

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
	副主任研究員	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
	副主任研究員	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
	研究員	山本 揚二郎
	ポスドク研究員	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
	主幹研究員	三好 崇之
	特別研究員	関口 渉次

(c) 業務の目的

三次元地震波速度構造（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P波速度3D地下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構造モデルを構築するとともに、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する。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について議論を開始する。自動震源決定システムの動作評価を進めるとともに、同システムを用いて過去に発生した地震の震源再決定を行う。

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2年度業務目的

DONET が設置されている熊野灘周辺の3D構造モデルを高精細化するため、最新の地下構造研究成果の収集とともに、構造モデル更新の仕組みの構築とマルチパラメータ化の手法・方針の検討を行う。観測点補正值を求めるため、構造探査データを用いた DONET 観測点直下の堆積層構造推定方法の検討を進める。3D構造モデルを用いた震源計算の効果进行调查するため、既存3D構造モデルを用いた準リアルタイム自動震源決定システムを構築し、震源計算結果及び計算時間等の評価を行う。

(2) 令和 2 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 3 D 構造モデルの高精細化のため、熊野灘海域を中心に、既存及び新たに発表された成果に基づく速度構造情報を収集した。加えて、新たに反映させる成果を取り入れると的確に 3 D 構造モデルが更新される仕組みの構築を進めた。モデルのマルチパラメータ化のため、既存の研究成果や経験的關係式について情報収集・整理し、モデル構築の手法・方針について検討を進めた。新たなマルチパラメータ構造推定手法の検討としては、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、潮岬付近の DONET 観測点をモデルケースとして、構造探査データを用いた観測点直下の堆積層構造推定を試みた。

(b) 業務の成果

1) 既存・新規観測研究成果の収集

南海トラフにおける既存の 3 D 構造モデルとしては、先行の「東海・東南海・南海地震の連動性評価プロジェクト」¹⁾で実施された主に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」²⁾で取りまとめられたプレート形状を含む P 波速度構造モデル³⁾や「海域における断層情報総合評価プロジェクト」⁴⁾で実施された反射法地震探査の成果も考慮した P 波速度構造モデルが報告されている。まず、これらの個別に進められた各プロジェクトの成果と使用された構造情報を整理し、統合するための準備を進めた。さらに、これらのモデルにまだ取り入れられていない既存の調査観測研究の成果や今年度新たに発表された研究成果について、熊野灘海域を中心に収集した。具体的には、図 2-1-①-1 に示す反射法地震探査に基づくプレート形状^{5),6)}や屈折法地震探査による最新の P 波速度構造⁷⁾、地震観測データに基づく紀伊半島沖の深部構造トモグラフィによる P 波・S 波速度構造⁸⁾、DONET 観測点直下の 1 次元 S 波速度構造⁹⁾である。

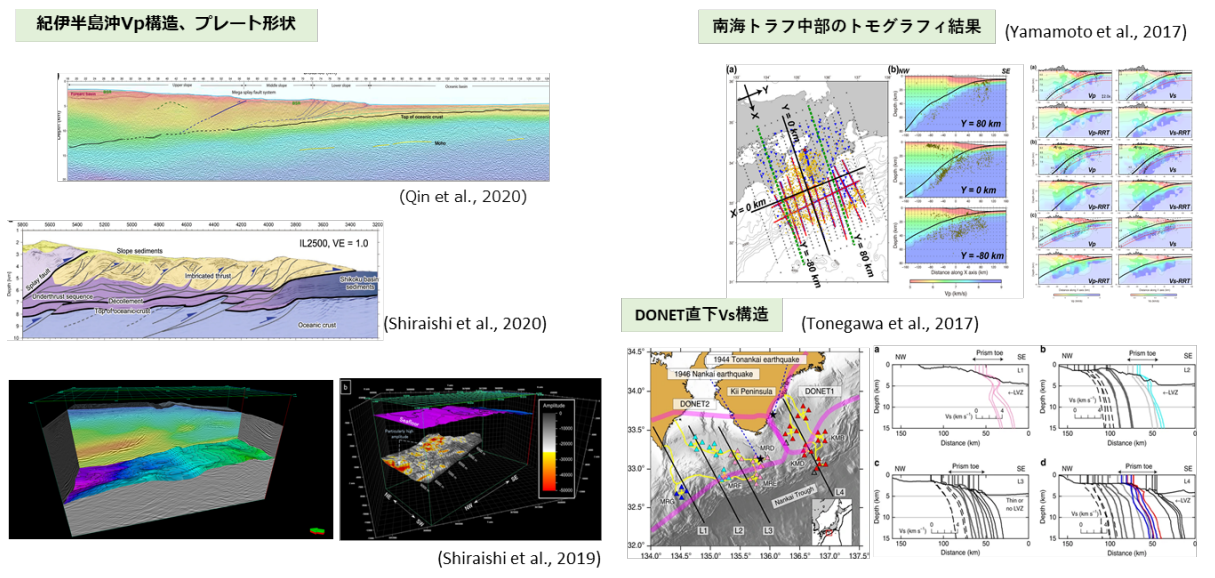
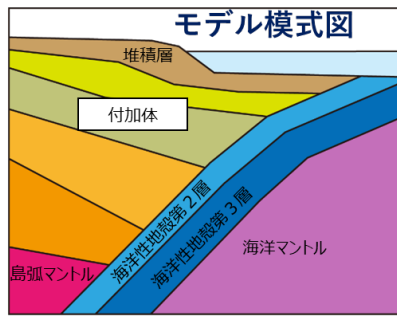


図 2-1-①-1 3D構造モデルに取り入れるために収集した調査観測研究に基づく成果

2) 構造モデル作成・更新の仕組みの構築とマルチパラメータ化の手法・方針の検討

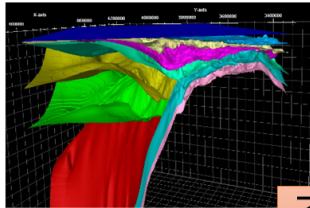
南海トラフにおける既存の3D構造モデルは、上述の通り、それぞれ異なる入力データ、方針で構築されてきた。本プロジェクトでは、それらを統合し、さらにこれらのモデルにはまだ反映されていない成果を取り入れて、一つの3D構造モデルとして取りまとめる計画である。そこで、今年度は、既存情報の収集に加え、新たな成果を取り入れると的確にモデルが更新される仕組みの構築を進めた。具体的には、3D構造を図2-1-①-2に示すような構造区分（堆積層、付加体、陸側地殻、沈み込む海洋地殻等）で取り扱う。それぞれの構造区分の境界となる境界面は、調査研究の成果に基づき作成する。多くの2次元断面上の情報から成る調査研究の成果に基づき、構造区分ごとに適切な条件を設定して補間する方針で、モデル構築とモデル更新を可能とする仕組みを、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などを用いて整備した。

さらに、モデルのマルチパラメータ化のためには、S波速度、密度などの情報も必要である。しかし、海域の調査観測研究から現時点で得られている推定結果は非常に限られている。本プロジェクトでは、まず、P波速度とその他の物理パラメータとの経験的關係式を用いて、P波速度構造モデルをマルチパラメータモデルに変換し、その上で、調査観測研究の成果が存在する地点のパラメータ値と比較し、調整してマルチパラメータ化を進めていく方針で検討した。今年度は、P波速度からS波速度及び密度を導出する経験的關係式について既存の研究成果^{10)~17)}を中心に情報収集し、図2-1-①-3のように整理した。これらの關係式をモデル構築に導入できるようPetrelを用いた作業環境の整備を進めた。



- ・付加体
 - ・陸側地殻
 - ・沈み込む海洋地殻等
- 構造区別に適切な関係式の導入を可能に

構造境界モデル構築例



新しい成果を取り入れると的確にモデル更新される仕組み (ハード・ソフト環境) を構築

その時点の最新の3Dマルチパラメータ構造モデルへ更新

図 2-1-①-2 モデル構築の方針を示す構造区分の模式図および実際に構築した地層境界面

$$V_s = \begin{cases} 0 & V_p = 1.5 \text{ km/s} \\ \text{Hamilton 1979} & 500\text{m below seafloor?} \\ \frac{V_p - 1.36}{1.16} & 1.5 < V_p < 4.0 \text{ km/s} \\ \text{Brocher empirical fit} & 4.0 \leq V_p \end{cases}$$

$$\text{density} = \begin{cases} 1000 & V_p = 1.5 \text{ km/s} \\ \text{Hamilton 1978} & 500\text{m below seafloor? } V_p < 2 \text{ km/s} \\ \text{Nafe - Drake} & 2 \text{ km/s} \leq V_p \end{cases}$$

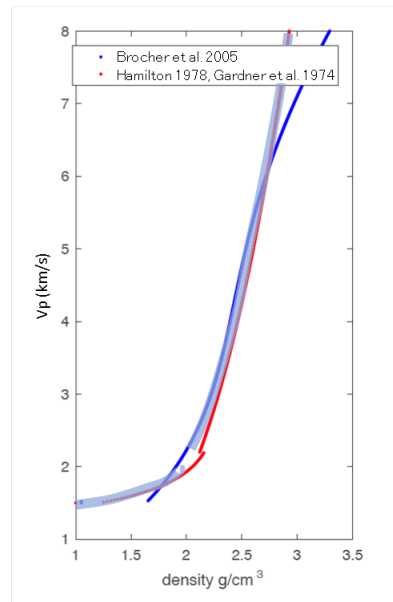
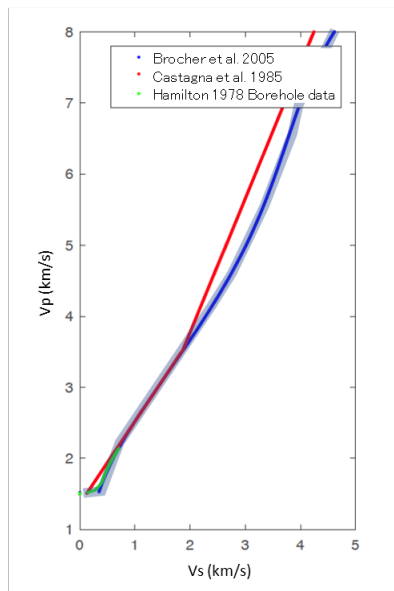


図 2-1-①-3 既存の成果に基づき整理したP波速度とS波速度及び密度との経験的な関係

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検討を進めた。

採用した S 波速度の推定方法は、人工振源から出た P 波が観測点直下付近で S 波に変換したフェーズを用いて PS 変換面をイメージングした上で、反射法地震探査のイメージング結果である P 波地震波反射断面に基づき変換面深度及びその付近の P 波速度を同定することで、変換面より浅い部分の S 波速度を見積もるというものである。この方法の適用には、DONET 観測点周辺で反射法地震探査を実施する必要がある。潮岬沖では、2018 年、海洋研究開発機構の調査船「かいめい」が大容量エアガン・アレー（総容量 10,600 inch³）と 6 km のストリーマーケーブルを用いて集中的な反射法地震構造探査を実施しており、本手法の検討の場として理想的な条件にある。そこで、令和 2 年度は潮岬沖の DONET 観測点をモデルケースとして、本解析手法の最適化や限界などを評価した。

エアガン信号を用いて抽出した PS 変換面の時間深度イメージ（レシーバー関数解析結果）の一例を図 2-1-①-4 に示す。ここでは約 0.89 秒にコヒーレントな PS 変換面が確認できる。近傍の反射断面ではいくつかの P 波反射面が識別できるが、その振幅を基準に観測点下の深さ 490m（往復走時 0.27 秒）に位置する反射面が PS 変換面だと想定すると、海底面と変換面間の堆積層の平均 P 波速度は反射法解析結果から 1.81 km/s、S 波速度は 0.42 km/s と見積られる。この見積もりは、レシーバー関数の品質と PS 変換面に対応する P 波反射面の同定結果によって大きく変化し得る。

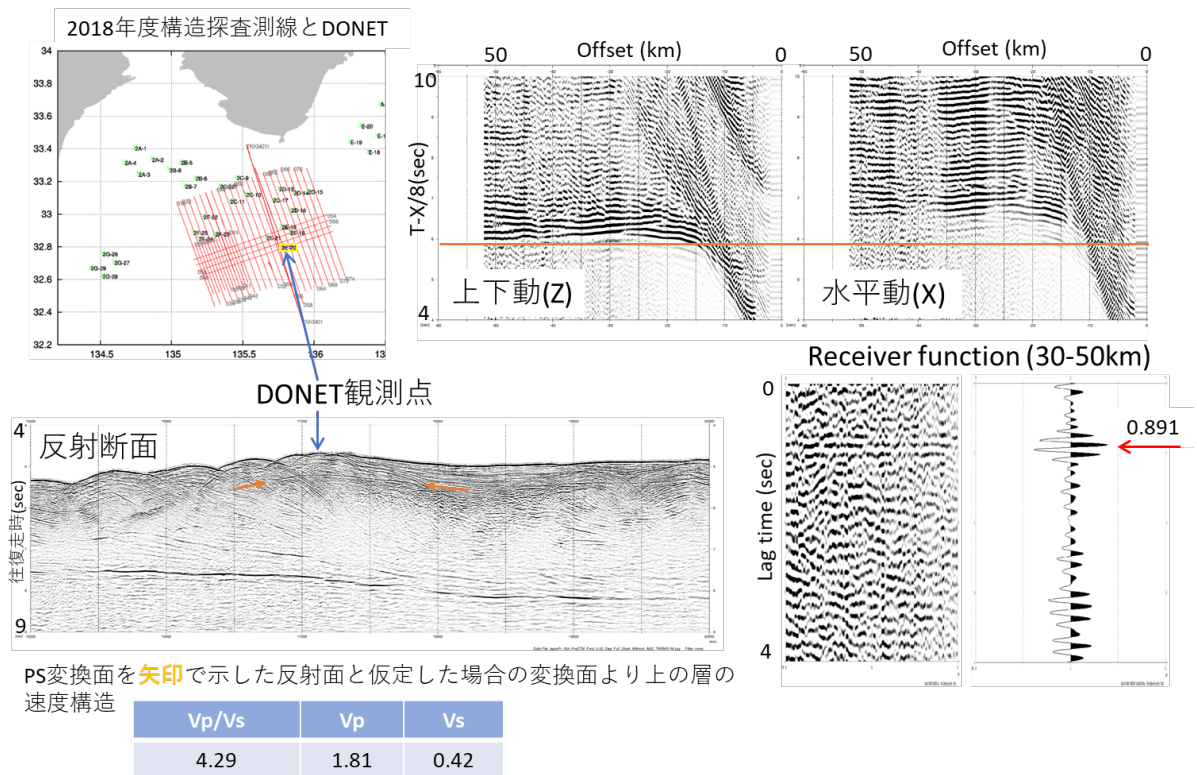


図 2 - 1 - ① - 4 DONET 観測点直下の地震波速度構造の推定の試み。(左上) 記録を使用した DONET 観測点と構造探査測線の配置。(左下) 反射法地震探査記録断面。(右上) DONET 観測点で得られた構造探査測線上のエアガンショット記録。オレンジ線は上下動成分で確認できる初動の周辺に引いた補助線であり、水平動の主な振幅が有意に遅れて到着していることが分かる。(右下) DONET 観測点の上下、水平成分に基づくレシーバー関数。

(c) 結論ならびに今後の課題

南海トラフ域 3D 構造モデルの高精細化のため、熊野灘海域を中心に、既存及び新たに発表された成果に基づく速度構造情報を収集した。収集した速度構造情報は、それぞれ異なる調査目的、観測仕様で得られた成果で、扱うスケールや領域に違いがある。異なる分解能を持つ入力データが分散して存在する問題の取り扱いは、信頼性や誤差の評価とも関係する課題である。また、新たに反映させる成果を取り入れると的確に 3D 構造モデルが更新される仕組みの構築を進めたが、実際にモデル構築を進めながら、必要に応じて手法や方針を修正していく必要があると考えられる。特に、モデルのマルチパラメータ化のため、様々な海域における既存研究成果に基づき P 波速度から他のパラメータに変換する経験的關係式を整理したが、現時点での P 波速度を基準とした単純な整理であっても、複数の關係式を滑らかに統合することは困難である上、關係式によって導出された S 波速度や密度と調査観測研究に基づく成果との比較も単純に整合しないことが予想される。さらに、他海域や実験研究に基づく經驗式が南海トラフの実データにどこまで適用可能かについても検証が必要である。今後は、關係式からの推定値と調査研究成果の比較を進めつつ、P 波速度構造モデルの構築時と同様に、構造区分ごとに適切な条件を調整、設定しながら進めることで、変換式の高精度化とモデル構築の実現を目指す。新たなマルチパラメータ構造推定手法の検討としては、DONET 観測点で収録さ

れた構造探査データを用いた観測点直下の堆積層構造推定を試みたが、DONET 観測点の水平成分の方位の補正など基本的なデータ処理を施す必要がある。さらに、観測点の南北によって波形データの見え方が異なるなど、複雑な構造が想像されるケースについての対応方法も検討する必要がある。変換面が複数観測される場合などは特に、反射断面で見られる構造境界と変換面の紐づけ作業（同定作業）はレシーバー関数解析と反射法データのみでは難しいため、近傍の屈折法データ解析結果などと合わせた解釈（同定）を進めていかねばならないだろう。

(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：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.
- 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：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.
- 3) 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.
- 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) Shiraishi K., G. F. Moore, Y. Yamada, M. Kinoshita, Y. Sanada, and G. Kimura: Seismogenic zone structures revealed by improved 3-D seismic images in the Nankai Trough off Kumano, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 2252-2271, doi: 10.1029/2018GC008173, 2019.
- 6) Shiraishi K., Y. Yamada, M. Nakano, M. Kinoshita, and G. Kimura: Three-dimensional topographic relief of the oceanic crust may control the occurrence of shallow very-low-frequency earthquakes in the Nankai Trough off Kumano, *Earth Planets Space*, 72:72, doi: 10.1186/s40623-020-01204-3, 2020.
- 7) Qin Y., G. Fujie, S. Kodaira, Y. Nakamura, Y. Kaiho, T. No, K. Obana, S. Miura: 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.
- 8) 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.
- 9) Tonegawa T., E. Araki, T. Kimura, T. Nakamura, M. Nakano, and K. Suzuki: 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.

- 10) 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.
- 11) Gardner, G. H. F., L. W. Gardner, and A. R. Gergory: Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps, Geophysics, 39, 770-780, doi: 10.1190/1.1440465, 1974.
- 12) 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.
- 13) Castagna, J. P., M. L. Batzel, and L. E. Raymond: Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, Geophysics, 50, 571, doi: 10.1190/1.1441933, 1985.
- 14) Wilkens, R. H., G. Simmons, and L. Caruso: The ratio V_p/V_s as a discrimination of composition for siliceous limestones, Explor. Geophys., 15, 263, doi: 10.1071/EG984263b, 1984.
- 15) Christensen, N. I. and W. D. Mooney: Seismic velocity structure composition of the continental crust: A Global view, J. Geophys. Res. Solid Earth, 100, 9761-9788, doi: 10.1029/95JB00259, 1995.
- 16) Carlson, R. L., C. N. Herrick: Densities and porosities in the oceanic crust and their variations with depth and age, J. Geophys. Res., 95, 9153-9170, doi: 10.1029/JB095iB06p09153, 1990.
- 17) JAMSTEC Seismic Survey Database: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, <<https://doi.org/10.17596/0002069>>, (参照 2021-4-14), 2004.

(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
なし
- 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

② 3D構造モデルを用いた自動震源決定システムの構築

(a) 業務の要約

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ことを目的として、3D構造モデルならびに海陸の地震観測データを用いた自動震源決定システムの構築に着手した。今年度は、防災科学技術研究所（防災科研）が運用する高感度地震観測網（防災科研 Hi-net）にて自動的に求められた震源情報を初期震源として受信し、アルゴリズムや計算パラメータの異なる複数のサブシステムで震源位置を推定する仕組みを構築した。解析により求められた震源情報はリレーショナルデータベース（RDB）に保存する仕組みとした。この RDB には、1D構造モデルによって求められた震源カタログ等も参照用として保存することにより、本研究で構築するシステムの震源計算結果の評価やカタログ活用の利便性向上を図った。

(b) 業務の成果

西南日本下には南海トラフからフィリピン海プレートが沈み込んでおり、フィリピン海プレートと陸側プレートとの境界部を震源とする巨大地震の発生が危惧されている¹⁾。この地震の想定震源域はほぼ海域に位置する。海域ではフィリピン海プレートが比較的浅部に位置するだけでなく、陸域に向かって次第に深くなる傾向にあること、当該海域下において複雑に湾曲していることが知られている^{2), 3)}。このような複雑な地下構造が想定される場合、従来のような1D構造モデルを用いた震源位置の推定では大きな誤差が生じうる。例えば、2016年4月1日に三重県南東沖で発生したマグニチュード(M) 6.5の地震の場合、気象庁によって1D構造モデルを用いて決められた震源の深さは28.7 kmであった⁴⁾。これまでに提唱されているフィリピン海プレートモデルでは、この地震の震央付近のフィリピン海プレート上面深さは10 km付近である^{2), 3)}。したがって、求められた震源深さからは、この地震はフィリピン海プレート内で発生した地震である可能性を示唆する。しかし、より詳細な地下構造を用いて震源決定を行った結果、フィリピン海プレート上面付近の深さに震源が決まる^{5), 6)}。前述の通り、南海トラフ周辺の海域ではフィリピン海プレートが地下浅部に位置する。このため、陸域を対象とした震源決定で用いられている1D構造モデルでの想定よりも有意に浅い場所に高速度なマントル物質が存在している。海域の海洋モホ面以浅で地震が発生すると、海洋モホ面に沿うヘッドウェーブとして速い見かけ速度で地震波が伝わる。1D構造モデルを用いた震源決定でこのような地震波伝播の特徴を説明するためには、陸域でより深くに設定されているモホ面近く、すなわち実際よりも震源を深く決め易くなる傾向がある⁷⁾。

近年、地震活動状況を把握するための指標として、グーテンベルグ・リヒター則のb値の時空間変化が着目されている。ただし、b値には震源深さ依存性⁸⁾やメカニズム解依存性⁹⁾がある。b値の変化として地震活動の特徴を適切に捉えるためには、地震の発生層、すなわち陸側プレート内、プレート境界付近、スラブ内のどこで発生した地震かを的確に把握し、地震活動を正しく分類した上で評価することが重要となる。

今年度は、より現実に即した3D構造モデルを用いた震源決定を実施するためのシステムの根幹部の整備とデータ利用環境の構築を行った。高精細かつ高分解能なモデルを震源決定に用いる場合、計算機上に膨大な記憶領域を確保しなくてはならないだけでな

く、相応の計算コストが必要となる可能性がある。また、複雑な地下構造を導入すると、理論的な波線計算が収束せず、震源決定が不安定になることが危惧される。システム構築にあたっては、既存の3D構造モデルを用いた震源決定アルゴリズムの調査と収集を実施するとともに、自動処理実現に向けた計算速度、計算の安定性の評価を実施する。評価に当たっては、一定の期間のデータを様々なアルゴリズムや計算パラメータで計算し、比較検討をする。大量のデータを効率的に管理するため、計算結果は全てRDBに保存し、必要な情報の検索や抽出を高速に実現できるようにした。

1) 3D構造モデルを用いた震源決定アルゴリズムの収集と実装

南海トラフ及びその周辺域を対象とした自動震源決定を実現するため、既に稼働実績を有する3D構造モデルを用いた震源決定方法の調査を行うとともに、そのプログラムを収集、実装した。

防災科研では、防災科研Hi-netをはじめとする日本全国の高感度地震計による観測波形データと1D構造モデルを用いた震源カタログ構築を行うため、P波及びS波の到着時刻を自動あるいは手動で検出している。この検出値データを用いた地震波走時トモグラフィ解析により、日本周辺海域を含めた3D構造モデルが構築・提案されている¹⁰⁾。詳細な震源分布を利用する際には、都度、この3D構造モデルを用いて震源位置の再決定を実施しており、その成果は活断層地域評価のための基礎資料等として活用されている^{11)~14)}。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理論的な時間(走時)を計算するための波線追跡(Ray Tracing)を行い、この理論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される。防災科研では、3D構造モデルに対して、pseudo-bending法¹⁵⁾により波線経路ならびに走時の計算を逐次行っている。この方法は、波線追跡を逐次実施する方法であることから、RT法と呼ぶこととする。なお、最終的な震源位置を得るためには、多くの波線を計算する必要がある。震源位置の推定に要する計算時間を短縮するために、RT法では、波線経路の計算を並列化して実行している。RT法とは別に、pseudo-bending法により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(Travel-time Table)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もある。この方法では走時表を用いることから、TT法と呼ぶこととする。また、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が公開され、世界中で広く使われている¹⁶⁾。この方法は、3D構造モデルから有限差分近似を用いてあらかじめ震源と観測点間の走時を求めておき、この走時情報を用いた非線形探索法により震源位置を求めるものである。この方法を以下ではNL法と呼ぶこととする。今年度構築する自動震源決定処理システムには、これら3種類の方法を実装することとした。

前述の通り、3D構造モデルが複雑になるにつれ、波線経路を求めるための計算量が膨大になったり、計算が不安定に陥ったりすることが危惧される。このような課題に対処するため、pseudo-bending法等の近似的な解法が提案されてきた。一方、複雑な構造モデルに対しても適用可能な地震波波線計算法として最短経路法が知られている。この方法は、得られた波線経路が局所解に陥らないこと、異方性媒質に簡単に適

用できることなどの特徴があるが、膨大な計算時間を要するという欠点があった。最近、最短経路法をもとにした効率的な地震波波線計算方法が開発され、計算時間の大幅短縮が実現した¹⁷⁾。本研究では、研究の進展に伴って更新される3D構造モデルにあわせて波線・走時計算結果の更新を行う必要があり、効率的かつ安定的に走時を計算する環境の整備は必須である。自動処理震源決定システムの構築にあたっては、3D構造モデル、あるいは構造モデルに基づく走時情報の更新が容易であり、モデルや走時表を更新してもシステムの安定性が阻害されないことを念頭に設計としている。次年度以降、最短経路法によって求めた走時表をTT法に実装することで、複雑な地下構造が震源決定に与える影響を検討することも重要となる。

2) 自動震源決定処理システムの構築

今年度構築した自動震源決定処理システムでは、前節で調査した既存3手法に基づくプログラムを稼働させる仕組みを根幹とし、震源計算に用いる3D構造モデルや計算パラメータ等は容易に入れ替えられる構成とした。各アルゴリズムや計算パラメータ等の性能比較を容易にするため、計算方法や設定したパラメータごとに仮想サーバ（サブシステム）を立て、それぞれの計算が独立に動作する環境を構築した。構築したシステム（以下、本システム）の概略構成を図2-1-②-1に示す。

防災科研Hi-netでは、日本全国から収集した観測波計データを逐次処理し、イベントの自動検出、P波、S波到着時刻の検出、1D構造モデルを用いた震源決定処理を行い、その結果をデータベース（DB）に保存している。また、震源位置に関する情報等がDBに登録された際に、そのイベント情報に1:1で紐づくインデックス（ID）情報を含んだ電文を発報している。本システムは、この電文を受信すると、IDに紐づく震源情報をHi-netのDBから自動取得する。当該イベントが、南海トラフ及びその周辺で発生した地震である場合、Hi-net DBから検出値情報を取得するとともに、Hi-net震源情報や検出値情報、観測点情報を記した共通入力データを作成し、各サブシステムに引き渡す。各サブシステムから得られた処理結果は、後述するRDBシステムに保存される。

システム全体を効率的に管理するためには、通常、複数のサブシステムの操作性や入出力データの形式は統一しておくことが望ましい。一方、今回採用した震源決定システムは、様々な環境下で豊富な動作実績を有している。データ入出力部分であってもプログラムの改変を行うことは、相応の作業量が生じるだけでなく、不具合の混入とそれに伴うシステム全体の不安定化に繋がる可能性が否定出来ないため、各震源決定プログラム本体は既存のものをそのまま活用することを原則とした。各サブシステムで必要な情報を1ファイルにまとめた形式を定め、そのファイルを各サブシステムで採用している震源決定プログラムへの入力ファイルに即した形式となるように変換するプログラムを新に作成した。出力ファイルについても同様の考えのもと、共通ファイルに変換した後にRDBに登録する形式とした。

各サブシステムは、過去のデータを手動で解析する目的でも使用出来る。その場合の入力方法のひとつとして、Hi-netの既存DBに登録されているイベントのIDを指定する方法を用意した。この場合は、自動起動時と同様、IDに紐づくイベント情報を

Hi-net の DB から取得し、共通入力データを作成、各サブシステムに転送する。この他、初期震源や検測値情報を入力データとして直接作成し、使用することも可能とした。この機能を導入したことにより、Hi-net システムで検知されなかったイベントがある場合でも 3 D 構造モデルを用いた震源計算が実施可能となる。

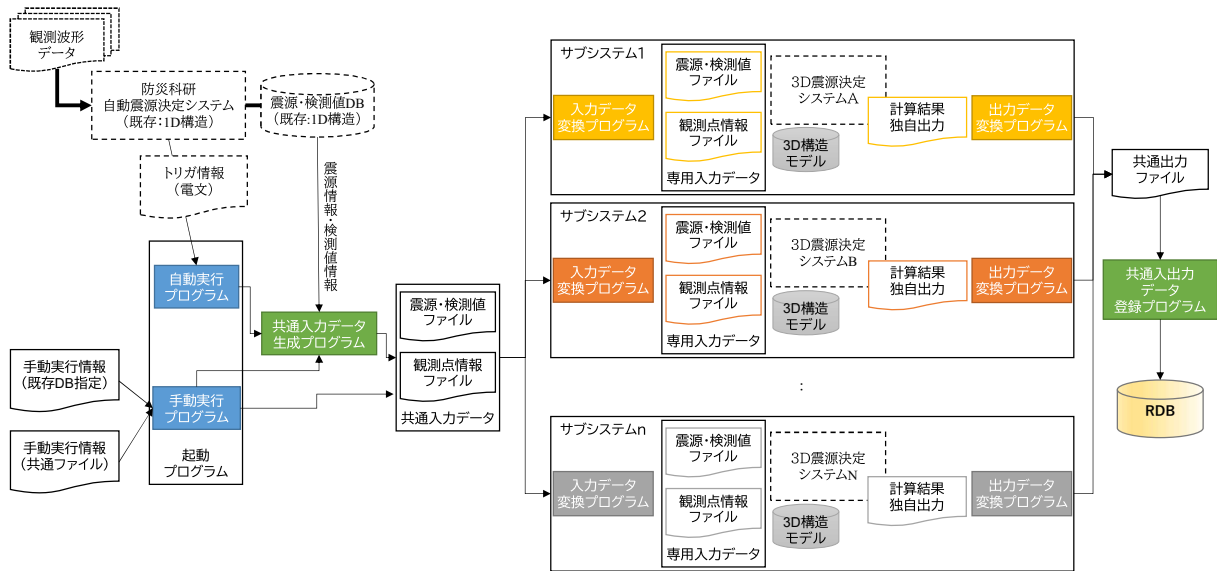


図 2-1-②-1 3 D 構造モデルを用いた自動震源決定システムの概略構成図。本研究で新たに構築した部分を実線枠で、本システムと連携する既存システムなどは破線枠で示した。

3) RDB の構築

各サブシステムで求められた震源計算結果（以下、3 D 震源カタログ）は、今後、その決定位置や震源計算に要する時間などの評価ならびに地震活動そのものの評価に用いる。最終的には数十年にわたる 3 D 震源カタログを構築するとともに、その情報を対象とした様々な解析や評価に資するため、震源カタログの検索や抽出が効率的に実施できることは極めて重要である。また、各サブシステムで得られた 3 D 震源カタログの性能評価、あるいは地震活動状況の評価を行う場合、他のシステムで決められた震源情報やスロー地震等、関連する他の事象との時空間的な比較検討が必須となる。そこで、各サブシステムの出力結果ならびに関連する各種情報を、全て RDB 上のテーブルに保存することとした。RDB として、オープンソースの RDB 管理システムである PostgreSQL を採用した。

まず、各サブシステムで得られた震源情報や計算に用いた検測値情報等を保存する RDB（以下、3D-DB）を構築した。本 DB に対して、ユーザーから高負荷な検索を受けることで、新たな 3 D 震源カタログの登録に支障が出ることは避ける必要がある。そこで、この 3D-DB は計算結果の保存を主要な目的とし、ユーザーが検索等に用いる参照用の DB（以下、RefDB）を別途構築した。RefDB は、様々な震源カタログを比較検討することを目的とし、震源要素のみを登録することで軽量化を行った。表 2-1-②-1

1、表2-1-②-2に、3D-DBに登録したデータの例及びRefDBに登録したデータを、それぞれ示す。

表2-1-②-1 3D-DBに登録したデータの例

登録データ種別	主な登録情報
震源要素	ID 震源時／震源時誤差 震央緯度／南北誤差 震央経度／東西誤差 震源深さ／深さ誤差 O-C 標準誤差 観測点数 P位相使用数 S位相使用数 振幅マグニチュード 更新日付
位相情報	ID 観測点コード 位相区分（P/S） O-C 値 P初動極性 最大振幅 到着時／読み取り誤差幅

表2-1-②-2 RefDBに登録したデータ

データ種別	データ内容	備考
3D震源カタログ	3D構造モデルによる震源要素（本研究）	逐次更新
Hi-net 震源カタログ	1D構造モデルによる震源要素と初動解	自動更新（1時間1回）
F-net MT解カタログ	1D構造モデルによるMT解	自動更新（1時間1回）
気象庁一元化震源カタログ	1D構造モデルによる震源要素と初動解	自動更新（1日1回）
日本全国高分解能再決定震源カタログ ¹⁸⁾	Double-Difference法 ¹⁹⁾ による震源要素	2001年～2012年 M≤6.5 深さ40 km以浅
深部低周波微動カタログ ²⁰⁾	ハイブリッド法による震央位置カタログ ^{21), 22)}	手動更新

4) 自動震源決定システム試験運用結果

図 2-1-②-2 は、今年度導入した 3 つのサブシステムにより自動的に求められた 3 D 震源カタログと、同期間の防災科研 Hi-net による自動処理震源カタログの比較結果を表す。両カタログ間において、同一の地震による情報を実線で結ぶとともに、3 D 震源カタログについては、震源位置を表す丸印を黒線で縁取って示した。初期震源として用いた 1 D 構造モデルによる震源位置と 3 D 震源カタログを比較すると、特に NL 法のトラフ軸周辺の地震でやや差違が目立つ傾向がある。ただし、各図は、各サブシステムが動作確認期間中に取得した限られた期間のデータであり、計算に用いている 3 D 構造モデルは、それぞれのサブシステムで稼働実績がある仮のモデルであることに注意が必要である。

図 2-1-②-2 に示す通り、今年度、各サブシステムが問題無く稼働することを確認することが出来た。次年度以降、既存 3 D 構造モデルを各サブシステムに反映させる仕組みを構築し、自動処理やオフライン処理を実施することで、各サブシステムの評価を進めていく予定である。

(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逐次的かつ適確に把握するためには、より現実に即し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、自動あるいは手動による検測値情報と 1 D 構造モデルを用いて求められた防災科研 Hi-net の震源情報を初期震源として、3 D 構造モデルを用いた震源決定を実施するシステムの構築を行った。この際、震源決定アルゴリズムとして、既に提案されている複数の方法を適用することで、その計算速度や安定性を評価出来る仕組みを導入した。また、全ての震源計算結果は、1 D 構造モデルを用いて求められた複数の震源カタログと併せて RDB に登録し、震源計算結果の評価やカタログ活用の利便性向上を図った。

本年度構築した震源決定システムでは、各サブシステムで稼働実績のある 3 D 構造モデル、あるいは走時情報を仮に用いた。今後は本業務で構築するマルチパラメータ化した高精度な 3 D 構造モデルを容易に各サブシステムに反映するための仕組みを構築する必要がある。高精度かつ高分解能な 3 D 構造モデルが得られた場合に備え、より高速かつ安定した波線経路計算を行うことも重要になるため、新たな方法として提案された最短経路法に基づくアルゴリズムの導入も進める。さらに、構築した震源決定システムや 3 D 構造モデルの評価を行うためにはたくさんの地震の震源決定処理を行う必要がある。当面は既存 3 D 構造モデルを用いて震源決定システムの評価を進めつつ、過去に発生した地震の震源再決定を効率的に行うための方法を検討する。

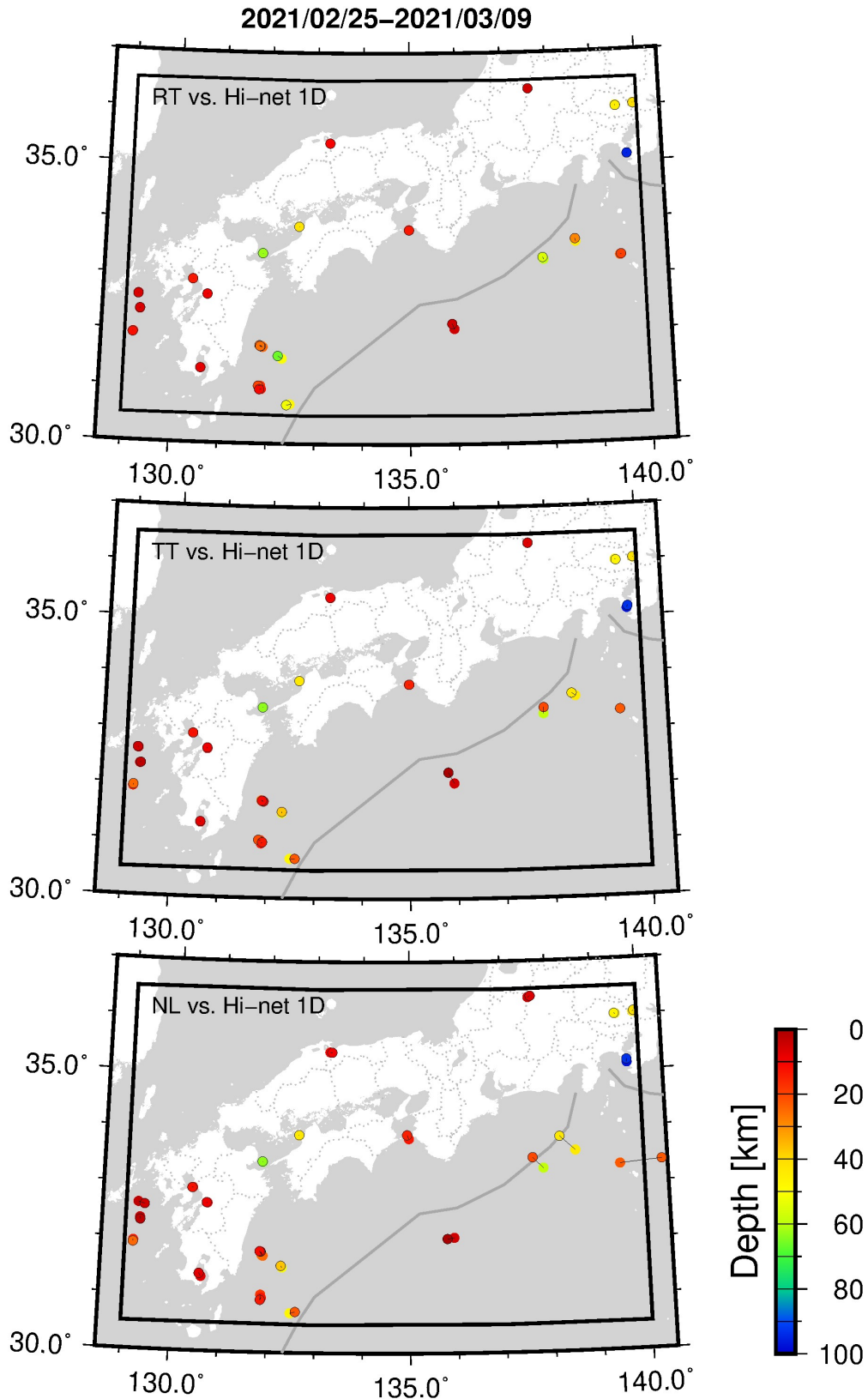


図 2-1-②-2 3D構造モデルに基づく震源計算システムの試験稼働結果。3D震源カタログと初期震源として用いた1D構造モデルによるHi-net震源との間を線で結んでいる。また、3D震源カタログについては、シンボルを黒線で縁取って示している。図中の太枠は、各サブシステムで、試験的に処理対象とした領域を表す。

(d) 引用文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版），
<https://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/nankai_2.pdf>，（参照
2021-4-8），2013.
- 2) Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira: The slip distribution of the
1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model,
Phys. Earth Planet. Inter., 132, 59-73, 2002.
- 3) 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.
- 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
2021-4-7），2020.
- 5) Wallace, L. M. et al.: Near - field observations of an offshore Mw 6.0 earthquake
from an integrated seafloor and subseafloor monitoring network at the Nankai
Trough, southwest Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 8338- 8351, doi:
10.1002/2016JB013417, 2016.
- 6) Takemura, S., T. Kimura, T. Saito, H. Kubo, and K. Shiomi: Moment tensor
inversion of the 2016 southeast offshore Mie earthquake in the Tonankai region
using a three-dimensional velocity structure model: effects of the accretionary
prism and subducting oceanic plate, *Earth Planets Space*, 70:50, doi:
10.1186/s40623-018-0819-3, 2018.
- 7) Takemura, S., K. Shiomi, T. Kimura, and T. Saito: 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.
- 8) Mori, J. and R. E. Abercrombie: 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.
- 9) Schorlemmer, D., S. Wiemer, and M. Wyss: Variations in earthquake-size
distribution across different stress regimes, *Nature*, 437, 539-542, doi:
10.1038/nature04094, 2005.
- 10) 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.

- 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：九州地域の活断層の長期評価（第一版）， < https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13feb_chi_kyushu/k_honbun.pdf >，（参照 2021-4-8），2013.
- 12) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：関東地域の活断層の長期評価（第一版）， < https://www.jishin.go.jp/main/chousa/15apr_chi_kanto/ka_honbun.pdf >，（参照 2021-4-8），2015.
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：中国地域の活断層の長期評価（第一版）， < https://www.jishin.go.jp/main/chousa/16jul_chi_chugoku/chu_honbun.pdf >，（参照 2021-4-8），2016.
- 14) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：四国地域の活断層の長期評価（第一版）， < https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17dec_chi_shikoku/shikoku_honbun.pdf >，（参照 2021-4-8），2017.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) Sekiguchi, S.: Efficient seismic ray tracing based on the shortest path method, *Geophys. J. Int.*, 225, 729-743, doi: 10.1093/gji/ggab001, 2021.
- 18) Yano, T. E., T. Takeda, M. Matsubara, and K. Shiomi: Japan Unified high-resolution relocated catalog for earthquakes (JUICE): Crustal seismicity beneath the Japanese Islands, *Tectonophys.*, 702, 19-28, doi: 10.1016/j.tecto.2017.02.017, 2017.
- 19) Waldhauser, F. and W. L. Ellsworth: A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368, doi: 10.1785/0120000006, 2000.
- 20) 松澤孝紀・田中佐千子・小原一成：西南日本における深部低周波微動活動（2019年11月～2020年4月），地震予知連絡会会報，104，388-392，2020.
- 21) Maeda, T. and K. Obara: Spatio-temporal distribution of seismic energy radiation from low-frequency tremor in western Shikoku, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 114, B00A09, doi: 10.1029/2008JB006043, 2009.
- 22) Obara, K., S. Tanaka, T. Maeda, and T. Matsuzawa: Depth-dependent activity of non-volcanic tremor in southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L13306, doi: 10.1029/2010GL043679, 2010.

(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
なし

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