

## 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	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	技術補佐員	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
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	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：

より正確な地殻変動の再現を目指し、最新の3D構造モデルを用いたグリーン関数の改訂を行う。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を得る。開発した手法を用いて実データに基づいて、南海トラフにおけるプレート間固着強度分布をその不確実性とともを得る。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。

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、分岐断層等を含めた海域構造を考慮した全国地下構造モデルでのグリーン関数を得る。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る。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。

#### 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実性が固着・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欠損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：

内陸断層およ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2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日本周辺域における弾性グリーン関数の構築を行うとともに、プレート境界でのすべり・固着による、熊野灘周辺に設置された長期孔内観測システムにおける歪・傾斜応答グリーン関数を精度よく計算するため、既存の有限要素モデルでは空間解像度が不足している領域を局所的に細分化する手法の実装及び高精細化されたモデルを用いてのグリーン関数の計算を実施する。推定された断層すべりが持つ誤差を定量評価するために、マルコフ連鎖モンテカルロ法を活用した推定手法の開発に着手する。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た広帯域地震観測データを得ることを目的に、固有周期120秒の広帯域地震計を搭載したレベリング装置付き小型広帯域海底地震計5台の整備を行う。さらに南海トラフ西部の日向灘において、これまで浅部低周波微動や超低周波地震活動の発生が確認されている領域に今年度に整備を行った小型広帯域海底地震計5台を含め、10台の長期観測可能な海底地震計を設置し、観測を開始する。

### (2) 令和2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(図2-2-①-1)に基づいて計算する。

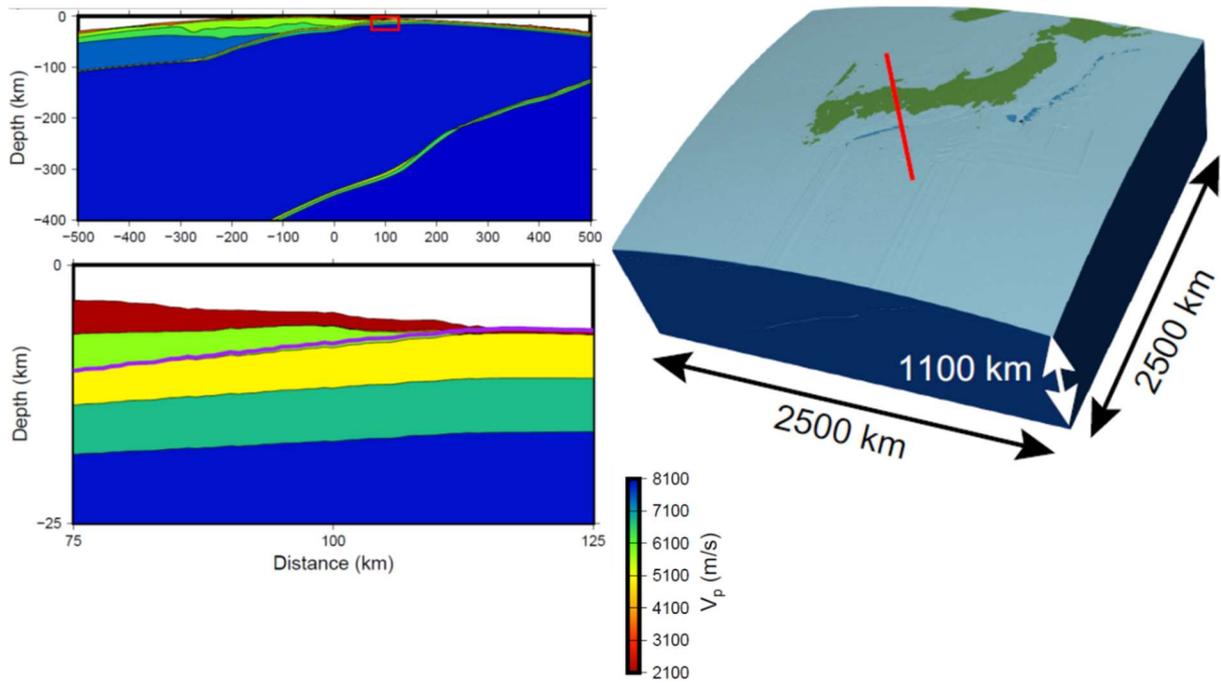


図 2-2-①-1 グリーン関数の計算に用いた 3D 地震波速度構造モデル<sup>5)</sup>。左側下段は、上段の赤枠内を拡大したもの。有限要素法モデルが右図の範囲に構築されており、メッシュサイズは細かいところで 1km 程度となっている。

本年度は、上記目的達成のため、プレート境界でのすべり・固着による、熊野灘周辺に設置された長期孔内観測システムにおける歪・傾斜応答グリーン関数を精度よく計算するため、既存の有限要素モデルでは空間解像度が不足している領域を局所的に細分化する手法の実装及び高精細化されたモデルを用いてのグリーン関数の計算を実施した。

(b) 業務の実施方法

南海トラフ中部域においては長期孔内観測システムに設置された間隙水圧計によって体積歪変化が計測されており、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モニタリングが実施されている (図 2-2-①-2)。

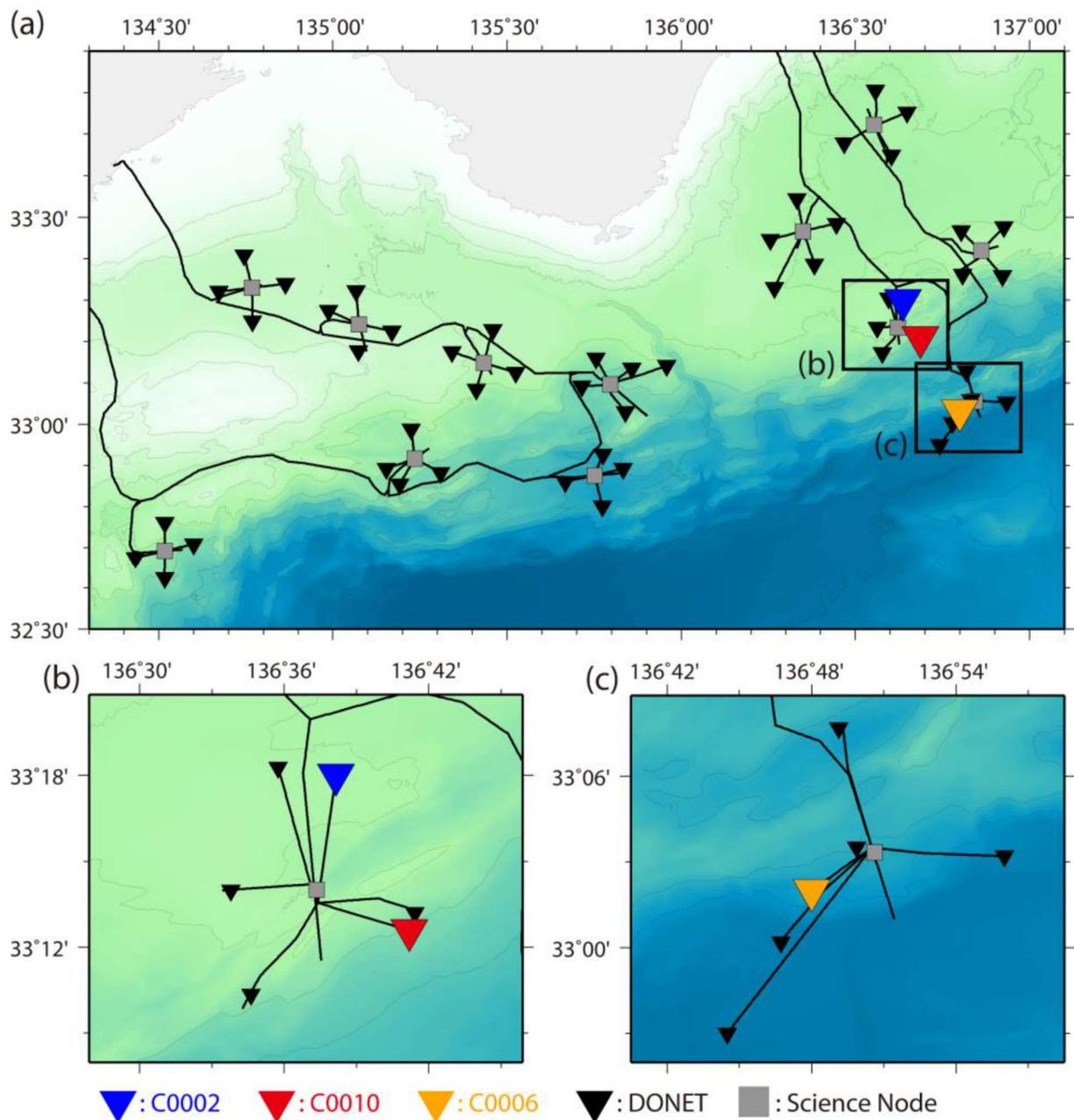


図 2-2-①-2 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された 3 点の長期孔内観測点 (C0002、C0010、C0006) と DONET の観測点配置図 (海洋研究開発機構 (2021, 第 355 回地震調査委員会資料)<sup>5)</sup>より)。(a) DONET 全域。(b) 孔内観測点 (C0002、C0010) 周辺。(c) 孔内観測点 (C0006) 周辺。

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<sup>1,2)</sup>、プレート境界のどこがどの程度すべったのかを精確に推定するためには、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<sup>3,4)</sup>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る<sup>5)</sup>が、そこで用いられている有限要素法モデルのメッシ

ユサイズは 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る（図 2-2-①-3 参照）。

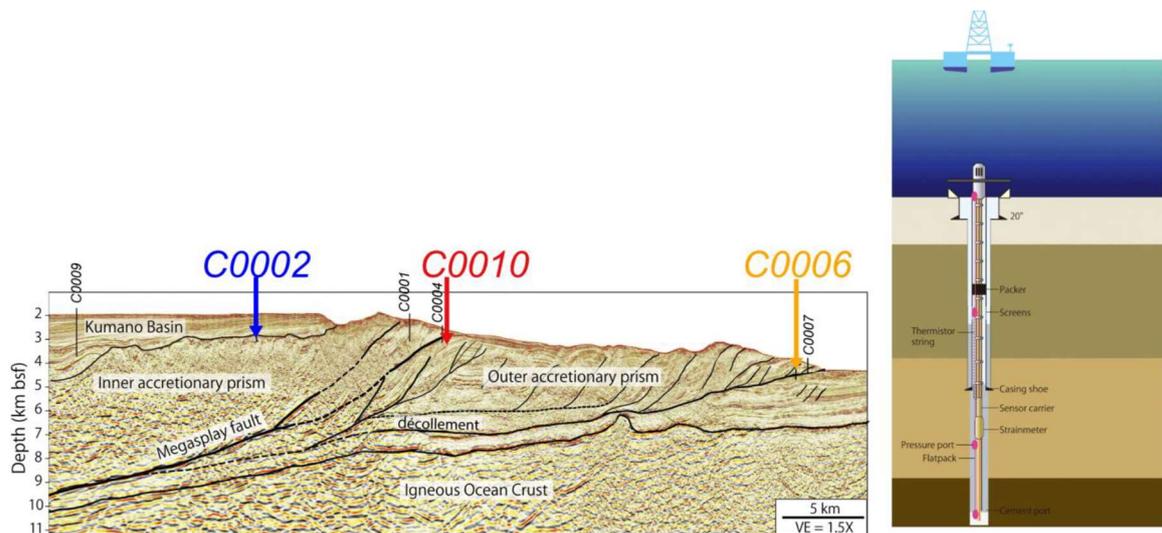


図 2-2-①-3 南海トラフ東南海地震震源域沖合に設置された 3 点の長期孔内観測点（C0002、C0010、C0006）の設置位置（地震断面図に投影したもの）（海洋研究開発機構（2021，第 355 回地震調査委員会資料）<sup>5)</sup>より）。海底下 980m (C0002)、650m (C0010)、495m (C0006) まで掘削した孔内における地殻内の間隙水圧・体積歪（C0010、C0006）などの連続リアルタイム観測が実施されている。

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微分値に関するグリーン関数も必要である。このため、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の実装、並びに、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実施することとした。

### (c) 業務の成果

南海トラフ沿い沈み込み帯全体の大規模有限要素法モデルのうち、間隙水圧計の位置、並びに、観測孔の孔口（海底面上）周辺を局所的に高精細化するサブルーチンを実装した。また、高精細化したモデルの各要素のうち、間隙水圧計の位置ならびに観測孔の孔口（海底面上）が含まれる要素を抽出する（いずれの要素にも含まれない場合は、最近傍の要素を抽出する）サブルーチンを実装した。これらを用いて、長期孔内観測システムの間隙水圧計の位置および同システムの孔口（海底面）の位置それぞれの変位及び歪応答の計算を行った。今回は、長期孔内観測システム付近のメッシュを三段階で再分割することにより、初期の八分の一、すなわち約 125m にメッシュサイズを細分化しての計算を実施した。プレート境界面におけるすべりを表現するスプライン関数を配置する位置を変えていき、走向方向およ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。

(d) 結論ならびに今後の課題

本業務により、既存の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。長期孔内観測システムの間隙水圧計及び傾斜計においては、2020年12月から1月にかけて、これまでに観測されてきたものよりも規模の大きなスロースリップイベントの発生に伴うとみられる変動が検出されている<sup>6)</sup>。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プレート境界でのすべり分布の詳細を把握するとともに、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、プレート境界でのすべり分布の比較を行うことを計画している。

(e) 引用文献

- 1) 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.
- 2) Ariyoshi, K., Iinuma, T., Nakano, M., Kimura, T., Araki, E., Machida, Y., Sueki, K., Yada, S., Nishiyama, T., Suzuki, K., Hori, T., Takahashi, N., and Kodaira, S.: 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, 2021.
- 3) Koketsu, K., Miyake, H., and Tanaka, Y.: 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, 2009.
- 4) Koketsu, K., Miyake, H., and Suzuki, H.: Japan integrated velocity structure model version 1, in *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1773, Lisbon, 2012
- 5) Hori, T., Agata, R., Ichimura, T., Fujita, K., Yamaguchi, T., and Iinuma, T.: 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, 2021.
- 6) 海洋研究開発機構：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355回地震調査委員会，2021年3月9日，2021.

(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  
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

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うとともに、プレート境界でのすべり・固着による、熊野灘周辺に設置された長期孔内観測システムにおける歪・傾斜応答グリーン関数を精度よく計算するため、既存の有限要素モデルでは空間解像度が不足している領域を局所的に細分化する手法の実装及び高精細化されたモデルを用いてのグリーン関数の計算を実施した。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、試行的に1707年宝永地震を模したシミュレーションデータに同手法を適用し、その性能評価を行った。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。

(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。これを定量評価することを目的に、本年度はマルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC法)を用いた断層すべり分布の即時推定アルゴリズムの開発に着手した。MCMC法は多数のフォワード計算を行うために計算コストが非常に大きく、リアルタイム用途には不適であると従来考えられてきた。一方、近年MCMCをリアルタイム用途に活用するための研究が進展しつつある<sup>1)</sup>。こうした背景を受けて、本研究ではリアルタイムで実行が可能にすることを念頭に置いたMCMCを活用した推定アルゴリズムの開発に着手した。具体的には、データを説明する多様なパラメータの組み合わせを効率的に探索するために、プレート境界面の断層を逐次細分化する「段階的全分割アルゴリズム」の開発を行った。同アルゴリズムでは、全小断層を段階的に4ステージに分割して細分化する。このとき、各ステージの前ステージにおける各小断層の95%信頼区間を次のステージにおけるMCMC法の各パラメータの摂動幅として用いることでマルコフ連鎖の収束における効率化を図った。同アルゴリズムの性能評価を目的として、南海トラフで過去に発生した1707年宝永地震を模したすべり分布(Mw 8.75)<sup>2)</sup>のシミュレーションデータへ適用した。ここで観測データとしては陸域のGNSSデータ

を仮定し、リアルタイムで想定されるノイズを付加したものを観測値として使用した。今年度の試行では、グリーン関数には均質半無限媒質の解析解<sup>3)</sup>を用いた。

MCMC 法を活用した上記手法では、観測データを同程度に説明する多数の異なる断層すべりモデルが得られる。これら得られた結果から、断層すべりモデルの不確実性を迅速に定量化することを目的として、多数断層モデル可視化ツールを開発した。同ツールは、得られた多数モデルの結果を GUI ベースで簡単に表示することが可能である。

本研究課題で実施する内容の内、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ている。そのため、2020 年 11 月 19 日に国土地理院測地観測センターおよび地理地殻活動研究センター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および議論を行った。

#### (c) 業務の成果

開発した「段階的全分割アルゴリズム」を、1707 年宝永地震を模したすべり分布 (Mw 8.75) のシミュレーションデータに適用したところ、仮定したすべりを大局的に推定することができた一方で、陸域に近いプレート境界では断層すべりの不確実性が明瞭に小さいのに対し、海溝軸付近に位置する断層ではその不確実性がきわめて大きいという結果を定量化することに成功した (図 2-2-②-1)。

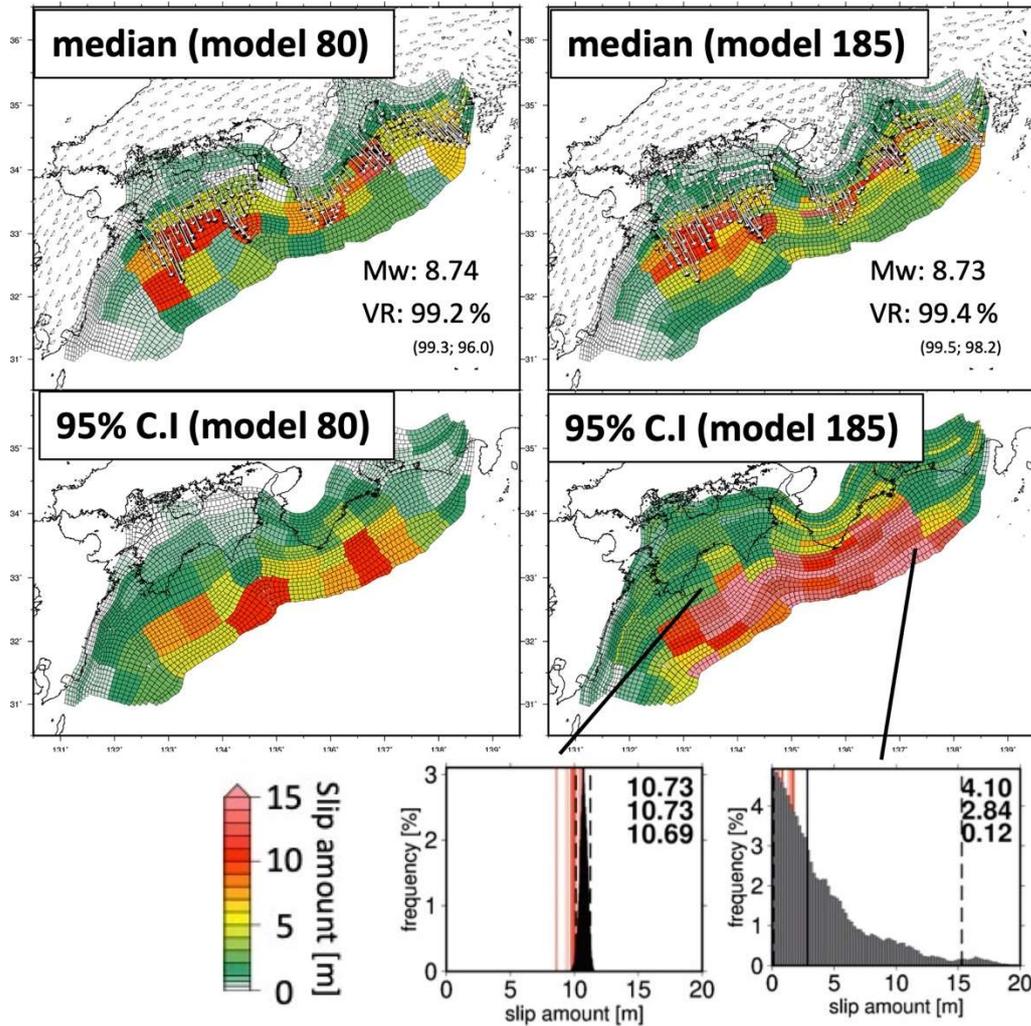


図 2-2-2-1 1707 年宝永地震を模したイベントの数値シミュレーション結果に対して「段階的全分割アルゴリズム」を適用したときのすべり量分布。左側が断層枚数 80 枚の場合の推定結果(中央値)とその 95%信頼区間、右側が断層枚数 185 枚の場合の推定結果(中央値)とその 95%信頼区間をそれぞれ示す。右下図は各小断層における事後確立分布。黒実線は中央値を、黒点線は 95%信頼区間を示す。赤実線は、最小単位の断層パッチにおいて仮定したすべり量を示す。挿入値は、上から平均値・中央値・最頻値を示す。

さらに、南海トラフの東半分(東南海)のみが破壊したと仮定したときに、陸域 GNSS 観測データからその走向方向の破壊をどの程度拘束できるかを、同手法を活用して評価した。その結果、やはり海溝軸付近では断層すべりが生じた領域の同定において、走向方向に 30~40km 程度の不確実性があることが明らかになった(図 2-2-2-2)。

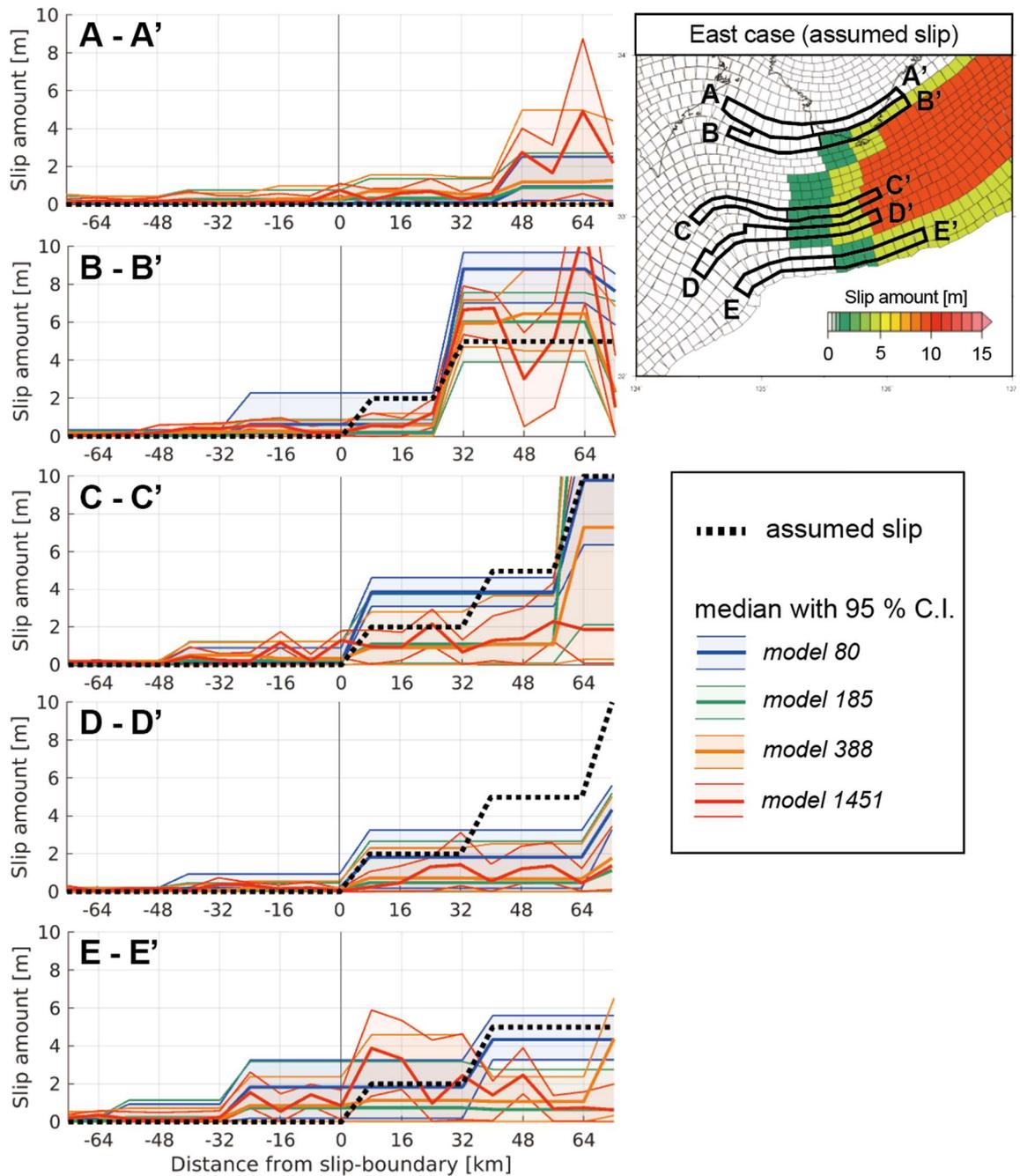


図 2-2-②-2 紀伊半島よりも東側のみが破壊する半割れケースの西側すべり境界地域の推定されたすべり量のプロファイル。横軸は、挿入地図内のすべり境界（黒細線）を 0 とし、その東方向を正とした。バックグラウンド小断層の断層走向方向の断層長さは全て 8 km で統一されており、プロファイルの横軸はその長さである（単位は [km]）。想定すべり分布（黒点線）に対する、4 段階各々の推定結果の中央値と 95%信頼区間を示す（青：断層枚数 80 枚、緑：断層枚数 185 枚、オレンジ：断層枚数 388 枚、赤：断層枚数 1451 枚）。

断層すべりモデルの不確実性を迅速に定量化することを目的とした、多数断層モデル可視化ツールを開発することによって、GUI ベースで迅速に各小断層が持つ推定不確実性を把握することが可能になった（図 2-2-②-3）。また、2020 年 11 月 19 日

に国土地理院と行った打ち合わせにより、国土地理院で現在機能改善を進めている REGARD の現状等についての情報共有を実現した。

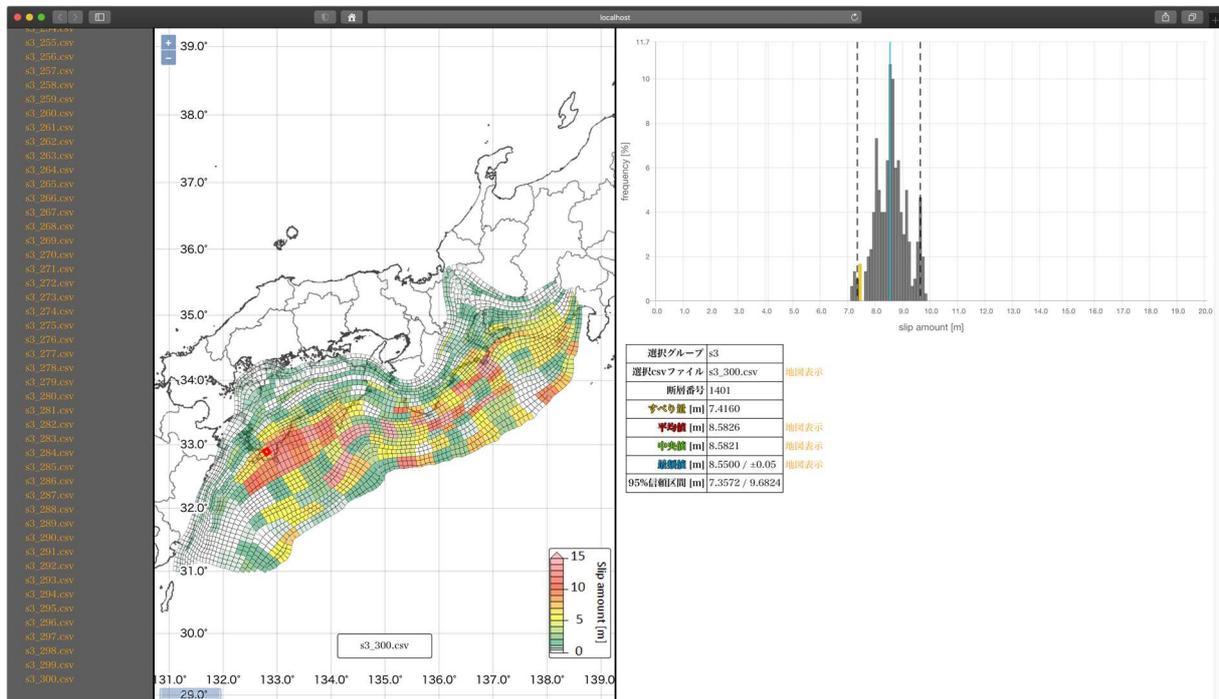


図 2-2-②-3 断層すべりモデルの不確実性を迅速に定量化することを目的とした、多数断層モデル可視化ツール。各小断層がどのようなすべりの多様性を持ちうるかを事後確率分布の形で迅速に GUI を用いて表示させることができる。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

断層すべりモデルの不確実性を迅速に推定するためのアルゴリズム開発を行うことで、推定の枠組みを得た。さらに試行的に南海トラフ巨大地震を模したイベントに対して同手法を適用した。同試行では均質半無限媒質を仮定した。さらに断層すべりモデルの不確実性を可視化するための多数断層モデル可視化ツールの開発を行った。また、本課題で開発した技術の REGARD への技術移転のための国土地理院との打ち合わせを 2020 年 11 月に実施した。今年度は、不確実性を含めて推定するためのアルゴリズムの枠組みを得た。来年度は同手法を高度化するとともに、3D 構造モデルによる推定の試行や海底地殻変動観測データの利活用等の検討等を進める。

#### (e) 引用文献

- 1) 大野圭太郎, 太田雄策: CMC を用いたリアルタイム GNSS データによる単一矩形断層推定の不確実性定量評価の試み -2011 年東北地方太平洋沖地震への適用例-. 測地学会誌, 64, 39-50, 2018.
- 2) Furumura, T., Imai, K., and Maeda, T.: A revised tsunami source model for the 1707 Hōei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116 (2), 1-17. doi:10.1029/2010JB007918, 2011.

- 3) Okada, Y.: Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 2, pp.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  
なし
- 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

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、上記目的達成のため、まず、固有周期120秒の広帯域地震計を搭載したレベリング装置付き小型広帯域海底地震計5台の整備を行った。その後、南海トラフ西部の日向灘において、これまで浅部低周波微動や超低周波地震活動の発生が確認されている領域に今年度に整備を行った小型広帯域海底地震計5台を含め、10台の長期観測可能な海底地震計を設置し、観測を開始した。

(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>。これから短期的なスロースリップの発生が示唆されており<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<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、まず固有周期120秒の広帯域地震計を搭載したレベリング装置付き小型広帯域海底地震計5台の整備を行った。固有周波数1Hzの地震計を搭載する長期観測型海底地震計のセンサー部を、固有周期120秒の小型広帯域地震計を搭載するレベリング装置と交換することにより、小型広帯域海底地震計とした<sup>5)</sup>。広帯域地震計には、Nanometrics社 Trillium Compact を用いた。その後、日向灘に今回整備した5台のレベリング装置付き小型広帯域海底地震計と長期観測型海底地震計5台の計10台の海底地震計を設置して、観測を開始した(図2-2-③-1、写真2-2-③-1～5、表2-2-③-1)。

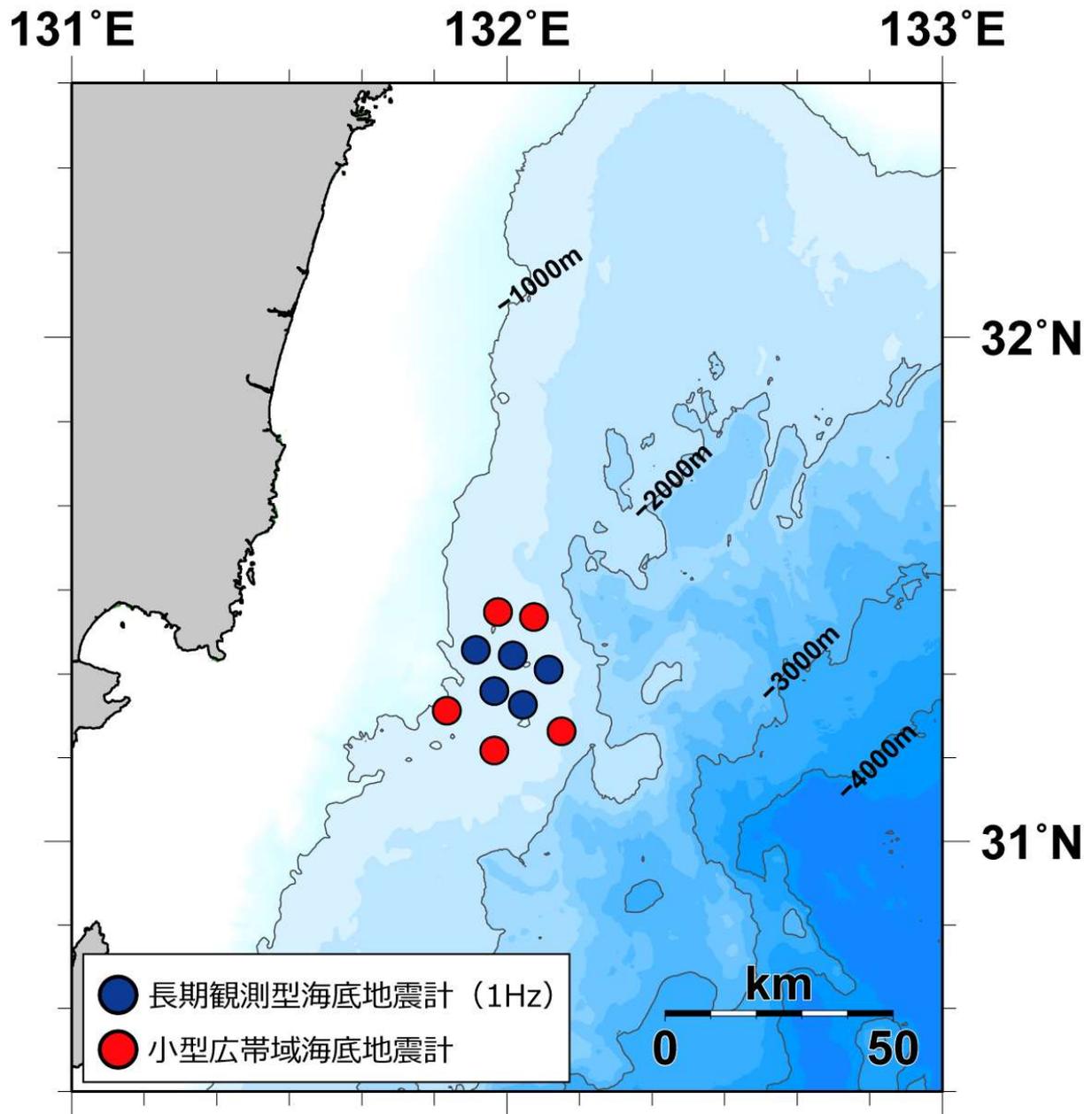


図 2 - 2 - ③ - 1 設置した海底地震計位置

2020 年度に観測を開始した長期観測型および小型広帯域海底地震計 10 台の設置位置。図中の青丸の 5 点に長期観測型海底地震計、赤丸の 5 点に小型広帯域海底地震計を設置して、観測を開始した。これらの海底地震計は、次年度以降まで観測を継続し、その後回収を予定している。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」

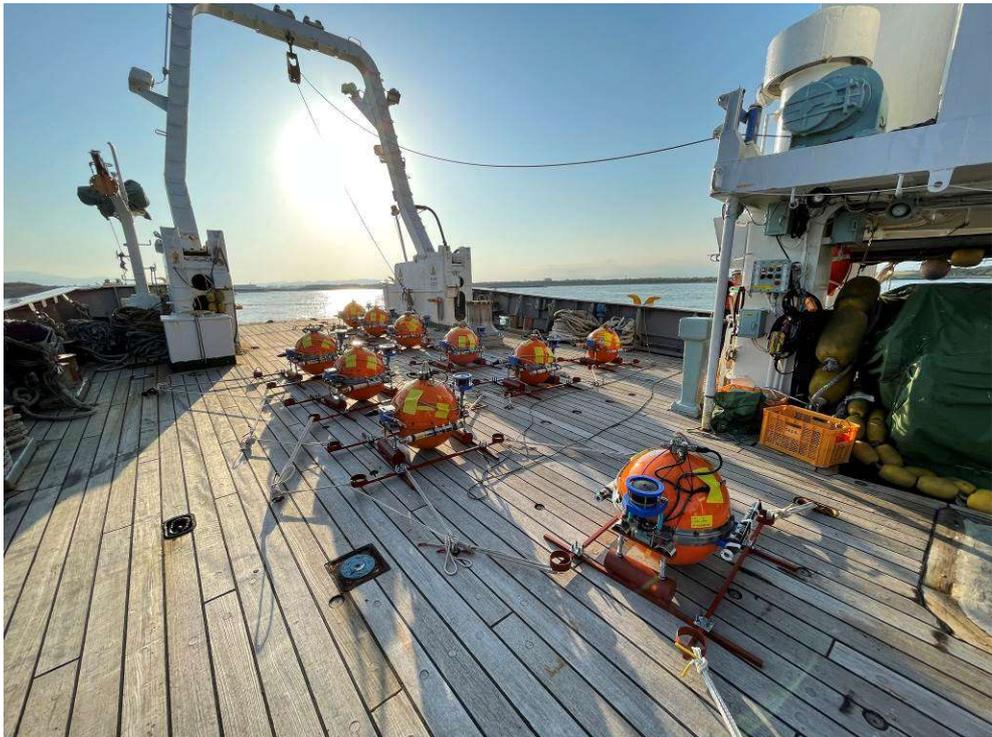


写真 2 - 2 - ③ - 2 観測船に搭載された海底地震計



写真 2-2-③-3 小型広帯域海底地震計  
外見は従来の長期観測型海底地震計と全く同じである

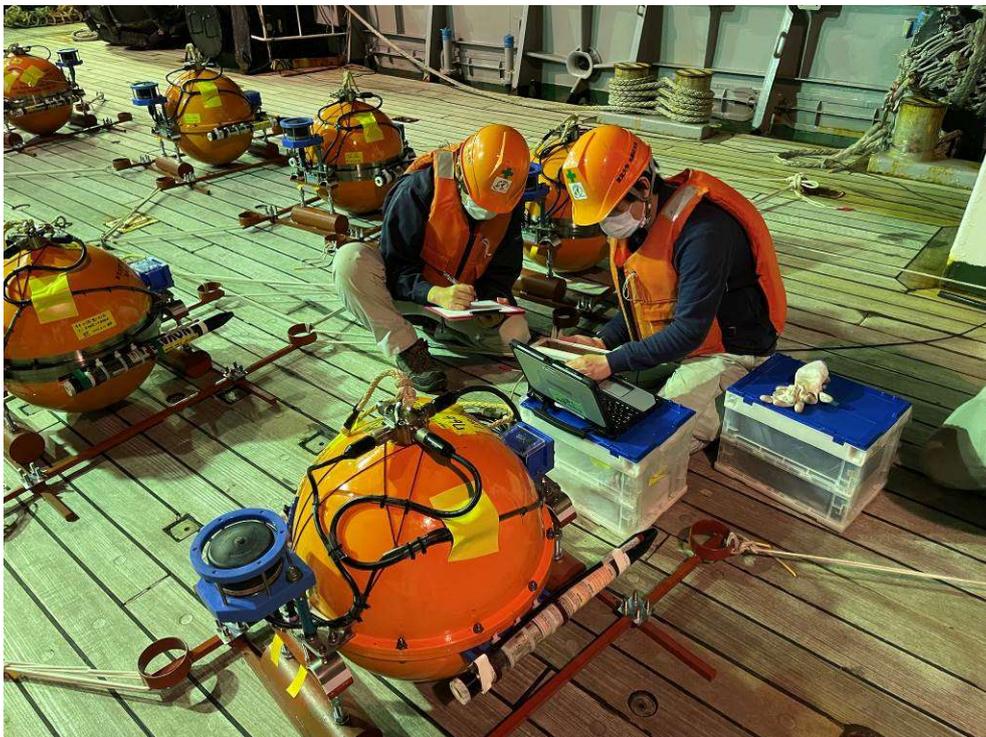


写真 2-2-③-4 海底地震計設置前準備作業

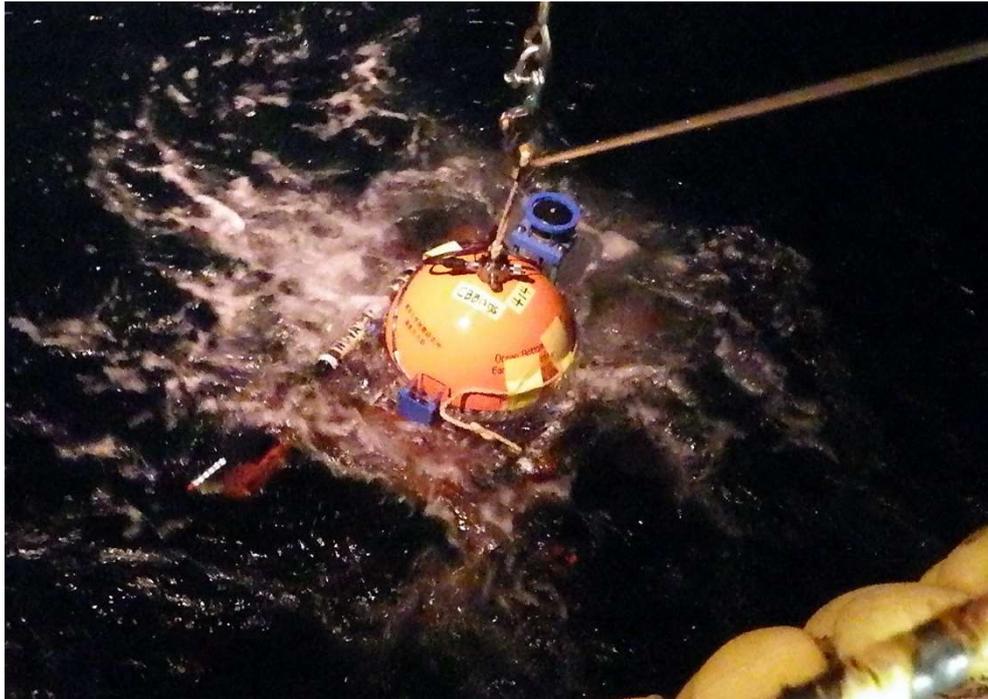


写真 2 - 2 - ③ - 5 海底地震計投入

表 2 - 2 - ③ - 1 海底地震計設置位置

観測点名	緯度		経度		水深	備考
	度	分	度	分	m	
NK20A6	31	22.22	132	00.70	1159	LOBS
NK20S1	31	27.44	131	58.65	1225	CBBOBS
NK20S2	31	26.80	132	03.65	1153	CBBOBS
NK20S3	31	22.89	131	55.64	1189	LOBS
NK20S4	31	20.60	132	05.64	1145	LOBS
NK20S5	31	18.00	131	58.12	1380	LOBS
NK20S6	31	16.37	132	02.12	1194	LOBS
NK20S7	31	15.65	131	51.76	1187	CBBOBS
NK20S8	31	10.88	131	58.17	1302	CBBOBS
NK20S9	31	13.20	132	07.42	1434	CBBOBS

備考欄の LOBS は長期観測型海底地震計、CBBOBS は固有周期 120 秒の地震計を搭載した小型広帯域海底地震計を示す。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。

本設置作業には、海洋エンジニアリング株式会社所属の第三開洋丸（2021年3月25日宮崎港出港、同年同月27日宮崎港帰港）を使用した。プレート間固着状況の把握に着眼し、これまでの観測で浅部低周波微動・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と通常の地震発生域の境界付近を観測対象域とした。海底地震計の設置間隔は10~20 kmとし、稠密観測網を構築した。また、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DPRI01<sup>6)</sup>）により海底地震計短スパンアレイが設置されており、この短スパンアレイと連携可能となるように観測点を配置した。設置後に、海底地震計が着底した位置を海底地震計の音響通信システムを用いた音響測量により求めた。

(d) 結論ならびに今後の課題

新たに小型広帯域海底地震計5台の整備を行った。日向灘において、整備した小型広帯域海底地震計を含めた計10台の長期観測可能な海底地震計の設置を行い、観測を開始した。今回の観測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。回収し得られたデータをもとに、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。

(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) 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, 2020.

- 5) Shinohara, M., Yamada, T., Shiobara, H., and Yamashita, Y.: Development of Compact Broadband Ocean Bottom Seismometer for Monitoring of Slow Earthquakes, submitted to Seism. Res. Lett.
- 6) 「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」令和元年度成果報告書,  
[http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/R1/r1\\_kikanbetsu.pdf](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/R1/r1_kikanbetsu.pdf)

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  
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