

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	助教	本荘千枝
東北大学大学院理学研究科	助教	中田令子
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
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。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。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、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3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。具体的には既存の全国一次地下構造モデルを基盤とした3D構造モデルで簡略化されているプレート境界浅部の構造を忠実に反映させたグリーン関数の構築を実施する。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を行うとともに、得られた断層すべりの推定不確実性をリスク情報へと変換するための試みとして津波浸水リスクマップとして可視化するための手法開発を行う。また、得られた断層すべりの推定不確実性を可視化するためのWebアプリの改良を行う。開発した技術の将来的な実装を念頭ににおいた国土地理院との協議を行う。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を用いた広帯域長期海底地震観測を機材の入れ替えによって継続しつつ、回収データに対して予備的な解析を実施する。

(2) 令和3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、全国一次地下構造モデルを基盤とした既存の3D有限要素法モデルでは簡略化されていた地下浅部に関して、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を構築するとともに、プレート境界でのすべり・固着による陸域及び海底に設置されている地殻変動観測点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

南海トラフ域全域に対して、全国一次地下構造モデル^{1,2)}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³⁾が、そこで用いられている有限要素法モデルでは、地下の浅い部分の地下構造が簡略化されている。具体的には、堆積層や付加体に対して定義されている第14層までが2層にまとめられて同じ物性値を持つようになってしまっている(表2-2-①-1参照)。トラフ軸に近い浅部プレート境界におけるプレート間の固着・すべり分布を精度よく推定するためには、浅い部分の地下構造の影響を正しく反映した変位応答グリーン関数に基づく解析を実施する必要がある。このため、全国一次地下構造モデルにおいて定義されているすべての層を可能な限り表現した有限要素法モデルを構築したうえで、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

全国一次地下構造モデルのDigital Elevation Model (DEM) データを基に有限要素法計算のためのメッシュを作成したうえで(図2-2-①-1及び図2-2-①-2)、スプライン関数を基底として表現されたプレート境界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。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。作成したDEMデータをそのまま用いた場合、作成したDEMデータに基づくが複数の層の物性値を一つにまとめた場合、及び、作成したDEMデータに基づくが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。

(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プレート境界での固着分布を不確かさも含めて推定する解析を行うとともに、詳細構造を取り込んだ効果について定量的な比較を行うことを計画している。

(e) 引用文献

- 1) 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.

- 2) 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.
- 3) 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.

(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

Layer	Vp(km/s)	Vs(km/s)	ρ (g/cm ³)	Qp	Qs	
1	1.7	0.35	1.80	119	70	
2	1.8	0.5	1.95	170	100	
3	2.0	0.6	2.00	204	120	
4	2.1	0.7	2.05	238	140	
5	2.2	0.8	2.07	272	160	
6	2.3	0.9	2.10	306	180	
7	2.4	1.0	2.15	340	200	付加体を含む
8	2.7	1.3	2.20	442	260	
9	3.0	1.5	2.25	510	300	
10	3.2	1.7	2.30	578	340	
11	3.5	2.0	2.35	680	400	
12	4.2	2.4	2.45	680	400	
13	5.0	2.9	2.60	680	400	地震基盤(近畿圏)
14	5.5	3.2	2.65	680	400	地震基盤(上部地殻第1層)
15	5.8	3.4	2.70	680	400	上部地殻第2層
16	6.4	3.8	2.80	680	400	下部地殻
17	7.5	4.5	3.20	850	500	マントル
18	5.0	2.9	2.40	340	200	海洋性地殻第2層(フィリピン海プレート)
19	6.8	4.0	2.90	510	300	海洋性地殻第3層(フィリピン海プレート)
20	8.0	4.7	3.20	850	500	海洋性マントル(フィリピン海プレート)
21	5.4	2.8	2.60	340	200	海洋性地殻第2層(太平洋プレート)
22	6.5	3.5	2.80	510	300	海洋性地殻第3層(太平洋プレート)
23	8.1	4.6	3.40	850	500	海洋性マントル(太平洋プレート)

- 地震本部などによる地下構造モデル
- Ludwig et al. (1970)
- 長周期地震動予測地図2009年試作版(宮城県沖地震)
- Yamada and Iwata (2005)
- H17年度大々特広域モデル(田中・他, 2006)
- $Q_s=1000*V_s/5$ $Q_p=1.7*Q_s$ Q_s が400を超える場合は400とする
(Kawabe and Kamae, 2008 を参考)

表 2 - 2 - ① - 1 全国一次地下構造モデルの物性値

(https://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/nankai/lp2012nankai_str_val.pdf より)。

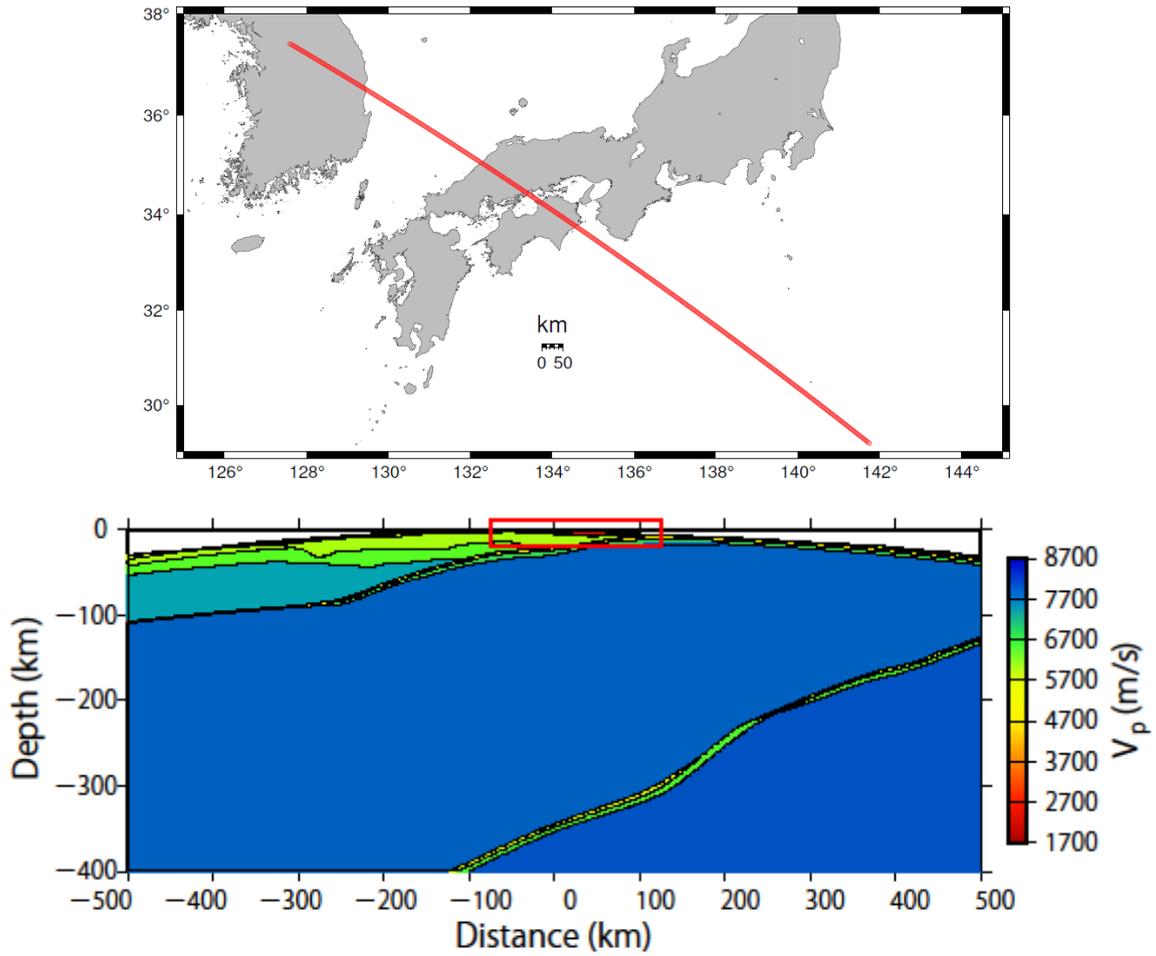


図 2-2-①-1 構築した 3D 構造モデルの断面。上段の赤線に沿った断面を下段に示す。赤枠内を拡大したものが図 2-2-①-2。

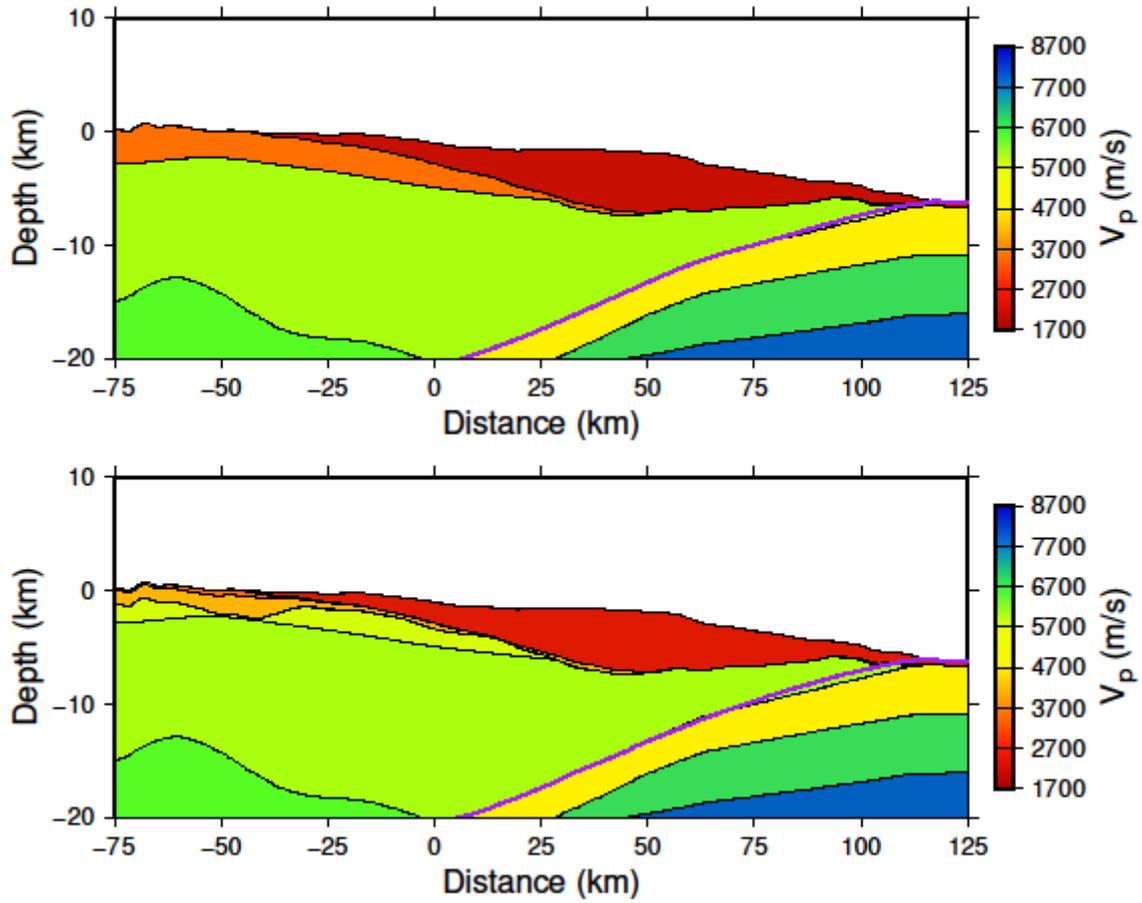


図 2-2-①-2 3D 構造モデルの断面の比較。上段は既存のグリーン関数ライブラリ³⁾で用いられている地震波速度構造、下段は本業務で構築した全国一次地下構造モデルをなるべく忠実に反映した地震波速度構造をそれぞれ示す。

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を継続するとともに、得られた断層すべりの推定不確実性をリスク情報へと変換するための試みとして津波浸水リスクマップとして可視化するための手法開発を行った。また、得られた断層すべりの推定不確実性を可視化するためのWebアプリの改良を実施した。令和3年6月及び令和4年3月に国土地理院測地観測センター及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。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を令和2年度に引き続き実施するとともに、得られた断層すべりの推定不確実性をリスク情報へと変換するための試みとして津波浸水リスクマップとして可視化するための手法開発を行った。具体的には令和2年度に開発した「段階的全分割アルゴリズム」に基づいて推定されたプレート境界におけるすべり推定の不確実性から、リスク情報の一つである津波浸水リスクを地図上に可視化するための技術開発を行った。対象として、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）¹⁾のシミュレーションデータを用いた。MCMC法では、データを同程度に説明する複数のシナリオを多数獲得することができる。一方で、それら多数シナリオをそのまま津波浸水等のリスク情報に用いてしまうと、シナリオ爆発を起こしてしまう。そのため、シナリオの類似性に着目して津波浸水計算が実施できる数にシナリオを縮減するための手法開発を行った。まず、「段階的全分割アルゴリズム」によって推定されたシナリオのうち、データをよく説明する（Variance Reduction値が大きい）シナリオを選別した。次に、教師なし機械学習の一つであるk-means法を用いて断層すべりモデルのシナリオ数を100個に縮減した。そして、100個のシナリオそれぞれで高知県高知市周辺を対象として津波浸水計算を行い、地点毎の津波浸水頻度を計算することで、断層モデルの推定不確実性がもたらす津波浸水のリスクマップを作成した。グリーン関数には均質半無限媒質の解析解²⁾を用いた。

MCMC法で最も一般的に用いられている手法の一つがメトロポリス・ヘイスティングス法（M-H法）であるが、同手法はその実装が簡便である一方で、事後確率分布を安定して取得できるまでに長い混合時間を必要とする。これは、すべり分布等の高次元の問題や、グリーン関数の計算を事前に行うことができない非プレート境界型地震等、1ステップ毎の計算時間が大きな問題における適用性という観点で課題である。そのため、本

年度は M-H 法と比較して収束性が早いハミルトニアンモンテカルロ法（HMC 法）を断層モデル推定に適用するための手法開発に着手し、1 枚矩形断層推定への適用を試みた。

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、令和 2 年度に開発した多数断層モデル可視化ツールの機能追加を進めた。

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、令和 3 年 6 月 11 日及び令和 4 年 3 月 9 日に国土地理院測地観測センター及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及び開発技術の今後についての議論を行った。

(c) 業務の成果

令和 2 年度に開発した「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、その結果にもとづいて本年度開発した手法により作成した、断層モデルの推定不確実性がもたらす津波浸水のリスクマップを図 2-2-②-1 に示す。同図を見ると、100 シナリオすべてで必ず浸水が確認されるエリア（図中ピンク色）がある一方で、低い確率で浸水するエリア（図中青色）が広い範囲で確認できる。この青色の包絡線を取ることによって、同イベントにおける津波浸水エリアのワーストケースを抽出可能であると考えられる。

HMC 法による 1 枚矩形断層推定手法の開発を行い、同手法を 2016 年熊本地震における REGARD の結果に対して適用し、M-H 法との比較を行った。その結果、両者それぞれで得られた事後確率分布はきわめて高い一致度を示し（図 2-2-②-2）、HMC 法で断層推定が可能であることを初めて示した。また、収束に必要なステップ数について検証したところ、M-H 法の数%程度のマルコフ連鎖の数で収束することが判明した。これは HMC 法の収束効率の高さを示す結果であり、より高次の問題等への適用における有用性を期待させる結果である。

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、Web ベース多数断層モデル可視化ツールへの機能追加によって、迅速に各小断層が持つ推定不確実性を描画することが可能になった（図 2-2-②-3）。また、令和 3 年 6 月 11 日及び令和 4 年 3 月 9 日に行った国土地理院との打ち合わせにより、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するとともに、本プロジェクトで開発した手法の技術移転等について議論を行った。

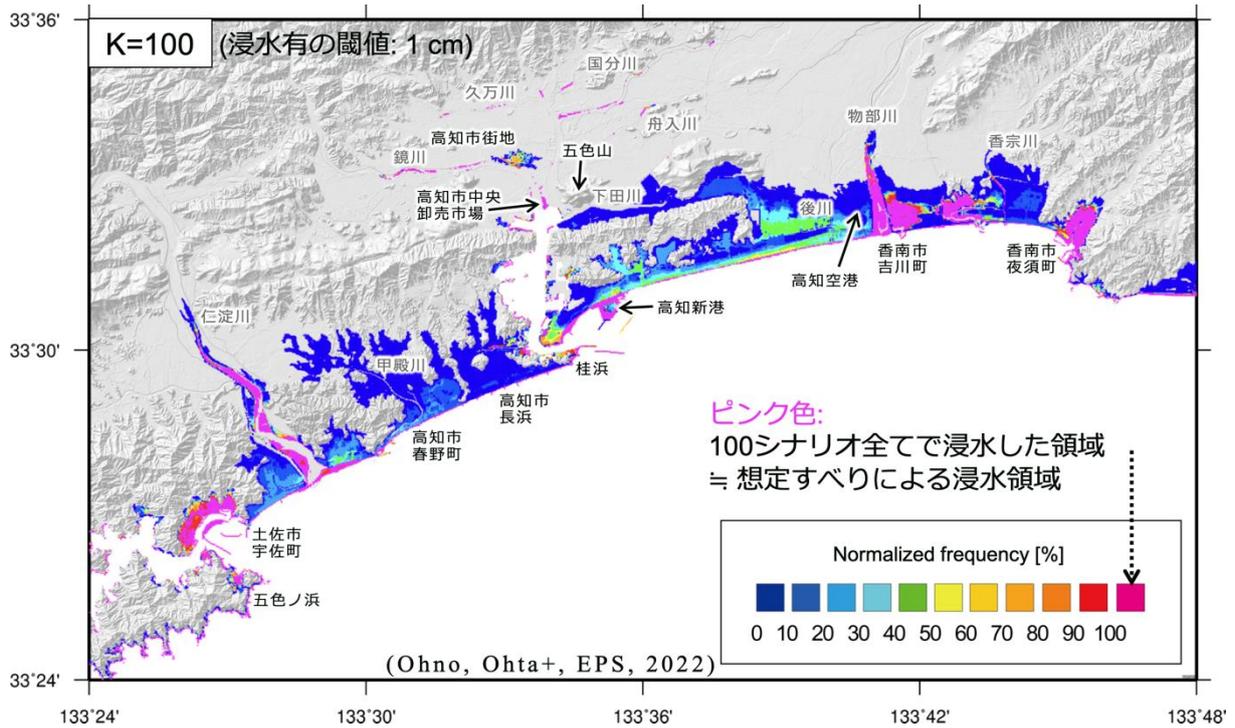


図 2-2-②-1 断層モデルの推定不確実性がもたらす津波浸水のリスクマップ。1707 年宝永地震を模したすべり分布 (Mw 8.75) のシミュレーションデータにもとづき、令和 2 年度に開発した「段階的全分割アルゴリズム」を適用した結果を用い、今年度開発した手法によってシナリオ数を縮減することで得た。色が津波浸水リスクを表し、暖色系ほどそのリスクが高いことを示す。

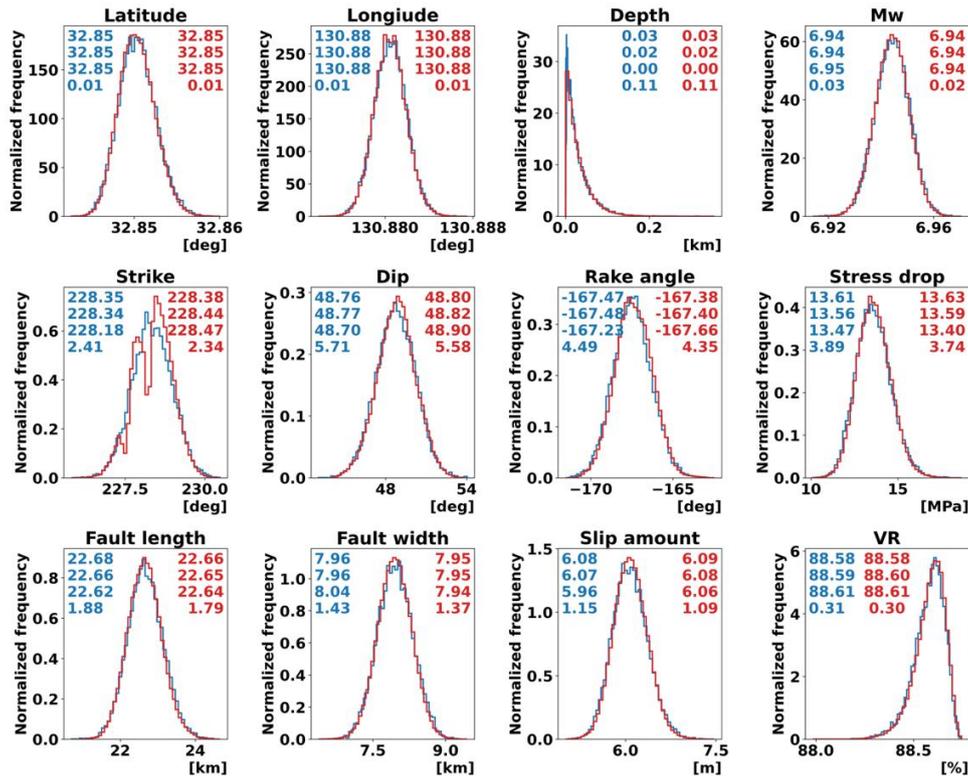


図 2-2-②-2 2016 年熊本地震時の REGARD による永久変位データに対して HMC 法及び M-H 法で 1 枚矩形断層モデルを推定した結果の事後確率分布。両者がよく一致していることが分かる。

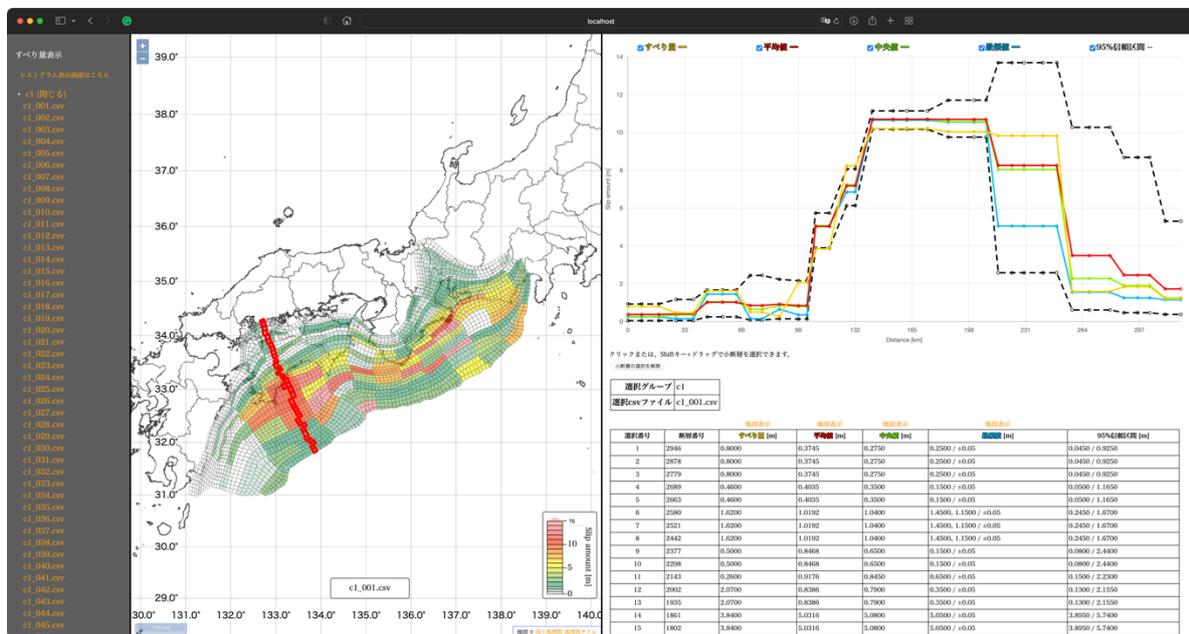


図 2-2-②-3 断層すべりモデルの不確実性を迅速に定量化することを目的とした、多数断層モデル可視化ツールへの機能追加。推定されたすべり分布が持つ推定誤差を迅速に可視化できる。図中左図の赤枠で囲まれた断層をドラッグして選択すると、右図のようなすべり(平均値、中央値、最頻値)とその 95%信頼区間を迅速に描画できる。

(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継続することで、推定の枠組みを得るとともに、同手法によって得られる断層すべりの不確実性をリスク情報として活用するための手法開発を行った。これによって津波浸水リスクを地図上に可視化することに成功した。また従来法と比べて収束性が高い HMC 法による断層モデル推定手法の開発に着手し、同手法によって1枚矩形断層推定が可能であることを示した。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への機能追加を行った。また、令和3年6月及び令和4年3月に国土地理院との打ち合わせを行った。来年度は断層すべりモデルの不確実性定量評価手法の開発を継続するとともに、3D構造モデルによる推定の実施及び海底地殻変動観測データの利活用等の検討を行う。

(e) 引用文献

- 1) Furumura, T., Imai K., and Maeda T.: A revised tsunami source model for the 1707 Hoei 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, 2021.
- 2) 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

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
単一矩形断層推定に関するハミルトニアンモンテカルロ法の適用可能性（口頭）	山田太介、太田雄策	日本地球惑星科学連合2021年大会	令和3年6月	国内
ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較（口頭）	山田太介、太田雄策	日本地震学会2021年度秋季学術大会	令和3年10月	国内
ハミルトニアンモンテカルロ法を活用した断層モデル推定とメトロポリス・ヘイスティング法との比較（口頭）	山田太介、太田雄策	日本測地学会第136回講演会	令和3年11月	国内

Efficient estimation of the fault model using the GNSS data based on the Hamiltonian Monte Carlo approach (ポスター)	Taisuke Yamada, Yusaku Ohta	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	令和3年12月	国外
Application of GNSS for real-time prediction of geohazards and its transformation to disaster information (口頭) (招待講演)	Yusaku Ohta	Geospatial Capacity Development Conference on GNSS applications and DRR	令和4年1月	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
Rapid and quantitative uncertainty estimation of coseismic slip distribution for large interplate earthquakes using real-time GNSS data and its application to tsunami inundation prediction	Ohno K., Y. Ohta, R. Hino, S. Koshimura, A. Musa, T. Abe, H. Kobayashi	Earth, Planets Space	令和4年2月	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10台設置して観測を継続した。これらのうち、6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データが取得されており、複数のスロー地震活動とスロー地震活動に同期発生したと考えられる地震活動を含む良好なデータが取得されていることを確認した。これらに加え、本年度は過去に実施された観測データの再解析も行い、日向灘における浅部低周波微動活動の新たな活動特性を明らかにした。

(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)}。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²⁾。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⁴⁾、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⁵⁾ 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 20 秒の小型広帯域海底地震計 3 台、固有周波数 1 Hz の地震計を搭載した長期観測型海底地震計 4 台の計 10 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、写真 2-2-③-1~7、表 2-2-③-1)。

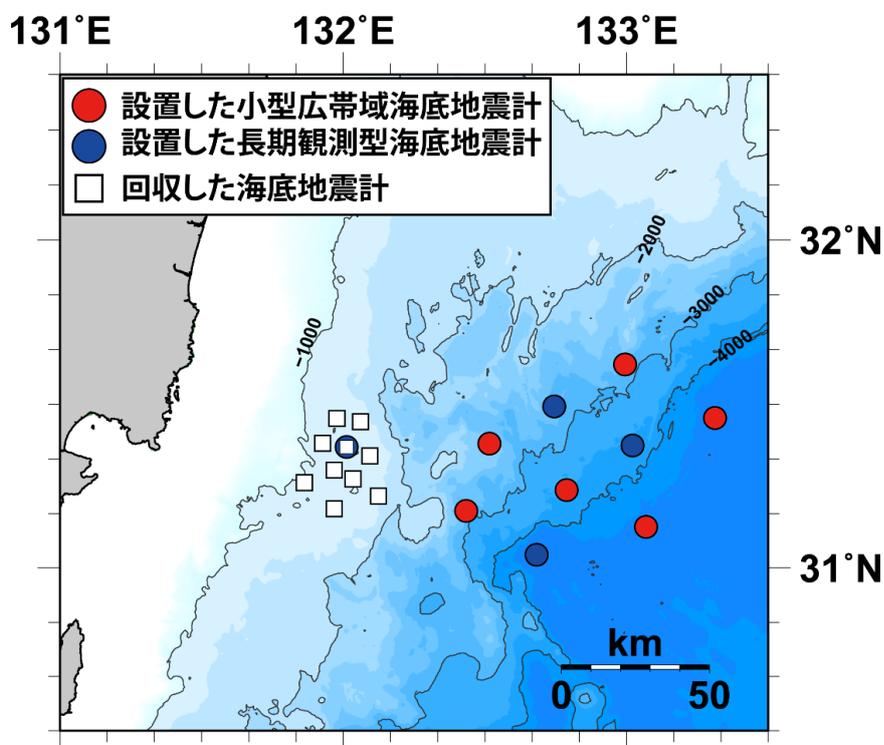


図 2-2-③-1 設置した海底地震計位置

令和 2 年度に設置され、令和 3 年度に回収した長期観測型及び小型広帯域海底地震計 10 台と、令和 3 年度に設置された長期観測型及び小型広帯域海底地震計 10 台の設置位置。四角の点に設置されていた海底地震計を回収した。また、青丸の 4 点に長期観測型海底地震計、赤丸の 6 点に小型広帯域海底地震計を新たに設置して、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

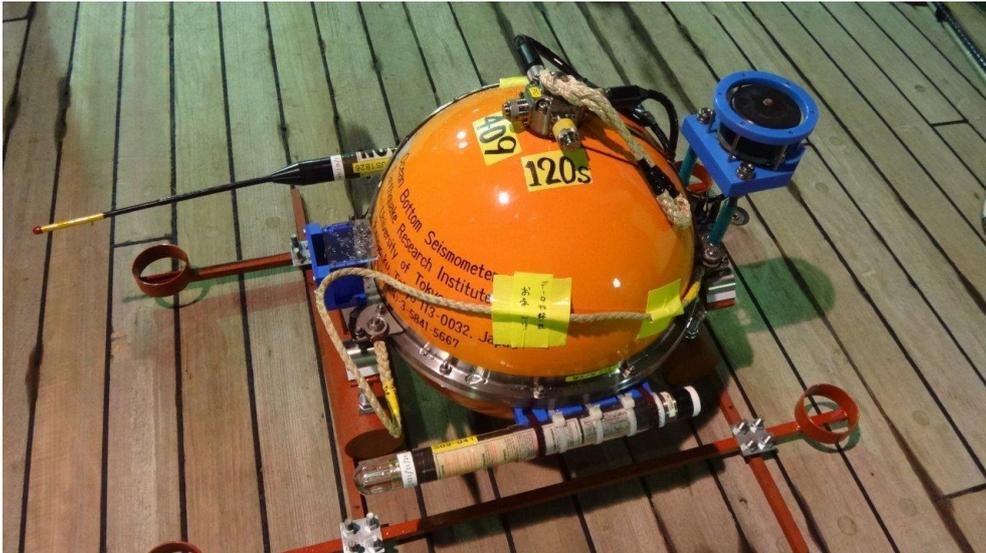


写真 2 - 2 - ③ - 3 今回新たに整備した小型広帯域海底地震計。外見は従来の長期観測型海底地震計と全く同じである。

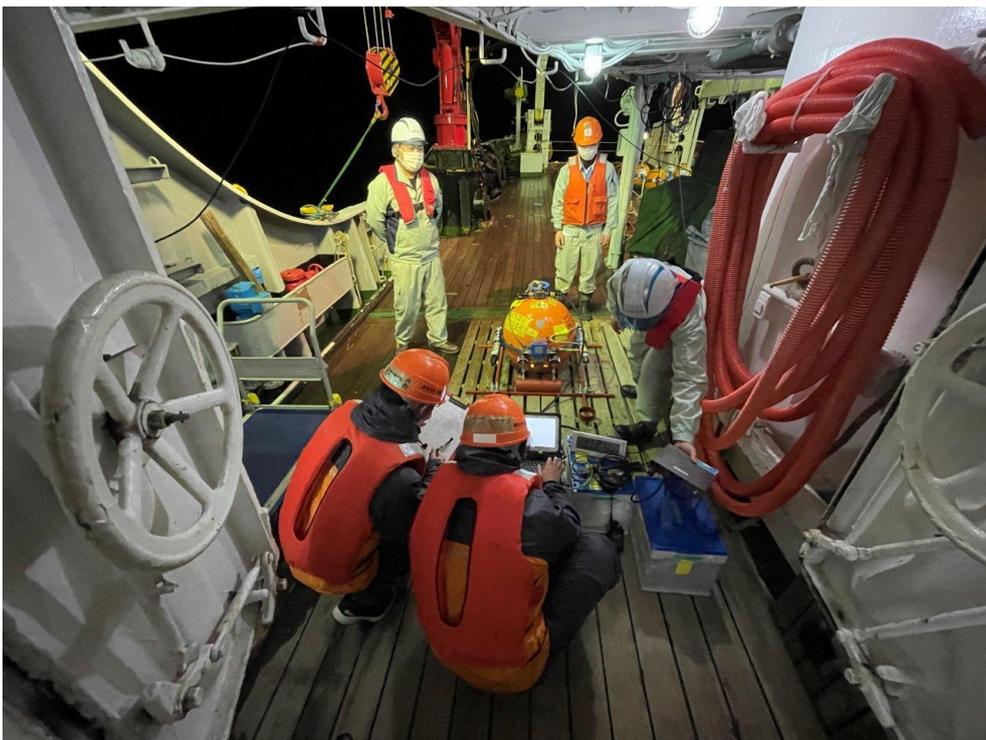


写真 2 - 2 - ③ - 4 海底地震計設置前準備作業の様子。



写真 2 - 2 - ③ - 5 海底地震計投入作業の様子。



写真 2 - 2 - ③ - 6 海底地震計回収作業の様子。



写真 2-2-③-7 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		
NK21A6	31	22.42	132	00.97	1146	LOBS
NK2101	31	02.63	132	41.10	4872	LOBS
NK2102	31	10.65	132	26.00	2824	CBB OBS (120)
NK2103	31	23.05	132	30.93	2437	CBB OBS (20)
NK2104	31	29.69	132	44.71	2913	LOBS
NK2105	31	14.54	132	47.41	3504	CBB OBS (20)
NK2106	31	07.76	133	04.21	4666	CBB OBS (20)
NK2107	31	22.70	133	01.48	3572	LOBS
NK2108	31	37.31	132	59.68	2750	CBB OBS (120)
NK2109	31	27.57	133	18.77	4834	CBB OBS (120)

備考欄の LOBS は長期観測型海底地震計、CBB OBS は小型広帯域海底地震計で、20 と 120 はそれぞれ固有周期 20 秒と 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、NK2108 と NK2109 は作業時間不足のために設置位置決定のための測量を実施していないので、投入位置である。

設置・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（令和4年1月7日宮崎港出港、同年同月10日宮崎港帰港）を使用した。なお、NK20A6の回収作業及びNK21A6の設置作業は長崎大学練習船「長崎丸」を用いて、行われた（令和3年8月2日実施）。本年度は昨年度よりもさらに東側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、平成27年（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。海底地震計の設置間隔は20～30 kmとし、特に海溝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 DPRI01⁶⁾）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。

回収した海底地震計すべてでデータが取得されており、複数のロー地震活動と、ロー地震活動に同期発生したと考えられる地震活動を含む、良好なデータが取得されていることを確認した。令和3年（2021年）5月22日の3時4分（JST）に中華人民共和国・青海省で発生したMw 7.3の地震では、日向灘は本震の震源から約3,200 kmの距離があるものの、本震のレイリー波により浅部低周波微動が動的誘発された事が確認された（図2-2-③-2）。この後、低周波微動活動は活発化と静穏化を繰り返しつつ、6月8日頃まで活動度の高い状態が続いた。

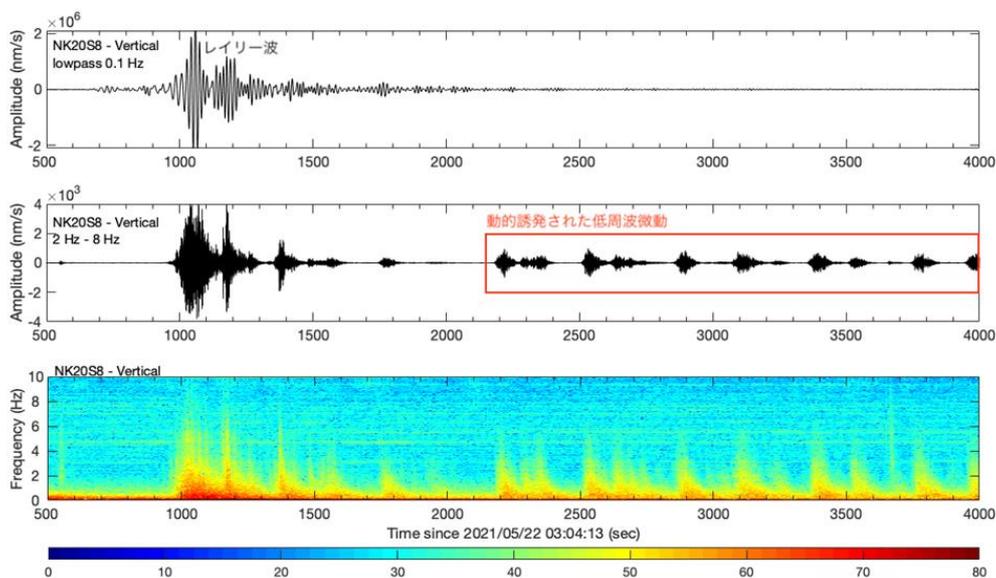


図2-2-③-2 中華人民共和国・青海省で発生した地震（Mw7.3）のレイリー波と、レイリー波によって動的誘発された低周波微動。時間は本震発生時刻からの経過時間（秒）を示す。（上）0.1 Hzのローパス・フィルタをかけたNK20S8観測点（上下動）の波形。（中）2 Hz－8 Hzのバンドパス・フィルタをかけたNK20S8観測点（上下動）の波形。赤枠内が動的誘発された浅部低周波微動。（下）パワースペクトルの最小値でスケールリングしたスペクトログラム。

新たな観測によるデータ取得に加え、過去に取得されたデータの再解析を行い、日向灘における浅部低周波微動活動の新たな特性について明らかにした⁷⁾。平成 26 年～29 年(2014 年～2017 年)にかけて行われた観測データを網羅的に解析した結果、平成 25 年(2013 年)に観測された南から北への移動を伴う活動とは異なり、西から東へ移動を伴う活動が明らかとなった(図 2-2-③-3)。これらは活動域が一部は重複するものの異なっており、さらに移動速度に大きな差があることが分かった。西から東への移動は南から北への移動よりも遅く、この違いは浅部低周波微動活動域より深いプレート境界の固着強度の違いに起因していると考えられる。さらに、浅部低周波微動と比較的大きな浅部超低周波地震の分布を比較すると、基本的には誤差を考慮すれば両者は同じ場所で発生しているように見えるが、細かく見ると浅部低周波微動の震央が疎な部分において、浅部超低周波地震が多く発生しており、互いに相補的な分布をしている事が明らかとなった(図 2-2-③-4)。これらはプレート境界浅部の固着の空間変化の不均質性を反映している可能性が高いと考えられる。

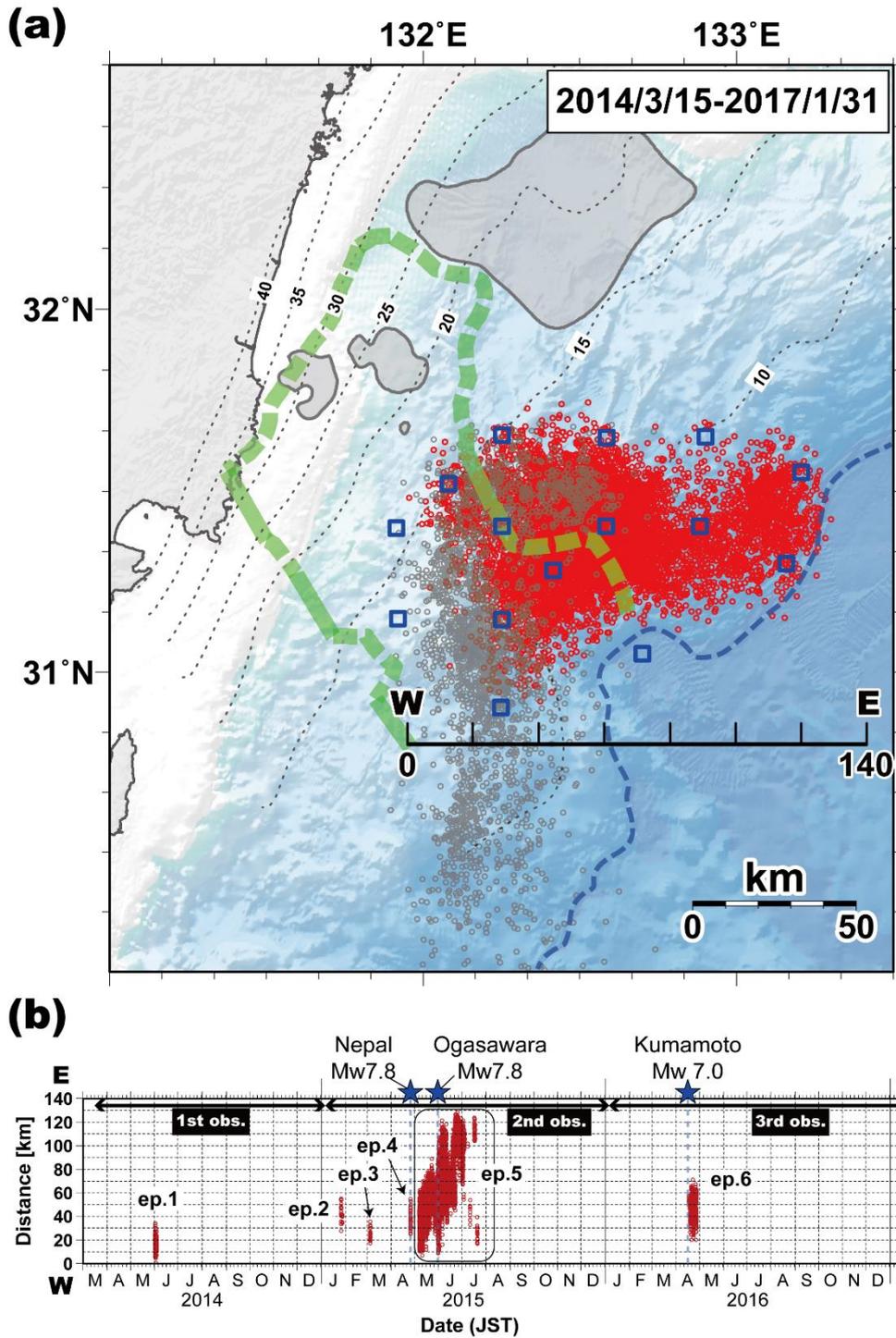


図 2 - 2 - ③ - 3 平成 26 年～29 年(2014 年～2017 年)の間に発生した浅部低周波微動の(a)震央分布と(b)時空間プロット⁷⁾。赤丸が 2014 年～2017 年、灰丸は 2013 年の活動²⁾。図中の黒破線はプレート境界面の等深度線⁸⁾、青四角は解析に用いた海底地震計の設置位置、緑実線・破線は沈み込んだ九州パラオ海嶺の縁⁹⁾を示している。時空間プロットは、震央分布図上の W-E 測線に投影されおり、主要な活動 (episode) が ep.1～6 まで示されている。青星は浅部低周波微動活動に影響を与えた主要な大地震の発生時間を示す。

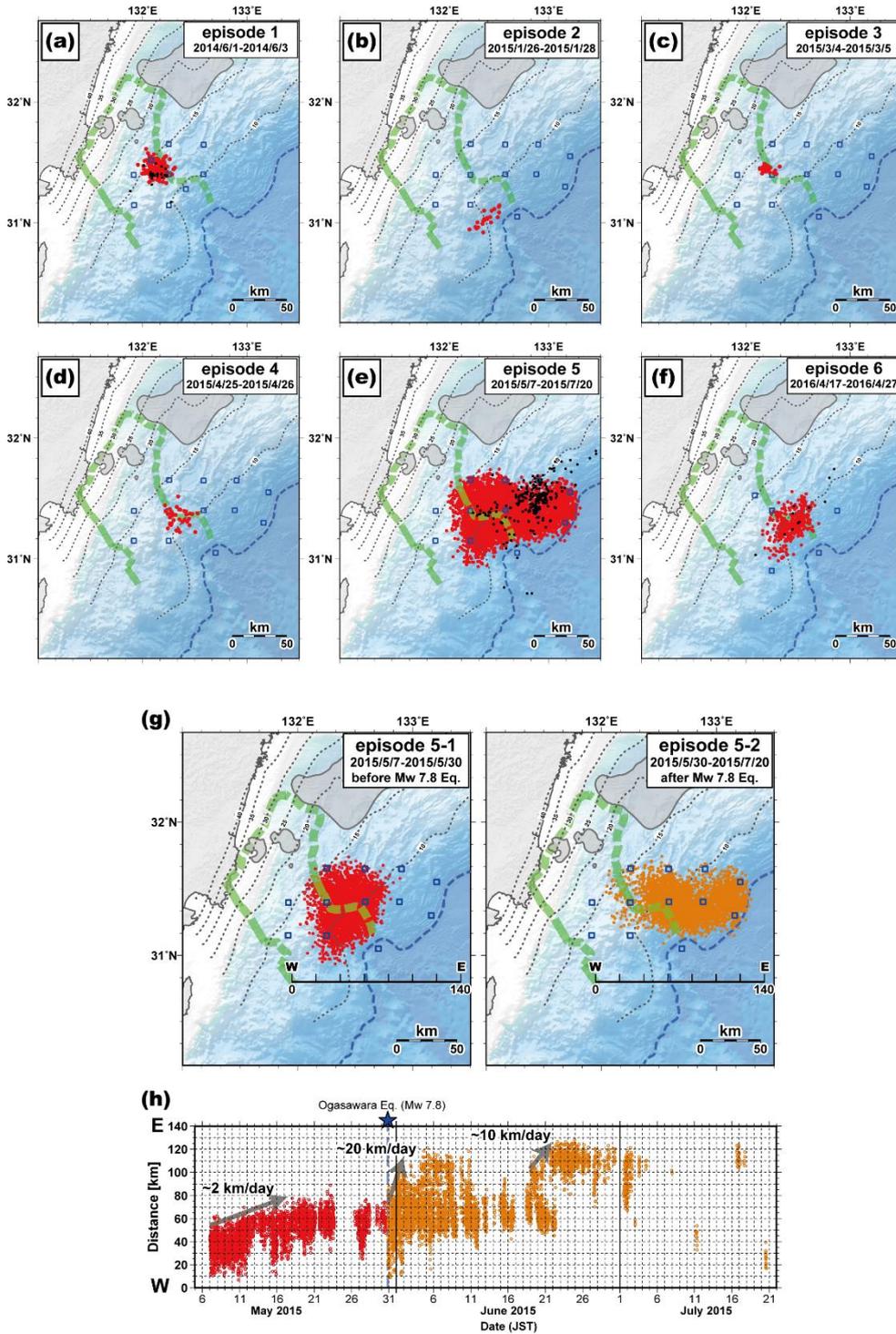


図 2 - 2 - ③ - 4 平成 26 年～29 年 (2014 年～2017 年) の間に発生した浅部低周波微動の (a-g) episode 毎の震央分布と、(h) episode 5 における時空間プロット⁷⁾。episode は図 2 - 2 - ③ - 3 (b) に示されている。黒色の点は浅部超低周波地震の震央分布¹⁰⁾。

(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 10 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。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。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, *Seism. Res. Lett.*, 92(6), 3610-3625, doi: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2年度成果報告書:
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/R2/r2_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, doi: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., 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. doi:10.1130/2018.2534(04), 2018.

9) Yamamoto Y., Obana K., Takahashi T., Nakanishi A., Kodaira S., 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., 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.

(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
Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations	Yamashita, Y., M. Shinohara and T. Yamada	Earth, Planets Space	令和3 年10月	国外
Development of Compact Broadband Ocean Bottom Seismometer for Monitoring of Slow Earthquakes	Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, and Y. Yamashita	Seism. Res. Lett.	令和3 年7月	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