

## 1 (1) 海溝型地震

「海溝型地震」計画推進部会長 小原一成（東京大学地震研究所）

副部会長 西村卓也（京都大学防災研究所）

海溝型地震の発生機構を科学的に解明することは、海溝型地震の発生予測ならびに地震に伴う地震動、津波などによる災害に備えるための基本として重要である。海溝型地震計画推進部会では、主としてプレート境界で発生する海溝型地震を対象に、地震現象に関する過去データの収集と整理、地震現象の解明、地震発生場の解明、地震現象のモデル化、モニタリングによる地震活動予測、先行現象に基づく地震活動予測、及び観測・解析技術の開発を進めてきた。加えて、海洋プレート内部で発生するスラブ内地震についても発生機構の解明に関する研究を行っている。

### 5年間の成果の概要と今後の展望

平成26年度より「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において5年間続けられてきた観測研究は、海溝型地震という現象に対する我々の理解を深める多くの成果を挙げてきた。平成30年度における個別の成果は次節に詳しく述べるが、ここでは5年間の成果の概要を述べる。

プレート境界域で発生する低周波微動やスロースリップイベント（SSE）といったスロー地震に関する研究については、様々な地域における詳細な発生履歴や発生過程、スロー地震間の相互作用に関する観測研究、地震波速度や減衰、比抵抗構造などの発生場を理解する研究が活発に行われ、現在最も研究が進んだトピックであると言える。スロー地震に関する研究は、モニタリングに基づく実データを用いた観測研究だけでなく、実験室においてスロー地震発生の背景に潜む摩擦特性を理解しようとする岩石摩擦実験研究や断層摩擦構成則を用いたスロー地震のシミュレーション研究、GNSSデータとシミュレーションのデータ同化による摩擦パラメータの推定と推移予測を目指す研究なども行われ、これらの研究が本部会の成果を牽引している。スロー地震は、通常地震活動が不活発な領域においても頻発に発生する現象であることから、プレート境界面の状態の時間変化をモニタリングする上で貴重な情報をもたらす。スロー地震と大地震の関係性についてはObara and Kato (2016) によって、(1) Analog（類似現象）、(2) Stress meter（応力状態を反映するインジケータ）、(3) Stress transfer（周囲への応力転荷）という3点において整理され、スロー地震を用いた海溝型地震研究のさらなる活性化に貢献した。SSEによる周囲への応力転荷については、東北沖地震でも地震活動や海底水圧計データの解析から地震前にSSEが発生していたことが知られていたが、2014年にチリとメキシコで発生したイクケ地震( $M_w$ 8.1)とパノア地震( $M_w$ 7.3)は、GNSSデータによって本震前にそれぞれの震源域周辺でSSEが発生していたことが明瞭に捉えられており(Ruiz et al., 2014; Radiguet et al., 2016)、SSEによって本震がトリガーされた可能性が指摘されている。似たような事例は近年のGNSS観測網の拡大によって相次いでおり、大地震がスロー地震による応力転荷によってトリガーされることが珍しくないことを示していると考えられる。日本海溝・千島海溝沿いにおいては、繰り返し地震と陸上GNSSのデータから、数年程度の周期的なSSEが発生しているこ

とが発見され、このような周期と同期してM5以上の地震が活動が活発化していることが示された (Uchida et al., 2016)。SSEが大地震をトリガーする条件については、さらなる研究が必要であるが、GNSSデータの解析手法の高度化 (例えば, Nishimura et al., 2014; Takagi et al., 2019) や小繰り返し地震を用いたプレート間滑りの解析技術の高度化 (Nomura et al., 2017) により短期的SSEや長期的SSEの検出精度も向上しており、この5か年の研究によりSSEのモニタリングが大地震の発生予測へ貢献できる可能性を示されたと考えられる。

一方、岩石実験やシミュレーションに基づく断層摩擦特性の理解に関する研究は、本計画の究極的な目標である地震発生予測を行う上でも根幹となる研究であり、この5年間は主としてスロー地震を対象とした研究の進展が見られた。海底掘削や海底面で採取された岩石や調査に基づいて、プレート境界断層を構成する物質を用いた断層摩擦実験からは、断層ガウジの組成や温度圧力条件、断層の滑り速度によって摩擦特性がどのように変化するか調べられた。その結果、同一深度でも断層帯を構成する堆積物・岩石によって、地震性・非地震性双方の多様な断層運動が起こることがわかった。また、東北沖地震の震源域の断層帯の構成物質の実験から、震源に浅部付近の摩擦パラメータ $a$ - $b$ が0付近の領域で間隙水圧が上昇すると、スロー地震が発生する条件が現れることもわかった。シミュレーションにおいても、断層面の幾何形状や物性の不均質に対する地震やスロー地震の発生条件が調べられ、断層の粗さが増すと巨視的な滑り挙動が安定的になることが見出されるとともに、房総沖や八重山諸島で発生したSSEについて推定された断層滑りの時間発展 (例えば, Fukuda et al., 2018; Kano et al., 2018) から、摩擦パラメータの推定が行われている。摩擦構成則を用いた断層滑りのシミュレーションに、GNSSなどのモニタリングデータを同化する研究についても、2003年十勝沖地震のGNSSデータを用いて震源域周辺の摩擦パラメータの推定に成功したこと (Kano et al., 2015) は特筆に値する。データ同化により断層摩擦パラメータ推定の精度を上げるためには、断層滑り速度が時間変化している時のデータを使う必要があるため、SSEはデータ同化による推移予測の検証に最も適した現象である。よって次期計画においては、豊後水道域などの長期的SSE発生領域でデータ同化手法の有効性を確認し、巨大地震発生域を含む南海トラフ全体を対象とした研究などを進めていくことが期待される。なお、海溝型大地震の再来周期は一般に数十年以上であり、決して頻度の高い事象ではない。よって日本列島におけるモニタリングだけでは、モデルを検証するための十分な事例を積み重ねることは難しい。そのため、ニュージーランドなどの海外をフィールドとした観測研究によって事例を増やすことや、断層摩擦構成則に基づくシミュレーションによって、SSEが巨大地震をトリガーする条件やSSEから巨大地震発生までにかかる時間を検討すること (Ohtani et al., 2019) は、次期計画でも推進していくべきである。

スロー地震発生域を含むプレート境界断層及びその周辺の地下構造に関する研究も着実な成果を挙げている。南海トラフや相模トラフなどにおける研究から、地域性はあるものの多くの領域で見られる特徴として、スロー地震の発生領域周辺は、高 $V_p/V_s$ で地震波の減衰が大きく、プレート境界からの反射波が明瞭であるという点が挙げられる。これらは高間隙圧の流体の存在がスロー地震の発生条件に関わっていることを示唆しており、茨城県南西部においてスロー地震の発生と地震波減衰構造の時間変化が同期していること

が確かめられた(Nakajima and Uchida, 2018) ことは、流体とスロー地震の関係性をより明確に示した研究であると言える。流体の存在以外にも、断層の幾何形状や断層物質の物性などが断層滑りの特性を規定していると考えられ、今後もプレート境界域の地下構造や沈み込む海洋プレート側の物質科学的特性と大地震及びスロー地震の関係を明らかにしていく必要がある。

低頻度大規模地震に関して、津波堆積物や地形地質調査などによる過去の地震の履歴に関する研究も、精力的に進められた。東北日本弧においては、まだ確定的な結果は得られていないものの、17世紀の千島海溝地震、1611年慶長三陸津波地震、1454年享徳地震、869年貞観地震などに対応する津波の浸水範囲がかなり明らかになった。西南日本においても過去の南海トラフ地震の津波の浸水範囲が明らかになり、大きな浸水域を伴う地震は歴史地震の再来間隔よりも長い400-1000年間隔であることが明らかになった。また、房総半島南部の海岸段丘の離水年代の再調査から、大地震の再来間隔が非常にばらつきが短くなることが明らかにされ、従来考えられてきた元禄型関東地震の再来間隔を再考する必要性が示された (Komori et al., 2017)。

スラブ内地震についても、高精度の震源決定や断層パラメータの推定により、起震応力場が空間的に大きく変化することや相似地震の断層面が相補的であることがわかった。また、スラブ形状と斜め沈み込みを考慮した三次元温度構造のモデリングから、東北・関東地方においてスラブ内地震及びプレート境界地震が起きる温度範囲が明らかになった。また、石膏の脱水摩擦変形試験からは、冷たいスラブ内の代表的な含水鉱物であるローソナイトの変形特性も明らかになり、これらの研究を進めることにより、脱水脆性化によって生じると考えられるスラブ内大地震の発生ポテンシャルが評価できる可能性が示された。

以上の成果に加えて、この5年間における進展として重要なものとして、地震及び地殻変動観測における海底観測技術の進展と海底観測によって初めて明らかになった諸現象があげられる。海溝型地震の震源域の大部分は海底下であるため、微小なシグナルを捉えるためには、海底での観測が必要不可欠である。GNSS-Aでは、観測方法やデータ解析手法の高度化、観測の高頻度化により、日本海溝や南海トラフ沿いの地殻変動の時空間変化が詳細に捉えられるようになった。日本海溝沿いの観測結果は、東北沖地震の余効変動の時空間発展を明らかにし、地下のレオロジー構造やプレート境界断層の摩擦特性に関する情報をもたらした。また、南海トラフ沿いの観測結果は、プレート境界面の現在の固着分布の推定に用いられ、陸上の観測点だけでは空間解像度が乏しい沖合の領域における固着分布の不均質性が初めて明らかになった(例えば, Yokota et al., 2016; Nishimura et al., 2018)。最近では紀伊水道沖で変動速度の時間変化が捉えられ、プレート境界浅部の長期的SSEが発生していると考えられる。また、自己浮上式海底地震計においても広帯域地震計を搭載した機器開発が進められていることに加えて、1年以上の長期観測を繰り返し実施することにより東北沖地震の震源域の時空間変化が捉えられ、本震直後はほとんど見られなかった三陸沖でのプレート境界地震が2-3年後には発生するようになったことがわかった。地震観測網については、南海トラフ沿いにDONET、日本海溝沿いにS-netというケーブル式の海底観測網が構築されたことによっても、沖合のスロー地震活動に対する知見は大きく深まっている。DONETでは、掘削孔における間隙圧や傾斜の測定から南海トラフの浅部で短期的SSEが繰り返し発生していることが示された (Araki et al., 2017)。

災害軽減に貢献するという本計画の目標に関しては、本部会で行われた研究の多くは地震現象の解明のための研究であり、一見すると災害軽減に直結する研究は少ないように見える。特に、前計画から続けられてきた地震発生予測によって災害軽減に資するという目標までは、未だ道半ばと言わざるを得ない。しかし、本計画で進められた過去の海溝型地震や津波の発生履歴による研究は、その地域における過去の災害そのものの記録であり、今後起こりうる災害を想定する上で必要不可欠な情報であるため、災害軽減に貢献するものである。さらに、東北沖地震の余効滑りにより三陸沖北部などの過去に発生した大地震の震源域への応力载荷が進んでいる可能性が示された (Iinuma et al., 2016) ことや、地震サイクルシミュレーションにより、日向灘のM7地震が数年以内に南海トラフ巨大地震をトリガーするシナリオが示されたこと (Hyodo et al., 2016) は、地震調査委員会の海溝型地震の長期評価の見直しや内閣府における南海トラフ地震対策において考慮されるなど、本計画の成果が社会における災害軽減に向けた活動に役立てられている例は多い。

災害軽減に貢献するという本計画の5か年においては、工学や社会学分野の研究者が計画に参画し、成果報告会などにおいて研究成果の共有が行われるようになった。このことは、理学研究者を中心とする本部会においても、他分野や社会からのニーズを直接感じ、自分たちの研究を災害軽減の役立てようという意識が高まったように感じられる。本部会における課題においても、シミュレーションを用いて地震間の応力蓄積過程から地震時のダイナミックな破壊過程、強震動や津波の計算までを統一的なスキームで取り扱う研究が始まっており、地震現象の理解から地震津波災害までを一気通貫して扱う研究が実現しつつある。次期計画でも、本計画で進められた研究の方向性を保ちながら観測研究を継続し、社会へのアウトプットを増やして災害軽減に貢献していくことが望ましい。

## 平成30（2018）年度の成果の概要

以下では、本計画の5年目である平成30（2018）年度の成果の概略を述べる。

### 1. 地震・火山現象の解明のための研究

#### (2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

#### **ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明**

日本海溝・千島海溝、相模トラフ、南海トラフ、南西諸島海溝で発生した巨大地震の履歴と発生様式を明らかにするため、海岸や海底において、津波堆積物、地形地質調査、サンゴや有孔虫などの生物痕跡に基づいたデータ収集と整理が行われた（北海道大学〔課題番号：1002〕、名古屋大学〔課題番号：1703〕、海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕、産業技術総合研究所〔課題番号：5004〕）。

北海道太平洋岸の登別市から根室市までの11点で、17世紀の津波堆積物もしくはその候補となる砂層について同一手順・手法でサンプリングと泥炭層の炭素同位体年代を測定し、広域対比を試みた（図1）。その結果、1640年の北海道駒ヶ岳津波の堆積物は噴火湾から苫小牧市まで分布し、1611年慶長三陸津波の堆積物は、苫小牧市からむかわ町にかけて分布するが、十勝地方から釧路地方に分布する津波堆積物は1611年よりは後年のイベントである可能性が高い（北海道大学〔課題番号：1002〕）。志摩半島沖の安乗口海底

谷付近の海底活断層に関して、平成 28-29 年度に取得したコアの一部について有孔虫分析を実施し、放射性炭素年代測定を行った。その結果、コア深度 0.81 m に認められる不整合面の形成時期が約 1 万年前と推定された。この不整合面と断層変位地形から、対象とした海底活断層は約 1 万年前以降、1 回あるいは複数回の活動によって上下方向に約 10 m 変位した可能性がある。この海底活断層は南海トラフのトラフ軸と比べて陸域に近いため、生じた津波は沿岸域に短時間で到達すると考えられる（名古屋大学 [課題番号：1703]）。

## イ. プレート境界巨大地震

### （東北沖）

2011 年（平成 23 年）東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）の震源域やその周辺では、陸上及び海底での地震・地殻変動観測から東北沖地震以降の様々な地震活動・地殻変動・地下構造の変化が捉えられている（東北大学 [課題番号：1210]，東京大学地震研究所 [課題番号：1503]，東京大学地震研究所 [課題番号：1510]，京都大学理学研究科 [課題番号：1803]，海洋研究開発機構 [課題番号：4002]，海上保安庁 [課題番号：8001]）。

東北沖地震発生前後に日本海溝域で実施された海底地震観測及び陸上定常観測データから、同領域で発生した地震の震源とマグニチュードの詳細なカタログを作成し、東北沖地震前後の地震活動の特徴を明らかにした（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。地震波形の振幅と相関を用いて、プレート境界面付近の地震を自動検出・震源決定し、震源の時空間分布や規模別頻度分布を得た。その結果、東北沖地震発生前においては、北緯 39 度付近で活動が変わり、北側の低活動域が少なくとも東北沖地震発生前の数年間継続したことを示した。一方、東北沖地震発生後においては、本震の大滑り域に顕著な低活動域、その周辺で高活動域が見られた。Gutenberg-Richter 則 (G-R 則) を仮定し、地震の規模別頻度分布から  $b$  値を求めると、東北沖地震後は低  $b$  値が広く分布することが明らかになった（図 2）。さらに、本震時に高周波破壊を起こした領域では、東北沖地震発生後に  $b$  値が低下し、地震後の頻度分布は G-R 則から逸脱することが推定された。このような地震活動の特徴は、破壊に伴う応力変化とプレート境界面の摩擦状態変化が原因と考えられる。

東北沖地震の地震時変位及び地震後 7 年間の変位時系列データを用いて、プレート境界の摩擦パラメータ、海洋マントル及びマントルウェッジの Maxwell 及び Kelvin 要素の粘性率、地震時の滑り分布とそれに対する平滑化パラメータを同時に推定する手法の開発を行った（京都大学理学研究科 [課題番号：1803]）。このモデルでは、地震時の応力変化によって粘弾性緩和と余効滑りが駆動され、余効滑りの時間発展は摩擦構成則に従うと仮定するため、モデルによる余効変動の計算値は、プレート境界の摩擦パラメータ、マントルの粘性率、地震時の滑り分布等の関数となる。このモデルを東北沖地震の地震時及び地震後 7 年間の地表変位データに適用し、図 3 に示すような地震時の推定滑り分布とモデルから計算される積算余効滑り分布により、観測された余効変動の時空間パターンを水平・上下変動共に概ね説明することができた。

## (南海トラフ)

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、南海トラフ周辺域での地殻変動観測が継続されており、プレート境界固着の影響による地殻変動が観測された(海上保安庁[課題番号：8001])。なお、後述するように紀伊水道沖では、地殻変動速度の時間変化が観測された。

### (3) 地震・火山噴火の発生場の解明

#### ア. プレート境界地震

茨城県南西部のフィリピン海プレート上面付近で2004年から2015年に発生した地震を用いた解析により、繰り返し地震の活動が約1年周期で活発化すること、その活動と同期してプレート境界直上の地震波の減衰特性が大きくなること、さらにそれから数か月遅れて浅い地震活動が活発化することが明らかになった(図4)(東京大学地震研究所[課題番号：1510], Nakajima and Uchida, 2018)。これら一連の活動は、1) 約1年周期で発生するプレート境界でのスロースリップイベント(SSE)により繰り返し地震が活発化する、2) SSEに伴ってプレート境界の水が上盤に排出され、地震波の減衰を大きくする、3) 排出された水は数か月かけて浅部に上昇し、上盤プレート内で地震を誘発する、と考えることで観測された時空間変化を説明できる。このようなシナリオに基づくと、SSEによって「水の移動」がトリガーされ、移動した水が上盤プレート内やプレート境界の破壊強度を低下させ、そこで地震を誘発する可能性が示唆される。

プレート間の滑り現象を規定する構造不均質を明らかにする目的で、2017年度に和歌山県の深部低周波微動活動が不明瞭な領域における測線(図5)で取得した稠密自然地震観測データ、制御震源地殻構造探査データに対して、トモグラフィー解析、反射法解析をそれぞれ実施した(東京大学地震研究所[課題番号：1509])。また、深部低周波微動活動域の詳細な地震波減衰構造を推定するために、今までの稠密自然地震観測で得られた波形データを使用して、Q値インバージョン解析を行った。深部低周波微動が不活発な領域を通る測線下の反射法断面図(図6)からは、測線北側から中央部の深さ25 km付近に明瞭な北傾斜の反射面が確認でき、トモグラフィー解析で得られた速度構造(図7)と比較すると、島弧側のモホ面に対応すると考えられる。測線南端の深さ22 km付近から確認できる北傾斜の反射層は、フィリピン海プレート上面に対応すると考えられる。この反射層の層厚は、紀伊半島北東部下の微動活動が活発な領域におけるフィリピン海プレートに対応する反射層(Iwasaki et al., 2008)の層厚よりも薄くなっている。このことから、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。深部低周波微動発生域は紀伊半島東～中部では海洋プレート内、西部では海洋プレート上面付近に存在し、既存研究から高 $V_p/V_s$ 域に位置すると推定されている。地下流体の存在領域は低Q・高 $V_p/V_s$ で特徴づけられることを踏まえると、本研究の結果は紀伊半島の中中部・西部では地下流体の存在する環境で深部低周波微動の活動が活発になっている可能性を示している。また、紀伊半島東部では下部地殻の不透水層によって、マンタルウェッジ端部でスラブ起源流体が滞留している可能性がある。さらに、既存研究では中央構造線沿いの領域で高 $V_p/V_s$ が得られていることから、紀伊半島東部の深部低周波微動発生域で生じた高圧流体は、一部がマンタルウェッジへ移動したのち、中央構造線に沿って上昇

している可能性が示唆された。

## イ. 海洋プレート内部の地震

東北地方中央部の太平洋スラブ上面で発生している地震の震源とメカニズム解を決定したところ、正断層地震と逆断層地震が 100 m 以内という非常に近接した場所で発生していることが明らかになった（東北大学 [課題番号：1201]）。この結果は、エクロジャイト化に伴う体積減少によりプレート表面近くで正断層地震が発生するという従来の解釈を支持するものであるが、相転移による応力擾乱は極めて局所的であることを強く示唆する。一方、日本列島の周辺で発生しているスラブ内地震の地震波放射エネルギー効率を推定した（東北大学 [課題番号：1201]）。解析では観測点毎の結果のばらつきを小さくするために観測点補正値をインバージョンにより推定し、その値を用いて観測された地震波放射エネルギー効率を補正した。その結果、地震波放射エネルギー効率は地震の規模とともに小さくなることと深さ 360 km までの範囲では顕著な深さ依存を示さないことが明らかになった。

### (4) 地震現象のモデル化

#### イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

##### (摩擦実験)

防災科学技術研究所が所有する大型振動台を利用した岩石摩擦実験が行われ、以下のような結果が得られた（防災科学技術研究所 [課題番号：3001]）。インド産変はんれい岩を用いたスティックスリップ実験では、通常の高速度破壊イベントに加え、媒質の弾性波速度を越えて高速伝播するゆっくり滑りが発生していることを明らかにした。また、過去の実験データを解析し、高速な破壊伝播を模擬断層から離れて設置した歪みゲージによって観測する際に大きな誤差が発生しうることを指摘するとともに、数値計算から得られた波形と観測波形とをフィッティングさせて模擬断層の真の破壊パラメータを推定する手法を開発した。スティックスリップが繰り返し発生する模擬断層の断層帯が発達する過程を推定するため、断層面に沿って伝播するレイリー波の群速度変化を推定する手法を開発した。1 mm/s の載荷速度で実施した実験結果に適用したところ、約 1000 回のイベント発生を経ておよそ 1% の速度低下が検出された。また、ガウジを断層面に挟んだ摩擦実験からは、速度状態依存摩擦構成則のパラメータが断層長に依存するかどうかを調査した。推定された摩擦パラメータ ( $a-b$ ,  $D_c$ ) は断層長サイズには依存しない傾向が見られたが、滑り距離に伴って変化する様子が確認された。

##### (シミュレーション)

フラクタル的な凸凹をもつ粗い断層面における地震発生過程を調べるため、境界要素積分法によるシミュレーションを行った（東京大学地震研究所 [課題番号：1507], Ozawa et al., 2019）。粗い断層は微小な直線セグメントからなっており、各セグメントには速度状態依存摩擦則を仮定し、状態の発展法則には slip law を用いた。この系で震源核形成ダイナミクスを詳細に追った結果、地震性高速滑りの発生前に非地震性の遅い滑りが発生した後、一方向に移動し(図 8)、断層の粗さが増すと(粗さの振幅が大きい/最短波長が短い)

その移動距離がより長くなることを見い出された。このことは、より大きなモーメントが準備段階の間に解放されることを意味する。さらに、断層の粗さがある程度以上になると、断層は地震性の速い滑りを起こせなくなり、スロー地震のようなイベントが期待されることも見い出された。これらの現象は、断層の粗さによる抵抗応力の概念で定量的に記述される。

速度状態依存摩擦則を用いた豊後水道の長期的 SSE 活動のモデル化において、SSE 領域の浅部延長側に位置する南海トラフ巨大地震震源域に対応する固着域の有無による SSE の滑り速度分布の違いを検討した（京都大学理学研究科 [課題番号：1801]）。その結果を図 9 に示す。固着域がない場合では、円形パッチの中心に対称的に滑りが広がるのに対し、固着域がある場合では、滑り速度の大きな領域が浅部に移り、深さ方向に非対称な分布になっており、GNSS データのスパースモデリングにより得られた滑り分布（Nakata et al., 2017）と似ている（図 9）。そのため、長期的 SSE 領域での摩擦特性及び滑り発展推定には固着域での滑り欠損速度の推定も同時に行う必要があることがわかった。

## 2. 地震・火山噴火の予測のための研究

### (2) モニタリングによる地震活動予測

#### ア. プレート境界滑りの時空間発展

##### (日本海溝・千島海溝)

東北沖地震の震源域南側となる福島県沖に設置した海底地震計アレイの観測により、低周波微動活動が検知された（図 10）（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。微動は約 1 年間の観測期間中に 5 回の顕著な活動期に集中して発生し、それぞれに活動期の中で震央の経時的な移動が見られる。移動の速さはおよそ 5 km/日であり、南海トラフで観測される微動が示すものより有意に遅いが、東北沖地震前に小繰り返し地震から示された SSE のフロントの移動速さに近い。微動が励起した S 波の振動方向の解析により、微動は低角逆断層型の発震機構解を示す。よって、低周波微動の活動の背景には、繰り返し発生する SSEがあると推測される。微動の発生域は、地殻変動観測から東北沖地震後の余効滑りが継続していると推定されている範囲内であって、比較的狭い時空間の範囲内で余効滑りと SSE とが共存して進行している可能性を示唆する。

岩手県釜石沖の繰り返し地震では、地震サイクル後半に小地震活動が活発化する傾向が、東北沖地震後の地震発生間隔が極端に短くなった期間における傾向は明らかになっていない。そこで、2011 年 3 月 11 日から 34 日間の連続波形データに対し Matched Filter 法 (MF 法) を適用し、釜石沖の繰り返し地震 (M4.8 前後) の極近傍で発生したと考えられる 25 個の地震を検出した（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]，奥田・他，2019）。得られた地震活動は、繰り返し間隔が 9～23 日と極端に短くなっている時期においても、地震サイクル後半に活動が活発化する傾向が保存されていたことを示す。地震サイクルにおける小地震の活動の静穏化・活発化が釜石沖の本震の繰り返し間隔に依存しないという結果は、このような活動が、繰り返し間隔の長短によらず固着域内部での応力状態や固着域の階層性といったような同一の性質に支配されている可能性を示唆する（図 11）。



### (南海トラフ)

南海トラフの海溝型巨大地震を引き起こす応力蓄積と将来発生する断層の動的破壊過程及び内陸地震への影響を考慮するためのモデリングを実施した(防災科学技術研究所[課題番号:3001])。まず、粘弾性緩和の影響を考慮してGNSSデータからプレート間滑り遅れ速度分布を推定した(Noda et al., 2018)。アセノスフェアの粘弾性緩和を考慮することで、滑り遅れ速度のピークが従来の研究よりも海溝の近くに存在することを示した。次に、滑り遅れ速度の推定結果から算出したプレート境界への応力蓄積速度を入力値として南海トラフ海溝型地震の断層破壊シミュレーションを実施し、今後発生しうる地震のシナリオを複数作成した。また、推定したプレート境界の滑り遅れ分布と小地震解析による西南日本の背景応力場推定とを統合解析し、プレートの沈み込みが内陸地震発生層に引き起こす剪断歪みエネルギー量を推定した。その結果、剪断歪みエネルギーの増減分布と地震分布との間には有意な相関があることを確認した(Saito et al., 2018)。

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、紀伊水道沖の2観測点において2017年末頃から2018年の初め頃にかけて、南向きの非定常地殻変動を観測した(海上保安庁[課題番号:8001])。海底観測点で観測された変位分布と陸上観測点で地殻変動が観測されていないことから、プレート境界の浅部におけるSSEが原因と考えられる(図12)。

プレート境界浅部(海域)で発生する滑り現象把握のため、海域の現実的な3次元地下構造の影響を考慮した解析手法を開発した(防災科学技術研究所[課題番号:3002], Takemura et al., 2018)。この手法を紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震に適用したところ、陸域の広帯域地震観測網F-netの記録のみで、海底地震計による解析結果とほぼ同様な解が得られ、高い精度の解析が可能であることを確認した。海域での観測がなされていない期間の解析結果からも、紀伊半島南東沖で発生する浅部超低周波地震が総じてプレート境界の滑りを反映する低角逆断層となることが示され、陸域観測網のデータの存在する長期の活動把握が可能となった。

### (南西諸島海溝)

琉球海溝南西部八重山諸島近傍において、およそ6か月周期で繰り返し発生するSSEに伴う断層滑り速度の時間発展の振る舞いがSSE毎に異なることを示し(京都大学理学研究科[課題番号:1803], Kano et al., 2018)、この滑り速度の振る舞いを、1自由度のばねスライダモデルでモデル化し、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いてSSE発生域の摩擦パラメータの推定を試みた。その結果、SSEごと、また一つのSSEの時系列の中でも、推定に使用するデータ期間により摩擦パラメータの分布が異なることがわかった。単純なモデルを用いたため、大自由度系のモデルを用いた場合の検討は必要ではあるが、この結果はプレート境界周辺の流体分布や摩擦の分布が時間変化している可能性を示唆している。

## 3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

### (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

#### (津波災害)

北海道太平洋沖でM9規模の巨大地震が発生した場合の津波による被害の発生過程を解

明するために、東北沖地震による津波が北海道太平洋沿岸に被害を及ぼした大きな津波後続波について解析した（北海道大学 [課題番号：1002] ,Tanioka et al., 2019）。この津波では、特に函館で9時間遅れで最大波が到達し大きな被害が生じた。後続波の生成過程を解析したところ函館湾の基本モード（49.6分）が励起されたことがわかった（図13）。さらに、その基本モードは函館港沿岸で波高が特に大きくなることがわかった。周期の長い（49.6分）の基本モードを励起するには震源域の大きなM9クラスの巨大地震である必要があると考えられ、北海道太平洋沖の巨大地震による津波の場合でも函館港近傍では大きな後続波による被害に警戒する必要がある。

#### 4. 研究を推進するための体制の整備

##### (2) 研究基盤の開発・整備

##### ウ. 観測・解析技術の開発

##### (海域観測機器)

海底間音響測距に関して、2017年3月に福島沖に設置した機器の回収を行い、通常のDirect Path Ranging (DPR) 基線の解析に加え、音響パスを確実に通すために新たに開発した中継機（インターロゲーター）を用いたIndirect Path Ranging (IPR) のデータについても、データ取得の状況など有用性を精査した（東北大学 [課題番号：1210]）。DPR方式では5局の組み合わせ中に音響パスが確保できたのは、海溝軸をまたぐ1基線のみであったが、海溝軸の収束状況を計測するという当初の最低限の目的は実現できた。その結果、昨年度までの成果である宮城沖の日本海溝と同様に有意な収束は見られず、福島沖の余効滑りが完全に海溝軸まで達していないか、あるいは2017年以降滑りが止まったことを示す結果を得た。一方、IPR方式は、音響パスを確保する目的通り、中層係留で設置した中継機の周囲の5局に対するすべてのパスが通り、正常に測距が行われていたことを確認した。IPR方式の解析手法はまだ確立されていないが、係留した中継機の動きがどの程度の精度でモニターできるかを解析し、その後、中継機を介した各基線長変化を推定する予定である。

次世代型広帯域海底地震計（BBOBS-NX）において自律展開設置・自己浮上方式を改良した新型機（NX-2G）の長期試験観測を2017年4月から実施し、2018年10月に機器とデータの回収に成功した（東京大学地震研究所 [課題番号：1521]）。同地点では通常型のBBOBSも設置され記録が取られており、NX-2Gとのノイズレベル比較を実施した結果、これまでのBBOBS-NXとBBOBSでの差程は水平動ノイズレベルの改善が見られなかった。これは、センサー部と記録部を唯一つなぐ水中ケーブルの引き回しが悪く、ケーブルが十分に海底に落ちていなかったため、海中に浮遊状態にある記録部の振動がセンサー部へ伝わってしまったことによると考えられる。これは容易に解決可能であり、2002年に発案し開発を進めてきた、自己埋設方式センサーによる自己浮上型BBOBSが基本的には実現できた。

次世代海底設置システム試験・評価として、BMS(海底設置型掘削装置)に搭載する観測装置設置装置の開発と海域試験を実施し、水深1,879mにおいて海底下約2.5mにダミーセンサーの設置に成功した（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。水圧計校正技術の検証として、DONET2 観測点近傍において移動式水圧校正装の再現性の検証を行い、0.09hPa（水深0.9mm相当）の再現性を確認した。このような校正技術により水圧計データを用い

た地殻変動観測の高精度化が実現することが示されたといえる。

## 成果リスト

- Agata, R., S. D. Barbot, K. Fujita, M. Hyodo, T. Iinuma, R. Nakata, T. Ichimura, and T. Hori, 2019, Rapid mantle flow with power-law creep explains deformation after the 2011 Tohoku mega-quake, *Nature Communications*, 10, 1385, doi:10.1038/s41467-019-08984-7.
- Ando, R. and Y. Kaneko, 2018, Dynamic rupture simulation reproduces spontaneous multifault rupture and arrest during the 2016 Mw 7.9 Kaikoura earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 12875-12883, doi: doi.org/10.1029/2018GL080550.
- Arai, T., S. Kodaira, T. Takahashi, S. Miura and Y. Kaneda, 2018, Seismic evidence for arc segmentation, active magmatic intrusions and syn-rift fault system in the northern Ryukyu volcanic arc, *Earth Planets Space*, 70:61, doi:10.1186/s40623-018-0830-8.
- Chiba, T., Y. Nishimura, and T. Otsuka, 2018, Fossil diatom assemblages during the last millennium in the Toveri River mouth area, Hokkaido, Japan. *Diatom*, 34, 8-29, doi: 10.11464/diatom.34.8.
- Cho, I., and T. Iwata, 2019, A Bayesian approach to microtremor array methods for estimating shallow S wave velocity structures: Identifying structural singularities. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2018JB015831.
- Fujie, G., S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, T. Takahashi, S. Miura and T. Yamada, 2018, Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin, *Nature Communications*, 9:3844, doi:10.1038/s41467-018-06320-z.
- 富士原敏也・金松敏也・笠谷貴史, 2018, 佐田岬半島沖瀬戸内海における海底地形, 浅層構造, 重力調査. *JAMSTEC Report of Research and Development*, 27, 13-25, doi:10.5918/jamstecr.27.13.
- Fukao, Y., O. Sandanbata, H. Sugioka, A. Ito, H. Shiobara, S. Watada, and K. Satake, 2018, Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan, *Science Advances*, doi: 10.1126/sciadv.aao0219.
- Fujino, S., H. Kimura, J. Komatsubara, D. Matsumoto, Y. Namegaya, Y. Sawai, M. Shishikura, 2018, Stratigraphic evidence of historical and prehistoric tsunamis on the Pacific coast of central Japan: Implications for the variable recurrence of tsunamis in the Nankai Trough, *Quaternary Science Reviews*, 201, 147-161, doi:10.1016/j.quascirev.2018.09.026.
- Hamada Y., T. Hirose, A. Ijiri, Y. Yamada, Y. Sanada, S. Saito, N. Sakurai, T. Sugihara, T. Yokoyama, T. Saruhashi, T. Hoshino, N. Kamiya, S. Bowden, M. Cramm, S. Henkel, K. Homola, H. Imachi, M. Kaneko, L. Lagostina, H. Manners, H.L. McClelland, K.

- Metcalfe, N. Okutsu, D. Pan, M. J. Raudsepp, J. Sauvage, F. Schubotz, A. Spivack, S. Tonai, T. Treude, M.-Y. Tsang, B. Viehweger, D. T. Wan, E. Whitaker, Y. Yamamoto, K. Yang, M. Kinoshita, L. Maeda, Y. Kubo, Y. Morono, F. Inagaki, and V. B. Heuer, 2018, In-situ mechanical weakness of subducting sediments beneath a plate boundary décollement in the Nankai Trough, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:70, doi:10.1186/s40645-018-0228-z.
- Hamahashi, M., G. Kimura, W. Tanikawa, Y. Hamada, Y. Hashimoto, and S. Saito, 2018, Physical property anisotropy of foliated fault rocks: Study from the Nobeoka Thrust, Shimanto Belt, southwest Japan, *Island Arc*, 27, e12257, doi:10.1111/iar.12257.
- Han, R., J.-S. Kim, C.-M. Kim, T. Hirose, J. O. Jeong, and G. Y. Jeong, 2019, Dynamic weakening of ring faults and catastrophic caldera collapses, *Geology*, 47, 107-110, doi: 10.1130/G45687.1.
- Hasegawa, R., A. Yamaguchi, R. Fukuchi, Y. Hamada, N. Ogawa, Y. Kitamura, G. Kimura, J. Ashi and T. Ishikawa, 2019, Postseismic fluid discharge chemically recorded in altered pseudotachylyte discovered from an ancient megasplay fault: an example from the Nobeoka Thrust in the Shimanto accretionary complex, SW Japan, *Prog. Earth Planet. Sci.*, in press
- Hashimoto, Y., M. Stipp, J. C. Lewis and F. Wuttke, 2019, Paleo-stress orientations and magnitudes from triaxial testing and stress inversion analysis in Nankai accretionary prism sediments, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:3, doi: 10.1186/s40645-018-0249-7.
- 廣瀬仁・松澤孝紀, 2018, スロースリップイベントによる応力時間変化の計算: 房総半島スロースリップイベントへの適用と地震活動との対比, *神戸大学都市安全研究センター研究報告*, 22, 20-25.
- Iinuma, T., 2018, Monitoring of the spatio-temporal change in the interplate coupling at northeastern Japan subduction zone based on the spatial gradients of surface velocity field, *Geophys. J. Int.*, 213, 30-47, doi:10.1093/gji/ggx527.
- Ikeda, T. and T. Tsuji, 2018, Temporal change in seismic velocity associated with an offshore  $M_w$  5.9 Off-Mie earthquake in the Nankai subduction zone from ambient noise cross-correlation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:62, doi: 10.1186/s40645-018-0211-8.
- Ioki, K., Tanioka, Y., Yanagisawa, H., and Kawakami, G., 2019, Numerical simulation of the landslide and tsunami due to the 1741 Oshima-Oshima eruption in Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, in press.
- Ishikawa, T. and Y. Yokota, 2018, Detection of Seafloor Movement in Subduction Zones Around Japan Using a GNSS-A Seafloor Geodetic Observation System from 2013 to 2016, *J. Disaster Res.*, 13, 511-517, doi:10.20965/jdr.2018.p0511.
- Kameda, J. and Hirauchi, K., 2018, Rheological properties of composite serpentine-brucite suspensions: Implications for mudflow behavior on forearc

- seamounts, *Marine Geology*, 403, 191-196, doi: 10.1016/j.margeo.2018.06.004.
- Kano, M., Fukuda, J., Miyazaki, S., and Nakamura, M., 2018, Spatio-temporal Evolution of Recurrent Slow Slip Events Along the Southern Ryukyu Subduction Zone, Japan, From 2010 to 2013. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123. doi:10.1029/2018JB016072.
- Kano, M., N. Aso, T. Matsuzawa, S. Ide, S. Annoura, R. Arai, S. Baba, M. Bostock, K. Chao, K. Heki, S. Itaba, Y. Ito, N. Kamaya, T. Maeda, J. Maury, M. Nakamura, T. Nishimura, K. Obana, K. Ohta, N. Poiata, B. Rousset, H. Sugioka, R. Takagi, T. Takahashi, A. Takeo, Y. Tu, N. Uchida, Y. Yamashita, and K. Obara, 2018, Development of a Slow Earthquake Database, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 1566-1575, doi:10.1785/0220180021.
- 加納靖之・細 善信・尾上謙介, 2018, 1960年代の紀伊半島の傾斜計記録の復元, *東濃地震科学研究所地殻活動研究委員会報告書*, 40, 173-175.
- Katakami, S., Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, S. Suzuki, 2018, M. Shinohara, Spatiotemporal variation of tectonic tremor activity before the Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9676-9688, doi:10.1029/2018JB016651.
- Kimura, G., H. Koge and T. Tsuji, 2018, Punctuated growth of an accretionary prism and the onset of a seismogenic megathrust in the Nankai Trough, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:78, doi: 10.1186/s40645-018-0234-1.
- Kinoshita, M., K. Shiraishi, E. Demetriou, Y. Hashimoto, and W. Lin, 2019, Geometrical dependence on the stress and slip tendency acting on the subduction megathrust of the Nankai seismogenic zone off Kumano, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:7, doi:10.1186/s40645-018-0253-y.
- Koge, H., Y. Yamada, A. Ohde, A. Bauville, A. Yamaguchi and J. Ashi, 2018, Dynamic formation process of thick deformation zone on the shallow plate boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:69, doi: 10.1186/s40645-018-0230-5.
- Kubota, T., T. Saito, Y. Ito, Y. Kaneko, LM Wallace, S. Suzuki, R. Hino, and S. Henrys, 2018, Using tsunami waves reflected at the coast to improve offshore earthquake source parameters: Application to the 2016 Mw 7.1 Te Araroa earthquake, New Zealand, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 8767-8779, doi:10.1029/2018JB015832.
- 日下部哲也・亀伸樹, 2018, 津波のグリーン関数Kajiura Filterの級数表現の導出, *地震* 2, 71, 117-119, doi:10.4294/zisin.2017-16.
- 桑野修, 2018, 高速せん断される摩擦接触面の発熱の可視化—断層高速摩擦の素過程解明を目指して—, *可視化情報学会誌*, 38, 149, 65-68.
- Lackey, J., G. Moore and M. Strasser, 2018, Three-dimensional mapping and kinematic characterization of mass transport deposits along the outer Kumano Basin and Nankai accretionary wedge, southwest Japan, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:65, doi: 10.1186/s40645-018-0223-4.
- Miyakawa, A., M. Kinoshita, Y. Hamada and M. Otsubo, 2019, Thermal maturity structures

- in an accretionary wedge by a numerical simulation, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 6:8. doi:10.1186/s40645-018-0252-z.
- Muramoto, T., Y. Ito, D. Inazu, L. M. Wallace, R. Hino, S. Suzuki, S. C. Webb, and S. Henrys, 2019, Seafloor crustal deformation on ocean bottom pressure records with non-tidal variability corrections: application to Hikurangi margin, New Zealand, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 303-310, doi:10.1029/2018GL080830.
- Nagano, A., Y. Yamashita, T. Hasegawa, K. Ariyoshi, H. Matsumoto, M. Shinohara, 2018, Characteristics of an atypical large-meander path of the Kuroshio current south of Japan formed in September 2017, *Marine Geophys. Res.*, doi:10.1007/s11001-018-9372-5.
- Nakajima, J., and N. Uchida, 2018, Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nature Geoscience*, 11, 351-356, doi:10.1038/s41561-018.
- Nakano, M., M. Hyodo, A. Nakanishi, M. Yamashita, T. Hori, S. Kamiya, K. Suzuki, T. Tonegawa, S. Kodaira, N. Takahashi and Y. Kaneda, 2018, The 2016 Mw 5.9 earthquake off the southeastern coast of Mie Prefecture as an indicator of preparatory processes of the next Nankai Trough megathrust earthquake, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:30, doi: 10.1186/s40645-018-0188-3.
- Nishimura, T., Y. Yokota, K. Tadokoro, and T. Ochi , 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14, 535-551, doi:10.1130/GES01529.1.
- Noda, A., T. Miyauchi, T. Sato, and M. Matsu'ura, 2018, Modelling and simulation of Holocene marine terrace development in Boso Peninsula, central Japan, *Tectonophysics*, 731-732, 139-154, doi:10.1016/j.tecto.2018.03.008.
- Noda, A., T. Saito, and E. Fukuyama, 2018, Slip-deficit rate distribution along the Nankai trough, southwest Japan, with elastic lithosphere and viscoelastic asthenosphere, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 8125-8142, doi:10.1029/2018JB015515.
- Obana, K., Y. Nakamura, G. Fujie, S. Kodaira, Y. Kaiho, Y. Yamamoto, S. Miura, 2018, Seismicity in the source areas of the 1896 and 1933 Sanriku earthquakes and implications for large near-trench earthquake faults, *Geophys. J. Int.*, 212, 2061-2072, doi:10.1093/gji/ggx532.
- Ohtani, M., N. Kame, and M. Nakatani, 2019, Nucleation of characteristic earthquakes in simulated cycles involving deep huge slow slip events, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, 1822-1837, doi:10.1029/2018JB016156.
- Otsubo, M., H. Naruse and A. Miyakawa, 2018, Temporal changes in the internal stresses and pore pressures in a large-scale submarine mass transport deposit, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:59, doi: 10.1186/s40645-018-0219-0
- 奥田貴・内田直希・浅野陽一, 2018, Matched Filter法を用いた2011年東北地方太平洋沖地震直後の小地震の検出 -釜石沖繰り返し地震クラスターへの適用-, *地震*, 71,

- 87-101, doi:10.4294/zisin.2017-8.
- Okutsu, N., J. Ashi, A. Yamaguchi, T. Irino, K. Ikehara, T. Kanamatsu, Y. Suganuma, M. Murayama, 2018, Evidence for surface sediment remobilization by earthquakes in the Nankai forearc region from sedimentary records, Geological Society, London, Special Publications, 477, SP477. 22. doi:10.1144/SP477.22.
- Ozawa, S. W., T. Hatano, and N. Kame, 2019, Longer migration and spontaneous decay of aseismic slip pulse caused by fault roughness. *Geophys. Res. Lett.* 46, 10.1029/2018GL081465.
- Poiata, N., J.P. Vilotte, P. Berbnard, C. Satriano, K. Obara, 2018, Imaging different components of a tectonic tremor sequence in southwestern Japan using an automatic statistical detection and location method, *Geophys. J. Int.*, 205, 1548-1573, doi:10.1093/gji/ggy070.
- Saito, T., A. Noda, K. Yoshida, S. Tanaka, 2018, Shear strain energy change caused by the interplate coupling along the Nankai trough: An integration analysis using stress tensor inversion and slip-deficit inversion, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 5975-5986, doi:10.1029/2018JB015839.
- Sawazaki, K., T. Saito and K. Shiomi, 2018, Shallow temporal changes in S wave velocity and polarization anisotropy associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 9899-9913, doi:10.1029/2018JB016261.
- Shibazaki, B., H. Noda, and M. J. Ikari, 2019, Quasi-dynamic 3D modeling of the generation and afterslip of a Tohoku-oki earthquake considering thermal pressurization and frictional properties of the shallow plate boundary, *Pure and Appl. Geophys.*, 176, 1-23, doi:10.1007/s00024-018-02089-w.
- Shinohara, M., T. Yamada, H. Shiobara, Y. Yamashita, 2018, Development and Evaluation of Compact Long-term Broadband Ocean Bottom Seismometer, 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), 1-4, doi:10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559338.
- Suetsugu, D., H. Shiobara, H. Sugioka, N. Tada, A. Ito, T. Isse, K. Baba, H. Ichihara, T. Ota, Y. Ishihara, 2018, S. Tanaka, M. Obayashi, T. Tonegawa, J. Yoshimitsu, T. Kobayashi, and H. Utada, The OJP array: seismological and electromagnetic observation on seafloor and islands in the Ontong Java Plateau, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, 26, 54-64, doi: 10.5918/jamstecr.26.54.
- 高橋美紀・廣瀬丈洋・飯尾能久, 2018, 断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性. *地質学雑誌*, 124, 725-739.
- 田中愛幸・黒石裕樹・香取秀俊, 2018, 光格子時計の地震・火山研究応用の可能性を探る, *地震ジャーナル*, 65, 36-44.
- Takemura, S., T. Matsuzawa, T. Kimura, T. Tonegawa, and K. Shiomi, 2018, Centroid moment tensor inversion of shallow very low frequency earthquakes off the Kii Peninsula, Japan, using a three-dimensional velocity structure model, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 6450-6458, doi:10.1029/2018GL078455.

- Takeo, A., H. Kawakatsu, T. Isse, K. Nishida, H. Shiobara, H. Sugioka, A. Ito, and H. Utada, 2018, In situ characterization of the lithosphere - asthenosphere system beneath NW Pacific ocean via broadband dispersion survey with two OBS arrays, *G-cubed*, 19, 3529-3539, doi:10.1029/2018GC007588.
- Tanigawa, K., M. Shishikura, O. Fujiwara, Y. Namegaya, D. Matsumoto, 2018, Mid to late Holocene marine inundations inferred from coastal deposits facing the Nankai Trough in Nankoku, Kochi Prefecture, southern Japan, *Holocene*, 28, 867-878, doi:10.1177/0959683617752837.
- Tanioka, Y., M. Shibata, A. Gusman, Y. Yamanaka, and K. Ioki, 2019, Generation Mechanism of Large Later Phases of the 2011 Tohoku-oki Tsunami Causing Disaster at Hakodate, Hokkaido, Japan, *Prog. Earth. Planet. Sci.*, 6:30, doi:10.1186/s40645-019-0278-x.
- Todd, E.K., S.Y. Schwartz, K. Mochizuki, L.M. Wallace, A.F. Sheehan, S.C. Webb, C.A. Williams, J. Nakai, J. Yarce, B. Fry, S. Henrys, Y. Ito, 2018, Earthquakes and Tremor Linked to Seamount Subduction During Shallow Slow Slip at the Hikurangi Margin, New Zealand, *J. Geophys. Res.*, 123, 6769-6783, doi:10.1029/2018JB016136.
- Tsuru, T., J. Park, T. No, Y. Kido, and K. Nakahigashi, 2018, Visualization of attenuation structure and faults in incoming oceanic crust of the Nankai Trough using seismic attenuation profiling, *Earth Planets Space*, 70:31, doi:10.1186/s40623-018-0803-y.
- Tsuru, T., K. Amakasu, J. Park, J. Sakakibara, and M. Takanashi, 2019, A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low-velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay, *Earth Planets Space*, 71: 31, doi:10.1186/s40623-019-1011-0.
- Usami, K., K. Ikehara, T. Kanamatsu and C. M. McHugh, 2018, Super cycle in great earthquake recurrence along the Japan Trench over the last 4000 years, *GeoScience Letters*, doi:10.1186/s40562-018-0110.
- Uchida N, R. Bürgmann 2019, Repeating earthquakes, *Annual Review Earth Planet. Sci.*, 47, doi:10.1146/annurev-earth-053018-60119.
- Uemura, M. Y. Ito, K. Ohta, R. Hino, M. Shinohara, 2018, Spatio-temporal changes in the seismic velocity induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake and slow slip event revealed from seismic interferometry, using ocean bottom seismometer' s records, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:87, doi:10.1186/s40645-018-0240-3.
- Wang, K., T. Sun, L. Brown, R. Hino, F. Tomita, M. Kido, T. Iinuma, S. Kodaira, T. Fujiwara, 2018, Learning from crustal deformation associated with the M9 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geosphere*, 14, 552-571, doi:10.1130/GES01531.1.
- Wang, T., J. Zhuang, J. Buckby, K. Obara, H. Tsuruoka, 2018, Identifying the recurrence patterns of non - volcanic tremors using a 2D hidden Markov model with extra zeros, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 10.1029/2017jb015360.



- Wiersberg, T., S. B. Hammerschmidt, S. Fuchida, A. Kopf and J. Erzinger, 2018, Mantle-derived fluids in the Nankai Trough Kumano forearc basin, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:79, doi: 10.1186/s40645-018-0235-0.
- Xu, S., E. Fukuyama, and F. Yamashita, 2019. Robust estimation of rupture properties at propagating front of laboratory earthquakes, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 124, doi:10.1029/2018JB016797.
- Yabe, S. and S. Ide, 2018, Variations in precursory slip behavior resulting from frictional heterogeneity, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 5:43, doi:10.1186/s40645-018-0201-x.
- Yamamoto, R., M. Kido, Y. Ohta, N. Takahashi, Y. Yamamoto, A. Pinar, D. Kalafat, H. Ozener, and Y. Kaneda, 2019, Seafloor geodesy revealed partial creep of the North Anatolian Fault submerged in the Sea of Marmara, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 1268-1275, doi:10.1029/2018GL080984.
- Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe, 2018, Gradient field of undersea sound speed structure extracted from the GNSS-A oceanography. *Marine Geophys. Res.*, 1-12.
- Yokota, Y., T. Ishikawa and S. Watanabe, 2018, Seafloor crustal deformation data along the subduction zones around Japan obtained by GNSS-A observations, *Scientific Data*, 5:180182, doi: 10.1038/sdata.2018.182.
- Yoshida, S., 2018, Numerical simulations of earthquake triggering by dynamic and static stress changes based on a revised friction law, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 123, 4109- 4122, doi:10.1029/2017JB014781.

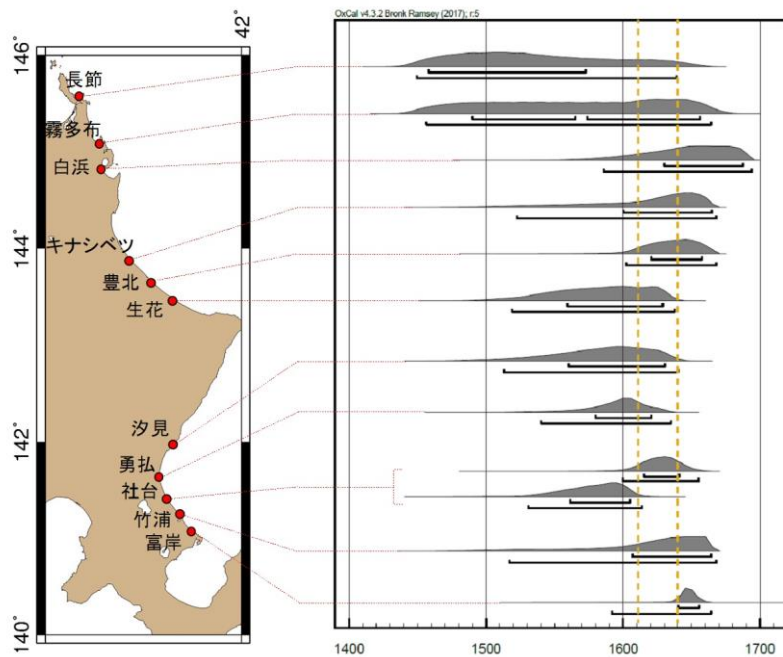


図1. 北海道太平洋沿岸における17世紀津波堆積物の年代推定結果（北海道大学〔課題番号：1002〕）。

右図の縦点線は西暦1611年，1640年の位置を示す。

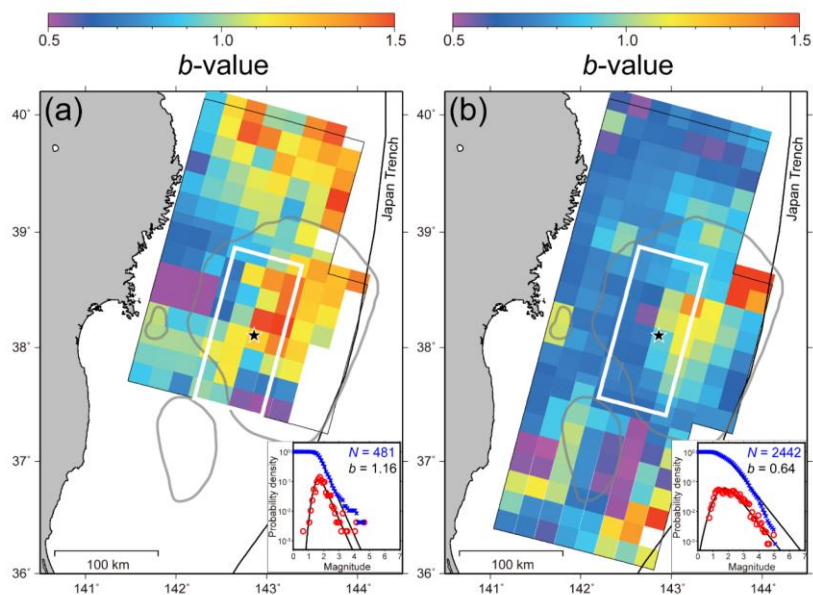


図2. 東北沖のプレート境界で発生した地震に対するb値の時間変化（東京大学地震研究所〔課題番号：1503〕）。

(a) 東北沖地震前及び(b)地震後のG-R則のb値の空間分布。b値推定手法はMaximum Curvature法 (Wiemer and Wyss, 2000)。星印は東北沖地震の震源，灰色コンターはIinuma et al. (2012)による本震時滑り分布 (10 m) を示す。挿入図は地図上の白色矩形域内で発生した地震 (N: 全地震数) の規模別頻度分布 (赤: 非累積頻度, 青: 累積頻度) を示す。ただし，ここでのb値はOgata and Katsura (1993)の最尤推定モデル (黒線) から得た。

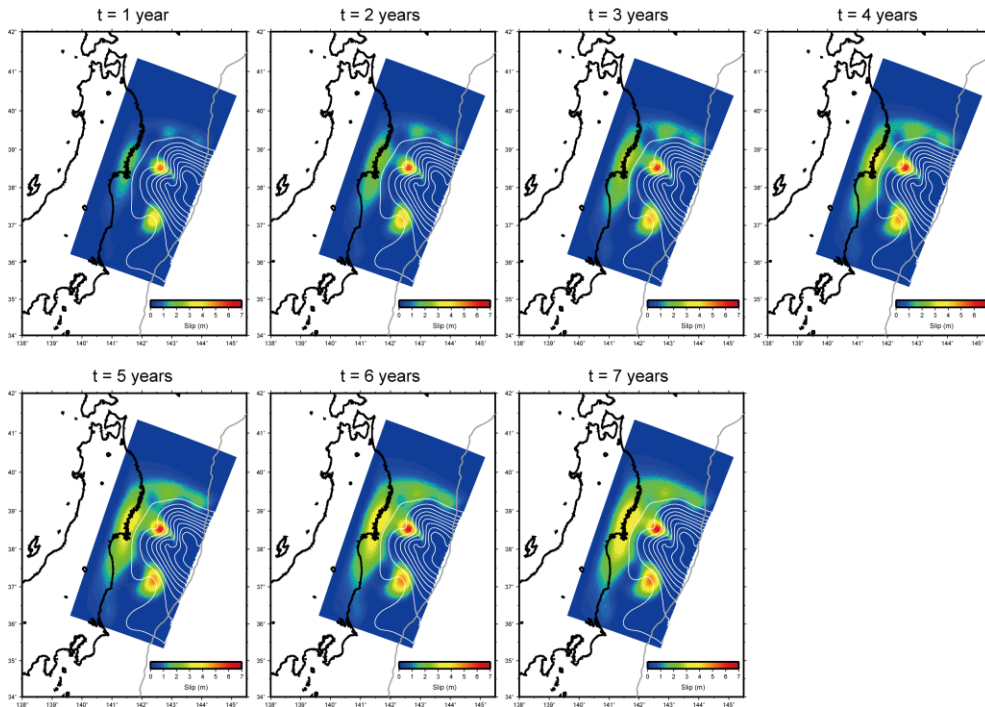


図3. 東北地方太平洋沖地震の余効滑り分布の時間発展（京都大学理学研究科 [課題番号：1803]）。

推定された地震時の滑り分布（白コンター）及び推定されたパラメータを用いてモデルから計算された積算余効滑り分布（カラスケール）の時間変化。コンターの間隔は5 m。

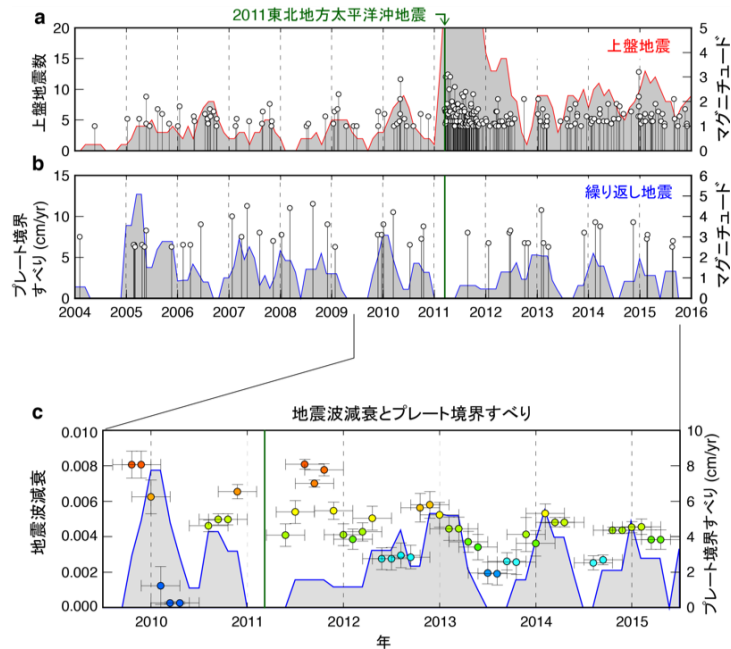


図4. 茨城県南西部における地震活動とP波減衰の時間変化（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]，Nakajima and Uchida, 2018）。

(a) 上盤地震の地震数, (b) 繰り返し地震から推定したプレート境界の滑りレート, (c) 地震波減衰の時間変化とプレート境界の滑りレート。

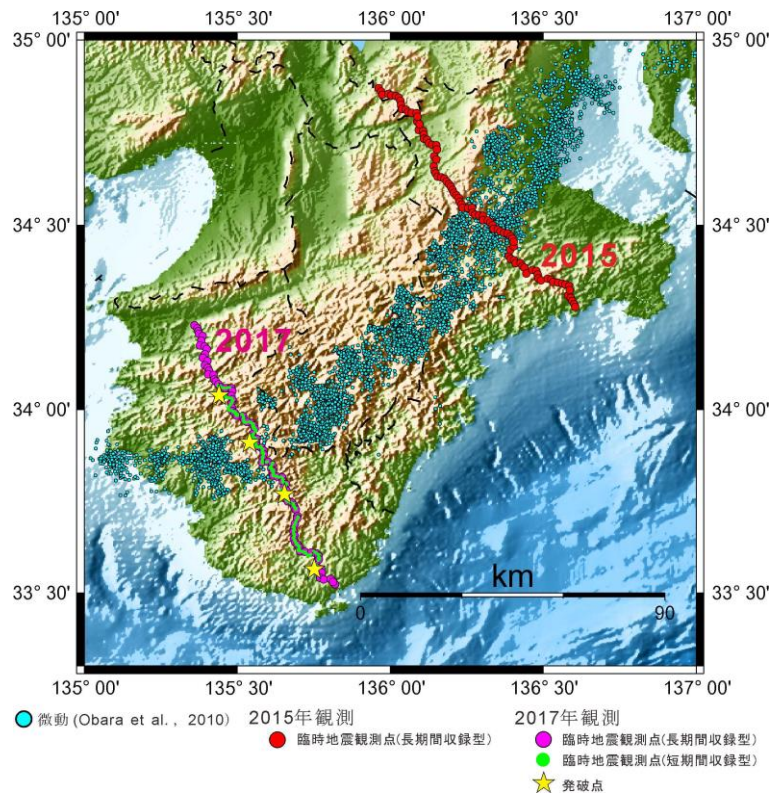


図5. 紀伊半島における臨時地震観測点配置図 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1509])。

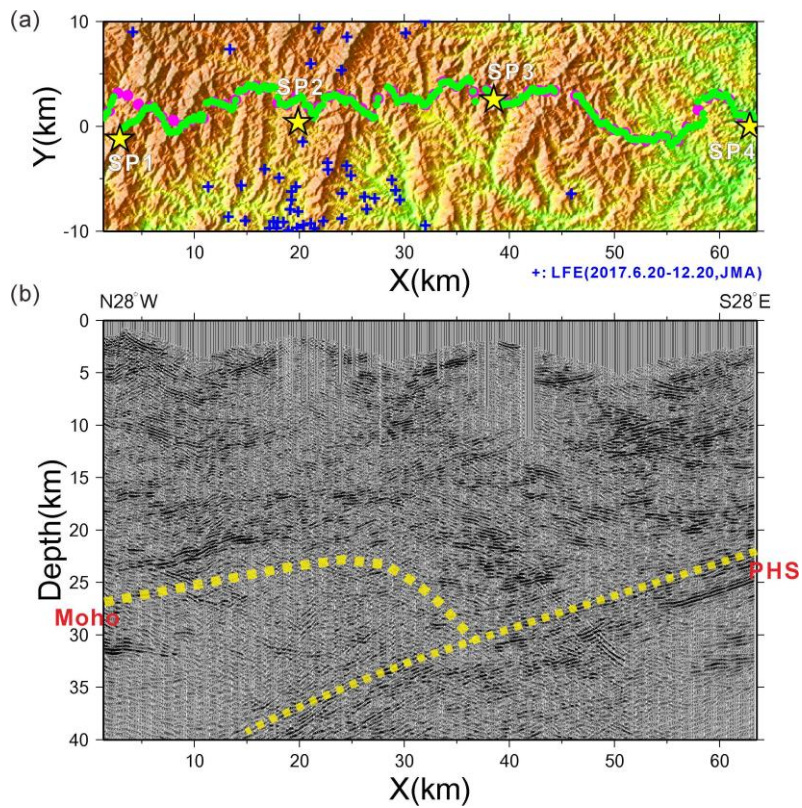


図6. 2017年測線 (図5) 下の反射法断面図 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1509])。 (a) 探査測線と気象庁一元化震源カタログによる低周波地震 (2017. 6. 20-2017. 12. 20) の震央分布図。 (b) 深度断面図。

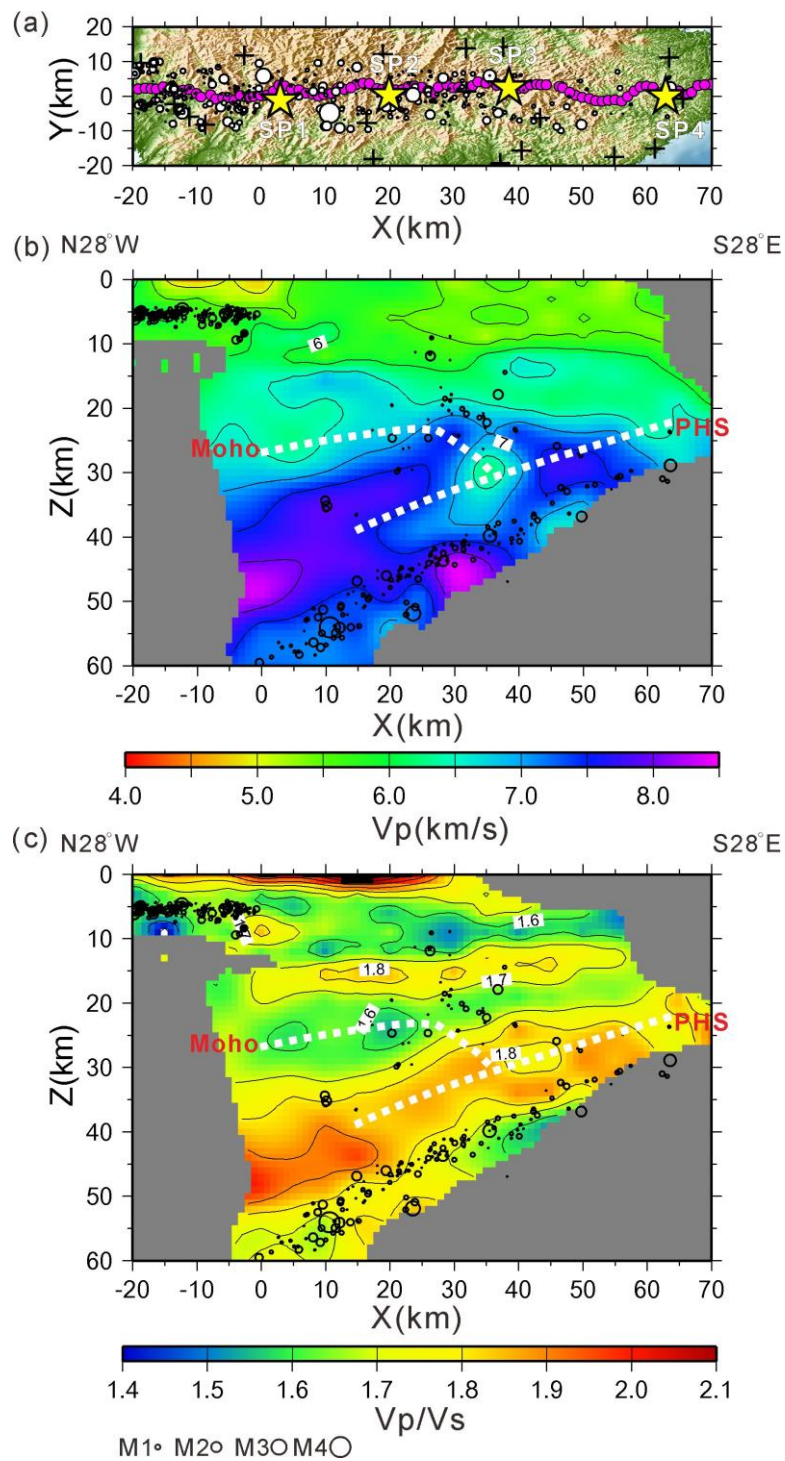


図7. トモグラフィー解析により得られた2017年測線（図5）下の地震波速度構造と震源分布（東京大学地震研究所 [課題番号：1509]）。

(a) 紫色丸印が臨時観測点，+が定常観測点，星印は発破点位置を示す。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。(b) P波速度構造。(c)  $V_p/V_s$  構造。

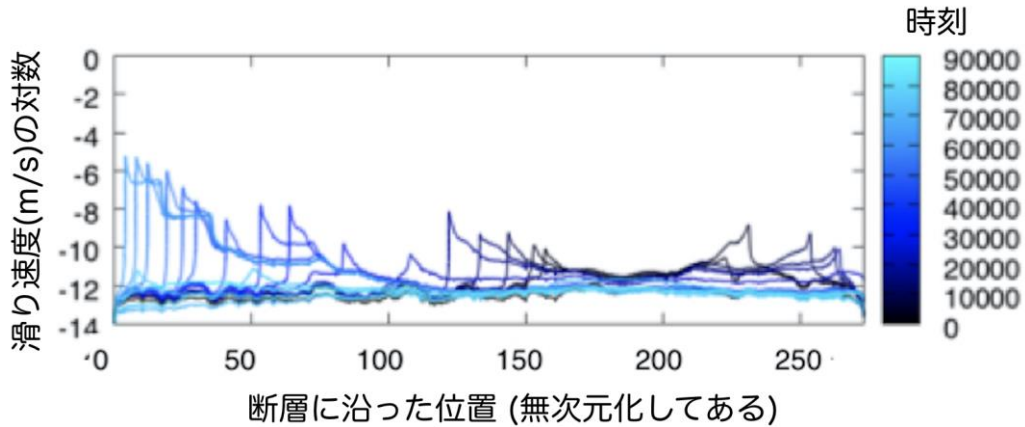


図 8. 粗い断層における滑り速度の時間発展の例 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1507], Ozawa et al., 2019)。

断層の右側で始まった核形成がなかなか加速せず左側へ移動して行く。

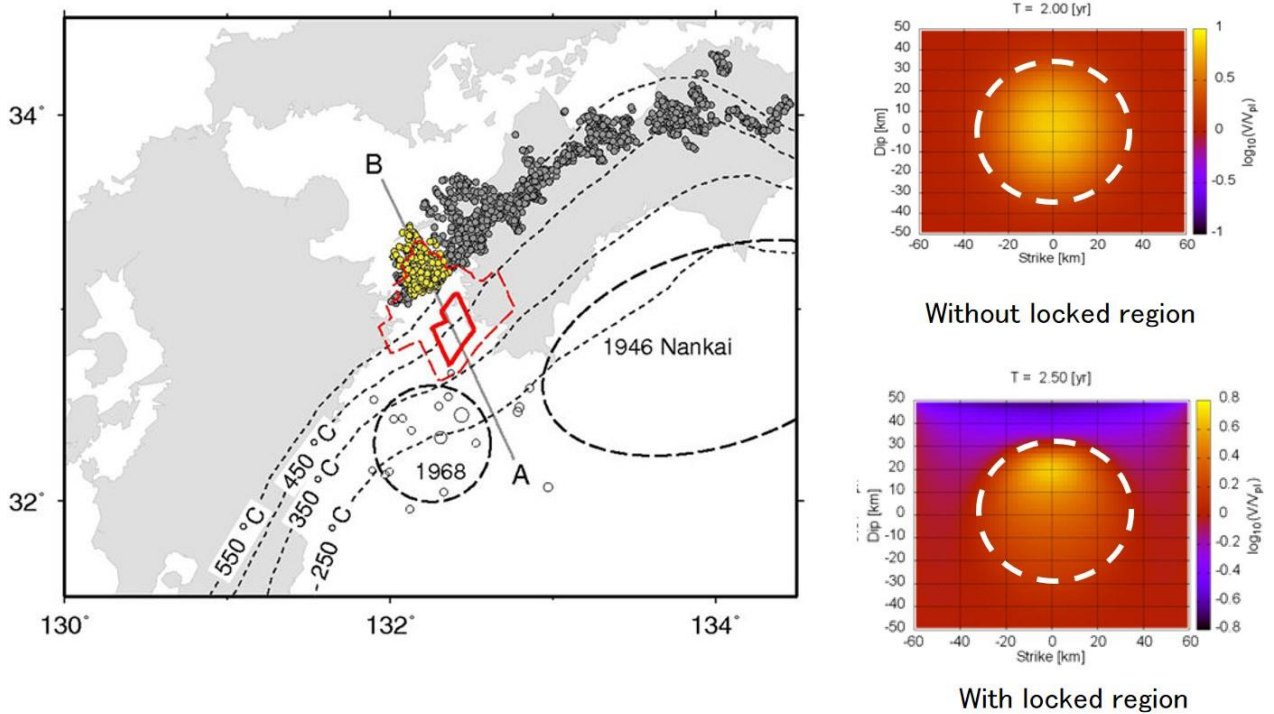


図 9. 豊後水道長期的SSE域における滑り分布の観測とシミュレーション (京都大学理学研究科 [課題番号: 1801])。

(左図) Nakata et al. (2017)のスパースモデリングにより推定された2010年豊後水道長期的SSEの滑り分布。赤実線及び赤点線で囲まれた部分は、それぞれ、滑り量が0.2 m, 0.1 m以上の領域を示す。(右上図) 固着域が無い場合の、シミュレーションによる長期的SSE発生時の滑り速度分布。(右下図) 固着域が有る場合の、シミュレーションによる長期的SSE発生時の滑り速度分布。点線円は長期的SSEパッチを示す。

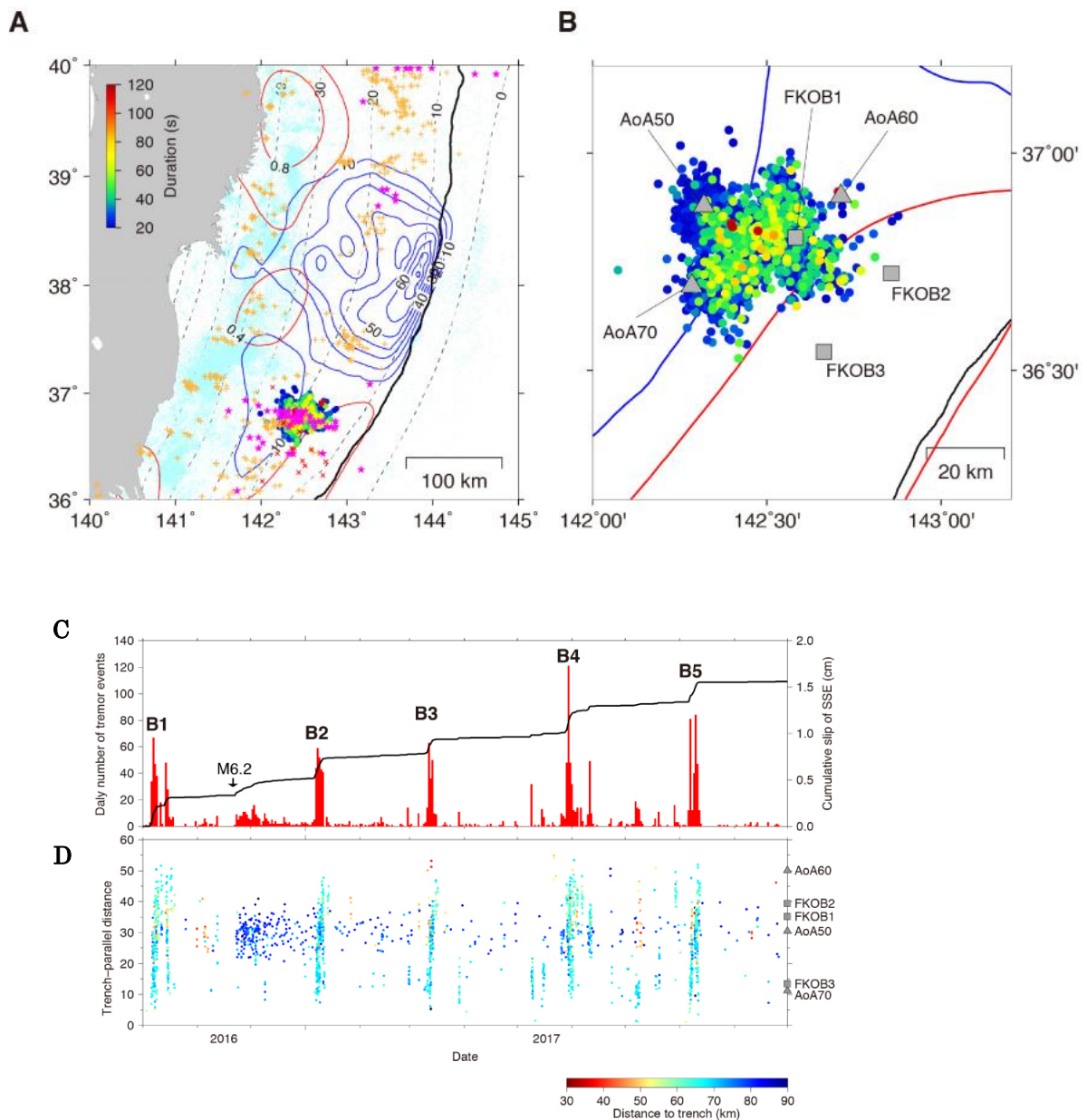


図 10. 日本海溝南部で検知された低周波微動の空間分布と時空間変化。(東京大学地震研究所 [課題番号: 1503])

(A) 微動の継続時間に応じた色をつけた丸印で震央を示す。VLFE (紫星), 小繰り返し地震 (橙十字), 気象庁一元化処理による震央 (水色点) をあわせて示す。青色コンター (10 m 間隔) と赤色コンター (0.4 m 間隔) は, 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う地震時及び余効滑りの分布。(B) 微動発生域周辺の拡大図。海底地震観測点をあわせて示す。(C) 日別の個数分布と微動活動から換算された対応する SSE による累積滑り。(D) 海溝軸に沿う方向に投影した微動活動の時空間プロット。検知された微動イベントをその震央の海溝軸からの距離に応じた色シンボルで示す。

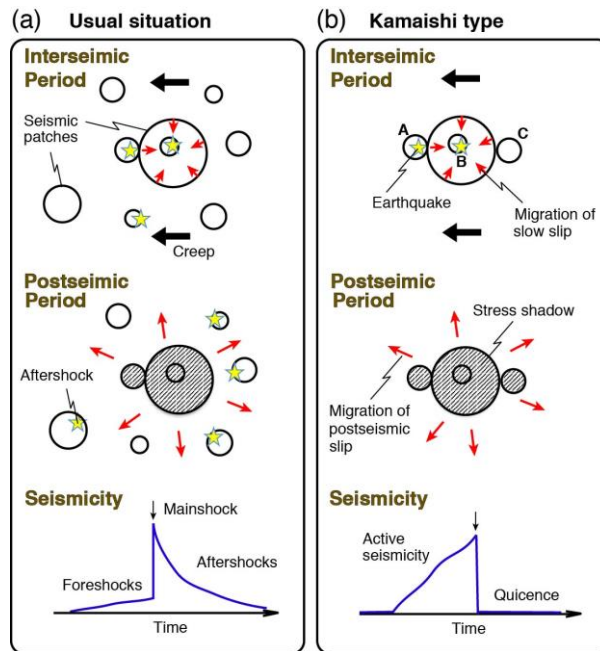


図11. 本震発生前後の地震活動（☆印）を説明するモデル（東京大学地震研究所〔課題番号：1510〕，奥田・他，2018）。

(a)通常の場合、(b)釜石沖地震の場合。通常の場合では、大きな固着域の周りに小さな固着域が存在するが、釜石沖地震の場合はそれが存在しない。地震間（本震前）は通常の場合では、大きな固着域内外で地震が発生する。一方、本震後は大きな固着域の周りに小さな固着域がない釜石沖では余震が発生しない。



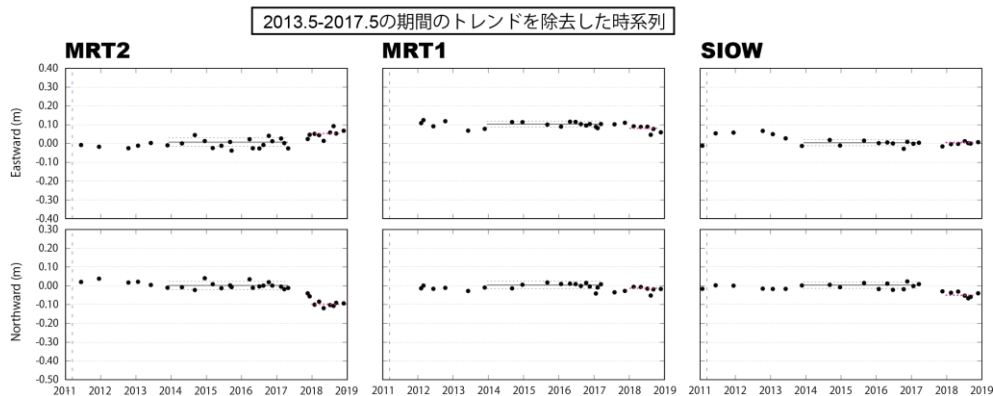
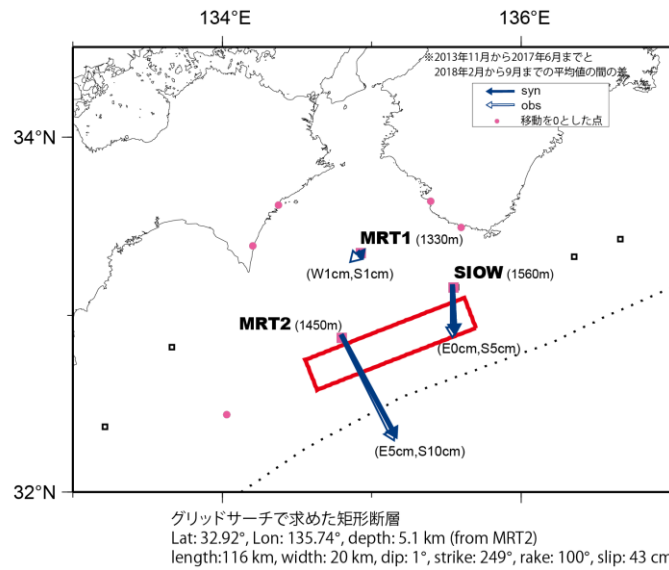


図 12. 紀伊水道沖の海底における非定常地殻変動（海上保安庁 [課題番号：8001]）。  
上図の白抜き矢印は、2013 年 11 月から 2017 年 6 月の間の平均値と 2018 年 2 月から 2018 年 9 月の間の平均値の差から求めた非定常地殻変動。赤四角はグリッドサーチで求めた矩形断層の最適解。赤丸は変動量を 0 とした観測点。青矢印は断層モデルから計算された変動。下図は、上図に示した 3 観測点でのデトレンド後の変位時系列。

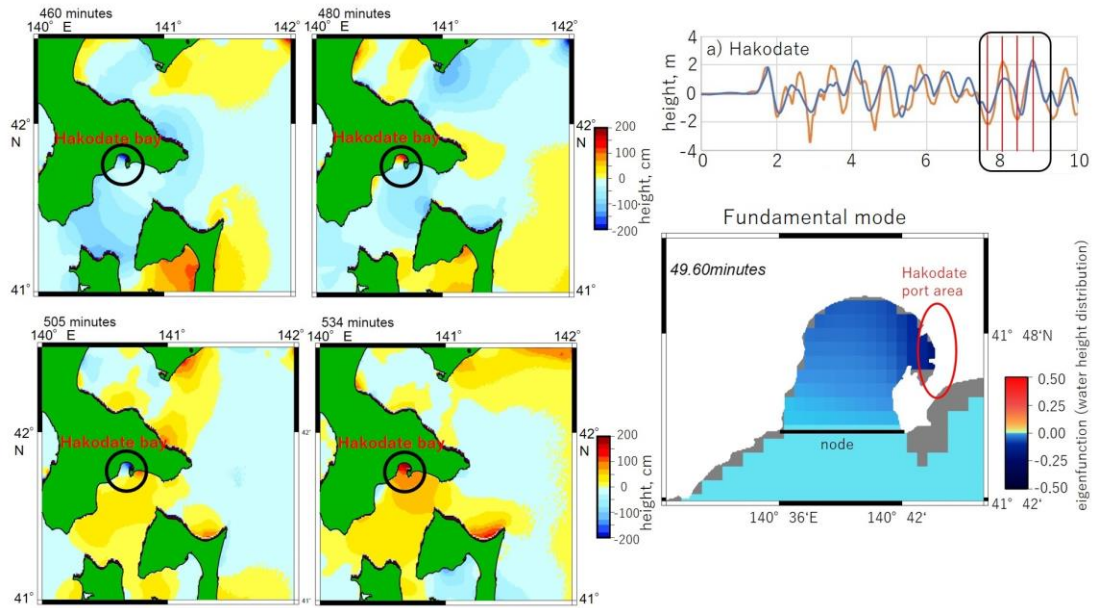


図 13. 2011 年東北地方太平洋沖地震で励起された函館での後続波の解析結果（北海道大学 [課題番号：1002]）。

（左）函館周辺での津波スナップショット（地震発生後 460 分，480 分，505 分，534 分）。（右上）函館での観測津波波形（青）と計算津波波形（橙）。（右下）函館湾の基本モード（周期 49.6 分）。函館港沿岸で波高が特に大きい。