

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	グループリーダー	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
	副主任研究員	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值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：

熊野灘周辺の3D構造モデルの検証や更新を実施しつつ、解析対象を紀伊水道域へ拡張するとともに、観測点補正值を3D構造モデルに反映する。熊野灘周辺の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層の評価手法の検討を行う。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。

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、地震発生層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3年度業務目的

熊野灘周辺の最新の構造研究成果を統合することで、海陸統合高精細マルチパラメータ3D構造モデルの構築を進める。また、前年度に引き続き DONET の観測点直下の堆積層構造解析を実施する。前年度構築した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開始し、震源計算結果等の評価を進める。並行して、震源計算に用いる3D構造モデル等の計算パラメータを効率的に更新する仕組みを構築する。

(2) 令和 3 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

南海トラフ域におけるマルチパラメータ 3 D 構造モデルの高精細化のため、これまで未活用だった研究成果に基づく速度構造情報を新たに取り込むことで、熊野灘周辺の三次元 P 波速度構造モデルの高精細化を進めた。さらに、令和 2 年度に取りまとめたマルチパラメータ化手法を適用することで、熊野灘周辺の高精細マルチパラメータ 3 D 構造モデルの構築も進めた。南海トラフ全域を対象とする他のサブ課題等との連携を進めるため、高精細化されていない既存の広域三次元 P 波速度構造モデル¹⁾に同様のマルチパラメータ化手法を適用することで、南海トラフ全域のマルチパラメータ 3 D 構造モデルを構築した。この全域モデルをもとに、他のサブ課題等とのモデル共有について議論を開始した。令和 2 年度に引き続き、既存構造探査データを新しいアプローチで解析することで、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

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、先行の「東海・東南海・南海地震の連動性評価プロジェクト」²⁾で実施された主に 2 D 屈折法地震探査の成果に基づき、「南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト」³⁾で取りまとめられたプレート形状を含む既存三次元 P 波速度構造モデル¹⁾に、昨年度、収集・整理した「海域における断層情報総合評価プロジェクト」⁴⁾で収集された反射法地震探査の成果、加えて既存の調査観測研究の成果や新たに発表された研究成果を統合し、熊野灘周辺を中心に三次元 P 波速度構造モデルを更新した。さらに、令和 2 年度に取りまとめたマルチパラメータ化手法を適用することで、熊野灘周辺の三次元 S 波速度構造モデルを作成した（図 2-1-①-1）。

他のサブ課題との連携を進めるため、高精細化されていない既存三次元 P 波速度構造モデル¹⁾に上述のマルチパラメータ化手法を適用し、それぞれ三次元の S 波速度構造及び密度構造モデルを先行して作成した（図 2-1-①-2）。これについては後述する。

作成したマルチパラメータ化モデル（S 波速度、密度）は、経験式に基づいて P 波速度構造から変換したものであり、変換式自体を含め今後も修正が必要である。これらを修正するためには、まず、経験式に基づいて変換した構造モデルと実際の構造を比較し、検証する必要がある。今年度、従来から行われている検証方法に従い、変換式により作成した 3 D 構造モデルから計算される数値データと観測データを比較して評価することを想定し、検証のために必要な作業環境の整備を進めた。具体的には、2 D 地震探査測線に沿った観測データと数値データを比較するために、作成した 3 D 構造モデルから測線に沿った 2 D 速度構造情報を抽出する作業手順のフロー化やツールの整備、及びモデル領域の観測重力異常と比較するため、密度の 3 D 構造モデルから重力異常を計算するツールの整備を Schlumberger 社製の地震探査データ等解析・可視化ソフトウェアである Petrel などを用いて進めた。

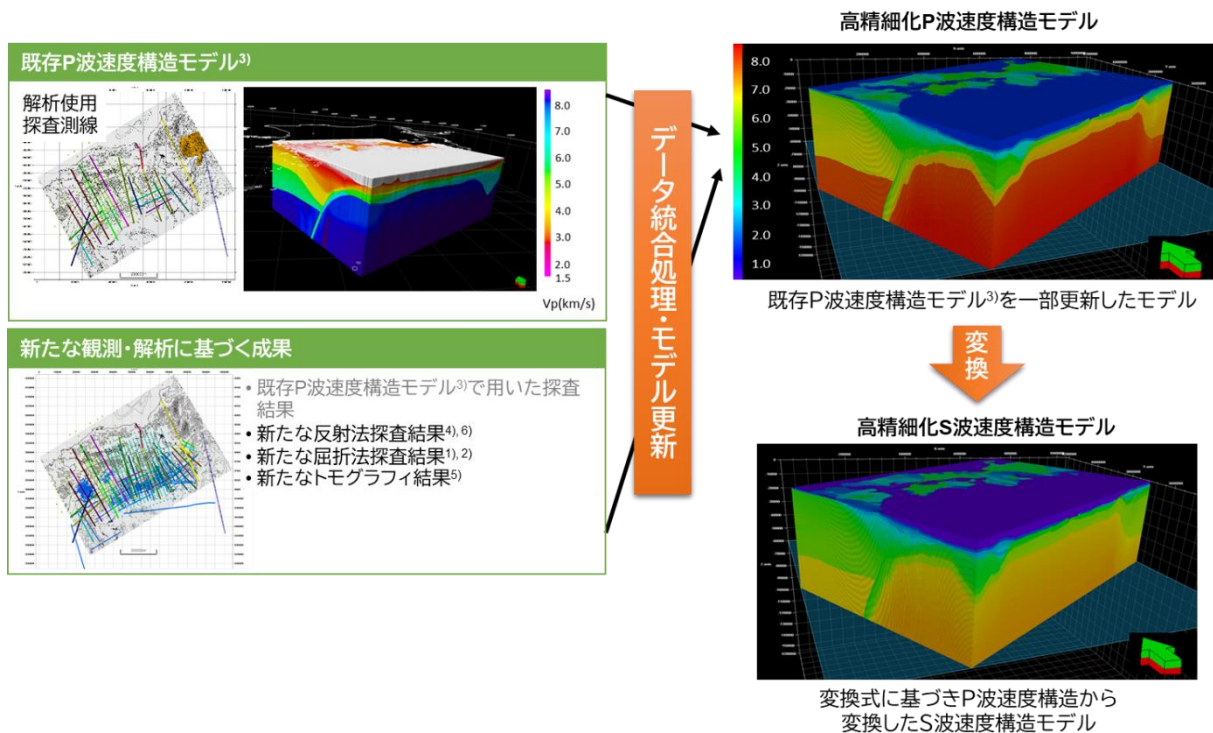


図 2-1-①-1 既存 P 波速度構造モデル¹⁾ (左上) に新たな観測・解析に基づく成果 (左下) を追加し、熊野灘周辺を中心に P 波速度構造モデルを更新するとともに (右上)、変換式に基づき P 波速度構造から S 波速度構造モデル (右下) を構築した。

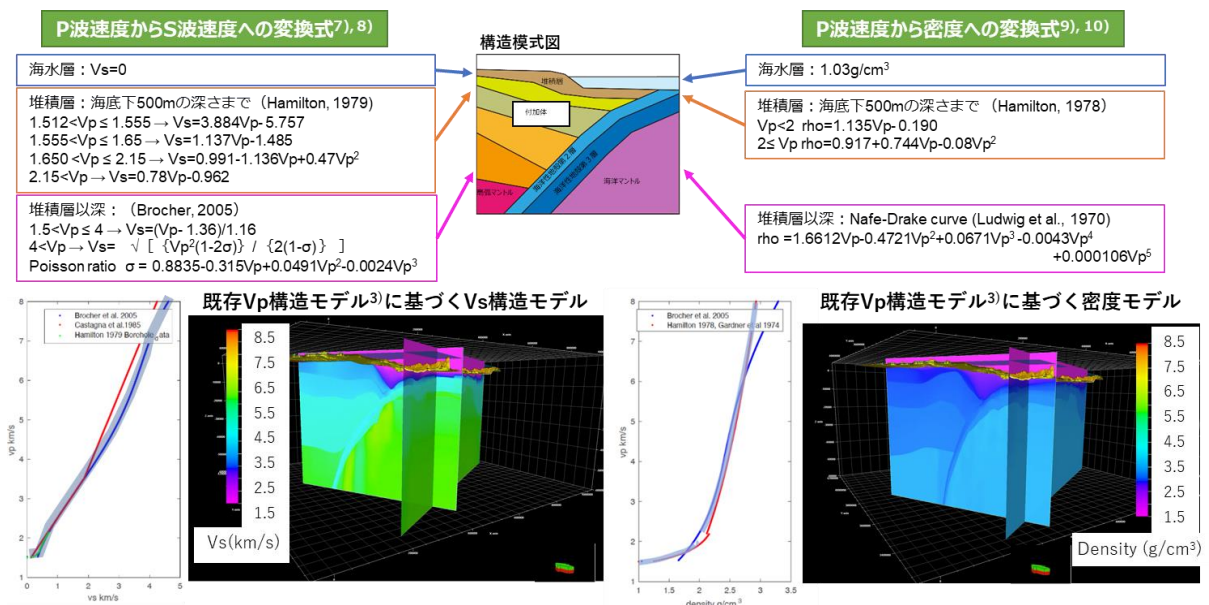


図 2-1-①-2 令和 2 年度にとりまとめた P 波速度から S 波速度と密度への変換式と、既存 P 波速度構造モデル¹⁾への適用結果

2) 3D構造モデル統合方針の検討

構造モデルは、震源決定のほか、滑り分布の推定や地震動の計算など様々な場面で活用されている。しかし、現状は、研究者や研究機関、あるいは活用用途や研究課題ごとに使用するモデルが異なり、使用したモデルによって震源位置や滑り分布の推定にばらつきが存在する。そのため、例えば、2016年4月1日の三重県南東沖の地震(M6.5)について各研究機関が報告した震源位置のばらつきが大きく、当該地震がプレート境界型であったか否かの判断に時間を要したことや¹¹⁾、同じ地殻変動観測データに基づくプレート間固着強度分布であっても構造モデルの違いに応じて推定結果が異なる^{12), 13)}といった問題が生じている。これらの問題の解決には、構造モデル情報を研究機関や活用用途の垣根を越えて共有化する取り組みが必要であるが、これまで十分に行われてきたとは言い難い。

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、サブ1課題で震源決定や滑り分布の推定・推移予測に活用し、サブ2課題の地震防災基盤シミュレータにおける強震動、長周期地震動計算や津波評価でも活用することを念頭においているほか、地震本部等での地震動予測等でも活用されることを目指している。このため、構造モデル情報の効果的な共有方針を確立し、それに沿って構造モデル情報を整備することが必要である。

そこで、今年度は構造モデル情報の共有化方法やデータ仕様、モデル構築、活用方法などを検討するために、本プロジェクトの他サブ課題関係者や地震本部の構造モデル構築に関係する委員と月1回程度の意見交換を重ねた。この検討に既存の三次元P波速度構造モデル¹⁾と現状の変換式に基づき作成した暫定的なマルチパラメータモデルを活用した。検討はまだ初期段階ではあるが、地震本部の取り組みや他のサブ課題に効果的に貢献するためには、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を整備し、その発展形として様々な用途に活用できる新たな海陸統合モデルを作成することが望ましいという認識を共有した(図2-1-①-3)。これを受け、本プロジェクトにおいては、マルチスケール地下構造情報共通基盤への円滑な活用を見据えたモデル構築を目指すこととした。

この構造モデル情報共有の取り組みや将来の課題等について、2021年12月と2022年2月に地震本部の委員会では話題提供を行った。

3D構造モデルの共有及び統合方針の検討状況

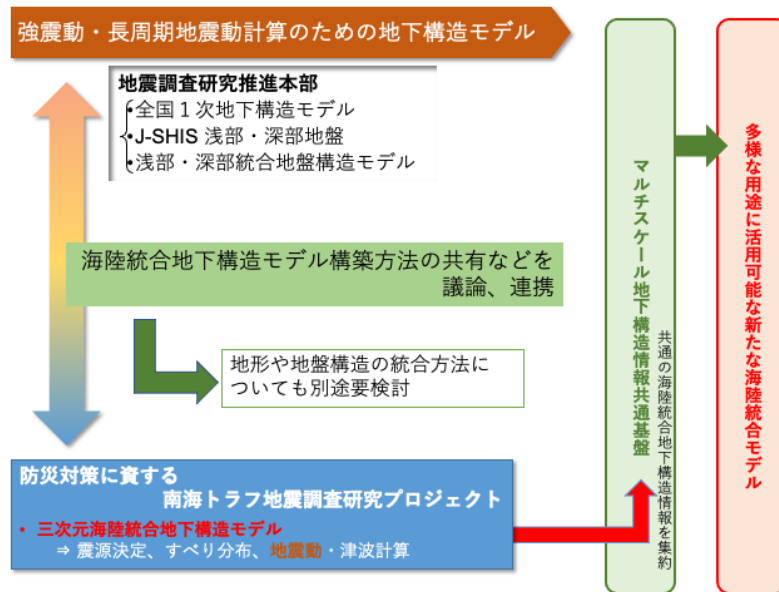


図 2-1-①-3 3D構造モデルの共有及び統合方針の検討状況

3) 浅部堆積層構造の推定方法の検討

震源決定の高精度化に重要な観測点補正値を求めるため、構造探査データを用いた DONET 観測点直下の堆積層内の P 波及び S 波速度構造推定方法について、その有効性や限界、最適な適用方法などについて、前年度に引き続き検討を進めた。

過去に実施された多数の地震波反射法探査によって、DONET 海域の堆積層内地震波反射構造（P 波反射面分布と P 波速度）の詳細は広範囲で明らかになっている。ここでは、この堆積層内地震波反射構造と DONET 観測点で観測した構造探査データから、堆積層内で P 波から S 波に変換された信号（PS 変換波）を抽出、解析することで、堆積層内の S 波速度構造を推定することを目指している。令和 2 年度に潮岬沖の DONET 観測点で PS 変換波による地下構造解析を行ったところ、観測点直下の堆積層内には多数の PS 変換面があることが確認できた。しかし、PS 変換面と P 波反射面の関連づけが容易ではなく、S 波速度の見積もりには大きな不確定性が残ってしまうことが分かった。S 波速度の推定精度を向上させるためには、PS 変換波がどの P 波反射面で生じているのかを確からしく推定する必要がある。

今年度は、DONET 観測点に加えて DONET 近傍で実施された稠密 OBS（自己浮上式海底地震計）を用いた地震探査データにも同様の解析を施すことによって、PS 変換面分布を空間的にマッピングし、P 波反射面分布との相関から変換面・反射面同定の信頼性を高めた（図 2-1-①-4）。その結果、比較的陸域に近い水深 1500m～2000m 程度の海域では、海底下 500m 程度までの浅層の V_p/V_s が 4～5 程度と推定された。一方、トラフ軸近傍では有意に大きな V_p/V_s を示すなど浅層の V_p/V_s には地域性があることも分かってきた。今後、このような地域性に注意しつつ、推定した S 波速度構造情報を 3D マルチパラメータ構造モデルに反映していく。

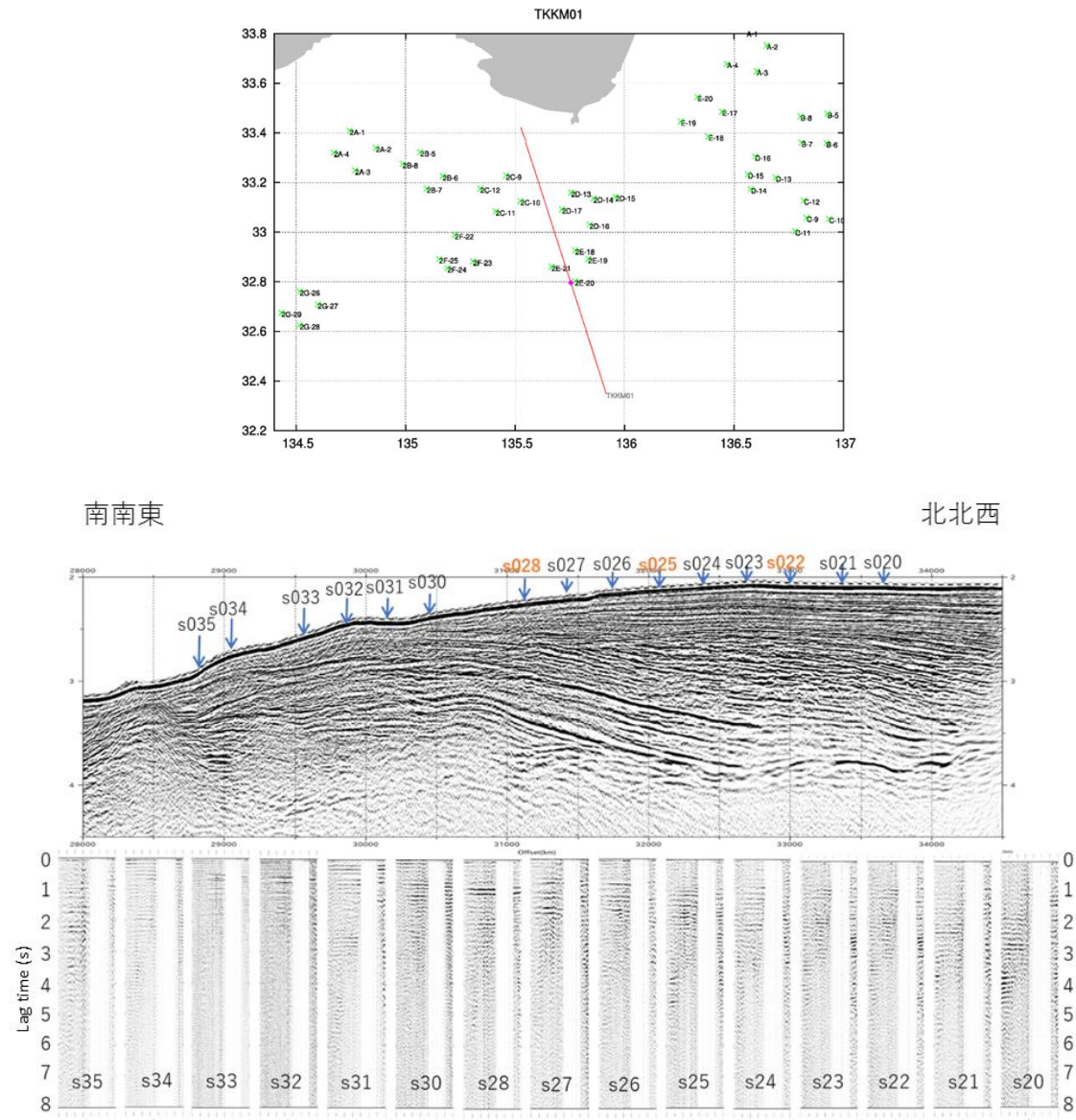


図 2-1-①-4 上) 解析に使用した DONET 近傍の地震探査測線 (赤)。中) 上図の測線に沿った反射法地震探査記録断面。矢印は測線上に設置した OBS の位置を示す。下) 上で示した海底地震計のレーシーバ関数 (PS 変換面分布)。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ域を対象としたマルチパラメータ 3D 構造モデルの高精細化のため、これまで未活用だった熊野灘周辺の構造探査成果等を既存の三次元 P 波速度構造モデル¹⁾に取り込み、熊野灘周辺の 3D 構造モデルの高精細化を進めた。ただし、異なる空間解像度の構造モデルを統合した場合の信頼性や誤差の評価に関しては、今後も引き続き検討を進める必要がある。

マルチパラメータ 3D 構造モデルの構築にあたっては、現状では主に P 波速度から変換式 (経験則) を用いて他のパラメータ (S 波速度、密度) へ変換することで進めている。今後は、実データに基づき独立に求めた S 波速度構造情報などの新たな知見や、変換式により作成したマルチパラメータ 3D 構造モデルで計算した数値データと観測デ

ータの際から、変換式の改良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開始した。本プロジェクトにおいては、マルチスケール地下構造情報共通基盤への円滑な活用を見据えたモデル構築を目指す方針であるが、現時点で問題認識と情報の整理と共有が十分とは言えない。引き続き構造モデル関係者への情報共有を進めつつ、具体的に、本研究プロジェクトが終了した後も効率的にモデル統合を進めていくための体制整備やそのための取り組みについても配慮しながら、本研究プロジェクトで構築するモデルについて議論を詰めていく必要がある。

震源位置ならびに震源断層推定の高精度化に重要な堆積層内の詳細な S 波速度構造の推定を目指し、DONET 観測点周辺の稠密 OBS 構造探査データを用いた解析を行い、堆積層浅部の S 波速度を推定した。ただし、堆積層浅部の S 波速度には OBS 構造探査測線に沿って顕著な地域性を示す傾向も確認された。今後、DONET 観測点における観測点補正值の確からしさを向上させるために、今年度解析した測線のトラフ軸側を対象としたより広範囲の OBS 構造探査データを用いた解析を進めることが不可欠である。

(d) 引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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：南海トラフ広域地震防災研究プロジェクト 令和元年度 成果報告書 令和 2 年 5 月, 1–655, 2020.
- 4) 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 平成 31 年度（令和元年度）成果報告書 令和 2 年 5 月, 1–385, 2020.
- 5) Yamamoto, Y., T. Takahashi, Y. Kaiho, K. Obana, A. Nakanishi, S. Kodaira, and Y. Kaneda: Seismic structure off the Kii Peninsula, Japan, deduced from passive- and active-source seismographic data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 461, 163–175, doi: 10.1016/j.epsl.2017.01.003, 2017.
- 6) 中村 恭之・海宝 由佳・野 徹雄・白石 和也・藤江 剛・小平 秀一・木村 学・尾鼻 浩一郎・三浦 誠一・仲西 理子：潮岬－足摺岬沖南海トラフにおける稠密反射法探査による構造マッピング, 日本地震学会 2021 年秋季大会, S06P-05, 2021.
- 7) Hamilton, E. L.: V_p/V_s and Poisson’s ratios in marine sediments and rocks, *J. Acoust. Soc. Am.*, 66, 1093, doi: 10.1121/1.383344, 1979.
- 8) Brocher, T.M.: Empirical relations between elastic wavespeeds and density

- in the Earth' s crust, Bull. Seism. Soc. Am., 95, 2081-2092, doi: 10.1785/0120050077, 2005.
- 9) Hamilton, E. L.: Sound velocity-density relations in sea-floor sediments and rocks, J. Acoust. Soc. Am., 63, 366, doi: 10.1121/1.381747, 1978.
- 10) Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake: Seismic refraction, in The Sea, A. E. Maxwell (Editor), Vol. 4, Wiley-Interscience, New York, 53-84, 1970.
- 11) 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, 1-48, <https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_04.pdf>, (参照 2022-3-31), 2016.
- 12) Hashmoto, C. E. Fukuyama, T. Terakawa, T. Sagiya, K. Nakajima, T. Sato, and M. Matsu'ura: Development of a Predictive Simulation System for Crustal Activities in and around Japan - VIII, Annual Report of the Earth Simulator Center April 2010-March 2011, 89-93, 2011.
- 13) Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada: Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, Nature, 534, 374-377, doi: 10.1038/nature17632, 2016.

(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
Constructing a 3D seismic S-wave velocity model of the Nankai Trough（ポスター）	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	日本地球惑星科学連合2021年大会	2021年6月	国内
潮岬-足摺岬沖南海トラフにおける稠密反射法探査による構造マッピング（ポスター）	中村 恭之・海宝 由佳・野 徹雄・白石 和也・藤江 剛・小平 秀一・木村 学・尾鼻 浩一郎・三浦 誠一・仲西 理子	日本地震学会 2021 年秋季大会	2021年10月	国内
南海トラフ域の3次元地震波速度・密度構造の構築（口頭）	仲西 理子・Qin Yanfang・Liu Xin・藤江 剛・汐見 勝彦・小平	日本地震学会 2021 年秋季大会	2021年10月	国内

	秀一・高橋 成 実・中村 武史・ 富士原 敏也			
Unsupervised data mining applied to marine active-source seismic data from a linear OBS array in Nankai Trough (口頭)	Liu Xin・仲西 理 子・藤江 剛・利 根川 貴志・尾鼻 浩一郎・小平 秀 一	American Geophysical Union 2021 Fall meeting	2021年12 月	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
Upper-plate controls on subduction zone geometry, hydration and earthquake behaviour	Adrien F. Arnulf, Dan Bassett, Alistair J. Harding, 小平秀一, 仲西理子, Gregory Moore	Nature Geoscience	2022年2 月	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

昨年度構築した自動震源決定処理システムの仮運用を行うとともに、震源計算に用いる3D構造モデルや様々な計算パラメータを更新し、計算処理に反映するためのツール、アーカイブされたデータを対象とした震源再計算ツール等の整備を進めた。2022年1月22日に日向灘北部で発生した地震ならびにその余震活動を対象として、震源決定処理システムによる結果の確認及び評価を行った。さらに、3D構造モデルの走時計算に、複雑な3D構造モデルにも適用可能な最短経路法を採用することの利点等について検討に着手した。

(b) 業務の成果

1) 震源決定処理システム運用のための環境整備

南海トラフ周辺のように、複雑な地下構造が想定されている場所で発生する地震の震源位置を正確に知るためには、詳細かつ高精度な 3D 構造モデルを用いる必要がある。本研究課題で構築した震源決定処理システム（以下、本システム）では、2021 年 3 月、サーバ上に 3 つの仮想マシン（Virtual Machine, VM）を設定し、各 VM 上で異なる震源計算プログラムの試験稼働を開始した。本システムの概略構成図を図 2-1-②-1 に示す。サブシステム 1 では、与えられた 3D 構造モデルに対して、pseudo-bending 法¹⁾により波線経路ならびに走時の計算を逐次行う方法を採用した。サブシステム 2 では、あらかじめ仮想震源と観測点間の走時を計算した走時表を整備しておき、震源位置を探索する際にはその情報を活用することで計算時間の短縮を行う方法²⁾を用いた。サブシステム 3 には、NonLinLoc と呼ばれる震源決定のためのソフトウェアパッケージ³⁾を採用した。

本研究課題では、並行して実施している高精細マルチパラメータ 3D 構造モデル構築の進展に伴い、最新の 3D 構造モデルを本システムに適切なタイミングで反映しながら運用を行うことを計画している。各サブシステム上で必要とされる 3D 構造モデルあるいは走時表のフォーマットはそれぞれ異なる。そのため、新たな 3D 構造モデルを用いた震源計算処理を行うためには、都度、各サブシステムで使用可能な形式に変換し、配布する作業を実施しなくてはならない。そこで、今年度、3D 構造モデルを更新する際に、各サブシステム向けのフォーマット変換や走時表作成を一定の手順で行い、その出力結果を各サブシステムに適切に配布するツールの開発を進めた。なお、高精細マルチパラメータ 3D 構造モデル構築にあたって実施しているサブ課題間の意見交換において、地殻変動研究等の他用途では全国 1 次地下構造モデル（Japan Integrated Velocity Structure Model, JIVSM）⁴⁾で採用されている層構造フォーマットを標準としている事例があることが明らかになった。本システムで用いているマルチパラメータ 3D 構造モデルは、適切な間隔に設定された格子点（グリッドポイント）上に地震波速度等の情報が配置されたグリッドデータ形式である。JIVSM で採用されているフォーマットで定義された 3D 構造モデルを用いた震源計算を実施する場合は、上記ツールにおいて、一旦グリッドデータ形式に変換し、グリッドデータから構造モデルの変換等を行うこととした。

震源位置の推定結果は、構造モデルのほか、様々な計算パラメータ、例えば、計算に用いる検測位相の重みや観測点ごとの補正值、地球半径などの影響を受ける。自動震源計算処理に用いる構造モデルや計算パラメータを変更する場合、過去の震源位置についても、同じ構造モデルならびに同じ計算パラメータで再計算しておかないと、両者を直接比較することは出来ない。今年度は、各 VM で稼働している自動震源計算処理で使用している構造モデル（または、走時表）ファイルならびに計算パラメータを確認するためのツールを構築した。さらに、それらと同じ構造モデル（または、走時表）や計算パラメータを用いて、過去に発生した地震の震源再計算を容易に実行するためのツールも構築した。再計算前後の結果の評価を効率的に実施するため、再計算結果は自動処理と異

なるフラグを付与した状態でデータベースに保存可能とした。

昨年度、本システムを稼働させるためのオペレーティング・システム（OS）として CentOS8.2 を採用した。しかし、システム構築着手後の 2020 年 12 月、当該 OS のサポート終了が 2021 年末までに大幅に短縮されることが発表された。システムを安定稼働させるためには、サポートが終了した OS の継続使用を避けなくてはならない。そのため、システム OS の Rocky Linux 8.5 への更新ならびに新 OS 上での安定動作の確認も併せて行った。OS 選択にあたっては、サポート期間が十分に長いことに加え、構築済みシステムの改修や検証のための工程が極力抑制出来ることを条件とした。

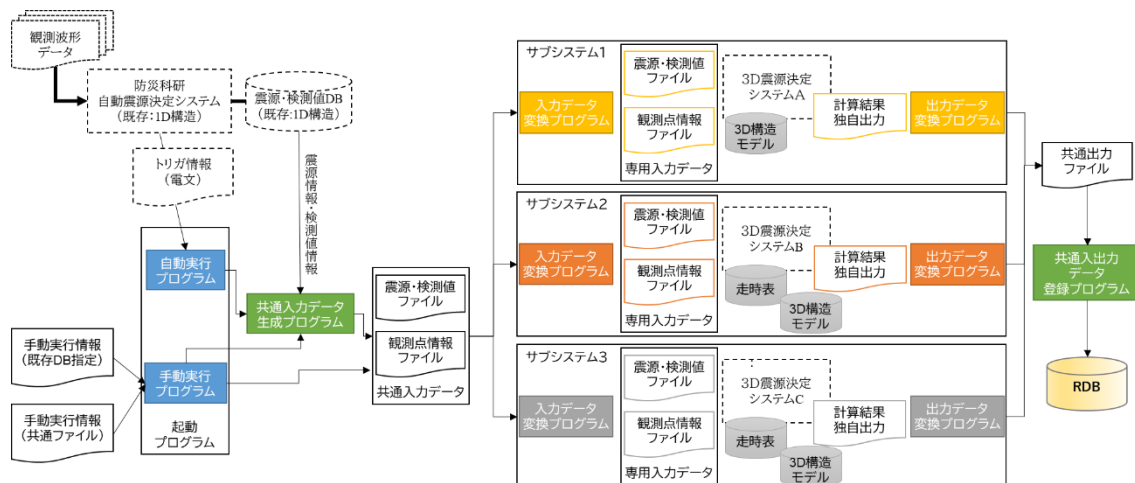


図 2-1-②-1 3D構造モデルを用いた自動震源決定処理システムの概略構成図。本研究で新たに構築した部分を実線枠で、本システムと連携する既存システムなどは破線枠で示した。

2) 自動震源決定システム処理結果の確認と評価

2022 年 1 月 22 日 1 時 8 分頃、日向灘を震源とする気象庁マグニチュード (M_J) 6.6 の地震が発生した。この地震は、地震調査委員会において、沈み込むフィリピン海プレート内で発生した地震として評価がなされている⁵⁾。本システム稼働後に、南海トラフ海域で初めて発生したマグニチュード 6 を超える地震であり、活発な余震活動を伴ったことから、この地震活動を対象として本システムの処理結果の確認を行った。なお、ここでは、pseudo-bending 法¹⁾により波線経路ならびに走時の計算を逐次行う方法（サブシステム 1）の結果を参照する。解析には、地震波走時トモグラフィ解析によって求められた、日本周辺海域を含めた 3D 構造モデル⁶⁾を用いた。

図 2-1-②-2 及び表 2-1-②-1 に、2022 年 1 月 22 日 1 時 8 分頃に発生した地震（以下、本震）の震源計算結果を示す。図 2-1-②-2 において、本システムの結果を赤星印で示すとともに、参考として 1D 構造モデルに基づく防災科研 Hi-net による震源計算結果（黒星印）と気象庁一元化震源計算結果（青星印）を併せて示した。また、Nakanishi et al. (2018) によるフィリピン海プレート上面位置⁷⁾を破線で示した。ここで、本システムの震源計算には、防災科研 Hi-net による震源と同じ検測値情報を用いている。本システムの震源計算結果は、他のカタログと同様にフィリピン海プレ

ート上面より有意に深く、沈み込むプレート内で発生した地震という地震本部の評価と矛盾しない。本システムによる震央位置は、1 D 構造モデルに基づく震源カタログと大きな違いは見られないが、断面図からは、3 D 構造モデルを用いた本システムによる結果が他の結果よりわずかに浅く、北西側（陸側）に移動したことが分かる。図 2-1-②-3 に、本システムでの震源計算に用いた P 波速度構造のパターベーション（平均値からのゆらぎ）を示す。図中、本震のおおよその震源位置を黒楕円で示した。海域の A 側から陸域の B 側に向かって深くなる高速度異常領域として、沈み込むフィリピン海プレートがイメージされており、本震の震源はこの高速度異常域の上端付近に位置している。一方、この地域の地震観測点は陸域にのみ配置されている。震源と陸域の間には、暖色系で表された低速度異常を示す領域が存在する。これは、当該間の地震波走時が平均値よりも時間を要することを表しており、逆に平均的な 1 D 構造モデルを用いると、震源を深く決めてしまうことを意味する。3 D 構造モデルを用いて、このような構造異常による走時の変化を評価することにより、1 D 構造モデルを用いた震源計算結果よりも、震央位置はわずかに浅く、また陸域に近づく方向（北西方向）に移動したと考えられる。

この地震は、活発な余震活動を伴った。本震周辺で 2022 年 2 月末までに発生した地震について、本システムにおいて 3 D 構造モデルを用いた震源再決定を行った結果を図 2-1-②-4 (a) に示す。図中、M4.5 以上の地震を赤点で、M1.5 以上の地震の位置を黒点で示した。また、2012 年 1 月から本震発生前までの 10 年間に検知した M1.5 以上の地震について、灰色の点で示した。なお、本システムにおける自動処理は、2021 年 3 月に試験稼働を開始した。試験稼働開始以前の震源カタログについては、本年度構築した震源位置再計算ツールを用いて、震源の再決定を行った。

灰色の点で示された過去の地震活動から、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う厚さ 7~8 km 程度の地震発生層が存在することを確認出来る。黒点ないし赤点で示された今回の地震活動は、ほぼこの発生層内で鉛直に分布している。今回の震源計算に用いた 3 D 構造モデル⁶⁾と図に青線で示したフィリピン海プレート上面形状モデル⁷⁾は異なるデータに基づくため、両者を詳細に比較することは難しいが、余震分布の上端はフィリピン海プレート上面に近接していたことが分かる。比較のため、図 2-1-②-4 (b) 及び (c) に 1 D 構造モデルによる防災科研 Hi-net カタログ、気象庁一元化震源カタログの結果をそれぞれ示した。マグニチュード計算方法が異なるため表示されている地震数に違いがあるが、(b) と (c) で震源分布の傾向に大きな差はない。フィリピン海プレート沈み込みに伴う地震発生層は 10~15 km 程度と (a) よりも厚くなっている。これは、3 D 構造モデルを用いた (a) の方が正しい震源位置に集中して求まっているためと考えられる。また、(b) や (c) で求められた今回の地震活動の上端は (a) よりもやや深く、フィリピン海プレート上面との間にわずかな空隙が確認出来る。

以上から、本システムにおいて 3 D 構造モデルを用いることにより、従来の 1 D 構造モデルを用いた震源計算よりも、深さ方向に締まった震源分布が得られており、震源決定精度が改善されていると判断可能である。

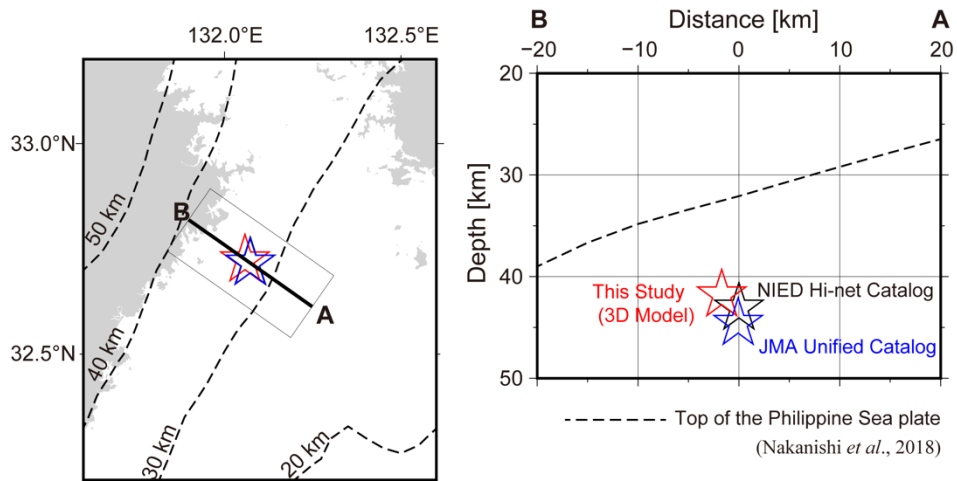


図 2-1-②-2 2022 年 1 月 22 日 1 時 8 分頃に発生した日向灘の地震の震源計算結果。地図上 A-B 測線の断面図を右側に示す。赤星、黒星、青星はそれぞれ本システムの結果、防災科研 Hi-net の結果、気象庁一元化震源の結果を表す。破線は、フィリピン海プレートの上端位置⁷⁾を表す。

表 2-1-②-1 2022 年 1 月 22 日 1 時 8 分頃に発生した日向灘の地震の震源計算結果

	震源位置			M
	緯度 [°N]	経度 [°E]	深さ [km]	
本システム処理結果	32.724	132.058	41.8	6.7
防災科研 Hi-net カタログ	32.717	132.074	43.1	6.7
気象庁一元化震源	32.716	132.072	44.6	6.6

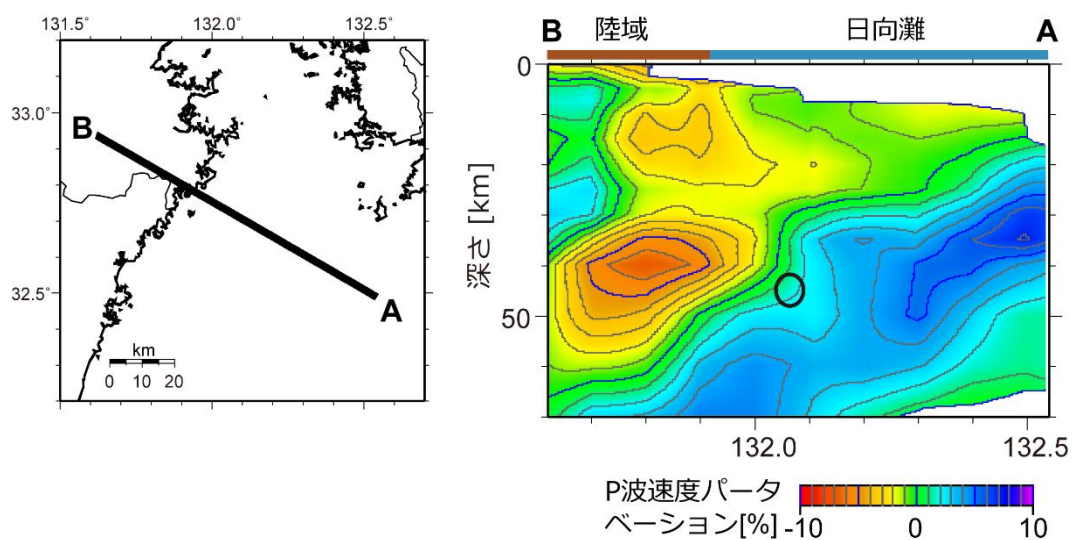


図 2-1-②-3 2022 年 1 月に発生した日向灘の地震活動周辺の P 波速度構造のゆらぎ⁶⁾。断面図中の黒楕円は、本震の概略震源位置を表す。

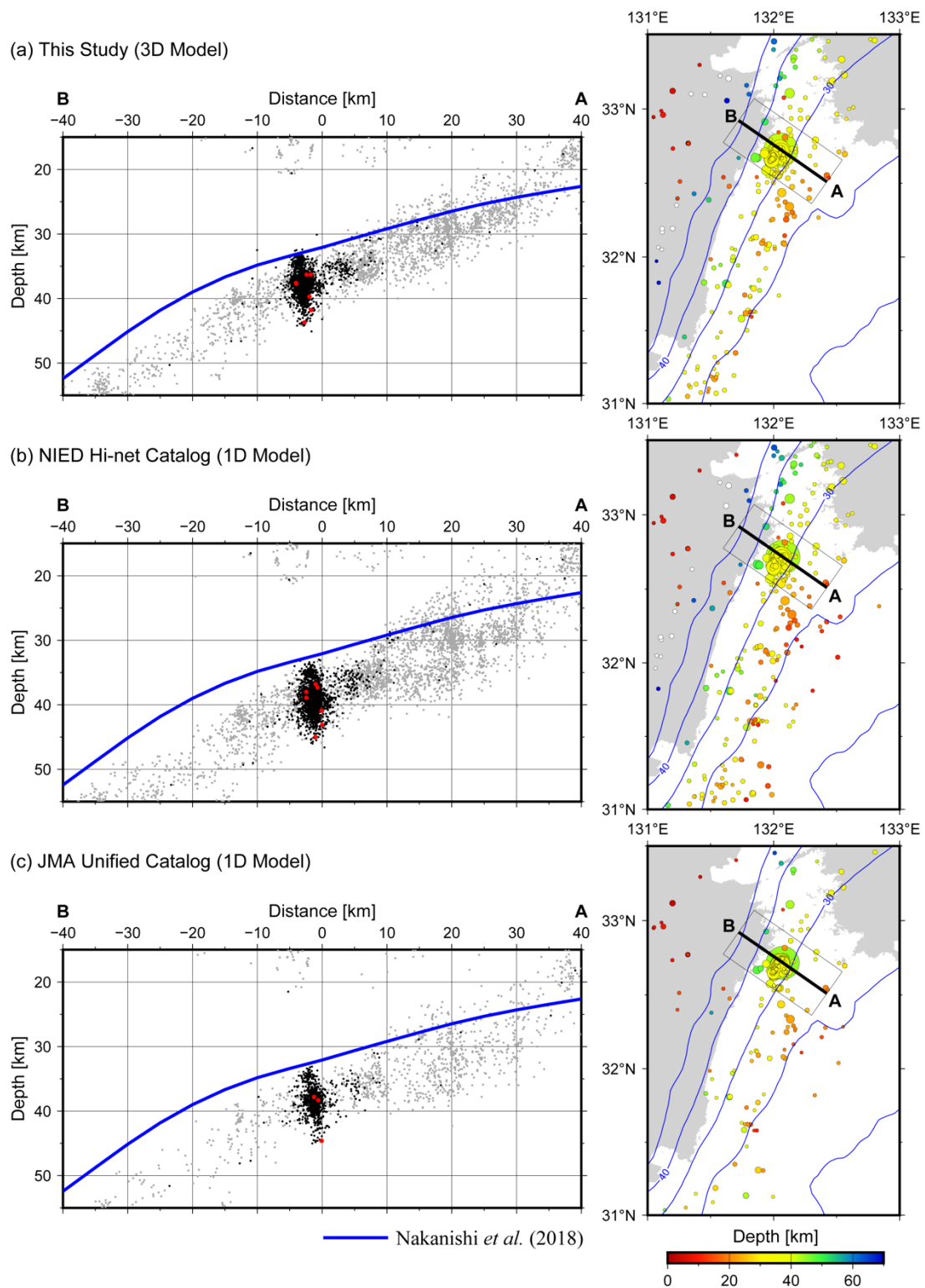


図 2-1-②-4 日向灘北部における地震活動。(a) 本システム、(b) 防災科研 Hi-net カタログ、(c) 気象庁一元化震源カタログ。左) 本震発生から 2022 年 2 月末までに発生した M1.5 以上の地震を黒点で、M4.5 以上の地震を赤点で示す。また、2012 年 1 月から本震発生前までに発生した M1.5 以上の地震を灰色の点で示す。断面線の位置は右側地図に示す。右) 本震発生から 2022 年 2 月末までに発生した M1.5 以上の地震の震源位置を示す。青線はフィリピン海プレート上面の等深線⁷⁾を表す。

3) 最短経路法を用いた迅速な震源決定の実施

地震の震源位置は、与えた構造モデルに対し、震源－観測点間を接続する波線経路とその間を地震波が伝播するために要する時間（走時）を計算するための波線追跡を行い、計算による走時と観測走時との差が最小となる場所を探索することで推定可能である。3D構造モデルを用いた場合、1D構造モデル使用時に比べ、波線が通過する経路が複雑になるため、この波線追跡に計算時間を要する。近年、pseudo-bending 法の開発¹⁾や計算機の能力の向上により、波線追跡に要する時間も大幅に短縮されるようになったため、最近では逐次的に波線追跡を行う方法でも迅速な震源決定が可能になってきた。実際、サブシステム1において pseudo-bending 法により波線経路ならびに走時の計算を逐次行う方法を採用しており、前節ではこの方法による震源計算結果を示した。一方、あらかじめ計算時間のかかる波線追跡及び走時計算の結果を走時表としてデータベース化しておき、震源決定処理実施時にはその計算結果を参照することで、計算時間の劇的な迅速化を可能とする方法もある²⁾。ここで、事前計算の対象となる計算走時は、計算対象領域の全グリッド点と各観測点を結ぶ経路となるが、事前に行う走時計算に厳しい即時性は求められないため、ある程度計算時間を必要とする走時計算手法でも使用可能となる利点がある。今年度は、いろいろな分野で利用されている最短経路法(shortest path method)を波線追跡に適用した手法⁸⁾を震源計算に用いるための試験的な評価を実施した。最短経路法は異方性媒質を含む複雑な構造モデルに対しても適用可能であり、得られた波線経路が局所解にならないといった特徴がある。その反面、多くの計算時間を要することが欠点とされており、事前に計算した走時表を参照する震源計算方法に適していると言える。

図2-1-②-5に、最短経路法で求めた走時表を用いて、2015年1年間に紀伊半島周辺の深さ120 km以浅で発生した地震を対象に試験的に再決定した震源の分布を示す。紀伊半島沖では2016年にDONET2が完成し、定常的な海域観測網の運用が始まったが、本課題では、DONET整備以前の震源カタログも整備する計画である。本試験ではDONET2運用開始直前の2015年を対象とし、2000年より運用されている陸域に設置された防災科研 Hi-net の観測データのみを用いた震源決定を試みることにより、3D構造モデル採用による影響の有無や計算の安定性を確認した。前節同様、震源計算には、地震波走時トモグラフィ解析による3D構造モデル⁶⁾を用いた。解析には、領域内に位置する防災科研 Hi-net150点における検測値データを用いており、1D構造モデルに基づく防災科研 Hi-net カタログの震源（青印）を初期震源として計算を行った。計算対象となった約9000イベント全てを処理するために要した時間は、一般的なPCで3.8秒であった。

3D構造モデルへの最短経路法適用にあたって、まず、計算対象領域を直方体のセルに分割し、各頂点に地震波速度構造の値を与えた。セル内部の地震波速度は線形補間することにより速度を算出した。セル境界面上にノードを均質に分布させ、各セル内で可能なすべての組み合わせの2組のノードをパスで結び、観測点から各ノードへの最短経路を求めた。この際、セルの数、ノードの数は、必要な精度の走時値を得られるまで増加させた。セルの頂点で得られた計算走時は3次スプライン関数で補間し、スプライン関数として保存した。

今回の手法と防災科研 Hi-net のカタログでは、おおむね同じ位置に震源が推定され

ているが、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って発生する地震の深さが若干浅く決まっているなど、相違点もある。海域下の地震については陸上の観測点のみでは深さ方向に十分な制約が与えられていないため、両カタログともばらつきが大きい。最近のデータについては、DONET 等、海域観測のデータを追加することにより改善することが期待される。

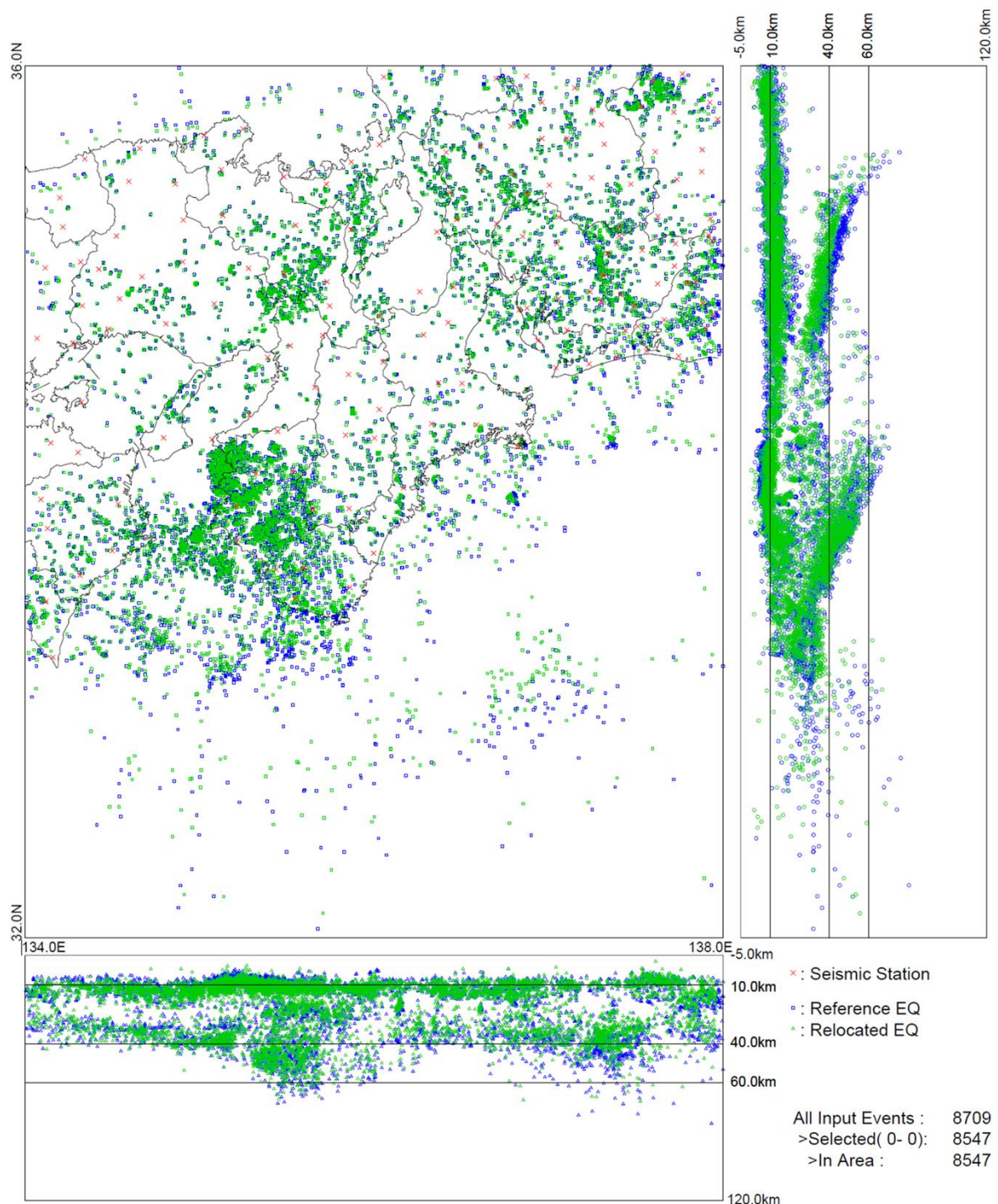


図 2-1-②-5 2015 年に発生した地震の震源分布。最短経路法⁸⁾と Matsubara et al. (2019) による 3D 構造モデル⁶⁾から求めた走時表を用いて震源再決定をした結果を緑印で示す。青印は 1D 構造モデルを用いて求められた防災科研 Hi-net カタログによる結果を表す。赤印は解析に用いた観測点の位置を示す。

(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、より現実に応じた地震波速度構造を用い、自動的に震源位置の推定を行う必要がある。本年度は、昨年度構築した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行うとともに、震源計算に用いる3D構造モデルや様々な計算パラメータを更新するためのツール、保存されている過去の検測値データに基づいて震源再計算を行うツールの整備等を実施した。2022年1月22日に発生した日向灘の地震について、本システムにより求めた震源の深さは、従来の1D構造モデルを用いた震源分布よりも数km程度浅くなることが分かった。過去10年間に日向灘北部周辺で発生した地震について、震源再計算ツールを用いて3D構造モデルに基づく震源分布を求めた。その結果、フィリピン海プレート沈み込みに伴って発生する地震の層は、1D構造モデルで求められた結果よりも薄く、厚さ7~8 km程度であること、2022年1月22日の地震の余震活動は、この地震発生層内で鉛直に分布することを明らかにした。また、3D構造モデルの走時計算に最短経路法をあらかじめ適用することについて、その利点や効果についての検討を行った。

前述の通り、現時点で求められた震源分布について、参照しているプレート上面位置の推定と震源計算に用いた3D構造モデルが異なるため、両者の空間的な関係を詳細に比較検討することは難しい状況にある。今後、高精細化したマルチパラメータ3D構造モデルの構築が進み、震源計算に使用可能な3D構造モデルでプレート形状モデルも検証が出来れば、容易にプレート間地震を抽出し、評価することが可能になると期待される。そのためには、高精細化したマルチパラメータ3D構造モデルを用いた震源再計算が必要になる。新たな3D構造モデルを本システムに導入する前に、モデル更新が震源計算結果に与える影響の度合いを把握するためのツール類の構築や年々増大する過去データを効率的に再計算する環境の整備、地震カタログの特徴を把握するための可視化方法の検討を進めることが重要である。

(d) 引用文献

- 1) Koketsu, K. and S. Sekine: 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.
- 2) 関口渉次: 事前走時計算をもとにした3次元速度構造における迅速な震源決定手法について, 防災科学技術研究所研究報告, 77, 1-5, doi: 10.24732/nied.0000120, 2010.
- 3) Lomax, A., J. Virieux, P. Volant, and C. Berge: Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in “Advances in Seismic Event Location”, ed. by C. H. Thurber, N. Rabinowitz, Kluwer, Amsterdam, 101-134, 2000.
- 4) Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki: Japan integrated velocity structure model version 1, *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake*

Engineering, Vol. 1-4,

<http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1773.pdf>, (参照 2022-3-31), 2012.

- 5) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会: 2022年1月の地震活動の評価, 1-46, <https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2022/2022_01.pdf>, (参照 2022-3-31), 2022.
- 6) Matsubara, M., H. Sato, K. Uehira, M. Mochizuki, T. Kanazawa, N. Takahashi, K. Suzuki, and S. Kamiya: 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.
- 7) 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.
- 8) Sekiguchi, S.: Efficient seismic ray tracing based on the shortest path method, Geophys. J. Int., 225, 729-743, doi: 10.1093/gji/ggab001, 2021.

(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
最短経路法を走時計算に適用した3次元速度構造での震源決定（ポスター）	関口 渉次	日本地震学会2021年秋季大会	2021年10月	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