2.2 プレート固着・すべり分布のモニタリングシステムの構築

(1) 業務の内容

(a)業務題目「プレート固着・すべり分布のモニタリングシステムの構築」

(h)扣	当	老
(D	/]드		^ H

所属機関	役職	氏名
東北大学大学院理学研究科	教授	太田雄策
東北大学大学院理学研究科	教授	日野亮太
東北大学大学院理学研究科	助教	東 龍介
東北大学大学院理学研究科	技術専門職員	鈴木秀市
東北大学大学院理学研究科	技術専門職員	平原 聡
東北大学大学院理学研究科	技術専門職員	中山貴史
東北大学大学院理学研究科	技術専門職員	出町知嗣
東北大学大学院理学研究科	技術専門職員	海田俊輝
東北大学大学院理学研究科	学術研究員	佐藤真樹子
東北大学大学院理学研究科	技術補佐員	平岡恵美子
東北大学大学院理学研究科	技術補佐員	小鳥谷久美子
東北大学災害科学国際研究所	教授	木戸元之
東北大学災害科学国際研究所	助教	富田史章
海洋研究開発機構	主任研究員	飯沼卓史
海洋研究開発機構	研究員	縣 亮一郎
東京大学地震研究所	教授	篠原雅尚
東京大学地震研究所	教授	小原一成
東京大学地震研究所	教授	塩原肇
東京大学地震研究所	准教授	望月公廣
東京大学地震研究所	助教	悪原岳
東京大学地震研究所	助教	山田知朗
東京大学地震研究所	技術専門職員	阿部英二
東京大学地震研究所	技術専門職員	田中伸一
東京大学地震研究所	技術専門職員	増田正孝
東京大学地震研究所	技術専門職員	宮川幸治
東京大学地震研究所	技術専門職員	渡邉篤志
東京大学地震研究所	技術職員	橋本匡
東京大学地震研究所	技術職員	秋山峻寬
京都大学防災研究所	准教授	伊藤喜宏
京都大学防災研究所	助教	山下裕亮

(c) 業務の目的

南海トラフにおける巨大地震震源域の様々な時間帯域におけるプレート間固着・すべ りの現状把握を実現し、情報発信するために、現実的な3D構造モデルに基づいた、プ レート境界及び分岐断層等の海域断層を含めた固着・すべりを、3D構造モデルの不確 実性を含む、推定の曖昧さとともに定量化するシステム開発を行う。同システムにはプ レート境界以外の断層も含む3D構造モデルに基づいた、地下の断層におけるすべりと 地表及び海底での地殻変動を結びつけるグリーン関数を組み込む。さらに3D構造モデ ルに不均質粘弾性構造を追加したグリーン関数を導入する。これによって、プレート境 界におけるすべり遅れの蓄積、地震時のすべり及びゆっくりすべり等の時空間分布を迅 速かつ精度よく把握するとともに、その推定誤差を定量的に提示し、情報発信できるシ ステムのプロトタイプを実現する。加えて分岐断層等のプレート境界以外の海域断層も 考慮に入れた推定を試みるとともに、広帯域海底地震観測により、プレート境界浅部に おけるスロー地震活動や非プレート境界の地震活動の詳細な時空間把握を行う。3 D構 造モデルが更新されれば、それに追随してグリーン関数を修正して随時再解析を行う。 これらのうち、プレート境界及び分岐断層等の海域断層を含めた固着・すべりの推定の 曖昧さを含めた推定技術については、国土地理院が別途進めている「南海トラフ沿いの 巨大地震発生に対応するための高精度な地殻活動把握手法の研究開発」と密接に連携す る。また、地震時すべり分布の即時推定については、国土地理院で運用している REGARD (電子基準点リアルタイム解析システム) への技術移転を念頭に置いた開発を行う。

(d) 5か年の年次実施計画

1) 令和2年度:

正確な地殻変動の再現を目指し、現実的な3D構造モデルを用いたグリーン関数の 構築を行うために、3D構造モデルに基づくグリーン関数の計算を行った。推定され た断層すべりが持つ誤差を定量評価するための手法の枠組みを得るために、プレート 間固着・すべり分布推定の誤差を定量評価する手法の開発を開始した。また、南海ト ラフプレート境界浅部におけるスロー地震活動や非プレート境界の地震活動の詳細な 時空間把握を目指し、南海トラフ中西部における長期海底地震観測を開始した。

2) 令和3年度:

正確な地殻変動の再現を目指し、現実的な3D構造モデルを用いたグリーン関数の 構築及び改良を行った。推定された断層すべりが持つ誤差を定量評価するための手法 の開発を継続した。また、南海トラフプレート境界浅部におけるスロー地震活動や非 プレート境界の地震活動の詳細な時空間把握を目指し、広帯域長期海底地震観測を継 続した。

3) 令和4年度:

プレート境界以外の断層面が地震間や地震時の地殻変動に与える影響を評価するこ とを目指し、分岐断層でのすべりによる地表・海底における変位グリーン関数を得た。 構築した3D構造モデルの不確実性が固着・すべり分布推定に与える影響について予 察的知見を得た。推定された断層すべりが持つ誤差を定量評価するための手法の開発 を継続した。粘弾性構造を考慮した地殻変動場の再現を目指し、3D粘弾性構造モデ ルに基づいたグリーン関数の作成に着手した。さらに、南海トラフプレート境界浅部 におけるスロー地震活動や非プレート境界の地震活動の詳細な時空間把握を目指し、 広帯域地震観測データを得るとともに、浅部プレート境界における固着状況の把握・ モデル化について予察的な知見を得た。

4) 令和5年度:

プレート境界以外の断層面が地震間や地震時の地殻変動に与える影響を評価する ことを目指し、熊野灘周辺まで延長した分岐断層でのすべりによる地表・海底での変 位グリーン関数を得るとともに、プレート境界と海域断層におけるすべり・固着分布 を同時推定した予察的結果を得た。また、令和3年度に行った、現実的な3D構造モ デルを用いたグリーン関数の改良を行った。構造モデル等の不確実性が固着・すべり 分布推定に与える影響について予察的な知見を得た。さらに、南海トラフプレート境 界浅部におけるスロー地震活動や非プレート境界の地震活動の詳細な時空間把握を目 指し、広帯域地震観測データを得るとともに、浅部プレート境界における固着状況の 把握・モデル化について予察的な知見を得た。

5) 令和6年度:

分岐断層及びプレート境界における固着・すべり状態を、南海トラフ沿いに設置さ れている長期孔内観測システムで取得されるデータに基づいて把握することを目指 し、海底及び海底下の変位及び歪応答グリーン関数を計算した。海域断層及びプレー ト境界における固着・すべりの履歴を同時推定するための手法を構築した。開発を進 めた誤差の定量評価付きプレート間固着・すべり分布即時推定手法を、REGARD へ技術 移転するために必要な情報を得た。南海トラフ中西部における長期観測型海底地震観 測データの取りまとめを行うとともに、それを用いた浅部プレート境界における固着 状況の把握・モデル化についてまとめの知見を得た。

(e) 令和6年度業務目的

正確な地殻変動の再現を目指し、現実的な3D構造モデルを用いたグリーン関数の 構築及び改良を行う。具体的には、昨年度までに構築した南海トラフ全域の分岐断層 面及びプレート境界面でのすべりに対する、長期孔内観測システムに設置されている センサーの位置における歪や傾斜応答に関するグリーン関数を得る。プレート境界と 海域断層におけるすべりや固着分布の同時推定を、数値実験を中心として実施する。 さらに、それら技術を国土地理院 REGARD システムに技術移転するための知見を整理す る。また、南海トラフプレート境界浅部におけるスロー地震活動や非プレート境界の 地震活動の詳細な時空間把握を目指した広帯域長期海底地震観測を終了するとともに、 得られたデータから、浅部プレート境界における固着状況の把握・モデル化について の知見を得る。

(2)令和6年度の成果

①固着・すべり状態の変化による地殻変動の計算

(a) 業務の要約

プレート境界におけるすべり遅れの蓄積や、地震時のすべり、スロースリップなど の時空間分布を迅速かつ精度よく把握するシステムの構築を実現するため、地殻変 動データからプレート間の固着・すべり分布を推定するうえで必要となる、地下の 断層におけるすべりと海底及び海底下での地殻変動を結びつけるグリーン関数を、 現実的な3D構造モデルに基づいて計算する。

本年度は上記目的達成のため、昨年度までに構築した、熊野灘周辺から四国沖にかけての分岐断層面(図2-2-①-1)と、全国一次地下構造モデルにできうる限 り忠実に従った有限要素法モデルの中に設定されたプレート境界面断層面(図2-2-①-2)を用い、それぞれの面におけるすべりによって生じる、長期孔内観測 システムのセンサー位置及び孔口における歪や傾斜を定量的に評価できるようにす るため、変位応答及び変位の空間勾配応答グリーン関数の計算を実施した。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ中部域及び西部域においては、複数の長期孔内観測システムが設置さ れていて、間隙水圧計や歪計、傾斜計による地殻変動観測が行われている。地震・ 津波観測監視システム (DONET)の基幹ケーブルを介してのリアルタイムでのデータ 取得・監視が実施されており、毎月の地震調査委員会にはモニタリング状況に関す る資料が提出されている (図2-2-①-3)。これまでに、近傍のプレート境界に おける長期的スロースリップイベントによると考えられる変動が複数回検出されて いるものの^{1,2)}、プレート境界のどこがどの程度すべったのかを定量的に把握する ためには、海底の地形や地下の構造が正しく反映された3D構造モデルに基づいて 計算されたグリーン関数を用いて解析を行う必要がある。

南海トラフ域全域に対して、全国一次地下構造モデル^{3,4}に基づいて計算された グリーン関数ライブラリがすでに整備されていた⁵⁾が、そこで用いられている有限 要素法モデルのメッシュサイズは1km 程度であるため、海底面から1km 未満の深 度に設置されている長期孔内観測システムのセンサーによって計測された間隙水圧 変化(≒体積歪)に基づいてプレート境界におけるすべりを推定するには、空間解 像度が不足していた(図2-2-①-4参照)。また、長期孔内観測システムには傾 斜計も設置されているが、そのデータを活用するためには、センサーの位置におけ る変位場の空間勾配値に関するグリーン関数も必要である。このため、2020年度に 本事業で開発した局所的に有限要素法モデルのメッシュを細分化する手法と変位場 の空間微分値の出力値を得るためのサブルーチンを再度適用し、それらを用いた有 限要素法モデルの局所高精細化及びグリーン関数の計算を、修正されたプレート境 界面と昨年度までに構築された分岐断層面それぞれのすべりに対して、実施するこ ととした。 (c) 業務の成果

昨年度までに修正や構築を終えた、プレート境界面及び分岐断層面をすべり面と して設定したうえで、スプライン関数を基底として表現された単位すべり分布に対 する、長期孔内観測システムのセンサーの位置及び同システムの孔口(海底面)の 位置それぞれでの変位及び変位の空間勾配応答の計算を、地球シミュレータ上で実 施した(図2-2-①-5)。スプライン関数を配置する位置を変えていき、走向方 向及び傾斜方向の単位すべりそれぞれに対するグリーン関数を得た(図2-2-① -6)。さらに、昨年度と同様、作成した DEM データをそのまま用いた場合、複数の 層の物性値を一つにまとめた場合、及び、すべての層の物性値を同じにした場合につ いて計算を行い、物性の与え方によるグリーン関数の違いを把握できるようにした。



図2-2-①-1 昨年度までに構築した、南海トラフ沿いの構造探査測線(黒実線・緑実線)に沿って取得された構造断面から構築した分岐断層面。等深線は300m 間隔。各測線において読み取られた分岐断層の上端(海底面と分岐断層面の交点) 及び下端(プレート境界面と分岐断層面の交点)の位置を赤丸及び青丸で示した。 測線の位置を含め背景の地図は Park et al. [2010]⁶⁾ および Nakamura et al. [2022]⁷⁾からの抜粋。



図2-2-①-2 昨年度修正したプレート境界断層面の断面。(左) 測線 ABCD に 沿って取った断面のトラフ軸付近の拡大図(太線部分)。紫・マゼンタ線はそれぞれ、 分岐断層・プレート境界位置を表す。(右)断面測線の位置。



 図 2 - 2 - ① - 3 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された4点の長期孔内 観測点(C0002、C0010、C0006及びC9038)とDONETの観測点配置図(海洋研究開発 機構(2025,第409回地震調査委員会資料)⁸⁾より)。(a)DONET全域。(b)孔内観 測点(C0002、C0010)周辺。(c)孔内観測点(C0006)周辺。



図2-2-①-4 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された3点の長期孔内 観測点(C0002、C0010、C0006)の設置位置(地震断面図に投影したもの)(海洋研 究開発機構(2025,第409回地震調査委員会資料)⁸⁾より)。海底下980m(C0002)、 650m(C0010)、495m(C0006)まで掘削した孔内における地殻内の間隙水圧・体積歪 (C0010、C0006)・光ファイバ歪計(C9038)・地震動などの記録をDONETケーブルを 用いてデータ伝送することにより連続リアルタイム観測を実施している。



図2-2-①-5 プレート境界面(左)及び分岐断層面(右)上に配置したスプ ライン関数のノード配置。プレート境界面については計457点、分岐断層について は計213点のノードをそれぞれ配置した。それぞれの位置に頂点を持つスプライン 関数で走向・傾斜方向のすべり分布を与えて地表・海底での変位を計算し、グリー ン関数を得た。



図2-2-①-6 (左)図2-2-①-5の左側で示したプレート境界面に配置 したノードのうちの141のノードに沈み込み方向に対して垂直な方向のすべりを与 えた場合(上段)と、201(下段)のノードに沈み込み方向に沿った方向のすべりを 与えた場合の、孔内観測点のセンサー位置における平面ひずみの主ひずみ成分と体 積ひずみ。(右)図2-2-①-5の右側で示した分岐断層面に配置したノードのう ちの81のノードに沈み込み方向に対して垂直な方向のすべりを与えた場合(上段) と、141(下段)のノードに沈み込み方向に沿った方向のすべりを与えた場合の、孔 内観測点の孔口位置における平面ひずみの主ひずみ成分と体積ひずみ。 (d) 結論ならびに今後の課題

本業務により、精密な3D構造モデルに基づいた有限要素法モデルを用いて、プ レート境界面並びに南海トラフ近傍の分岐断層面における固着・すべり分布を把握 するために必要なグリーン関数を整備することができた。今後、今回計算したグリ ーン関数を用いた解析を実施して、プレート境界と分岐断層におけるすべりの識別 可能性を検討するとともに、過去のイベントに伴う地殻変動データの再解析を行っ て、プレート境界及び分岐断層でのすべり分布の推定を行うことが可能となった。

- (e) 引用文献
 - Araki, E., Saffer, D. M., Kopf, A. J., Wallace, L. M., Kimura, T., Machida, Y., et al. (2017). Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust. Science, 356(6343), 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120.
 - 2) Ariyoshi, K., T. Iinuma, M. Nakano, T. Kimura, E. Araki, Y. Machida, K. Sueki, S. Yada, T. Nishiyama, K. Suzuki, T. Hori, N. Takahashi, and S. Kodaira (2021). Characteristics of Slow Slip Event in March 2020 Revealed From Borehole and DONET Observatories. Front. Earth Sci., 8, 679, doi:10.3389/feart.2020.600793.
 - 3) Koketsu, K., H. Miyake, and Y. Tanaka (2009). A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan. Tectonophysics, 472(1-4), 290-300, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.037.
 - Koketsu, K., H. Miyake, and H. Suzuki (2012). Japan integrated velocity structure model version 1, in Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1773, Lisbon.
 - 5) Hori, T., R. Agata, T. Ichimura, K. Fujita, T. Yamaguchi, and T. Iinuma (2021). High-fidelity elastic Green's functions for subduction zone models consistent with the global standard geodetic reference system. Earth Planets Space, 73, 41, doi:10.1186/s40623-021-01370-y.
 - 6) Park, JO., G. Fujie, L. Wijerathne, T. Hori, S. Kodaira, Y. Fukao, G. F. Moore, N. L. Bangs, S. Kuramoto, and A. Taira (2010). A low-velocity zone with weak reflectivity along the Nankai subduction zone. Geology, 38, 283-286, https://doi.org/10.1130/G30205.1.
 - Nakamura, Y., K. Shiraishi, G. Fujie, S. Kodaira, G. Kimura, Y. Kaiho, T. No, and S. Miura (2022). 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.
 - 8)海洋研究開発機構(2025).南海トラフ孔内(間隙水圧)観測による浅部ゆっくりすべりモニタリング,第409回地震調査委員会,2025年1月15日.

- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
 - 1) 学会等におけるロ頭・ポスター発表 なし
 - 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	発表した	国内·
目)		(学会誌・雑誌等名)	時期	外の別
Revisiting Slip	Raymundo	Journal of	2024.12	国外
Deficit Rates and Its	Plata-	Geophysical		
Insights Into Large	Martinez,	Research: Solid		
and Slow Earthquakes	Takeshi	Earth		
at the Nankai	Iinuma,			
Subduction Zone(査読	Fumiaki			
あり)	Tomita,			
	Yasuyuki			
	Nakamura,			
	Takuya			
	Nishimura,			
	Takane Hori			

(g) 特許出願、ソフトウエア開発、仕様・標準等の策定

- 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

②固着・すべり分布の即時推定

(a) 業務の要約

南海トラフにおける巨大地震震源域の様々な時間帯域におけるプレート間固着・す べりの現状把握を実現し、情報発信するために、現実的な3D構造モデルに基づいた、 プレート境界及び分岐断層等の海域断層を含めた固着・すべりを、3D構造モデルの 不確実性を含む、推定の曖昧さとともに定量化するシステム開発を行う。

上記目的を達成するために本年度は、昨年度に引き続きプレート境界と海域断層に おけるすべり・固着分布を同時推定しつつ、その推定誤差を定量化する手法の高度化 を進めた。さらにこれまでに開発した技術を活用し、2024年度能登半島地震における 地震時すべり分布とその推定不確実性の推定を実施した。また、開発した技術のREGARD への技術移転に向けた知見の整理を行うとともに、国土地理院測地観測センター電子 基準点課との打ち合わせを令和6年2月18日に実施し、本研究課題で得られた成果の REGARDへの技術移転とその課題について議論を行った。

(b) 業務の実施方法

プレート境界において発生する超巨大地震に付随して発生が危惧される海域にお ける断層のうち、特に分岐断層におけるすべりを同時推定することは、津波即時予測 の観点で重要である。本年度は、前年度に引き続き、南海トラフにおけるプレート境 界型地震と同時に付加体内部に発達する分岐断層がすべったと仮定し、そこから期待 される変位を入力として、それらを昨年度までに開発を進めてきたベイジアン逆解析 手法を用いてそれらすべりの同時推定を試みた。今年度は分岐断層を南海トラフ域全 域に配置し、さらに N-net の水圧計データによる地殻上下変動を陸域 GNSS 観測データ と併合利用した場合の推定精度の定量評価を実施した。分岐断層においては西から並 べた4枚目の断層 (sp4と以下呼称) に5mのすべりを仮定した。観測データとして は GEONET 観測点における変位三成分および、南海トラフに敷設されている DONET およ び N-net の海底水圧計データによる上下成分を用いた。比較のために、N-net データ を利用しなかった場合の結果も併せて計算した。パラメータ数が多いことから収束性 の悪化を克服するために、サンプリング手法として Hamiltonian Monte Carlo 法(HMC 法)¹⁾を採用した。尤度関数の標準偏差は GEONET の水平成分が2cm,上下成分が5cm, DONET および N-net の上下成分が 10cm をそれぞれ仮定した。プレート境界のすべり分 布の正則化拘束には、von Karmanの自己相関関数を用いた。計算は 5000 連鎖分計算 し、100連鎖をBurn-inとして除外し、最終的な事後確率分布を得た。

これまでに開発した技術を活用し、2024 年度能登半島地震における地震時すべり分 布とその推定不確実性の推定を実施した。推定には同様に HMC 法を用いた。観測デー タとしては GNSS データおよび SAR データを用いた。同地震は地殻内で発生した地震で あり、地震時すべり推定においては断層幾何の仮定が必要になる。ここでは、構造探 査等から事前に指摘されていたリストリックな断層を模した断層形状を仮定し、その 上での地震時すべりを推定した。

開発した技術の REGARD への技術移転に向けた知見の整理を行うとともに、国土地 理院測地観測センター電子基準点課との打ち合わせを令和6年2月18日に実施し、本 研究課題で得られた成果の REGARD への技術移転とその課題について議論を実施した。

(c) 業務の成果

得られた事後確率分布の平均値にもとづいて描画したすべり分布および同時推定 された分岐断層のすべり量(以下、平均値モデルと呼ぶ)および推定されたすべり量か ら仮定した真値を差し引いたもの、また 60%信頼区間を2-2-2-2-1に示す。同結 果より、N-net を使用しなかった場合、高知県沖合に配置した分岐断層 sp4 において 推定されたすべり量は平均値で-2.42m となり、真値(5m)と大きくかけ離れたものに なった。また 60%信用区間の値も 22.52m ときわめて大きくなった。また、sp4 断層と 重なるプレート境界小断層にてすべりが過大評価の傾向を示した。これらの結果は、 観測網から離れた場所における分岐断層の推定精度はきわめて低いことを明瞭に示す。 一方、N-net を追加した場合、推定されたすべり量は平均値で 4.69m となり、真値に 近い値が推定された。また 60%信用区間も 1.39m と小さく、すべりをよく拘束できた。 さらに、土佐海盆-日向海盆のプレート境界浅部におけるすべりも推定の精度が向上し、 観測網の追加の効果が明瞭であるとともに、開発した手法がプレート境界および海域 断層におけるすべりを同時推定できる能力があることが明確になった。

令和6年2月 18 日に実施した国土地理院測地観測センター電子基準点課との打ち 合せにおいて、本研究課題で得られた成果の REGARD への技術移転とその課題について 議論を行った。その結果、昨年度までに進めてきた本 PJ で構築した3D構造モデルに もとづくグリーン関数の提供およびその精度評価の共同実施結果の再確認を行った。 さらに、既に技術移転を完了しているマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC法)を用い た地震時断層推定とその誤差評価手法を火山体における力源推定にも活用するための 技術についての実装状況について議論を実施した。同技術は火山版 REGARD として国土 地理院内でシステム化が進んでいる状況にあり、本課題で得られた成果のアウトカム の一つである。



図2-2-2-2-1 分岐断層を南海トラフ域全域に配置し、さらに N-net の水圧計データ による地殻上下変動を陸域 GNSS 観測データと併合利用した場合の推定精度の定量評価の 実施結果。上段:陸域 GNSS 観測網である GEONET および DONET を用いて推定した結果。sp4 と記載がある分岐断層に5mのすべりを仮定した。下段:上段に加え、N-net も加えて推定 した結果。上段、下段とも、左から平均値モデル、モデルから真値を差し引いた結果、60% 信用区間をそれぞれ示す。



図 2 - 2 - 2 - 2 Yamada et al. (2025)より引用。開発した手法によって推定された 2024 年能登半島地震の地震時すべり分布の結果。左図:得られた事後確率分布の平均値による 地震時すべり分布モデル。右図:左図の a-a', b-b' c-c'のそれぞれにおける余震分布と 仮定した断層面との比較。リストリックなモデルを仮定することで両者が大局的に一致する。

(d) 結論ならびに今後の課題

最終年度である本年度は、昨年度に引き続きプレート境界と海域断層におけるすべ り・固着分布を同時推定かつ、その推定誤差を定量化する手法の高度化を進めた。さ らにこれまでに開発した技術を活用し、2024年度能登半島地震における地震時すべり 分布とその推定不確実性の推定を実施した。また、開発した技術のREGARDへの技術移 転に向けた知見の整理を行うとともに、国土地理院測地観測センター電子基準点課と の打ち合わせを実施し、本研究課題で得られた成果のREGARDへの技術移転とその課題 について議論を行った。今後、REGARDに対する実際の実装作業に向けて議論を加速さ せるとともに、時間帯域としてよりゆっくりとした現象等の検知能力の向上等に資す る研究開発が必要である。

- (e) 引用文献
 - Yamada, T., K. Ohno, and Y. Ohta, Comparison between the Hamiltonian Monte Carlo method and the Metropolis-Hastings method for coseismic fault model estimation, *Earth, Planets Space*, doi:10.1186/s40623-022-01645-y, 2022.

- 2) Yamada T., Ohta Y., Nishimura T., Yoshida K., Hiramatsu Y., Kinoshita Y., Coseismic slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake deduced from dense global navigation satellite system network and interferometric synthetic aperture radar data: effect of assumed dip angle. *Earth Planets Space* 77, 19 (2025). https://doi.org/10.1186/s40623-025-02154-4, 2025.
- (f) 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	一発表
----	------------	-----	-----

	1			
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)				
稠密 GNSS 観測網に基	山田太介	JpGU 2024	2024.5	国内
づく 2024 年能登半島	太田雄策			
地震のすべり分布の推	西村卓也			
定(口頭)	平松良浩			
稠密測地観測にもとづ	山田太介	日本測地学会第142	2024.10	国内
く 2024 年能登半島地	太田雄策	回講演会		
震の地震時すべり分布	西村卓也			
と断層幾何の定量評	平松良浩			
価(口頭)	木下陽平			
	吉田圭佑			
南海トラフにおけるプ	山田太介	日本測地学会第142	2024.10	国内
レート境界および分岐	太田雄策	回講演会		
断層上の地震時すべり				
の 同時推定に関する				
検証 (ポスター)				
稠密 GNSS 観測網に基	山田太介	日本地震学会 2024	2024.10	国内
づく 2024 年能登半島	太田雄策	年度秋季大会		
地震のすべり分布およ	西村卓也			
び断層幾何の網羅的評	平松良浩			
価(口頭)	木下陽平			
	吉田圭佑			
Coseismic Slip	Yamada T.	AGU Annual Meeting	2024.12	国外
Distribution and	Y. Ohta	2024		
Fault Geometry	T. Nishimura			
Evaluation of the	Y. Hiramatsu			
2024 Noto Peninsula	Y. Kinoshita			
Earthquake Deduced	K. Yoshida			
from Very Dense GNSS				
Networks (ポスター)				

 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	発表した	国内·
目)		(学会誌・雑誌等名)	時期	外の別
Real-time modeling of	Ohno K.,	Earth, Planets and	2024.11	国外
transient crustal	Y.Ohta,	Space		
deformation through	<u>N.</u> Takamatsu,			
the quantification of	H.Munekane			
uncertainty deduced	M. Iguchi			
from GNSS data (査読				
あり)				
Coseismic slip	Yamada T.	Earth, Planets and	2025.2	国外
distribution of the	Y.Ohta,	Space		
2024 Noto Peninsula	T.Nishimura,			
earthquake deduced	K. Yoshida,			
from dense global	Y. Hiramatsu			
navigation satellite	Y. Kinoshita			
system network and				
interferometric				
synthetic aperture				
radar data: effect of				
assumed dip angle				
(査読あり)				

(g) 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

- ③ 浅部プレート境界の固着状態の推定(広帯域地震観測)
- (a) 業務の要約

浅部スロー地震活動はプレート境界浅部におけるプレート間固着状態を把握する 上で有用な指標の1つである。本研究では浅部スロー地震活動が活発な南海トラフ 中西部において広帯域海底地震観測によりプレート境界浅部におけるスロー地震 活動の詳細な時空間把握を行う。また、プレート境界からの分岐断層付近に代表さ れる非プレート境界域における地震活動の時空間把握も行う。観測より得られるこ れらの地震活動の時空間変化を、現実的な3D構造モデルに基づいた、プレート境 界および分岐断層等の海域断層を含めた固着・すべりを、3D構造モデルの不確実 性を含む、推定の曖昧さとともに定量化するシステム開発に役立てる。

本年度は、南海トラフ西部に位置する日向灘に昨年度設置した海底地震計9台の 回収を行った。回収した海底地震計には良好なデータが記録されていた。観測期間 中に発生した地震活動について震源決定を行い、ほとんどの地震がプレート内部で 発生していることを示唆する結果が得られた。また、これまでの観測データの精査 を進め、昨年度の解析のアップデートを行った。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ中西部域ではトラフ近傍のプレート境界浅部域においてスロー地震の 発生が確認されており、特に海底観測によって活動特性が明らかになりつつある ^{1,2,3,4)}。これらの浅部スロー地震活動の時空間変化はプレート間固着状態を反映し ていると考えられる。また、浅部スロー地震のうち、浅部低周波微動に関しては時 間と共に発生領域が移動するマイグレーション現象が確認されている^{2,3)}。これら は短期的なスロースリップの発生を示唆しており^{2,3)}、南海トラフ中部域において は孔内間隙水圧観測の変化からもスロースリップの発生が推定されている 4)。浅部 超低周波地震は波形解析からプレート境界地震と同様の発震機構であることが明ら かになっており¹⁾、浅部低周波微動と浅部超低周波地震が同期発生していることも 明らかになっている^{2,3)}。これらの異なる周波数帯域を持つ地震活動特性を総合的 に理解するためには、海底における地震近傍での広帯域観測が必要不可欠である。 南海トラフ中西部では1年~数年間隔でマイグレーション現象を伴う比較的規模の 大きな浅部スロー地震活動が発生しており、本研究期間中にも複数回の浅部スロー 地震活動が発生することが期待される。南海トラフ域では、過去の地震の震源域内 にプレート境界からの分岐断層が存在することが明らかにされ⁵、地震発生様式や プレート間固着への影響が議論されている。そこで、浅部スロー地震活動と非プレ ート境界域における地震活動の詳細な時空間変化を明らかにすることを目的として、 南海トラフ中西部の浅部スロー地震震源域周辺に通常の地震から浅部低周波微動、 超低周波地震まで観測できる広帯域海底地震計を含めた稠密観測網を構築すること とした。

(c) 業務の成果

南海トラフ中西部のプレート境界浅部におけるスロー地震活動と非プレート境界 域における地震活動の詳細な時空間把握が本研究業務の目的である。これらの結果 は、3D構造モデルに基づいたプレート境界および分岐断層等の海域断層を含めた 固着・すべりを定量化するシステム開発に寄与する。本年度は、南海トラフ西部に 位置する日向灘に昨年度設置した小型広帯域海底地震計⁶⁾9台の回収を行い,観測 を終了した(図2-2-③-1、写真2-2-③-1~4)。

設置および回収作業には、海洋エンジニアリング株式会社所属の第三開洋丸(2024 年8月16日宮崎港出港、同年同月19日宮崎港帰港)を使用した。昨年度より日向 灘のプレート境界浅部域におけるプレート間固着状況の把握に着目し、海底地震計 観測網を新たに構築して観測を行っていた。本観測網の特徴は,海底地震計の設置 間隔を該当領域のプレート境界の深さに近い15 km 程度とし、特にトラフ軸周辺に おける地震・スロー地震活動の有無を確認し,深さ方向の精度向上が期待できるよ うな観測網としていた.同領域には別プロジェクト(文部科学省 災害の軽減に貢献 するための地震火山観測研究計画(第2次) 課題番号 DPRI01⁷¹)により展開されてい た海底地震観測網と連携可能となるように観測点が配置されていた。今回の回収を 実施した海底地震観測網での観測期間中には、地震活動について良好なデータが取 得されていることを確認した(図2-2-③-2)。

第4期観測にあたる 2023 年8月から 2024 年8月の観測データについて、 気象 庁一元化カタログに掲載されている地震 75 個について震源再決定を行った(図2-2-③-3)。第4期観測中は、活発なスロー地震活動の発生は確認されておらず、 観測網内での通常の地震活動についても低調であった。また、得られた観測データ から、P波およびS波の到達時を手動で検測し、hypoMH⁸⁾を用いて震源計算を行っ た。また発震機構解⁹の決定のために P 波初動の極性、地震の規模を推定するため に最大振幅を読み取った。hypoMHによる震源決定では、PS 変換波の走時を基に堆積 層補正値の初期値を求め、走時残差を補正として取り入れる繰り返し震源決定によ り、各観測点の観測点補正値を求めた。一次元速度構造は対象地域および周辺域の 地震波トモグラフィー及び地震波構造探査の結果^{10,11)}を元とした。さらに、hypoMH の結果を初期値として、3次元速度構造を用いる double difference tomography^{12,13)} (tomoDD-SE)により、震源決定を行った。速度構造には、Nakanishi et al., 2018¹⁴⁾による 3 次元構造を平滑化した 3 次元構造を用いた。なお、tomoDD-SEは、inversionにより、速度構造を求めることも可能であるが、これまでの解析 と同じように地震数が多くないので、速度構造については固定とした。なお、第4 期観測については、文部科学省 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計 画(第2次)(課題番号 DPRI01⁷⁾)の観測点との併合処理とした。震源再決定の結果、 気象庁による一元化震源と比較すると、震央位置は大きく変化しないが、震源の深 さは全体的に浅くなり、多くの震源の深さが 10 km から 30 km となり、面を形成す ることがわかった。この面は西に緩やかな角度で傾いている。現在求められている 3次元構造モデルによるプレート境界モデル¹⁴⁾と比較すると、ほとんどの地震がフ

ィリピン海プレート内部で発生していることが推定される。また、地震は時間的に 均等に発生しており、観測期間内では群発活動等の時間的に集中した活動は確認さ れなかった。

昨年度実施した第1期観測にあたる 2021 年3月~2022 年1月の観測データにつ いて、本年度は昨年度の暫定結果で課題であった観測網外に移動してしまった地震 クラスターの震源決定精度向上に取り組み、最終的な結果を得た。波形の相関処理 を交えた検測の見直し等、データそのものの見直しを行って震源再決定を行ったが、 海底地震観測網のみでは震源決定精度の向上がこれ以上見込めなかったため、陸上 地震観測点との併合処理を行い、かつHu et al., 2024¹⁵)と同様に3次元速度構造 を用いる double difference tomography^{12,13)} (tomoDD-SE)により、震源決定を行っ た。3次元速度構造モデルは、海域は Nakanishi et al., 2018¹⁴⁾による3次元構 造、陸域は JMA2001 とし、両者の接合部は不連続がないように調整して連続的な構 造を作成した。さらに、海底地震計観測網直下だけでなく、陸上観測網と海底地震 観測網の間に位置するイベントを新たに解析対象に加えた。これらの追加されたイ ベントについて海底地震計での検測を新たに行った。

解析の結果、陸から近いイベントは気象庁一元化震源と震源位置が水平・深さと もに大きく変わらなかったが、陸から離れるに従ってずれが大きくなることが確か められた。最終的な震源計算結果では、これまで上盤側プレート内の地震のように 見えていた地震クラスターは、プレート境界付近に震源が求まり、3次元速度構造 を用いて計算された射出角を使用した発震機構解は低角逆断層型を示すことが分か った(図2-2-③-4)。つまり、震源再決定によって観測網外に出てしまった地 震クラスターは、プレート境界地震であると結論づけられた。この地震クラスター の活動時期は、浅部スロー地震活動に同期して活動が活発化しており、浅部スロー 地震活動の影響を同じプレート境界面上で受けたことで発生したと考えられる。一 方、震源再決定の結果、従来よりも震源が down-dip 側に移動したため、海底地震観 測データからこれまでに得られている浅部微動の活動域とは離れる形となった。つ まり、通常の地震の震源域と浅部微動の活動域^{2,3)}の間にはギャップのような領域 が存在している可能性が示唆される。今後、より議論を深めるためには浅部微動も しくは浅部超低周波地震の精密な震源決定が必要であるが、そのための観測技術・ 解析技術の開発も重要である。

65



図2-2-③-1 設置した海底地震計位置

令和5年度に設置され,令和6年度に回収した小型広帯域海底地震計9台の位置。 赤丸は小型広帯域海底地震計が設置されていた位置を示す。なお、図中のコンター は1000m間隔の等水深線である。



写真2-2-3-1 観測に使用した研究船「第三開洋丸」



写真2-2-3-2 海面に浮上した海底地震計



写真2-2-3-3 海底地震計の回収



写真2-2-3-4 回収された海底地震計



Times from 23:31:55 (JST) [s]

図2-2-3-2 海底地震計の地震記録例。観測網直下で発生した地震の海底地震 計記録。9点分の上下動記録を示している。周波数フィルターは施していない。気象 庁による震源決定では、震源時は 2023/11/20 23:31:59.1 (日本時間)、震央は東経 132.5670 度、北緯 30.5185 度、震源の深さは 57.0km、マグニチュードは 2.3 である。



図2-2-③-3 第4期観測である 2023 年8月から 2024 年8月までの観測期 間中に、気象庁が決定した通常の地震の震源再決定結果。カラーで示す丸は3次 元構造と double difference 法による震源決定結果,黒色の丸は絶対走時と1次 元構造を用いる震源決定結果(中間結果)をしめす。灰色丸は気象庁が決定した震 源位置である。赤四角は海底地震観測点,実線は等水深線である。



図2-2-③-4 第1期観測にあたる2021年3月~2022年1月に発生した地震 の震源再決定結果と発震機構解析の結果。〇は震源で赤色が本研究、黄色が気象庁 一元化震源カタログ、黒の逆三角は海底地震観測点、黒四角は陸上観測点。右図の 深さ断面図に示された灰色の線はプレート境界モデル¹⁵⁾、発震機構解は下半球等積 投影。

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度は最終年度にあたり、今年度に取得したデータの解析を進め、気象庁一元 化カタログに掲載されている通常の地震の震源を精度良く求めた。その結果、多く の震源は深さが気象庁一元化震源よりも浅くなり、浅部スロー地震震源域内で発生 する地震は深さ20 km程度で発生している地震が多い。一方、浅部スロー地震震源 域とプレート境界地震発生域の境界部分で発生する地震は、深さがほぼプレート境 界の深さとなった。今後は、気象庁一元化カタログにない地震についても、本研究 計画で得られた海底観測データを用いた解析を行い、より詳細な通常の地震の時空 間分布を把握することが重要である。

- (e) 引用文献
 - Sugioka, H., Okamoto, T., Nakamura, T., Ishihara, Y., Ito, A., Obana, K., Kinoshita, M., Nakahigashi, K., Shinohara, M., and Fukao, Y.: Tsunamigenic potential of the shallow subduction plate boundary inferred from slow seismic slip, Nature Geoscience, 5 (6), 414-418, doi: 10.1038/NGE01466, 2012.
 - Yamashita, Y., Yakiwara, H., Asano, Y., Shimizu, H., Uchida, K., Hirao, S., Umakoshi, K., Miyamachi, H., Nakamoto, M., Fukui, M., Kamizono, M., Kanehara, H., Yamada, T., Shinohara, M., and Obara, K.: Migrating tremor

off southern Kyushu as evidence for slow slip of a shallow subduction interface, Science, 348 (6235), 676-679, doi:10.1126/science.aaa4242, 2015.

- Yamashita, Y., M. Shinohara and T. Yamada, Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations, Earth, Planets and Space, 73(1), 196, doi:10.1186/s40623-021-01533-x, 2021.
- 4) Araki, E., Saffer, D. M., Kopf, A. J., Wallace, L. M., Kimura, T., Machida, Y., et al.: Recurring and triggered slow-slip events near the trench at the Nankai Trough subduction megathrust. Science, 356(6343), 1157-1160, doi:10.1126/science.aan3120, 2017.
- 5) Park, J.-O., Tsuru, T., Kodaira, S., Cummins P.R.and Kaneda, Y.: Splay fault branching along the Nankai subduction zone, Science, 297, 1157-1160, 2020.
- 6) Shinohara, M., Yamada, T., Shiobara, H., and Yamashita, Y., Development of Compact Broadband Ocean Bottom Seismometer for Monitoring of Slow Earthquakes, Seism. Res. Lett, 92(6), 3610-3625, https://doi.org/10.1785/0220210100, 2021.
- 7)「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」令和5年度成果報告書、 https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKY0/_/f/2025/02/R5SeikaGaiyo.pdf
- Hirata, N., and M. Matsu'ura, Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, Phys. Earth Planet. Inter., 47, 50-61, doi:10.1016/0031-9201(87)90066-5, 1987.
- 9) Hardebeck, J. L., and P. M. Shearer, A new method for determin-ing first-motion focal mechanisms, Bull. Seism. Soc. Am., 92, 2264-2276, doi:10.1785/0120010200, 2002.
- 10) 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, p. 163-175, doi: 10.1016/j.epsl.2017.01.003, 2017
- 11) Yamamoto, Y., T. Takahashi, Y. Ishihara, K. Obana, S. Miura, S. Kodaira, and Y. Kaneda, Plate geometry model and seismicity in the northern Ryukyu subduction zone, Japan, deduced from amphibious seismic observations. Earth Planet. Sci. Lett., 536, doi: 10.1016/j.epsl.2020.116143, 2020
- 12) Zhang, H. and C. H. Thurber, Double-Difference Tomography: The application to the Hayward Fault California, Bull. Seism. Soc. A., 93, 1875-1889, 2003

- 13) Zhang, H., and C. H. Thurber, Development and Applications of Doubledifference Seismic Tomography. Pure appl. geophys. 163, 373-403, https://doi.org/10.1007/s00024-005-0021-y, 2006.
- 14) Nakanishi, A., N. Takahashi, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. O. Citak, T. Nakamura, K. Obana, S. Kodaira and Y Kaneda, Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis. Geological Society of America Special Paper, 534, 1-18, doi: 10.1130/2018.2534(04), 2018
- 15) Ching-Yu Hu, M. Shinohara, Y. Yamashita, T. Tonegawa, T. Yamada, T. Akuhara, K. Mochizuki, Seismic activity around shallow plate boundary near westernmost Nankai Trough revealed by ocean bottom seismometer observation, Earth, Planets and Space, 76(1), 168, doi:10.1186/s40623-024-02122-4, 2024
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等

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・ポスター発表		(学会等名)	時期	外の別
の別)				
Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation (ポスター)	胡靚妤 篠 山 下 田 田 原 谷 朗 望 月 公 廣	日本地球惑星科学 連合 2024 年大会	2024. 05	国内
向灘の通常の地震と浅部 スロー地震の発生領域境 界部における地震活動 (口頭)	平山松仲平八中江松大伊山篠田下島谷野木東本本柳藤田原一裕健幸舟原和賢聡修喜知雅皇,浩一寛夫太 慧宏朗尚	日本地球惑星科学 連合 2024 年大会	2024. 05	国内

1) 学会等における口頭・ポスター発表

Seismicity in shallow part of Hyuga-nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 to 2022 (口頭)	胡靚妤 篠原雅尚 山下裕亮 利根川貴志 山田知朗 悪原岳 望月公廣	日本地震学会 2024 年秋季大会	2024.10	国内
日向灘の通常の地震と浅 部スロー地震の発生領域 境界部における地震活動 (口頭)	平山松仲平八中江松大伊胡山篠田下島谷野木東本本柳藤靚田原一裕健幸舟原和賢聡修喜妤知雅聖亮 浩一寛夫太 慧宏 朗尚	日本地震学会 2024 年秋季大会	2024.10	国内
Earthquake distribution by OBS observation in Hyuga-nada region and comparison with slow earthquake activities (口頭)	Hu, C-Y M. Shinohara Y. Yamashita T. Tonegawa T. Yamada T. Akuhara K. Mochizuki	AGU Fall Meeting 2024	2024. 12	国外
Seismicity observation at Hyuga-nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 (口頭)	Hu, C-Y M. Shinohara Y. Yamashita T. Tonegawa T. Yamada T. Akuhara K. Mochizuki	2025 IEEE Underwater Technology (UT)	2025.03	国外

掲載した論文(発表題	発表者氏名	発表した場所	発表した	国内 ·
目)		(学会誌・雑誌等名)	時期	外の別
Seismic activity	Ни, С-Ү,	Earth, Planets and	2024.12	国外
around shallow plate	M. Shinohara	Space		
boundary near	Y. Yamashita			
westernmost Nankai	T. Tonegawa			
Trough revealed by	T. Yamada			
ocean bottom	T. Akuhara			
seismometer	K. Mochizuki			
observation				
(査読あり)				
Seismicity	Hu, C-Y	2025 IEEE	2025.3	国外
observation at Hyuga-	M. Shinohara	Underwater		
nada subduction zone	Y. Yamashita	Technology (UT)		
by ocean bottom	T. Tonegawa			
seismometer from 2015	T. Yamada			
to 2024	T. Akuhara			
(査読なし)	K. Mochizuki			

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

- (g)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