

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」

(b) 担当者

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	渡邊篤志
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	秋山峻寛
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。3D構造モデルが更新されれば、それに追従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。構造モデル等の不現実性が固着・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。

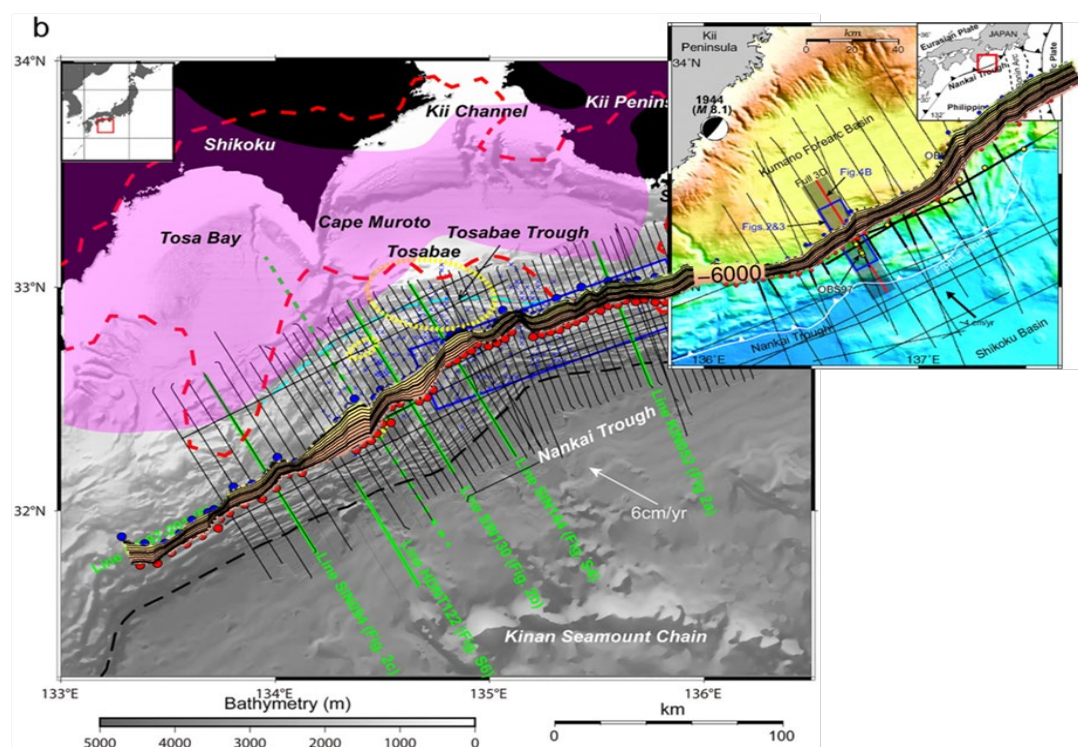


図 2-2-①-1 昨年度までに構築した、南海トラフ沿いの構造探査測線（黒実線・緑実線）に沿って取得された構造断面から構築した分岐断層面。等深線は 300m 間隔。各測線において読み取られた分岐断層の上端（海底面と分岐断層面の交点）及び下端（プレート境界面と分岐断層面の交点）の位置を赤丸及び青丸で示した。測線の位置を含め背景の地図は Park et al. [2010]⁶⁾ および Nakamura et al. [2022]⁷⁾からの抜粋。

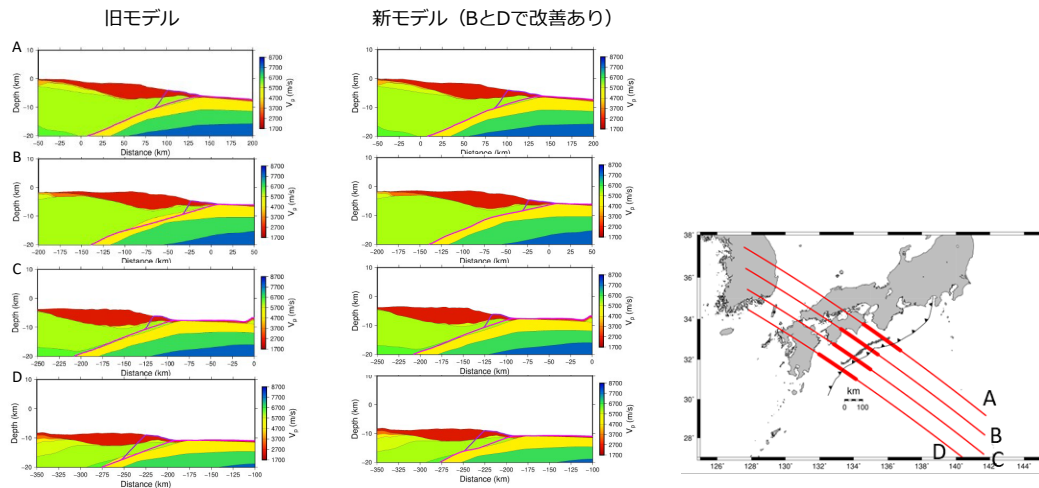


図 2-2-①-2 昨年度修正したプレート境界断層面の断面。(左) 測線 ABCD に沿って取った断面のトラフ軸付近の拡大図(太線部分)。紫・マゼンタ線はそれぞれ、分岐断層・プレート境界位置を表す。(右) 断面測線の位置。

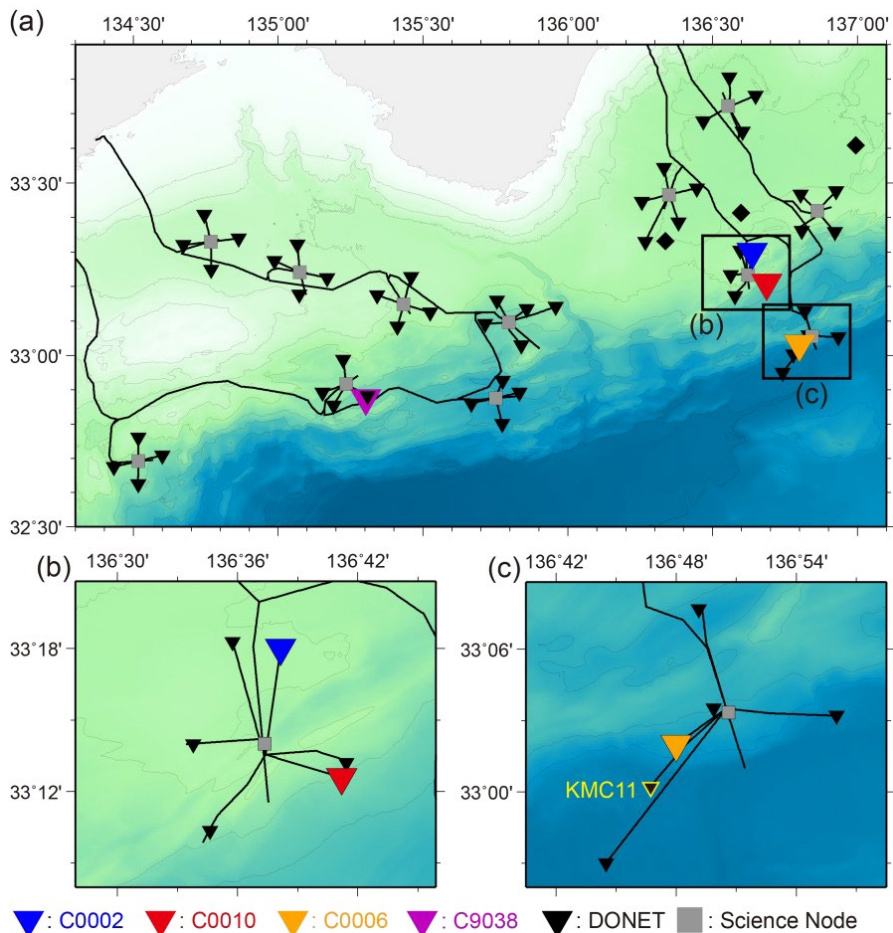


図 2-2-①-3 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された 4 点の長期孔内観測点 (C0002、C0010、C0006 及び C9038) と DONET の観測点配置図 (海洋研究開発機構 (2025, 第 409 回地震調査委員会資料)⁸⁾より)。(a) DONET 全域。(b) 孔内観測点 (C0002、C0010) 周辺。(c) 孔内観測点 (C0006) 周辺。

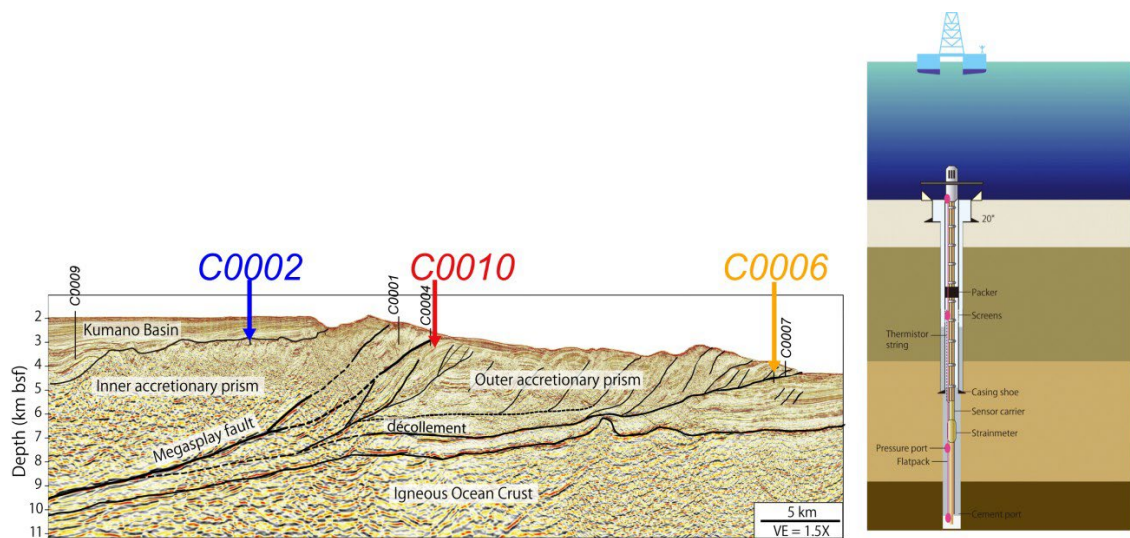


図 2-2-①-4 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された 3 点の長期孔内観測点 (C0002、C0010、C0006) の設置位置 (地震断面図に投影したもの) (海洋研究開発機構 (2025, 第 409 回地震調査委員会資料)⁸⁾より)。海底下 980m (C0002)、650m (C0010)、495m (C0006) まで掘削した孔内における地殻内の間隙水圧・体積歪 (C0010、C0006)・光ファイバ歪計 (C9038)・地震動などの記録を DONET ケーブルを用いてデータ伝送することにより連続リアルタイム観測を実施している。

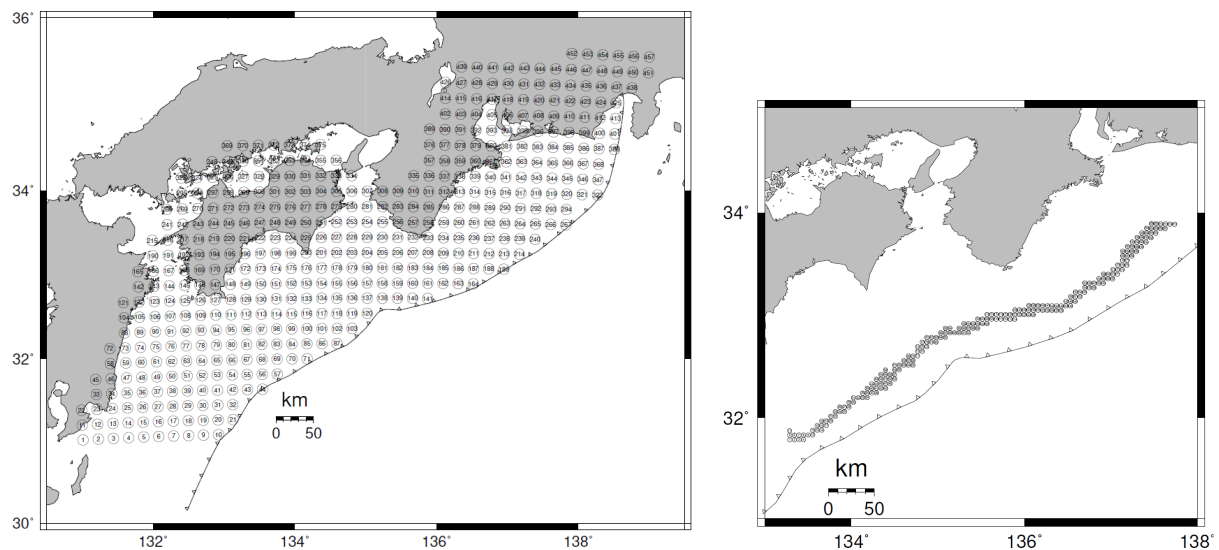


図 2-2-①-5 プレート境界面 (左) 及び分岐断層面 (右) 上に配置したスプライン関数のノード配置。プレート境界面については計 457 点、分岐断層については計 213 点のノードをそれぞれ配置した。それぞれの位置に頂点を持つスプライン関数で走向・傾斜方向のすべり分布を与えて地表・海底での変位を計算し、グリーン関数を得た。

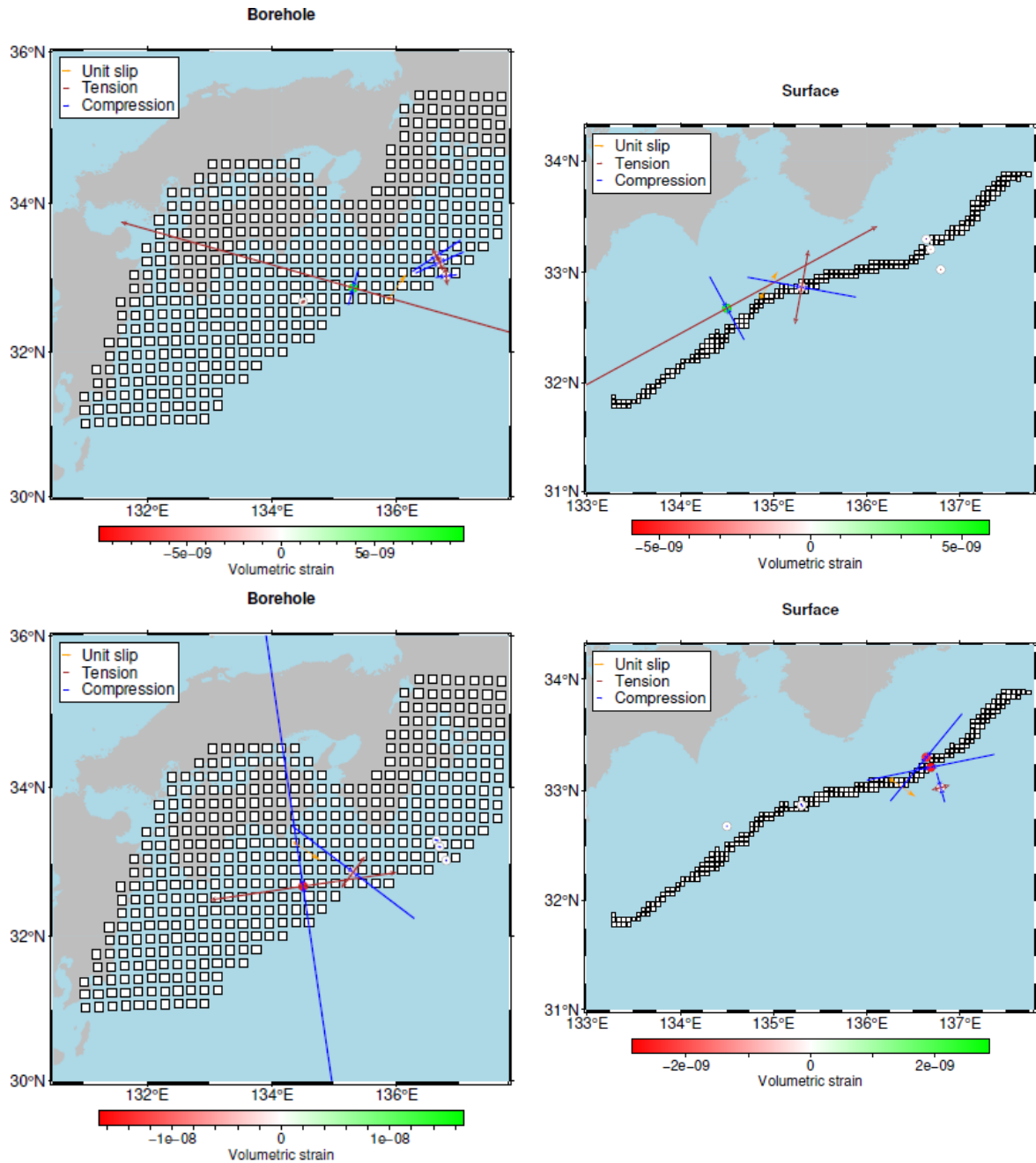


図 2-2-①-6 (左) 図 2-2-①-5 の左側で示したプレート境界面に配置したノードのうちの 141 のノードに沈み込み方向に対して垂直な方向のすべりを与えた場合 (上段) と、201 (下段) のノードに沈み込み方向に沿った方向のすべりを与えた場合の、孔内観測点のセンサー位置における平面ひずみの主ひずみ成分と体積ひずみ。(右) 図 2-2-①-5 の右側で示した分岐断層面に配置したノードのうちの 81 のノードに沈み込み方向に対して垂直な方向のすべりを与えた場合 (上段) と、141 (下段) のノードに沈み込み方向に沿った方向のすべりを与えた場合の、孔内観測点の孔口位置における平面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

- 1) 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.
- 4) 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, J.O., 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>.
- 7) 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

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
Revisiting Slip Deficit Rates and Its Insights Into Large and Slow Earthquakes at the Nankai Subduction Zone（査読あり）	Raymundo Plata-Martinez, Takeshi Iinuma, Fumiaki Tomita, Yasuyuki Nakamura, Takuya Nishimura, Takane Hori	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2024. 12	国外

(g) 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 5 m 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 2 cm, 上下成分が 5 cm, 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 2-2-②-1 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 (5 m) 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わせにおいて、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。

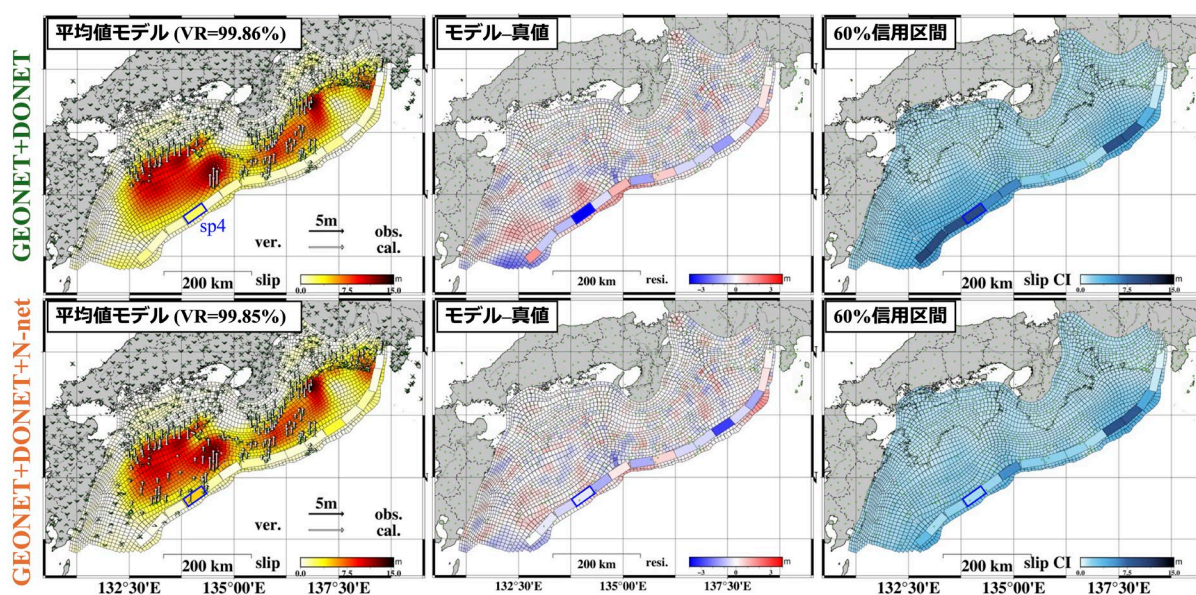


図 2-2-2-1 分岐断層を南海トラフ域全域に配置し、さらに N-net の水圧計データによる地殻上下変動を陸域 GNSS 観測データと併合利用した場合の推定精度の定量評価の実施結果。上段：陸域 GNSS 観測網である GEONET および DONET を用いて推定した結果。sp4 と記載がある分岐断層に 5m のすべりを仮定した。下段：上段に加え、N-net も加えて推定した結果。上段、下段とも、左から平均値モデル、モデルから真値を差し引いた結果、60%信用区間をそれぞれ示す。

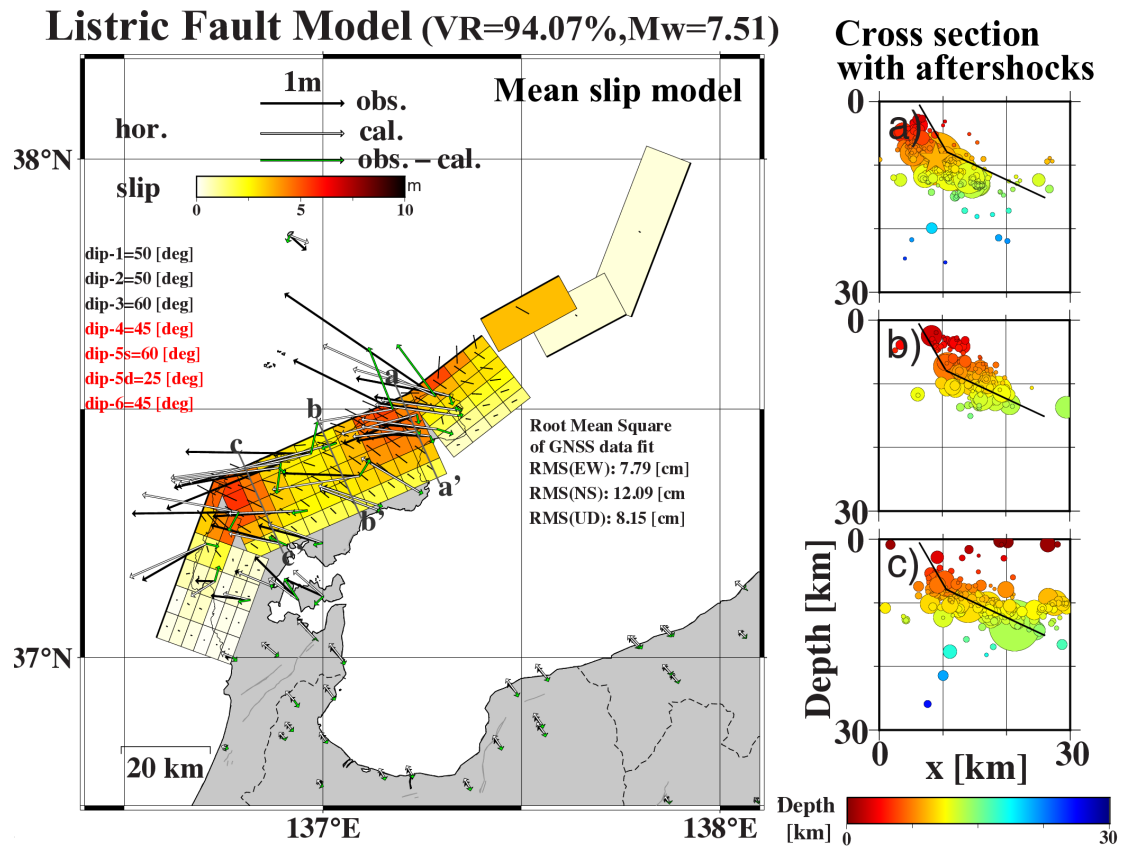


図 2-2-②-2 Yamada et al. (2025) より引用。開発した手法によって推定された 2024 年能登半島地震の地震時すべり分布の結果。左図：得られた事後確率分布の平均値による地震時すべり分布モデル。右図：左図の a-a'，b-b' c-c' のそれぞれにおける余震分布と仮定した断層面との比較。リストリックなモデルを仮定することで両者が大局的に一致する。

(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

- 1) 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
稠密 GNSS 観測網に基づく 2024 年能登半島地震のすべり分布の推定（口頭）	山田太介 太田雄策 西村卓也 平松良浩	JpGU 2024	2024. 5	国内
稠密測地観測にもとづく 2024 年能登半島地震の地震時すべり分布と断層幾何の定量評価（口頭）	山田太介 太田雄策 西村卓也 平松良浩 木下陽平 吉田圭佑	日本測地学会第 142 回講演会	2024. 10	国内
南海トラフにおけるプレート境界および分岐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）	山田太介 太田雄策	日本測地学会第 142 回講演会	2024. 10	国内
稠密 GNSS 観測網に基づく 2024 年能登半島地震のすべり分布および断層幾何の網羅的評価（口頭）	山田太介 太田雄策 西村卓也 平松良浩 木下陽平 吉田圭佑	日本地震学会 2024 年度秋季大会	2024. 10	国内
Coseismic Slip Distribution and Fault Geometry Evaluation of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Deduced from Very Dense GNSS Networks（ポスター）	Yamada T. Y. Ohta T. Nishimura Y. Hiramatsu Y. Kinoshita K. Yoshida	AGU Annual Meeting 2024	2024. 12	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
Real-time modeling of transient crustal deformation through the quantification of uncertainty deduced from GNSS data（査読あり）	Ohno K., Y. Ohta, <u>N.</u> Takamatsu, H. Munekane M. Iguchi	Earth, Planets and Space	2024. 11	国外
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（査読あり）	Yamada T. Y. Ohta, T. Nishimura, K. Yoshida, Y. Hiramatsu Y. Kinoshita	Earth, Planets and Space	2025. 2	国外

(g) 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

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的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DPRI01⁷⁾)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出し、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值の初期値を求め、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值を求めた。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

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出の見直し等、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出を新たに行った。

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。

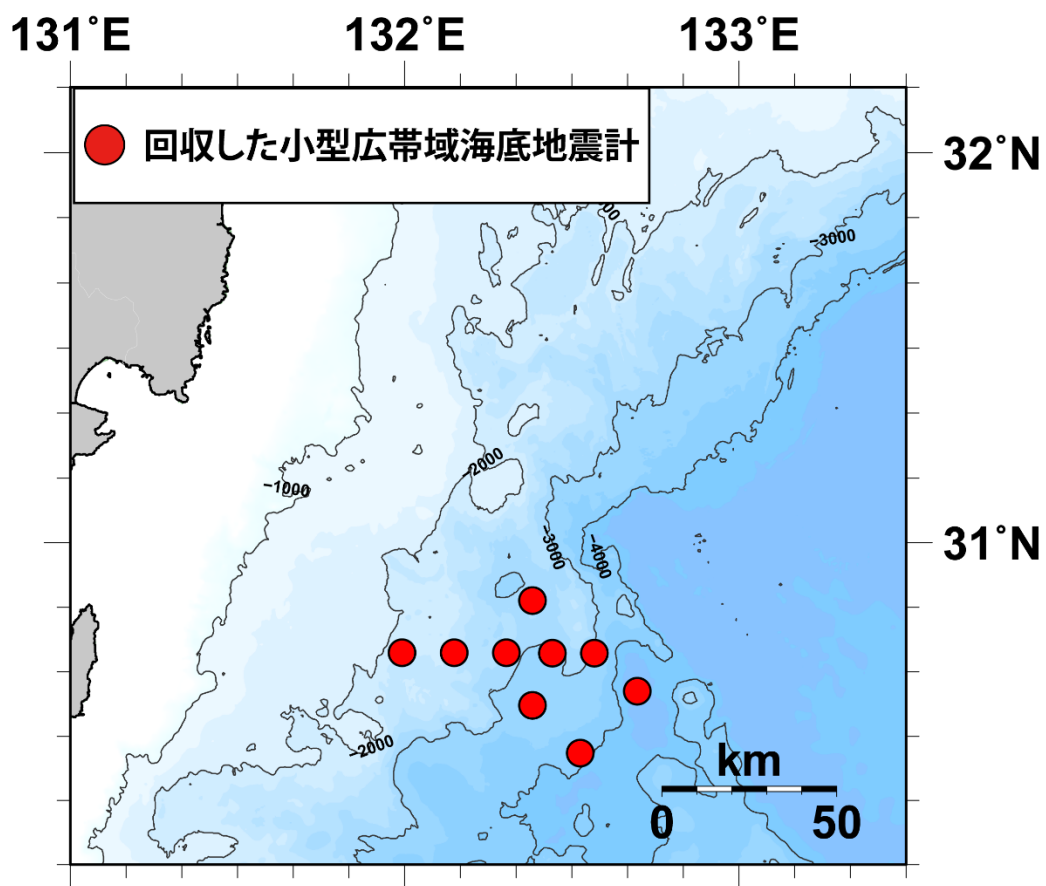


図 2 - 2 - ③ - 1 設置した海底地震計位置

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」

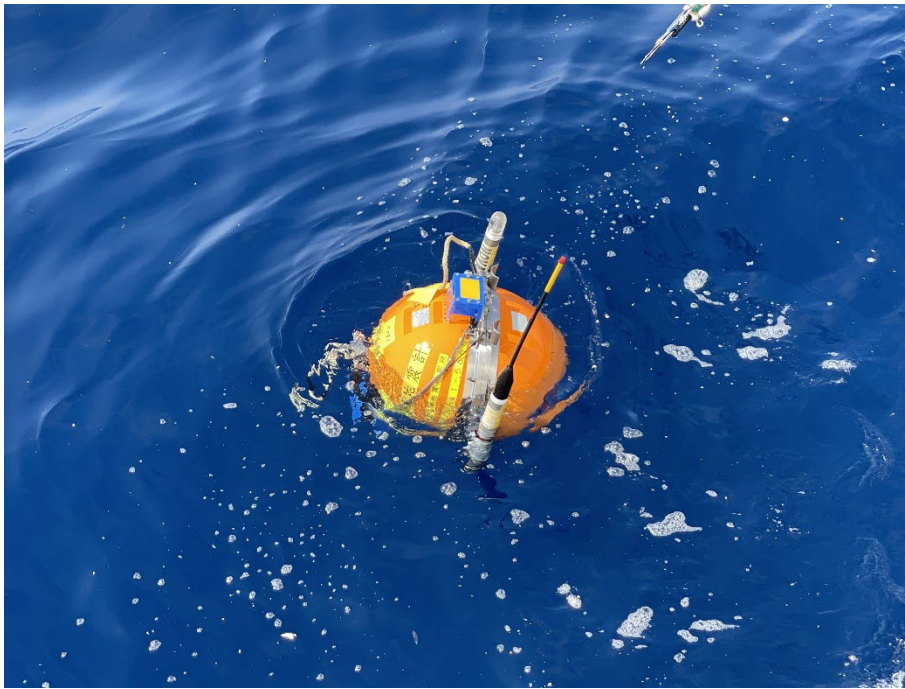


写真 2 - 2 - ③ - 2 海面に浮上した海底地震計

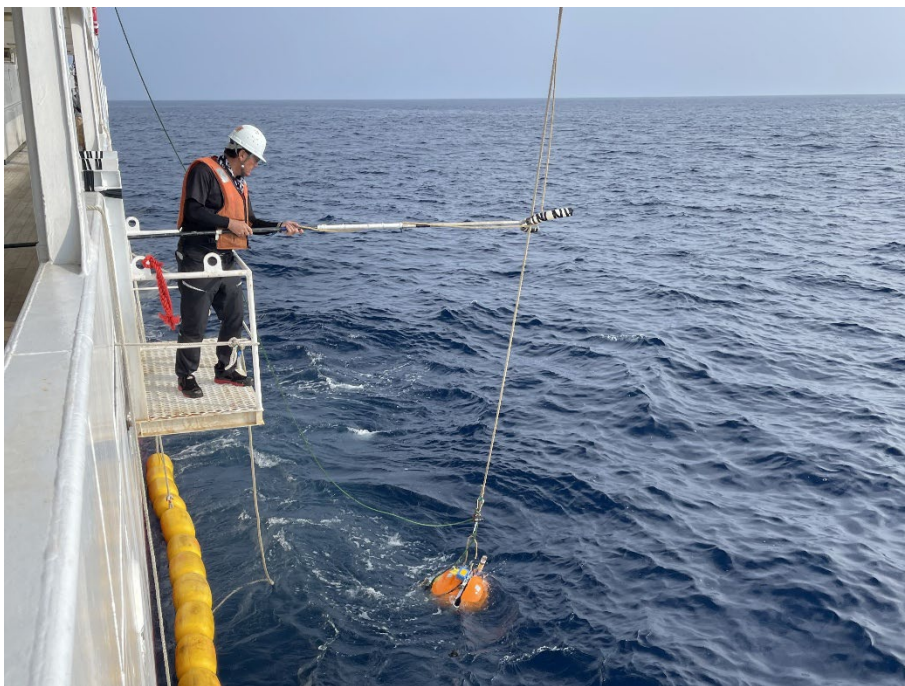


写真 2 - 2 - ③ - 3 海底地震計の回収



写真 2 - 2 - ③ - 4 回収された海底地震計

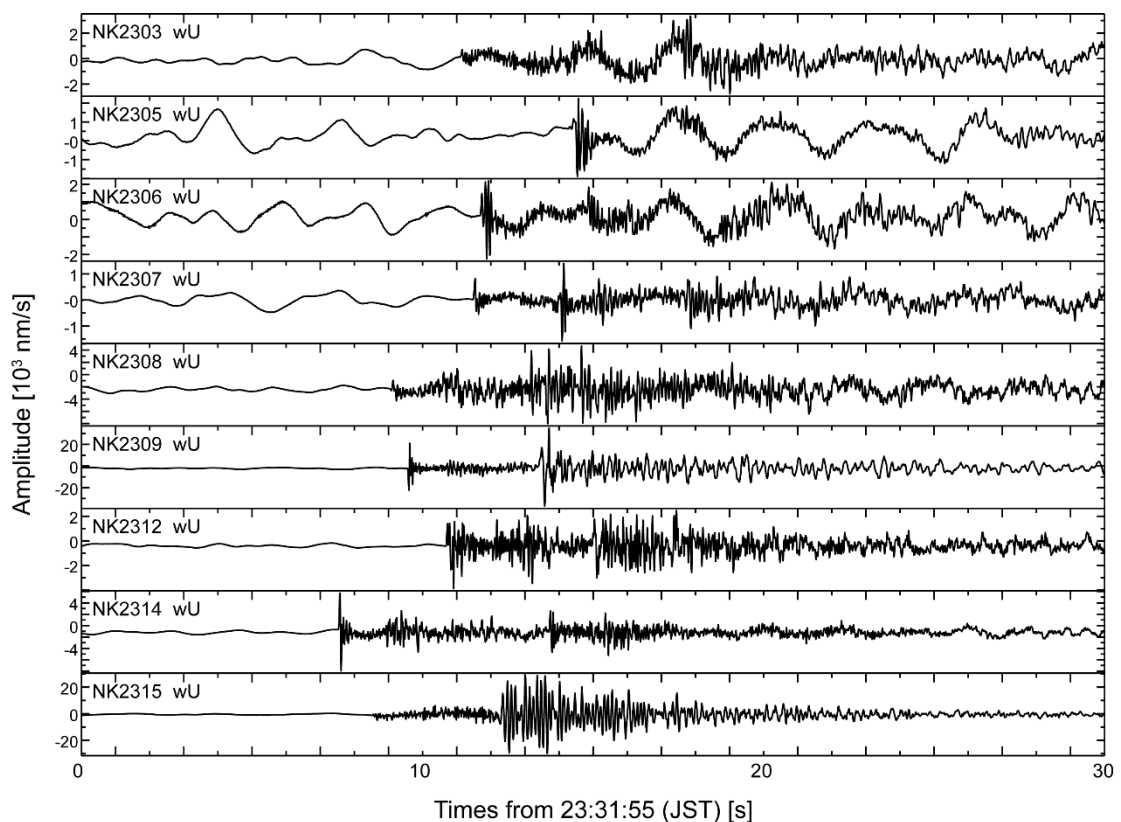


図 2 - 2 - ③ - 2 海底地震計の地震記録例。観測網直下で発生した地震の海底地震計記録。9 点分の上下動記録を示している。周波数フィルターは施していない。気象庁による震源決定では、震源時は 2023/11/20 23:31:59.1（日本時間）、震央は東経 132.5670 度、北緯 30.5185 度、震源の深さは 57.0km、マグニチュードは 2.3 である。

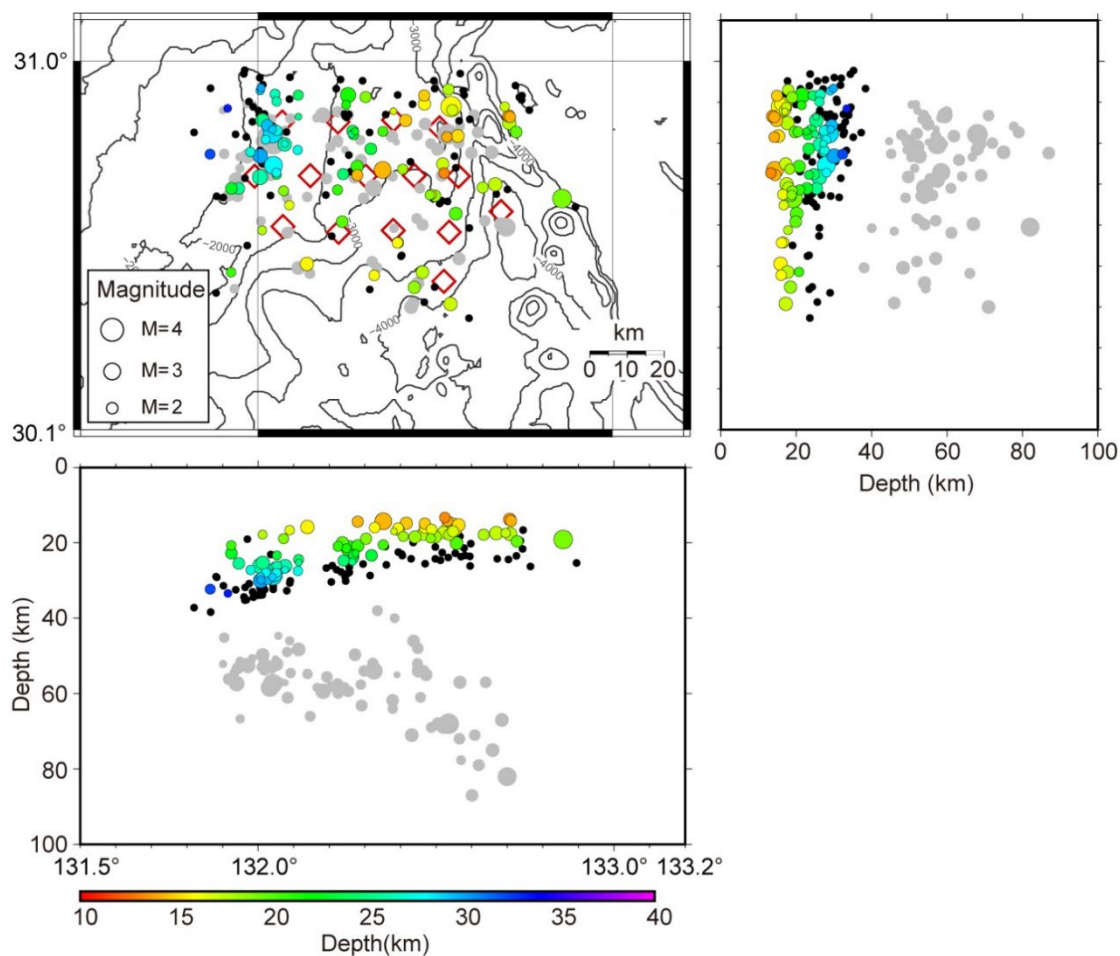


図 2-2-③-3 第 4 期観測である 2023 年 8 月から 2024 年 8 月までの観測期間中に、気象庁が決定した通常地震の震源再決定結果。カラーで示す丸は 3 次元構造と double difference 法による震源決定結果、黒色の丸は絶対走時と 1 次元構造を用いる震源決定結果(中間結果)をしめす。灰色丸は気象庁が決定した震源位置である。赤四角は海底地震観測点、実線は等水深線である。

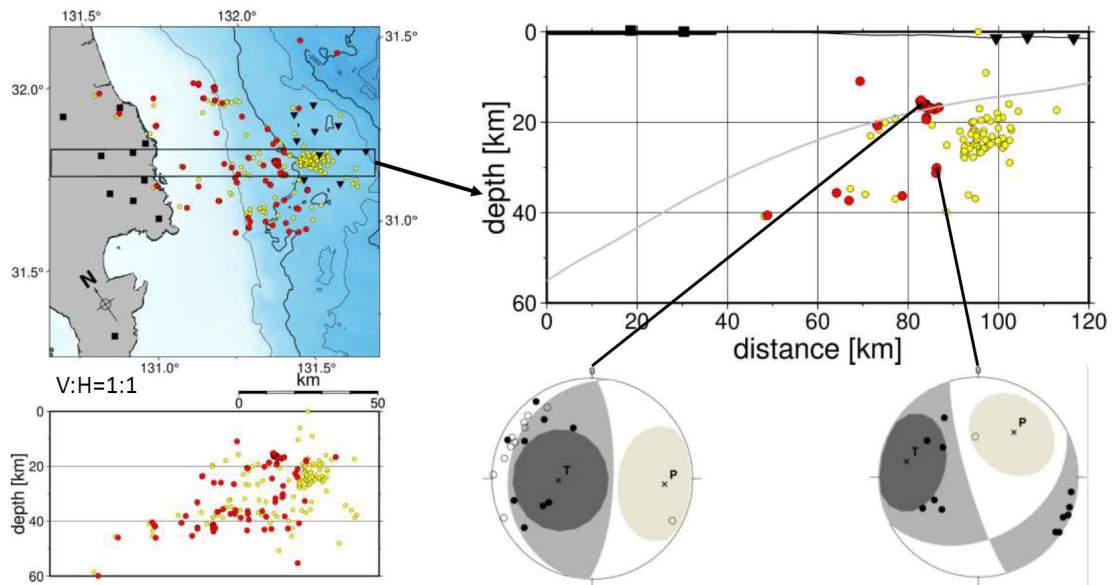


図 2-2-③-4 第 1 期観測にあたる 2021 年 3 月～2022 年 1 月に発生した地震の震源再決定結果と発震機構解析の結果。○は震源で赤色が本研究、黄色が気象庁一元化震源カタログ、黒の逆三角は海底地震観測点、黒四角は陸上観測点。右図の深さ断面図に示された灰色の線はプレート境界モデル¹⁵⁾、発震機構解は下半球等積投影。

(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

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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
 - 8) 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 determining 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 Double-difference 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

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
Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation (ポスター)	胡靚妤 篠原雅尚 山下裕亮 山田知朗 悪原岳 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)	平田一聖 山下裕亮 松島健 仲谷幸浩 平野舟一郎 八木原寛 中東和夫 江本賢太郎 松本聡 大柳修慧 伊藤喜宏 山田知朗 篠原雅尚	日本地球惑星科学連合 2024 年大会	2024. 05	国内

Seismicity in shallow part of Hyuga-nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 to 2022 (口頭)	胡靚好 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)	平田一聖 山下裕亮 松島健 仲谷幸浩 平野舟一郎 八木原寛 中東和夫 江本賢太郎 松本聡 大柳修慧 伊藤喜宏 胡靚好 山田知朗 篠原雅尚	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

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
Seismic activity around shallow plate boundary near westernmost Nankai Trough revealed by ocean bottom seismometer observation （査読あり）	Hu, C-Y, M. Shinohara Y. Yamashita T. Tonegawa T. Yamada T. Akuhara K. Mochizuki	Earth, Planets and Space	2024. 12	国外
Seismicity observation at Hyuga- nada subduction zone by ocean bottom seismometer from 2015 to 2024 （査読なし）	Hu, C-Y M. Shinohara Y. Yamashita T. Tonegawa T. Yamada T. Akuhara K. Mochizuki	2025 IEEE Underwater Technology (UT)	2025. 3	国外

(g) 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