

## 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 <sup>＊</sup> 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、内陸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、プレート境界と内陸断層におけるすべり・固着分布を同時推定した結果を得る。構造モデル等の不確かさが固着・すべり分布推定に与える影響について知見を得る。前回の南海トラフ地震以降のすべり遅れの蓄積並びに現在の応力状態とその不確かさについて知見を得る。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・モデル化について知見を得る。

#### 5) 令和6年度：

内陸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した結果を得る。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4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。具体的には海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。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する。具体的には、すべり分布を安定的に推定するための正則化拘束の高度化を行う。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、広帯域地震観測を継続しつつ、回収データに対して予備的な解析を実施する。

### (2) 令和4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、昨年度構築した全国一次地下構造モデルにできる限り忠実に従った有限要素法モデルの中に分岐断面を設定し、変位応答グリーン関数の計算を実施した。

また、昨年度計算した現実的な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を用いたプレート間固着域の推定を試行した。

(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<sup>1,2</sup>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高い「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、分岐断層の下端及び上端を決定した。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、昨年度計算した現実的な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を使用し、プレート間固着域の推定を実施した。Tomita et al. (2022)<sup>3)</sup>の構築した逆解析手法を、Nishimura et al. (2018)<sup>4)</sup>が用いた陸上GNSS観測及び海底GNSS-A観測に基づく西南日本の変位速度場に対して適用し、プレート境界におけるすべり欠損分布とその誤差分布の推定を、海陸の地殻変動データの重みパラメーターの最適化と同時行った。

(c) 業務の成果

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2-2-①-2)。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2-2-①-3)。また、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。

南海トラフ沈み込み帯のプレート境界面上におけるすべり欠損分布を誤差の分布とともに推定した(図2-2-①-4)。現実的な3D構造モデルに基づくグリーン関数を用い、また、海陸のデータの重みを自動的に最適化する手法を用いた結果、内陸のブロック運動を考慮せずとも、ある程度妥当なすべり欠損分布を推定することができた。

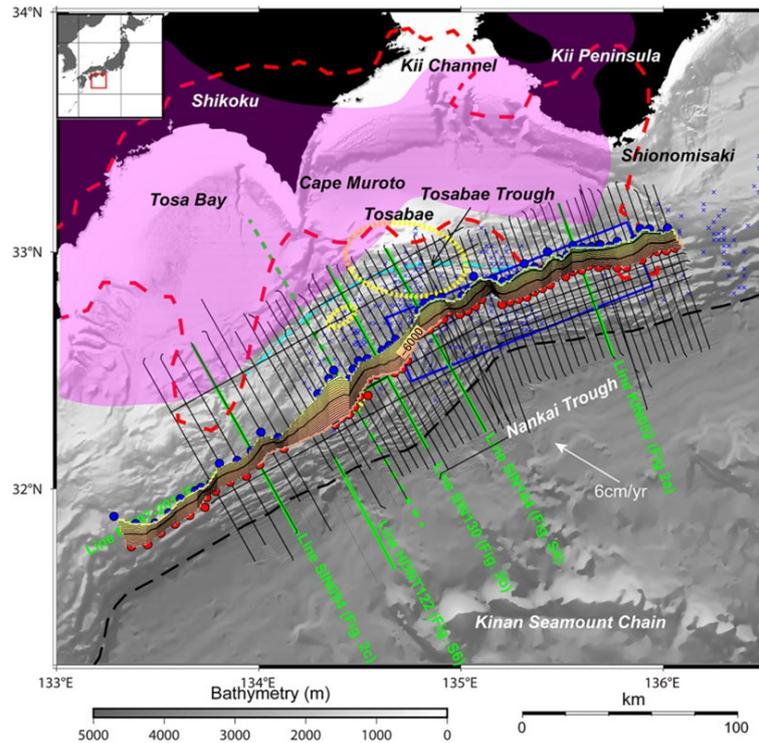


図 2-2-①-1 南海トラフ沿いの構造探査測線（黒実線・緑実線）に沿って取得された構造断面から構築した分岐断層面。等深線は 300m 間隔。各測線において読み取った分岐断層の上端（海底面と分岐断層面の交点）及び下端（プレート境界面と分岐断層面の交点）の位置を赤丸及び青丸で示した。測線の位置を含め背景の地図は Nakamura et al. [2022]からの抜粋。

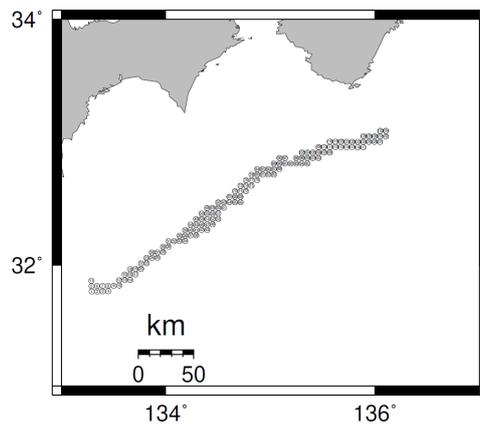


図 2-2-①-2 構築した分岐断層面上に配置したスプライン関数のノード配置（計 134 点）。それぞれの位置に頂点を持つスプライン関数で走向・傾斜方向のすべり分布を与えて地表・海底での変位を計算し、グリーン関数を得た。

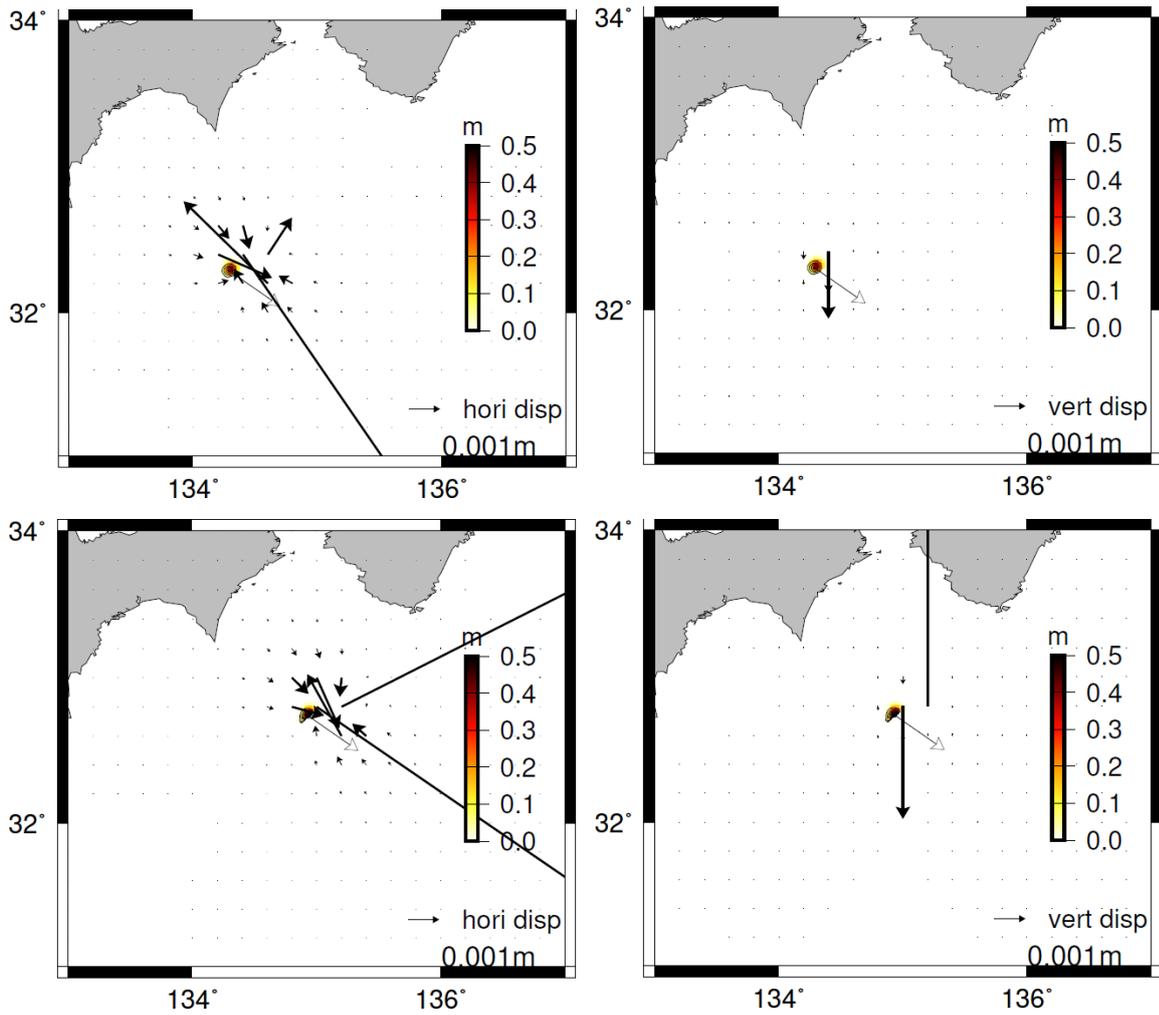


図 2-2-①-3 図 2-2-①-2 の 41 (上段) と 81 (下段) のノードに傾斜方向のすべりを与えた場合の地表・海底での変位。左は水平成分、右は上下成分を示す。

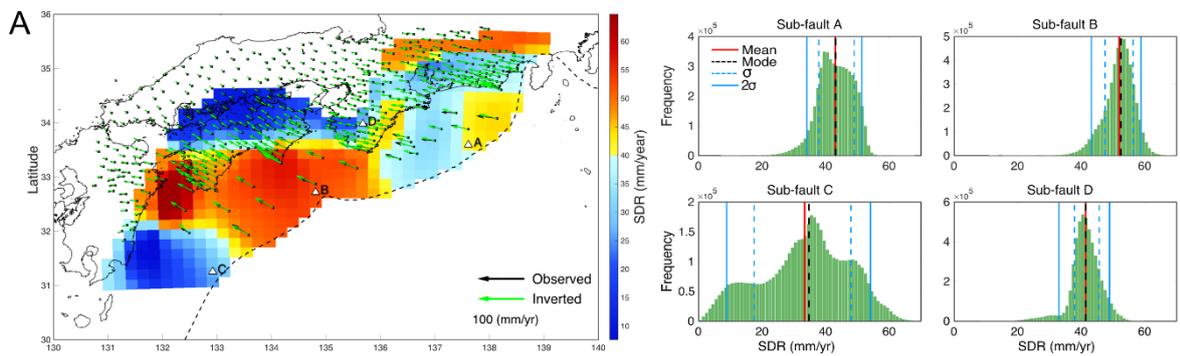


図 2-2-①-4 海陸の観測点における変位速度から推定したすべり欠損レート (SDR; Slip Deficit Rate) の分布 (左) と、地図中の A~D 各点での推定すべり欠損値の頻度分布 (右)。左図の黒矢印が入力した観測値、緑矢印が推定されたすべり欠損分布からの計算値。

(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に加えて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、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。

本年度推定したプレート間のすべり欠損分布については、次年度早急に論文による公表を行うが、誤差の推定結果の可視化や今後新しい変位速度場データが得られた際に随時再推定を行うシステムの構築を検討する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) Park, J.O., 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) 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.
- 3) Tomita, T., T. Iinuma, R. Agata, and T. Hori (2021). Development of a Trans-Dimensional Fault Slip Inversion for Geodetic Data, *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JB020991, doi:10.1029/2020JB020991.
- 4) Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, T. Ochi (2018). Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14, 535-551, doi:10.1130/GES01529.1

(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 and slow earthquake distribution at the Nankai Trough (ポスター)	Plata-Martinez R. O. T. Iinuma F. Tomita T. Nishimura R. Agata T. Hori	AGU 2022 Fall Meeting	2022.12	国外

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、推定された断層すべりが持つ誤差を定量評価するとともに、その推定において断層すべりが自己相似性を持つという先験情報を反映させ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行った。また令和5年2月13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行ない、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

プレート間の固着、すべりを限られた測地観測データから推定するとき、得られた断層すべりには大きな推定不確実性が内在する。特に断層すべり分布を求める際には、離散化した小断層の数が使用するデータ数よりも大きい劣決定問題であることが多い。こうした問題を安定して解くためには先験情報などに基づいた制約により、問題を正則化する必要がある。正則化の手法として、ラプラスアン平滑化が最もよく用いられる。これはすべりの空間2階微分のL2ノルム最小化を条件とする拘束であり、断層面上でのすべり量の変化率を最小化することで平滑化されたすべり分布を獲得できる。同平滑化は、断層上の隣接する場所で応力降下量が極端に異なった値を取らないという先験情報をラプラスアンという形で数学的に表現したものとも言い換えられる。一方、ラプラスアン平滑化を含むL2ノルム平滑化拘束では、すべりが生じていない小断層でも微小なすべりを推定する特徴があるとの報告<sup>1)</sup>もある。また、断層すべりが自己相似性を持つという特徴を活用した拘束手法も存在する。Mai and Beroza (2002)<sup>2)</sup>では、さまざまな地震において推定されたすべり分布モデルを解析し、それらが von Karman の自己相関関数によって近似される自己相

似性を持つことを示した上で、さらに既往地震のすべり分布をコンパイルすることで、von Karman の自己相関関数におけるハイパーパラメータである相関距離とハースト指数のマグニチュードに対するスケーリング則を構築している。また、Amey et al. (2018)<sup>3)</sup> では、同スケーリング則に従う von Karman の自己相関関数を正則化拘束に用いるすべり分布推定手法を開発した。一方、同スケーリング則の構築においてはマグニチュードが 8 を超える巨大地震がほとんど含まれていないことなど、スケーリング則自体に大きな不確実性が含まれている。

こうした背景のもと、本年度は von Karman の自己相関関数による制約を与えたすべり分布推定において、これまでハイパーパラメータとして扱われていた相関距離も同時推定する手法を開発した。同問題は、複数の非線形パラメータを同時に推定することになる。そのため、開発した手法ではベイジアン逆解析を採用した。さらにパラメータ数の増加にともなう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) を採用した。開発した手法の妥当性を検証するために、まず相関距離を走向方向に 100km、傾斜方向に 50km と仮定したすべり分布を作成した。この時、傾斜角は 10 度とし、低角逆断層型のプレート境界型地震を仮定した。相関距離を同時推定することを目的としたため、この数値実験では観測点を 10km 間隔で満遍なく配置した。また、実際の南海トラフでの巨大地震に近い検証として、1707 年宝永地震の地震時すべり (図 2-2-②-1) を想定したデータセットに対しても適用し、その制度評価を行った。なお、ここで仮定した地震時すべり分布は必ずしも von Karman の自己相関関数に従うすべり分布ではない。そのため、相関距離の比較においては、Mai and Beroza (2002) が構築したスケーリング則から計算される相関距離の値をその比較対象として用いた。

また、これまで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行った。具体的には 1707 年宝永地震の地震時すべりを参考に 3D グリーン関数によって地表面変位を計算し、それにノイズを加えた後、均質半無限弾性体のグリーン関数<sup>5)</sup> によってすべり分布の復元を試みた。推定においては、上で述べた von Karman の自己相関関数による正則化拘束を適用した HMC 法によるサンプリングを用いた。これによって、現実を反映していないグリーン関数を用いた場合にどのような偽像が出現しうるかについて定性的な評価を行った。

また令和 5 年 2 月 13 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行ない、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

図 2-2-②-2 に相関距離を仮定して作成した地震時すべり分布を開発した手法で、相関距離を含めて同時推定した結果を示す。本手法では HMC 法によるサンプリングを行っているため、結果は事後確率分布の最頻値に基づいて描画している。結果及び真値との残差分布を見ると、得られた最頻値モデルは与えたすべりをよく説明していることが分かる。また、同時に推定した相関距離の事後確率分布 (図 2-2-②-3) を見ると、与えた相関

距離の値をピークに含むような結果が得られている。この結果は、これまでハイパーパラメータとして扱ってきた相関距離を同時推定できることを示す結果である。

図 2-2-②-4 に 1707 年宝永地震の地震時すべりを想定したデータセットに対して、開発した手法を適用して推定された地震時滑り分布を示す。結果及び真値との残差分布を見ると、得られた最頻値モデルは与えたすべりをよく説明する。また、同時推定した相関距離の事後確率分布（図 2-2-②-5）を見ると、走向方向についてはスケーリング則が最頻値に近いところに位置しているのに対し、傾斜方向についてはスケーリング則の値よりも大きな値に最頻値が位置することが分かった。この原因としては、Mai and Beroza (2002) によるスケーリング則自体がマグニチュード 8 を超えるイベントをほとんど含まない形で構築されていること、プレート境界型地震ではプレートの沈み込み角度などによって地震発生層の幅などが沈み込み帯毎に大きく異なることなど、スケーリング則自体の不確実性を反映している可能性があると考えている。一方、今回の検証では陸域のみに観測点が存在し、海溝軸近傍のすべりに対する感度が低い。すなわち、推定される相関距離は、データが分解できるすべりの空間解像度を反映している可能性がある。今後、推定される相関距離の妥当性や物理的な意味などの検討が必要であると考えられる。

図 2-2-②-6 に 1707 年宝永地震の地震時すべりを参考に 3D グリーン関数によって地表面変位を計算し、それにノイズを加えた後、均質半無限弾性体 (Okada, 1992) のグリーン関数によってすべり分布の復元を試みた結果を示す。観測点配置による推定結果への影響を除去するために、観測点を海域にも稠密に配置した結果を見ると、地震時すべりの大きな領域の深部延長に負のすべりが生じていることが分かる。これは仮定したすべり分布では与えていないものであり、現実から乖離したグリーン関数を用いることで生じた虚像であると考えられる。すなわち、正確なすべり分布の推定には、正確なグリーン関数の使用がきわめて重要であることが改めて明らかになった。

令和 5 年 2 月 13 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行ない、本研究課題の進捗状況についての報告及び議論を行うことで、本プロジェクトで開発する技術の方向性について明確化することができた。

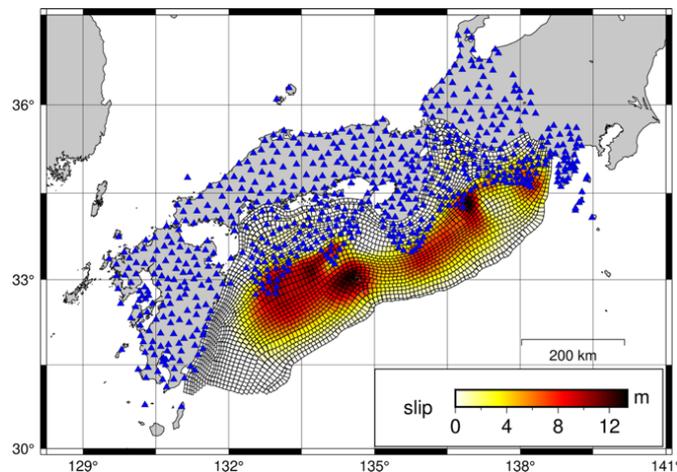


図 2-2-②-1 仮定した 1707 年宝永地震の地震時すべり分布。青い三角は仮定した GNSS 観測点の位置を示す。

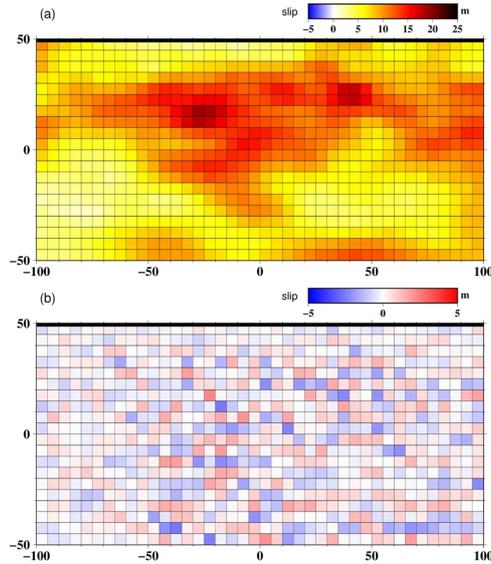


図 2-2-②-2 推定されたすべり分布(最頻値を使用) (上段) と仮定したすべりとの残差 (下段)。

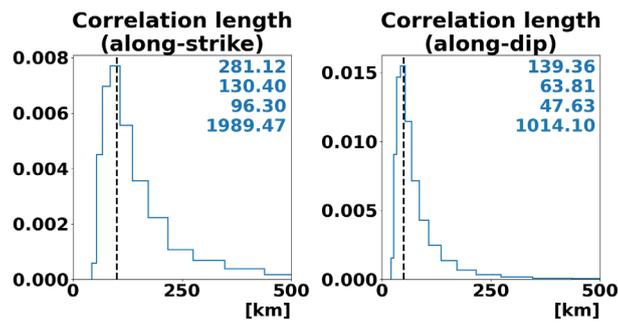


図 2-2-②-3 推定された相関距離。左図：走向方向の相関距離の事後確率分布。右図：傾斜方向の相関距離の事後確率分布。図中の破線は仮定した相関距離の値を示す。挿入値は上から平均値、中央値、最頻値、95%信用区間幅をそれぞれ示す。

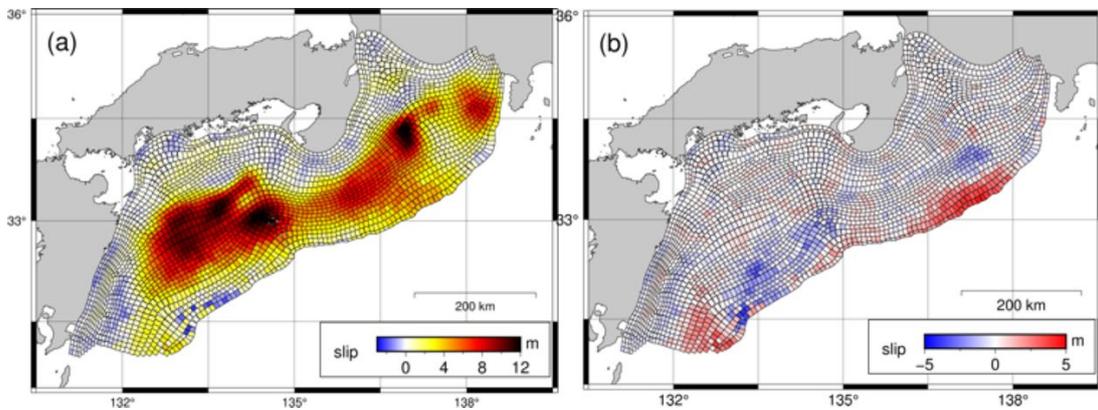


図 2-2-②-4 開発した手法で推定されたすべり分布 (左図) と仮定したすべりとの残差 (右図)。

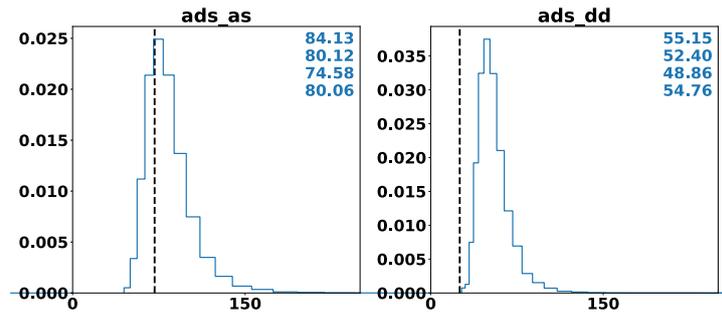


図 2-2-②-5 推定された相関距離。左図：走向方向の相関距離の事後確率分布。右図：傾斜方向の相関距離の事後確率分布。図中の破線は Mai and Beroza (2002) によって構築されたスケージング則に基づく相関距離の値を示す。挿入値は上から平均値，中央値，最頻値，95%信用区間幅をそれぞれ示す。

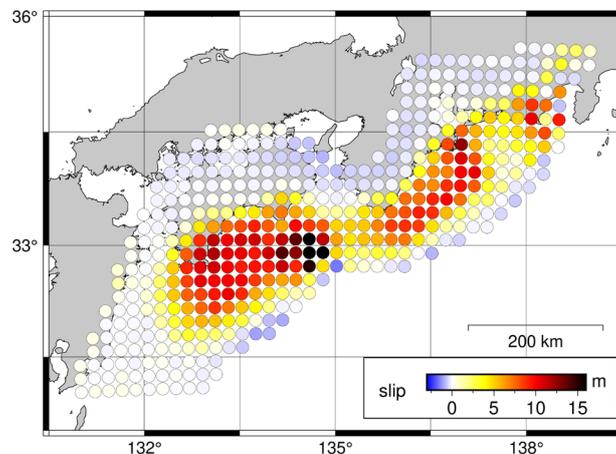


図 2-2-②-6 3Dグリーン関数に基づいて計算した地殻変動場から、均質半無限媒質を用いて推定した地震時すべり分布。地震時すべりの深部延長を中心として負のすべりが生じていることが分かる。

#### (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み、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、推定された断層すべりが持つ誤差を定量評価するとともに、その推定において断層すべりが自己相似性を持つという先験情報を反映させるための技術開発を実施し、その精度検証を、数値実験を中心として実施した。その結果、従来ハイパーパラメータであった相関距離も含めて同時推定することに成功した。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行った。今後は、3Dグリーン関数を用いつつ、開発した手法を実データ等へ適用することで、プレート間のすべり・固着状態をどの程度把握できる能力があるのかについて、定量評価が必要である。

(e) 引用文献

- 1) Wang, L., Zhao, X., Xu, W., Xie, L., and Fang, N.: Coseismic slip distribution inversion with unequal weighted Laplacian smoothness constraints. *Geophysical Journal International*, 218(1), 145-162. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz125>, 2019.
- 2) Mai, P. M., and Beroza, G. C. : A hybrid method for calculating near-source, broadband seismograms: Application to strong motion prediction. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 137(1-4), 183-199. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(03\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(03)00014-1), 2003.
- 3) Amey, R. M. J., Hooper, A., and Walters, R. J.: A Bayesian Method for Incorporating Self-Similarity Into Earthquake Slip Inversions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(7), 6052-6071. <https://doi.org/10.1029/2017JB015316>, 2018.
- 4) 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.

(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
ハミルトニアモンテカルロ法による断層推定および不確実性評価手法の開発（口頭）	山田太介 太田雄策 大野圭太郎	日本地球惑星科学 連合2022年大会	2022. 5	国内
相関距離を未知とした自己相似性を断層すべりの先験情報としたすべり分布推定手法の開発（口頭）	山田太介 太田雄策	日本測地学会第 138回講演会	2022. 10	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
Impact of Ambiguity of Physical Properties of Three-Dimensional Crustal Structure Model on Coseismic Slip and	Murakami, S. T., Ichimura K. Fujita T. Hori Y. Ohta	GeoHazards	2022. 4	国外

Interseismic Slip Deficit in the Nankai Trough Region				
Comparison between the Hamiltonian Monte Carlo method and the Metropolis-Hastings method for coseismic fault model estimation	Yamada, T. K. Ohno Y. Ohta	Earth, Planets and Space	2022.6	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10台の回収を行った。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3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。これらのうち、8台は小型広帯域海底地震計である。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。今回の観測期間中には目立ったスロー地震活動は発生していなかったものの、観測網の直下を含む複数の地震活動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<sup>1,2,3)</sup>。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<sup>3)</sup>。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<sup>3)</sup>、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<sup>2)</sup>。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<sup>1)</sup>、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<sup>3)</sup>。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、海底で発生する地震の震源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<sup>4)</sup>、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及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<sup>5)</sup>3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10台の回収を行うとともに、本年度整備した3台のレベリング装置付き小型広帯域海底地震計に加え、固有周期120秒の小型広帯域海底地震計5台、固有周波数1Hzの地震計を搭載した長期観測型海底地震計1台の計9台の海底地震計を新たに設置して、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)。

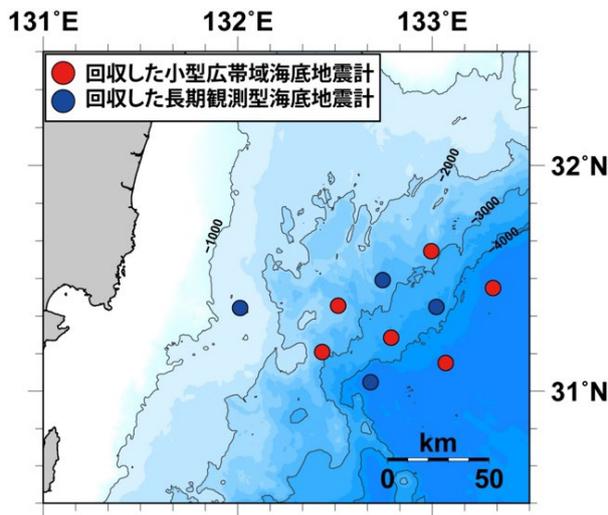


図 2-2-③-1 回収した海底地震計位置

令和 3 年度に設置され、令和 4 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 10 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。

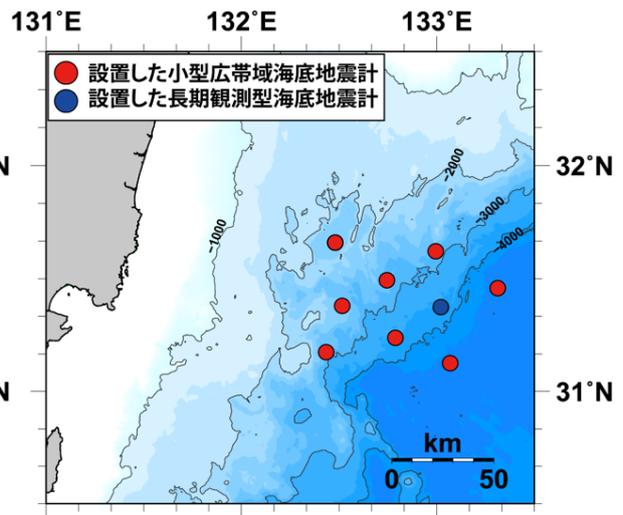


図 2-2-③-2 設置した海底地震計位置

令和 4 年度に設置された長期観測型および小型広帯域海底地震計 10 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。これらの海底地震計は、例 s5 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

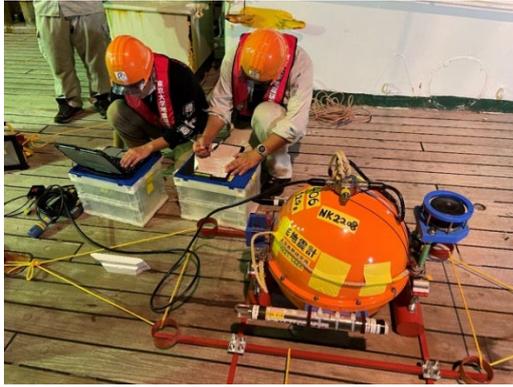


写真 2 - 2 - ③ - 3 今回新たに整備した小型広帯域海底地震計と海底地震計設置前準備作業

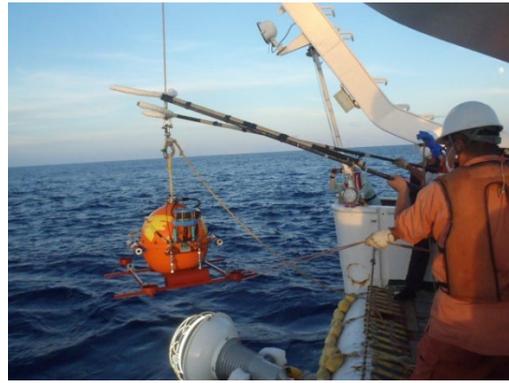


写真 2 - 2 - ③ - 4 海底地震計投入



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		
NK2202	31	10.73	132	26.13	2839	CBB OBS (120)
NK2203	31	23.11	132	31.09	2458	CBB OBS (120)
NK2204	31	29.73	132	44.88	2915	CBB OBS (120)
NK2205	31	14.85	132	47.60	3456	CBB OBS (120)
NK2206	31	07.77	133	04.42	4589	CBB OBS (120)
NK2207	31	22.85	133	01.86	3584	LOBS
NK2208	31	37.25	132	59.83	2779	CBB OBS (120)
NK2209	31	27.44	133	19.12	4870	CBB OBS (120)
NK2215	31	39.60	132	28.77	2454	CBB OBS (120)

備考欄の LOBS は固有周波数 1Hz の速度型地震計を搭載した長期観測型海底地震計、CBB0BS 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。

設置及び回収作業には、海洋エンジニアリング株式会社所属の第三開洋丸（2022 年 8 月 10 日宮崎港出港、同年同月 13 日宮崎港帰港）を使用した。なお、一部の回収作業は長崎大学練習船「長崎丸」を用いて行われた（2022 年 8 月 2 日実施）。本年度は昨年度より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、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ロー地震活動域付近を観測対象域とした観測網を維持した。海底地震計の設置間隔は 20～30 km とし、特にトラフ軸周辺における活動の有無を確認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 DPRI01<sup>6)</sup>)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。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。今回の観測期間中には目立ったロー地震活動が発生していなかったが、回収された海底地震計記録は良好であり、通常地震が記録されていることを確認した(図 2-2-③-3)。

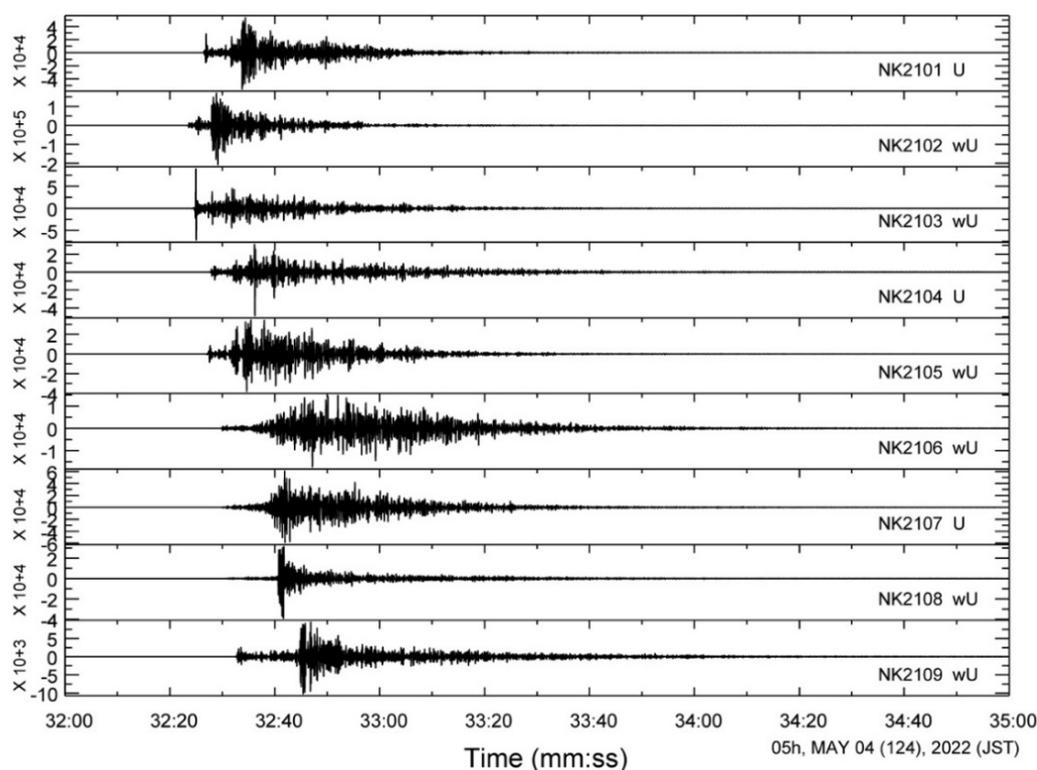


図 2-2-③-3 海底地震計による通常地震記録例

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 2022/05/04 05:32:18.77 (日本時間)であり、震央は、東経 132.4347 度、北緯 31.2127 度、震源の深さは 63.72km、マグニチュードは 2.9 である。

本年度は、観測対象域において、2014年以降に実施された海底地震観測のデータを利用して、設置された海底地震計の方位を Rayleigh 波粒子軌跡の解析から推定した<sup>11)</sup>。その結果、広帯域海底地震計 (BBOBS) の大半が 5°以下、長期観測型海底地震計 (LTOBS) の約半数で 12°以下であったが、推定誤差が 20°以上となる LTOBS 観測点が見られた。推定誤差の大きい観測点は水深が 2,200m から 2,600m の範囲に設置されており、水深が浅いほど推定誤差が大きい結果となった。海洋 infragravity 波と雑微動のパワースペクトル密度の関係や、海洋におけるノイズ源との比較・考察より、LTOBS の方位推定誤差の水深依存性は、海底流が Rayleigh 波の水平動成分の SN 比を下げるるとともに、コンプライアンスノイズが Rayleigh 波の上下動波形自体を歪めた結果であることを推察した。本研究の結果は、Rayleigh 偏向波解析<sup>12)</sup>による方位推定誤差が海底の環境雑微動レベルの指標となり得ることを実証した形となり、本プロジェクトで行われている海底地震観測においても、水深依存性を持つ海底背景ノイズレベルが表面波や雑微動を用いた解析に影響を与える可能性を示唆した。

#### (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 3 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 10 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いたが、今回の観測期間中には目立ったスロー地震活動は発生していなかった。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。今回は回収し得られたデータをもとに、プレート境界及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。地震活動の詳細な時空間把握のためには、継続的な観測ならびにスロー地震の帯域まで記録可能な機材による観測が重要である。次年度以降においても、広帯域海底地震計を含めた海底観測網を構築し、観測を実施する予定である。そのため、新たにレベリング装置付き小型広帯域海底地震計の整備を行うことも計画している。さらに、観測対象域において、2014年以降に実施された海底地震観測のデータを利用して、Rayleigh 偏向波解析による方位推定誤差が海底の環境雑微動レベルの指標となり得ることを実証した。

#### (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, <https://doi.org/10.1038/ngeo1466>, 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) 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.
- 4) 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, doi:10.1126/science.1074111, 2020.
- 5) 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.
- 6) 「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3年度成果報告書, [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/R3/r3\\_kikanbetsu.pdf](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/R3/r3_kikanbetsu.pdf)
- 7) Yamashita, Y., Shinohara, M., and Yamada, T.: 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, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01533-x>, 2021.
- 8) Nakanishi, A., Takahashi, N., Yamamoto, Y., Takahashi, T., Ozgur, Citak S., Nakamura, T., Obana, K., Kodaira, S., and Kaneda, Y.: Three-dimensional plate geometry and P-wave velocity models of the subduction zone in SW Japan: Implications for seismogenesis. In: Byrne T, Underwood MB, III, Fisher D et al. (eds) *Geology and Tectonics of Subduction Zones: A Tribute to Gaku Kimura*, vol 534. *Special Paper of the Geological Society of America*. [https://doi.org/10.1130/2018.2534\(04\)](https://doi.org/10.1130/2018.2534(04)), 2018.
- 9) Yamamoto Y., Obana K, Takahashi T, Nakanishi A, Kodaira S, and Kaneda Y.: Imaging of the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region, western Nankai Trough subduction zone. *Tectonophysics* 589:90-102. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.028>, 2013.
- 10) Tonegawa T., Yamashita Y, Takahashi T, Shinohara M, Ishihara Y, Kodaira S, and Kaneda Y.: Spatial relationship between shallow very low frequency earthquakes and the subducted Kyushu-Palau Ridge in the Hyuga-nada region of the Nankai subduction zone. *Geophys J Int* 222(3):1542-1554. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa264>, 2020.
- 11) Sawaki, Y., Yamashita, Y., Ohyanagi, S., Garcia, E. S. M., Ito, A., Sugioka, H., Takahashi, T., Shinohara, M., and Ito, Y.: Seafloor depth controls seismograph orientation uncertainty, *Geophys. J. Int.*, 232, 2, 1376–1392, <https://doi.org/10.1093/gji/ggac397>, 2022.

12) Doran, A.K., and Laske, G.: Ocean-bottom seismometer instrument orientations via automated Rayleigh-wave arrival-angle measurements, *Bull. seism. Soc. Am.*, 107, 691-708., <https://doi.org/10.1785/0120160165>, 2017.

(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
Ocean bottom seismological observation at the boundary between slow earthquakes and ordinary earthquakes in Hyuga-nada, western part of Nankai Trough、(ポスター発表)	山下裕亮 大柳修慧 佐脇泰典 仲谷幸浩 八木原寛 伊藤喜宏 篠原雅尚	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022.6	国内
Seismological Property and Structure beneath the Seafloor at the Hyuga-nada, Estimated Using Ocean Bottom Seismographs、(ポスター発表)	佐脇泰典 山下裕亮 大柳修慧 Emmanuel Soliman Garcia 伊藤亜妃 杉岡裕子 高橋努 篠原雅尚 伊藤喜宏	日本地球惑星科学連合2022年大会	2022.6	国内
日向灘海底地震観測記録から得られる自己相関関数の時空間的特徴、(ポスター発表)	佐脇泰典 山下裕亮 大柳修慧 Garcia Emmanuel Soliman 篠原雅尚 伊藤喜宏	日本地震学会2022年秋季大会	2022.10	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
Seafloor depth controls seismograph orientation uncertainty broadband ocean bottom seismic observations	Sawaki, Y. Y. Yamashita S. Ohyanagi E. S. M. Garcia A. Ito H. Sugioka T. Takahashi M. Shinohara Y. Ito	<i>Geophys. J.</i> <i>Int.</i>	2022.10	国外

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