令和６年度年次報告

課題番号：THK_01

（1）実施機関名：

東北大学理学研究科

（2）研究課題（または観測項目）名：

（和文）海底測地観測の拡充と測地・繰り返し地震データの統合解析によるプレート境界すべりモニタリング

（英文）Monitoring of interplate fault slip through extension of seafloor geodetic observation and an integrated analysis of geodetic and repeating earthquake data

（3）関連の深い建議の項目：

１ 地震・火山現象の解明のための研究
(3) 地震発生過程の解明とモデル化

（4）その他関連する建議の項目：

１ 地震・火山現象の解明のための研究
(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
６ 観測基盤と研究推進体制の整備
(1) 観測研究基盤の開発・整備
イ. 観測・解析技術の開発

（5）本課題の５か年の到達目標：

本課題では、日本海溝沿いにおける海底測地観測（GNSS音響観測）と繰り返し地震観測の実施とその統合的な解析を行うことで、2011年東北地方太平洋沖地震後のプレート境界断層すべり・固着のこれまでの時空間発展および現状把握を行う。また、その結果を元に東北沖地震自体の現象解明にも取り組む。具体的には、（１）これまで海域での測地観測の空白域であった房総沖における海底測地観測点の設置および海底地殻変動観測の実施による地殻変動場の現状把握、（２）繰り返し地震観測とそのデータ解析の継続的な実施・高度化、（３）海陸の測地観測データと繰り返し地震データを統合的に解析する断層すべりモデル化手法の開発、を実施する。（１）・（２）で得られた観測成果を用いて（３）による解析を実施し，日本海溝沿いでのプレート境界断層すべり・固着の時空間発展を把握する。

（6）本課題の５か年計画の概要：

海底測地観測の実施：これまでの海域での測地観測の空白域であり、かつ津波地震の発生リスクのある房総沖日本海溝浅部域において、海溝を挟む形でGNSS-A観測点を2点設置する。各GNSS-A観測点では、年に1回程度のキャンペーン観測を繰り返し実施し、5年間の変位速度を計測する。既に設置されている東北沖のGNSS-A観測点（22点）についても年に1回程度の観測を実施する見込みである。
繰り返し地震カタログの高度化：これまでの成果で既に繰り返し地震カタログは作成しているが、課題期間内での繰り返し地震カタログの更新、及びS-netデータを最大限活用したより小規模の地震に対応した繰り返し地震カタログの高度化を本課題で実施する。
断層すべりモデリングの高度化：海陸測地観測データ・繰り返し地震データを統合した断層すべりの時空間発展を推定する手法を開発する。本課題で活用する繰り返し地震・陸域GNSS観測・海域GNSS-A観測は、データの時間・空間スケールが異なるほか、観測精度も大きく異なる。そのため、すべり分布を推定する上でデータ間の重みやすべり分布の時空間変化についての拘束条件を最適化す

ることで、それぞれのデータの長所を生かしたすべり・固着の時空間発展の推定に取り組む。

（7）令和６年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

（１）海底測地観測の実施による地殻変動場の現状把握

これまで海域での測地観測の空白域であった日本海溝沿い房総沖において、2024年10月にGNSS-A観測点を新たに2点設置した（図１赤四角：G26点、およびG27点）。両観測点とも、それぞれ4台の海底局で構成されている。G26点では全ての海底局が動作していることを確認したが、G27点では１台の動作が確認できなかった。そのため、G27点では来年度に代替海底局を追加する予定である。両観測点では、初回のGNSS-Aキャンペーン観測を実施したが、上記の機器の不良のためG27点での観測データについては予備的な扱いとし、来年度から本格的な観測を実施する見込みである。また、これら新規GNSS-A観測点におけるGNSSデータ解析の基準として、陸上GNSS観測点（図１黄四角）の保守作業を行い、長期に渡って安定してGNSSデータの取得ができる状態に整えた。既存のGNSS-A観測点（図2）については、船舶およびWave Gliderを用いたキャンペーン観測を実施し、計18観測点でデータを取得した。2011年東北地方太平洋沖地震以降から昨年度までに取得した既存のGNSS-A観測データについては、確度の高い測位成果を得られるようにGNSS-A測位手法を改良した上で（Tomita, 2024, EPS）、海底地殻変動場を求めた（図2）。これにより、2011年東北沖地震に伴う余効変動が減衰していく様子が捉えられた。

（２）繰り返し地震観測とそのデータ解析の継続的な実施・高度化

繰り返し地震カタログの高度化に関しては、小規模地震の解析に向けて、気象庁がS-netを活用する前の2016-2020年についてS-netと機械学習を用いた地震の検知と震源決定を行い、その精度評価を行なった。その結果沖合では、S-netの効果によりこれまでより6倍程度多くの地震を検知することができることがわかった。一方、海岸に近い領域では、S-netにより新たに検知できる地震の数は少なかった。また、繰り返し地震を用いた評価により沖合の震源深さの精度が上がったことが確かめられたが、プレート境界深度が20 km以浅の海溝ごく近傍では、深さに系統的な誤差が認められた。また、海溝海側の領域においても比較的震源決定の際の誤差が大きく、海溝近傍の複雑な速度構造による震源決定への影響が考えられる。また、繰り返し地震のデータ解析については、効率的な繰り返し地震モニタリングに向けた地震データ取得および解析手法の高度化の検討を行うとともに、既存手法により統合解析用の2020年までの繰り返し地震カタログの整備を行なった。

（３）海陸の測地観測データと繰り返し地震データの統合解析による断層すべり推定

複数の観測データの同時インバージョンを行う手法として、マルコフ連鎖モンテカルロ（MCMC）法によって各データの事前分布形状（各データの正規分布の分散）を最適化可能なTomita et al. (2021, JGR)のすべりインバージョン手法を選択し、同手法を複数の事例に適用し、その適用可能性を模索した。まず、海陸の測地観測データとその評価が充実して行われている南海トラフ沿いでの固着分布推定に適用した結果、インバージョン手法によって最適化された海陸の観測誤差が既存の研究で評価された観測誤差と大きな乖離がないことを確認した（Plata-Martinez et al., 2024, JGR）．次に、海陸の測地観測および繰り返し地震によってそれぞれ変位とすべりが検出されている2015年2月16日に発生したMw6.7三陸沖の地震に伴う非地震性すべりのすべり分布推定に適用した。非地震性すべりが生じていた期間における各繰り返し地震グループの累積すべり量を求め、それらをすべり分布推定を行う小断層ごとに平均し、平均累積すべり量を算出した。インバージョンでは海陸の測地観測データに加えて、繰り返し地震による平均累積すべり量も観測値としてデータベクトルに取り入れた。なお、この平均累積すべり量に対応するグリーン関数は単位行列として表現される。結果として、各観測データを全て取り入れたすべり分布の推定に成功した（図3）。ただし、GNSS-Aデータが2011年東北沖地震の余効変動と2015年のイベント非地震性すべりの影響を分離できていないため、観測値と計算値の乖離が大きい結果となった。また、Tomita et al. (2021, JGR)のインバージョン手法は、モデルパラメータについて空間的に強いスパース性を与えた事前分布推定しているため、データセットによっては平坦な分布となりやすい欠点がある。そのため、入力するデータセットの精緻化に加え、モデルパラメータの事前分布設定について今後の改良が必要である。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

地震発生過程を理解する上での基本情報となる網羅的な海底測地観測データ、およびプレート境界での非地震性すべりをモニター可能な繰り返し地震観測データを順調に取得している。また、それらのデータの解析手法の高度化にも着手し、着実に目的達成に貢献している。また、新規観測点設置、および今後の4-5年の継続観測の実施により、日本海溝沿い全域、特にこれまで評価されていなかった房総沖日本海溝沿いでのハザード評価が進むと期待され、ハザードの正確な認知による災害軽減に貢献できると考える。

(8) 令和６年度の成果に関連の深いもので、令和６年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

Tomita, F., 2024, Enhanced GNSS-acoustic positioning method implementing with constraints on underwater sound speed structure, Earth Planets Space, 76, 178, doi:10.1186/s40623-024-02120-6.,査読有

Plata-Martinez, R., Iinuma, T., Tomita, F., Nakamura, Y., Nishimura, T., & Hori, T., 2024, Revisiting slip deficit rates and its insights into large and slow earthquakes at the Nankai subduction zone. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 129, e2023JB027942, doi:10.1029/2023JB027942.,査読有

・学会・シンポジウム等での発表

Tomita, F., T. Sun, T. Iinuma, M. Kido, Y. Ohta, N. Uchida, R. Hino, K. Wang, 2024, Postseismic deformation following the 2011 Tohoku earthquake revealed by onshore geodetic, offshore geodetic, and small repeating earthquake observations, The 2024 AGU Annual Meeting, G23B-3585.

富田史章・Sun Tianhaozhe・飯沼卓史・木戸元之・太田雄策・内田直希・日野亮太・Wang Kelin, 2024, GNSS・GNSS音響・小繰り返し地震観測によって捉えられた2011年東北沖地震に伴う余効変動の全体像，日本地震学会2024年度秋季大会，S03P-03.

富田史章・木戸元之・飯沼卓史・太田雄策・日野亮太, 2024, GNSS音響測位における不確定性を考慮した東北沖における上下変動場評価，日本地球惑星科学連合2024年大会，SCG48-P04.

飯沼卓史・木戸元之・福田達也・太田雄策・富田史章・日野亮太・高橋浩晃・堀高峰・佐藤大祐, 2024, ウェーブグライダーを用いたGNSS-音響測距結合方式の海底地殻変動観測（その５），日本地球惑星連合2024年大会，SCG48-P01.

内田直希・鈴木琳大郎,・ZhuWeiqiang・BerozaGregory・中山貴史・豊国源知・高木涼太・東龍介・吉田圭佑・長谷川昭, 2024, A clearer view of seismicity offshore NE Japan through deep-learning-based analysis of S-net data: evidence for the role of forearc fluids in interplate coupling, 日本地球惑星科学連合2024年大会，SCG40-03.

(9) 令和６年度に実施した調査・観測や開発したソフトウエア等のメタ情報：

項目：地震：地殻変動：GNSS音響結合方式海底地殻変動観測
概要：KS-24-07航海：根室沖・三陸沖における船舶によるGNSS-A観測の実施、およびGNSS-A観測を自走して実施するWave Gliderの投入を実施。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：根室沖・三陸沖 40.6936 143.5192
調査・観測期間：2024/4/11-2024/4/21
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：地震：地殻変動：GNSS音響結合方式海底地殻変動観測

概要：KS-24-20航海：三陸沖における船舶によるGNSS-A観測の実施。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：三陸沖 39.5662 143.8971
調査・観測期間：2024/10/12-2024/10/17
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：地震：地殻変動：GNSS音響結合方式海底地殻変動観測
概要：KM24-04航海：茨城沖における船舶によるGNSS-A観測の実施。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：茨城沖 36.4963 142.6708
調査・観測期間：2024/5/26-2024/6/8
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定） Cruise Report
https://doi.org/10.17596/0003912

項目：地震：地殻変動：GNSS音響結合方式海底地殻変動観測
概要：東京海洋大学練習船・汐路丸による房総沖における新規GNSS-A観測点の設置、および船舶によるGNSS-A観測の実施。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：房総沖 35.7276 142.0469
調査・観測期間：2024/10/16-2024/10/19
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：地震：地殻変動：GNSS音響結合方式海底地殻変動観測
概要：傭船による宮城沖における船舶によるGNSS-A観測の実施。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：宮城県沖 37.8916 142.7747
調査・観測期間：2024/12/25-2024/12/26
公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

項目：ソフトウエア開発（解析）
概要：GNSS音響観測データの測位解析ソフトウェア SeaGap V1.10 を開発した。音速勾配構造を仮定し、走時遅延パラメータに対して多様な制約条件（事前分布）を課してMCMC法で測位解析を行う。
既存データベースとの関係：
調査・観測地域：
調査・観測期間：
公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web）
https://github.com/f-tommy/SeaGap.git

（10）令和７年度実施計画の概要：

海底測地観測については、房総沖G27観測点に代替海底局を設置する。加えて、房総沖の新規観測点、および既存のGNSS-A観測点において、船舶・Wave Gliderによる観測を行い、現在の海底地殻変動場の検出に努める。繰り返し地震については、引き続いて繰り返し地震カタログの更新とS-netを用いた高精度化に取り組む。断層すべり推定については、既存の解析手法（Tomita et al., 2021）を改良し、合成データによる性能試験、2015年2月16日の三陸沖非地震性すべりイベントへの適用を実施する。

（11）実施機関の参加者氏名または部署等名：

富田史章（東北大学災害科学国際研究所）,内田直希（東北大学大学院理学研究科）,木戸元之（東北大学災害科学国際研究所）,太田雄策（東北大学大学院理学研究科）,日野亮太（東北大学大学院理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

中東和夫（東京海洋大学）,飯沼卓史（海洋研究開発機構）

（12）公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：東北大学大学院理学研究科　地震・噴火予知研究観測センター
電話：022-225-1950
e-mail：zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp
URL：https://www.aob.gp.tohoku.ac.jp

（13）この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：富田史章
所属：東北大学災害科学国際研究所

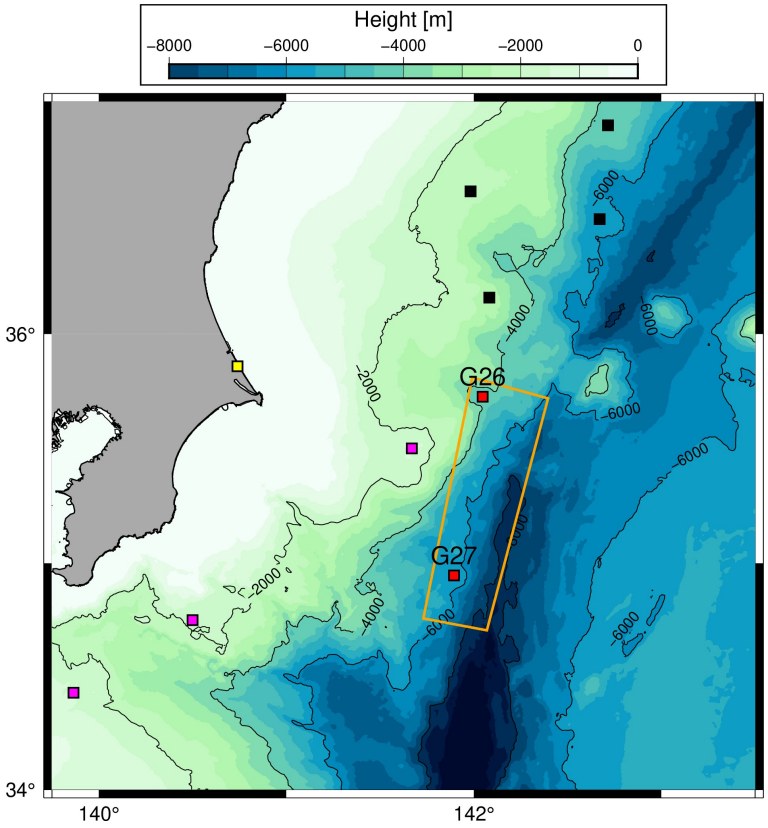


図１：房総沖に設置した新規GNSS-A観測点（赤四角）位置
黒四角・マゼンタ四角はそれぞれ東北大学・海上保安庁による既存のGNSS-A観測点位置を示す。陸上の黄三角は、東北大学によって保守しているGNSS-A観測用の陸上基準GNSS観測点位置を示す。橙矩形は、1677年延宝房総津波地震の主すべり域（slip=16 m; Yanagisawa et al., 2016）を示す。

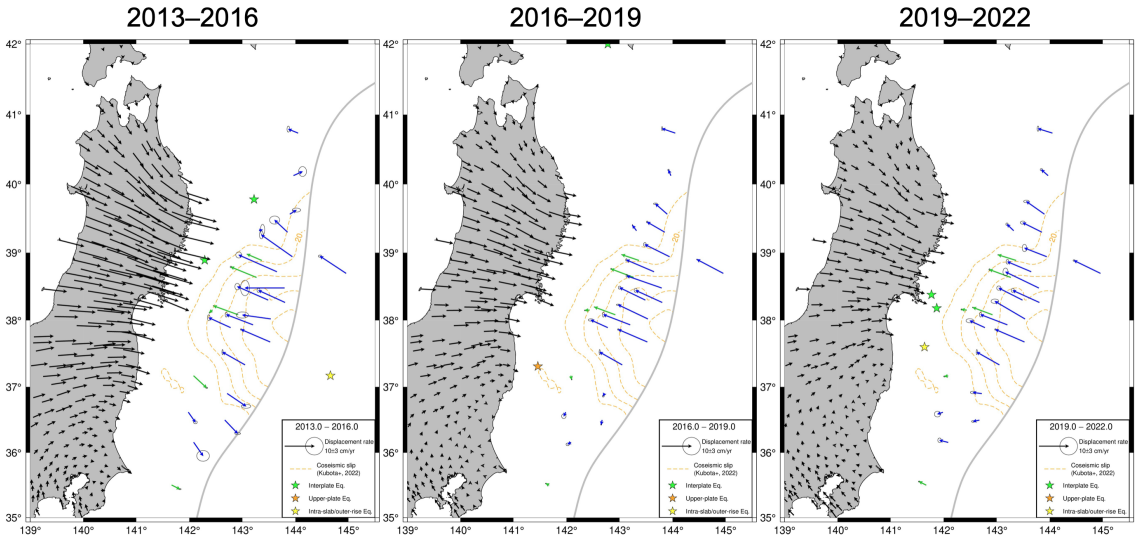


図２：日本海溝沿いでの2011年東北地方太平洋地震後の地殻変動場（各時間までの平均変位速度）（左）2013–2016年，（中央）2016–2019年，（右）2019–2022年。橙色コンターは、Kubota et al. (2022)の2011年東北地方太平洋地震の地震時すべりモデルを示す。

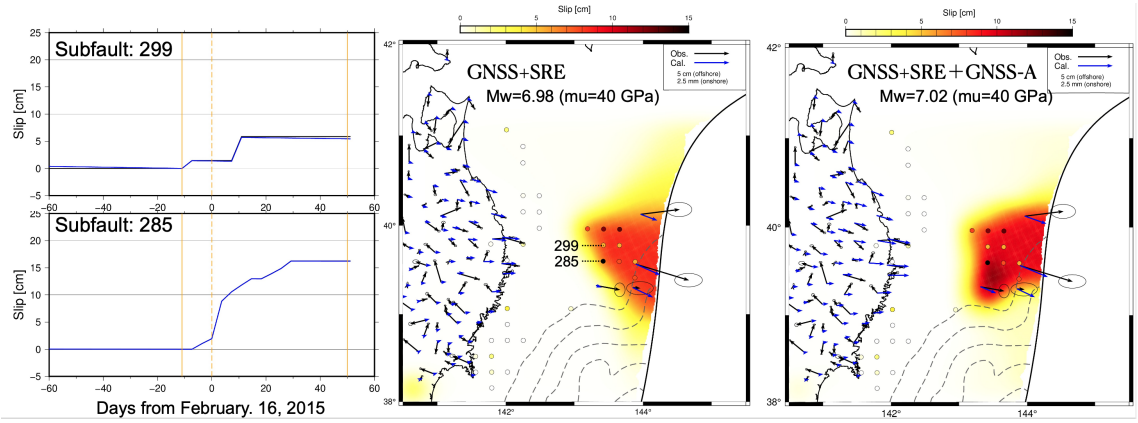


図３：2015年2月16日三陸沖の地震に伴う非地震性すべり分布の推定結果
（左）繰り返し地震カタログから算出した小断層285番・299番における平均累積すべりの時間変化。（中央）陸上GNSSデータと繰り返し地震データから推定されたすべり分布。（右）陸上GNSSデータ、GNSS-Aデータ、および繰り返し地震データから推定されたすべり分布。