

(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7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観測点および昨年度新設した2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。17観測点のうち、当初年限を超えて老朽化が見られる7観測点については年度末までに撤収を行う。超低周波地震検出に用いる周期帯（20-50秒）よりも長周期側（周期25-250秒）でモーメント解放量を推定し、断層サイズを仮定しながら応力降下量や滑り速度を推定し、学会発表を行った（Takeo & Kato, 2025）。より小さな超低周波地震の検知へ向け、機械学習によるノイズ低減処理のためのGreen関数データベースを構築した。

南海トラフ浅部について、DONETにより地震学的スロー地震の特徴を調べた。その結果、沈み込む海山が超低周波地震の震源特性に影響を与えていること（Takemura et al., 2025）、浅部微動のエネルギーレート関数の特徴（Takemura & Yabe, 2025, under review）を明らかにした。また、観測された浅部スロー地震の特徴をまとめ、深部との差異など議論した解説論文を発表した（武村・他, 2025）。

2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング

豊後水道周辺地域におけるスロースリップイベント（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た。

また防災科研Hi-net傾斜記録に基づき、紀伊半島北部にて2021年～2025年に発生した14個の短期的SSEのすべり分布を推定した(図1)。その結果、この地域の短期的SSEのすべり域は、概ね志摩半島付近を境にして、北側と南側の2つのセグメントに分かれて活動していることが分かった

（Hirose et al., 2025）。

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。計画の通り進行中であり、今年度は、四国1点、宮崎1点、奥能登1点での観測を終え、年度末までに東海2点で観測を実施予定である。奥能登での観測の結果、令和6年能登半島地震に伴い、地震前に蓄積していた流体の最大で3割程度が移動した可能性があることを明らかにした(図2)。また、地震直後の2024年1月中旬に観測した結果に、GNSSで計測したその後の地殻上下変動の影響を足し合わせると今回の観測結果と誤差の範囲で一致することから、2024年1月下旬以降は、重力変化として検出できるような流体移動は生じていないことが分かった。石垣島の重力計2台のうち1台が故障したため、現在、修理中であり、残りの1台でスロースリップ中の重力変化データを蓄積した。

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

紀伊半島東部から中央部にかけての地域においてスロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出を目的とした稠密地震観測を実施する為に、既存地殻構造探査で得られた結果や定常的な地震活動度、西南日本の他のスロー地震発生域で取得した稠密地震観測データによる最新の解析結果を参考にしながら観測点配置の検討を行った。検討結果を基に現地踏査を実施して設置場所を決定した。地震観測装置は、三重県松阪市から奈良県下北山村に至る東西測線上(測線長約65km)の63か所に約1~2km間隔で設置する予定である。現在、地震観測装置を設置する為の許認可申請作業を実施している。設置作業は2026年3月中旬を予定し、観測は2026年秋頃までを予定している。また、2021年12月から2023年2月まで、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(図3)。東西方向の稠密地震観測の地震波形からS波スペクトルを求め、それに二重スペクトル比法を適用して、微動活動度が変化する地殻内のQs値を推定した。その結果、微動活動度が高い領域の上の地殻のQs値は微動活動度が低い領域の上の地殻のQs値より低くなる傾向が見られた(図4)。この結果は既存研究で推定された地殻内での減衰の特徴とおおむね整合的だった。

比抵抗構造研究では、まず令和6年度に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。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、紀伊半島における従来データのコンパイルを行うとともに、令和7年度も引き続き紀伊半島全域において広帯域MT法観測を実施した。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法データを解析し、フィリピン海プレートの沈み込みに関連する広域深部構造を推定した。その結果、前弧側の非火山性低周波地震発生域に隣接するように低比抵抗域が分布していた。また、高比抵抗として解像されたフィリピン海プレート直上から、地震活動帯・高温泉の点在・ひずみ集中など活発な地殻活動が集中する背弧側へむけてたのぼるかのような低比抵抗帯が推定された。これらの低比抵抗域は間隙流体の存在を示唆し、前弧、背弧それぞれの地殻活動が、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って地下深部にもたらされる水の上昇に関連して発生していると推測される。

5. プレート境界断層に沿った間隙水圧の推定

今年度は、南海トラフ沈み込み帯において浅部スロー地震活動の静穏域にあたる紀伊半島の潮岬沖と、活動が活発な四国の室戸岬沖(=プレート間固着の弱い領域)を比較することで、浅部スロー地震を規定する要因を探った。海洋研究開発機構が過去に紀伊半島潮岬沖の南海トラフ沈み込み帯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、重合前深度マイグレーション(Pre-stack depth migration: PSDM)処理を実施し、地下地質構造、特にプレート境界断層を高精度にイメージングした。その結果、紀伊半島沖ではタービダイト層がプレート境界断層に沿って沈み込んで

いることが確認された。さらに、PSDMから得られたP波速度を用い、経験式

(Hoffman and Tobin, 2004, Geology) と深海掘削データを組み合わせて、沈み込む堆積物の間隙率を推定し、有効応力や間隙水圧を算出した (Yu et al., 2025, JGR)。また、泥質堆積物のみが沈み込んでいる四国室戸岬沖との比較により、紀伊半島潮岬沖では間隙水圧比の差は小さいものの、付加体層厚が約2倍に達することが判明した (図5a, b)。これにより、プレート境界断層の高い間隙水圧に加え、付加体層厚が有効応力やせん断応力を制約し、断層固着やスロー地震発生に大きく影響することが明らかとなった (図5c, d)。

6. 熊野灘における浅部スロー地震発生環境の解明

昨年度に引き続き、熊野灘で発生したテクトニック微動の震央分布、反射断面図、海底地形データを統合的に解析することで、スロースリップに伴う断層すべりの空間的広がりを規定する地下構造要因について検討した。具体的には、断層すべり域の浅部側の端は断層の幾何形状によって、また深部側の端は上盤の物性によってそれぞれ制約されている可能性を示した。さらに、間隙流体圧や海山の沈み込みが断層すべりに及ぼす影響についても定性的な議論を行った (Akuhara et al., 2026)。

また、これまでに熊野灘で蓄積された地震波形観測データを用いて、レシーバ関数解析および地震波干渉法解析を実施し、三次元S波速度構造の推定に着手した。得られたレシーバ関数からは、デコルマ面直上に位置する厚さ1-2 km程度の低速度層に起因すると考えられるPs変換波を明瞭に確認することができた。

7. スロー地震と地震発生との関連性

今年度は、南海トラフ沿いのスロー地震現象を対象として、地震・測地データを用いた検出・解析を進め、スロー地震の時空間的な活動像の把握と物理的解釈の高度化を図った。まず、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、2024年8月~2025年7月の深部低周波地震活動を解析した。その結果、紀伊半島~東海や伊勢湾周辺で複数の移動エピソードが確認され、移動速度は主に10~20 km/dで従来のスロー地震活動と整合的であった。加えて、日向灘のM7.1 (2024年8月) およびM6.6 (2025年1月) の地震に伴う動的誘発現象が確認された。誘発域が両地震で異なることから、応力が臨界値に近い領域においてのみ誘発活動が生じた可能性が示唆された。また、四国~豊後水道でも移動やギャップ越えを含む連続的な活動が見られ、最大約1か月継続する長期的エピソードの存在が確認された。

さらに、四国西部における短期的スロースリップ (S-SSE) を対象に、連続地震波形とGNSS変位速度を同時に活用する機械学習手法による検出を試みた (Ohtake et al., 2026)。地震波形から抽出した統計特徴量を説明変数、GNSS由来の変位速度を目的変数としてランダムフォレスト回帰モデルを構築し、6年分のGNSS変位速度を予測した。その結果、予測値と観測値は強い相関を示し、既知のS-SSEに加えて5つの新規イベントを検出した。また、各S-SSEについて矩形断層モデルを推定し、カタログに依存せずに地震波形とGNSS変位データを同時に用いることでS-SSEを捉えることに成功した。

南海トラフ沈み込み帯の豊後水道直下で発生する微動波形を用いて、通常地震観測では捉えにくいマントル・ウェッジ (深さ約30-40 km) の地震波異方性を推定した (Ishise and Kato, 2025)。連続波形に基づくS波スプリッティング解析により、遅れ時間は約0.2~0.3秒、速い偏波方向はWNW-ESEが卓越することを示した。地殻浅部の寄与が小さいことから、主要な異方性の起源はマントル・ウェッジにあると結論づけた。さらに、速い偏波方向がフィリピン海プレートの沈み込み方向とほぼ平行であること、推定される異方性強度が大きいことから、スラブ由来流体によるマントル・ウェッジの蛇紋岩化の影響が示唆された。

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

速度状態依存摩擦構成則に基づく余効すべりの物理モデルに対して、モデルのパラメータ (摩擦構成則のパラメータと断層面上における地震時の応力変化) とその不確実性の空間分布を地震時及び地震後の測地データを用いて推定する手法の開発を行った。逆問題をベイズの定理に基づいて定式化し、昨年度までに開発してきたensemble Kalman filterに基づく手法を用いて、これらのモデルパラメータの事後確率分布の平均と共分散行列を近似的に推定した。この問題はパラメータの空間変化を考慮しているため、パラメータ空間が高次元の非線形逆問題となるが、本手法により、事後確率分布の平均と共分散行列を効率的に推定することが可能となった。この手法の性能を調査するために、3次元モデルと人工的な測地観測データを用いたテストを行った。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概ね再現できることが分かった。また、推定されたパラメータから得られる地震時のすべりと余効すべりは、真値を良く再現できることが分かった。

・「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、特に浅部スロー地震と沈み込む海山の関係を明らかにした。さらに、南海トラフ沿いで発生する浅部スロー地震のまとめ（武村・他, 2025）が発表され国内の関連分野の研究の基礎となると考えている。また、SSEの繰り返し発生様式を理解することはプレート境界断層の力学特性を理解することにつながり、建議の「2.(2)ア.地震発生物理モデルに基づく予測と検証」にある地震発生物理モデルを構築する上での基礎的な知見を提供する。

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。今年度の観測により、内陸大地震の場合の地震後の流体のふるまいについて知見が得られたとともに、南海トラフ域において通常の弾性変形では説明できない重力変化が継続している証拠を蓄積した。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。

南海トラフのプレート境界断層に沿った間隙水圧比や剪断応力を比較し、浅部スロー地震発生について考察したことで、「関連の深い建議の項目」の目的達成に貢献している。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。また、スロー地震発生領域における構造の特徴と様々な時定数を有するプレート境界すべり現象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。加えて、島弧の走行方向の構造の変化にも着目し、地学的・地球物理学的な様々な活動・現象の発現メカニズムの解明を図る。

高精度に決定された微動の震央分布を活用することで、断層面の幾何形状、上盤の物性、間隙流体圧分布、ならびに海山の沈み込みといった複数の要因が、断層すべりの進展に及ぼす複合的な影響を詳細に明らかにすることができた。本研究では主としてスロー地震に伴う断層すべりを対象としたが、ここで得られた知見を巨大地震の断層すべり過程へ応用することにより、津波被害予測の高度化など、防災・減災への貢献が期待される。

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、スロー地震と通常の地震活動（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。上述の成果はそのためのステップの一つと位置付けられる。

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7年度の成果に関連の深いもので、令和7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, 2026, Structural barriers control the spatial extent of slow earthquake slip. *Nature Communications*, <https://doi.org/10.1038/s41467-025-68179-1>, 査読有, 謝辞有

Fukuda, J. and S. Barbot, 2025, Ensemble Kalman inversion for spatially varying rheological parameters in a stress-driven model of post-seismic deformation, *Geophysical Journal International*, 242(2), ggaf208, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf208>, 査読有, 謝辞有

廣瀬仁, スロースリップイベント (6.3.2節), 2025, 平田直・森田裕一・岩崎貴哉・古村孝志・石山達也・佐藤比呂志・小原一成・西山昭仁・佐竹健治 (編), 地震の大事典, 朝倉書店, 査読無, 謝辞無

Ishise, M., & Kato, A. ,2025, Seismic anisotropy in the mantle wedge revealed by tectonic tremors beneath Bungo Channel, southwest Japan. *Geophysical Research Letters*, 52, e2025GL116762.<https://doi.org/10.1029/2025GL116762>, 査読有, 謝辞有

Ohtake, K., Kato, A., Okada, Y. et al. , 2026, Machine-learning detection of slow slip events in western Shikoku, Japan, through joint analysis of seismic and geodetic data. *Earth Planets Space* 78, 5. <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02331-5>, 査読有, 謝辞有

Takemura, S., Yabe, S., Emoto, K., & Baba, S. ,2025, Along-dip variations in source characteristics of shallow slow earthquakes controlled by topography of subducted oceanic plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2024JB030751. <https://doi.org/10.1029/2024JB030751>, 査読有, 謝辞無

武村俊介, 岡田悠太郎, 野田朱美, 馬場慧,2025,南海トラフ沿いで発生する浅部スロー地震の特徴, 地震 第2輯, 78, 167-186, <https://doi.org/10.4294/zisin.2024-20>, 査読有, 謝辞無

Usui, Y. and Uyeshima, M., 2025, Three-dimensional combined inversion method of the MT and Network-MT response functions. *Earth Planets Space*, 77, Article Number: 135, <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02266-x>, 査読有, 謝辞有

Yu, F., Ehsan Jamali Hondori, and Jin-Oh Park, 2025, Pre-stack depth imaging and pore-fluid pressure estimation along the Nankai Trough subduction zone off the Kii Peninsula, SW Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, e2024JB029780, <https://doi.org/10.1029/2024JB029780>, 査読有, 謝辞無

・学会・シンポジウム等での発表

Farge, G., E Brodsky, A Kato, 2025, Probing the organization of stress in the slow-slipping megathrust, *American Geophysical Union Fall Meeting 2025*, S43D-0297.

廣瀬仁, 高感度地震観測網による地殻変動・スロー地震, 2025, 研究集会「日本列島を覆う地震観測網とそれらが捉えた諸現象」

Hirose H., Chujo N., Kimura T., 2025, Activity and slip distributions of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula, central Japan, *International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025*, P2-25.

小松理子, 西村卓也, 松島健, 廣瀬仁, 2025, 陸上GNSSデータと海域GNSS-Aデータを用いた日向灘におけるプレート間固着の推定, *JpGU Meeting 2025*, SGD03-04.

小松理子, 西村卓也, 松島健, 廣瀬仁, 2025, L1 トレンド・フィルタを用いて期間分けした日向灘におけるプレート間固着分布の時間変化, *日本測地学会第144回講演会*, 20.

- Shi, Y., Uyeshima, M., Murakami, H., Shiozaki, I., Yamaguchi, S., Usui, Y., 2025, Three-dimensional resistivity structure beneath the Chugoku and Shikoku districts in Southwestern Japan using Network-Magnetotelluric method. AOGS.
- Siez, A., A Kato, D Garagash, 2025, Episodic hydraulic fracturing from slab dehydration as a driver of slow slip and tremors, American Geophysical Union Fall Meeting 2025, S11C-0177.
- 武村俊介, 矢部優, 江本賢太郎, 馬場慧, 2025, Influence of the subducted Paleo-Zenisu ridge on source characteristics of shallow slow earthquakes, 日本地球惑星連合大会, SCG45-44.
- 竹尾明子, 加藤愛太郎, 2025, Very low-frequency earthquakes in the eastern Shikoku observed by campaign deployment of broadband seismometers, 日本地球惑星連合大会, SCG45-46.
- 田中愛幸, 西山竜一, 新谷昌人, 堀田耕平, 坂上啓, 中小路一真, 高田大成, 西村卓也, 平松良浩, 澤田明宏, 2025, 2024年能登半島地震による重力変化とその解釈, 日本測地学会第144回講演会.
- Tanaka Y., R. Nishiyama, A. Araya, K. Hotta, H. Sakaue, T. Takata, K. Nakakoji, T. Nishimura, Y. Hiramatsu, A. Sawada, 2025, An interpretation of the temporal gravity change caused by the 2024 M7.6 earthquake in the Noto Peninsula, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025.
- Tanaka Y., R. Nishiyama, A. Araya, K. Hotta, H. Sakaue, T. Takata, K. Nakakoji, T. Nishimura, Y. Hiramatsu, A. Sawada, 2025, Gravity changes due to the 2023 M6.5 and 2024 M7.6 earthquakes in the Noto Peninsula, Japan Geoscience Union Meeting 2025.
- Tanaka, Y., Y. Tamura, T. Jike, N. Kikuchi, 2025, Report on the continuous observation by the superconducting gravimeter at Mizusawa, 2025 ENIGMA Collaboration Workshop on Astrophysics and Geophysics, 2025/11/11, Jeongsun, South Korea, (Invited).
- Watanabe, A., Uyeshima, M., Yamaguchi, S., Usui, Y., Murakami, H., Ogawa, T., Oshiman, N., Yoshimura, R., Aizawa, K., Shiozaki, I., Kasaya, T., 2025, Combined analysis of the Network-MT data and conventional long-period and wide-band MT data obtained around the source area of Deep Low-Frequency Earthquakes in the Kii Peninsula, Southwestern Japan. AOGS.
- Yu, F., Ehsan Jamali Hondori, and Jin-Oh Park, 2025, Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building and Uncertainty Quantification, 日本地球惑星科学連合2025年大会, SIT19-P02.

(9) 令和7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、大分県、愛知県、三重県 33.7691 133.653

調査・観測期間：-2027/3/

公開状況：公開中（データベース・データリポジトリ・Web） Takemura, S. (2025). Catalog and moment rate function dataset of shallow VLFSE southeast off the Kii Peninsula, in the Nankai subduction zone [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14859667>

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：四国・宮崎・奥能登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：石川県珠洲市奥能登 37.52590 137.28390

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）

項目：地震：MT・AMT観測

概要：長基線地電位差測定 3成分磁場測定。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：四国西部ならびに九州東部

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8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

12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。より包括的なスロー地震震源像解明へ向け、超低周波地震の震源過程（メカニズム解、非ダブルカップル成分、モーメントレート関数、断層面積…）の詳細解析へ加え、微動やスロースリップといった他帯域のスロー地震現象との関連を明らかにする。

2.GNSS観測による豊後水道周辺域でのモニタリング

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継続的に把握していく。また傾斜データに基づく短期的SSEの解析も実施し、すべり挙動の経年的な変化について調査する。さらにこれらの観測データからSSEによる変動を客観的に検出する手法の開発も継続して取り組む。

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。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

2026年3月に設置した臨時地震観測点を撤収し、取得した稠密自然地震観測データの解析を開始する。また、四国東部の南北群列地震観測点のデータに二重スペクトル比法を適用し、プレート沈み込み方向での地殻内の地震波減衰構造に空間的变化がみられるか、また、それを東西測線の結果と比較し、微動の発生場所とその上の地殻構造にどのような対応関係があるかを明らかにする。比抵抗構造研究では、紀伊半島でのコンパイルした既存データや新規に取得した広帯域MT観測データを解析し、周波数領域での電場磁場比であるインピーダンスを推定する。そうして得られた広帯域MTインピーダンスとネットワークMT応答関数をあわせて3次元インバージョン解析を行い、浅部から深部に至る精度の高い広域深部構造を推定する。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静穏域にあたる四国の足摺岬沖と活発域にあたる紀伊半島の熊野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

レシーバ関数解析および地震波干渉法によって得られる表面波の位相速度分散曲線を用いたジョイントインバージョンを実施し、S波速度の三次元構造を推定する。さらに、得られたS波速度構造に基づき、間隙流体圧分布を定量的に評価する。

7.スロー地震と地震発生との関連性

南海トラフ沿いにおける深部低周波地震を対象として、連続波形データにテンプレートマッチング手法を適用し、深部低周波地震カタログの構築を行う。さらに、四国西部で開発した地震・測地データを同時に活用する機械学習手法を、南海トラフ沿いの他地域へ拡張し、スロー地震現象の検出・解析の高度化を図る。

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

R7年度に開発を行った手法のテストを継続し、手法の改良を行う。また、現実のデータへの適用を行う。

(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

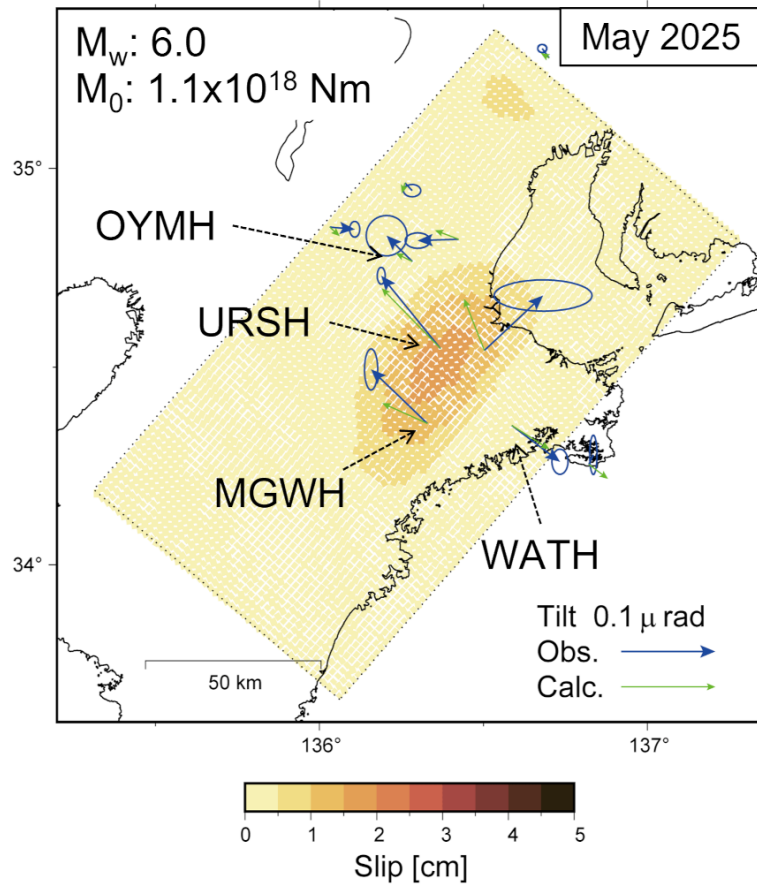


図1:紀伊半島北部で2025年5月に発生した短期的SSEのすべり分布。青の矢印が観測された傾斜変化ベクトル、そのデータから推定されたすべり分布をカラースケールで、緑の矢印がそのすべり分布から計算された傾斜変化ベクトル。

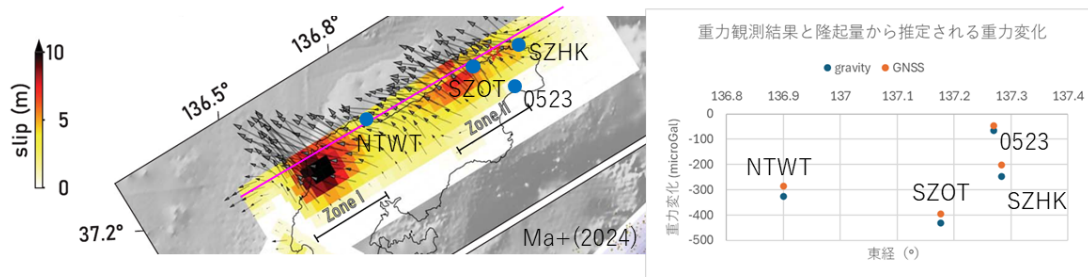


図2:能登半島地震に伴う重力変化。青は観測結果、橙はGNSS上下変位から推定される重力変化。海岸に沿う3点で、有意な負の重力異常が検出された。この異常は通常の弾性変形理論では高々半分までしか説明できず、地下で質量移動が起きたことを示唆する。

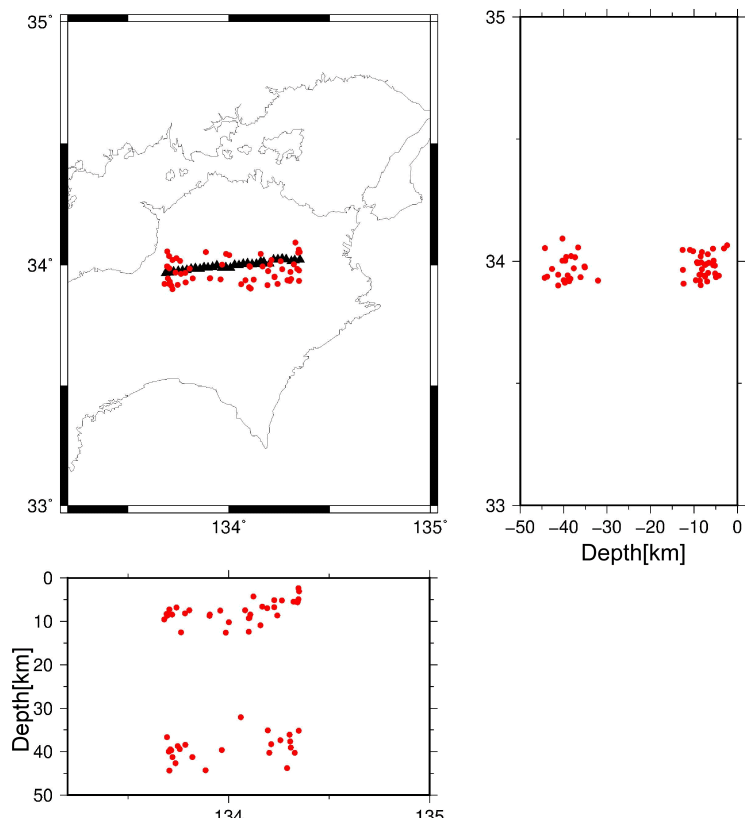


図3:解析に用いた稠密観測点(黒三角)および地震(赤丸)の分布図。

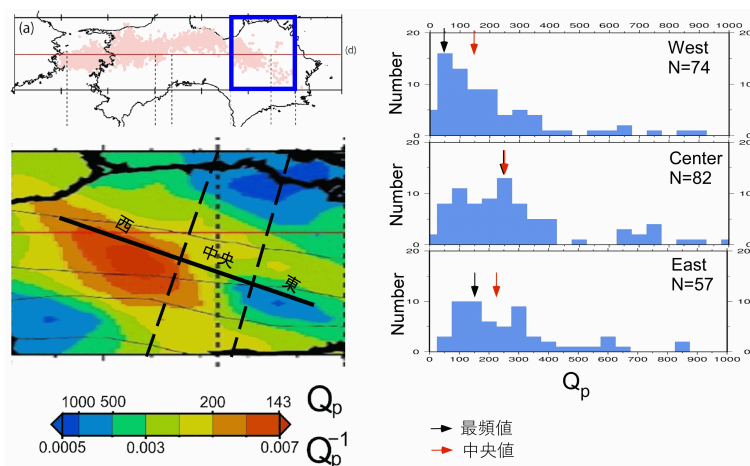


図4: (左) Kita et al. (2016) が推定した四国東部のQ構造と群列地震観測点の位置関係。(右) 左図の西, 中央, 東の領域で発生した地震の組み合わせに対して得られた Q_p の頻度分布。

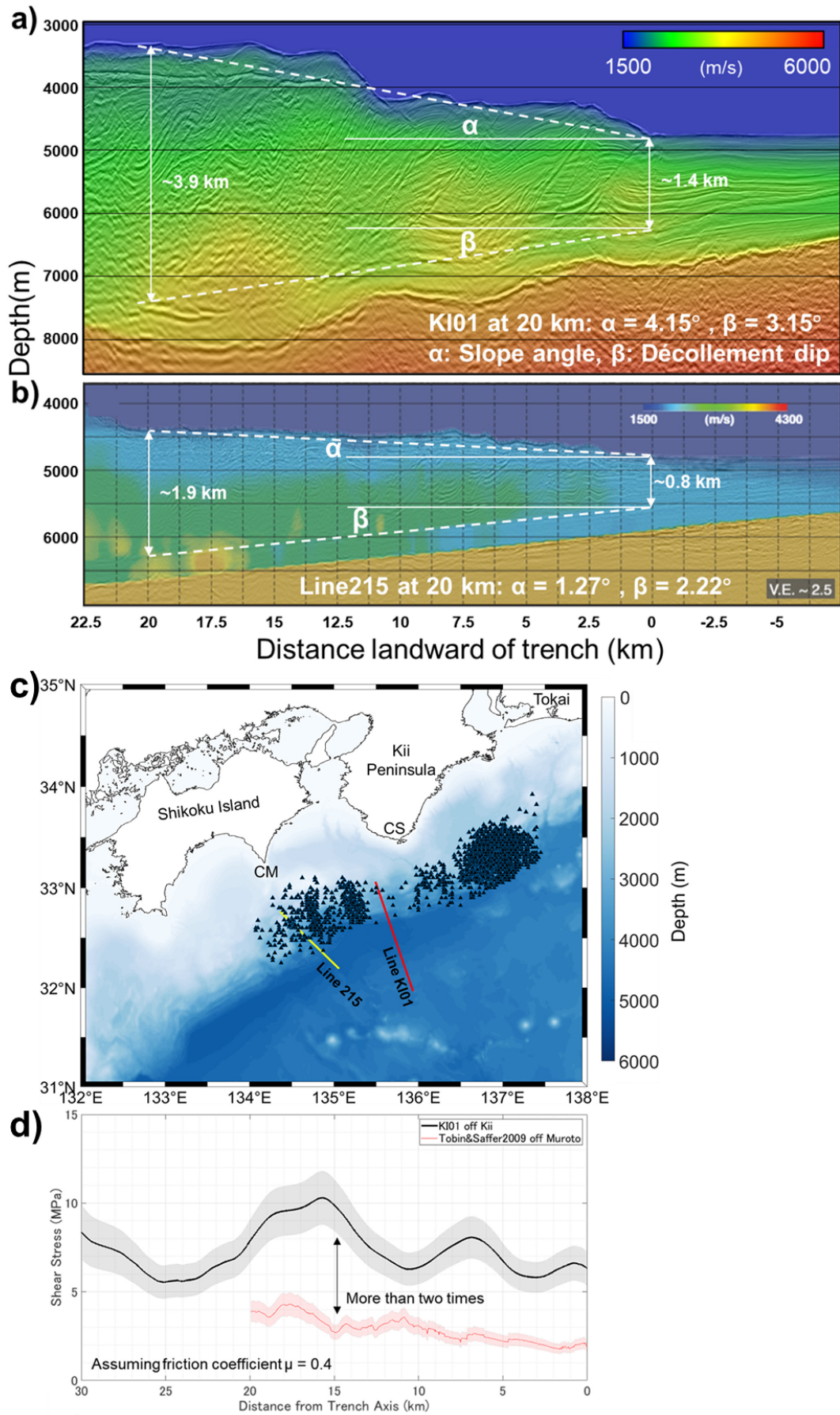


図5: (a)本研究で処理した紀伊半島の潮岬沖測線KI01のP波速度モデルとPSDM断面図。(b)四国の室戸岬沖測線215におけるP波速度モデルとPSDM断面図 (Tobin and Saffer, 2009を改変)。紀伊半島潮岬沖の付加体の層厚は、20 km地点において四国室戸岬沖の約2倍以上である。(c)スロー地震の

震央位置の空間分布。三角印は推定されたスロー地震の震央を示す（Nakano et al., 2018; Takemura, Baba, et al., 2022; Takemura, Matsuzawa, et al., 2019; Takemura, Noda, et al., 2019; Takemura, Obara, et al., 2022）。(d)測線KI01および測線215において計算されたせん断応力。