

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 | 准教授 | 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 |
| 海洋研究開発機構 | ポストドクトラル研究員 | ライムント プラターマル ティネス |
| 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 | 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 | 技術職員 | 橋本匡 |
| 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み、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：

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する。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る。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と、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る。

(e) 令和5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および改良を行う。具体的には熊野灘周辺から四国沖に至る南海トラフ全域の分岐断層におけるグリーン関数をこれまでの知見に基づいて構築するとともに、プレート境界面の形状を修正し、これについてもグリーン関数を得る。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、海域断層を含めた構造モデルでの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するための手法を構築し、予察的結果を得る。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る。

(2) 令和5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、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、プレート境界以外の断層におけるすべりが地表にもたらす変形を定量的に評価できるようにするために、昨年度構築した紀伊水道沖から四国沖にかけての分岐断層を東方に延長し、熊野灘周辺における分岐断層面を設定するとともに、一昨年度に構築した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の形状を修正し、それぞれの面における変位応答グリーン関数の計算を実施した。

(b) 業務の実施方法

トラフ軸に近い浅部プレート境界周辺には、プレート境界から分岐してトラフ軸よりも陸側の海底に至る断層がいくつも存在している。海洋研究開発機構がこれまでに実施してきた地震波構造探査の結果^{1,3}などから、このような分岐断層のうち空間的な連続性が強く見られるとともに海底地形に大きく影響しているとみられる面を、地震時にすべりを起こす可能性がある「分岐断層」として選択した。構造探査測線それぞれにおいて、プレート境界から分岐断層が枝分かれする位置または枝分かれした後に高角に傾斜角が急変する位置と、分岐断層が海底面に達する位置を目視で読み取り、分岐断層の下端および上端を決定した。これらをつないで分岐断層面モデルを構築し(図2-2-①-1)、この面でのすべりに対する変位応答グリーン関数の計算を実施することとした。また、一昨年度に計算した現実的な3D構造モデルに基づくプレート境界での固着・すべりに対するグリーン関数に関して、トラフ軸近傍でプレート境界として定義した面が海洋性地殻内にはみ出してしまっていた領域があったため、これを修正し(図2-2-①-2)、修正した面に対する変位応答グリーン関数の計算を実施した。

(c) 業務の成果

一昨年度作成した全国一次地下構造モデルに基づく有限要素法計算のためのメッシュの中に分岐断層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分岐断層面における単位すべり分布に対する、地表面での変位応答の計算を地球シミュレータ上で実施した(図2-2-①-3)。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2-2-①-4)。また、修正したプレート境界面についても同様に計算を行い、グリーン関数を得た。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。

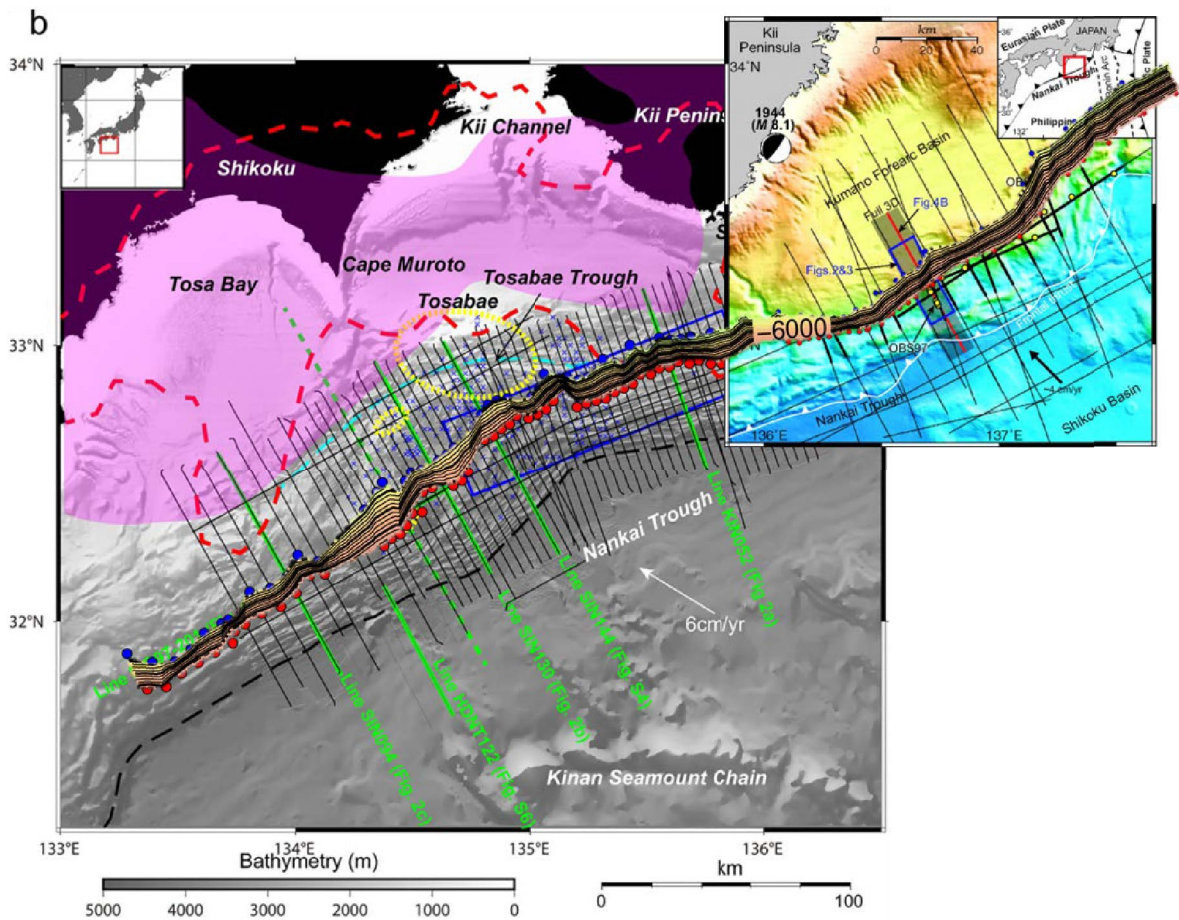


図 2-2-①-1 南海トラフ沿いの構造探査測線（黒実線・緑実線）に沿って取得された構造断面から構築した分岐断層面。等深線は 300m 間隔。各測線において読み取った分岐断層の上端（海底面と分岐断層面の交点）及び下端（プレート境界面と分岐断層面の交点）の位置を赤丸及び青丸で示した。測線の位置を含め背景の地図は Nakamura et al. [2022]³ 及び Park et al. [2010]² からの抜粋。

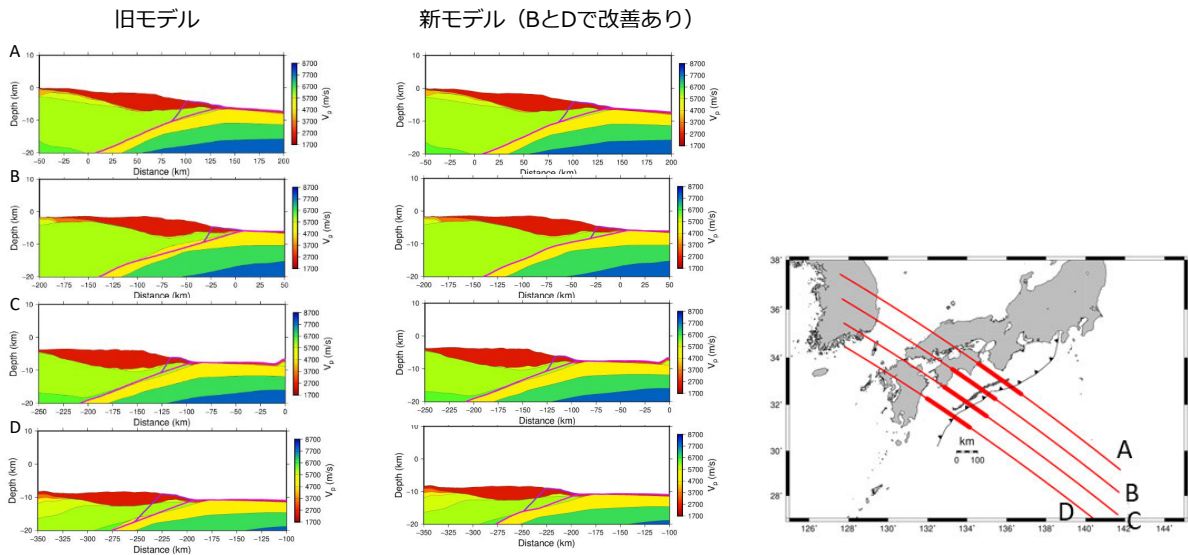


図 2-2-①-2 (左) 測線 ABCD に沿って取った断面のトラフ軸付近の拡大図 (太線部分)。紫・マゼンタ線はそれぞれ、分岐断層・プレート境界位置を表す。(右) 断面測線の位置。

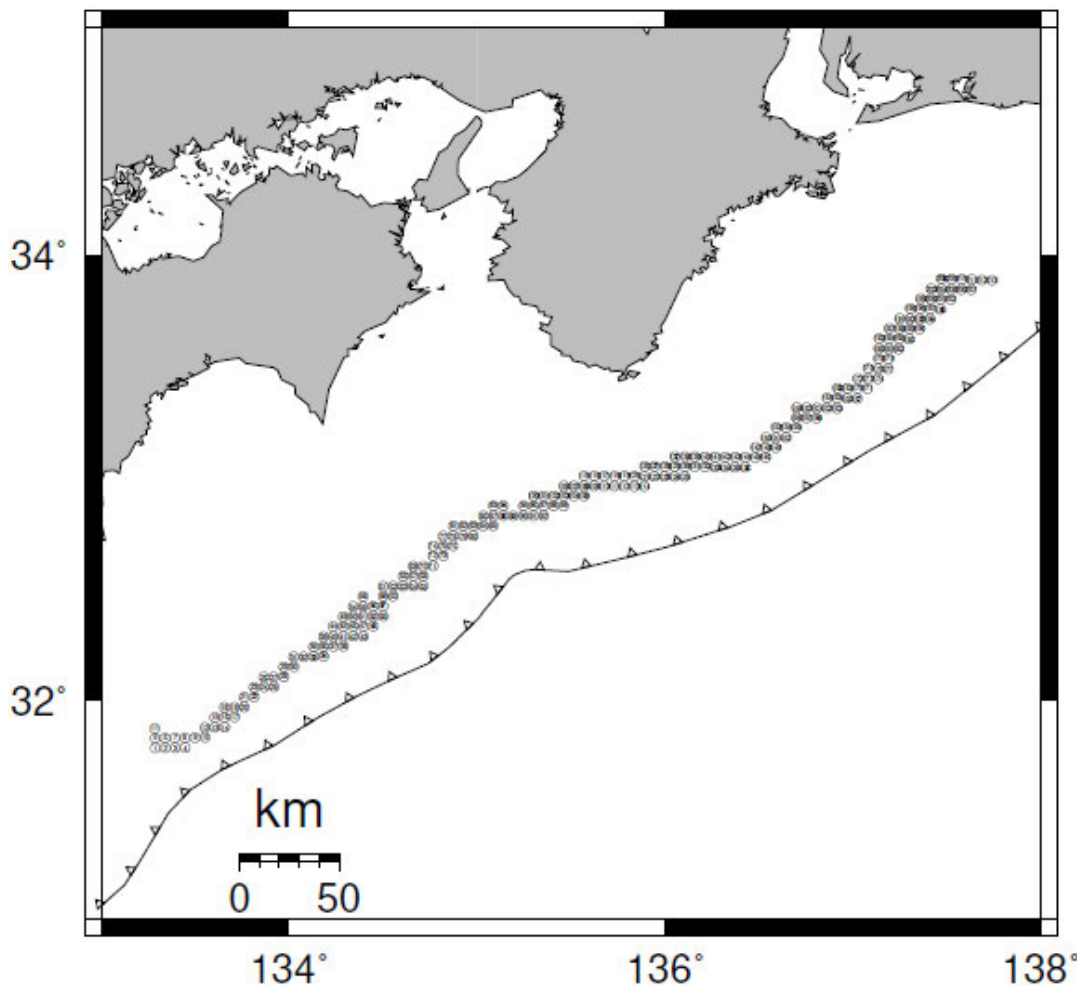


図 2-2-①-3 構築した分岐断層面上に配置したスプライン関数のノード配置 (計 213 点)。それぞれの位置に頂点を持つスプライン関数で走向・傾斜方向のすべり分布を与えて地表・海底での変位を計算し、グリーン関数を得た。

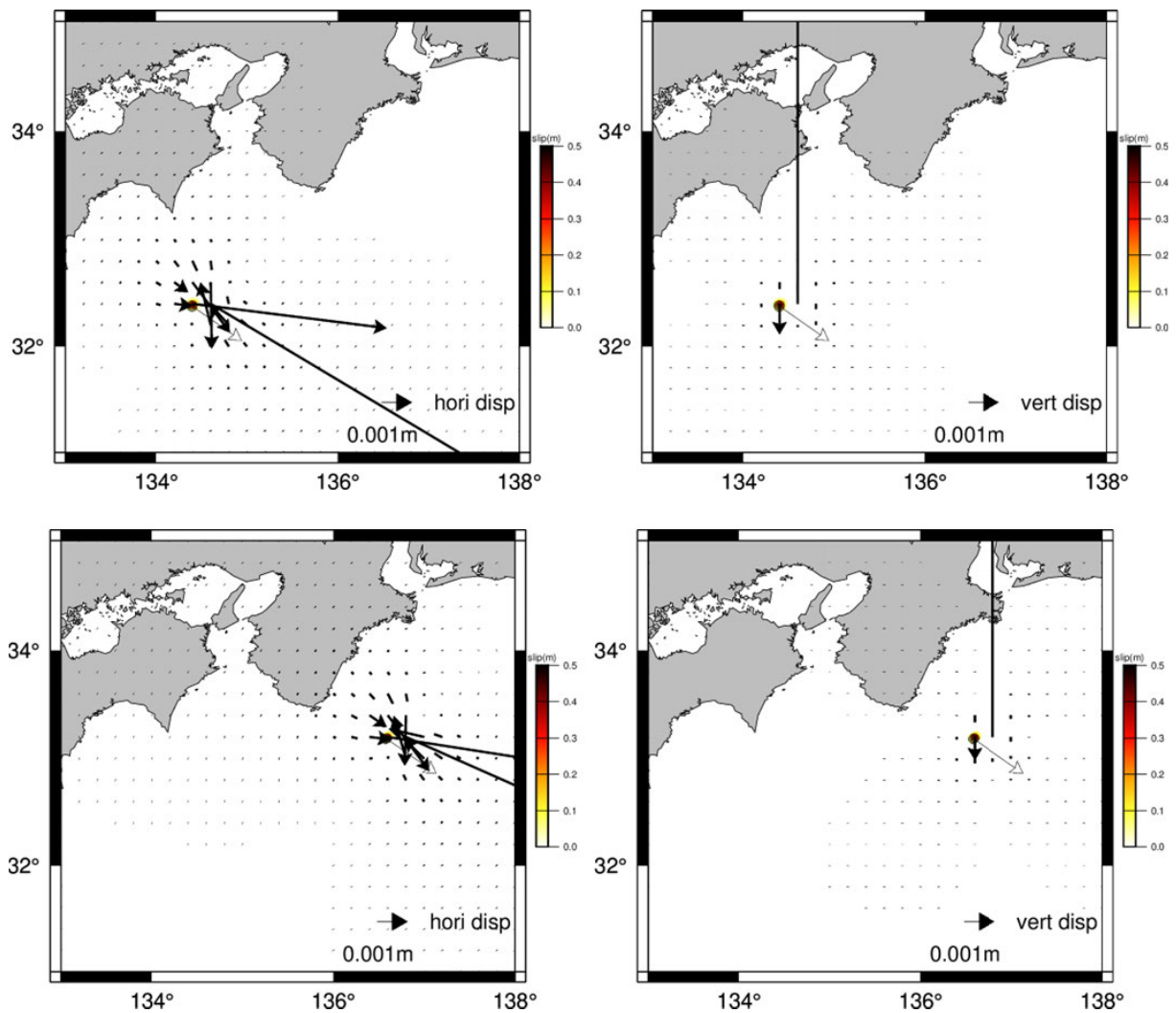


図 2-2-①-4 図 2-2-①-3 の 51 (上段) と 151 (下段) のノードに傾斜方向のすべりを与えた場合の地表・海底での変位。左は水平成分、右は上下成分を示す。

(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・すべり分布の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。次年度は、今回計算したグリーン関数を用いた解析を実施して、現状の海陸の観測網で取得されうる地殻変動データによる、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、熊野灘や四国沖に設置されている長期孔内観測点での歪及び傾斜応答グリーン関数を計算する。

(e) 引用文献

- 1) Park, JO., and S. Kodaira (2012). Seismic reflection and bathymetric evidences for the Nankai earthquake rupture across a stable segment-boundary. Earth Planets Space, 64, 299-303, doi:10.5047/eps.2011.10.006.

- 2) 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>.
- 3) 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.

(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 |
|--|--|------------------------------|------------|------------|
| Slip deficit rate, slow and fast earthquake at the Nankai subduction zone（口頭） | R. O. Plata-Martínez T. Iinuma F. Tomita T. Nishimura T. Hori | EGU General Assembly 2023 | 2023.04 | 国外 |
| New slip deficit rate model and slow earthquakes at the Nankai subduction zone(口 頭) | R. O. Plata-Martínez T. Iinuma F. Tomita T. Nishimura Y. Nakamura T. Hori | 日本地球惑星 科学連合 2023 年大会 | 2023.05 | 国内 |

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(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み、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、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するための手法を構築するとともに、その推定誤差を定量評価するための技術開発を実施した。さらに、本プロジェクトで構築を進めてきた三次元のグリーン関数(3Dグリーン関数)を用いた、正確な地殻変動場の再現を実現するための数値実験による評価を継続するとともに、REGARDへの技術移転のための知見整理を実施した。また令和5年8月7-8日および令和6年3月27日にREGARDの開発・運用を行っている国土地理院測地観測センター電子基準点課と打ち合わせを実施し、本研究課題の進捗状況についての報告及び議論を行った。

(b) 業務の実施方法

プレート境界で超巨大地震が発生する際に、付随して近傍の非プレート境界断層(例えば付加体内部に発達する分岐断層)がすべりうることは、これまでのさまざまな研究で指摘されている。それに対して、プレート境界面のみが破壊すると仮定して断層すべり分布推定を行うと、その推定結果を過小/過大評価する可能性があるだけでなく、津波の即時予測等の観点からもその影響は大きい。一方、陸域のデータのみでは分岐断層等の海域断層でのすべりを正しく推定することはきわめて難しい。そのため、DONETに設置された海底水圧計等、海域測地観測のデータを活用することがきわめて重要になるが、それらDONETの観測網間隔は陸域と比べた場合に空間的に疎であり、分岐断層におけるすべりの感度は必ずしも明らかではない。

こうした背景のもと本年度は、南海トラフにおけるプレート境界型地震と同時に不可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。分岐断層は室戸沖の海溝軸近傍に高角(30度)の傾斜角を持つ矩形断層を一枚仮定し、すべり量としては5mを仮定した(図2-2-②-1)。グリーン関数には昨年度構築までに構築した現実的な3D構造モデルに基づくグリーン関数を同推定に活用するための試行を行うとともに、解析解¹⁾のグリーン関数を用いた計算を、手法開発の先行を念頭に実施した。

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の海底水圧計データによる上下成分を用いた。

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)²⁾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1000連鎖分計算し、50連鎖をBurn-inとして除外し、最終的な事後確率分布を得た。

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るために、構築した3D構造モデルを用いてプレート境界型巨大地震を模したすべり分布から地殻変動場を計算し、それらデータを構築した3D構造モデルとこれまでによく用いられている解析解によるグリーン関数のそれぞれでインバージョン解析を行った。同解析は、技術移転を念頭に国土地理院と共同で実施した。

また令和5年8月7～8日および令和6年3月27日にREGARDの開発・運用を行っている国土地理院測地観測センター電子基準点課と打ち合わせを実施し、本研究課題の進捗状況についての報告及び議論を行った。

(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)を図2-2-②-2(水平成分)および図2-2-②-3(上下成分)に示す。推定されたすべり分布および分岐断層におけるすべり量は観測値をよく説明し、観測値全体に対するVR(Variance Reduction)は99.86%、GEONETの変位三成分に対しては99.87%、DONETの上下変動成分に対しては99.67%となり、いずれの値もきわめて高い。推定されたすべり量(平均値モデル)から仮定したすべり量を差し引いた残差を図2-2-②-4に示す。まずプレート境界面でのすべりに注目すると、推定された断層すべりはおおむね仮定したすべりを再現できている。一方、プレート境界浅部、特にDONETが展開されていない四国よりも西部側において、残差の値が大きいことがわかる。また、同時推定した分岐断層に着目すると、負の残差、すなわち仮定したすべり量よりもその値を過小評価していることが確認できる。図2-2-②-4中に分岐断層のすべり量の事後確率分布を示す。同図中の縦破線が仮定したすべり量の5mを示すが、得られた事後確率分布はそれよりも小さなすべり量をピークとして、正規分布的な事後確率を示す。また、分岐断層の深部延長側のプレート境界面の断層パッチも同時にすべり量の過小評価をしていることがわかる。これらの結果は、現状のDONETを含めた観測網において、プレート境界面でのすべりと分岐断層のすべりを完全には分離できないことを示唆する。図2-2-②-5に得られた事後確率分布の60%信用区間の空間分布を示す。同図は推定における不確実性の一つの指標であるが、同図からも分岐断層における不確実性が周囲のプレート境界すべりと比較して大きいことが確認できる。一方、分岐断層のすべりの推定不確実性をこのように可視化できることは、推定結果の妥当性の検討のみならず、それらに起因するハザード予測の観点、例えば津波の即時予測等における最悪シナリオの抽出等の観点から、非常に重要と考える。

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るために、構築した3D構造モデルを用いてプレート境界型巨大地震を模したすべり分布から地殻変動場を計算し、それらデータを構築した3D構造モデルとこれまでによく用いられている解析解によるグリーン関数のそれぞれでインバージョン解析を行ったところ、より現実的な構造モデルにもとづくグリーン関数を用いない場合、すべりの虚像が現れ、すべり分布推定の正確性に影響が生じることを再確認した(図2-2-②-6)。

令和5年8月7～8日および令和6年3月27日にREGARDの開発・運用を行っている国土地理院測地観測センター電子基準点課と打ち合わせを実施し、本研究課題の進捗状況に

ついでに報告及び議論を行うとともに、本 PJ で構築した 3D 構造モデルにもとづくグリーン関数を提供し、その精度評価を共同で行うことで、技術移転に向けた知見の整理ができた。

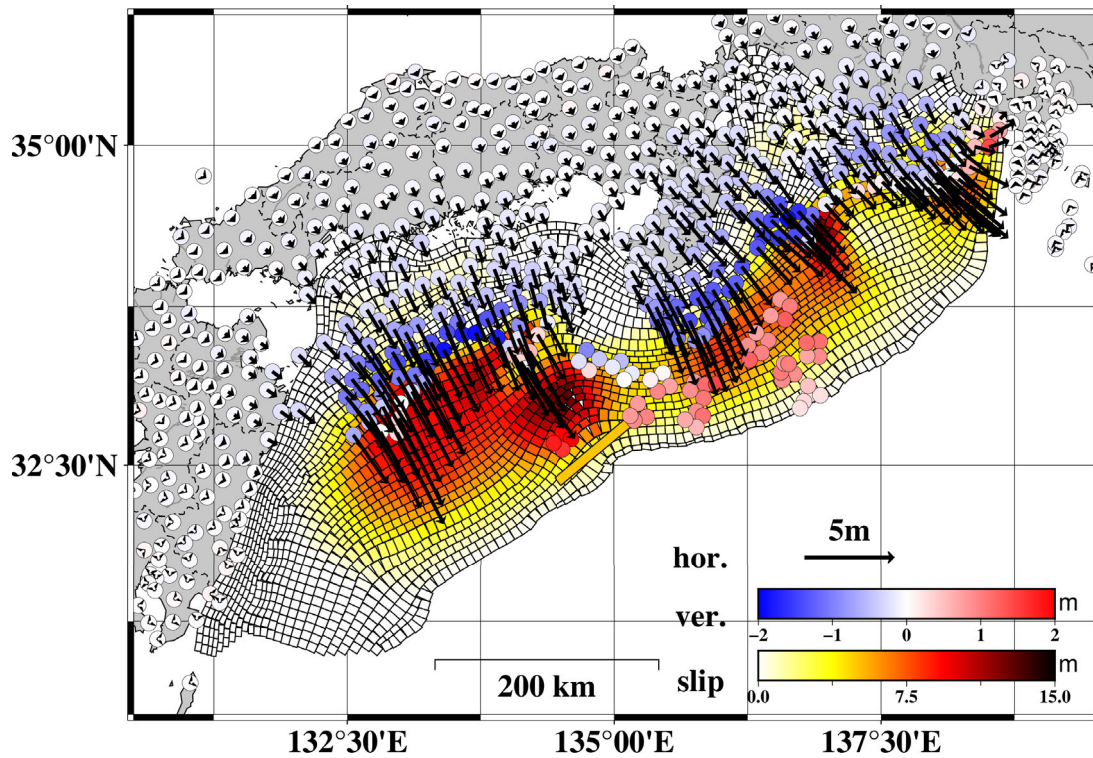


図 2-2-②-1 仮定したプレート境界面におけるすべり分布と分岐断層のすべり量。矢印は各観測点における水平変位場を示す。色付き丸印は各観測点における上下変位場を示す。

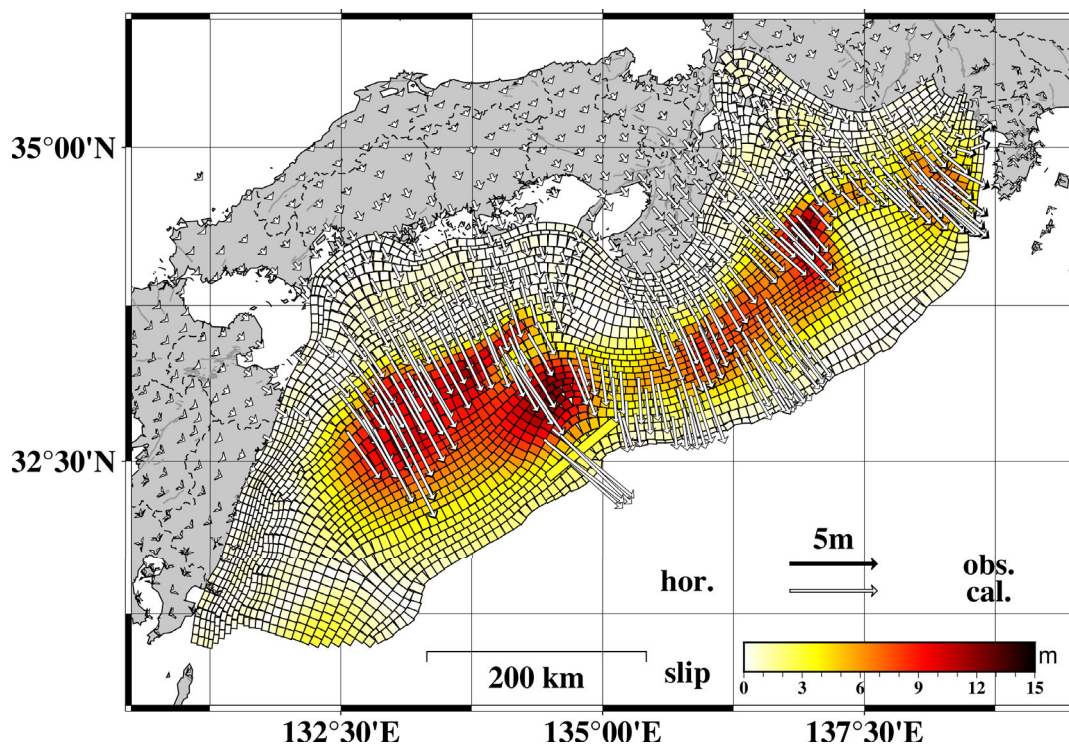


図 2-2-②-2 得られた事後確率分布の平均値にもとづいて描画したすべり分布および同時推定された分岐断層のすべり量。矢印は各観測点における水平変位場を示す。推定には用いていないが、DONET において期待される水平変位場も参考のために併記した。

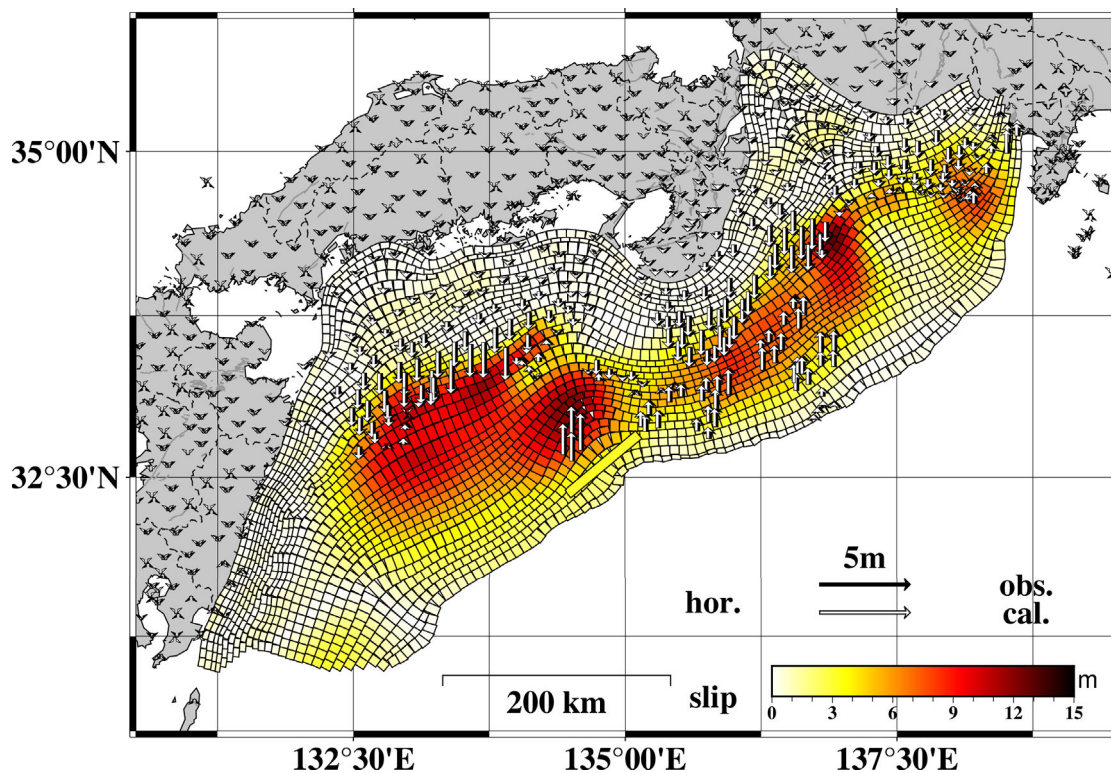


図 2-2-②-3 得られた事後確率分布の平均値にもとづいて描画したすべり分布および同時推定された分岐断層のすべり量。矢印は各観測点における上下変位場を示す。

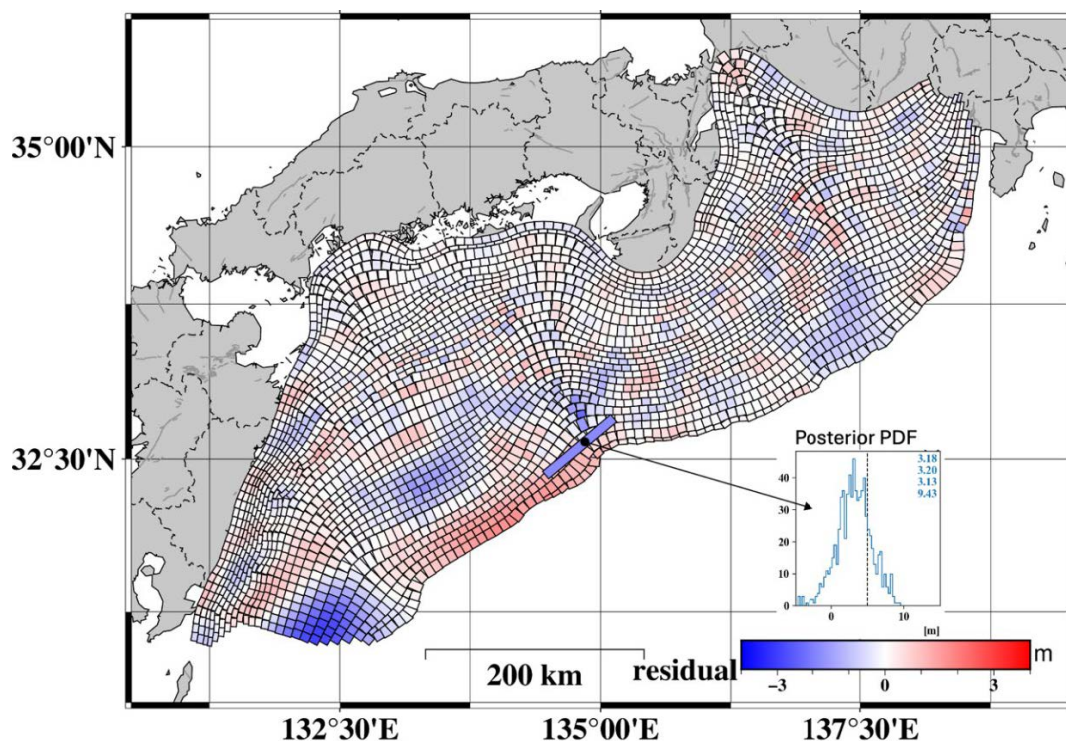


図 2-2-②-4 推定されたすべり量（平均値モデル）から仮定したすべり量を差し引いた残差。中に分岐断層のすべり量の事後確率分布を示す。

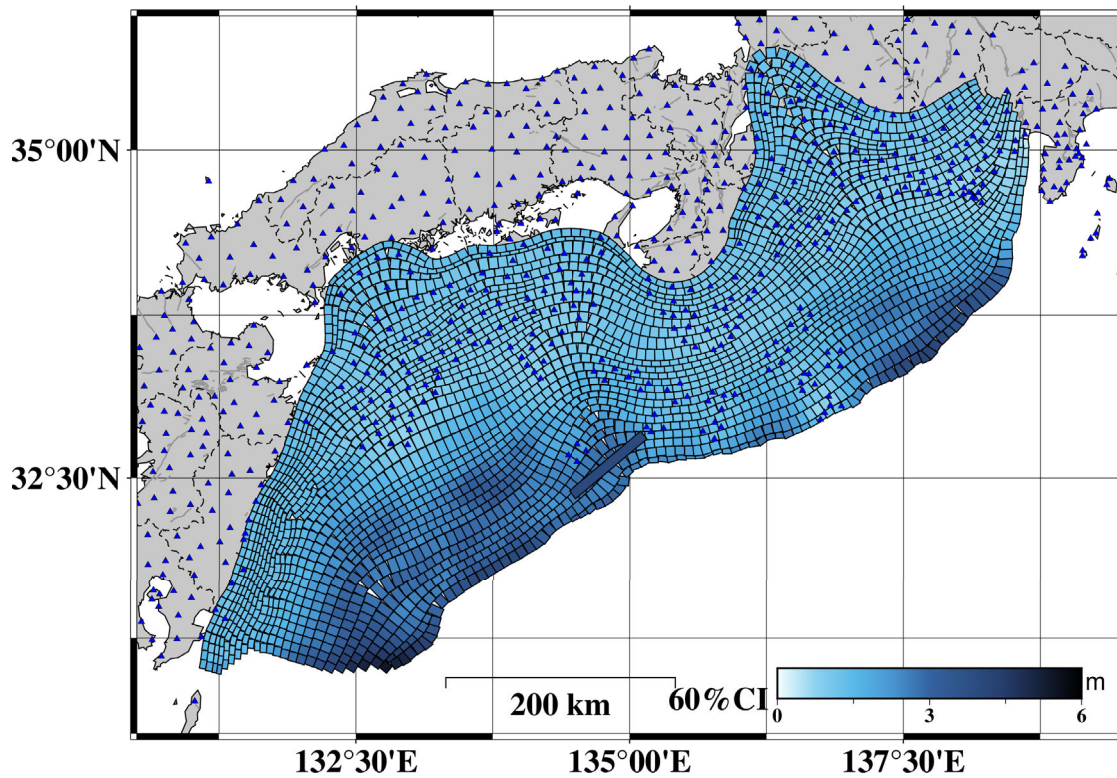


図 2-2-②-5 得られた事後確率分布の 60%信用区間の空間分布。

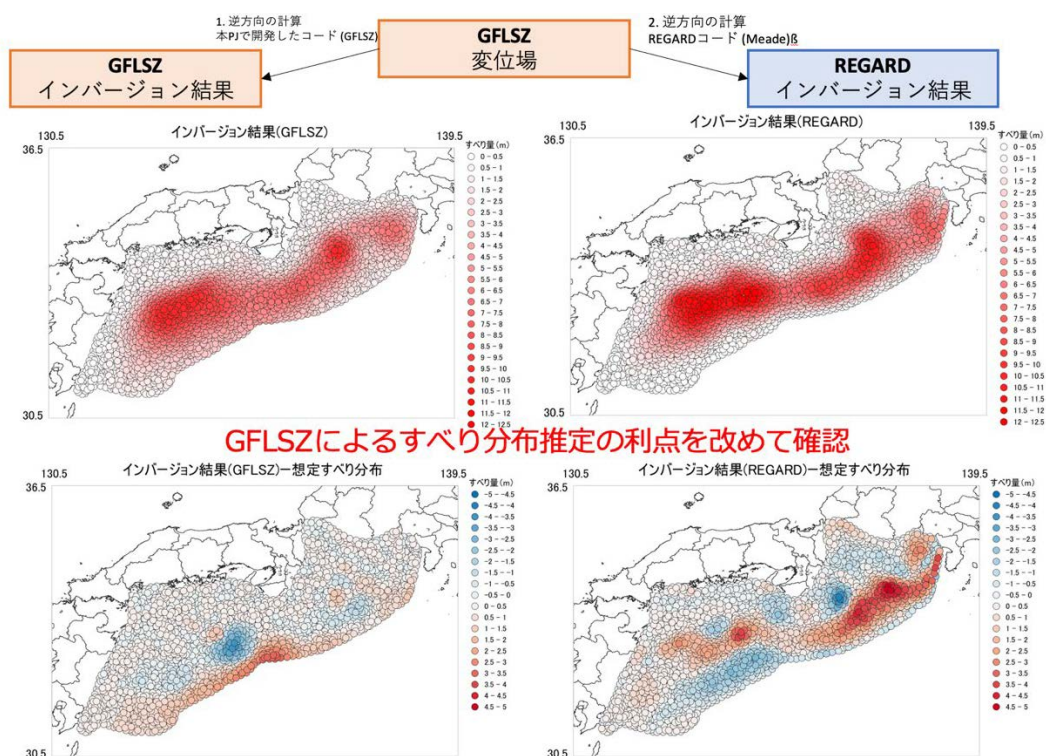


図 2-2-②-6 構築した 3D 構造モデルを用いてプレート境界型巨大地震を模したすべり分布から地殻変動場を計算し、それらデータを構築した 3D 構造モデルとこれまでによく用いられている解析解によるグリーン関数のそれぞれでインバージョン解析を行った結果。左列上：本 PJ で構築した 3D 構造モデルを用いてインバージョン解析を行い、得ら

れた結果。左列下：仮定したすべり分布との残差。右列上：解析解を用いてインバージョン解析を行い、得られた結果。右列下：仮定したすべり分布との残差。同解析は国土地理院と共同で実施した。

(d) 結論ならびに今後の課題

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った。具体的には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、海域断層を含めた構造モデルでの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するための手法を構築し、予察的結果を得た。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。今後は、今年度拡張した分岐断層の3D構造モデルによるグリーン関数をさらに活用し、より現実的な地震シナリオ等によってプレート間のすべり・固着状況を把握するための試みを進める必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America Seismological Society of America*, 82(2), 1018-1040, 1992.
- 2) 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.

(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 |
|--|---|---------------------------------------|---------|--------|
| Evaluation of the ability to extract crustal deformation signal from ocean bottom pressure time series using principal component analysis (口頭) | Hideto Otsuka Yusaku Ohta Ryota Hino Tatsuya Kubota Daisuke Inazu Tomohiro Inoue Narumi Takahashi | 28th IUGG General Assembly 2023 | 2023.07 | 国外 |

| | | | | |
|---|-------------------------------|---------------------------------------|----------|----|
| Development of the simultaneous estimation method of slip distribution and its correlation length based on the assumption of self-similarity (口頭) | Taisuke Yamada Yusaku Ohta | 28th IUGG General Assembly 2023 | 2023. 07 | 国外 |
| すべり分布推定における相関距離の同時評価とその適用 (ポスター発表) | 山田太介 太田雄策 | 日本測地学会 第 140 回講演 会 | 2023. 10 | 国内 |
| Evaluation of self-similarity of a coseismic slip by estimating a correlation length in von Karman autocorrelation (ポスター発表) | Taisuke Yamada Yusaku Ohta | AGU Fall Meeting 2023 | 2023. 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 |
|---|--|------------------------|----------|--------|
| Non-tidal oceanographic fluctuation characteristics recorded in DONET ocean-bottom pressure time series using principal component analysis (査読あり) | Hideto Otsuka Yusaku Ohta Ryota Hino Tasuya Kubota Daisuke Inazu Tomohiro Inoue Narumi Takahashi | Earth Planets Space | 2023. 10 | 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み、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、上記目的達成のため、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取得されていた。また、新規の固有周期120秒の広帯域地震計を搭載した海底地震計用レベリング装置2台の整備を行い、長期観測可能な海底地震計を9台設置して観測を継続した。9台はすべて小型広帯域海底地震計である。今回の観測期間中には、2023年4月から6月にかけて浅部スロー地震活動が発生し、観測網の直下において多数の浅部低周波微動ならびに超低周波地震を観測することに成功したほか、群発的な地震活動についてもデータが取得されていることを確認した。

(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、固有周期 120 秒の広帯域地震計 (Nanometrics 社 Trillium Compact) を搭載した海底地震計レベリング装置を導入して、小型広帯域海底地震計⁶⁾ 2 台の整備を行った。その後、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 台の回収を行うとともに、長期観測可能な小型広帯域海底地震計を 9 台設置し観測を継続した。(図 2-2-③-1~2、写真 2-2-③-1~6、表 2-2-③-1)。

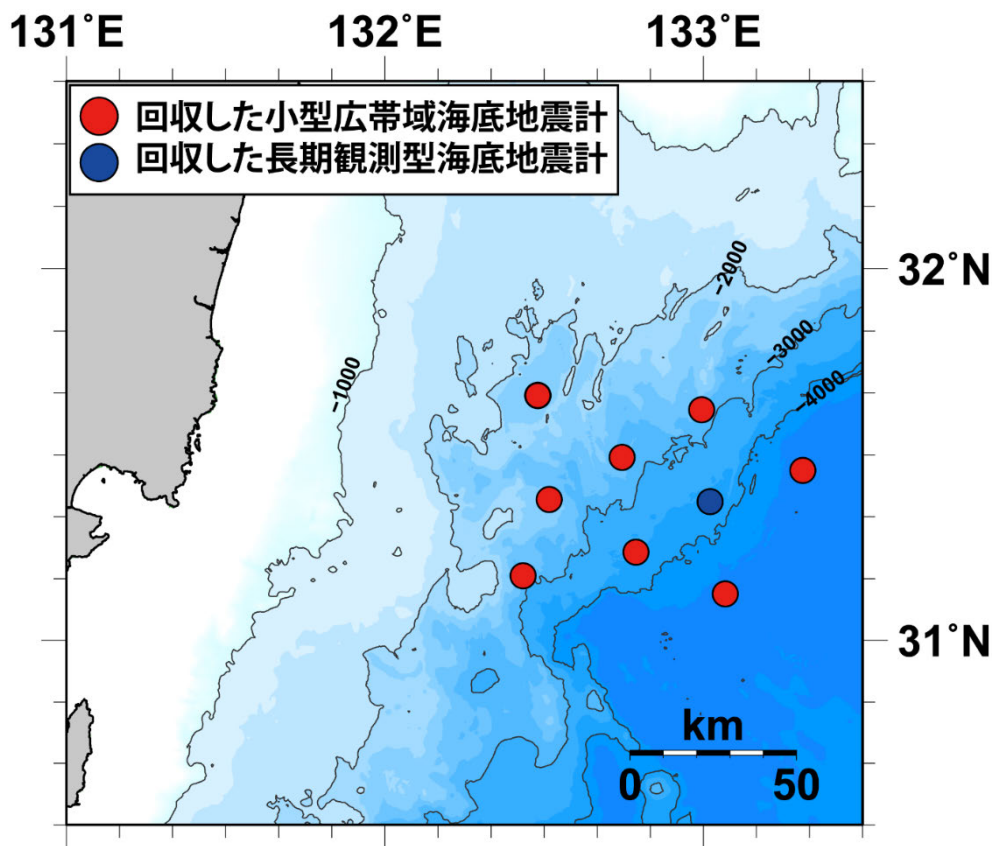


図 2-2-③-1 回収した海底地震計位置

令和 4 年度に設置され、令和 5 年度に回収した長期観測型および小型広帯域海底地震計 9 台の位置。青丸は長期観測型海底地震計、赤丸は小型広帯域海底地震計を示す。なお、図中のコンターは 1000m 間隔の等水深線である。

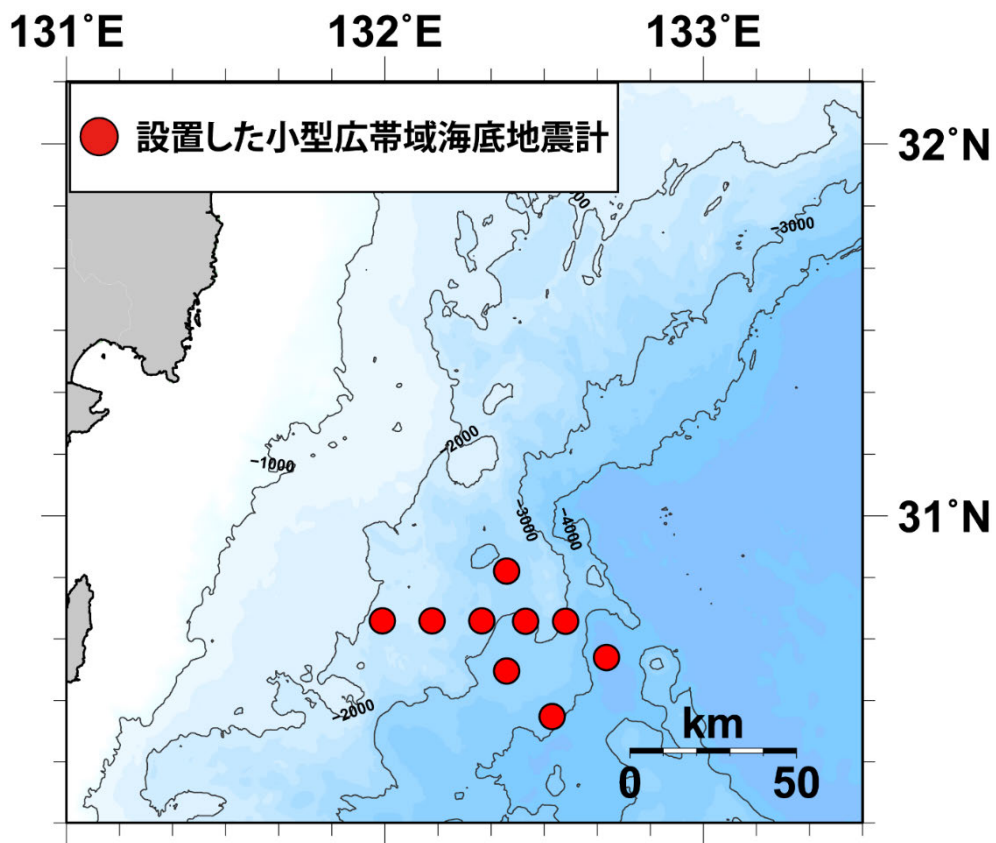


図 2 - 2 - ③ - 2 設置した海底地震計位置

令和 5 年度に設置され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を示す。これらの海底地震計は、令和 6 年度に回収予定である。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 観測船に搭載された海底地震計



写真 2 - 2 - ③ - 3 今回新たに整備した小型広帯域海底地震計と海底地震計設置前準備作業



写真 2 - 2 - ③ - 4 海底地震計投入

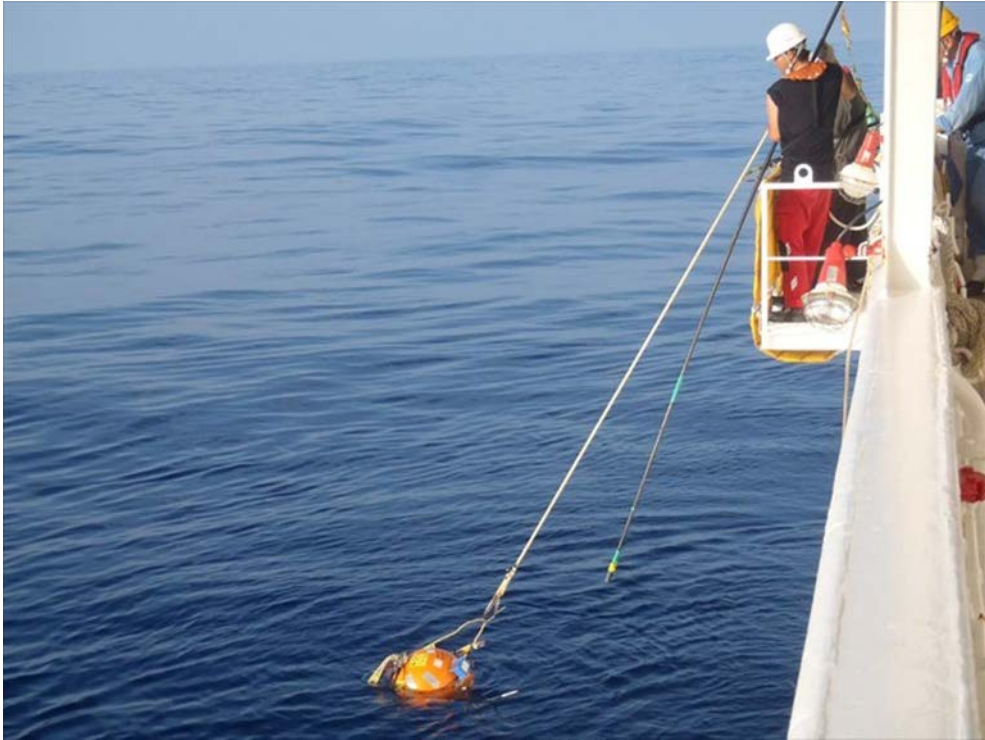


写真 2 - 2 - ③ - 5 海底地震計回収



写真 2 - 2 - ③ - 6 回収された海底地震計

表 2 - 2 - ③ - 1 海底地震計設置位置

| 観測点名 | 緯度 | | 経度 | | 水深 m | 備考 |
|--------|----|-------|-----|-------|---------|-------------|
| | 度 | 分 | 度 | 分 | | |
| NK2303 | 30 | 51.07 | 132 | 22.95 | 2830 | CBBOBS(120) |
| NK2305 | 30 | 43.15 | 132 | 59.45 | 2297 | CBBOBS(120) |
| NK2306 | 30 | 43.23 | 132 | 08.86 | 2391 | CBBOBS(120) |
| NK2307 | 30 | 43.22 | 132 | 18.22 | 2794 | CBBOBS(120) |
| NK2308 | 30 | 43.27 | 132 | 26.44 | 3076 | CBBOBS(120) |
| NK2309 | 30 | 43.16 | 132 | 33.91 | 3065 | CBBOBS(120) |
| NK2312 | 30 | 35.23 | 132 | 22.88 | 3244 | CBBOBS(120) |
| NK2314 | 30 | 38.00 | 132 | 41.13 | 4672 | CBBOBS(120) |
| NK2315 | 30 | 27.78 | 132 | 31.46 | 3641 | CBBOBS(120) |

備考欄の CBBOBS は小型広帯域海底地震計で、120 は固有周期 120 秒の広帯域地震計を搭載していることを示す。座標値は着底後の音響測量によって求められた着底位置である。ただし、NK2303 は時間の都合上、音響測量が実施できなかったため投入位置の座標を示している。

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（2023 年 8 月 18 日宮崎港出港、同年同月 21 日宮崎港帰港）を使用した。第 2 期観測より 2015 年 5 月～7 月にかけて浅部低周波微動・超低周波地震活動が確認されている日向灘のスロー地震活動域付近³⁾を観測対象域とした観測網を維持していたが、2023 年 4 月～6 月にかけて同領域でスロー地震活動が確認されたため、今年度は種子島東方沖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た。海底地震計の設置間隔は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を構築している。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る海底地震観測網と連携可能となるように観測点を配置した。

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、2023 年 4 月から 6 月にかけて浅部スロー地震活動が発生し、観測網の直下において発生した多数の浅部低周波微動ならびに超低周波地震を観測することに成功した(図 2 - 2 - ③ - 3)。また、2022 年 9 月以降に発生した群発的な地震活動についても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 - 4)。

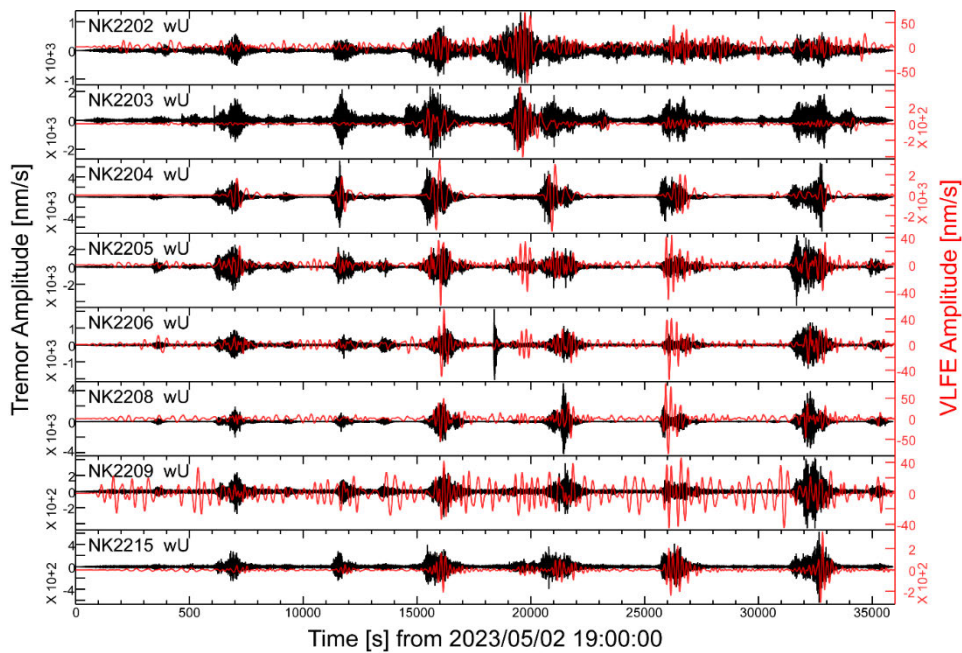


図 2 - 2 - ③ - 3 海底地震計の地震記録例（浅部低周波微動と超低周波地震）

観測網直下で発生した浅部低周波微動と超低周波地震の海底地震計記録。小型広帯域海底地震計 8 点分の上下動記録を示している。黒は浅部低周波微動帯域（2-4 Hz）、赤は超低周波地震帯域（20-50 s）のフィルターをかけている。

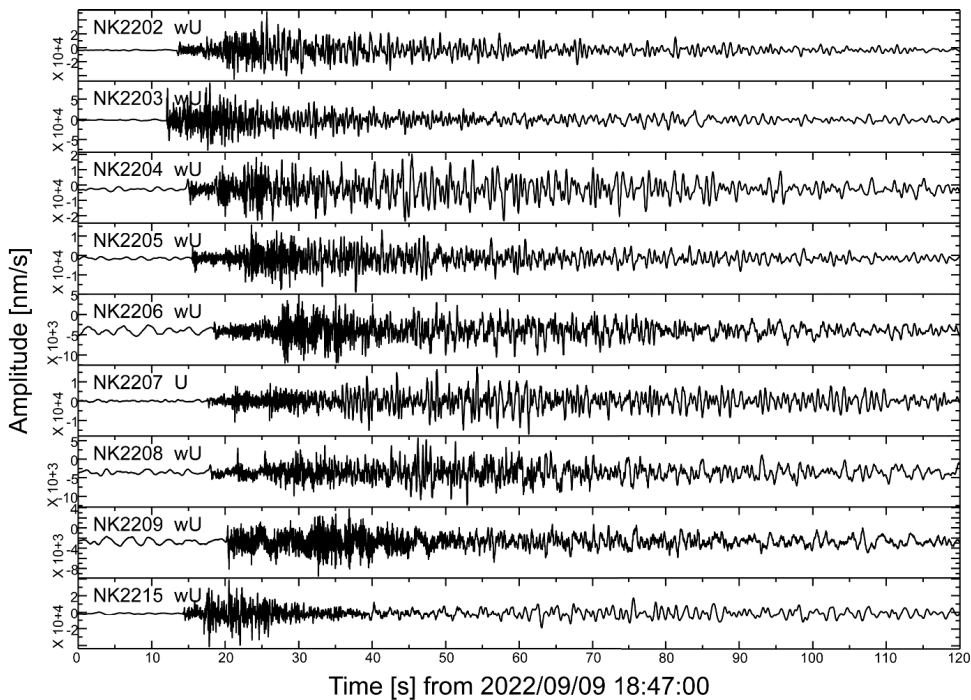


図 2 - 2 - ③ - 4 海底地震計の地震記録例

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 2022/09/09 18:47:06（日本時間）、震央は東経 132.4865 度、北緯 31.3663 度、震源の深さは 46.0km、マグニチ

ュードは 2.7 である。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、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⁾)の観測点との併合処理を行い、気象庁一元化カタログに掲載されている地震 83 個について震源再決定と初動発震機構解の解析を行った。各観測点における P 波および S 波の到達時、P 波初動の極性、上下動成分の最大振幅を手動で検出し、PS 変換波の走時から、堆積層補正値を求めた。これらを元に、hypoMH⁸⁾を用いて震源計算を行った。一次元速度構造は地震波構造探査の結果⁹⁾から作成し、震源計算で用いる V_p/V_s 値は、検測値から和達ダイアグラムを作成して得られた 1.9 を使用した。最終的に残差の RMS 値は、P 波は 0.31 s から 0.09 s、S 波は 1.06 s から 0.34 s まで減少し、多くの震源は水平誤差 0.5 km、深さ誤差 0.4 km 程度となり、陸上からの解析に比べ精度の高い震源分布が得られた(図 2-2-③-5)。気象庁による一元化震源と比較すると、震源は水平方向で北西に約 10 km 移動し、深さは全体的に浅くなり、多くの震源が 15 km 付近に集中した。HASH¹⁰⁾を用いて得られた 15 個の信頼性の高い発震機構解は正断層型の解が求められた。今回震源再決定を行った地震は、スロー地震活動と同期して発生した地震活動であったため、これまでプレート境界で発生していたと考えられていたが、解析結果はフィリピン海プレート内部で発生していることを示唆している。しかしながら、再決定後の震源が観測網の外にでてしまっており、射出角の計算次第では押し引き分布が低角逆断層型の分布にもなり得ることから、震源位置の確かさを含め今後精査が必要である。

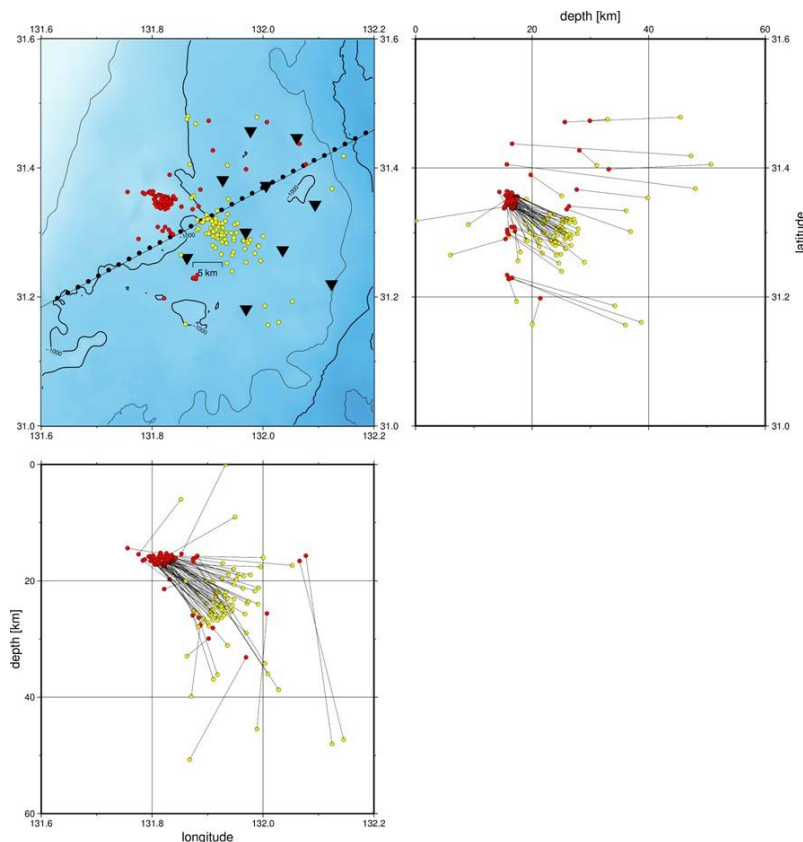


図 2-2-③-5 2021 年～2022 年観測期間中に発生した通常地震の震源再決定結果 (赤：本研究結果、黄：気象庁一元化カタログ)。図中の逆三角は海底地震観測点、実線と黒丸は速度構造の作成に用いた構造探査実験測線と海底地震計の位置⁸⁾を示す。

第2期観測にあたる2022年1月～2022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13個について震源再決定を行った。第2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は極めて低調であった。また、第3期観測である2022年8月から2023年8月の観測データについても、P波およびS波の到達時、P波初動の極性、最大振幅を手動で検出し、hypoMH⁸⁾を用いて震源計算を行った。第3期観測では、気象庁一元化カタログに掲載されている地震70個を解析対象とした。これらの震源決定では、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^{11,12)}及び地震波構造探査の結果^{11,12)}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^{13,14)} (tomoDD-SE)により、震源決定を行った。速度構造には、Nakanishi et al., 2018¹⁵⁾を簡略化した単純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、今回は地震数が少ないので、速度構造を固定とした。さらに、観測領域がほぼ同じであり、第3期観測である2022年8月から2023年8月の観測データについても、同様な方法で震源決定を行った、なお、第3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DPRI01⁶⁾)の観測点との併合処理とした。この期間は、2022年9月に群発活動があったことが、気象庁カタログから推定される。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20 kmとなった。現在求められているプレート境界モデル¹⁵⁾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、2022年9月に群発活動についても、沈み込むフィリピン海プレート内部で発生した可能性がある。

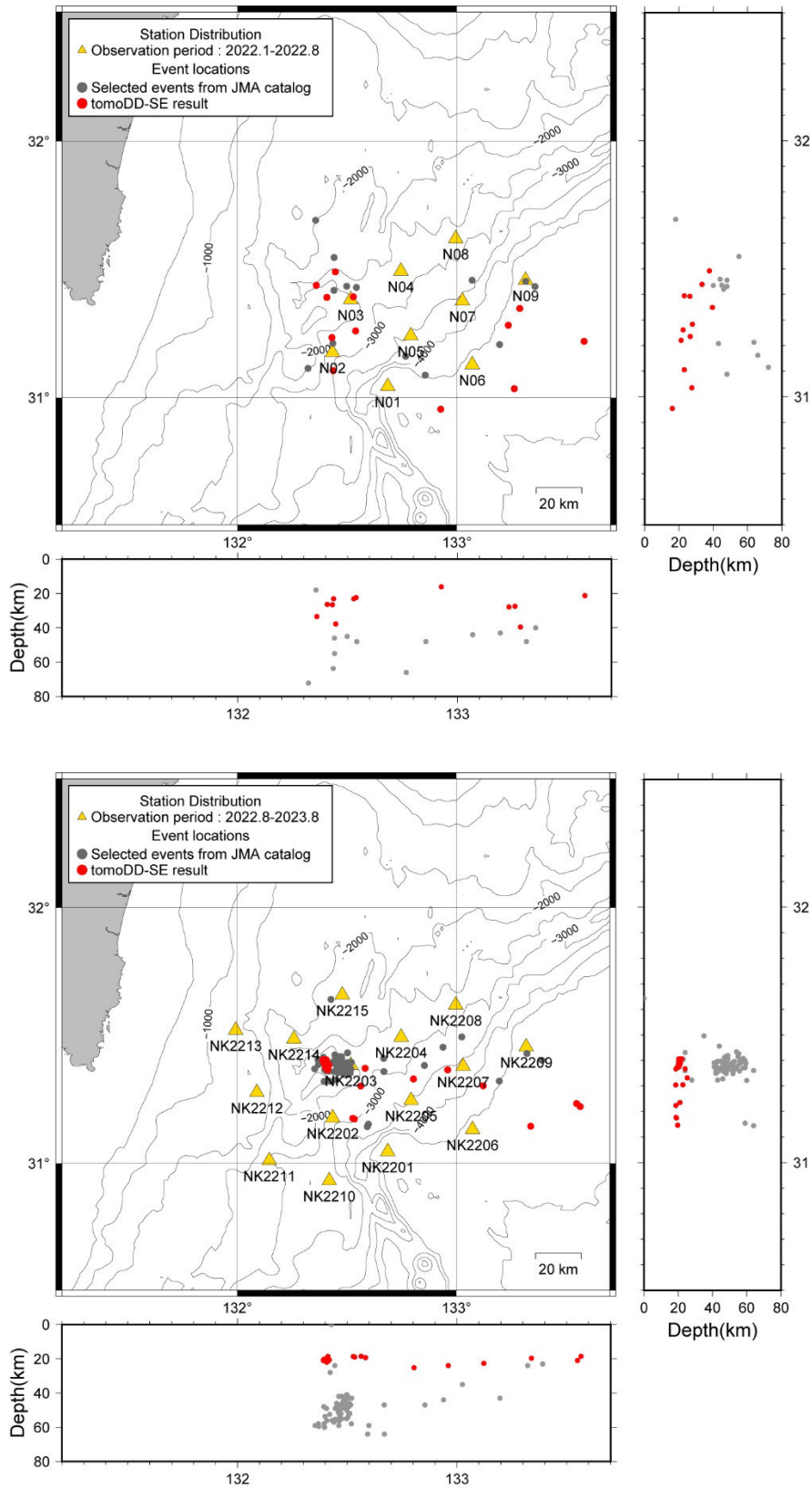


図 2-2-③-6 第 2 期観測である 2021 年 1 月から 2022 年 8 月まで (上) および第 3 期観測である 2022 年 8 月から 2023 年 8 月まで (下) の観測期間中に、気象庁が決定した通常地震の震源再決定結果 (赤: 本研究結果、灰色: 気象庁決定)。図中の三角は海底地震観測点、実線は等水深線である。

(d) 結論ならびに今後の課題

新たに固有周期 120 秒の広帯域地震計を搭載した海底地震計用レベリング装置 2 台の整備を行った。日向灘において、昨年度設置した海底地震計 9 台の回収を行うとともに、整備した小型広帯域海底地震計を含めた計 9 台の長期観測可能な海底地震計の設置を行い、観測を継続した。回収した海底地震計には良好なデータが取得されており、特に 2023 年 4 月～6 月にかけて発生した 2015 年以来の大規模なスロー地震活動を記録することに成功した。今年度設置した海底地震計は、海底地震計耐圧容器内の記録媒体にデータ収録されるため、データ取得には次年度以降の海底地震計回収作業が必須である。

今年度は昨年度まで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かった。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、深さはプレート境界付近の深さ 15 km 付近に決まった。今年度回収した海底地震計によって得られたデータも同様に、プレート境界およびその周辺で発生していると考えられる通常の地震を主として、スロー地震を含めた地震活動を把握し、浅部プレート境界域における解析を実施する。

次年度は本プロジェクト最終年度に当たるため、今年設置した広帯域海底地震計を含めた海底地震計をすべて回収し、これまでに取得したデータの解析を進め、プレート境界浅部域における様々な地震活動を明らかにすることを目指す。

(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4年度成果報告書, <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/R4/R4SeikaGaiyo.pdf>
- 8) Arai, R., S. Miura, Y. Nakamura, G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, K. Mochizuki, R. Nakata, M. Kinoshita, Y. Hashimoto, Y. Hamada, and K. Okino, Upper-plate conduits linked to plate boundary that hosts slow earthquakes, *Nat. Commun.*, 14, 5101, doi:10.1038/s41467-023-40762-4, 2023.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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
- 12) 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
- 13) Zhang, H. and C. H. Thurber, Double-Difference Tomography: The application to the Hayward Fault California, *Bull. Seism. Soc. A.*, 93, 1875-1889, 2003
- 14) 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.
- 15) 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

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 |
|---|---|-----------------------|---------|--------|
| Towards Adjoint Tomography of the Nankai and Kyushu Subduction Zones (ポスター発表) | Samriddhi Prakash Mishra Yoshihiro Kaneko Bryant Chow Shun Adachi Yusuke Yamashita Masanao Shinohara | AGU Fall Meeting 2023 | 2023.12 | 国外 |
| Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation (ポスター発表) | ChingYu Hu Masanao Shinohara Yusuke Yamashita Tomoaki Yamada Takeshi Akuhara Kimihiro Mochizuki | AGU Fall Meeting 2023 | 2023.12 | 国内 |
| Seismic activity around plate boundary near westernmost Nankai trough revealed by ocean bottom seismometer observation (口頭発表) | 胡靚妤 篠原雅尚 山下裕亮 山田知朗 悪原岳 望月公廣 | 日本地震学会 2023年秋季大会 | 2023.10 | 国内 |
| Towards adjoint tomography of Nankai and Kyushu subduction zones (ポスター発表) | Samriddhi Mishra Yoshihiro Kaneko Bryant Chow Yusuke Yamashita Masanao Shinohara | 日本地球惑星科学連合2023年大会 | 2023.5 | 国内 |

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 |
|--|---|---------------------------------------|---------|------------|
| Spatial variation in shallow slow earthquake activity in Hyuga-nada, southwest Japan (査読有) | S. Baba S. Takemura K. Obara A. Takeo Y. Yamashita M. Shinohara | Geophys. J. Int. | 2024. 1 | 国外 |
| Shallow Low - Velocity Layer in the Hyuga - Nada Accretionary Prism and Its Hydrological Implications: Insights From a Passive Seismic Array (査読有) | T. Akuhara Y. Yamashita S. Ohyanagi Y. Sawaki T. Yamada M. Shinohara | Journal of Geophysical Research | 2023. 4 | 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