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
(U)	1브		日

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 揚二朗
	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、観測点補正値を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、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3D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3D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値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3D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2D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3D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、2D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3D構造モデルから 測線に沿った2D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3D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・可視化ソフトウエアで ある Petrel などを用いて進めた。

高精細化P波速度構造モデル



変換式に基づきP波速度構造から 変換したS波速度構造モデル

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2g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話題提供を行った。

14



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 Vp/Vs 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 Vp/Vs を示すなど浅層の Vp/Vs 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。





北北西



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 正値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

- 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.: Vp/Vs 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.
- 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	発表者氏名	発表した場所	発表した	国内·
目、口頭・ポスター発		(学会等名)	時期	外の別
表の別)				
Constructing a 3D	仲西 理子・Qin	日本地球惑星科	2021年6月	国内
seismic S-wave	Yanfang • 藤 江	学連合2021年大		
velocity model of the	剛・汐見 勝彦・	숲		
Nankai Trough (ポス	小平 秀一・高橋			
ター)	成実・中村 武史			
潮岬-足摺岬沖南海トラ	中村 恭之・海宝	日本地震学会	2021年10	国内
フにおける稠密反射法	由佳・野 徹雄・	2021 年秋季大会	月	
探査による構造マッピ	白石 和也・藤江			
ング(ポスター)	剛・小平 秀一・			
	木村 学・尾鼻			
	浩一郎・三浦 誠			
	一・仲西 理子			
南海トラフ域の3次元地	仲西 理子・Qin	日本地震学会	2021年10	国内
震波速度・密度構造の構	Yanfang • Liu	2021 年秋季大会	月	
築(口頭)	Xin・藤江 剛・汐			
	見 勝彦 · 小平			

	秀一·高橋 成			
	実・中村 武史・			
	富士原 敏也			
Unsupervised data	Liu Xin・仲西 理	American	2021年12	国外
mining applied to	子・藤江 剛・利	Geophysical	月	
marine active-source	根川 貴志・尾鼻	Union 2021 Fall		
seismic data from a	浩一郎・小平 秀	meeting		
linear OBS array in	<u> </u>			
Nankai Trough (口頭)				

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文(発表題	発表者氏名	発表した場所	発表し	国内•
目)		(学会誌・雑誌	た時期	外の別
		等名)		
Upper-plate controls	Adrien F. Arnulf,	Nature	2022年2	国外
on subduction zone	Dan Bassett,	Geoscience	月	
geometry, hydration	Alistair J.			
and earthquake	Harding,			
behaviour	小平秀一,			
	仲西理子,			
	Gregory Moore			

- (f)特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
- 1) 特許出願
 - なし
- 2) ソフトウエア開発
 - なし
- 3) 仕様・標準等の策定
 - なし

②3D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エアパッケージ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値、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(0S)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、1D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、3D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波速度構造のパータベーション(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1D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。3D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、1D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3D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3D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1D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違はない。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、3D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3D構造モデルを用いることにより、従来の1D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。

22



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 プレートの上面位置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			м
	緯度[°N]	経度[°E]	深さ[km]	- 14
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、震源ー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

25

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が、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 3 D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 1 D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、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 ステムにより求まった震源の深さは、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

- 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) 関ロ渉次: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 Hinet 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.
- 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	発表者氏名	発表した場所	発表した時	国内・
目、口頭・ポスター発		(学会等名)	期	外の別
表の別)				
最短経路法を走時計算	関口 渉次	日本地震学会2021	2021年10月	国内
に適用した3次元速度		年秋季大会		
構造での震源決定 (ポス				
ター)				

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

- (f)特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定
- 1) 特許出願
 - なし
- 2) ソフトウエア開発

なし

- 3) 仕様・標準等の策定
 - なし