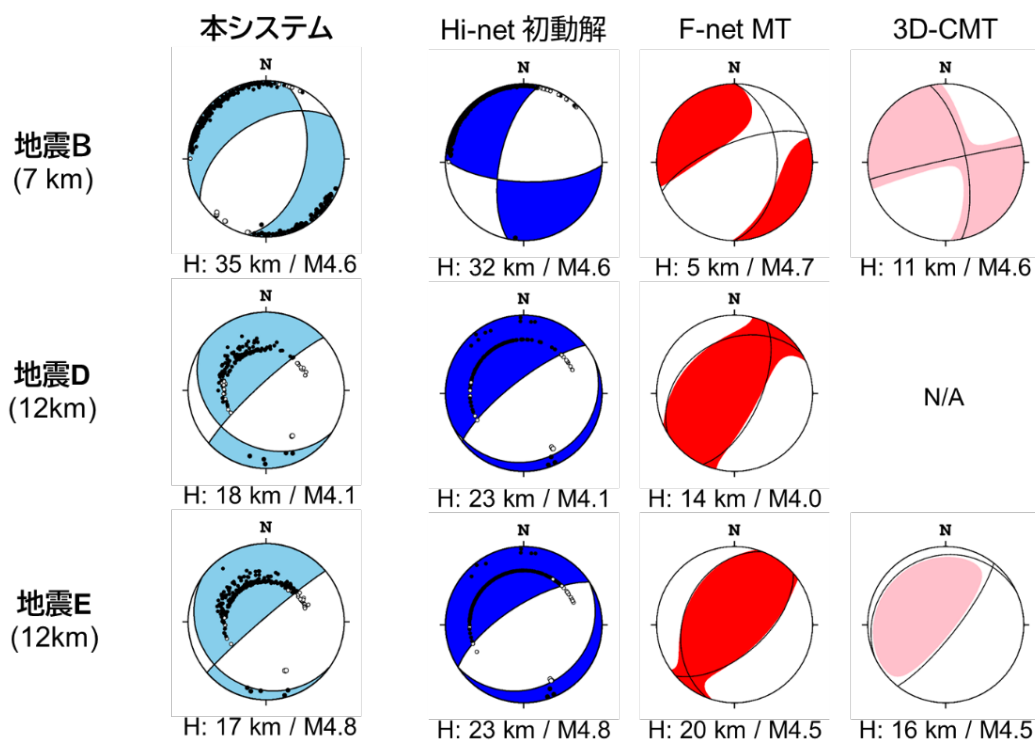


図 2-1-②-4 地震 B、D 及び E の本システムによる初動解。参考として、それぞれの地震における Hi-net 初動解、防災科研 F-net MT 解、3D-CMT 解⁷⁾を示す。地震名の下部には、それぞれの地震の震央付近におけるフィリピン海プレート上面深度¹⁰⁾を表す。なお、地震 D の 3D-CMT 解はカタログ⁷⁾に登録されていない。

以上から、震央近傍に観測点が存在する場合、プレート形状を考慮した 3D 構造モデルに基づいて波線経路を評価することで、初動解析からも現実的な発震機構解が推定可能であることが明らかになった。既に 3D-CMT 解析により南海トラフ域で信頼性の高い発震機構解を推定することが可能となっているが⁶⁾、3D-CMT 解析は初動解析に比べて計算コストが高いうえ、M4 程度以上の規模の地震しか安定した解の推定が出来ない。前節で構築中のより現実的な 3D 構造モデルを用いて震源位置及び発震機構解を計算し、3D-CMT 解のカタログと相補的に活用することで、より信頼性の高い地震発生場所の評価につながることを期待される。

2) 震源決定処理システム運用のための環境整備

前項で示した通り、今年度は初動解析による発震機構解推定を 3D 構造モデルに基づいて実施する機能を構築し、新たな VM 上で試験動作を開始した。この際、従来のトモグラフィ解析に基づく 3D 構造モデル⁴⁾に加え、本プロジェクトによる高精細化 3D 構造モデルが構築されるまでの評価用として JIVSM⁵⁾をグリッドフォーマットに変換したモデルを新たに採用し、両モデルによる処理を並行して実施出来る体制とした。

今後、高精細化 3D 構造モデルが完成した際、計算用モデルの入れ替えを行う。その際、過去のデータとリアルタイムで処理されるデータとの整合を取るため、新しいモデルを用いた震源再計算を実施し、保存する必要がある。大量の過去データの再計算を実施する環境として新たな VM を容易に立ち上げられるよう、上述の JIVSM 用の VM 立ち上げに際して、手順の簡易化ならびに明文化を行った。また、新たな計算を開始する前に、新しく導入したモデルが本システム用に正しく変換されていることを確認するため、構造モデルの簡易ビューを新たに作成した。図 2-1-②-2 に示した P 波速度構造断面図は、本ビューの出力の一例である。再計算にあたって、異なる構造モデルによる震源計算結果が混在することは避けなければならない。以前のモデルによる震源カタログが保存されている RDB に対し、古いデータの安全な退避あるいは削除を実行し、新たな計算に備えるためのツールの整備を行った。

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はなく、過去のデータについても同様の計算条件で震源位置を再計算し、長期の震源カタログを整備することで、地震活動の変化を連続的に評価できるようにすることを目指している。しかし、日々の震源分布図だけでは、地震活動の変化を定量的あるいは客観的に評価することは難しい。地震活動度の変化を評価するパラメータとして、従来、グーテンベルグ・リヒター則 (G-R 則) における b 値ならびに Z 値が多用されてきた。今年度は、これらのパラメータの導出方法についての資料収集を行うとともに、計算方法や設定すべき条件等についての検討に着手した。

G-R 則とは地震の規模別発生頻度がマグニチュードとともに指数関数的に減ることを表す法則であり、この指数を b 値と言う。 b 値は地震活動の性質を表す重要なパラメータの一つと考えられており、大地震発生前に有意に低下する事例が報告されている¹²⁾。通常、与えられた地震カタログに対して、全ての地震が検出されていると考えられる最

小マグニチュード M_c を設定し、それ以上の地震活動に対して最尤法等を適用することで b 値を推定する。 M_c の推定に関しては、 R 関数による評価方法¹¹⁾が広く用いられている。 R 関数は、ある M を最小マグニチュードとして最尤法により推定した b 値から導出される G-R 則と観測された規模別頻度分布の適合性を評価する関数である。小さな M から順番に評価を始め、初めて適合度が一定値、例えば 90% を超えた M を M_c とする。但し、この方法ではデータ数が多い、小さな M での適合度が結果に強く影響を与える。小さい M の地震は、検知能力の限界のために全ての地震が把握されていないことが多く、そのような場合、 b 値の過小評価に繋がることが指摘されている¹³⁾。これに対し、明田川 (2018) は規模別頻度分布の直線性が成り立つ範囲をより強く意識した M_c の評価方法を提案した¹³⁾。この方法では、カタログに掲載されている地震数を M に対して 0.1 ごとに計数し、その個数が最大となる M (M_p) と、積算個数が初めて 10 個以上になる M (M_{10}) 間の積算度数の常用対数に最小自乗法を当てはめ、 M_p から M の大きい方にみたときに、積算度数が最小自乗直線よりも初めて上になるところを M_c とする。一般的に R 関数によって求めた M_c の方が M_p に基づいて推定される M_c よりも小さくなる傾向がある。地震活動は必ずしも G-R 則の直線性を担保するとは限らず、地震数が十分でない場合等には上に凸の形状を示すことが多い。このような場合、推定される b 値は M_c に依存する。本課題では、両方の M_c 評価方法を実装し、結果への影響を比較できるようにシステム化を行う。

Z 値は、ある期間の地震活動度について、参照とする期間の地震活動と対比して示す値であり、地震活動の静穏化や活発化を定量化するパラメータとして活用されている。 Z 値も文献により、異なる定式化が行われている。Habermann (1983) は、解析対象期間中のある時間 t を設定し、 t 以前とそれ以降の期間の活動度の差分を計算することにより地震活動度の変化点を探る方法を提案した¹⁴⁾。但し、この方法では、複数回の活動度変化を検出することが難しいことから、全期間に対する評価期間の活動度の差分を計算する手法¹⁵⁾や、全期間から評価期間を除いたデータと評価期間の活動度の差分を計算する方法¹⁶⁾が提案されている。これまでそれぞれの解析方法の特徴や差違についての詳細な議論は十分になされていないため、これらの 3 通りの計算方法を実装し、計算結果の比較検討を実施出来るようにする。

b 値、 Z 値とも、ある評価期間での空間分布の他、ある地点での時系列的な変化を計算し、ウェブブラウザ上で閲覧可能なシステムとする。空間分布を地図上に表示する際には、各地点で評価する地震データの距離範囲(半径)や計算を実行する最小地震数を、時系列表示の場合は解析対象とするウィンドウ幅や解析に用いる地震数等をユーザが調整可能なパラメータとして設定出来るような仕組みを導入する。

(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逐次的かつ適確に把握するためには、より現実的に即した三次元の地震波速度構造を用い、自動的に震源位置や発震機構解の推定を行う必要がある。本年度は、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、初動解析により発震機構解を計算する機能を新たに追加し、実装した。また、海域で発生する地震に対する 3D 構造

モデルの効果を評価するため、全国 1 次地下構造モデルに基づいて自動震源計算を行う VM を新たに立ち上げ、震源位置並びに発震機構の決定状況について調査、検討を行った。1 D 構造モデルを用いた初動解析では震源深さ及び発震機構解ともに正しい結果が得られなかった海域の地震について、3 D 構造モデルを用いた計算を実施したところ、1 D 構造モデルによる結果に比べて、ほぼ全ての地震において震源深さが浅くなり、CMT 解析の結果に近づいた。また、一部の地震では、3 D 構造モデルによる初動解は CMT 解に類似する方向に変化した。本試験運用を実施するにあたって、震源計算用に変換した構造を可視化するツールやデータベースに登録されたデータの安全な対比や削除を行うためのツールを整備した。さらに、次年度以降に構築する地震活動可視化のためのシステムに向けて、地震活動評価のためのパラメータ推定手法に関する文献収集を行うとともに、システムの基本的な機能についての検討を行った。

一方、海域で発生した地震に対する震源決定並びに発震機構の解析において、概略的な 3 D 構造モデルでは、トラフ軸付近の地震活動に対して震源深さに改善が見られない事例があることを確認した。これは、沖合の構造モデルの精度が十分ではないこと、地震発生当時は震源近傍に運用中の地震観測点が無かったこと等が理由と考えられる。現在は、紀伊半島沖から室戸沖に DONET が整備されており、この海域での観測は充実した。今後、当該地域で顕著な地震が発生した際に、現在の観測データを高精細化した 3 D 構造モデルを用いて処理することで、この問題が解消されるのか検証する必要がある。地震活動変化の可視化については、システム化に向けて検討に着手したところであるが、地震活動の一般的な指標である b 値や Z 値であっても、文献によって計算式や計算条件が異なる。南海トラフの海域は、日本海溝周辺等と比べて普段の地震活動が低調な地域である。 b 値や Z 値によって地震活動の時空間的な変化を最適な分解能で表すための計算パラメータのチューニングは必須であるとともに、条件によってはパラメータを変えながら解の安定度あるいは不確定性を評価することも今後の検討課題となりうる。

(d) 引用文献

- 1) Mori, J. and Abercrombie, R. E.: Depth dependence of earthquake frequency magnitude distributions in California: Implications for rupture initiation, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 102, 15081-15090, doi: 10.1029/97JB01356, 1997.
- 2) Schorlemmer, D., Wiemer, S., and Wyss, M.: Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes, *Nature*, 437, 539-542, doi: 10.1038/nature04094, 2005.
- 3) Takemura, S., Shiomi, K., Kimura, T., and Saito, T.: Systematic difference between first-motion and waveform-inversion solutions for shallow offshore earthquakes due to a low-angle dipping slab, *Earth Planets Space*, 68:149, doi: 10.1186/s40623-016-0527-9, 2016.
- 4) 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.
- 5) 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 2023-3-31) , 2012.
 - 6) 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.
 - 7) Takemura, S., Okuwaki, R., Kubota, T., Shiomi, K., Kimura, T., and Noda, A.: 3D CMT catalogue of moderate size offshore earthquakes along the Nankai Trough, doi: 10.5281/zenodo.4412026, 2021.
 - 8) 地震調査研究推進本部 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 2023-03-31) .
 - 9) 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 2023-03-31) .
 - 10) 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.
 - 11) Wiemer, S. and Wyss, M.: Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 90, 859-869, doi: 10.1785/0119990114, 2000.
 - 12) Nanjo, K. Z., Hirata, N., Obara, K., and Kasahara, K.: Decade-scale decrease in *b* value prior to the *M*₉-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, Geophys. Res. Lett., 39, L20304, doi: 10.1029/2012GL052997, 2012.
 - 13) 明田川保: X Windows System を用いた地震検索・地震活動解析プログラム (REASA) の開発 (その 2) , 験震時報, 82, 1-15, 2018.
 - 14) Habermann, R. E.: Teleseismic detection in the Aleutian Islands arc, J. Geophys. Res., 88, 5056-5064, doi: 10.1029/JB088iB06p05056, 1983.
 - 15) Habermann, R. E.: Seismicity rate variations and systematic changes in magnitudes in teleseismic catalogs, Tectonophys., 193, 277-289, doi:10.1016/0040-1951(91)90337-R, 1991.

- 16) Katsumata, K.: Precursory seismic quiescence before the $M_w = 8.3$ Tokachi -
 oki, Japan, earthquake on 26 September 2003 revealed by a re - examined
 earthquake catalog, J. Geophys. Res., 116, B10307, doi:
 10.1029/2010JB007964, 2011.

(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
三次元地震波速度構造を用いた自動震源決定システムの構築～南海トラフ周辺を対象として（ポスター）	汐見 勝彦 松原 誠 関口 渉次	日本地震学会2022 年度秋季大会	2022.10	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