

(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：

スロー地震モニタリングに基づく南海トラフ域の地震発生可能性評価手法に関する研究

(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) 地殻活動モニタリングに基づく地震発生予測

ア. プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測

(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

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

ア. 地震発生機構の解明

(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

オ. 構造共通モデルの構築

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測

ア. 海溝型巨大地震の長期予測

3 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 強震動の事前評価手法

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

ア. 南海トラフ沿いの巨大地震

(3) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

エ. 地震・火山現象のデータベースの構築と利活用・公開

(4) 関連研究分野との連携強化

(5) 国際共同研究・国際協力

(5) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

(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多様な滑り現象をモニタリングすることで、それらの時空間変化を高精度に把握し、スロー地震間の相互作用、スロー地震と地震発生との関係、これらの現象の発生環境としての地下構造異常・流体挙動との関係の解明を通じて、プレート境界すべり特性やプレート境界現象間の相互作用の理解を深める。これら新たに得られる知見に基づき、スロー地震が隣接する巨大地震領域に与える影響、すなわち、スロー地震と同じプレート境界で発生する大地震発生可能性の相対的な変化を評価する手法の開発に貢献する。

サブテーマ毎の到達目標を以下に記す。

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

科研費から引き継いでスロー地震データベースを更に拡充し、本地震火山観測研究計画内での利用に留まらず、国内外のスロー地震研究基盤としてその存在価値を高め、地震研究分野におけるわが国の国際的リーダーシップの強化に貢献する。また、これらのカタログを活用しスロー地震の活動特性を正確に把握することで、シミュレーションによる現象再現性の精度向上を通じ、長期的及び中短期的な大地震発生可能性の評価に貢献する。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

これまでの本地震火山観測研究計画や科研費等で展開した四国西部・九州東部の広帯域地震観測データ等を用いて、南海トラフ域に発生する超低周波地震のモニタリングを行ない、その活動様式を解明すると共に、他のスロー地震との相互作用などを明らかにする。得られた超低周波地震カタログはスロー地震データベースに登録し、国際的スロー地震研究の推進に貢献する。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

スロー地震は、短い長さスケールほど滑りの継続時間が短くなる拡散現象としての性質を有しており、既知のものより高速且つ短い伝播距離で特徴づけられる新たな高速移動現象が存在することが予想される。この新たなモードは、ゆっくり滑りから通常の地震による速い滑りへの遷移的な挙動を知る上で重要である。特に、中短期的な時間スケールにおいて、ゆっくり滑りと地震発生との関連性を考える上で根本的な理解の促進に貢献すると期待される。これまでの機動観測によって取得された地震波形データを用いて、深部低周波地震の高速移動現象の新たなモード検出を目指し、既存の活動様式との比較検討を行う。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSEのモニタリング

豊後水道周辺地域において、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、国土地理院等の他機関の観測データもあわせて解析することで、長期的SSEをはじめとする、より長期的なプレート間すべりの動態を把握しスロー地震間の相互作用について理解を深める。同時に、この領域でのすべり特性・プレート間相対運動による歪蓄積と解放の収支を推定し、その発生様式の理解を通じて巨大地震発生様式の解明を目指すことで、地震の長期的予測の高度化に資することを目的とする。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

準リアルタイム解析による長期的SSEモニタリング手法の開発をするとともに、フィリピン海プレート上面における長期的SSE活動様式の全容を解明する。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

プレート境界面上の巨大地震震源域周辺に分布するスロー地震域におけるすべり特性の理解をすすめる。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

南海トラフ等のスロースリップ域において重力・地磁気観測を実施し、間隙流体の時間変動を捉えることを目指す。プレート境界の応力状態を変化させる間隙流体の移動を明らかにすることは、他のスロー地震及び巨大地震発生域とスロースリップ発生域とがどのように相互作用しているのか解明することに貢献し、中短期予測につながる。

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

スロー地震の活動様式に違いがある四国中部から東部にかけての地域で稠密地震観測を実施し、既存稠密地震観測データの再解析結果と合わせて、スロー地震発生域における構造を明らかにする。豊後水道のほぼ中央に位置する水ノ子島に構築した観測点を維持し、取得データの解析から、豊後水道下のプレート形状を明らかにする。これら、明らかになっ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、滑り特性を規定する地下構造異常の特徴を把握する。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動を解明する。特に、浅部スロー地震の地域性（発生域 vs. 非発生域）を規定する要因を明らかにするとともに、デコルマやOut-of-sequence-thrust(OOST)断層の構造と流体が浅部スロー地震にどのように影響するかを解明する。また、デコルマやOOST断層の固着（強・弱）と挙動における沈み込む四国海盆堆積物の岩相層序と流体の役割を明らかにする。

10. スロー地震と地震発生との関連性

スロー地震の時空間発展を詳細に調べることで、その周辺域への応力载荷の状況を把握し、地震の発生可能性の相対的变化を推定することを試みる。例えば、房総沖のスロースリップに伴う有感群発地震に関して、地震活動の詳細な時空間発展を把握し、滑りが引き起こす応力変化と比較することで、地震発生を引き起こす条件を探索する。また、大地震の発生に先行する前震活動の解析を行い、スロースリップとの関連性について検討する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

2019年度は、2021年度に科研費から本計画にデータベースを移行するための準備を進め、2020年度は移行作業を実施する。2021から2023年度は、データベースの維持・拡充を継続するとともに、多様なスロー地震カタログを活用してそれぞれの時空間変化や相互作用などを明らかにする。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

2019から2020年度は、科研費で実施するため、本計画での経費は必要としない。2021から2023年度は、科研費で展開された広帯域地震観測点の維持、データ収集、解析を行ない、既存の広帯域地震観測網のデータも活用して、超低周波地震の活動特性や他のスロー地震との相互作用を明らかにする。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

2019から2020年度は、科研費で実施するため、本計画での経費は必要としない。2021年度は、高密度な機動観測によって取得された地震波形記録に対して、アレイ解析手法等を適用することで、深部低周波地震の詳細な時空間発展を明らかにする。2022から2023年度は、深部低周波地震の高速移動現象を抽出するとともに、既存の活動様式との比較検討を行う。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSEのモニタリング

2019年度においては、前計画・科研費等で構築してきた機動的GNSS連続観測点における地殻変動観測を継続して実施し、国土地理院等の他機関の観測データもあわせてモニタリングを行う。このためのGNSS基線解析環境を構築するとともに、過去の長期間のデータも活用しSSEの把握を進める。2020年度においては、前年度の研究を継続する。2021年度においては、前年度までの研究を継続すると共に、プレート境界面付近における歪収支について検討を進める。2022年度においては、前年度までの研究を継続すると共に、SSE同士の相互作用について検討を進める。2023年度においては、前年度までの研究を継続すると共に、成果の取りまとめをおこなう。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

2019年度においては、これまで開発した手法を準リアルタイム解析へ拡張することを検討する。また、関東地方などを中心にSSEの系統的検出を行う。2020年度は、引き続き手法の拡張とSSEの系統的検出を行う。2021年度は、開発した手法に基づく準リアルタイムモニタリングの実施を目指す。2022年度は、モニタリングを継続するとともに、相模トラフから琉球海溝までの領域における長期的SSEのセグメント化や移動などの活動様式を明らかにする。2023年度は、SSE活動様式をさらに検討し、地震活動および微動活動との時空間的な関係性を検討する。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

西南日本および南西諸島における繰り返し地震活動をモニタリングし、SSEや比較的大きな地震の活動状況との関係を調べる。またスロースリップの周期性に関する研究も行う。これらによりプレート境界での地震とスロースリップの関わりの方が明らかになれば、中短期予測の精度向上に寄与できる可能性がある。

2019年度は、これまでに得た繰り返し地震のデータにより、西南日本でのスロー地震と中・大規模地震の関係について調べる。2020年度は、これまでに得た繰り返し地震のデータにより、西南日本での周期的なスロースリップについて解析を行う。2021年度は、南西諸島における繰り返し地震を抽出および東北日本との比較を行う。2022年度は、南西諸島におけるスロー地震と中・大規模地震の関係について調べる。2023年度は、スロー地震と中・大規模地震の関係についてモデル化を行う。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

重力観測は西南日本のスロースリップ域で2-3年間に1回を行うことを標準とするが、スロースリップの発生に応じて観測頻度を地域間で調整する。

(2019～2022年度)絶対・相対重力観測(東海、四国、宮崎、八重山)、地磁気観測(八重山)、ネットワー

クMT観測（四国）、データ解析、ノイズ補正手法及び既存モデルの改良を行う。（2023年度）同上、成果とりまとめ

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

2019から2023年度において、水ノ子島観測点の保守・データ回収作業を実施し、水ノ子島観測点と周辺観測点のデータを用いた解析を実施することで、豊後水道下のプレート構造を把握する。紀伊半島等で取得されている稠密地震観測データの再解析を実施し、スロー地震発生域やその近傍における構造を明らかにする。2021年度は、2022年度から四国で実施する地震観測の現地踏査を実施する。2022から2023年度にかけて、稠密地震観測を実施する。取得した稠密地震観測データの解析を実施し、既存稠密地震観測データの再解析結果と合わせて、スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常を抽出する。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

2019年度と2021年度においては、既存・新規のマルチチャンネル反射法地震探査（Multi-channel Seismic：MCS）データと深海掘削（ODP/IODP）データを統合し、デコルマ・Out-of-sequence-thrust（OOST）断層や沈み込む四国海盆堆積物の構造的特徴、流体分布、摩擦係数を推定すると共に、海底地殻変動観測（Yokota et al., 2016）から求めたデコルマの固着分布（強・弱）と比較する。2020年度と2022年度においては、既存MCSデータが十分でない浅部スロー地震の発生域と非発生域でTime-lapse MCS調査を行い、デコルマやOOST断層の反射係数を比較することで、間隙水圧の時間変化を推定すると共に、その間の浅部スロー地震発生と比較する。2023年度は、デコルマやOOST断層の構造的特徴と間隙水圧の時間変動に着目し、浅部スロー地震の活動様式との関連性を求め、浅部スロー地震発生に対する断層の地殻構造と流体挙動の影響を解明する。

10. スロー地震と地震発生との関連性

2019から2021年度は、房総沖スロースリップに伴う群発地震活動の震源再決定、Matched filter法による地震活動の再検出を行う。また、小繰り返し地震のモニタリングに関する課題とも連携し、非地震性滑りの時間発展について調べる。2022から2023年度は、房総沖スロースリップと群発地震発生との関連性をスロースリップが引き起こす応力変化に注目して検討する。5か年の実施期間中に大地震が発生した場合は、先行した前震活動や地殻変動に関する解析を実施し、大地震発生に至る直前過程に関する知見を蓄積する。

(8) 令和5年度及び計画期間中（令和元年度～5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、スロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データ解析手法の開発を進め、既存観測データを用いた繰り返し地震や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連性に関する研究を進めた。

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築したスロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データベースへのカタログ登録を継続的に呼びかけ、現在では約120のカタログが登録されている。

拡充されたスロー地震データベースを活用し、南海トラフ沿いで発生する浅部スロー地震の特徴をまとめた。地震学および測地学的な浅部スロー地震の分布を明らかにするとともに、浅部プレート境界へのインプット、室内実験、プレート境界のすべり欠損や地下構造との対比を実施し、浅部スロー地震の分野間共通理解を目指した（図1）。それらの成果は、Earth, Planets and SpaceへReview paperとして投稿し、受理掲載された（Takemura et al., 2023a）。

海域の定常観測の発展に伴い、DONETやS-netによる浅部微動や浅部超低周波地震の解析が進んでいる。そこで、浅部微動の高精度解析へ向け、海底地震計での高周波地震動の特性を明らかにした（Takemura et al., 2023b）。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

機動的広帯域地震観測点11点（四国西部3点、紀伊半島4点、東海4点）と準定常観測点6点（四国西部5点、九州1点）について、継続して現地作業や遠隔作業を含む保守作業を行なった（竹尾・

他, 2023)。また、得られたデータを整理し、公開に向けた作業を行なった。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

南海トラフ沈み込み帯の深部低周波地震（LFE）の長期的な挙動に関する理解を深めるために、先行研究（Kato and Nakagawa 2020）によって構築された低周波地震カタログのアップデートを行った。2015年9月から2020年12月までの連続波形記録にテンプレートマッチング法を適用することで約23万個のLFEを検出した。その結果、長期的SSEの規模が大きいほどLFEの活動度も高くなる傾向が見い出された。また、2011年東北地方太平洋沖地震以降、走行方向に四国全体を横断する主要なLFE活動が継続して発生しており、プレート境界の状態が変化した可能性が示唆される。

紀伊半島で発生しているLFEとスラブ内地震の波形を比較分析することで、低周波に卓越するLFEの波形の特徴がプレート境界周辺域の特殊な減衰構造等に寄与するのではなく、スローな震源過程を反映していることを実証した（Wang et al., 2023）。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSE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た。それらの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つのスロースリップイベント（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（図2）（Hirose et al., 2023）。

GNSSデータのスタッキング解析により2011年東北地方太平洋沖地震の本震発生約2時間前から始まる加速的な先駆すべりの存在を示唆する結果が得られたという報告の検証のため、GNSSとは独立な防災科研Hi-net高感度加速度計（傾斜計）記録を同様な手法で解析した。その結果、ノイズレベルを超えるような数時間の加速的な変動は見られないことが分かった。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

今年度までに開発してきた常時微動表面波トモグラフィー手法をS-net及び過去に実施された稠密海底地震観測網のデータに適用し、日本海溝沈み込み帯におけるS波速度構造を推定した（図3）（高木・他, 2023）。その結果、空間的に相補的に分布する微動発生域と大地震すべり域に対応したS波速度構造の空間変化を明らかにした。また、異方性構造の推定へ向けた検証を行い、常時微動源の非等方性の影響をモデリングできた（高木・西田, 2023）。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

巨大地震震源域周辺に分布するスロー地震域におけるすべり特性の理解のため、東北沖での震源決定を進めた。また、世界の地震波形のデータを用い、繰り返し地震を抽出するプログラムの開発を進めた。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

昨年度に引き続き、東海、四国南西部、宮崎で絶対・相対重力観測を実施し、重力異常のデータを蓄積した。東海では、この数年のデータ蓄積により、重力異常がプレート境界の浅部に位置する観測点から深部に位置する観測点へ伝播するように見えることが分かった。能登半島の群発地震域で4度、重力観測を実施し、令和5年5月、6年1月に発生した大地震に伴う重力変化を検出した。これらの重力変化は弾性ディスクーション理論では説明できない負の質量変化を含んでおり、現在、この地域に大量に含まれる地殻流体の変動により説明できるか検討している。石垣島のスロースリップ発生域において、時間分解能を大幅に改善した連続観測可能な重力計による観測を継続中である（Tanaka, 2023; Tanaka et al., 2023）。

昨年度に引き続き、四国西部域においてNetwork-MT観測を継続し、そのデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて構造変化検知可能性の検討を行った。さらにスロースリップ域の空間的特性を明らかにするため、四国地方や紀伊半島域での従来のNetwork-MT法観測データをコンパイルし、紀伊半島についてはそのデータに基づいた3次元比抵抗構造推定を行った（Shi・他, 2023; Watanabe et al., 2023）。

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

令和3年12月から令和5年3月まで、スロー地震活動様式に違いがある四国東部地域において実施した稠密地震観測で取得したデータを用いた地震波モグラフィ解析を実施し、スロー地震の滑り特性を規定する地下構造の特徴把握を行った(蔵下・他, 2023)。解析に使用した観測点の配置図を図4、得られた南北測線下の地震波速度構造を図5に、東西測線下の地震波速度構造を図6に示す。南北測線下のVp/Vs構造より、深さ15km以深でVp/Vs値の大きな領域が北傾斜で確認できる。既存の四国東部地域における制御震源探査データの解析結果(蔵下・他, 2007)と比較すると、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻がVp/Vs値の大きな領域に対応している。南北測線下の深さ20km以深で確認できる北傾斜の震源分布は、フィリピン海プレートの沈み込む方向とほぼ平行に確認でき、地震は沈み込む海洋性地殻下の上部マントル内で多く発生している。既存の反射法断面図(蔵下・他, 2007)と比較すると、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で、Vp/Vs値が特に大きくなる特徴を示し、流体の存在が示唆される。南北測線下での考察を踏まえると、得られた東西測線下のVp/Vs構造より、深さ30-40kmのVp/Vs値が周囲より大きな領域は、沈み込むフィリピン海プレートの海洋性地殻に対応すると解釈できる。Vp/Vs値は東西方向に変化が確認できる。深部低周波微動活動が活発な領域は、低調な領域に比べてVp/Vs値が高くなる特徴が見られ、深部低周波微動活動度と沈み込むフィリピン海プレート内の構造不均質との関連が示唆される。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

JAMSTECが過去に南海トラフで取得した反射法探査データを深海掘削データと組み合わせ、海溝で沈み込む深海堆積物を分析した。その結果、中新世に堆積した3つのタービダイトがプレート境界に沿って深部へ沈み込んでいることを発見した(図7)。砂層に富むタービダイトが、スロー地震活動の静穏域(プレート間固着の強い領域とほぼ一致する)に集中して分布している。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、断層面の剪断強度が大きくなることで、スロー地震活動が静穏化した可能性が考えられる(Park and Jamali Hondori, Scientific Reports, 2023)。今後、南海トラフ沿いのプレート境界断層の間隙水圧を高精度・広域的に調査することで、巨大地震に影響するスロー地震に関する理解が進展し、巨大地震発生予測モデルの高度化への貢献が期待される。なお、令和5年度の成果は本課題の5か年計画と概ね一致する。

10. スロー地震と地震発生との関連性

2020年3月末から半年以上にわたって、岐阜・長野県境付近において群発地震活動が発生した。機械学習モデルによる地震波の読み取りや震源再決定、テンプレートマッチング法を適用することで、約20万個のイベントから成る包括的な地震カタログを構築した。群発地震は主に東西走向もしくは北西-南東走向の高角傾斜の多数の断層面に分布し、活動域は南側から北側へと徐々に拡大した。また、活動域の拡大フロントの移動速度は約10~150 km/日であり、沈み込み帯で見られるスロー地震の移動速度と類似する。流体に駆動されたスロースリップが群発地震の発生に関与している可能性が考えられる(Kato et al., 2023)。

2024年1月1日能登半島地震M7.6の発生前の約1時間前から見られた前震活動について連続波形記録を用いた解析を行った。その結果、M3未満の前震がM7.6の震央近傍約1km以内の狭い範囲に集中して発生していたことが明らかになった。

2018年6月に発生した房総沖スロースリップに伴う群発地震活動に対してMatched filter法を適用することで地震活動の再検出を行った。その結果、過去のスロースリップ発生時と同様に、群発地震活動は沖合の東北東から陸域の西南西に向けて移動を示した。移動速度は2007年と2014年のスロースリップ発生時とほぼ同じ約3km/日であった。また、スロースリップの滑り速度が大きくなる後半に地震活動が活発化を示した。

・計画期間中(令和元年度~5年度)の成果の概要

1. スロー地震データベースの拡充とスロー地震活動特性の解明

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築したスロー地震データベースを安定的に維持・管理するとともに、データベースへのカタログ登録を継続的に呼びかけ、この5年間での登録数は70以上も増加し、全世界におけるスロー地震研究者が活用する研究基盤としての位置づけをさらに強化した。また、スロー地震の活動特性の解明としては、内陸の火山等直下に発生する深部低周波地震の網羅的検出に基づいた活動様式の多様性(Kurihara et al., 2019)、プレート境界に発生するスロー地震活動

の多様性と系統性の観点に基づく活動様式の整理 (Obara, 2020)、統計モデルに基づく深部低周波微動活動特性の評価手法 (Buckby et al., 2020) や、低周波地震の破壊伝播速度 (Supino et al., 2020)、深部低周波微動のクラスタリング解析に基づいた中間帯域におけるスロー地震のスケーリング特性 (Aiken and Obara, 2021)、四国におけるBackTrackBB法による深部低周波微動の新たなカタログ構築 (Pojata et al., 2021)、コスタリカにおける浅部超低周波地震の検出 (Baba et al., 2021)、紀伊半島南東沖における浅部超低周波地震の発生様式や震源パラメータスケーリング則 (Takemura et al., 2022a; 2022b) などの研究成果を得た。

また、特にこの10年で拡充された浅部スロー地震カタログと地下構造、地質、室内実験研究を統合することで、南海トラフ沿いの浅部スロー地震に関する多面的レビュー論文 (Takemura et al., 2023a) が出版された。

2. 陸域広帯域地震観測等を用いた超低周波地震活動様式の解明

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において展開された機動的広帯域地震観測点 (四国西部6点、紀伊半島4点、東海4点) と準定常観測点 (四国西部5点、九州1点) を維持するなかで、この5年間の間に四国西部の機動的観測点3点を撤収し、残り17点の維持作業とともに、深部超低周波地震の検出手法の改良を継続的に実施してきた。また、東北地方太平洋沖及び西南日本において、沈み込みプレート境界やプレート運動を仮定して計算された理論波形をテンプレートとして、防災科研F-netの連続波形データから超低周波地震を検出し、2011年東北地方太平洋沖地震による影響やプレート間カップリングとの関係性などを明らかにした (Baba et al., 2019; 2020)。

3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

南海トラフ沈み込み帯のLFEの長期的な挙動に関する理解を深めるために、高密度及び高感度の地震計ネットワーク (Hi-net) によって記録された約17年間の連続波形記録に対して、マッチドフィルター法を適用した (2004年4月から2020年12月まで)。その結果、合計で約740,000個のLFEを検出した。2015年までのカタログについては、論文として出版し一般に公開した (Kato and Nakagawa 2020) (図8)。このカタログを分析することで、長さ約15 kmスケールの短い距離においても、LFEは拡散的なパターンで高速移動 (拡散係数 $\sim 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) を起こすことを新たに発見した。また、主要なエピソード中にLFEの高速な移動が断続的に多数発生していたことも捉えられ、スロースリップには拡散プロセスによって制御される小規模な断層滑りイベントが多数含まれていると考えられる。また、長期的SSEの規模が大きいほどLFEの活動度も高くなる傾向が明瞭になり、SSEから解放される歪みエネルギーがLFEの活動度を制御していると考えられる。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震以降、走行方向に四国全体を横断する主要なLFEエピソードが継続的に発生しており、プレート境界の状態が変化した可能性が示唆される。

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において、稠密な地震計アレイを四国西部のLFE発生域の直上に設置し、2019年12月下旬から2020年5月まで連続波形記録を取得した。各地震計アレイの口径は約1~2 kmで、60~100点の3成分短周期地震計 (一部の観測点では上下動成分のみ) から構成される (計340点)。LFEの大規模活動が生じた2020年2月下旬前後約1カ月間の波形データを用いて、センブランス値に基づいてLFE震源の時空間発展を推定した。LFEの震央分布は、現在のフィリピン海プレートの収束方向と平行な西北西-東南東の走向に加えて、過去の収束方向に平行な北西-南東走向の2つの構造で特徴づけられ、プレートの沈み込みにより生成された構造に規定されていると解釈される (図9)。また、プレートの傾斜方向と走向方向の両方向へのLFEの高速移動が見られるとともに、順方向・逆方向の移動が頻繁に生じていることが分かった。

4. GNSS観測による豊後水道周辺域でのSSE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、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。

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)。

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、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)。

また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つのスロースリップイベント (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 (図2) (Hirose et al., 2023)。

5. 相模トラフ～南海トラフ～琉球海溝におけるフィリピン海プレート沈み込み境界全域の長期的SSEの系統的把握とそのモニタリング

GNSSデータによる関東地方に沈み込むフィリピン海プレート上面で発生するスロースリップイベント (SSE) の系統的検出を行い、房総半島沖で繰り返し発生するSSEよりも小規模なSSE活動が存在することを明らかにした(高木・他, 2019)。また、当初の計画とは異なるものの、近年急速に発展する海底観測網を活用したスロー地震発生場の解明のため、常時微動表面波トモグラフィーによる海底下S波速度構造推定手法の開発・高度化を行なった(Takagi and Nishida, 2022)。

6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

西南日本において繰り返し地震やスロー地震が空間的に相補的な分布をしていること、異なる種類のスロー地震の活動に相互作用があることを明らかにした。また、九州沖から四国にかけてのプレート境界の深部および浅部で、時間スケールが異なる2つのスロー地震の長距離移動を見出した(Uchida et al., 2020a)。スロー地震と中・大規模地震の関係について調べるために、東北地方で沈み込み帯上盤の流動構造を調べた。S-netおよび陸域観測点でのS波スプリッティングデータから火山フロントを境に前弧では、海溝平行の速いS波の振動方向がみられ、地下に冷たく動かないマントルがあることがわかった(Uchida et al., 2020b)。また、世界の地震波形のデータを用いた、繰り返し地震の抽出のためのプログラム整備を進めた。

7. 重力・電磁気観測に基づくすべりの時間発展と流体との相互作用の解明

東海地方で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。その後の観測データの蓄積により、観測された重力変化に小さな位相差があり、質量源が移動する可能性が明らかになった。微動が潮汐に対して時間遅れで発生する観測事実を、流体挙動を考慮した物理モデルで説明することで、プレート境界の摩擦特性や透水構造が制約できることを示した。石垣島では、時間分解能を絶対重力観測から大幅に改善した連続観測可能な重力計を用い、比較的規模の大きいスロースリップの発生中に、地殻上下変動では説明できない重力変化を検出することに成功した (図10) (平松, 2023)。負の重力異常が観測された事実は東海やカスカディアと共通する。能登半島で既存の弾性体理論で説明できない重力変化を捉えた。

豊後水道周辺域でNetwork-MT観測を実施し、広域深部比抵抗構造を推定することで、普通地震、スロー地震の発生域と電気の流れやすい領域(流体の存在を示唆)との関連性を明らかにした。また、四国西部域におけるNetwork-MT観測を継続し、そのデータから得られた3次元比抵抗構造に基づいて構造変化検知可能性の検討を行った。さらにスロースリップ域の空間的特性を明らかにするため、四国地方や紀伊半島域での従来のNetwork-MT法観測データをコンパイルし、紀伊半島についてはそのデータに基づいた3次元比抵抗構造推定を行った (Shi・他, 2023; Watanabe et al., 2023)。

8. スロー地震の滑り特性を規定する地下構造異常の抽出

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、豊後水道の中心部に位置する水ノ子島で臨時地震観測を実施するとともに、スロー地震の活動様式に違いがある四国中部から東部にかけての地域で稠密地震観測を実施した。新規に取得した観測データや、深部低周波微動活動が活発な紀伊半島北東部や四国西部で取得されている稠密地震観測データを用いた解析を行い、スロー地震の滑り特性を規定する地下構造の特徴把握を行った。

水ノ子島では、平成28年から現地収録型のレコーダを使用した臨時地震観測を開始した。令和元年11月にメンテナンス作業のため豊後水道水ノ子島の地震観測点を訪れたところ、観測点が消滅していることが判明した。これは台風による高波による影響と考えられた。そのため、観測点再構築に向け、高波にも耐えうる観測点設置方法の検討を開始した。しかし、その後のコロナ禍の影響もあり、令和5年度までに観測を再開することが出来なかった。令和元年までに取得したデータからパワースペクトル密度を計算することでデータの評価を行った。その結果、水ノ子島のような岩礁でも良好な観

測環境であることが分かった。さらに、波形データに豊後水道周辺で報告されている深部低周波微動が記録されていることを確認し、水ノ子島のような岩礁でも地震観測が有効であることを示した。

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、前計画期間中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., 2021a)。現行計画において四国東部で取得した稠密地震観測データに地震波トモグラフィ解析を適応することで得た地震波速度構造の特徴からも、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)。また、スロー地震発生におけるプレート境界面近傍の構造を詳細に把握する為に、科研費・新学術領域研究「スロー地震学」によって四国西部で取得した制御震源地殻構造探査データと、それ以前に取得されていた制御震源地殻構造探査データとを統合したデータに対して反射法解析を適応した。得られた反射法断面図からは、プレート境界に沿った反射帯の見え方は、プレートの沈み込む方向と沈み込みに垂直な方向の両方で変化していることが確認できる。明瞭な反射帯が確認できる領域は、Nishimura et al. (2013)で示されたS-SSEの積算滑り量が大きな領域と対応し、反射波の特性の変化と積算滑り量の変化との間には対応関係があるように見える。このことは、プレート境界近傍の構造不均質が断層のすべり挙動に影響を与えている可能性を示唆している(Kurashimo et al., 2021b)。

9. 南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造と流体挙動の解明

南海トラフで浅部スロー地震の滑り特性を規定する地下構造を解明するため、JAMSTECが過去に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)データの再解釈を行い、深海掘削(ODP/IODP)データとの統合を試みた。結果的に、四国海盆から南海トラフまで分布する3種類のタービダイト(西部タービダイト、中部タービダイト、東部タービダイト)が浅部プレート境界断層(デコルマ)の下部へ沈み込んでいることが明らかになった。南海トラフの陸側へ既に沈み込んでいると推察される3種類のタービダイトの空間分布と、海底地殻変動から推定されたプレート間固着度(カップリング)分布(Yokota et al., 2016)を比較した結果、タービダイトの岩相と形状の違いがプレート間固着度に影響することが示唆される。

室戸岬沖南海トラフの浅部スロー地震に影響する高間隙水圧と比較するため、これまで浅部スロー地震が殆ど報告されていない紀伊半島潮岬沖南海トラフに着目し、浅部デコルマ付近の間隙水圧推定を試みた。本研究のため、JAMSTECが過去に潮岬沖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(測線KI01)を用いた重合前深度マイグレーション(Pre-stack depth migration: PSDM)処理に着手し、P波速度構造を求めた。PSDM断面図では、砂泥互層のタービダイトを含む四国海盆堆積層が浅部デコルマに沿って沈み込んでいるイメージが得られた。透水性の高いタービダイトの沈み込みの場合、泥岩層の沈み込み(例:室戸岬沖南海トラフ)に比べて、間隙率が低下し(例: Hüpers et al., GSA special issue, 2018)、高間隙水圧の形成は困難である。これは、潮岬沖南海トラフのMCS測線KI01付近で浅部スロー地震が殆ど観測されないことと調和的である。また、経験式に基づき、P波速度を間隙率に変換し、有効応力を求める手法(Tobin and Saffer, Geology, 2009; Li et al., Geology, 2018)を駆使して、鉛直有効応力(Vertical effective stress)と過剰間隙水圧比(Overpressure ratio = [pore pressure - hydrostatic pressure] / [lithostatic pressure - hydrostatic pressure])を推定した。これら物性の最終的な推定誤差は最大20%となった。解析の結果、デコルマの物性や付加体の層厚変化に基づき、潮岬沖南海トラフ(測線KI01)のデコルマ発達域は2つの領域に区分できる: Zone 1(海溝軸(0 km)から陸側距離13 kmまで)とZone 2(海溝軸の陸側距離13 kmから30 kmまで)。潮岬沖南海トラフのZone 1の過剰間隙水圧比は室戸岬沖南海トラフより低く、潮岬沖南海トラフのデコルマに沿って沈み込んでいる、透水性の高い砂岩層を含むタービダイトに起因することが考えられる。Zone 2において過剰間隙水圧比が上昇し続けることは、沈み込んでいるタービダイトの排水機能が弱まっているか、または粘土鉱物の脱水反応による流体供給を示唆する。潮岬沖南海トラフの鉛直有効応力は室戸岬沖南海トラフより高く、潮岬沖南海トラフのデコルマがより強く固着していることを示唆する。この結果は、先行研究の南海トラフのすべり欠損分布(Noda et al., JGR, 2018)や浅部超低周波地震発生(Takemura et al., GRL, 2019)とも調和的である。

南海トラフで浅部スロー地震を引き起こす「浅部プレート境界断層」(=デコルマ)の断層強度やすべり挙動を評価するために、比較対象となる日本海溝の反射法地震探査データを解析し、海底下のP

波速度構造と間隙水圧を求め、有効応力比 (Effective stress ratio = calculated vertical effective stress ÷ expected vertical effective stress under normal consolidation conditions) を推定した (Jamali Hondori and Park, Scientific Reports, 2022)。有効応力比が低いほど断層強度は弱く、滑りやすい。過剰間隙水圧の状態が考えられる四国室戸岬沖南海トラフ (Tobin and Saffer, Geology, 2009) と宮城沖日本海溝 (本研究) デコルマの有効応力比を比較した場合、海溝軸に近い Zone I において、南海トラフの有効応力比が日本海溝より著しく低く、南海トラフのデコルマがもっと滑りやすい、浅部スロー地震発生の容易な状態が考えられる。沈み込む太平洋プレート上面のグラーベン構造の発達域にあたる、日本海溝の Zone I には付加体内部の複数のスラスト断層がグラーベン構造内部まで発達し、スラスト断層の優れた排水作用が相対的に高い有効応力比をもたらした可能性が考えられる。一方、南海トラフの Zone I では、透水性の低い泥岩層が沈み込み、排水作用が劣ることで、低い有効応力比が維持されていると考えられる。

JAMSTEC が過去に南海トラフで取得した反射法探査データを深海掘削データと組み合わせ、海溝で沈み込む深海堆積物を分析した。その結果、中新世に堆積した3つのタービダイトがプレート境界に沿って深部へ沈み込んでいることを発見した (図7)。砂層に富むタービダイトが、スロー地震活動の静穏域 (プレート間固着の強い領域とほぼ一致する) に集中して分布している。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、断層面の剪断強度が大きくなることで、スロー地震活動が静穏化した可能性が考えられる (Park and Jamali Hondori, Scientific Reports, 2023)。

なお、これらの研究成果は、本課題の5か年計画と概ね一致している。

10. スロー地震と地震発生との関連性

深部低周波地震活動の発生タイミングを基準にして、南海トラフ沿いの陸域GNSSデータを重合して短期的SSE発生時の滑り量分布に関する解析を進めた (Kano et al. 2019; Kano and Kato 2020)。深さ約35kmのSSE発生域に加えて、四国西部や四国東部、東海地域においてはわずかな滑りが固着域においても起きていたことを見出した (図11)。固着域の中で確認されたスロースリップという点が特徴的であり、短期的SSEによる固着域への応力载荷過程を理解する上で重要な成果が得られた。また、近年の観測・理論・実験的研究の成果に基づいて大地震発生に至るプロセスの多様性・複雑性を概観し、大地震の発生過程に関する統合的なモデルを提案した (図12) (Kato and Ben-Zion, 2021)。さらに、2013年2月に発生した栃木県北部地震M6.3の前震活動を解析することで、複数の時間スケールにおいて前震活動の段階的な活発化が起きるとともに、約1時間前から前震活動域が拡大したことを明らかにした。時空間スケールは異なるが、2011年東北地方太平洋沖地震の発生前に見られた前震活動域の拡大の様子と類似性が見られ、スロースリップが本震の発生を促した可能性が考えられる。

・「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

本研究課題と関連の深い建議の項目 (2(2)ア プレート境界滑りの時空間変化の把握に基づく予測) 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、解析手法の開発も進め、既存観測データを用いた繰り返し地震や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を進めている。

スロー地震活動は沈み込むプレート境界におけるすべりを反映すると考えられるため、その活動の詳細な描像を解明することは、プレート間すべりを把握しその物理的メカニズムを理解する上で重要である。特に、浅部スロー地震活動が多様であることについては、巨大地震発生域に隣接した浅部プレート境界のせん断応力あるいは流体の時空間変化に対応していると考えられ、巨大地震発生域周辺の不均質性がスロー地震活動によって明らかにされたことは、スロー地震と巨大地震との関連性を議論する上で重要である。今後も、スロー地震モニタリングを継続的かつ詳細に実施することにより、巨大地震発生の切迫度評価に向けた研究に貢献するものと期待される。

地殻変動観測により得られた成果は、各地域におけるプレート間のひずみ収支の把握に必要な情報を提供するものである。沈み込みプレート境界面においてSSE発生領域と巨大地震発生領域は大局的には異なると考えられるが、プレート間地震が発生した際にその破壊が深部微動領域などへ伝播するかどうかを決定づける重要な要素の1つとしてひずみ収支が挙げられる。言い換えると、ひずみ収支の把握は巨大地震の規模予測に寄与する。また非地震性すべりの伝播に関する地域特性は巨大地震のひずみ蓄積過程に直接的に影響すると考えられるため、地震の短・中期的な予測精度向上に鍵と

なる。

GNSSデータによるスロー地震の発生様式及び常時微動によるスロー地震発生場の解明により、スロー地震発生メカニズムの理解に貢献すると期待される。また、スロー地震発生様式とS波速度構造不均質の詳細な理解は、これらに基づくプレート境界固着域及び大地震すべり域分布の把握につながると期待される。

スロースリップや群発地震が発生する地殻流体の豊富な複数の地域において、継続して絶対・相対重力観測を実施することで、これまでの理論では説明できないような重力変化が生じることが分かってきた。重力の時間変化とスロースリップを含む地震活動との対応を明らかにし、その対応を、流体移動を記述する物理モデルで説明することで、他のサブテーマから明らかにされているスロースリップの多様性に、流体移動がどのように関わっているのか解明することが期待できる。

四国西部や紀伊半島地域において、深部広域構造を決定する上で有利なNetwork-MT観測データをコンパイルし、四国西部域や紀伊半島全域で3次元比抵抗構造を決定した。その結果、中部地殻内の地震発生域が電気の流れにくい高比抵抗域に分布していて、その周辺や下部に流体の存在を示すと思われる低比抵抗域が分布していることが明らかとなった。ただ、四国西部地下の長期的スロースリップ発生域や紀伊半島の深部低周波微動発生域には低比抵抗域は認められず、流体は存在しないか、存在したとしても孤立して存在する可能性が示唆された。今後、さらなる感度検証と、長期的スロースリップが発生したときの構造の時間変化の検知が待たれる。

南海トラフと日本海溝のデコルマに沿った有効応力比を比較し、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デコルマ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、南海トラフのスロー地震活動について、沈み込む深海堆積物の影響を明らかにしたのは、本研究が初めてである。プレート境界断層の間隙水圧の変動に対する深海堆積物の影響を定量化することは、スロー地震の活動様式や発生原因を解明する上で重要である。今後、南海トラフ沿いのプレート境界断層の間隙水圧を高精度・広域的に調査することで、巨大地震に影響するスロー地震に関する理解が進展し、巨大地震発生予測モデルの高度化への貢献が期待される。

このような研究を継続して実施し、スロー地震と同じプレート境界で発生する大地震発生可能性の相対的な変化を評価する研究に貢献し続けることで災害の軽減に貢献する。

(9) 令和5年度の成果に関連の深いもので、令和5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

Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2023, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, southwest Japan, Earth Planets Space, 77, 75, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01833-4>, 査読有, 謝辞有

廣瀬仁, 2023, statsmodelsを用いたGNSS座標時系列データのスムージング, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 27, 1-8, 査読無, 謝辞無

J.-O. Park and Jamali Hondori, E., 2023, Link between the Nankai underthrust turbidites and shallow slow earthquakes, Scientific Reports, 13, 10333, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37474-6>, 査読有, 謝辞有

Nishida, K., R. Takagi, and A. Takeo, 2024, Ambient noise multimode surface wave tomography, Prog Earth Planet Sci., 11, 4, <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00605-8>, 査読有, 謝辞無

Takemura, S., Y. Hamada, H. Okuda, Y. Okada, K. Okubo, T. Akuhara, A. Noda and T. Tonegawa, 2023a, A review of shallow slow earthquakes along the Nankai Trough, Earth Planets Space, 75, 164, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01920-6>, 査読有, 謝辞無

Takemura, S., K. Emoto, and L. Yamaya, 2023b, High-frequency S and S-coda waves at ocean-bottom seismometers, Earth Planets Space, 75, 20, <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01778-8>, 査読有, 謝辞無

Wang QY, Frank WB, Abercrombie RE, Obara K and Kato A, 2023, What makes low-frequency

・学会・シンポジウム等での発表

- 比嘉友香・廣瀬仁・木村武志, 2023, 傾斜データに基づく短期的スロースリップイベント検出のための機械学習手法の開発, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG55-P02
- Higa T., H. Hirose, T. Kimura, 2023, Development of a machine learning model to detect short-term SSEs from tilt records, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023, P56
- Hirose H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura, 2023, Long-term slow slip events with and without tremor activation in the Bungo Channel and Hyuganada, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG45-04
- 廣瀬仁・加藤愛太郎・木村武志, 2023, 2011年東北地方太平洋沖地震直前の傾斜変動再訪: スタッキングによる検証, 日本地震学会2023年度秋季大会, S08-15
- Kato A, S. Nakagawa K. Fujita, T. Ichimura, and H. Nagao, 2023, A comprehensive earthquake catalog for the 2020 seismic swarm in the central Japan, 日本地球惑星科学連合2023大会, SCG45-15
- 蔵下英司・飯高隆・津村 紀子, 2023, 四国東部地域における稠密地震観測, 日本地震学会2023年度秋季大会, S02-P12
- 根岸幹・小原一成・武村俊介・悪原岳・山下裕亮・杉岡裕子・篠原雅尚, 2023, Source-Scanning Algorithmを共通的に用いた浅部微動・浅部VLFの時空間発展の推定, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-30
- Shi Yujie・上嶋誠・村上英記・塩崎一郎・山口覚・白井嘉哉, 2023, 四国中国地方ネットワークMT法観測データ解析, 地震研究所共同利用研究集会「地球電磁気学的手法による地球内部構造研究と室内実験結果の総合解釈」
- 高木涼太・西田究, 2023, S-netで観測された常時微動表面波の位相速度の方位依存性, 日本地球惑星科学連合2023年大会, SSS07-P08
- 高木涼太・東龍介・日野亮太・西田究・篠原 雅尚, 2023, 常時微動を用いた日本海溝・千島海溝会合部におけるS波速度構造推定, 日本地震学会2023年度秋季大会, S06P-05
- Takemura S, 2023, Slow earthquakes around shallower extension of megathrust zone in Nankai, AGU fall meeting 2023, TA51-09 (invited talk)
- 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, 2023, 南海トラフ浅部スロー地震の理解へ向けた多面的レビュー, 日本地震学会2023年度秋季大会, S09-P01
- 竹尾明子・宮川幸治・西本太郎・安藤美和子・佐伯綾香・田中伸一・大塚宏徳・藤田親亮・浜本未希・柴田律也・加藤翔太・加藤慎也・増田滉己・加納将行・武村俊介・小原一成, 2023, 深部超低周波地震を対象とした西南日本における広帯域地震観測, 日本地震学会2023年度秋季大会, S02-P05
- Tanaka Y., 2023, Terrestrial and satellite gravity observations of earthquake-related phenomena - an overview, 1st Workshop on Earthquake Early Detection using Superconducting Gravimetry
- Tanaka Y., Yuichi Hiramatsu, Hiromu Sakaue, Akio Kobayashi and Tadahiro Tsuyuki, 2023, Gravity anomaly in the slow slip area along the southern Ryukyu subduction zone captured by continuous parallel observation using two gPhoneX gravimeters, AGU fall meeting 2023, T04-04
- 于凡・Jamali Hondori, E.・朴 進午, 2023, Application of Convolutional Neural Networks for Seismic Velocity Model Building Using “Realistic” Synthetic Data, 日本地震学会2023年度秋季大会, S21-03
- Uchida, N, R. Suzuki, W. Zhu, G. C Beroza, T. Nakayama, G. Toyokuni, R. Takagi, R. Azuma, K. Yoshida, A. Hasegawa, 2023, Offshore microseismicity in NE Japan constrained by S-net and PhaseNet: insights on the forearc circulation of fluids and interplate coupling, AGU fall meeting 2023, S43A-03
- Watanabe, A., M. Uyeshima, S. Yamaguchi, Y. Usui, H. Murakami, T. OGAWA, N. Oshiman, R. Yoshimura, K. Aizawa, I. Shiozaki, T. Kasaya, 2023, The 3-D electrical conductivity structure modelling of the Network-MT observation dataset in the Kii Peninsula, southwestern Japan, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2023年秋季年会, R003-08
- 渡部熙・上嶋誠・山口覚・白井嘉哉・村上英記・小河勉・大志万直人・吉村令慧・相澤広記・塩崎一

郎・笠谷貴史,2023,紀伊半島におけるNetwork-MT法データを用いた広域深部電気比抵抗構造モデリングの現状と解釈について,地震研究所共同利用研究集会「地球電磁気学的手法による地球内部構造研究と室内実験結果の総合解釈」

(10) 令和5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：・四国西部、紀伊半島、東海の14点の機動的広帯域地震観測点で観測を実施した。・スロー地震データベースを整備した。

既存データベースとの関係：スロー地震データベース

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~sloweq/>

調査・観測地域：

調査・観測期間：

公開状況：

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30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：御前崎、菊川、豊橋、宮崎、足摺岬、能登、石垣島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、石垣島、能登

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：公開中（論文・データジャーナル・報告書等）

<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0797-5>

項目：地震：MT・AMT観測

概要：四国西部と九州東部においてNetwork-MT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：四国西部、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（公開時期・ポリシー未定）

(11) 次期計画における課題名：

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

(12) 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）、小原一成（東京大学地震研究所）、竹尾明子（東京大学地震研究所）、加藤愛太郎（東京大学地震研究所）、上嶋誠（東京大学地震研究所）、小河勉（東京大学地震研究所）、飯高隆（東京大学大学院情報学環/東京大学地震研究所）

他機関との共同研究の有無：有

加納将行（東北大学）、内田直希（東北大学）、高木涼太（東北大学）、井出哲（東京大学大学院理学系研究科）、田中愛幸（東京大学大学院理学系研究科）、朴進午（東京大学大気海洋研究所）、中東和夫（東京海洋大学）、津村紀子（千葉大学）、麻生尚文（東京工業大学）、廣瀬仁（神戸大学）、松島健（九州大学）、田部井隆雄（高知大学）、西村卓也（京都大学防災研究所）、松澤孝紀（防災科学技術研究所）

(13) 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：東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会 企画部
 電話：03-5841-5787
 e-mail：yotikikaku@eri.u-tokyo.ac.jp
 URL：https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/

(14) 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

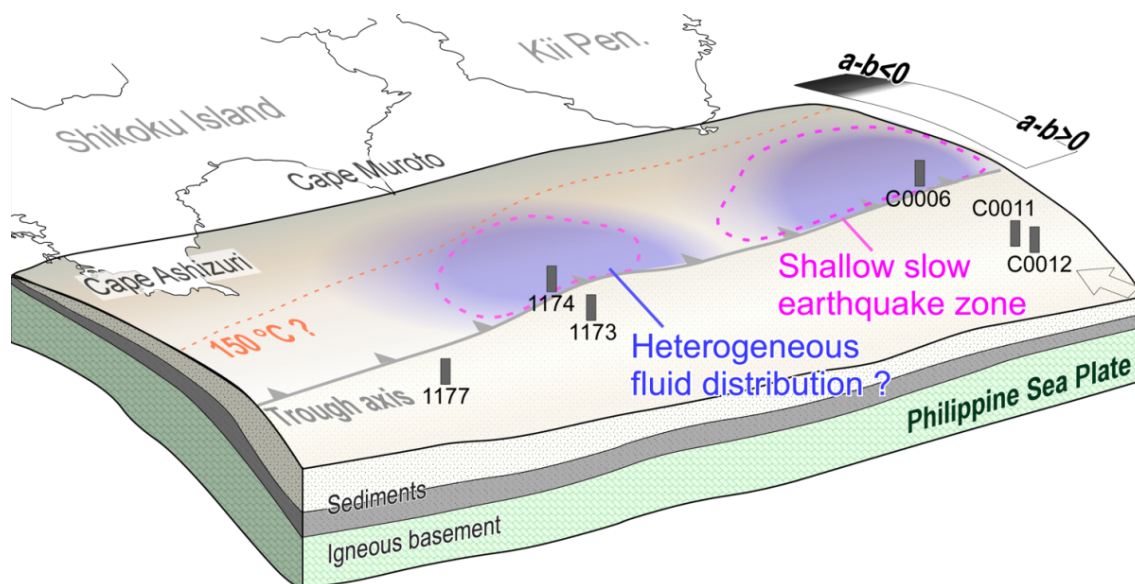


図1: 南海トラフ沿いの浅部スロー地震発生域の概略図。

青色が濃い領域ではプレート境界断層周辺で流体圧が高いと考えられ、浅部スロー地震の活動域とよく一致している。図中の灰色の柱はコアサンプルが得られているボーリングの位置、矢印はフィリピン海プレートの沈み込み方向を示す。

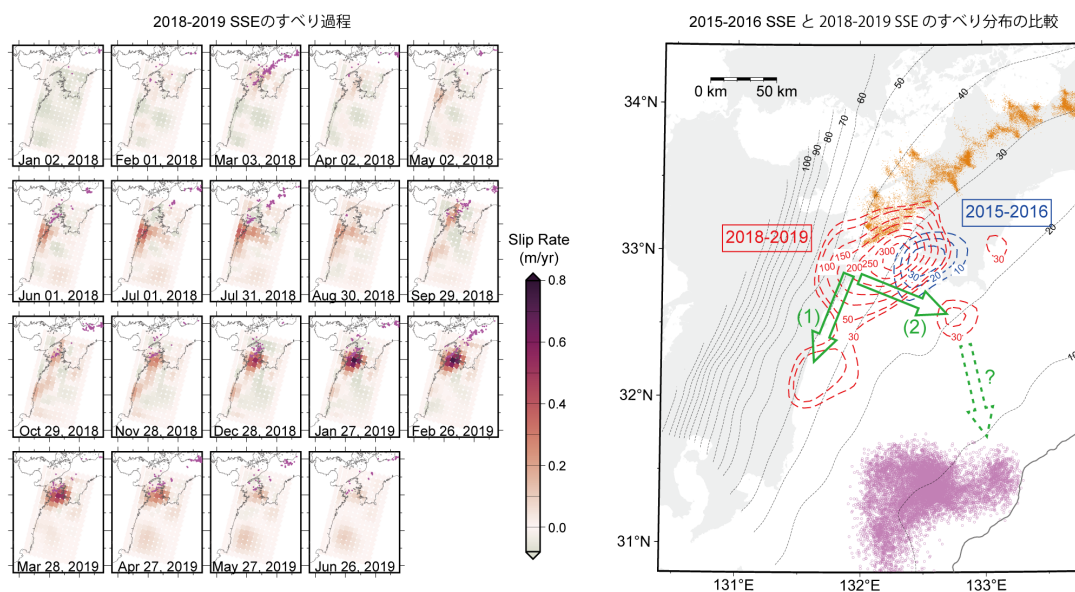


図2: (左) GNSSデータから推定した2018-2019豊後水道・日向灘SSEのすべりの時間発展。各フレームの下に表示した日付におけるプレート境界面上のすべり速度を30日ごとにカースケールで示す。紫色の点は

当該時間窓に発生した微動の震央（防災科研の微動カタログによる）。（右）2015-2016SSE（青コンター）および2018-2019 SSE（赤コンター）のすべり分布の比較。橙点は深部微動の震央（防災科研カタログ）、紫丸印は浅部微動の震央（Yamashita et al., 2015, 2021）。緑矢印（実線）は2018-2019 SSE期間中に見られたすべり伝播方向、緑矢印（点線）は、存在するかも知れない、より浅部へのすべり伝播経路。

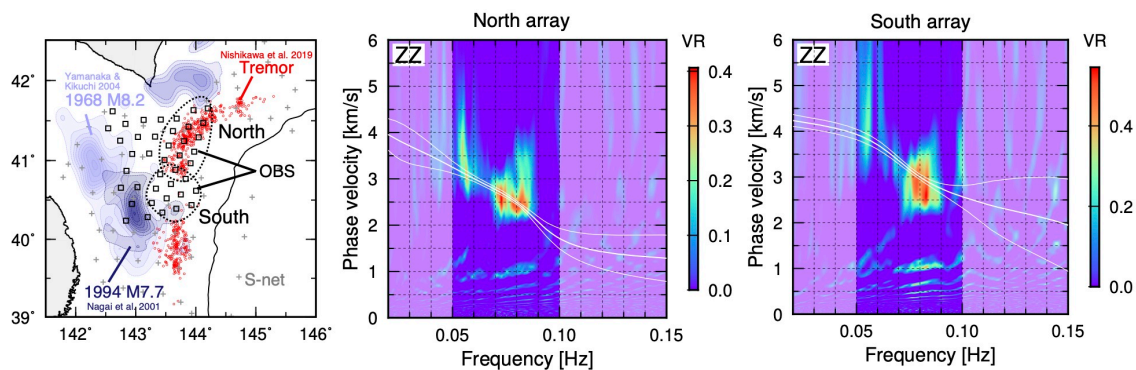


図3: 日本海溝北部における稠密地震観測によるレイリー波位相速度分散曲線。観測網南部の微動空白域では北部の微動発生域に比べて20%程度速度が速い。

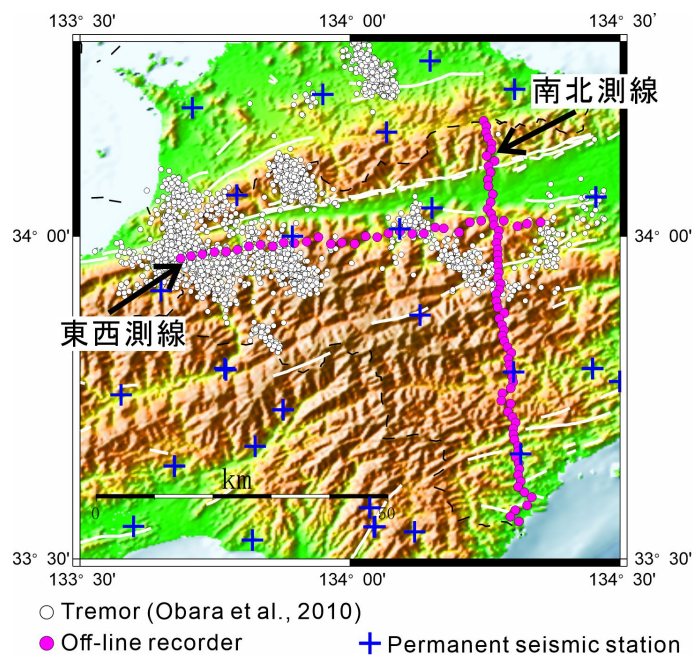


図4：臨時地震観測点配置図。

紫色丸印が臨時観測点、+が定常観測点、白色丸印は、Obata et al. (2010)で示された深部低周波微動の震央を示す。

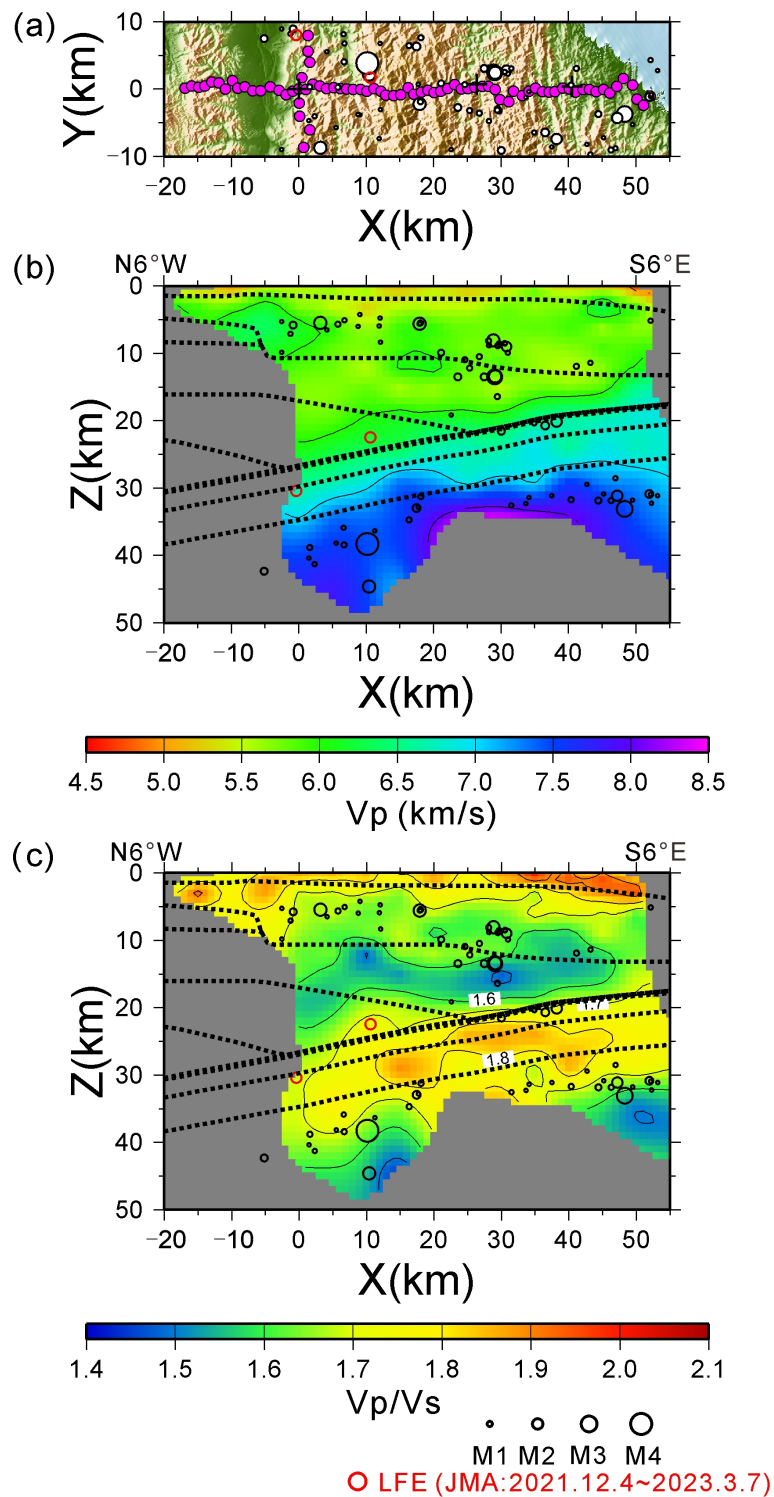


図5: トモグラフィック解析により得られた南北測線下の地震波速度構造と震源分布。破線は、蔵下・他(2007)によって示された南北測線下の速度境界面を示す。(a)観測点配置と震央分布図。紫色丸印が臨時観測点、+が定常観測点。白色丸印は再決定した震央分布を示し、その大きさがマグニチュードを表す。赤色丸印は、観測期間中の気象庁一元化処理による低周波地震の震源を示す。(b) P波速度構造。(c) V_p/V_s 構造。

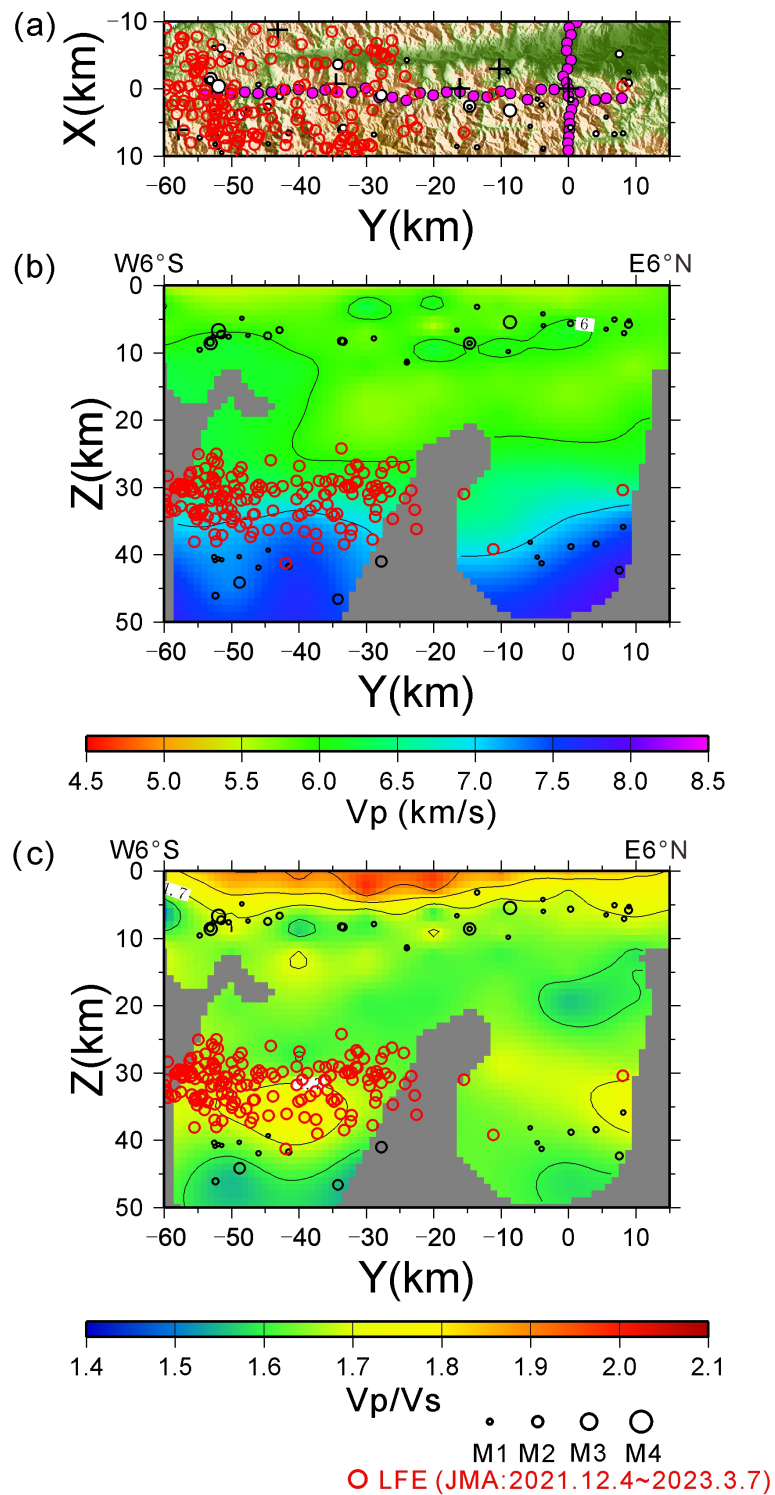


図6： トモグラフィ解析により得られた東西測線下の地震波速度構造と震源分布。
 (a)観測点配置と震央分布図。紫色丸印が臨時観測点、+が定常観測点。白色丸印は再決定した震央分布を示し、その大きさがマグニチュードを表す。赤色丸印は、観測期間中の気象庁一元化処理による低周波地震の震源を示す。(b) P波速度構造。(c) V_p/V_s 構造。

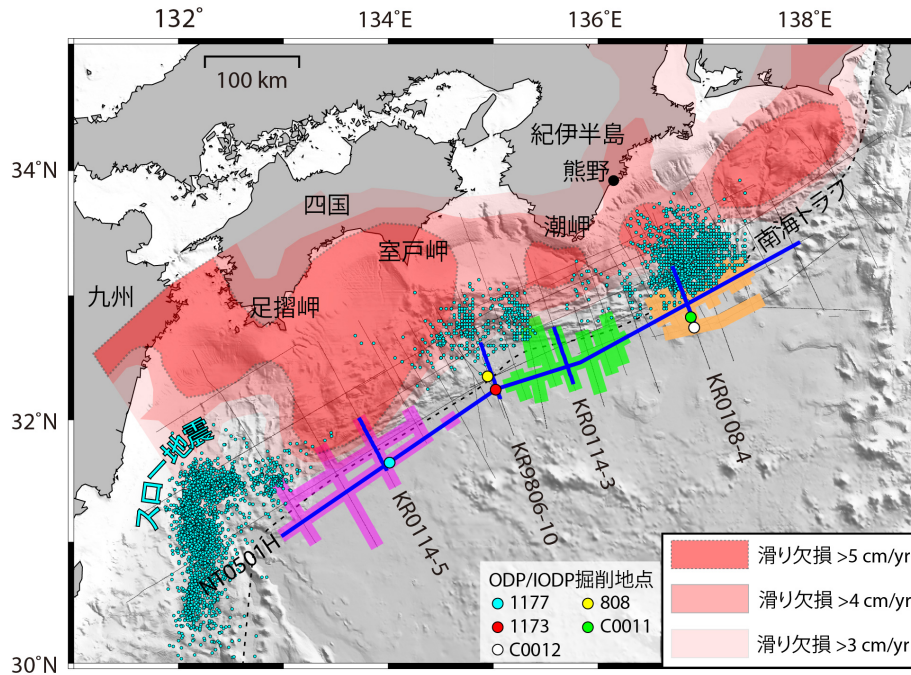


図7：南海トラフ沿いの反射法探査測線とタービダイトの分布。
 反射法探査測線（灰色）上で確認された3つのタービダイト（西側、中央、東側）をそれぞれ紫、緑、オレンジ色で示す。シアン丸は浅部スロー地震（Kano et al., 2018）を示す。プレート間の固着を表す滑り欠損（Yokota et al., 2016）を赤のグラデーションで示す。黒点線は南海トラフの軸を表す。

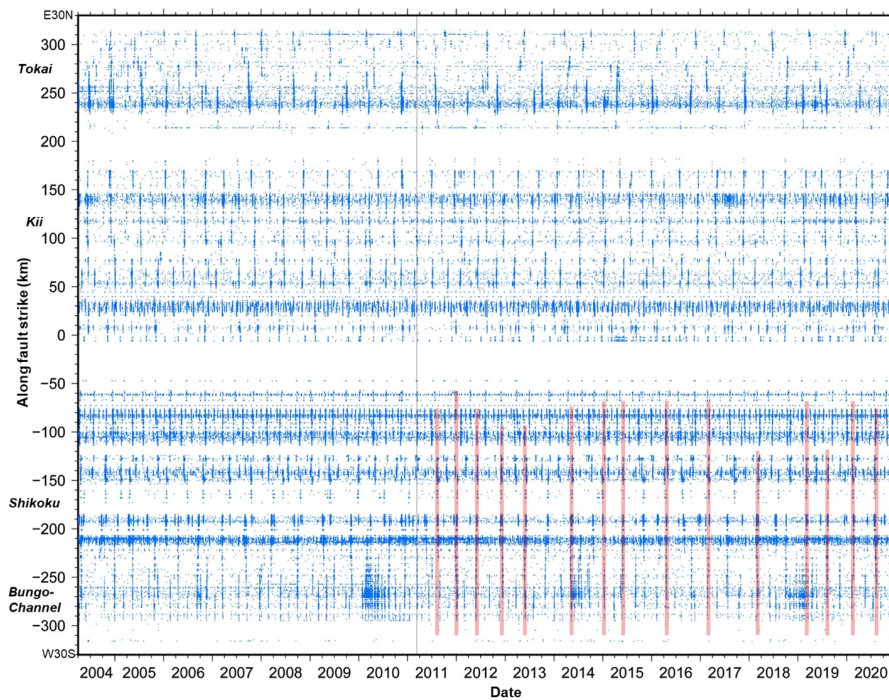


図8：マッチドフィルター法により構築したLFEカタログの時空間分布図（after Kato and Nakagawa 2020）。
 赤色の陰影バーは豊後水道から四国東部までの複数セグメント間の連鎖的な活動を示す。

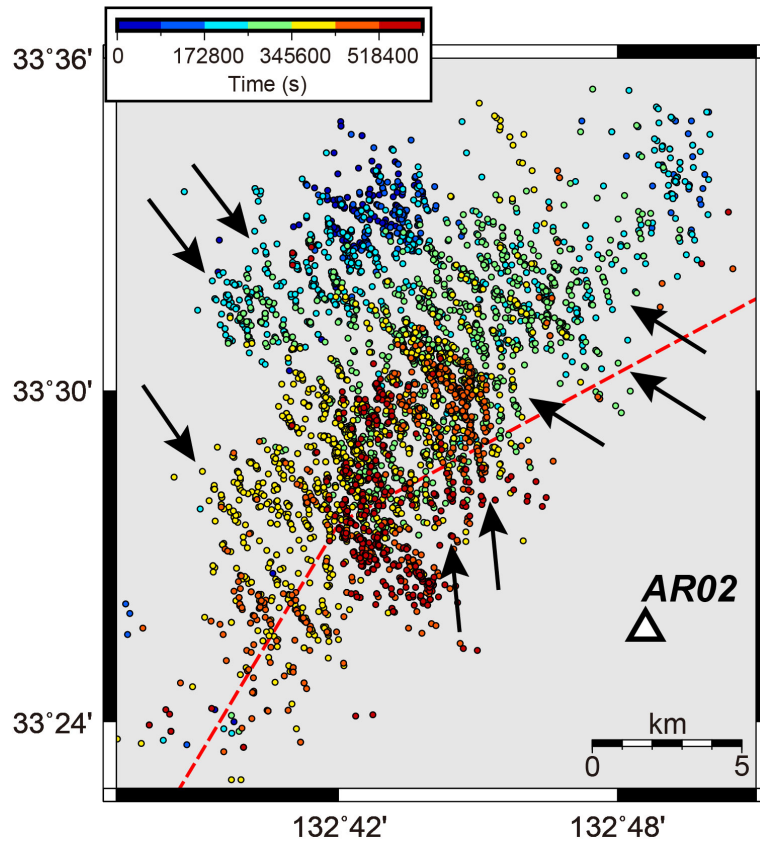


図9：四国西部における稠密地震計アレイ解析によるLFEの震央分布図。色はLFEエピソードの活動開始時刻からの経過時間を表す。三角形は地震計アレイの位置を示す。

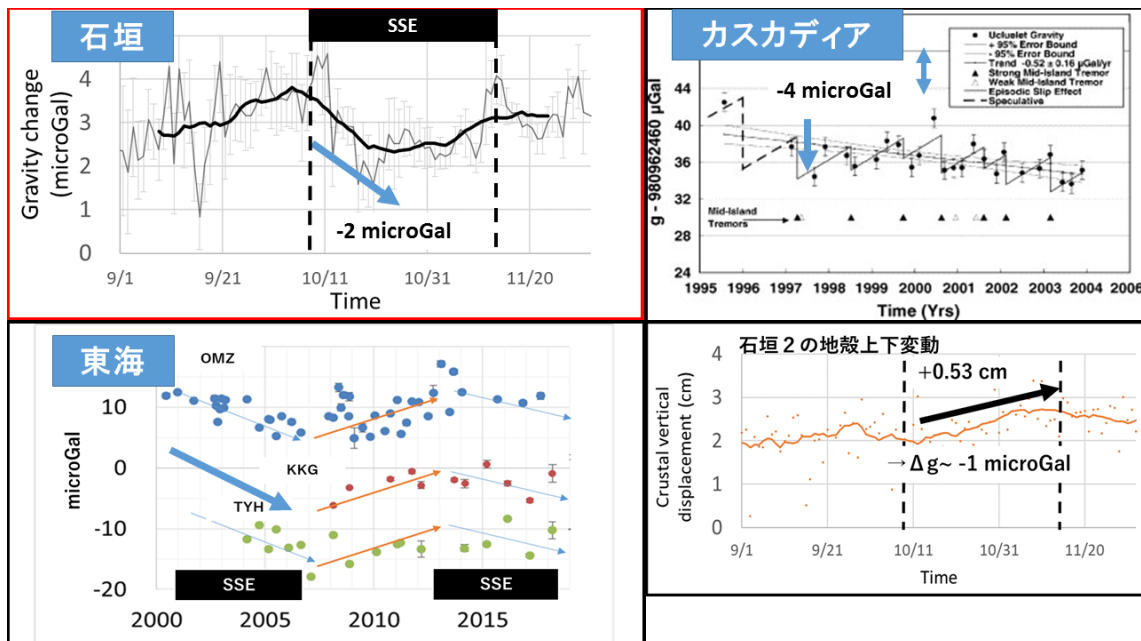


図10: 石垣島で観測されたスロースリップ中の重力変化。スロースリップの開始と同時に重力が約2microGal減少する（左上）。東海（左下）やカスカディア（右上）の観測結果と異なり連続的な重力データを取得した。GNSSによる地殻上下変動の寄与は約-1 microGalで、スロースリップ期間全体にわたり一様な速度で生じるが（右下）、重力変化は期間の前半に起きている。

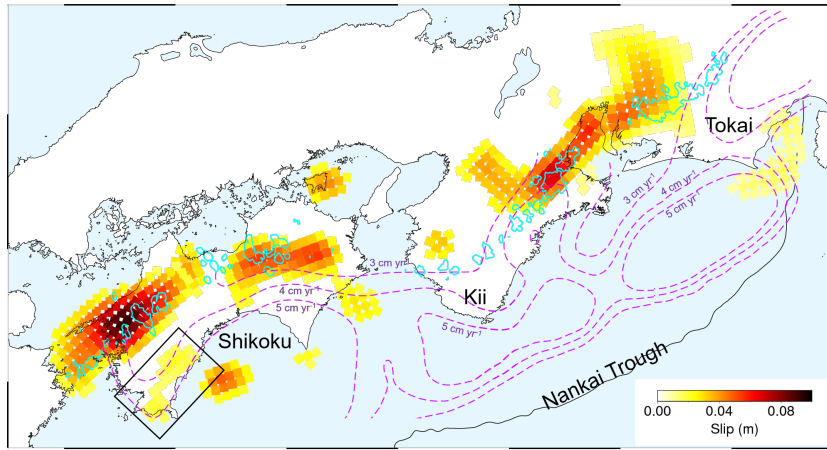


図11：短期的スロースリップ発生時の累積滑り量分布図（Kano and Kato 2020）。水色の線はLFE 密度（Kato and Nakagawa 2020）の等高線を、紫色の線は滑り欠損速度(Yokota et al. 2016)の等高線を示す。

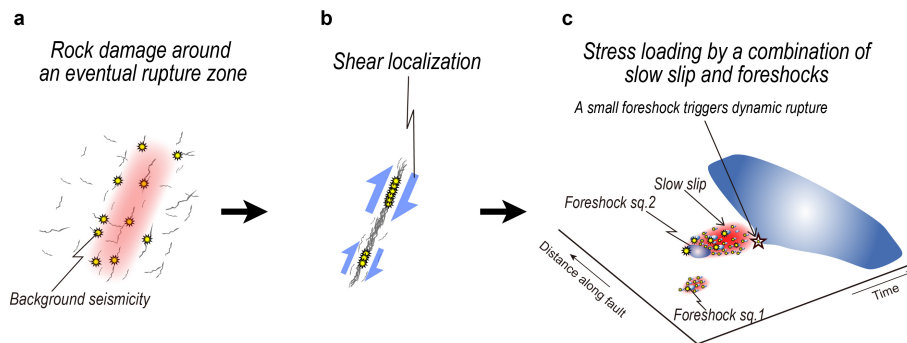


図12: 地震の発生過程を示すモデル。
 (a) 地下の広域変形が、(b) 震源域周辺へと徐々に集中（局在）化し、(c) 大地震の発生直前に前震活動やスロースリップが同時に発生することで断層面近傍に変形の集中（局在）化が進み大地震の発生が促進される。