

## (1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

## (2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）南海トラフ域を中心したプレート境界すべりの時空間発展のモデリング・予測に関する研究  
（英文） Study on modeling and prediction of the spatio-temporal evolution of slip on the plate boundary in the Nankai subduction zone

## (3) 関連の深い建議の項目：

## 2 地震・火山噴火の予測のための研究

## (2) 地震発生確率の時間更新予測

ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

## (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

## 5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

## (1) 南海トラフ沿いの巨大地震

## (5) 令和5年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

本計画は、8つのサブテーマから構成される。サブテーマ毎に研究成果の概要を記述する。

**1.広帯域観測を用いた超低周波地震の活動様式の詳細把握**

陸域の準定常広帯域地震観測点を敷設し、深部超低周波地震について長期的スロースリップ時の非線形な応答を明らかにした(Takeo and Obara 2020)。また、定常観測網を用いて浅部超低周波地震を解析し、2004年からの20年弱の活動履歴、震源移動特性、個々の震源時間関数およびスロー地震の高周波数成分である微動との関係を明らかにした(Takemura et al., 2022ab; 2023)。

**2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング**

前計画・科研費等で構築してきた、豊後水道周辺地域におけるGNSS連続観測および座標値解析を継続して実施し、スロースリップイベント (SSE)発生様式の把握に有用な地殻変動データを取得することができた。このGNSS観測データに基づき、2015～2016年頃および2018～2019年頃に豊後水道で発生した2つのSSEのすべり域を推定した。これらと深部微動活動を比較したところ、豊後水道では微動発生域へのSSEすべりの進展と微動活動により相関が示された (Hirose et al., 2023)。GNSS時系列データから短期的SSEを自動的に検出する手法を新たに開発し、本研究で得たGNSSデータに適用したところ、東海～九州地域で1997年から2020年の期間に発生した284イベントを検出した。これには日向灘などこれまでにSSEが未検知だった地域の活動も含まれる (Okada et al., 2022)。

四国で発生している短期的SSEのすべり分布を防災科研傾斜変化（オフセット）データセットに基づいて推定し、2001年から2019年にかけて発生した61イベントについてすべり分布を求めた。約20年間の短期的SSEの地域による活動様式の違いや、この期間の後半で、より規模の大きいSSEが増える傾向がみられた (Hirose and Kimura, 2020)。

**3.重力磁気観測に基づく流体挙動とプレート境界滑り**

東海地方において、SSEと同期する重力異常を世界で初めて捉え、観測結果が流体移動で説明でき

ることを報告した(Tanaka et al., 2018)。四国西部と九州東部において、長基線地電位差観測に基づいたネットワークMT観測を継続している。四国のデータを用いて3次元比抵抗構造を推定し、プレート上盤側の中部地殻に低比抵抗域が分布する様子がとらえられた。その構造に基づき、プレート境界面付近での比抵抗値変化に対する観測量の感度を調べた。

#### 4.プレート境界滑り特性を規定する地下構造の特徴抽出

スロー地震の滑り特性を規定する地下構造の特徴を把握する為に、紀伊半島北東部で取得された稠密地震観測データに地震波トモグラフィー解析、自然地震反射法解析を適応することで、スロー地震の滑り特性に影響を与えている可能性を示唆する流体に起因した不均質構造を示した(Kurashimo et al., 2021)。四国東部で取得した稠密地震観測データに地震波モグラフィー解析を適応することで得た地震波速度構造の特徴からは、深部低周波微動活動度との関連が示唆される、沈み込むフィリピン海プレート内の流体に起因する不均質構造が確認できる(蔵下・他, 2023)。

#### 5.プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定

反射法地震探査データを用いた重合前深度マイグレーション結果を深海掘削データと組み合わせ、東北沖日本海溝の浅部プレート境界断層(=デコルマ)の物理特性を調査し、デコルマに沿った間隙水圧が異常に高いことを見出した(Jamali Hondori and Park, 2022)。デコルマの高い間隙水圧は断層面の強度低下をもたらし、2011年東北沖地震(M9.0)の巨大津波発生に深く関与した可能性が考えられる。また、南海トラフ沿いの反射法地震探査データを深海掘削データと組み合わせ、海溝で沈み込む堆積物を調査し、砂層に富むタービダイトが浅部スロー地震発生の静穏域(プレート間固着の強い領域と概ね一致)に集中して分布することを明らかにした(Park and Jamali Hondori, 2023)。透水性の優れたタービダイトがプレート境界断層の間隙水圧を低下させることで、断層面の剪断強度が大きくなり、スロー地震活動が静穏化した可能性が高い。

#### 6.熊野灘における浅部スロー地震発生環境の解明

浅部スロー地震発生域近傍におけるS波速度構造を推定するために、海面―海底面での多重反射波がノイズとして卓越する海底地震計の波形記録から、高周波帯域でレシーバ関数を計算し、速度構造のインバージョンを行う手法を開発した(Akuhara et al., 2019; Akuhara et al., 2020)。また、レシーバ関数とは相補的な感度を持つ表面波の位相速度とのジョイント・インバージョン解析のコード開発を行い、その有用性を示した(Akuhara et al., 2023a)。

熊野灘においては、2019年度以来、微動の観測や浅部のS波速度構造推定を狙った長期海底地震観測を継続させている。2020年12月に発生した微動のエピソードに関しては、微動の震源を高精度に求めるためのインバージョン手法を開発し、その詳細な震源分布を求めた(Akuhara et al., 2023b)。

#### 7.スロー地震と地震発生との関連性

南海トラフ沈み込み帯の深部低周波地震の長期的な挙動に関する理解を深めるために、2004年~2020年の連続波形記録に対してマッチドフィルター法を適用することで、深部低周波地震のより包括的なカタログを構築した実績がある。その一部はKato & Nakagawa (2020)の論文として公表されている。また、スロー地震と大地震の関連については2011年東北地方太平洋沖地震や2014年チリ北部地震、2016年熊本地震等の前震活動解析に基づく実績(Kato et al., 2012; 2014; 2016)を有している。

#### 8.プレート境界滑り現象の物理モデルに対するパラメータ推定手法

測地データを用いてプレート境界の摩擦パラメータやマンツルの粘性率等、余効変動の物理モデルのパラメータをベイズ推定する手法を開発した。これを2011年東北沖地震後の測地データに適用した(Fukuda and Johnson, 2021)。

### (6) 本課題の5か年の到達目標 :

南海トラフ域を中心とし、沈み込みプレート境界で発生する様々な時定数を有する滑り現象をモニタリングすることで、それら滑り現象の時空間変化を高精度に把握する。また、それらの発生環境としての地下構造の特徴・流体挙動との関係の解明を通じて、プレート境界すべりの特性やプレート境

界すべり現象間の相互作用の理解を深め、沈み込みプレート境界における断層滑りの時空間発展予測に貢献する。以下にサブテーマ毎の到達目標を記す。

### 1.広帯域観測を用いた超低周波地震の活動様式の詳細把握

陸海の定常広帯域観測点（F-netやDONET）と新学術領域研究「スロー地震学」等で四国～東海地域に敷設した準定常広帯域観測点を用いて、プレート境界で発生する超低周波地震の（1）網羅的検出、（2）震源物理特性の把握を実施する。検出・評価された超低周波地震カタログにより、南海トラフのスロー地震の活動様式やスロー地震域とその周辺の応力変化を評価し、プレート境界におけるスロー地震発生メカニズム解明へつなげる。継続的なモニタリング研究により、プレート境界の巨大地震準備過程との関係を明らかにする。

### 2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング

豊後水道およびその周辺地域において、これまでに構築してきたGNSS連続観測点における地殻変動観測を継続して実施し、他機関の定常観測データと組み合わせ、SSEをはじめとするプレート間すべりの動態・時空間発展を把握するとともに、この地域におけるプレート間すべり特性や歪収支、さらに微動など他のすべり現象との相互作用を明らかにする。

### 3.重力磁気観測に基づく流体挙動とプレート境界滑り

重力変化の観測を通して流体挙動とプレート境界すべりとの相互作用に関する理解を深める。比抵抗構造を通して流体の分布を把握し、その変化がとらえられたら、重力と同じく流体の挙動を探る一助とする。

### 4.プレート境界滑り特性を規定する地下構造の特徴抽出

プレート境界滑り特性が変化している紀伊半島東部から中央部にかけての深部低周波微動発生域における稠密地震観測と紀伊半島の電磁気データ空白域における追加電磁気観測を実施し、西南日本で過去に取得された稠密地震観測データや電磁気データの再解析と合わせてスロー地震発生域の構造を明らかにする。得られたプレート境界面の形状や境界面近傍の構造不均質と、モニタリングされるスロー地震活動と対応させることで、プレート境界滑り特性を規定する地下構造の特徴を把握し、スロー地震の発生における時空間的揺らぎのメカニズムやスロー地震間に働く相互作用の理解を深める。

### 5.プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定

浅部スロー地震を引き起こすプレート境界断層（＝デコルマ）の詳細構造と間隙水圧を広域的に調査することで、スロー地震活動を規定する要因を解明し、プレート境界滑りの時空間発展予測に貢献する。具体的には、海洋研究開発機構が過去に南海トラフで取得した反射法地震探査データを深海掘削（ODP/IODP）データと組み合わせ、浅部スロー地震活動の活発域（日向灘沖、室戸岬沖、熊野沖）と静穏域（足摺岬沖、潮岬沖、東海沖）においてデコルマの形状や間隙水圧を推定し、両域の比較検討を行う。また、間隙水圧の変化に影響する沈み込みインプット（デコルマに沿って沈み込む堆積物と海洋性地殻）の広域変化を調査する。

### 6.熊野灘における浅部スロー地震発生環境の解明

自然地震観測および構造探査が充実した熊野灘を重点的な調査対象域として、スロー地震の発生場を解明することを目指す。特に、同地域で報告されている厚い沈み込む堆積層の物性解明、およびスロー地震震源との位置関係について明らかにする。これにより、従来は“面”として考えられがちであった巨大地震せん断帯の実態に迫る。

### 7.スロー地震と地震発生との関連性

南海トラフ沿いで発生する深部低周波地震は、固着域の深部延長で発生しており、その時空間変化を解明することは、プレート境界の固着状態の変化に関する知見をもたらすことが期待される。そこで、長期間にわたり定常地震観測網で取得された連続波形記録をもちいて、深部低周波地震の網羅的な検出をおこない、深部低周波地震の活動様式の多様性や長期的な振る舞いを明らかにする。また、大地震の発生に先行する前震活動の解析を継続し、スロースリップとの関連について考察する。

## 8.プレート境界滑り現象の物理モデルに対するパラメータ推定手法

物理モデルによるすべりの予測を行うためには、観測データからモデルの状態変数・パラメータを逆問題として推定する手法を確立する必要がある。そこで、ベイズ統計学やアンサンブルデータ同化の理論に基づき、摩擦構成則に従う断層すべりとマンツルの粘弾性緩和を取り入れた物理モデルの状態変数・パラメータの空間分布とその不確実性を測地データから推定する手法を開発する。

### (7) 本課題の5か年計画の概要：

サブテーマ毎に研究を進める。それぞれで得られた成果を共有し、モニタリング結果とモデルをデータ同化によって組み合わせ、沈み込みプレート境界における断層滑りの時空間発展予測に貢献する。以下にサブテーマ毎の5か年計画を記す。

#### 1.広帯域観測を用いた超低周波地震の活動様式の詳細把握

準定常広帯域観測点を保守し、継続的な運用を目指す。その上で、令和6年度においては定常+準定常広帯域観測点における超低周波地震の検知下限評価を実施し、モニタリング性能の現状把握を行う。令和7年度においては、従来手法で検知可能な超低周波地震について震源物理特性の推定、カタログ化し広く公開する。令和8-10年度においては、より小さな信号を持つ超低周波地震検知へ向け、機械学習によるDenoisingの実装を行い、モニタリングの次世代化を目指す。令和9年度以降は、高度化した超低周波地震モニタリングの結果を活用し、震源物理特性の評価、超低周波地震の統計性を明らかにし、スロー地震発生メカニズムの解明へ資する。

#### 2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング

令和6-7年度においては、独自のGNSS観測点での連続観測を継続するとともに、これまでの長期間のデータと合わせて活用し、SSEによる地殻変動を自動検出する手法の開発を進める。令和8-9年度においては、前年度までの研究を継続するとともに、プレート間の歪収支、微動など他現象との相互作用について検討を進める。令和10年度においては、前年度までの研究を継続するとともに、成果とりまとめを行う。

#### 3.重力磁気観測に基づく流体挙動とプレート境界滑り

令和6-10年度の実施期間中において、SSE及び流体が観測されている東海3点、四国1点、宮崎1点、能登1点で年1回程度の絶対・相対重力測定を実施するとともに、石垣島SSE域における連続重力観測を継続する。近い将来に大規模なSSE活動が予測される豊後水道域を囲む、四国西部地域17エリア、九州東部海岸域3エリアにおけるNetwork-MT長基線地電位差観測を継続するとともに、四国西部地域の2地点で3成分磁場観測を継続する。令和7-8年度においては、重力、電磁場データの観測・解析を継続する。得られた重力データから重力の時間変化の様式を明らかにする。さらに、重力とすべりの時空間発展との関連を明らかにし、それらの関連を説明するための定性的なモデル化を試みる。得られた電磁場データから電磁場や比抵抗構造の時空間変化の様式を明らかにする。令和9年度においては、重力、電磁場データの観測・解析を継続する。重力とすべりの時間発展の様式を地域間で比較し、地域差を説明するための定性的なモデル化を試みる。電磁場データの解析により、電磁場・比抵抗の時空間変化とすべりの時空間発展との関連性を明らかにする。令和10年度においては、重力、電磁場データの観測・解析を継続する。重力とすべりの時間発展を説明するための定量的なモデルを構築する。また、電磁場・比抵抗の時空間変化とすべりの時空間発展との関連性を説明するための定性的ないしは定量的モデル化を試みる。このような物理モデルの構築により流体挙動やプレート境界の摩擦・透水構造を推定し、流体挙動とプレート境界の滑りが互いにどのような影響を及ぼしているかを明らかにする。

#### 4.プレート境界滑り特性を規定する地下構造の特徴抽出

令和6年度においては、令和7年度から予定している臨時地震観測の現地踏査と紀伊半島の電磁気データ空白域における追加電磁気観測を実施する。四国や紀伊半島等で取得された既存稠密地震観測データの再解析や、過去に取得している紀伊半島や四国東部から鳥取に至るNetwork-MTデータのコンパイル、再解析を令和10年度まで継続して実施する。令和7年度においては、地震観測装置を設置し、観測を開始する。紀伊半島の電磁気データ空白域における追加電磁気観測を引き続き実施する。令和7-8年度においては、紀伊半島や四国東部から鳥取に至る地域での広域深部3次元比抵抗構造解明を図る。

令和8年度においては、前年度に設置した臨時地震観測点を撤収する。令和9-10年度においては、臨時地震観測点データを用いてスロー地震発生域やその近傍における地震学的構造を明らかにする。既存地震観測データの再解析結果や電磁気データの解析結果と合わせて、スロー地震発生域のセグメント境界・活動様式を規定する構造を抽出する。紀伊半島や四国東部から鳥取に至る地域で推定された広域深部比抵抗構造と、他の地球物理観測から得られた情報を総合し、テクトニックな地殻活動のメカニズムを明らかにする。

#### 5.プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定

令和6年度と7年度においては、浅部スロー地震活動の活発域（日向灘沖、室戸岬沖、熊野沖）でデコルマの形状や間隙水圧を推定する。令和8年度と9年度においては、浅部スロー地震活動の静穏域（足摺岬沖、潮岬沖、東海沖）でデコルマの形状や間隙水圧を推定し、活発域との比較検討を行う。令和10年度においては、沈み込みインプットの広域変化を調査し、間隙水圧変化への影響を明らかにする。

#### 6.熊野灘における浅部スロー地震発生環境の解明

令和6年度においては、S波速度構造の推定手法のさらなる高度化を目指す。具体的には、レイリーアドミッタンス（表面波がもたらす上下変位と応力の比）はH/V比（表面波がもたらす水平変位と上下変位の比）を新たに用いて、S波速度絶対値の感度を向上させる。令和7年度においては、前年度までに開発したインバージョン手法を利用し、各観測点下のS波速度構造を推定する。ひいては、沈み込む堆積物の物性や流体圧を考察する。令和8年度においては、稠密観測網を利用して、スロー地震（特にテクトニック微動）の深さ決定精度を向上させる方法を模索する。例えば、アレイ観測網のデータや、近地波形データからP波の走時情報を抽出することを考える。令和9年度においては、これまでに得られた結果から、スロー地震震源と沈み込む堆積物の相対的な位置関係など、震源と構造の関連性について総合的に解釈する。令和10年度においても引き続き、これまでに得られた結果を総合的に解釈し、最終的な成果をとりまとめる。

#### 7.スロー地震と地震発生との関連性

令和6-7年度においては、四国地域を対象にマッチドフィルター法により深部低周波地震のカタログを構築する。令和8-9年度においては、紀伊半島・東海地域を対象にマッチドフィルター法により深部低周波地震のカタログを構築する。令和10年度においては、深部低周波地震カタログの分析し、活動様式の多様性や長期的な振る舞いを明らかにする。令和6-10年度の実施期間中において、活発な前震活動を伴う大地震が起きた場合は、前震活動の時空間発展を明らかにする。

#### 8.プレート境界滑り現象の物理モデルに対するパラメータ推定手法

初めに、摩擦構成則に従う断層すべりとマンツルの粘弾性緩和を取り入れた物理モデルを構築する。この物理モデルの状態変数・パラメータの空間分布とその不確実性を測地データから推定する手法をベイズ統計学やアンサンブルデータ同化の理論に基づいて定式化し、計算コードを開発する。人工的なデータを用いたテストにより、手法の振舞いを理解する。さらにプレート境界地震の余効変動やスロースリップ等に伴う測地データに手法を適用する。手法のテストやデータへの適用から得られた知見に基づき、手法の改良を継続的に行う。

#### (8) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

蔵下英司（東京大学地震研究所）、竹尾明子（東京大学地震研究所）、武村俊介（東京大学地震研究所）、上嶋誠（東京大学地震研究所）、臼井嘉哉（東京大学地震研究所）、悪原岳（東京大学地震研究所）、加藤愛太郎（東京大学地震研究所）、福田淳一（東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

廣瀬仁（神戸大学都市安全研究センター）、松島健（九州大学大学院理学研究院）、田中愛幸（東京大学大学院理学系研究科）、津村紀子（千葉大学大学院理学研究院）、岩崎貴哉（地震予知総合研究振興会）、朴進午（東京大学大気海洋研究所）

(9) 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：

電話：

e-mail：

URL：

(10) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：蔵下英司

所属：東京大学地震研究所