

(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 計画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3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、巨大地震の発生過程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70のカタログが登録されている。また、様々なスロー地震カタログに基づいたスロー地震活動様式に関する研究を継続的に実施し、微動のクラスタリング解析に基づいて中間帯域におけるスロー地震のエネルギー、継続時間、破壊面積等のスケーリング特性を明らかにした（Aiken and Obara, 2021）。また、四国においてBackTrackBB法による微動の新たなカタログを構築し、その時空間的分布や挙動が非常に複雑でかつ不均質であり、沈み込むプレートの構造や応力集中、流体分布の複雑さを反映する可能性のあることを示した（Poiate et al., 2021）。一方、日本周辺以外で浅部超低周波地震の存在が確認されているコスタリカにおいて実施された機動的広帯域地震観測データを解析し、海溝付近における浅部超低周波地震活動の検出に成功した（Baba et al., 2021）。この活動域は大地震震源域のアップディップ側で、過去に発生したスロースリップイベントのすべり域と調和的である。また、超低周波地震に伴う微動シグナルを検出し、両者の比であるスケールドエネルギーを評価したところ、南海の浅部スロー地震とほぼ同様であった。

#### 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)のうち機材調整などの都合で四国西部の機動的観測点3点を撤収した。残り17点を維持するため現地作業を行なったとともに、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いる。

### 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)の移動現象を解明するために、四国西部に展開された稠密な短周期地震計アレイにより取得された連続波形記録の解析を進めた。LFEの大規模活動が生じた2020年2月下旬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。その結果、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ることが明確に示された。同様な構造は、Ide(2010)でも広域スケールにおいて指摘されているが、今回は数kmスケールでも類似の構造が存在することが明らかになった。スロー地震発生域のマルチスケール構造を示唆する意義深い結果である。また、LFEの大規模活動は、先行研究(Ide, 2010; Kato and Nakagawa, 2020)で報告されているように、深部から浅部へ移動後にプレート走向方向へと向きを変え、低速且つ拡散的な様式で移動することが示された。低速移動中には、約10分間という短い時間内に距離約3 kmを高速に移動する現象を複数見出した。移動速度は30 km/hr程度であり、プレートの傾斜方向と走向方向の両方への移動が見られ、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た。新型コロナウイルス感染症拡大の影響で遅れていた一部観測点の保守作業を順次実施した。GNSS時系列データから短期的スロースリップイベント(SSE)を自動的に検出する手法を新たに開発し、これらのGNSS観測データに適用した結果、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(図1)。特に、九州沖合での超低周波地震や繰り返し地震活動に同期したSSEなど、これまで見出されていなかった活動が初めて検出された。また例えば、SSEの平均すべり速度が、四国西部では、四国東部や九州に比べ、おおよそ倍程度大きいといった、地域ごとの活動の特長も見出した(Okada et al., 2022)。

### 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

地震波干渉法による常時微動表面波トモグラフィーの高度化のための手法開発を行い、S-netデータを用いて日本海溝沈み込み帯前弧海域における、スロー地震分布と対応する表面波位相速度の空間変化を明らかにした。海水層および堆積層の影響で海域を伝播する常時微動表面波はマルチモードで構成される。また、沈み込み帯では海水層を含む構造の水平方向への変化が大きいため、表面波伝播が複雑である。本研究では、多成分常時微動クロススペクトルの非線形フィッティングによりマルチモード分散曲線をロバストに推定する手法を開発した。また、水平方向に不均質な背景位相速度に対する有限周波数効果を取り入れた表面波トモグラフィー手法の開発を行った。マルチモードかつ有限周波数効果を取り入れたトモグラフィーによって深さ方向・水平方向ともに高分解能なS波構造推定が可能になると考えられる。得られた表面波位相速度を図2に示す。微動に代表されるスロー地震は低速度異常域内に位置するのに対し、2011年東北沖地震や根室沖の巨大地震発生が予想される領域は高速度異常域に対応することが明らかになった。なお、本課題の5か年計画とは一致しないが、スロー地震の発生様式と発生場の対応関係の解明につながり、本課題の目的であるスロー地震発生場の理解に資する成果である。

### 6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

巨大地震とスロー地震の関係の整理に関係して、巨大地震の1つである東北沖地震の意味やその後約10年の研究の進展についてレビューをし、論文にまとめた(Uchida and Burgmann, 2021, 図3)。また、南西諸島領域を含む世界の繰り返し地震の分布について研究を進め、地域ごとの特徴の精査に着手した。なお、今年度の成果は本課題の5か年計画と一致している。

### 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

当初の計画通りスロースリップに伴う流体移動の検出を目的とした重力及び電磁気観測を実施中である。絶対・相対重力観測を4月に御前崎1点で実施した。宮崎1点、東海2点（菊川・豊橋）及び豊後水道（足摺岬）1点の観測は2月中旬から3月中旬に行う予定である。これまで得られた成果として、図4に東海地方の観測結果を示す。2回の長期的SSE発生時期を比べると重力異常が明らかに増加していることが分かる。菊川（KKG）・豊橋（TYH）では2回の長期的SSE後に重力異常が増加しているが、御前崎（OMZ）では2回目の長期的SSE後は減少しており、原因を調査中である。

石垣島地方気象台において、気象研究所との共同研究として、相対重力計による連続重力観測データを蓄積し、解析を進めている。今年度は、重力観測における地下水等のノイズの評価に着手した。

能登半島の群発地震の原因として、流体またはスロースリップが関わっていることが指摘されている。この原因を明らかにするため、当初計画にはなかった絶対・相対重力観測の実施を検討している。

スロースリップ域の流体が微動の潮汐による誘発に及ぼす影響を物理的にモデル化し、スロースリップ域の断層特性を観測とモデルとの比較から制約できることを示し、論文を投稿した。

東海地方、石垣島、西表島において地磁気観測を継続し、データを蓄積中である。地磁気変化の異常場をデータから同定するために、地磁気変化の全国規模の標準場モデルの構築を進めた。また、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、四国地方全域にわたる従来の広帯域MT法観測データをコンパイルし、そのデータに基づいた3次元比抵抗構造推定のための準備を継続している。

## 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

四国東部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確定した設置場所で、令和3年12月13日より観測を開始した。観測点配置を図5に示す。本観測では、徳島県阿波市から海陽町に至る「阿波-海陽測線」

（測線長：約70km）上の70か所（観測点間隔：約1km）、三好市から神山町に至る「三好-神山測線」（測線長：約60km）上の30か所（観測点間隔：約2km）に臨時地震観測点を設置した。各観測点では、固有周波数4.5Hzの地震計によって上下動及び水平動の3成分観測を実施している。

令和元年に科研費・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2次元波線追跡法、反射法解析を適応することで、島弧地殻や沈み込むフィリピン海プレートの形状を得た(Kurashimo et al., 2021)。四国西部下の島弧モホ面は25km~30kmの深さに位置し、北傾斜の沈み込むフィリピン海プレート上面は、深さ25-33km付近に位置している。深部低周波微動発生域の南端は、島弧下のマントルウエッジが確認できる南端と良い一致を示している。

豊後水道下のプレート形状を明らかにする目的で、平成28年12月から豊後水道の中心部に位置する水ノ子島において現地収録型のレコーダを使用した臨時地震観測を行っていたが、令和元年8月に台風による高波により観測点が流失した。今年度は、観測の再開に向け地震計などを高波による浸水などを防ぐ筐体の検討を行ったが、新型コロナウイルス感染症の影響もあり現地での観測点再構築作業は行うことが出来なかった。今後、新型コロナウイルス感染症の感染状況を考慮しながら再構築の日程を決定する予定である。

## 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

南海トラフの浅部スロー地震（浅部超低周波地震）はクラスター分布を示し（Obara and Kato, 2016）、浅部スロー地震発生の地域性（発生域 vs. 非発生域）が見受けられるが、その要因は十分に解明されていない。プレート境界断層（デコルマ）付近の浅部スロー地震には高間隙水圧が関与しているとされているが、浅部スロー地震発生の地域性を規定する間隙水圧分布のデータは十分に得られていない。デコルマの間隙水圧に影響する主な要因として、沈み込む四国海盆堆積物の岩相層序と流体が考えられる。先行研究では、四国の室戸岬沖南海トラフの浅部デコルマが高間隙水圧の状態であると示唆され（Tobin and Saffer, 2009）、その近傍では浅部スロー地震のクラスターが報告されている。室戸岬沖南海トラフでは半遠洋性の泥岩層が沈み込み、透水性の低い泥岩層がデコルマの高間隙水圧をもたらしたと考えられている。

今年度の研究では、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の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を推定した。本研究のため、JAMSTECが2011年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：以下、PSDM）処理を行い、P波速度構造を求めた。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, 2009; Li et al., 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（図6）。これら物性の最終的な推定誤差は最大20%となった。

以下、解析結果を考察する。

（1）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（図6A）：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）。

（2）潮岬沖南海トラフのZone 1の過剰間隙水圧比（図6A）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。また、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。

（3）潮岬沖南海トラフの鉛直有効応力（図6B）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., 2018）や浅部超低周波地震発生（Takemura et al., 2019）とも調和的である。なお、令和3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

最近の観測・理論・実験的研究の成果をもとに、大地震の発生過程に関する統合的なモデルを提案した（Kato and Ben-Zion, 2021）。移動を伴う前震活動やスロー地震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、大地震の発生を促進した複数の事例を概観した。このプロセスは時間とともに段階的に進むため、大地震の精度の高い直前予測が困難な点についても言及した。さらに、不均一性の強い構造をもつ断層面を用いた近年の室内実験や理論研究にもとづいて、大地震発生に至るプロセスの多様性・複雑性について議論を展開した。

### ・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況

本研究課題では、スロー地震のモニタリングを実施し、データの蓄積や解析手法の開発・改良を実施しながら、スロー地震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・流体挙動との関係を示した。これらは、建議2(2)アにおいて示している「日本各地で発生する様々なスロー地震活動を観測し、それらの時空間変化を明らかにすることで、滑り現象の多様性と相互作用の理解を深める。さらに、繰り返し地震・微小地震の検出や海底地殻変動観測などプレート境界滑り現象の時空間変化をモニタリングする手法を高度化し、滑り速度が異なる現象間の相互作用を明らかにする。」で示していることであり、建議の記載の目標達成への貢献をしている。

### (9) 令和3年度の成果に関連の深いもので、令和3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

Aiken, C. and K. Obara, 2021, Data-driven clustering reveals more than 900 small magnitude slow earthquakes and their characteristics, *Geophys. Res. Lett.*, 48, doi:10.1029/2020GL091764

Atoltz, M., G. Stoltz, K. Obara, T. Wang, and D. Bryant, 2021, Acceleration of hidden Markov model fitting using graphical processing units, with application to low-frequency tremor classification, *Computers and Geosciences*, 156, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104902>

Baba, S., K. Obara, S. Takemura, A. Takeo, and G. A. Abers, 2021, Shallow Slow Earthquake Episodes Near the Trench Axis Off Costa Rica, *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 126, e2021JB021706, <https://doi.org/10.1029/2021JB021706>

Jamali Hondori, E. C. Guo, H. Mikada, and J.-O., Park, 2021, Full-waveform inversion for imaging faulted structures: A case study from the Japan Trench forearc slope, *Pure and Applied Geophysics*, <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02727-w>



Kato, A. and Y. Ben-Zion,2021,The generation of large earthquakes,Nature Reviews Earth & Environment,2,26–39,https://doi.org/10.1038/s43017-020-00108-w

Kurihara, R. and K. Obara,2021,Spatiotemporal characteristics of relocated deep low-frequency earthquakes beneath 52 volcanic regions in Japan over an analysis period of 14 years and 9 months,Journal of Geophysical Research-Solid Earth,126,https://doi.org/10.1029/2021JB022173

Okada, Y., Nishimura, T., Tabei, T., Matsushima, T., Hirose, H,2022,Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone,Earth Planets Space,74,18,https://doi.org/10.1186/s40623-022-01576-8

Park, J.-O., N. Takahata, E. J. Hondori, A. Yamaguchi, T. Kagoshima, T. Tsuru, G. Fujie, Y. Sun, J. Ashi, M. Yamano, and Y. Sano,2021,Mantle-derived helium released through the Japan trench bend-faults,Scientific Reports,11,1,2026,https://doi.org/10.1038/s41598-021-91523-6

Park, J.-O., T. Tsuru, G. Fujie, E. Jamali Hondori, T. Kagoshima, N. Takahata, D. Zhao, and Y. Sano,2021,Seismic reflection images of possible mantle-fluid conduits and basal erosion in the 2011 Tohoku earthquake rupture area,Front. Earth Sci,9,687382,doi:10.3389/feart.2021.687382

Poiata, N., J. P. Vilotte, N. M. Shapiro, M. Supino, K. Obara,2021,Complexity of Deep Low-Frequency Earthquake Activity in Shikoku (Japan) Imaged From the Analysis of Continuous Seismic Data,Journal of Geophysical Research-Solid Earth,126,e2021JB022138,https://doi.org/10.1029/2021JB022138

副島庸平・廣瀬仁,2021,紀伊半島北部における短期的スロースリップイベントのすべり領域の傾斜データによる制約-すべり領域と微動発生領域の空間的比較-,神戸大学都市安全研究センター研究報告,25,9-21

Uchida, N., R. Bürgmann,2021,A Decade of Lessons Learned from the 2011 Tohoku-oki Earthquake,Review of Geophysics,59,2,doi:10.1029/2020RG0007132021

Uchida, N., and R. Bürgmann,2021,Learning from a disastrous megathrust earthquake,EOS,102,doi:10.1029/2021EO159741

・学会・シンポジウム等での発表

浅井ゆう子・島伸和・羽入朋子・松野哲男・廣瀬仁・南拓人・杉岡裕子,2021,鬼界海底カルデラ付近で得られた海底圧力観測の初期的な結果,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG45-13

馬場 慧・小原一成・武村俊介・竹尾明子・栗原亮,2021,日本周辺の超低周波地震活動における時間変化の特徴の定量化,日本地震学会2021年度秋季大会,S09-26

Baba, S., S.Takemura and K.Obara, A.Takeo, Y.Yamashita, M.Shinohara,2021,Scaled energy of shallow slow earthquakes in Hyuga-nada, southwest Japan,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-P10

Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura,2021,The moment release rate of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula based on NIED Hi-net tilt data (2002-2020),International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021,O-09

Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura,2021,The moment release rate of short-term slow slip events in the northern Kii Peninsula from 2002 to 2015 based on NIED Hi-net tilt data,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-17

Hiramatsu, Y., Y. Tanaka and A. Kobayashi,2021,Gravity data analysis to extract temporal gravity anomalies associated with slow slip events in the Ryukyu trench,AGU Fall Meeting 2021,G006-854520

Hiramatsu, Y., Y. Tanaka and A. Kobayashi,2021,Gravity data analysis to extract temporal gravity anomalies associated with slow slip events in the Ryukyu Trench,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-P26

Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura,2021,Slow slip events in the Bungo Channel and Hyuganada areas from 2018 to 2019 detected by a GNSS observation network,International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021,P-19

Hirose, H., T. Matsushima, T. Tabei, T. Nishimura,2021,Slow slip events in the Bungo Channel



and Hyuganada areas from May 2018 to June 2019 detected by a GNSS observation network,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-P15  
加藤愛太郎・竹尾明子・小原一成,2021,短周期地震計アレイ観測による深部低周波微動の高速移動現象,日本地震学会2021年度秋季大会,S09-19  
Kurashimo, E., K. Mochizuki, T. Iidaka, T. Takeda, K. Shiomi, S. Kodaira and K. Obara,2021,Detailed seismic structure of the slow-earthquake source region beneath the western part of Shikoku, SW Japan, revealed by active seismic experiments,International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021,P-28  
栗原 亮・小原一成,2021,雌阿寒岳・日光・焼岳での周期的に発生する火山性深部低周波地震活動,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG48-04  
前田拓也・小原一成・竹尾明子、松澤孝紀、田中優作,2021,深部低周波微動から検出された2次的スリップフロントの特徴,日本地震学会2021年度秋季大会,S09-21  
Maeda, T., K. Obara and A. Takeo, T. Matsuzawa,2021,Comprehensive detection of tremor migration using multiple time windows beneath Kii Peninsula,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-21  
小原一成,2021,スロー地震の活動様式とその地質学的背景,日本地質学会第128年学術大会,T3-O-1(招待)  
Obara, K,2021,Systematics and heterogeneity of deep and shallow slow earthquakes,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-19  
Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose,2021,Development of the detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-13  
Takagi R. and K. Nishida,2021,Ambient noise tomography in the offshore forearc region along the Japan trench using S-net dat,日本地球惑星科学連合2021年大会,SSS02-04 (Invited talk)  
Takemura, S., K. Obara, K. Shiomi, A. Takeo, S. Baba,2021,Migration characteristics of shallow very low frequency earthquake episodes southeast off the Kii Peninsula,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-P01  
竹尾 明子・小原一成,2021,SEEDフォーマット地震記録のリアルタイム伝送システム構築とGPS故障点の時刻補正,日本地球惑星科学連合2021年大会,STT35-P04  
Teshiba, S., H. Hirose,2021,A comparison of the source areas in Hyuganada among afterslip of two interplate earthquakes in 1996 and successive slow slip events,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG39-P28  
Yu, F., E. Jamali Hondori, and J.-O. Park,2021,Pre-stack depth imaging and pore-fluid pressure estimation along the Nankai Trough subduction zone off the Kii Peninsula,日本地球惑星科学連合2021年大会,SCG45-06

(10) 令和3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：宮崎、菊川、豊橋、御前崎、足摺岬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、足摺岬

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）

項目：地震：磁力観測（全磁力・3成分）

概要：東海地方、石垣島、西表島において地磁気観測を実施した。

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：東海地方、石垣島、西表島

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）

項目：地震：MT・AMT観測

概要：四国西部域において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

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）

項目：地震：地震：短周期地震観測

概要：四国東部で100点の稠密地震観測を実施した

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：徳島県

調査・観測期間：2021/12/13-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) 令和4年度実施計画の概要：

### 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

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」で構築されたスロー地震データベースの運用維持、カタログ追加登録等の事業を学術変革領域研究「Slow-to-Fast地震学」と協力して継続的に発展させるとともに、様々な種類のスロー地震の活動特性の解明を進める。

### 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

科研費・新学術領域研究「スロー地震学」において設置した機動的広帯域地震観測点の維持、データ収集を行い、深部超低周波地震の検出、活動特性や他のスロー地震との相互作用の解明を進める。

### 3. 深部低周波地震の高速移動現象の解明

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

豊後水道周辺地域においてこれまでに構築してきた機動的GNSS連続観測点での地殻変動観測および座標値解析を継続して実施する。観測が停止している拠点での早期再開を目指す。それと並行して、過去の長期間のデータを活用してSSEの活動様式を明らかにし、微動など他の活動との関連性についても調査を進める。

### 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

開発したトモグラフィ手法をS-netデータに適用し、高分解能な構造推定をもとに、東北沖におけるスロー地震発生環境を明らかにする。また、南海トラフにおいては、引き続きGNSSデータに基づくスロースリップ検出手法の拡張及びSSEの系統的検出を行う。

## 6. スロー地震と中・大規模地震の関係の解明

世界の繰り返し地震の抽出を進める。また大地震とスロースリップの関係について、日本および世界の沈み込み帯の繰り返し地震を用いて調べる。

## 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

5か年計画に基づき、御前崎、菊川、豊橋、足摺岬、宮崎における絶対・相対重力観測を継続するとともに、地下水等のノイズを低減する手法を開発する。四国西部域におけるNetwork-MT観測を継続するとともに、引き続き比抵抗構造変化検知可能性を探る。また、四国全域にわたる3次元比抵抗構造推定を試みる。東海地方、石垣島、西表島における地磁気観測を継続するとともに、地磁気変化の標準場モデルの精度の向上と更新を進める。

## 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

四国東部での稠密地震観測を継続して実施するとともに、新型コロナウイルス感染症の状況を考慮しながら可能な限り早い時期に水の子島観測点の再構築作業を行う。また、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ために、四国等で取得された稠密地震観測データの解析を引き続き実施する。

## 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

紀伊半島の熊野沖や四国の足摺岬沖南海トラフのMCSデータを用いたPSDM処理を行うことで、P波速度構造モデルを求め、浅部デコルマ付近の間隙水圧を定量的に推定する。これらの間隙水圧分布を浅部スロー地震発生と比較し、浅部スロー地震発生の地域性を規定する、沈み込む四国海盆堆積物の岩相層序と流体分布について考察する。

## 10. スロー地震と地震発生との関連性

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。

### (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

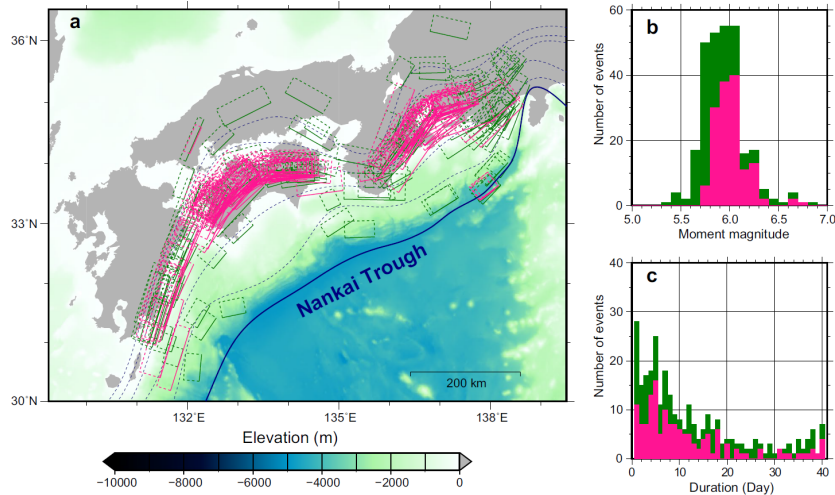


図1: (a) 本手法で検出された短期的SSEの分布。ピンクはクラス1（より信頼性が高いもの）のSSE断層モデル、緑はクラス2（信頼性がやや劣るもの）の断層モデル。(b) 推定されたSSEの地震モーメントの頻度分布。(c) 同じく継続時間の頻度分布。

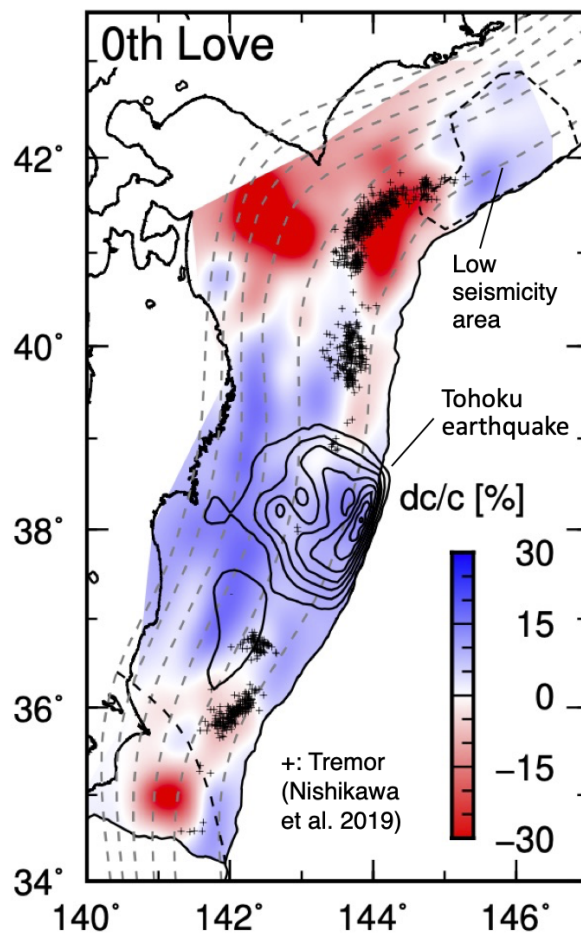


図2: 周期14秒のラブ波基本モードの位相速度マップ。2011年東北沖地震すべり域はInuma et al. (2012)、根室沖の微小地震空白域はTakahashi and Kasahara (2007)、微動はNishikawa et al. (2019)による。

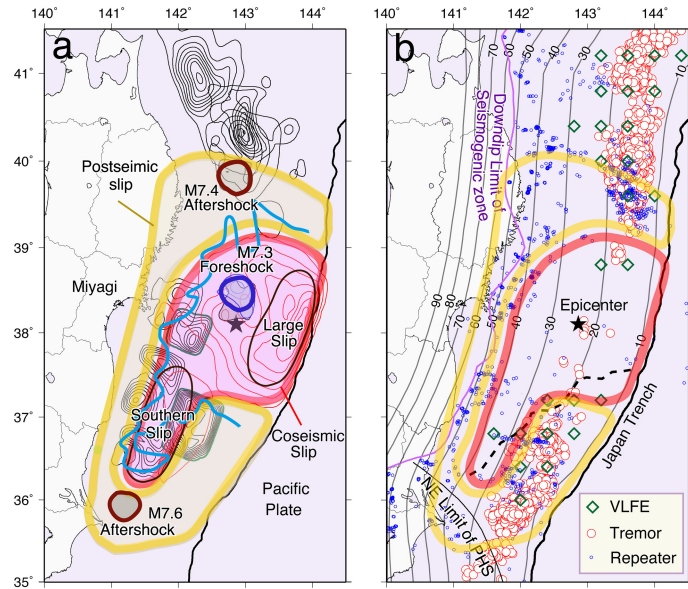


図3: 東北沖地震の滑り域とその周囲で発生した諸現象のまとめ (Uchida and Burgmann, 2021)。

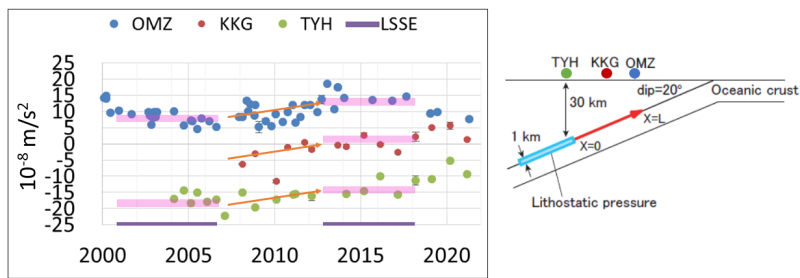


図4: 東海地方で観測された重力異常。  
 長期的SSE中に重力は一定もしくは減少傾向が見られる。流体が浅部へ移動したとするとこの変化を説明できる (Tanaka et al., 2018)。

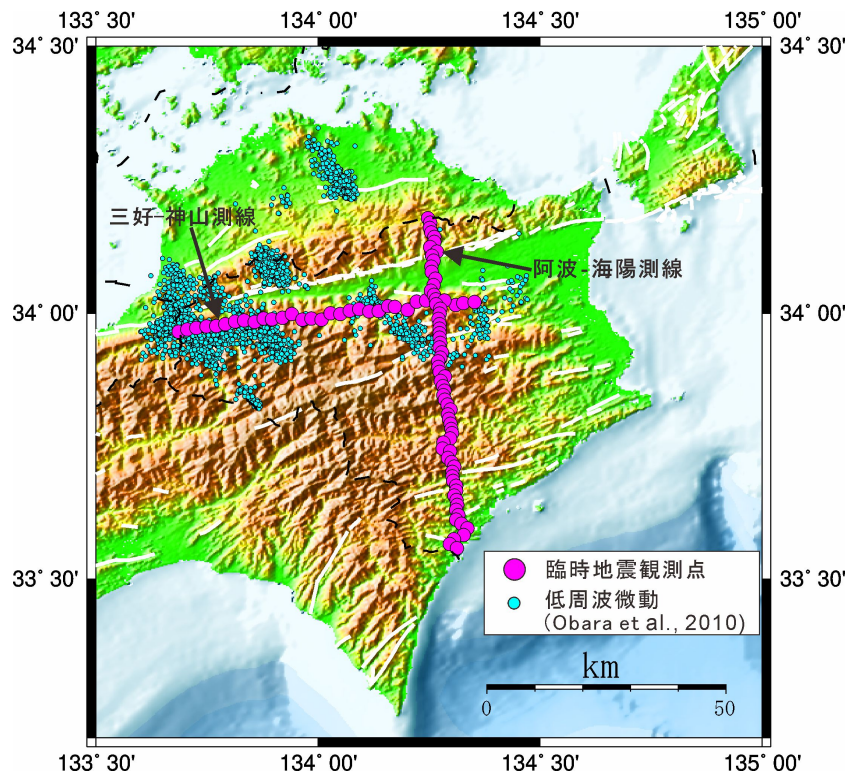


図5: 四国東部における観測点配置と低周波微動分布図。

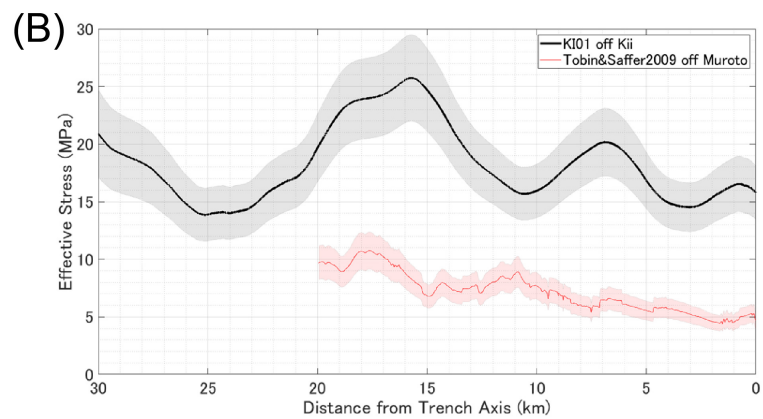
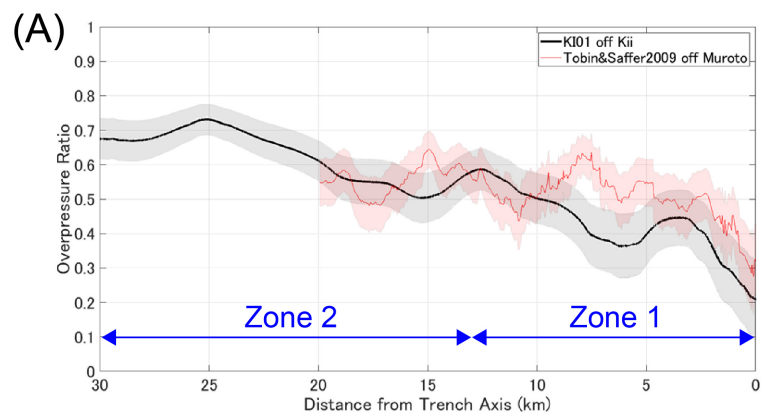


図6: 南海トラフ沈み込み帯のMCSデータを用いたデコルマの物性。  
黒線は紀伊半島の潮岬沖の値（本研究、測線KI01）であり、赤線は四国の室戸沖の値（Tobin and Saffer, Geology, 2009）である。

- (A) 過剰間隙水圧比（静水圧で規格化された間隙水圧比）を推定誤差とともに示す。
- (B) 鉛直有効応力を推定誤差とともに示す。