

(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) 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み堆積層の物性解明、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。

#### (6) 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、手法の振る舞いを理解する。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。

### (7) 令和6年度の成果の概要：

- ・今年度の成果の概要
- ・今年度の成果の概要

年次計画に基づいた機動的調査観測を実施するとともに、南海トラフ沿いにおけるスロー地震をモニタリングし、発生状況の把握を行なった。また、既存観測データを用いた地殻変動調査、スロー地震の活動様式、スロー地震発生域の構造・流体挙動の把握、スロー地震と地震発生との関係に関する研究や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に関する研究を進めた。以下、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

地震学的スロー地震の長周期側シグナルである超低周波地震を観測するため、前計画から四国・紀伊・東海地域に維持している17観測点について地震計やモバイル通信に関する保守作業を行いつつ観測を継続した。科研費プロジェクトと合同で2観測点を追加した。定常観測網による超低周波地震の検知下限 (Takemura et al., 2024) に加え、前述の準定常観測点による超低周波地震の検知能力を評価した。本計画による準定常広帯域観測点が、微小な超低周波地震検知に寄与することを確認した。検出されたスロー地震の震源特性の把握を高度化すべく、南海浅部あるいは日本海溝沿いの地震波伝播特性を評価した。その結果、浅部微動に含まれる堆積層の伝播増幅効果 (Takemura, et al., 2024)、標準的な海域の地震動予測式 (Nakanishi & Takemura, 2024) の構築が実現した。

### 2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング

前計画において、独自のGNSS観測によるデータ等にもとづき、豊後水道域で発生した2つの時期のスロースリップイベント(SSE)のすべり域を推定し、その空間的な広がりや微動活動による相関がみられるという成果が得られている (Hirose et al., 2023)。本計画においても、豊後水道周辺地域におけるSSEの動態を把握するため、同地域でのGNSS連続観測および座標値解析を継続して実施している。また防災科研Hi-netによる2011年東北地方太平洋沖地震の本震発生直前の傾斜記録のスタッピング解析によって、本震直前の地殻変動を調査し、数時間の時定数のノイズレベルを超えるような加速的な変動は見られなかった(図1)。また、震源付近でのそのタイムスケールのプレスリップは、存在したとしてもそのノイズレベル以下であることから、プレスリップの規模の上限に制約を与えた (Hirose et al., 2024)。

### 3.重力磁気観測に基づく流体挙動とプレート境界滑り

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ため、南海トラフ域を中心とし

た重力観測を行っている。前計画では、東海地方において、長期的スロースリップ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)。令和6年度は計画の通り進行中である。東海2点での重力観測を実施しデータを蓄積した。年度末までに東海2点、四国1点、宮崎1点の観測を終える予定である。令和5年奥能登地震、令和6年能登半島地震前後に観測した震源域近傍の重力変化を解析したところ、負の重力変化が生じたことがわかった。奥能登地震による変化は流体移動で説明できる可能性があり、能登半島地震については現在解析中である。石垣島の連続重力観測を継続中である。

電磁気観測については、前計画より四国西部と九州東部域におけるネットワークMT観測を継続している。四国では17中心点、九州では3中心点での長基線地電位差観測と、四国における2地点での3成分磁場観測を継続し、来るべき豊後水道域での長期的スロースリップ発生を待っているところである。

#### 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を規定する地下構造の特徴抽出を目的とし、令和7年度より紀伊半島東部から中央部にかけての地域で実施する稠密自然地震観測で設置する地震観測点の場所を検討した。また、前計画において、スロー地震活動様式に違いがある四国東部地域で実施した稠密自然地震観測(蔵下・他, 2023)で取得したデータの解析を継続して実施した。四国東部においては、1999年と2002年に発破を使用した地殻構造探査が実施されている(蔵下・他, 2002, Ito et al., 2008)。本年度は、それら探査で実施された発破を、四国東部に設置されている定常地震観測点で収録したデータからP波初動走時を読み取り、四国東部における稠密自然地震観測により得た走時データと統合したデータセットを用いた地震波モグラフィ解析を実施した。得られた南北測線下のVp/Vs構造からは、深さ15km以深でVp/Vs値の大きな領域が北傾斜で確認でき、フィリピン海プレート上面近傍の反射層が厚く確認できる領域(蔵下・他, 2007)と対応することから、流体の存在が示唆される。

比抵抗構造研究では、まず、紀伊半島地域で取得されていたすべてのネットワークMT観測データを用いた再解析を行い、紀伊半島全域にわたる広域深部比抵抗構造を推定した。従来研究では、非火山性低周波微動域が低比抵抗域または高比抵抗域となる互いに矛盾する2つの構造モデルが提出されていたが、本研究で得られた構造は低比抵抗域に対応することを支持しなかった。ただ、熊野酸性岩を示すと考えられる高比抵抗域が浅部に決定される一方でその深部はやや低比抵抗、周辺部には低比抵抗域が決定され、低周波微動域は高比抵抗の底付近に分布し、周囲の低比抵抗分布域は同地域の前弧域では珍しい高温泉の分布と調和的であった。ただ、ネットワークMTデータからは数10秒より短周期の情報は得られず、電話回線が分布しているところのみで情報が得られるため、周期帯や観測域の空間分布に空白域が存在していた。このため、それらの空白域を埋めるべく、特に低周波微動帯の直上域において広帯域MT観測を開始した。さらに、四国東部から山陰域で実施されていたネットワークMTデータ解析し、フィリピン海沈み込みに関連する広域深部構造推定を開始した。

#### 5. プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定

前計画「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)」では、南海トラフ沈み込み帯のプレート境界すべりを理解するために、プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定を試みるとともに、間隙水圧の変動に影響する要因について研究を行った。その例として、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(Pre-stack depth migration: PSDM)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。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。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。

今年度は、浅部スロー地震活動の静穏域にあたる紀伊半島潮岬沖の南海トラフで取得したマルチチャンネル反射法地震探査(MCS)データを用いたPSDM処理を行い、P波速度構造を求め、プレート境界断層に沿って間隙水圧を推定した。この解析結果を、浅部スロー地震活動の活発域にあたる四国室戸岬沖の結果と比較すると、両者において間隙水圧比に有意義な差は認められないものの、潮岬沖の

剪断応力が戸岬沖の約2倍高いことが明らかになった。この結果は、潮岬沖の付加体の層厚が室戸岬沖の約2倍大きいことに関連付けられる。今回の研究成果は、プレート境界断層の浅部スロー地震活動を評価する上で、間隙水圧に加え、付加体の層厚も考慮すべき重要な要因であることを示唆する。

なお、今年度の研究成果は、本課題の5か年計画と概ね一致している。

## 6.熊野灘における浅部スロー地震発生環境の解明

当初の計画では、熊野灘の微動発生域における3次元S波速度構造の推定を進めることとなっていたが、計画を変更し、まずは高精度に震源決定されたテクトニック微動の震源分布、反射法地震探査、海底地形のデータを活用することで、スロー地震発生域に特徴的な地質構造を調査することとした。

その結果、テクトニック微動の分布と地質構造には良い対応関係が見られ、微動覆瓦スラスト帯で発生し、より海溝に近い前縁スラスト帯ではほとんど発生していないことが明らかとなった。とくに発生域の上端はデコルマ面が高角度に立ち上がる場所と一致するなど、背景のスロースリップの進展が断層面の幾何形状によって妨げられている可能性が示唆された。

## 7.スロー地震と地震発生との関連性

本研究ではテンプレートマッチング手法を連続波形データに適用し、2022年4月2024年8月までの深部低周波地震活動の様子を明らかにした。2024年豊後水道のスラブ内で発生したM6.6の地震の発生直前に着目すると、北東方向へ移動する低周波地震活動の主要なエピソードが起きていたことがわかった。主要なエピソードの移動方向とは逆方向の移動（RTR）がM6.6の震源域を通りこした後に、M6.6の地震が発生した。さらに、M6.6地震後には豊後水道で低周波地震の活動が活発化し、高速移動を示す筋状の活動（Streak）が多数発生した。この結果は、スロー地震とスラブ内地震の間に相互作用が働いていた可能性を示唆する。さらに、2024年日向灘の地震M7.1による深部低周波地震の動的誘発現象が、紀伊半島東部と愛知県で確認され、両者の継続時間に明瞭な差が見られた。誘発前のプレート境界における流体圧や応力蓄積状況の違いを反映している可能性が考えられる。

## 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

断層すべりとマンツルの粘弾性緩和を組み合わせた物理モデルに対して、パラメータとその不確実性の空間変化を測地データから推定する手法の開発を行った。一般に、パラメータの最適値に加えてその不確実性も推定するためには、事後確率分布を推定する必要がある。ここで考えているようなパラメータの空間変化を推定する逆問題では、パラメータ空間は必然的に高次元となる。しかし、高次元の非線形逆問題に対する標準的な事後確率分布推定手法は非常に計算コストが高く、推定が困難な場合も多い。このような問題を現実的な計算コストで解くために、ensemble Kalman filterを反復的に用いて事後確率分布の平均と共分散行列を近似的に推定するアルゴリズムを開発した。この手法の性能を評価するために、モデルを用いて人工的な余効変動の観測データ（GNSS時系列データ）を作成し、このデータから空間変化するモデルパラメータ（断層の摩擦構成則パラメータ、マンツルの粘弾性構成則パラメータ、地震時の応力変化）の事後確率分布の平均と共分散行列を推定した。その結果、地震時の応力変化が大きい場所では事後確率分布の平均は真値を良く再現し、標準偏差（パラメータの不確実性）は事前確率分布の標準偏差より小さくなった。一方、地震時の応力変化が小さい場所では、事後確率分布の平均・標準偏差は事前確率分布の平均・標準偏差とほぼ同じであった。この結果は地震時の応力変化が大きい場所ではパラメータがデータにより拘束され、小さい場所では拘束されないことを示し、合理的な結果であると考えられる。計算コストは標準的な事後確率分布推定手法に比べて大幅に小さくなった。

・「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

本研究課題と関連の深い建議の項目（2(2)ア地震発生の物理モデルに基づく予測と検証）の目的達成に貢献するために、スロー地震をモニタリングし、発生状況の把握を行っている。また、スロー地震の活動様式、スロー地震発生域の構造・流体挙動の把握、スロー地震と地震発生との関係に関する研究や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を確立する研究を進めている。

スロー地震は沈み込み帯の巨大地震域の周囲で発生しており、巨大地震域周囲での応力蓄積解放過程のproxyであると考えられる。そのことから、スロー地震検知能力の向上、継続的なモニタリング、プレート境界の震源物理特性の理解は理学・防災の両面で重要な課題である。今年度はスロー地震の

モニタリング能力の強化、正確な震源物理特性解析のための基盤研究が進んだ。また、巨大地震のプレスリップ規模に制約を与えることは、「地震発生の物理モデルに基づく予測と検証」にある地震発生の物理モデルが説明すべき条件を提供することに貢献している。

流体の存在は地震の起きやすさを変化させるため、地震発生確率の予測や地震発生を支配する場の理解に、流体のふるまいを解明することが不可欠である。野外の実際の環境で流体が時間的に変動することを捉えた例は極めて少ないが、これまでの重力観測から、弾性変形では説明できない重力異常が生じる事例が蓄積され始め、スロースリップや大地震時に生じる重力異常が流体の時間変化で説明できる可能性があることが分かった。今後、流体の時間変化とすべりとの相互作用を解明することで、将来的に地震発生確率の時間予測に観測結果も同化することで予測精度向上を目指す。比抵抗構造研究からは、しばしば、内陸地震発生域の直下ないしは近傍域に流体の存在を示すと考えられる低比抵抗域が認められ、地震発生に流体が関与している可能性が指摘されてきた。しかし、場所や発生日の推定の困難さから、内陸地震発生の前後に、震源域周辺で構造を求めめるための電磁気観測が継続されたことはまれで、流体の移動を示唆する構造変化がとらえられたとの信頼に足る報告は殆どない。そのため、確実に変動が繰り返し起こる長期的スロースリップ発生域周辺での観測を継続している。まずは、発生時に顕著な時間変化現象が捉えられるかどうかの研究の第一歩であり、うまくとらえられることが出来れば、現象発生への流体の関与がより確実な形で明らかになると期待される。

南海トラフのスロー地震発生域における地質構造の特徴から、プレート境界断層の形状が、スロー地震の時空間発展に支配する要因となっている可能性を示唆する結果が得られた。また、スロー地震活動度の異なる地域でのプレート境界断層に沿った間隙水圧比や剪断応力の比較から、プレート境界断層の浅部スロー地震活動を評価する上で、間隙水圧に加え、付加体の層厚も考慮すべき重要な要因であることを示唆する結果が得られた。これらのことは、地震発生の物理モデル構築に貢献する。今後、浅部スロー地震を引き起こすプレート境界断層の物性解析を継続することで、「災害の軽減に貢献する」とともに、巨大地震とスロー地震との関連性を解明する研究への貢献が期待できる。

深部低周波地震は、スロー地震の最小単位と考えることができる。よって、深部低周波地震の長期的な活動様式を把握することは、南海トラフ沈み込み帯の固着域の深部端における詳細な滑り挙動を明らかにするうえで重要である。特に、スロー地震と通常地震活動（プレート境界地震、スラブ内地震、上盤内地震）との相互作用を明らかにすることは、南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会等での基礎的な知見として活用されることが期待される。

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パラメータ・状態変数やそれらの不確実性を推定する手法を確立する必要がある。そのために今年度は、断層すべりとマン托ルの粘弾性緩和を組み合わせた物理モデルに対して、パラメータとその不確実性の空間変化を測地データから推定する手法の開発を行った。

このような研究を継続して実施し、プレート境界すべりの時空間発展のモデリング・予測に関する研究に貢献し続けることで災害の軽減に貢献する。

(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

Akuhara, T., K. Shiraishi, T. Tsuji, Y. Yamashita, H. Sugioka, A. H. Farazi, S. Ohyanagi, Y. Ito, R. Arai, E. Araki, G. Fujie, Y. Nakamura, T. Tonegawa, R. Azuma, R. Hino, K. Mochizuki, S. Takemura, T. Yamada, and M. Shinohara, 2024, Geometrical barrier determines the updip limit of slow earthquake slip, Research Square, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4591362/v1>., 査読無,謝辞無

Hirose H., A. Kato, T. Kimura, 2024, Did Short-Term Preseismic Crustal Deformation Precede the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake? An Examination of Stacked Tilt Records, Geophys. Res. Lett., 51, 12, <https://doi.org/10.1029/2024GL109384> ., 査読有,謝辞有

Nakanishi, R., S. Takemura., 2024, Development of an offshore ground motion prediction equation for peak ground acceleration considering path effects based on S-net data. Earth Planets Space 76, 146, doi:10.1186/s40623-024-02078-5., 査読有,謝辞無

西村卓也, 田部井隆雄, 松島健, 廣瀬仁, 2024, 測地観測に基づく九州の地殻変動分布と活断層との関係,

活断層研究, 60, 39-44.,査読有,謝辞無

Nakanishi, R., S. Takemura., 2024, Development of an offshore ground motion prediction equation for peak ground acceleration considering path effects based on S-net data. *Earth Planets Space* 76, 146, doi:10.1186/s40623-024-02078-5.,査読有,謝辞無

田中愛幸, 2024, 衛星重力観測で捉えられた巨大地震数カ月前の重力変化(解説), *地震ジャーナル*, 77, 69-75,査読無

Tanaka, Y., R. Nishiyama, A.Araya, H. Sakaue, K. Nakakoji, T. Takata, T. Nishimura, Y. Hiramatsu, A. Sawada, 2024, A possibility of fluid migration due to the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake suggested from precise gravity measurement, *Earth Planets and Spece*, accepted., 査読有

・学会・シンポジウム等での発表

Akuhara, T., K. Shiraishi, T. Tsuji, Y. Yamashita, H. Sugioka, A. H. Farazi, S. Ohyanagi, Y. Ito, E. Araki, T. Tonegawa, R. Azuma, R. Hino, K. Mochizuki, S. Takemura, T. Yamada, and M. Shinohara, 2024, Structural controls on the spatial extent of tectonic tremors in Kumano-nada, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG40-09.

Fukuda, J. and S. Barbot, 2024, Ensemble Kalman inversion for stress-driven models of postseismic deformation with spatially varying parameters, 日本地球惑星科学連合2024年大会, S-GD02.

Hirose, H., A. Kato, T. Kimura, 2024, Did Short-Term Preseismic Crustal Deformation Precede the 2011 Great Tohoku-Oki Earthquake?, An Examination of Stacked Tilt Records, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024, P084.

Kato, A. and T. Nishimura, 2024, Foreshock sequence prior to the 2024 M7.6 Noto-Hanto earthquake, Japan, EGU General Assembly 2024, EGU24-22522, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-22522>.

Kato, A., S. Nakagawa, E. Kurashimo, S. Sakai, K. Emoto, S. Matsumoto, 2024, A long-persisting seismic swarm and the subsequent nucleation of the 2024 M7. 6 Noto earthquake, AGU fall meeting, S14C-02.

小松理子, 西村卓也, 松島健, 廣瀬仁, 2024, GNSS データを用いた日向灘におけるプレート間固着状況の推定, 日本測地学会第142回講演会, P26.

汐見勝彦, 武村俊介, 松原誠, 木村武志, 関口渉次, 2024, 三次元地震波速度構造に基づく地震情報の迅速な把握と活用, 日本地震学会2024年度秋季大会, S23P-18.

武村俊介, 濱田洋平, 奥田花也, 岡田悠太郎, 大久保蔵馬, 悪原岳, 野田朱美, 利根川貴志, 2024, Toward a comprehensive understanding of shallow slow earthquakes: a review of key studies along the Nankai Trough and future perspectives, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG40-06 (invited talk).

武村俊介, 矢部優, 溜瀨功史, 2024, Estimations for seismic energy and source duration of shallow tremors along the Nankai Trough incorporating the effects of thick sedimentary layer, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS03-P01.

Tanaka, Y., R. Nishiyama, A. Araya, H. Sakaue, K. Nakakoji, T. Takata, T. Nishimura, Y. Hiramatsu, A. Sawada, 2024, A possibility of fluid migration due to the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake suggested from precise gravity measurement, Workshop on Slow-to-Fast Earthquake, P075.

田中愛幸, 西山竜一, 新谷昌人, 坂上啓, 中小路一真, 高田大成, 西村卓也, 平松良浩, 澤田明宏, 2024,

2023年5月5日のM6.5奥能登地震に伴う重力変化, 日本測地学会第142回講演会, 21.

于凡, ジャマリホンドリエッサン, 朴進午, 2024, Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building and Uncertainty Quantification, 日本地震学会2024年度秋季大会, S21-01.

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

項目: 地震; 地震: 広帯域地震観測

概要: 西南日本に設置した機動的広帯域地震観測点で観測を実施した。

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 愛媛県、高知県

調査・観測期間:

公開状況: 公開留保中(計画終了後5年以内に公開予定) 観測全波形記録については、観測終了2年後(2028年3月)までに東京大学地震研究所のOcean Hemisphere Project Data Management Centerにて公開予定。

項目: 地震: 地殻変動: GNSS観測

概要: 四国、九州の独自GNSS観測点約15点での連続観測を実施した。

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 四国、九州

調査・観測期間: 昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況: 公開留保中(協議のうえ共同研究として提供可)

項目: 地震: 地殻変動: 重力測定

概要: 宮崎、東海、四国西部、八重山で重力測定を実施した。

既存データベースとの関係:

調査・観測地域: 宮崎、東海、四国西部、八重山

調査・観測期間: 昨年度より継続-次年度も継続予定

公開状況: 公開留保中(計画終了後5年以内に公開予定)

(10) 令和7年度実施計画の概要:

**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**

19点での準定常観測を継続し、定常観測点と合わせて利用することで超低周波地震の検出を行う。また、従来手法で検知可能な超低周波地震について、なるべく精緻に震源の運動学的特性(メカニズム解、モーメントレート関数など)を推定し、巨大地震域周囲の震源物理特性に迫る。

**2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング**

独自のGNSS観測点での連続観測を継続し、国土地理院等のデータと合わせることで、豊後水道周辺域での地殻変動を詳細に把握するとともに、既存の長期間の地殻変動データからSSEによる変動を自動的に検出する手法の開発を進める。

**3.重力磁気観測に基づく流体挙動とプレート境界滑り**

南海トラフ、石垣島等における重力データの観測を継続する。なお、令和7年度中に重力計の定期保守が予定されているため、観測の時期や点数は調整する。得られた重力変化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モデル構築を試みる。豊後水道周辺域での電磁気観測を継続し、現象発生時には時間変化の検知に努める。ただ、電話会社の光ファイバ化が急速に進められている現在、いつまで観測を継続できるか不透明である。

**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直上に臨時地震観測点を設置し、稠密自然地震観測を開始する。今年度に引き続き、紀伊半島での補充観測や既存データのコンパイルを継続し、構造決定の精度向上を図る。また、四国中国域で取得され

ていたネットワークMTデータのコンパイルと構造解析を継続し、島弧走行方向への構造変化の検出に努める。

#### 5.プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定

南海トラフの浅部スロー地震活動の活発域にあたる紀伊半島熊野沖と静穏域にあたる四国足摺岬沖のプレート境界断層に沿って間隙水圧を推定し、両者の比較検討を行う。

#### 6.熊野灘における浅部スロー地震発生環境の解明

熊野灘でこれまでに取得されている自然地震波形データに対して、表面波解析、レシーバ関数解析を適用し、スロー地震発生域の3次元S波速度構造を推定する。

#### 7.スロー地震と地震発生との関連性

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atalogを構築する。

#### 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

今年度開発した手法を現実の余効変動の観測データに適用する。

#### (11) 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）

#### (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：

電話：

e-mail：

URL：

#### (13) 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

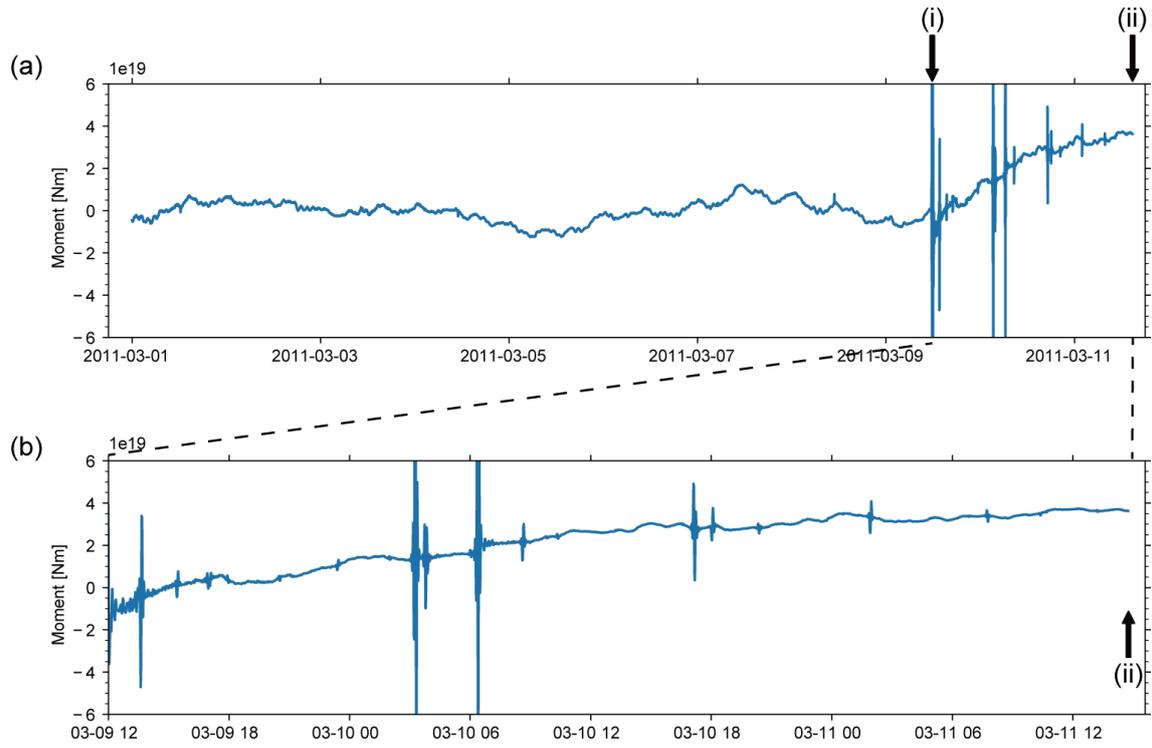


図1：2011年東北地方太平洋沖地震発生直前の傾斜記録に対するスタッキング処理の結果。震源での地震モーメント相当量に換算したもの。

(a) 2011年3月1日から本震発生直前まで; (b) 本震発生前約51時間 (Hirose et al., 2024 を改変)。図中の矢印は(i)3月9日最大前震; (ii)本震発生時; をそれぞれ示す。