

地震（中短期予測）

「地震（中短期予測）」計画推進部会長 中谷正生
（東京大学地震研究所）
副部会長 内田直希
（東北大学大学院理学研究科）

本部会では、地震発生確率が高まっている状態を定量的に評価する手法の開発を目的として、地殻活動のモニタリングや物理的解釈・数理モデル化、様々な自然現象の変調と地震の相関の調査などを行っている。

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

プレート境界の固着・滑りの時空間履歴は、地震発生への影響が物理的に明らかであり、予測への演繹的アプローチが考えやすい。本項目では、スロー地震と繰り返し地震の検出を中心とした、非地震性滑りのモニタリングに基づく物理モデルの構築と予測を目指して研究を行っている。

○繰り返し地震

繰り返し地震（相似地震）は、プレート境界・断層の滑りを監視するすぐれた方法である。今年度、日本の地震観測網（1340局）で捉えられた1989年9月15日から2016年2月29日までの世界個の地震（M4.5以上震央距離90°以内の37,341個、震源情報はUSGSのカタログによる）の波形相関を調べたところ、1125系列、3579イベントの相似地震が検出された。相似地震の発生状況からNadeau and Jonson（1998）の経験則を用いて推定したプレート境界の背景滑り速度を、それぞれの地域でのメガスラスト地震（Mw8.3以上）サイクルでの経過時間に対してプロットしたところ、メガスラスト地震の直後10年程度は、プレート収束速度の10倍から1倍程度に減衰する余効滑りが支配的で、一方、30年以降はプレート収束速度の20%程度から徐々に加速する傾向がみられた。ただし、これは相似地震の見つかった場所についての結果であって、強く固着して相似地震が見られないような時空間の情報は含まれていない（図1、東北大学理学研究科 [課題番号：THK09]、Igarashi and Kato, 2021）。

繰り返し地震は内陸でも発生している。今年度は、2016年熊本地震の震源域周辺で発生した地震（Mj1.5～4.5）を対象に、2016年4月14日から約2年間の期間において4つ以上の相似地震候補をもつ地震群に対して震源再決定を行い、11組の相似地震を検出した。これらの相似地震の組は全て2つの地震から構成されている。相似地震は日奈久断層帯の震源域とその南西延長部の余震域に分布するが、布田川断層帯の震源域では相似地震は検出されなかった（図2）。日奈久断層帯の震源域の相似地震はAsano and Iwata（2016）によるすべり量の小さな領域に位置しており、先行研究と同様にアスペリティの位置とは相補的な関係が見られた。余震域での相似地震からSomerville et al.（1999）のスケリーング則を用いて推定されたすべり速度はHashimoto（2020）で測地学的に観測された

すべり速度と調和的であった。一方、Nadeau and Johnson (1998)のスケリーング則を用いると過大な滑り速度が推定された(東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、森・平松, 2021)。

○深部スロー地震

南海トラフでおきる長期的・短期的なスロースリップ・イベント(SSE)については、GNSS、地下水、歪み、傾斜の定常観測データから準リアルタイムで自動検出と滑り量推定を行っている。産業技術総合研究所・防災科研・気象庁の3機関はひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して解析するシステムを運用しており、2020年11月-2021年10月までの1年間では、SSE30個の震源断層が決定された(図3)。2011年9月の運用開始以来の総計は10年2ヶ月で308イベントになる(産業技術総合研究所[課題番号:AIST09]、気象庁[課題番号:JMA_01]、矢部・他, 2021, 2022)。

GNSSによる検出に関しては、今年度、長期的SSEの客観検知処理の対象地域を日向灘沿いを含めるように拡張した(気象庁[課題番号:JMA_01])。また、GNSS時系列データから短期的SSEを自動的に検出する新たな手法を開発し、1997-2020年の東海～九州地域に適用して284イベントを検出した。この中には、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といった、これまで見い出されていなかった活動もある。また、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う特徴も見い出された(図4、東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12]、Okada et al., 2022)

一方、テンプレートを使わずに連続波形からLFEを自動検出するBackTrackBB法(Poiata et al., 2016, 2018; 連続波形から特徴関数として周波数依存のKurtosisを求め、その観測点間でのcoherencyに基づいてイベント検出と位置推定を実施)によって、Hi-net波形から四国の深部LFEカタログを構築した。その時空間的分布や挙動は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がある(図5、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Poiata et al., 2021)。

Mw3程度以下のSSEは存在しても、現状の測地技術では観測する手段はないと考えられている。そこで、南海トラフの深部微動やLFEのカタログを用い、これらのイベントのクラスタが小さなSSEであると思倣してスケリーング則を探ることを試みた。2004年4月から2013年3月までのIdehara et al. (2014)による82, 275個の微動(継続時間10-300秒)とJMAによる約20, 000個のLFEから、Mw0.5-2相当のクラスタ約900個を見い出した。すべり域形状は等方的であること、滑り域面積とモーメントの関係は応力降下量一定を示すこと、イベント継続時間は普通の地震とスロー地震の間であること、クラスタ内のイベント間の伝播はdip方向であることが多く、その伝播速度は数十km/時で、10km/日程度であるクラスタ全体での伝播速度よりも速いこと、などが見い出された(図6、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Aiken and Obara, 2021)。一方、微動は通常の地震と規模別頻度分布が異なることが知られているが、南海トラフ震源域の深部延長で起きている微動の規模(地震モーメント)分布に対し、従来から用いられているベキ分布や指数分布を混合することで適合度がある程度改善されることを示した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI13]、岩田・平松, 2021)。

○浅部スロー地震

プレート境界浅部のSSEについては、近くの海底に設置された孔内間隙水圧計に変動が現れることが示されている(Araki et al., 2017)。今年度は、間隙水圧記録の補正に近傍のDONETの海底水圧記録を活用することで孔内の体積歪の精度向上を図った。これにより潮汐によるノイズを従来の1/4~1/2以下に軽減、2020年3月に発生したSSEから20km以上離れた南海トラフ軸直近で発生したSSEによるわずか10ナノストレインの体積歪変化を直接捉えることに成功した(図7)。さらに、最新の海中天気予報(JCOPE-TDA)を活用して気象・海象擾乱による海底圧力変化を解析した結果、南海トラフ沿いで繰り返し発生している浅部SSEが黒潮蛇行に伴う海洋擾乱の影響を受けている可能性を示した(東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、Ariyoshi et al., 2021)。

また、浅部LFEの検出および震源決定について、DONETを活用した最大振幅とエンベロープ相関を用いたハイブリッド法による新たな手法を開発した(図8、気象庁[課題番号:JMA01]、溜渕・小木曾, 2021b)。また、日本周辺以外で浅部VLFE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、2004年7月から2006年1月までの間に70個弱の浅部VLFEを検出した。その活動域は大地震震源域の浅部延長の海溝近くで、過去に発生したSSEのすべり域と調和的である(図9)。これらのVLFE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、南海トラフの浅部スロー地震とほぼ同様であった(東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Baba et al., 2021)。

○スロー地震と構造の関係

プレート間固着の時間変化を推定し、その発展を予測するためには、プレート境界周辺の構造、物性や応力を知ることも重要である。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次元波線追跡法および反射法解析を適用して、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., 2021a)。四国西部下の島弧モホ面は25-30km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。さらに、四国東部での構造解明のための臨時稠密地震観測(図10)を開始した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_12])。

透水性の低い半遠洋性の泥岩層が沈み込む室戸岬沖南海トラフでは、浅部スロー地震が見られる。このことは、同地域のマルチチャンネル地震波探査によって求められたP波速度から推定される浅部デコルマの高間隙水圧(Tobin and Saffer, 2009)と調和的である。今年度は、これまで浅部スロー地震が殆ど報告されていない潮岬沖南海トラフでJAMSTECが2011年に取得した探査データ(測線KI01)に対して、Tobin and Saffer (2009)と同様の解析を行った。潮岬沖ではデコルマに沿って透水性の高い砂岩層を含むタービダイトが沈み込んでおり、海溝軸からdowndip側へ13kmまでの浅部においては、室戸沖に比べて過剰間隙水圧比が低く鉛直有効応力が高いことがわかった。これは、潮岬沖では浅部VLFEがないこと(Takemura et al., 2019)、固着が強いこと(Noda et al., 2018)と調和的である(図11、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Yu et al., 2021)。

一方、日本海溝沈み込み帯前弧海域において、S-netデータの常時微動記録を用いて、

地震波干渉法による表面波トモグラフィーを行ったところ、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（図12、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]、Takagi and Nishida, 2021）。

○断層滑りのデータ同化

観測データから、プレート境界の滑り履歴と摩擦特性を同時に推定するデータ同化は、原理的には、そのまま今後の滑り予測にも使えるはずである。本年度は、安定滑り領域の中に地震発生領域とSSE発生領域が近接して存在する数値モデル(平面断層にaging lawを仮定)を用いて、アジョイント法データ同化による予測能力を見定める実験を行った(田村, 2022)。(1) スロースリップ発生域の摩擦パラメータ b に異なる値を与え、アジョイント法によりこの b の値を推定する実験、および、(2) SSE発生域の状態変数の初期値 θ に異なる値を与え、アジョイント法により θ の初期値を推定する実験を行い、どちらの実験でも真の値に近い推定値が得られた。推定結果を用いたモデルで予測された地震発生の時期は、探索初期値を用いた予測より向上し、予測エラーは(1)で5~8日、(2)で50日であった(京都大学理学研究科 [課題番号：KUS_01])。

このようなデータ同化による予測を試みるのに適した地域である、およそ6ヶ月周期でSSEが繰り返す琉球海溝南西部八重山諸島においては、国土地理院の観測点に加えて、京都大学と九州大学がGNSS観測を2010年ごろから継続している。本年度は、これまでの10年間のGNSS時系列を基に定常変位速度を推定し、バックスリップモデルを用いてすべり欠損の空間分布を求め、八重山諸島の南側のプレート境界のすべり欠損レートが17-47 mm/yrであることが分かった。この領域はSSE発生域の浅部に相補的に位置し、プレート境界の摩擦特性などの物理的性質がプレートの傾斜方向に深さ変化していることが示唆される。同地域では1771年に津波被害をもたらす地震が発生しているが、以降250年間同様のすべり欠損レートで歪を蓄積していると仮定するとMw7.5に相当するエネルギーが蓄積されていることになる。一方、Nakamura (2009)で1771年の津波の波源域とされているプレート境界浅部のすべり欠損は陸域のGNSS観測からでは解明できないため、巨大地震発生ポテンシャルのより正確な評価には今後の海域観測の継続的な実施と観測点の拡充が必要である(図13、京都大学理学研究科[課題番号：KUS_01]、Kano et al., 2021)。

観測データからシミュレーションのパラメータの最適値のみならず、その不確実性を明らかにするためには、逆問題を確率論的に定式化し、パラメータの事後確率分布を推定する必要がある。昨年度までに、パラメータ空間が比較的低次元の場合に適用可能な事後確率分布推定手法の構築を行ったが、この手法はパラメータ空間が高次元の場合、多数回のフォワード計算を行うことが必要になり、計算コストが大きい。今年度は、より少ない回数でのフォワード計算に基づき事後確率分布を推定することができる手法の構築に向け、アンサンブルデータ同化手法の一部であるensemble smoother (ES)とiterative ensemble smoother (IES)の事後確率分布推定能力を検討した。モデルが線形で事後確率分布がガウス分布の場合、これらの手法から同一の結果が得られ、それらは真の事後確率分布に一致した。一方、モデルが非線形の場合、ESから得られる結果は真の事後確率分布に一致せず、非線形性が強くなるほど真の分布からの乖離が大きくなる。IESを用いることによりESよりも良い推定結果が得られるが、非線形性が強くなるほど真の分布に近

い推定結果を得るためには多数回の反復が必要であることが分かった。以上の結果から、非線形性の強いモデルに対する事後確率分布推定にはIESがより適していると考えられる(京都大学理学研究科[課題番号:KUS_01]、Fukuda and Johnson, 2021a, 福田・Johnson, 2021b)。

○地震サイクル

プレート収束速度に対するプレート境界滑り速度の不足(滑り遅れ)によってプレート境界断層の剪断応力は増加してゆく。メガスラスト地震は、こうしてプレート境界周辺に蓄積された剪断応力を解放する現象である。南海トラフにおいて直近の数十年は、典型的なインターサイスミックの応力蓄積フェーズにあると考えられるので、本年度は、2005年3月から2011年2月の測地データから推定された南海トラフにおける滑り遅れレートの空間分布(Noda et al., 2018)をインターサイスミック期の剪断応力増加レートに焼き直し、過去の南海トラフ地震のアスペリティに蓄積された剪断応力を推定して、どのようなアスペリティの組合せによるメガスラスト地震が発生可能な状態であるかを評価する方法を提案した。地震発生が可能かどうかは、仮に蓄積された応力をリセットするような滑りが起きた場合に、解放される弾性エネルギーとそのときの滑り弱化過程で散逸するエネルギーのどちらが大きいかで判断した。自発的破壊のエネルギー的な必要条件に着目していることになる(図14、気象庁[課題番号:JMA01]、Noda et al., 2021)。

最近の観測・理論・実験的研究の成果をもとに、大地震の発生に至るプロセスの概念モデルを提案した。ダメージ蓄積、変形局所化(e.g., Ben-Zion and Zalliapin, 2020)に続く最終段階において、移動をとまなう前震活動やスロー地震による载荷が本震をトリガするというコンセプトを提示した。このプロセスはステップ的な時間進行を見せる傾向にあるため、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。(図15、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、Kato and Ben-Zion, 2021)。また、2011年のM9東北地方太平洋沖地震について、その震源及び周辺域での様々なスロー地震の役割を含むレビューを出版した(図16、東京大学地震研究所[課題番号:ERI12]、東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、Uchida and Burgman, 2021a,b)。

イ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

地震活動は20世紀前半からの網羅的観測データがあり、予測手法の検証・実践に関して格段のポテンシャルを有しているため活発な研究が続けられている。

○地震活動の異常度評価法

地震活動の異常度を定量的に評価する新たな手法の開発を目指して、日本全国の2000年~2020年8月の日本全国の過去約20年間の地震活動の規模別頻度分布、潮汐関連に関する指標値について、空間グリッドサイズ一定、解析震源数一定の機械的な解析を行い、各指標値の頻度分布の統計的性質に着目して全国的に他の活動と区別することができない“ふつう”の地震活動を特徴づけ、これを基準として異常度を定量化することを試みた(気象庁[課題番号:JMA01]、永田・他, 2021a,b,c)。

○ETASと前震活動

現象的な相関としては前震活動の存在は疑うべくもないが、物理的な役割については、前震活動はその余震のうちの一つが偶々大きな地震にまで成長して本震と見做されただけであって、本震の物理的準備過程が存在することを示すものではないという考えも根強い。本年度、ETASモデルにおいて大きな余震が発生する確率を解析的に導いた一連の理論をまとめ、さらに、これまでに出版された「ETAS効果では説明できない本震」の存在を主張する主要な論文についての批判的見解をまとめた(Zhuang, 2021)。本物の前震が存在する可能性を完全に否定することはできないが、ETAS効果だけでも大きな地震の短期的な予測を相当な確率ゲインをもって行うことができるのは確かであり、地震研では地震の発生確率を準リアルタイムで計算し地形図や任意の期間・深さ・規模の震央、活断層の地表トレースなど様々な情報と組みあわせて二次元の地図上に表示して対話的に図の拡大・縮小や表示した各要素の詳細情報へのアクセスができるGISによるマッピングツールの試作を行なっている。今年度は、日々更新される地震発生確率値及び震央データを自動的に取得し、ArcGISonline上の本マッピングツールに毎日定時に自動的に展開する機能を追加した。この機能追加により地震発生確率マップと震源分布等の情報が自動的に更新されるため、大地震後の余震活動や群発地震時における活動の推移を予測する上で本マッピングツールを利用して重要な知見が得られることが期待される(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13])。

上述のZhuang(2021)でも指摘されているようにETASモデルのパラメタ推定はデリケートであり、これを改善することは非常に重要である。特に大地震直後の欠測の影響は大きい。地震のマグニチュード分布は時間的に不変であるということだけを仮定して、欠測を補う方法を前計画で提案(Zhuang, 2017, 2020)した。今年度は、この手法を日本の内陸で最近発生した5つのM6.7-7.0の地震に適用した(Zheng et al., 2021)。いずれのケースでも、補完によって大森-宇津則のc値は非常に小さくなり、また、p値はいずれも1.1前後のせまい範囲に決まった。今回は、解析すべき空間領域を客観決定する方法を取り入れたこともあって、ロバストな余震活動の予測をリアルタイムで行うことが十分可能となった。また、マッチトフィルタ法による検測結果と比較し、マッチトフィルタ法では本震直後の小さい余震が拾いきれず、本手法の方が早く信頼できる余震活動パラメタを得られることが示された。また、前計画から、従来のトリガ源を点震源として扱うことによるETASモデルの性能限界を改善するために、大きな地震の震源域形状及び震源の深さ分布を考慮した有限三次元ETASモデル(Guo et al., 2015, 2017, 2018, 2019)を開発してきたが、今年度は、これを南加の1980-2019のカタログに適用した(Guo et al., 2021)。この期間にあった4つの大地震(Mw6.7-7.3)は有限断層として扱うことで、モデルのフィットが向上したことを確かめた。ETASモデルではトリガの連鎖で定義した地震の家系図を作ることができ、複雑な余震活動の特徴を解きほぐすことができた。その結果、本震震源域の余震のうち2-4割が本震によって直接トリガされたものであり、さらに活動域は移動していくこと、大滑り域には余震が少いという傾向は明白であること、大き目の余震は、小さな余震が群れている領域のエッジに起きる傾向があること、を認識することができた(ただし、Ridgecrestは多くの点で例外)。さらに、余震活動の予測においては、最初の数日においてETASモデルの有限断層化及び三次元化の効果が顕著であることもわかった(図17)。また、耐震政策等に必要な長期的な危険度のゾーニングにETASモデルを用いるメリットを工学者向けに解説する論文(Pei et al., 2021)を出版した(東京大

学地震研究所 [課題番号：ERI_13])。

ETASモデルは、現象論的モデルとしては非常に優秀であり、上述のように、さらに性能を上げてきているが、物理的根拠は不明である。今年度は、摩擦構成則に基づく地震活動モデル(Dieterichモデル)に余効変動のような非定常な応力変化を組み入れ、ETASモデルのように「全ての地震が余震を引き起こす」可能性を考慮し、実データへ適用することで、どのような地震活動が表現されるかについて示した。また、この取り組みについてHawkes過程の視点からレビューを行った(東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、岩田, 2021)。

昨年度、個数ベースの簡単な基準で所与の地震活動が前震であるかを識別する前田法(Maeda, 1996)がもつ地震予測能力が、ETAS効果だけでは説明できないことを示すために、ETASに従って作った合成カタログに前田法を適用し、実カタログに適用した場合より顕著に成績が落ちることを報告した。今年度は実用的な観点から、前田法とETAS法を特定の地域の実カタログに適用して予測成績を比較し、前田法の方が概ね成績が良いことを示した(図18、気象庁 [課題番号：JMA01]、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Hirose et al., 2021c)。

○複合的なメカニズムによる前震活動

2011年のM9東北沖地震の13時間後に長野県北部でおきたM6.2の地震は、遠地からの波動によってトリガされただけでなく、顕著な前震活動を伴ったことから興味深い例である。歪み集中帯プロジェクトによって同地域に展開されていた稠密地震観測網の連続波形データをマッチトフィルタ法で解析したところ、M9地震の30分後からM6.2地震の発生までの間に、M2.2以下の微小地震が285個見い出された。M6.2地震断層の上盤内では拡散係数 $D=50\text{m}^2/\text{s}$ 程度での間隙流体の拡散によると思われる活動域の拡がりを示す群発地震活動であり、東北沖地震の大きな余震たちからの表面波通過時に活発化した。一方、M6.2地震がおきる断層面に沿う活動はM6.2の破壊開始点から2km以内であり、間欠的に三度活動し、それぞれで1-2km/時でM6.2の破壊開始点へ向かう移動がみられた。三度目の活動はM6.2の破壊開始点から数百mの位置で始まり本震直前まで続いた。これは過去に他地域で報告されているゆっくり滑りによる地震活動に似ている。また、一度目と三度目の活発化は、東北沖地震の大きな複数の余震からの表面波通過と対応しており、また震源の移動速度から見ても、流体の移動が関与していたと推察される。総合的にみて、大きな表面波によって誘起された間隙流体の移動によってゆっくり滑りが始まり、それがM6.2地震の震源核となったというシナリオが考えられる(図19、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、Shimojo et al., 2021)。

○動的トリガリング

上述の長野県北部の例でも見られるように、遠地地震の地震波動による動的トリガリングは、いまや明白な事実である。地震波動は、破壊が伝播する向きに強く放射されるため、そちら側に多くの余震をもたらす可能性が考えられる。そこで、地殻内の地震活動が活発で且つ稠密地震観測網が展開されている北茨城-いわき地域に着目し、経験的グリーン関数法により推定した各観測点における見かけの震源時間関数を用いて二次モーメント推定を行い、99個の地震のうち58個の地震が明確に破壊伝播の指向性を示すことを見

い出した。破壊伝播方向は様々であり、非常に近接した地震同士の破壊伝播の向きが逆であることも珍しくない。地殻内の断層形状や応力状態の短波長不均質を反映したものと考えられる。これらの58イベントについて、その近傍で発生した余震数を気象庁地震カタログに基づいて、破壊フロントが向かう側と遠ざかる側に分けて数えてみると、破壊フロントが向かう側で2倍近く多くの余震がおきていた。これは、動的トリガメカニズムから期待されるセンスである（図20、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]、横谷，2021）。

直前の微小前震

前震の中には、本震の破壊開始点近傍で本震直前に多数の微小な相似地震としておこるものがある（e.g., Bouchon et al., 2011; Doi and Kawakata, 2012, GRL, 2013 EPS）。これらは、プレスリップによる震源核の形成に伴う活動である可能性が高いため、昨年度までに、テンプレートなしで総当たりの波形比較を行って微小な相似地震を検出する新たな方法を提案してきた。しかし、前震研究の文脈で本来重要なのは、波形の相似性ではなく、同じ場所が繰り返し破壊する「繰り返し地震」かどうかということである。そこで本年度は、正確な震源と発震機構解（Uchide, 2020）が分かっている2018年大阪府北部地震の余震活動を使って、それぞれの相似地震検出手法で用いられる波形類似度を震源位置・発震機構解の相違度を用いて検証したところ、本計画で提案された2つの手法（2bit-hashとkhash）は、計算量が圧倒的に削減できたにもかかわらず、従来の波形相互相関による手法と同程度の繰り返し地震選別能力（特異度・感度・その調和平均であるF値）を持つことが示された（図21、立命館大学 [課題番号：RTM02]、高山・他，2021）。

一方、繰り返し地震でない直前の微小前震（e.g., Ellsworth and Bulut, 2018）の例も新たに確認された。2003-2019年の気象庁カタログのM4以上の浅い（15km以内）地震のうちHIST-ETASモデルにより余震でない判断された地震2029個を精査し、27個が直前60秒以内に前震をもつことを見出した。このうち直前10分以内に四つ以上の前震をもつものが三個あり、震源決定精度の良い茨城県北部と山形県置賜地方の二例を調べた。いずれも前震は本震の破壊開始点近傍に集中していたが、その破壊域は互いにあまり重ならず、また本震の破壊域との重なりも小さかったため、カスケード前震説（Ellsworth and Bulut, 2018、Gomberg, 2018）を支持する（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI13]、山名，2021）。

○震源の位置・メカニズム情報

地震活動を用いる研究において地震カタログの品質は生命線である。今年度、S-netを含む日本全国の観測網を用いて自動震源カタログを作成した。自動震源にはノイズ等の誤検知が5%程度含まれるため、機械学習の一種であるアンサンブル学習（ランダムフォレストとAdaBoost）による地震ノイズ識別手法を開発した。その結果、自動震源中のノイズの頻度を約1/5（全体の1%に相当）に低減できた。ノイズ除去後の2020年1-8月の自動震源から、日本海溝沿いの微小地震はプレート等深線の深さ20-50kmに集中しており、等深線10-20kmのスロー地震とは相補的な分布をしていることが明瞭になった（図22、気象庁 [課題番号：JMA_01]、Tamaribuchi et al., 2021）。

前震・余震活動も含めて地震間の相互作用の仕組みを理解するためには、地震の検出

下限を下げることに、精密に震源位置を決定することが必要である。本年度は、連続波形から地震カタログを作成するプロセスを、1) 観測波形から走時の確率トレースを計算するプロセスと、2) 多数の観測点の走時確率トレースから震源座標と発震時刻を推定する2つに分解し、これらを2つの深層学習ネットワークで処理することを試みた。1) ではすでに検出処理されている波形を、2) では、仮想的に与えた震源の理論走時をもとにデータを作成し、ネットワークの学習に用いた。本年度は、室内水圧破碎実験(Tanaka et al., 2021)で得られたAEデータを対象として過去の研究で得られた波形記録と、数値的に作成した震源の確率トレースをもとにネットワークの学習を行い、誤差を与えて作成した確率トレースに対してある程度の精度で震源決定ができることを確認した(東北大学理学研究科[課題番号:THK09]、直井, 2022)。

地震の相互作用を理解するためには微小地震の震源メカニズム解も重要な情報であるが、高密度の地震カタログが得やすい鉱山での超微小地震観測や室内実験で使われる圧電式AEセンサは特性が複雑で、メカニズム解を推定することが難しい。本年度は、前述の室内実験(Tanaka et al., 2021)で得られたAE波形記録からのP波初動振幅読み取りに深層学習の技術を用いることで、12個の供試体の実験データから合計46,857個のイベントのモーメント・テンソル解を得ることに成功した。得られた解の中には、剪断・開口・閉合型という多様なタイプが存在しており、顕著な時間変化も観察された。測定帯域が狭いことや、AEの震源メカニズム・規模の時間変化に起因するバイアスがかかるために、結果の解釈には注意が必要でだが、得られた $-9.1 \leq M_w \leq -6.3$ のAEのうち半分程度は、せん断型破壊に対して従来から報告されている応力降下量一定則と調和的な地震モーメントとコーナー周波数を有する。残りはより低周波成分が卓越していたが、これは流体注入による高い間隙流体圧の存在によるのかもしれない(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、直井・他, 2021a, b)。

また、東北地方の深さ30-60kmで発生したプレート境界型地震について、その破壊過程の特徴を調べた。この研究では、海域のS-netを活用し、小地震の波形を経験的グリーン関数として用いて見かけの震源時間関数を推定し、破壊伝播指向性を系統的に調べた。見かけの震源時間関数にモデルの当てはめをした結果、80%以上の地震が破壊の指向性を持ち、破壊が深部側から浅部側に伝播する地震が多いことがわかった。この結果は、プレート境界深部からの定常的なローディングあるいは、深部から浅部への流体移動が関係している可能性がある(図23、東北大学理学研究科[課題番号:THK_09]、Yoshida et al., 2022)。

(3) 先行現象に基づく地震発生の確率予測

地震先行現象の候補として提案されている様々な自然現象について、地震発生との相関の有無と程度を評価しておけば、その知見を経験的に地震発生確率の予測に取り入れることができるし、物理ベースの演繹的予測法のヒントになることも期待できる。

○前震以外の地震活動異常

沈み込み帯において10年程度の長期間M5以上の地震がおきない長期静穏化が巨大地震の中期的先行現象として提案されている(Katsumata, 2011, 2017)。先行傾向を統計的に評価する目的で、千島から小笠原にかけて、客観的・網羅的な静穏化の検出をおこない、

9-12年程度以上続く静穏化があればそこから50-70km程度の範囲に4-8年程度有効な警報を出すという試行予測による警報マップと、1988年からおきたM7.5以上8.5未満の地震8個とを比較した結果、確率ゲインが2程度、p値が5%をきることを確認した。しかし、学習に使ったデータと評価に使ったデータが同じなので、過学習による好成績である可能性がある。そこで、実験期間を前半・後半にわけて、片方で最適化したパラメタで他方の予測を行うクロスバリデーションを行った。この場合、評価はわずか4個の地震に対して行うことになるため低いp値は得られなかったが、後半データで学習して最適化した予測モデルは前半の地震の予測に対しても確率ゲインが2程度の予測ができ、また、この最適化された予測モデルの内容は全期間のデータで学習したモデルと同様であった。一方、前半データで学習した場合は、この期間におきた地震前の静穏化に継続期間の特に長いものが複数あったために異常検出の閾値が厳しすぎるモデルが選好されてしまい、学習期間では確率ゲインが4を超えるが評価期間では1程度となる(i. e., 予測できていない)典型的な過学習となった。いずれにしろ、8個の地震に対して学習したモデルはロバストに見えるので、評価に使える地震数を2倍にすれば、クロスバリデーションに合格できるかもしれない(図24、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Katsumata and Nakatani, 2021)。また、既存の静穏化の検出手法は、静穏化を定義する空間範囲を恣意的に設定するものであったが、偶然ではもっとも起りにくい静穏化が見えるように自動的に調節する新しい検出手法(PMAP法)を開発した。ZMAP法(Wiemer and Wyss, 1994)では静穏化が検出できなかった2006年のM8.3の千島の地震を含めて、1964-2006千島地方のM7.5以上の地震の多くに先立つ静穏化が検出できることを確認した(図25、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、Katsumata and Zhuang, 2020)。

また、別の中期的先行現象として、背景地震活動と地球潮汐との相関が高まる傾向が指摘されている(Tanaka et al. (2002)。トンガ・ケルマディック海溝はMw7を超える地震の頻度が高く統計的な検証に適しているため、トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型地震(1977-2020年、Mw5.5以上、深さ70km以浅、729個)を対象にROC(モルチャン)ダイアグラムを用いて検証した(図26)。予測対象を大きな地震だけに絞った場合ほど、ROCはランダム予測の成績である右下り対角線から下に大きく膨らみ、予測性能(確率ゲインやピアスのスキルスコア)が良い。最も良いスキルスコア($SS_p^{Omax} = 0.31$)が出たのは、直近720日間での潮汐相関の強まりに基いて360日長のM7予測を出した場合(図26aの赤星)で、警報分率46%で予知率78%を達成した(確率ゲイン1.70)。しかし、検定に使えるサンプル数が9個と少いため、99%有意をぎりぎりクリアできていない。一方、M6.5以上を予測対象とした場合の SS_p^{Omax} は0.29(図26bの赤星、警報分率44%、予知率74%で確率ゲイン1.68)で、M7以上を対象にした場合の性能よりわずかに低い、34個とサンプル数が多いため99%有意を軽々とクリアしている。(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、気象庁 [課題番号: JMA_01]、Hirose et al., 2022)。

大地震の前にはb値が下がる、あるいは、差応力とb値に逆相関があるという指摘は昔からあり、それに基いたリアルタイムでの予測の可能性も指摘されている。Gulia and Wiemer (2019)が真陽性の例として指摘した2016年熊本地震は、活動を詳細に見れば偽陰性のケースであることを昨年度指摘したが、これを今年度出版した(図27、Nanjo et al., 2022)。一方で、2021年3月20日、5月1日に隣接して起きたM6.9、M6.8の宮城県沖のプレート境界型地震に関して、2012年以降の同地域のb値の時空間分布を調べたところ、

地震前の数年間に両地震の破壊域の b 値が0.6-0.4という非常に低い値にまで低下していたことを見出した(図28、Nanjo and Yoshida, 2021)。これらの地震は、そのupdip側隣接域である1978年宮城県沖地震の大滑り域へ差応力の増加をもたらしたと考えられるが、そこから期待される b 値の減少は起きていない。一方、3月と5月の地震で滑って応力が下がったはずの b 値は0.6程度と低いままであった(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13])。

○測地学的変動と地震発生確率の相関

2017年8月8日にチベット高原の東縁でおきたMs7のJiuzhaigou地震の前数年にわたって見られた大きな重力変化を見出した。同地域で2014-2017年にされた稠密な繰り返し精密観測から得られた変化は、浅部地下水の影響や、測定点の隆起沈降、機器ドリフトなどでは説明できない大きなもので地殻深部で大きな広域的物質移動があったことは確実と考えられる(図29、東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Yang et al., 2021)。

外部からの準静的な応力による地震活動の変調として、地表付近の水の荷重による季節性の活動変化の可能性も指摘されている。昨々年度に山陰地方と新潟地方の例を示した(Ueda and Kato, 2019)が、今年度は、台湾において、地下水位、GNSS鉛直変位と、地震活動の相関を、季節性の観点から調査した。台湾西部の活動は明らかに地表水荷重から期待される変調がみられ、また、歴史地震にもそのような傾向がうかがえたが、台湾東部の18km以浅の地震は、むしろ、期待と逆センスの季節性がみられた(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Hsu et al., 2021)。

昨年度、山形地域について背景地震活動度とひずみ速度には正の相関を報告(Ueda et al., 2019)したが、今年度は、日本の内陸に位置する5地域のひずみ集中帯において、同様の相関が確認できた(上田, 2022)。さらに活火山近傍では、同じひずみ速度の地域と比較して背景地震活動度が高くなる傾向が見られた。活火山近傍では、火山性流体により断層強度が低下するため、同じひずみ速度の地域と比較して地震活動度が高くなると解釈される(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、上田, 2022)。

また、二層のドロネー分割を用いてGNSSの測地データから連続的な歪み速度場を推定する手法を開発し、これを用いて中国全土の歪み場を求めたところ、テクトニクスとよく対応する空間分布が得られた。ROC解析によって1997-2017の観測から得られた歪み場と同期間の背景地震活動(M3以上)と比較すると、最大剪断歪みの大きい場所で地震活動が高い傾向がみられ、さらに、2017-2019の地震活動とも同様の相関を示したことから、歪み速度情報がETASなどによる長期的な地震活動度の予測のさらなる向上に資すると考えられる(図30、東京大学地震研究所[課題番号: ERI_13]、Xiong et al., 2021)。

○地殻流体の挙動と地震発生確率の相関

地殻流体に見られる変調もしばしば地震に先行することがある。今年度は牡鹿半島において2005年から東北地方太平洋沖地震発生までの間、宮城県原子力センター(当時)が小型電離箱を用いておこなった大気中ラドン濃度のモニタリングのデータを解析した。日最小値の月平均値を解析した結果、2008年岩手宮城内陸地震発生後に大気中ラドン濃度が増加し始め、2008年12月に減少に転じて東北地方太平洋沖地震発生まで減少し続けた。後者はYasuoka et al. (2018)が報告した仙台市と栃木県壬生町における大気中ラドン濃度変化とも対応し、減

少幅が1Bq/m³程度であることも一致することから、広域的な地殻変形を反映していると考えられる。従来の地震に関連したラドン濃度変動の報告では放射線管理施設の据置型大容量電離箱が用いられていたが、本結果により可搬型小容量電離箱もモニタリングに有用であることが示唆された（東北大学〔課題番号：THK_10〕）。

また、2018年6月18日に発生した大阪府北部地震発生前後に大阪医科薬科大学で観測された大気中ラドン濃度データを詳細に解析した結果を出版した(図31、Muto et al., 2021)。2014年から観測されていた大気中ラドン濃度は、地震の約1年前から減少し、本震後2020年6月まで低かったことを明らかにした。観測点周辺での地震活動も同じ次期に静穏化を示した。さらに、本震後の地震活動も余震域を除く近畿地方全域で低下しており、このことが地震後もラドン濃度が増加しなかった原因として考えられる（東北大学〔課題番号：THK_10〕）。

昨年度までに、千葉県旭市で行っている地中ラドン濃度観測データから気圧および温度による変動を除去して求めたラドンフラックスの時系列に、2時間の降雨量が20mmを超える場合に有意な増加が生じることを見出した（小島・他, 2020）。今年度は、雨水の浸透による地中ラドンフラックス増加が原因であることを観測的に確認し、そのモデルを検討した(根本・他, 2021)。降雨効果を観測するために複数の土中水分を測定できるように装置の改良を実施し、試験観測を開始した（千葉大学〔課題番号：CBA_01〕）。

宮城県は漁海況調査として、沿岸と沖で海水温と塩分の定点観測を長期にわたって行っている。昨年度1978年までのデータをデジタル化した、「みやぎ水産NAVI」のホームページが改修され、漁海況調査データの一部がホームページから直接ダウンロードできるようになった。このサービスを利用して、1978年から2011年までの定置水温(宮城県の歌津、江島、佐須浜、田代島)のデータを入手した。この期間に周辺200km以内でM7.0以上の地震は2011年東北地方太平洋沖地震を含め4回あったが、先行異常と思しき挙動は見受けられなかった。また、漁獲については、「みやぎ水産NAVI」のホームページに2017年からの水揚日報(日別の漁獲量)が掲載されていたが、残念ながら2011年まで遡ることは、ここではできなかった。(公募研究、東京学芸大学〔課題番号：KOB008〕)。

同一地点に深さの違う3つの井戸を設置し、地下水位・歪・傾斜を観測する産業技術総合研究所の地下水等総合観測施設は、南海トラフの想定震源域に20点を計画し、2006年から順次整備を進め、現在16点まで進んでいる。本年度は和歌山県の日高佐和観測点の歪み計設置に成功した。気象庁の歪み計ネットワークが東海地域に集中しているのに対して、この観測網は四国西部までの広域をカバーしている(図32)。気象庁は2020年6月よりその歪みデータを南海トラフ沿いの24時間監視に取り入れて、南海トラフ全域で南海トラフ地震臨時情報を発表することが可能になった。また、今年度、ひずみデータの正確な原位置キャリブレーションのために、ひずみ計の設置深度を考慮したひずみ計に対する海洋潮汐の影響を計算するためのプログラムgotic2_modを開発した。海岸からの距離と設置深度との比が20以下の場合にひずみ計の設置深度を考慮したグリーン関数が必要であることを示し(図33)、さらに、海洋潮汐による理論ひずみを産業技術総合研究所のポアホールひずみデータと比較し、同プログラムの有効性を示した(Kamigaichi et al., 2021)。地下水計測において観測井の透水性は重要な情報である。産業技術総合研究所では電気伝導度検層によって透水性の評価を行っているが、多くの観測井で、孔壁崩壊の防止を優先したため、孔内水の置換や水頭の低下などの電気伝導度検層の標準的な測定手順が変更される制約があった。このような制約下における測定がデータの品質

や解析へ与える影響について、孔内水と地層水の圧力差などの観点から取りまとめ(木口・桑原, 2021)、さらに、今後の測定における対応策や解析における注意点なども整理した(産業技術総合研究所[課題番号:AIST09])。

○電磁気的な地震先行現象

電磁気的な先行現象候補の一つである、VLF帯パルス(Asada et al., 2001)については、中日本の5点で観測をしている。本年度、100MHzサンプリングの収録波形にARモデルとAICを用いる方法(Takanami and Kitagawa, 1988)で、パルス波の到来時刻同定を精密化したところ、トリガタイムを用いた場合に比してパルス源の位置標定が大幅に向上することが確認できた(図34、Nagao et al., 2021)。この試行的位置標定は、2017年5月の5点運用体制の開始以降、ネットワーク域内でおきた最も顕著な内陸浅発地震である、2017年6月25日のM5.6に先立つ5日間の記録に関して行い、地震の2日前にだけ、震源の付近で7発の電磁パルスが発生していた。この時間帯に中日本地域で雷はなく、地震の前兆であった蓋然性が高い。なお、東海大学観測点において、従来の観測場所が、新学部開設のため使用できなくなったので、別の校舎の屋上にセンサを移設した。それに伴い、ノイズフィルターの特性の現場試験を行い変更した(東京大学地震研究所[課題番号:ERI_13]、千葉大学[課題番号:CBA_01])。

情報通信機構(NICT)の国分寺イオノゾンデ観測データによる地震発生予測能力の評価について、今年度は陸域の地震と海域の地震に分けて解析してみた。イオノゾンデデータから日毎に判定できるNmF2異常の時系列と、1958年1月1日-2019年9月30日に国分寺観測点から震央距離350km以内で発生した $M \geq 6.0$ 、震源深さ $D \leq 40\text{km}$ の地震を比較した。予測対象地震の発生日数は海域で71日、陸域で19日であった(全解析日数は22553日)。海域地震に関しては地震に6-15日先行して、陸域地震に関しては地震に1-20日先行してNmF2異常が有意に発生することがわかった。みかけの予知率は、陸域の地震に対しては9/19、海域の地震に対しては19/71であった。さらに、先行現象としての有意性は地震の発生時系列をランダム化すると消失することを確認した。また、GPSデータと同様に日々NICTにて公開されるイオノゾンデデータを用いてリアルタイム解析が実施できるようにした(千葉大学[課題番号:CBA_01])。

巨大地震の数十分前に報告されているGNSS-TEC変動に関して、Heki and Enomoto (2015)は、類似の変動が地震と関連なく頻繁に起きていることを認めた上で、2011年東北沖地震前の4ヶ月間についてそのような変動の出現頻度(10時間に1度)を求め、この程度の出現頻度では、 $M_w 8.5$ 以上の地震5つ全てにおいてその直前1.5時間以内にTEC変動があったことを説明できず、TEC変動には地震直前の先行現象が含まれていることを主張した。これに対してIkuta et al. (2020)は同様の解析を、ただし、利用できる衛星を全て考慮して行くとTEC変動の出現頻度は2倍程度に上がり、Heki and Enomoto (2015)で報告されている $M_w 8.0$ 以上の地震のうち5つにTEC変動が先行したという観察は、地震と関係ない変動がたまたま地震直前の時期におきたという、偶然の時の一致で説明できると主張した。しかし、Iwata and Umeno (2016)は、近隣の観測点の相関に注目するCRA解析を適用したところ、東北沖地震の1時間前の大きな異常は残るが、周期性の強い太陽活動起源による異常が抑えられて、地震と関係のない時期の異常出現頻度は圧倒的に低下することを示した。これに対して、Ikuta et al. (2021)は、日本全国のより大きなデータセットに対して同様の解析を行い、Iwata and Umeno (2016)の示した東北沖地震の

前の変動は、統計的にみて異常に大きいとはいえないと論じた。これに対して、本年度、CRA解析の出力変動の統計は、SIPの場所(特に緯度)に大きく依存するから、異常の閾値を決めるためには、同一地域にSIPをもつデータのCRA結果の統計を見るべきであり、そうした場合には、東北沖地震の1時間前のCRA値はやはり圧倒的に異常と言えると反論した(千葉大学[課題番号:CBA_01]、Umeno et al., 2021)。

昨年度、2011年東北沖地震前後のTEC異常について電離圏電子密度の三次元トモグラフィを行い、preseismicな異常とpostseismicな異常(主に津波による)の場所がずれていること、また、preseismicな異常は陸域に限られることを見いだした(Muafiry and Heki, 2020)が、今年度は、同様の解析を2010年マウレ地震(チリ中部)について行った。地上局の偏在のために、300kmより高い高度の電離圏については、電子密度分布を忠実に再現することが容易でないことがわかったが、それでも、震源上空約300kmの電離圏F領域に正の電子密度異常が生じていたことが見いだされた(千葉大学[課題番号:CBA_01]、Muafiry and Heki, 2021)。

昨年度、2018年2月2日に打ち上げられた中国の地震電磁気衛星(CSES-1)のIn-situ電離圏電子数変動、およびヨーロッパの軌道決定センターが発表している全球電離圏マップ(CODE-GIMTEC)のデータと、インドネシアで発生した35個のM5.8以上の地震を比較する統計解析から、地震の1-7日前に電離圏電子数変動の有意な正の異常を見いだした(Song et al., 2020)。今年度は、CSES1データについて、さらに(1)2020年10月30日のトルコの地震(M7.0)、(2)2020年1月28日のジャマイカ地震(M7.7)について調査した。(1)のトルコの地震については磁気嵐と重なっており、CSES1のIn-situ電離圏電子関連データには地震に先行する明確な変動は確認できなかった。一方、(2)のジャマイカの地震に関して地震に先行する変動が確認され、GIM-CODEを用いた統計解析を実施中である(千葉大学[課題番号:CBA_01])。

フランスのDEMETER衛星が地震にリードタイム4時間以内で先行傾向のある異常を捉えた(Nemec et al., 2008, 2009)VLF帯電場強度異常を多数の小型衛星(CubeSat)で捉えるための衛星開発は、エンジニアリングモデルにより6Uサイズ(10×20×30cm)で可能なことが示しており、今年度は、運用ダイアグラム等より具体的なミッション設計と、BBM(新規技術要素を有する開発において、設計の実現性を確認するために高価な宇宙用の部品ではなく、地上の一般用部品や材料を使用して製作・試験されるモデル)の設計・製作・試験を進めた(公募研究、宇宙航空研究開発機構[課題番号:KOB007]、飯田, 2021; 山崎, 2021)。

○地震・火山・津波によって誘起されるTEC変動

早期警報等に役立つと期待される、地震・津波・火山によって励起されるTEC変動についても事例解析を進めた。地震時電離圏擾乱に含まれる音波成分(AW)と内部重力波成分(IGW)の振幅を、2011年東北沖地震、2010年マウレ地震、2003年十勝沖地震、1994年北海道東方沖地震に加え、津波地震として知られる2010年メンタワイ地震の計5個の地震についてGNSS観測網のデータを解析して求め、(1)大きな地震ほど大きなIGW/AW比を示すこと、(2)津波地震はそれらのトレンドから大きくずれた大きなIGW/AW比を示すことが明らかになった。これは断層運動が長い時間かけて起こるほど、地殻上下変動もゆっくり進行し、その結果長い周期の大気波動をより効率的に励起することを示唆することが

わかった (Heki and Takasaka, 2021a, b)。また、GNSSデータを利用したTECデータから浅間山、新燃岳、桜島、口永良部島の2004～2015年の5回の爆発的な火山噴火に対する電離圏応答を比較した (Cahyadi et al., 2021)。その結果、電離層のF領域の音波速度で外側に伝播する周期が約80秒のN字型の擾乱を引き起こすことがわかった。これらのTEC擾乱の振幅は、バックグラウンドのVTEC値の数%であることもわかり、火山爆発の強度の新しい指標となることを示した (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

電離圏電子密度の三次元のトモグラフィ解析手法についても進展があった。まず、電離圏電子密度の分布について、従来のカルマンフィルタの計算要件を軽減するために、再帰的な更新プロセスを必要としない、時間に依存しない簡略化されたカルマンフィルタ (SKF) を採用したトモグラフィ手法を開発した。この手法は初期値依存性があり、電離圏電子分布が静穏な場合は、実際に近い電子密度分布を再構成することがわかったが、擾乱時には再構成精度にやや問題があることがわかった (Song et al., 2021a)。そこで、従来の線形正則化法を改良した。従来の方法では、対象とする空間ボクセルに対して東西南北上下の6方向への変動に着目して拘束条件をかけているが、この方法では擾乱時に適切な結果が得られていない。本研究では、この拘束条件を上下の2方向に限ることにより、変動の大きい擾乱時の電離圏電子密度分布も再現可能な手法を開発した。この手法の再構成精度の評価を、国際標準電離圏モデル (IRI) による静穏時の電離圏電子密度や、これに人工的な局所電子密度擾乱を付加した場合において行い、その有効性を担保した (Song et al., 2021b)。次に、実際のデータを用いて、日本付近の典型的な電離圏電子密度擾乱である大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱や、近年わかってきた台風や地震動・津波によって励起された電離圏擾乱を再構成し、これらの電子密度擾乱の3次元構造を解析・考察した。その結果、大規模・中規模伝搬性電離圏擾乱は電離圏不安定、地震動は音波、台風や津波は大気重力波によって電離圏擾乱が励起されていることを示した。(宋, 2022)。このトモグラフィ手法で2011年のM9.0東北地方太平洋沖地震発震後の電子密度構造を調査したところ、電離層中を水平方向に速度約2.3-3.3km/sで伝播する、地震動 (レーリー波) に励起された擾乱と、水平方向に速度200-230m/sで伝搬する、津波に励起された擾乱を検知できた (図35)。これは、昨年度の解析結果と調和的である。また、地震動励起の擾乱に関しては垂直方向に450-600kmの波長があり、津波に関しては垂直方向に約200-250kmの波長があることも初めてわかった。特に津波に関しては、推定される背景の中性大気が北方向に49.3m/sで移動することが初めて観測的に推定することができた。これらの数値は大気重力波の条件 (分散式) を満足する合理的な値であり、津波による電離層の擾乱が大気重力波で発生したことを強く示唆する。従来の手法では不可能であった電離圏密度擾乱の3次元構造について、観測に基づいて現実的な空間分布を再構成したことは意義深く、今後、地震や津波に関連する影響の理解や把握に大きく貢献すると期待される。具体的には、津波発生領域の海面変動の検知による新しい津波緊急地震速報の開発や、地震前兆的電離圏変動の理解や物理機構の解明・評価である (千葉大学 [課題番号: CBA_01])。

これまでの課題と今後の展望

DONET、S-netデータの活用が本格化し、海域における地震観測網の巨大な空白域がなくなったことで、日本海溝、南海トラフのプレート境界の監視能力が増している。また、

AE、微小地震、LFE、微動、繰り返し地震など様々な微小イベントの検出において、機械学習等のデータサイエンス技術を用いて連続波形を総当たりに走査する客観的な自動検出技術が活用され始めた。こういった手法は、テンプレートイベントの偏り等のバイアス要因が避けられているので検出率の均質性に優れると期待でき、地震発生確率の時間変化との相関を探る目的に適している。本計画でULF磁場、イオノゾンデデータ、背景地震活動の潮汐同期などについて示されたように、サンプル数が十分ある場合には確率利得がわずかに1を超える程度の弱い傾向でも先行性の実在が示されることがある。先行現象の種類による予知率の高低、あるいは各々の先行現象の予知率の予測対象地震の特性への依存性は、地震発生プロセスと先行現象のメカニズムについてのユニークな情報であり、様々な先行現象を大きなデータセットで正確に評価するべきであろう。また、VLFEやSSEなど、より規模の大きなスロー地震もデータの質及び量が増しており、地震発生との相関を多数例から統計的に評価する経験的なアプローチが可能な段階かもしれない。

成果リスト

- 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.
- Aizawa K., S. Takakura, H. Asaue, K. Koike, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Utsugi, H. Inoue, K. Tsukamoto, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Yoshinaga, N. Matsushima, K. Uchida, Y. Tsukashima, T. Matsushima, H. Ichihara, D. Muramatsu, Y. Teguri, A. Shito, S. Matsumoto, and H. Shimizu, 2021, Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan, *Earth Planets Space*, 73:12, doi:10.1186/s40623-020-01340-w.
- Ariyoshi, K., T. Kimura, Y. Miyazawa, S. Varlamov, T. Iinuma, A. Nagano, J. Gomberg, E. Araki, T. Miyama, K. Sueki, S. Yada, T. Hori, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2021, Precise Monitoring of Pore Pressure at Boreholes Around Nankai Trough Toward Early Detecting Crustal Deformation, *Frontier Earth Science*, 9, 717696, doi:10.3389/feart.2021.717696.
- 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.
- 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, doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104902.
- Baba, S., K. Obara, S. Takemura, A. Takeo, and G.A. Abers, 2021a, Shallow Slow Earthquake Episodes Near the Trench Axis Off Costa Rica, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB021706, doi.org/10.1029/2021JB021706.
- 馬場 慧・小原一成・武村俊介・竹尾明子・栗原 亮, 2021b, 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, 2021c, 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.
- Cahyadi, M.N., E.Y. Handoko, R.W. Rahayu, and K. Heki, 2021, Comparison of volcanic explosions in Japan using impulsive ionospheric disturbances, *Earth Planets Space*, 73(228), doi:10.1186/s40623-021-01539-5.
- Chen, H., M. Miao, Y. Chang, Q. Wang, XH. Shen, K. Hattori, and P. Han, 2021, Singular Spectrum Analysis of the Total Electron Content Changes Prior to $M \geq 6.0$ Earthquakes in the Chinese Mainland During 1998-2013, *Front. Earth Sci.*, 9, 677163, doi:10.3389/feart.2021.677163.
- Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura, 2021a, 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, 0-09.
- Chujo, N., H. Hirose, T. Kimura, 2021b, 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.
- Enescu, B., Y., Takeda, and M. Miyazawa, 2021a, Dynamic triggering of earthquakes in volcanic and geothermal areas before and after the 2011 M9.0 Tohoku-oki earthquake, AGU Fall Meeting 2021, S41A-02, December 16 (oral, online).
- Enescu, B., I.-A. Moldovan, and C. Ionescu, 2021b, Analysis and forecasting of Romanian seismicity (AFROS) project: aim and preliminary results, AGU Fall Meeting 2021, NH25A-0542, December 14 (poster, online).
- Fukuda, J. and K. M. Johnson, 2021a, Bayesian inversion for a stress-driven model of afterslip and viscoelastic relaxation: Method and application to postseismic deformation following the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2020JB021620, doi:10.1029/2020JB021620.
- 福田淳一・K. M. Johnson, 2021b, ベイズ統計学による測地データの非線形逆解析(招待講演), 日本地震学会2021年度秋季大会, S23-08.
- Genzano, N., R. Colonna, C. Filizzola, K. Hattori, M. Lisi, N. Pergola, and V. Tramutoli, 2021, A focus on the capability of the RST-based satellite TIR anomalies for the short-term seismic hazard assessment in Japan (invited), 日本地球惑星科学連合2021年大会, MIS08-14.
- Gresse, M., M. Uyeshima, T. Koyama, H. Hase, K. Aizawa, Y. Yamaya, Y. Morita, D. Weller, T. Rung-Arunwan, T. Kaneko, Y. Sasai, J. Zlotnicki, T. Ishido, H. Ueda, and M. Hata, 2021, Hydrothermal and Magmatic System of a Volcanic Island Inferred From Magnetotellurics, Seismicity, Self-potential, and Thermal Image: An Example of Miyakejima (Japan), *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126(6), doi:10.1029/2021JB022034.
- Guo, Y., J. Zhuang, and H. Zhang, 2021, Heterogeneity of aftershock productivity along the mainshock ruptures and its advantage in improving short-term aftershock forecast. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB020494, doi:10.1029/2021JB020494.

- Hamama, I. and M.-Y. Yamamoto, 2021, Infrasonic Earthquake Detectability Investigated in Southern Part of Japan, 2019, *Sensors*, 21(3), 894, doi:10.3390/s21030894.
- Han, P., J. Zhuang, K. Hattori, C.-H. Chen, F. Febriani, and H. Chen, 2021, Assessing the potential earthquake precursory information in ULF magnetic data recorded in Kanto, Japan during 2000-2010: distance and magnitude dependences (invited), 日本地球惑星科学連合2021年大会, MIS08-05.
- Heki, K., 2021a, Chapter 21: Ionospheric Disturbances Related to Earthquakes, in *Ionospheric Dynamics and Applications*, Geophys. Monograph, 260, edited by C. Huang, G. Lu, Y. Zhang, and L. J. Paxton, Wiley/American Geophysical Union, 511-526, doi:10.1002/9781119815617.ch21.
- Heki, K., 2021b, Ionospheric disturbances before and after large earthquakes: How can we utilize the information (invited), NSF Convergence Workshop on Bringing Land, Ocean, Atmosphere and Ionosphere Data to the Community for Hazards Alerts (online), May 28.
- Heki, K. and Y. Takasaka, 2021a, Slow earthquake signatures in the ratio between AW and IGW amplitudes in coseismic ionospheric disturbances (invited), EGU General Assembly 2021, doi:10.5194/egusphere-egu21-758.
- Heki, K. and Y. Takasaka, 2021b, Slow earthquake signatures in the ratio between acoustic and internal gravity wave amplitudes in coseismic ionospheric disturbances, JPGU (online), Jun. 5.
- Heki, K. and T. Fujimoto, in press, Atmospheric modes excited by the 2021 August eruption of the Fukutoku-Okanoba volcano, Izu-Bonin Arc, observed as harmonic TEC oscillations by QZSS, *Earth Planets Space*.
- Hiramatsu, Y., Y. Tanaka, and A. Kobayashi, 2021a, 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, 2021b, 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, and T. Nishimura, 2021a, 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, 2021b, 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.
- Hirose, F., K. Tamaribuchi, and K. Maeda, 2021c, Characteristics of Foreshocks Revealed by an Earthquake Forecasting Method Based on Precursory Swarm Activity, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126, e2021JB021673, doi:10.1029/2021JB021673.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・上垣内 修, 2021d, 背景地震活動の地球潮汐相關情報に基づく地震予測モデルの効率: トンガ・ケルマディック海溝沿いのプレート境界型大地震に対して, 日本地震学会2021年秋季大会, S14P-01.

- Hirose, F., K. Maeda, and O. Kamigaichi, 2022, Efficiency of earthquake forecast models based on earth tidal correlation with background seismicity along the Tonga-Kermadec trench, *Earth Planets Space*, 74, 10, doi:10.1186/s40623-021-01564-4.
- Hsu, Y.-J., H. Kao, R. Burgmann, Y.-T. Lee, H.-H. Huang, Y.-F. Hsu, Y.-M. Wu, and J. Zhuang, 2021, Synchronized and Asynchronous Modulation of Seismicity by Hydrological Loading: A Case Study in Taiwan. *Science Advances*, 7(16), eabf7282. doi:10.1126/sciadv.abf7282.
- Igarashi, T. and A. Kato, 2021, Evolution of aseismic slip rate along plate boundary faults before and after megathrust earthquakes, *Commun. Earth Environ.*, 2, 1, 1-7, doi:10.1038/s43247-021-00127-5.
- 飯田智之, 2021, 航行用VLF電波の軌道上データを用いた地震先行現象検知検証衛星のミッション設計の提案, 日本大学理工学部航空宇宙工学科卒業論文.
- Iida, T., R. Futamata, M. Yamazaki, and M. Kamogawa, 2021, Design and Development of Prelude, Satellite for Seismic Precedence Detection and Verification Using VLF Radio Waves for Navigation Obtained in Orbit, The 35th Annual Small Satellite Conference, 262.
- 飯田智之・山崎政彦・鴨川 仁, 2022, 地震発生前直前の人工電波と雷電波の衛星軌道上電磁波強度減少について, 第100回日本大気電気学会研究発表会, PB1-4.
- 池田里奈・吉田圭佑・高橋 諒・松澤 暢・長谷川 昭, 2021, 2011年東北沖地震後から福島-茨城県境周辺で活発化した地震活動に見られる内陸の繰り返し地震, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Ishiyama, R., E. Fukuyama, and B. Enescu, 2021, Estimation of Time-Variable Friction Parameters Using Machine Learning, AGU Fall Meeting 2021, MR33A-07, December 15 (oral, online).
- 岩田貴樹, 2021, 地震学における非線形Hawkes過程: 摩擦構成則に基づく地震活動モデル, *統計数理*, 69(2), 209-222.
- 岩田貴樹・平松良浩, 2021, 混合分布による南海トラフ深部低周波微動の規模分布, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09-09.
- 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 Appl. Geophys.*, doi.org/10.1007/s00024-021-02727-w.
- Kano, M., A. Ikeuchi, T. Nishimura, S. Miyazaki, and T. Matsushima, 2021, Potential of megathrust earthquakes along the southern Ryukyu Trench inferred from GNSS data, *Earth Planets Space*, 73, 199, doi:10.1186/s40623-021-01531-z.
- Kamigaichi, O., N. Matsumoto, and F. Hirose, 2021, Green's function at depth of borehole observation required for precise estimation of the effect of ocean tidal loading near coasts, *Geophys. J. Int.*, 227, 275-286, doi.org/10.1093/gji/ggab216.
- Kato, A. and Y. Ben-Zion, 2021, The generation of large earthquakes, *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 26-39, doi.org/10.1038/s43017-020-00108-w.
- 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.

- Katsumata, K. and J. Zhuang, 2020, A New Method for Imaging Seismic Quiescence and Its Application to the Mw=8.3 Kurile Islands Earthquake on 15 November 2006, *Pure Appl. Geophys.*, 177, 3619-3630, doi:10.1007/s00024-020-02498-w.
- Katsumata, K. and M. Nakatani, 2021, Testing the seismic quiescence hypothesis through retrospective trials of alarm-based earthquake prediction in the Kurile-Japan subduction zone, *Earth Planets Space*, 73, 100, doi:10.1186/s40623-021-01418-z.
- 川方裕則・大内智博, 2021, 4MHz程度まで感度を有する広帯域超音波トランスデューサの較正, 日本地震学会2021年度秋季大会, S12P-02.
- 木口 努・桑原保人, 2021, 産総研地下水等総合観測井における透水性評価のための孔井内測定手法の適用事例: 主に測定時の制約に対応するために, 地質調査総合センター研究資料集, 726, 1-32.
- 木口 努・今西和俊・松本則夫, 2021a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2020年11月~2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 330-331.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・矢部 優, 2021b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2020年11月~2021年4月)(63), 地震予知連絡会報, 106, 323-329.
- 木口 努・今西和俊・松本則夫, 2022a, 岐阜県東部の活断層周辺における地殻活動観測結果(2021年5月~2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・矢部 優, 2022b, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2021年5月~2021年10月)(64), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 気象研究所, 2021a, 全国GNSS観測点のプレート沈み込み方向の位置変化, 地震予知連絡会会報, 105, 37-41.
- 気象研究所, 2021b, 南海トラフ沿いの長期的スロースリップの客観検知, 地震予知連絡会会報, 105, 373-377.
- 気象研究所, 2021c, 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, 地震予知連絡会会報, 105, 378-381.
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2021a, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2020年11月~2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 440-450.
- 北川有一・松本則夫・佐藤 努・板場智史・落 唯史・木口 努・矢部 優, 2021b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2020年11月~2021年4月), 地震予知連絡会報, 106, 451-454.
- 北川有一・板場智史・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2022a, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2021年5月~2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 北川有一・松本則夫・佐藤 努・板場智史・落 唯史・木口 努・矢部 優, 2022b, 近畿地域の地下水位・歪観測結果(2021年5月~2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- Kobayashi, T. and T. Sato, 2021, Estimating effective normal stress during slow slip events from slip velocities and shear stress variations, *Geophys. Res. Lett.*, 48(20), e2021GL095690, doi:10.1029/2021GL095690.
- Kurashimo, E., K. Mochizuki, T. Iidaka, T. Takeda, K. Shiomi, S. Kodaira, and K. Obara, 2021a, 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.

Kurashimo, E., T. Iwasaki, N. Tsumura, and T. Iidaka, 2021b, The Role of Fluid-Related Heterogeneous Structures in Controlling the Fault Slip Behavior in the Slow-Earthquake Source Region Along the Nankai Subduction Zone, Southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 48(4), e2020GL089882, doi:10.1029/2020GL089882.

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

栗原 亮・小原一成, 2021b, 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.

Liu, Y., J. Zhuang, and C. Jiang, 2021, Background Seismicity before and after the 1976 Ms 7.8 Tangshan Earthquake: Is Its Aftershock Sequence Still Continuing?, *Seismological Research Letters*, 92, 877-885, doi:10.1785/0220200179.

Maeda, T., K. Obara, and A. Takeo, T. Matsuzawa, 2021a, 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.

前田拓也・小原一成・竹尾明子・松澤孝紀・田中優作, 2021b, 深部低周波微動から検出された2次の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.

松原 誠・汐見勝彦・馬場久紀・佐藤 比呂志・西宮隆仁, 2021, 駿河トラフから東海地域に沈み込むフィリピン海プレート形状, 日本地震学会2021年度秋季大会.

Matsumoto, Y., K. Yoshida, , T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2021, Fault-valve behavior estimated from intensive foreshocks and aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay earthquake sequence, Kyushu, southern Japan, *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JB020278, doi:10.1029/2020jb020278.

松澤 暢・吉田圭祐・内田直希, 2021, 2021年3月(M6.9)と5月(M6.8)の宮城県沖の地震について, 地震予知連絡会会報, 106.

本山 真・山崎政彦・鴨川 仁, 2022, 地震発生前の大気電場変動モデルの検討, 第100回日本大気電気学会研究発表会, PB2-6.

森 絵万・平松良浩, 2021, 2016年熊本地震の相似地震, 日本地震学会2021年度秋季大会, S08P-01.

Muafiry, I. N. and K. Heki, 2021, 3D tomography of the ionospheric anomalies before the 2010 Maule earthquake, Chile: Comparison with the 2011 Tohoku-oki and 2015 Illapel earthquakes, JPGU (on-line), Jun. 6.

Muto, J., Y. Yasuoka, N. Miura, D. Iwata, H. Nagahama, M. Hirano, Y. Ohmomo, and T. Mukai, 2021, Preseismic atmospheric radon anomaly associated with 2018 Northern Osaka earthquake, *Sci. Rep.*, 11, 7451, doi:10.1038/s41598-021-86777-z.

Nagao, T., M. Kamogawa, J. Izutsu, T. Suzuki, A. Saito, A. Sugiura, and H. Kondo, 2021, Development and Preliminary Analysis of a VLF-Band Electromagnetic-Wave Observation System for Short-Term Earthquake Precursory Monitoring, *Front. Earth Sci.*, 9, 658825, doi:10.3389/feart.2021.658825.

- 永田広平・野田朱美・溜渕功史・弘瀬冬樹, 2021a, せん断ひずみエネルギー変化はb値を変化させるか—熊本地震及び西南日本のプレート間固着を例に—, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- 永田広平・溜渕功史・弘瀬冬樹・野田朱美, 2021b, 統合的な地殻活動指標の構築に向けて—“ふつう”の地震活動の特徴抽出—, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- 永田広平・溜渕功史・弘瀬冬樹・野田朱美, 2021c, 日本海溝沿いの地震活動の規模別頻度分布に関する指標値の地域特性とプレート間のすべり現象との比較, 日本地震学会2021年度秋季大会.
- 中谷正生, 2021, 階層的アスペリティを前提とした短期前兆のメカニズムについて, 地震予知連絡会会報, 105, 500-504.
- 楠城一嘉, 2021, b値にもとづく大地震発生予測のモデルのレビュー, 地震予知連絡会会報, 105, 489-492.
- Nanjo, K. Z. and A. Yoshida, 2021, Changes in the b value in and around the focal areas of the M6.9 and M6.8 earthquakes off the coast of Miyagai prefecture, Japan, in 2021. *Earth Planets Space* 73, 176, doi.org/10.1186/s40623-021-01511-3.
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, and M. Kamogawa, 2022, Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence and implications for improving the foreshock traffic-light system, *Tectonophysics*, 822, 229175, doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229175.
- 直井 誠, 2022, 走時の確率トレースを利用した深層学習による震源決定, 防災研究所研究発表講演会.
- 直井 誠・今北啓一・陳 友晴・山本和敏・田中 壘・川方裕則・石田 毅・福山英一・有馬 雄太郎, 2021a, 室内水圧破碎実験によって誘発された微小破壊の地震モーメント・コーナー周波数推定, 日本地震学会2021年度秋季大会, S08-20, 2021年10月16日, オンライン.
- 直井 誠・陳 友晴・田中 壘・有馬 雄太郎, 2021b, 室内水圧破碎実験で誘発された微小破壊のモーメントテンソル解析を目的とした深層学習によるP波初動振幅読み取り, 日本地震学会2021年度秋季大会, S22-P02, 2021年10月14日, オンライン.
- 根本和秀・小島春奈・吉野千恵・金子 柊・北出明嗣・服部克巳・茂木 透・小西敏春, 2021, 地表面付近の地中ラドンフラックス変動について: 強い降水の影響, *Journal of Atmospheric Electricity*, 40(1), 37-41, doi:10.1541/jae.40.37.
- Noda, A. and T. Saito, 2021a, Energy-based method to generate rupture scenarios for megathrust earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan: A necessary condition for earthquake generation, AGU Fall Meeting 2021.
- Noda, A. and T. Saito, 2021b, Energy-based scenarios for megathrust earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021.
- 野田朱美・齊藤竜彦, 2021c, 測地データと地震データを併用した非弾性変形の解析: 新潟神戸変形集中帯への適用, 日本地震学会2021年度秋季大会.
- Noda, A., T. Saito, E. Fukuyama, and Y. Urata, 2021, Energy-based scenarios for great thrust-type earthquakes in the Nankai trough subduction zone, southwest Japan, using an interseismic slip-deficit model, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 126,

e2020JB020417, doi:10.1029/2020JB020417.

- 野村俊一・田中昌之, 2021, 余震誘発効果を考慮した繰り返し地震の予測, 統計数理, 69(2), 239-254.
- Obara, K, 2021a, 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.
- 小原一成, 2021b, 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, T3-0-1(招待).
- 小木曾 仁・溜渕功史, 2021, 地震波振幅の空間分布から推定した紀伊半島南東沖で発生する浅部低周波微動の時空間分布:2020年12月から2021年1月, 日本地震学会2021年度秋季大会.
- 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.
- Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose, 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, doi.org/10.1186/s40623-022-01576-8.
- Omori, Y., H. Nagahama, J. Muto, and Y. Yasuoka, 2021, Atmospheric radon monitoring for earthquake studies -insights from 25-y experiences, Seminar on Earthquake Early Warning System Through Real Time Radon Gas Monitoring, 09-12 November 2021, University of Pannonia, Veszprem, Hungary.
- 小野里 和樹・本島邦行, 2021, 見通し内VHF帯放送波における伝搬異常の発生要因解析, 日本地震予知学会学術講演会, 2021年12月25日, 21-02.
- 織原義明, 2021a, ヤフーコメントから探る民間の地震予測を信じる理由, 日本地震学会2021年秋季大会, S18-03.
- 織原義明, 2021b, これからの地震予知研究に関する一考察, 日本地震予知学会第8回学術講演会, 21-14.
- 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, 2021a, Mantle-derived helium released through the Japan trench bend-faults, Scientific Reports, 11, 12026, 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, 2021b, 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.
- Pei, W., S. Zhou, J. Zhuang, Z. Xiong, and J. Pia, 2022, Application and discussion of statistical seismology in probability seismic hazard assessment studies. Science China Earth Sciences, 65, 257-268, doi:10.1007/s11430-021-9824-0.
- 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, J. Geophys. Res.: Solid Earth, 126, e2021JB022138, doi.org/10.1029/2021JB022138.

- Shimojo, K., B. Enescu, Y. Yagi, and T. Takeda, 2021, Nucleation process of the 2011 Northern Nagano earthquake from nearby seismic observations, *Sci. Rep.*, 11, 8143, doi:10.1038/s41598-021-86837-4.
- Shiobara, H., A. Ito, H. Sugioka, M. Shinohara, and T. Sato, 2021, Tilt Observations at the Seafloor by Mobile Ocean Bottom Seismometers, *Front. Earth Sci.*, 8, 599810, doi:10.3389/feart.2020.599810.
- 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.
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, and C. Yoshino, 2021a, The three-dimensional ionospheric electron density imaging in Japan using the approximate Kalman filter algorithm, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, 219, 105628, doi:10.1016/j.jastp.2021.105628.
- Song, R., K. Hattori, X. Zhang, J.-Y. Liu, and C. Yoshino, 2021b, Detecting the ionospheric disturbances in Japan using the three-dimensional computerized tomography, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 126, e2020JA028561, doi:10.1029/2020JA028561.
- 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.
- 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).
- 高山裕紀・平野史朗・川方裕則, 2021, ハッシュ法を用いた類似波形検出手法の性能比較, 日本地震学会2021年度秋季大会, S09P-12.
- Takemura, S., K. Obara, K. Shiomi, A. Takeo, and 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.
- 竹澤直樹・本島邦行, 2021, MF帯放送波の日没時伝搬異常と地震発生の関連性解析, 日本地震予知学会学術講演会, 2021年12月25日, 21-03.
- Tamakuma, Y., M. Hosoda, Y. Omori, H. Nagahama, T. Ishikawa, M. Shimo, and S. Tokonami, 2021, Car-borne survey for a black shale area and influence of snowfall on absorbed dose rate in air of a coastal area, *Radiat. Environ. Med.*, 10, 96-101.
- Tamaribuchi, K. and M. Ogiso, 2021a, Shallow low frequency earthquake monitoring system based on envelope cross-correlation and amplitude, International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021.
- 溜瀨功史・小木曾仁, 2021b, エンベロープ相関と振幅に基づく浅部低周波地震モニタリングシステム, 日本地震学会2021年度秋季大会.
- Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, Y. Iwasaki, K. Iwakiri, and H. Ueno, 2021, Noise classification for the unified earthquake catalog using ensemble learning: the enhanced image of seismic activity along the Japan Trench by the S-net seafloor network, *Earth Planets Space*, 73:91, doi:10.1186/s40623-021-01411-6.

- 溜瀨功史・小木曾仁・野田朱美, 2022, 浅部低周波地震モニタリングシステムの構築, 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学的諸現象のリアルタイム監視予測システムと活用」.
- Tanaka, M., 2021a, Relationship Between the Moderate Repeating Earthquakes and the Larger-scale Earthquakes on the Trench Side, AOGS2021 VIRTUAL 18th Annual Meeting.
- 田中昌之, 2021b, 中規模繰り返し相似地震と周辺の規模の大きな地震との態様について, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Tanaka, R., M. Naoi, Y. Chen, K. Yamamoto, K. Imakita, N. Tsutsumi, A. Shimoda, D. Hiramatsu, H. Kawakata, T. Ishida, E. Fukuyama, H. Tanaka, Y. Arima, S. Kitamura, and D. Hyodo, 2021, Preparatory AE activity of hydraulic fracture in granite with various viscous fluids revealed by deep learning technique, *Geophys. J. Int.*, 226, 493-510, doi:10.1093/gji/ggab096.
- Tanioka Y., N. Uchida, A. R. Gusman, M. Shishikura, and T. Nishimura, 2021, Special issue, “Kurile arc subduction zone: View of great earthquake generation and disaster mitigation of related phenomena”, *Earth Planets Space*, 63, 1-2, doi:10.1186/s40623-021-01439-8.
- Teshiba, S. and 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.
- 露木貴裕, 2021, 天竜船明レーザーひずみ計による地殻変動観測, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- 上田 拓, 2022, Seismicity analysis based on statistical modeling: Connection with stress change, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・博士論文.
- 山名祐輝, 2021, 本震直前の地震活動, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・修士論文.
- Uchida, N. and R. Burgmann, 2021a, A decade of lessons learned from the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Rev. Geophys.*, 59, e2020RG000713, doi:10.1029/2020RG000713.
- Uchida, N. and R. Bürgmann, 2021b, Learning from a disastrous megathrust earthquake, *EOS*, 102, doi:10.1029/2021E0159741.
- Umeno K., R. Nakabayashi, T. Iwata, and M.G. Kao, 2021, Capability of TEC correlation Analysis and Deceleration at Propagation Velocities of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances: Preseismic Anomalies before the Large Earthquakes, *Open Journal of Earthquake Research*, 10(4), 105-137, doi:10.4236/ojer.2021.104008.
- Xiong, Z., J. Zhuang, S. Zhou, M. Matsu'ura, M. Hao, and Q. Wang, 2021, Crustal strain-rate fields estimated from GNSS data with a Bayesian approach and its correlation to seismic activity in Mainland China, *Tectonophysics*, 81, doi:10.1016/j.tecto.2021.229003.
- 矢部 優・落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2021, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2020年11月～2021年4月), *地震予知連絡会報*, 106, 271-322.
- 矢部 優・落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝

- 紀・汐見勝彦, 2022, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2021年5月~2021年10月), 地震予知連絡会報, 107, 印刷中.
- 山崎政彦, 2021, 地震先行電離圏変動現象検知のためのCubeSatのエンジニアリング・モデル製作:衛星バス・サブシステムの統合, 第十一回気象文化大賞.
- Yang, J., S. Chen, B. Zhang, J. Zhuang, L. Wang, and H. Lu, 2021, Gravity Observations and Apparent Density Changes before the 2017 Jiuzhaigou Ms7.0 Earthquake and Their Precursory Significance. *Entropy*, 23, 1687, doi:10.3390/e23121687.
- 横谷直人, 2021, 二次モーメントによる小中規模地震の震源過程の推定, 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻・修士論文.
- 吉田圭佑・金森博雄, 2021, Radiated energy and source complexity of small earthquakes estimated from a large source time function data base in Japa, 日本地震学会2021年秋季大会.
- 吉田圭佑・松澤 暢・内田直希, 2021a, Initiation of the M^9 earthquake cycle: the 2021 Miyagi-Oki Mw7.0 earthquake at the deep seismic/aseismic transition, 日本地震学会2021年秋季大会.
- Yoshida, K., H. Noda, M. Nakatani, and B. Shibazaki, 2021b, Backward earthquake ruptures far ahead of fluid invasion: Insights from dynamic earthquake-sequence simulations, *Tectonophysics*, 229038, doi:10.1016/j.tecto.2021.229038.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, S. Noguchi, and K. Kasahara, 2021c, Low-frequency earthquakes in close vicinity of repeating earthquakes in the brittle upper crust of Hakodate, Hokkaido, northern Japan, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Yoshida, K., N. Uchida, H. Kubo, R. Takagi, and S. Xu, 2022, Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 578, 117306, doi:10.1016/j.epsl.2021.117306.
- 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.
- 行竹洋平・吉田圭佑・本多 亮, 2021, Aseismic process driving the earthquake swarm, revealed by the dense seismic observation, 日本地球惑星科学連合2021年大会.
- Zheng, Y., B. Enescu, J. Zhuang, and C. Yu, 2021, Data replenishment of five moderate earthquake sequences in Japan, with semi-automatic cluster selection, *Earthquake Science*, 34, 310-322, doi:10.29382/eqs-2021-0030.
- Zhuang, J., 2021, Chapter 4. Explaining foreshock and the Bath law using a generic earthquake clustering model. In *Statistical Methods and modelling of seismogenesis*, ed. by Limnios, E. Papadimitriou, and G. Tsaklidis, ISTE Ltd., pp.105-130, ISBN:9781789450378.

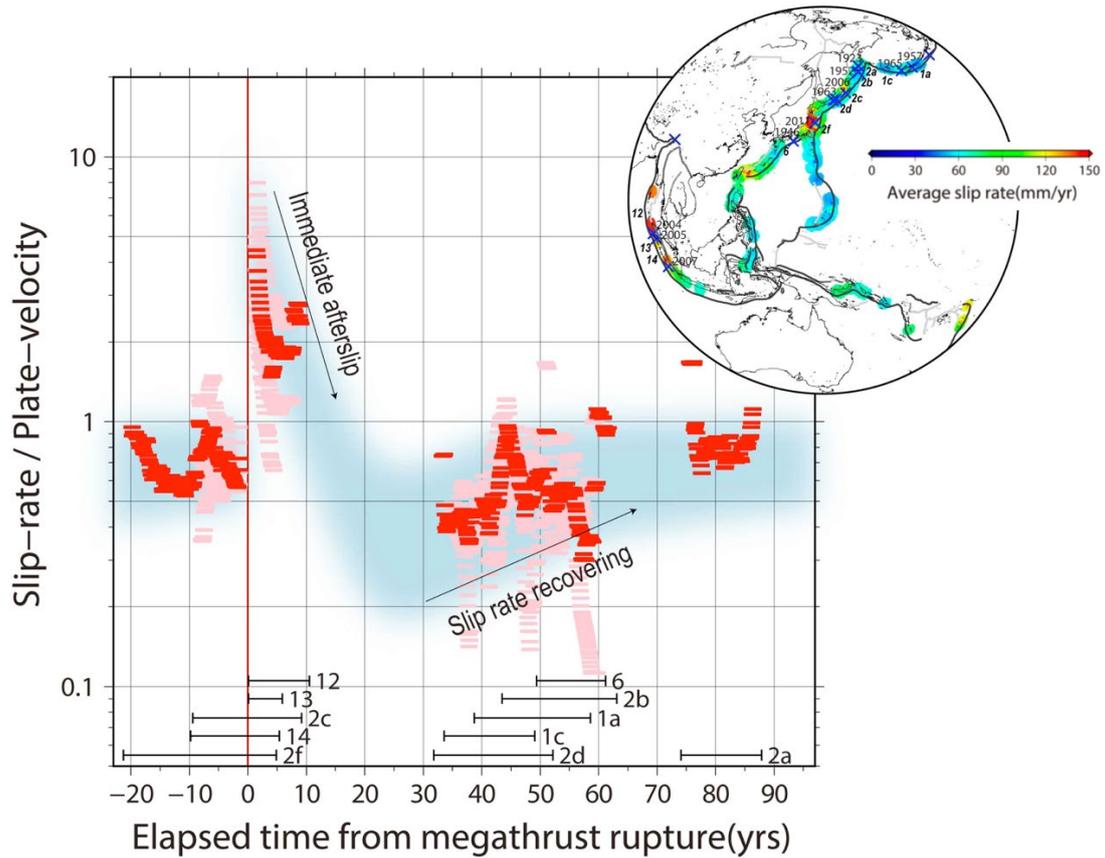


図1. 繰り返し地震から求めた世界の沈み込み帯の背景滑り速度 (Igarashi and Kato, 2021より改変、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

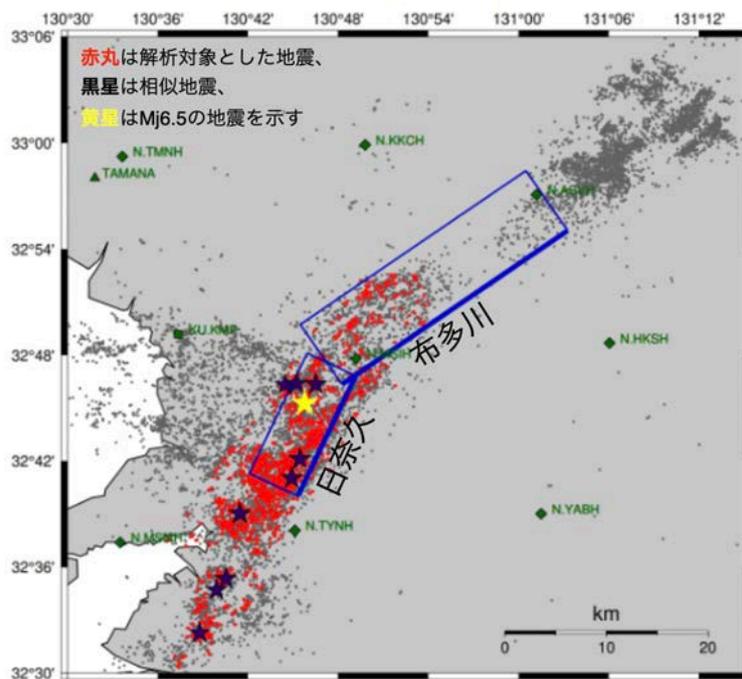


図2. 2016年熊本地震震源域周辺で発生した相似地震の探索 (森・平松, 2021より改変, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

防災科学技術研究所Hi-netや九州大学、気象庁の観測点で記録された地震波形を使用。

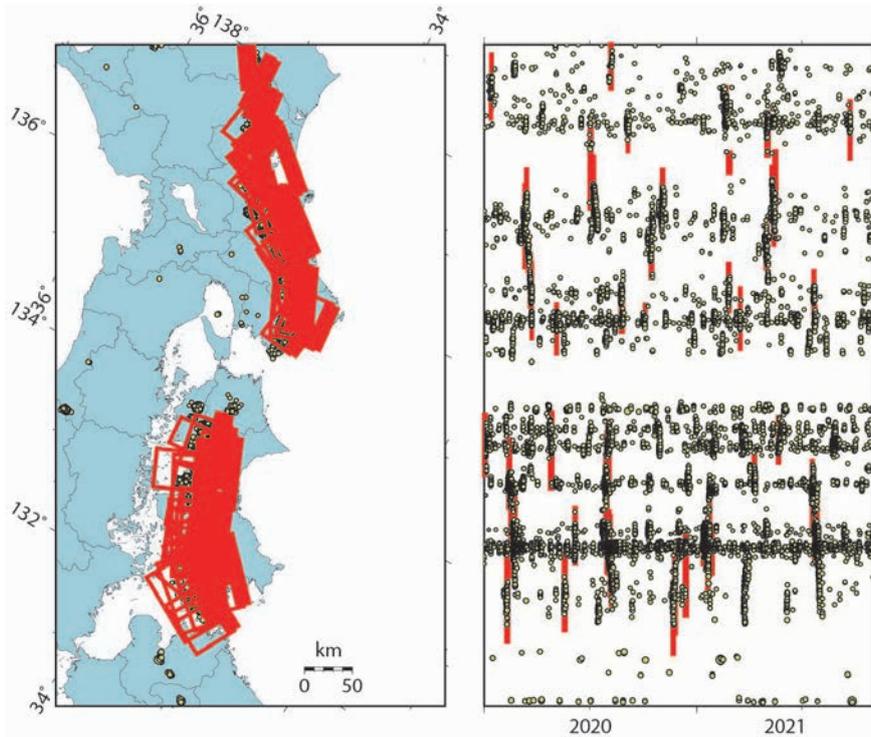


図 3. 産業技術総合研究所・防災科研・気象庁の歪・地下水・傾斜データリアルタイム共有により決定した短期的SSEの断層モデルの位置および時空間分布（矢部・他，2021，2022より改変，産業技術総合研究所〔課題番号：AIST09〕，気象庁〔課題番号：JMA_01〕）
 黄色の丸は同期間の気象庁一元化震源カタログによる深部低周波地震（微動）の震源位置と時空間分布。

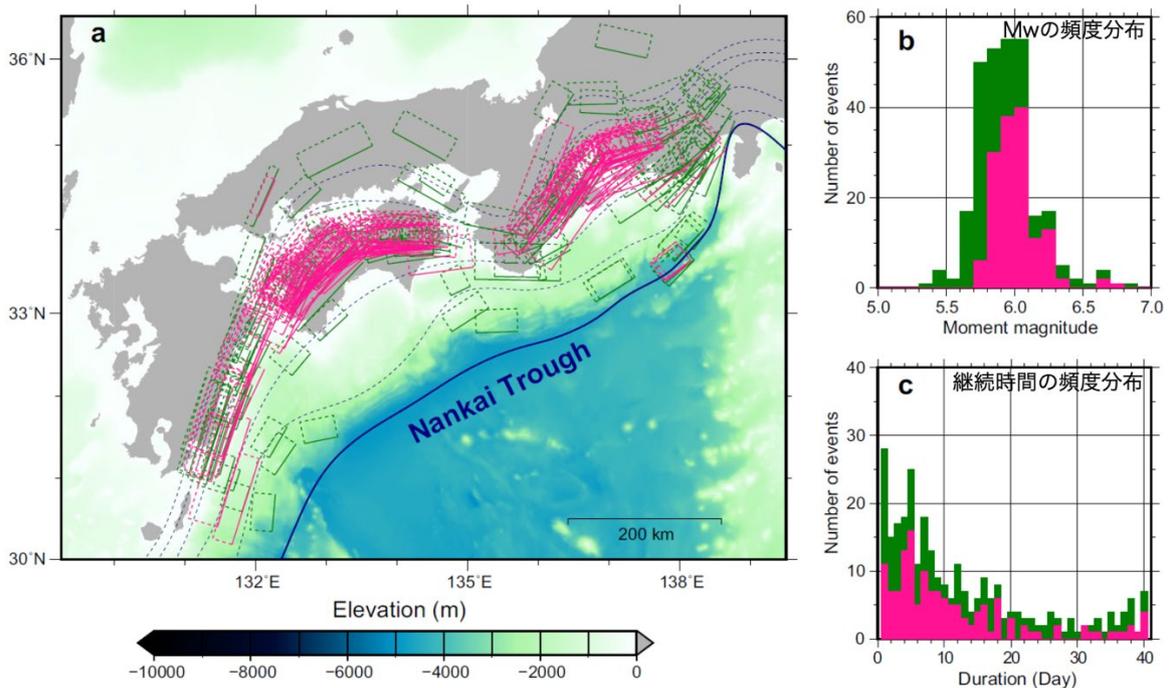


図 4. 新手法によってGNSS時系列データから自動検出された1997-2020年の短期的SSE（Okada et al., 2022より改変，東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）
 ピンクは信頼度の高いもの。

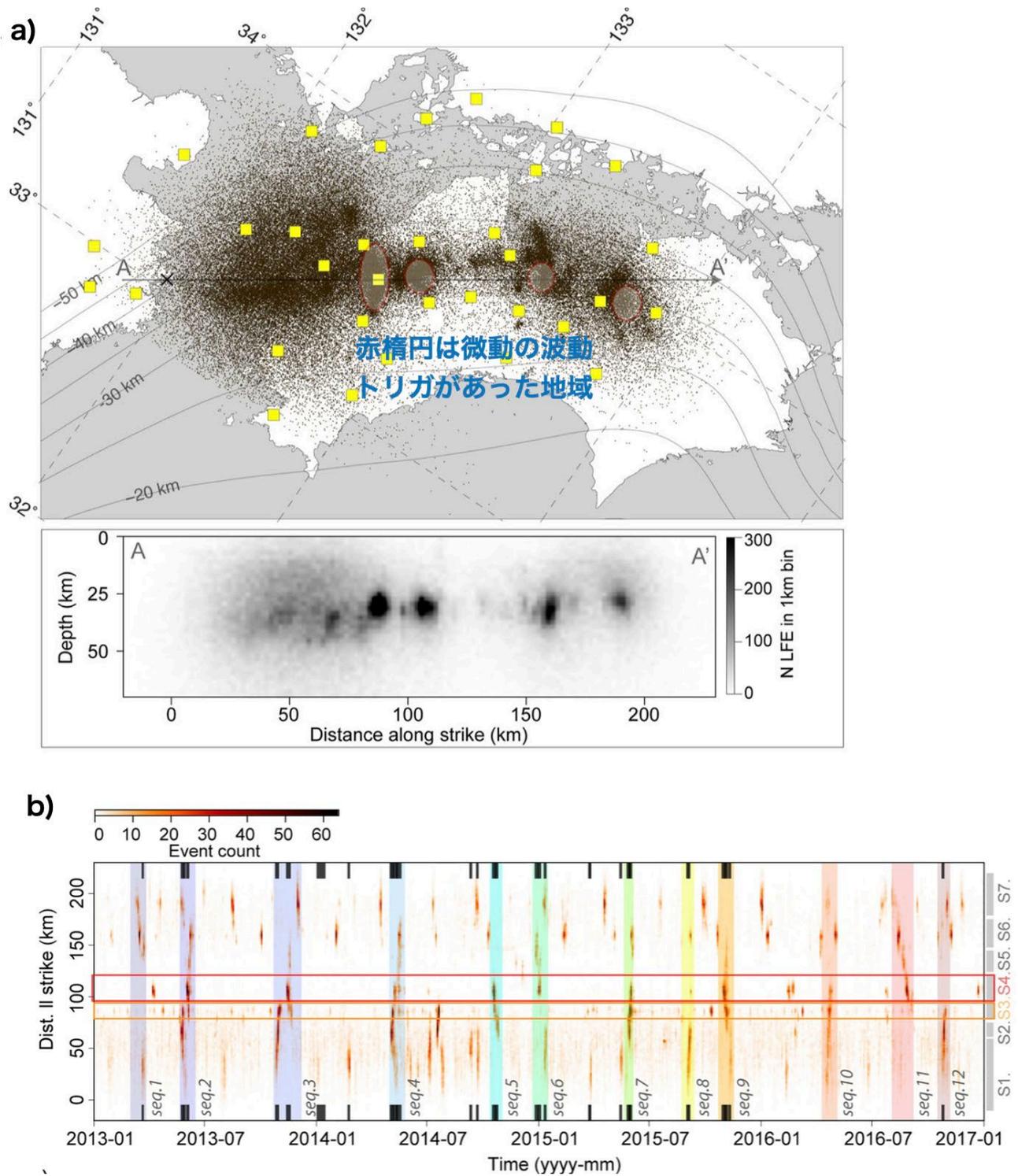


図5. テンプレートを使わない新手法で検出された四国地域のLFE (Poiatea et al., 2021より改変, 東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

a) 空間分布。 b) 1日2kmのビン中のイベント数の時空間分布。12度の顕著なLFE活動期を色付けハイライトしてある。上下の短い黒棒は産業技術総合研究所カタログによる短期的SSEの時期。右端のS1-S7はストライク方向のセグメンテーション。

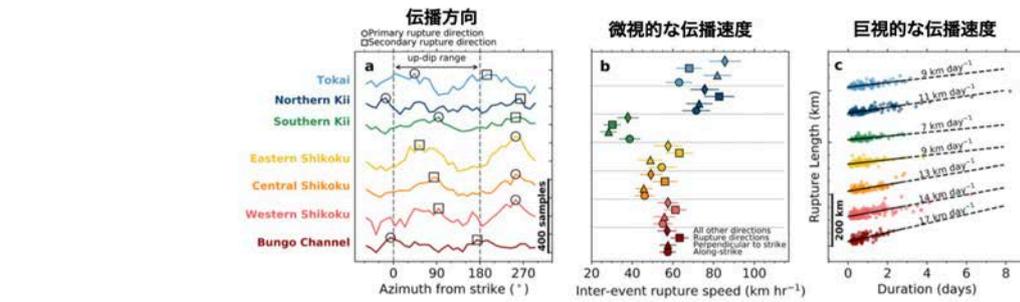
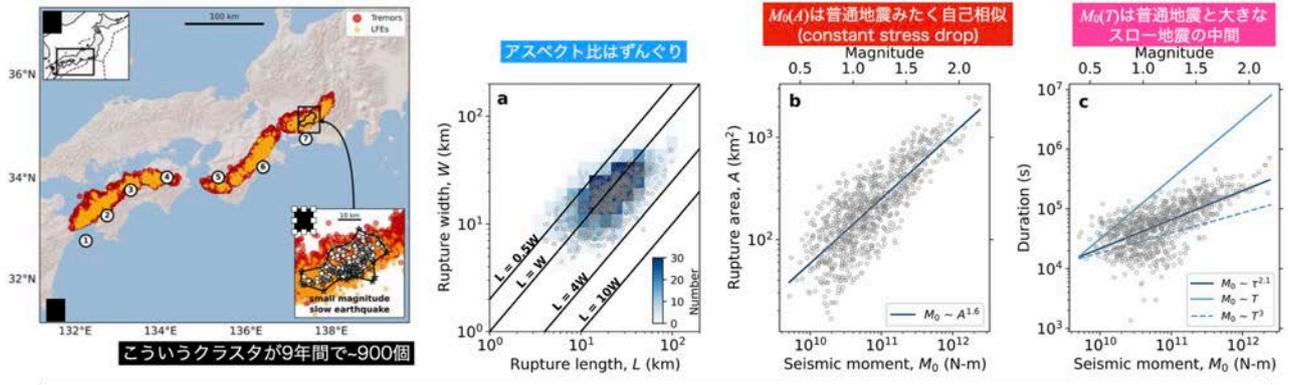


図 6. 微動やLFEのクラスターを小さなSSEだと見做した解析 (Aiken and Obara, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

上段左端: 解析に用いた微動とLFEおよびクラスタの定義

上段のa-c: クラスタのスケージング

下段: クラスタの破壊伝播特性

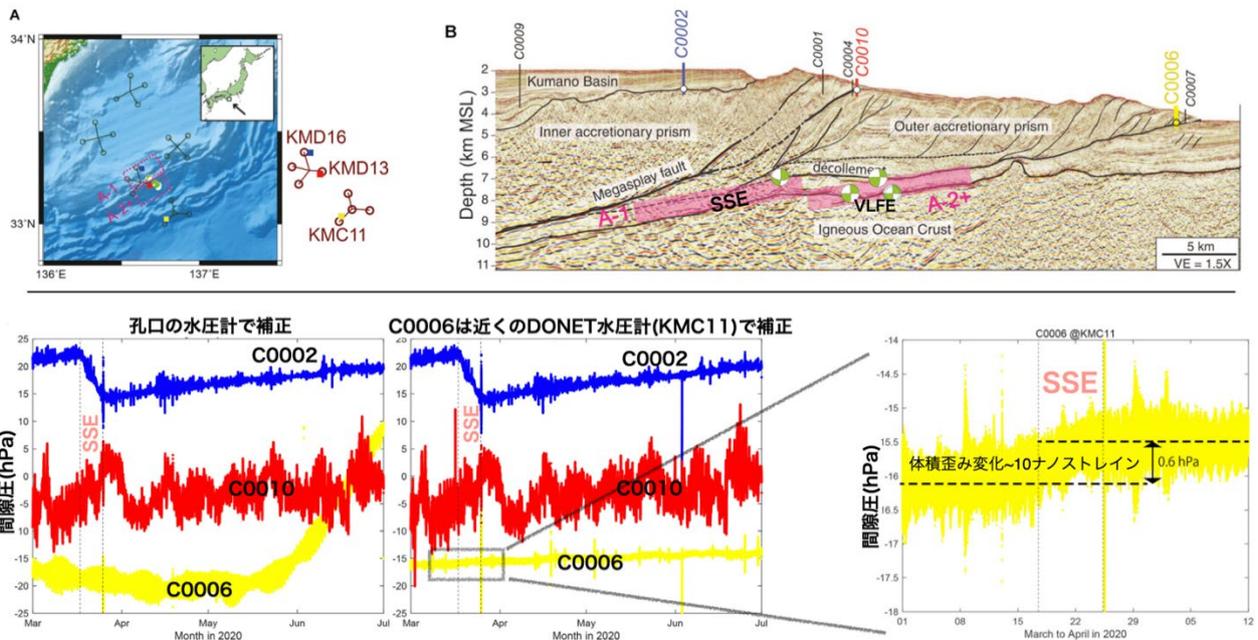


図 7. 間隙水圧変化で捉えた浅部SSE (Ariyoshi et al., 2021より改変、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

上段: A) DONET観測点と間隙水圧観測孔(四角印)の配置図。A-1、A2+はSSEの断層モデル、ビーチボールはVLFEのメカニズムを示す。 B) 反射法地震探査による構造断面図と解釈線。色太線は間隙水圧観測孔。下段: SSE発生時を含む間隙水圧記録

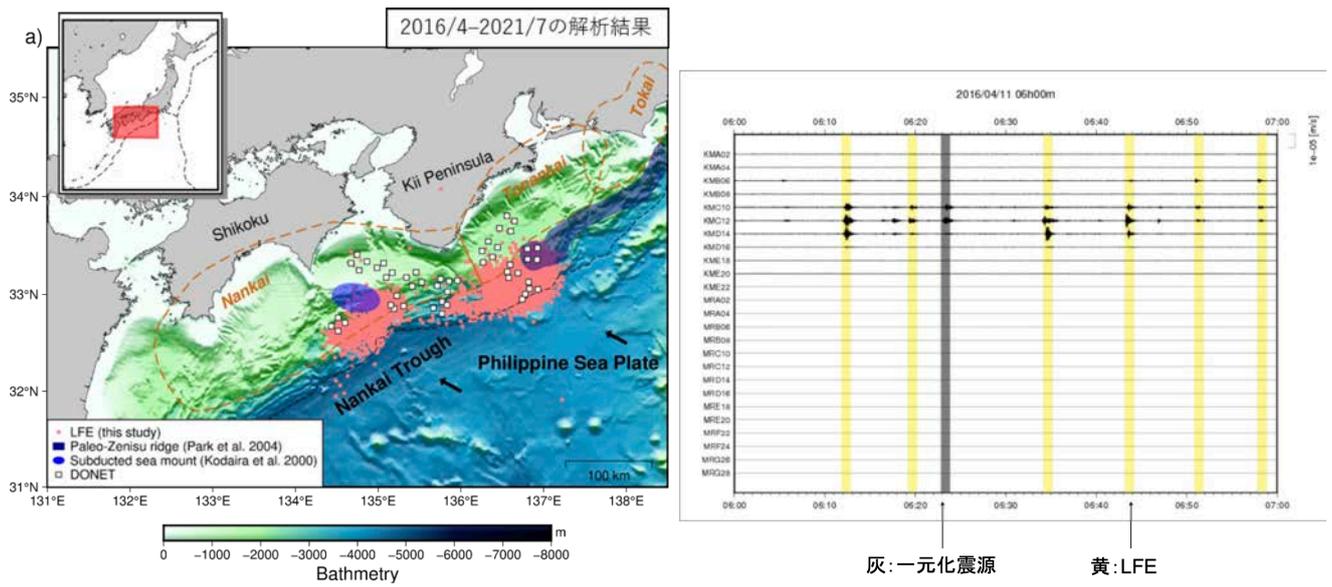


図 8. 最大振幅とエンベロープ相関を用いたハイブリッド法を用いて検出された浅部LFE（溜瀨・小木曾，2021bより改変、気象庁〔課題番号：JMA_01〕）
 ピンク点は本手法により検出された浅部低周波地震。薄い青色はそれぞれ沈み込んだ海山や海嶺、四角印はDONETの観測点を表す。

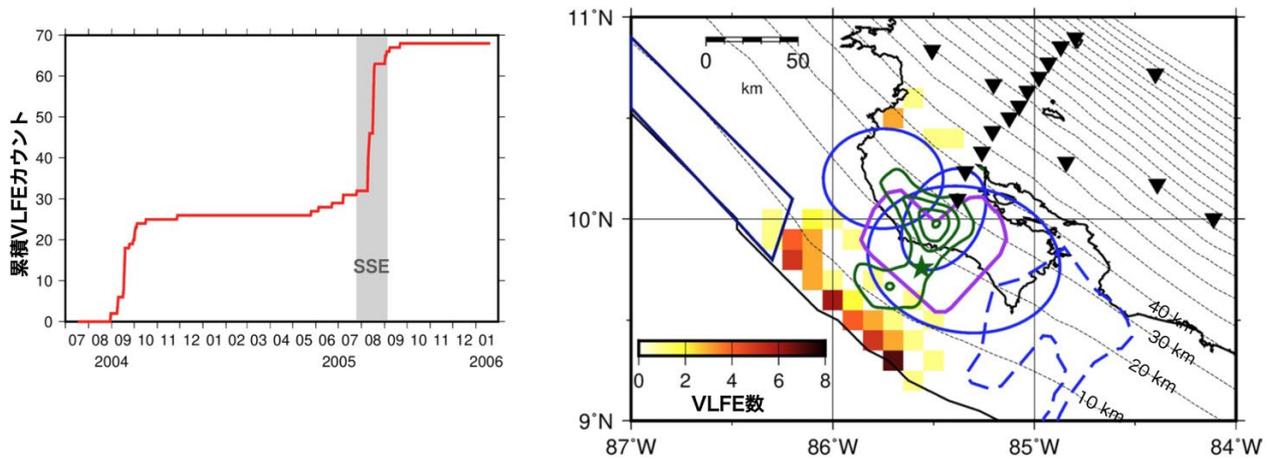


図 9. コスタリカの機動的広帯域地震観測データから検出された浅部VLFE（Baba et al., 2021より改変、東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_12〕）

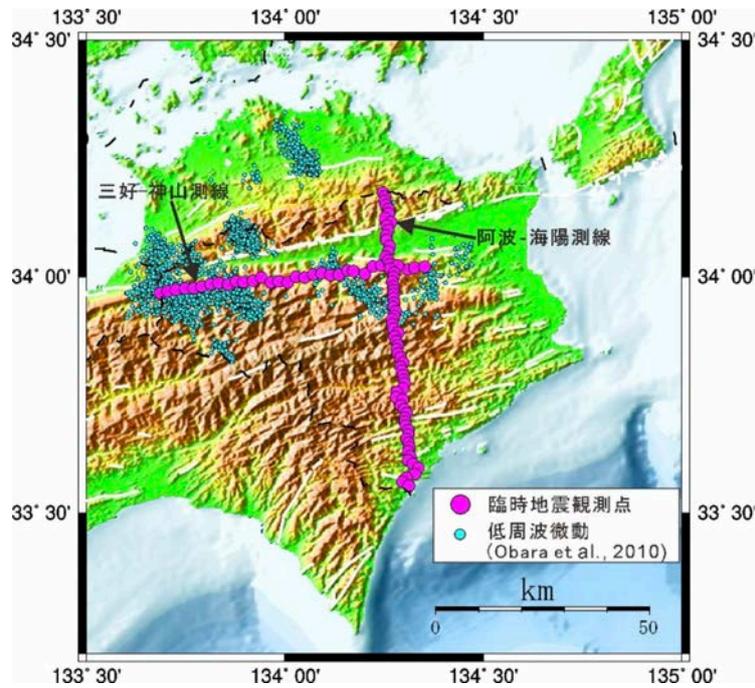


図10. 四国東部の臨時稠密地震観測（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12]）
2021年12月13日よりデータ収録開始。2022年12月まで収録予定。

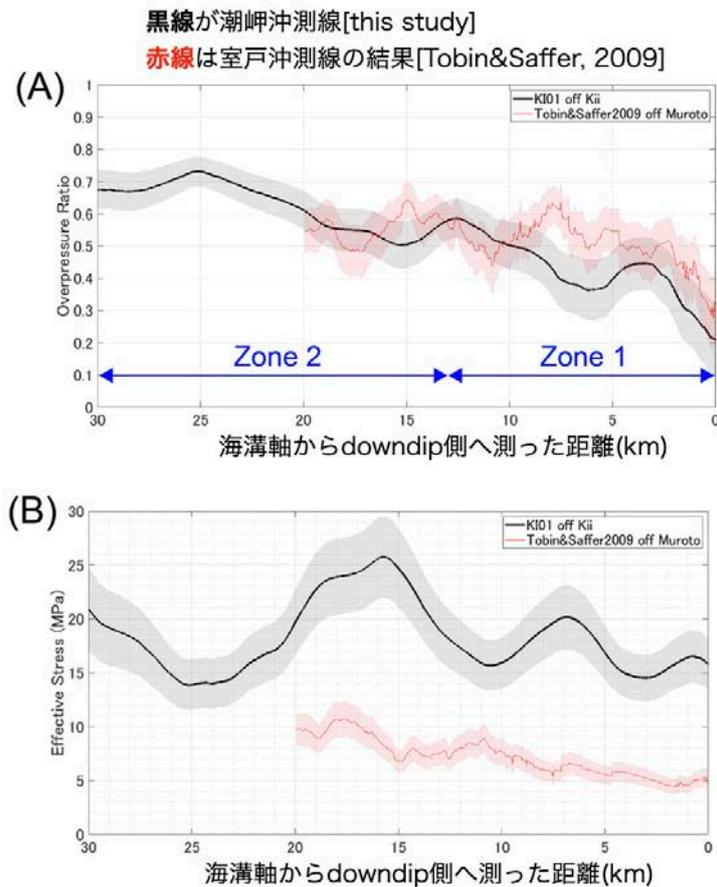


図11. P波速度構造から推定した潮岬沖の(A)過剰間隙水圧比と鉛直有効応力 (Yu et al., 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_12])
Zone1とZone2の区分はデコルマの物性や付加体の層厚変化に基づく。

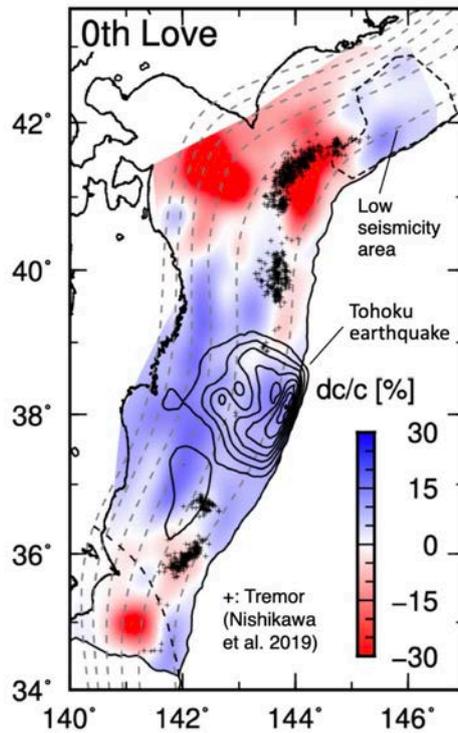


図12. 周期14秒のラブ波基本モードの位相速度マップ (Takagi and Nishida, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12])

2011年東北沖地震すべり域はIinuma 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。

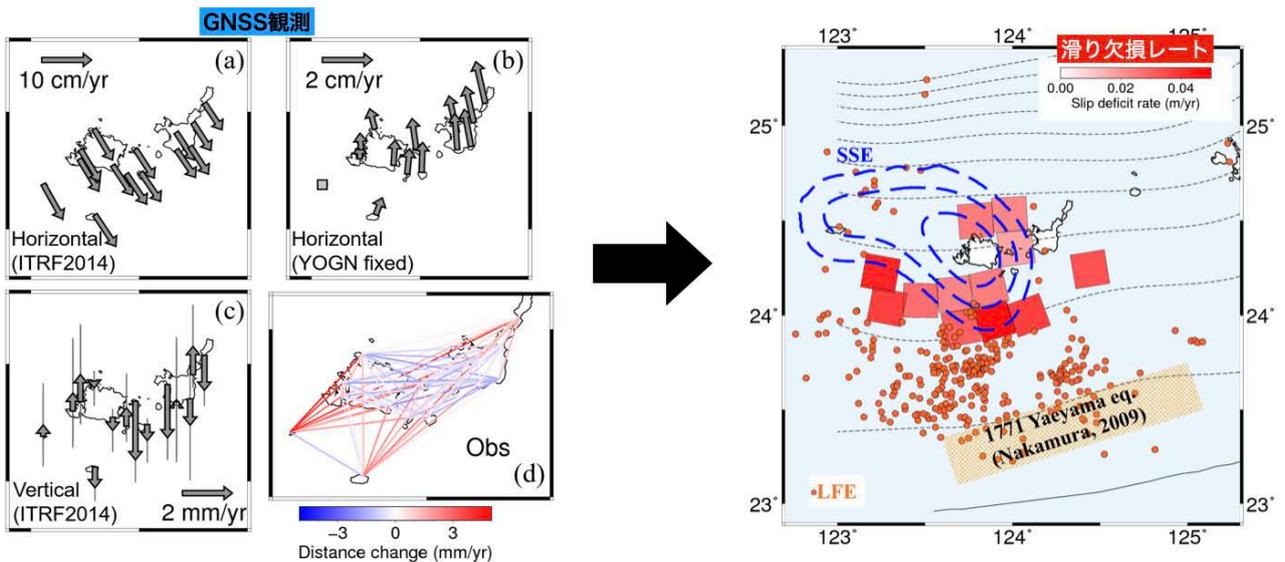


図13. 八重山地方のGNSS観測(左図)から求めた滑り欠損レートの分布 (Kano et al., 2021より改変、京都大学理学研究科 [課題番号: KUS_01])

左図: (a) ITRF2014に準拠した水平定常速度ベクトル。(b) (a)をYOGN観測点(四角で示した図中の最西端の観測点)固定に変換した水平ベクトル。(c) ITRF2014に準拠した上下定常速度ベクトル。 1σ の推定誤差を示しているが、水平速度ベクトルでは視認できないくらい小さい。(d) 水平定常速度ベクトルから計算した各観測点間の基線長変化

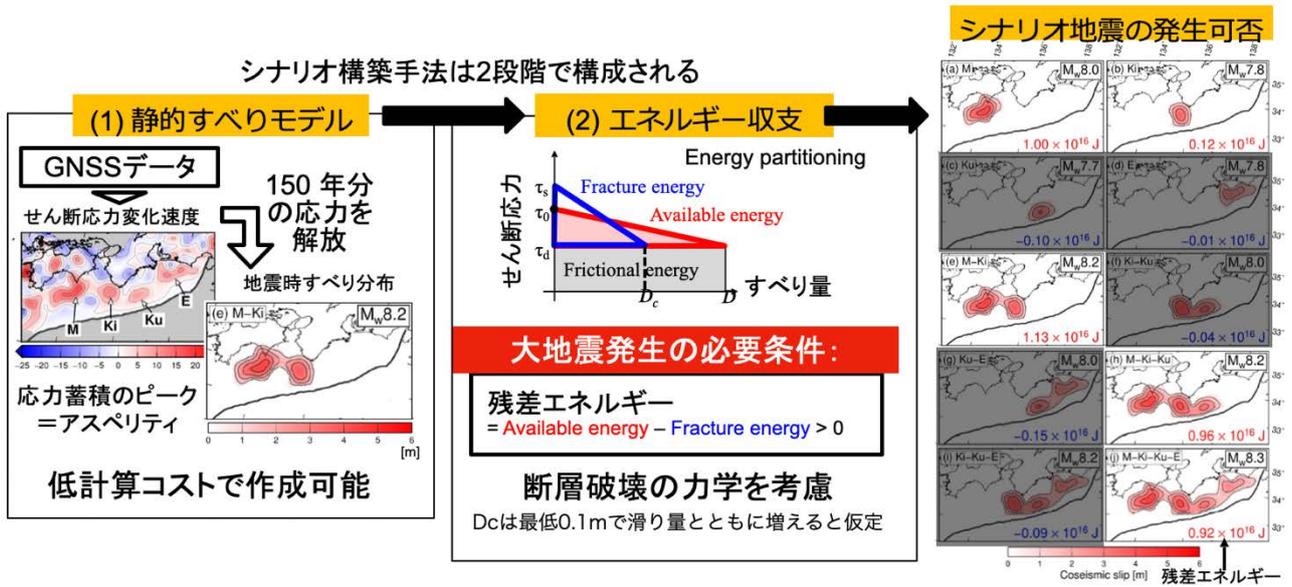


図14. 滑り遅れレートに基づいてエネルギー収支を考慮した地震発生シナリオの評価法 (Noda et al., 2021より改変、気象庁 [課題番号: JMA_01])

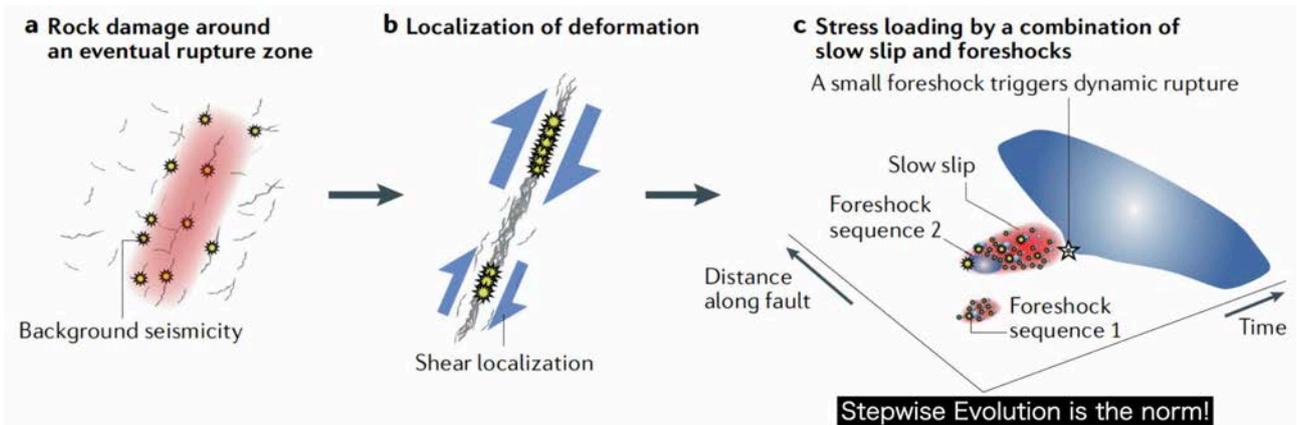


図15. 大地震準備過程の概念モデル (Kato and Ben-Zion, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_12]、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

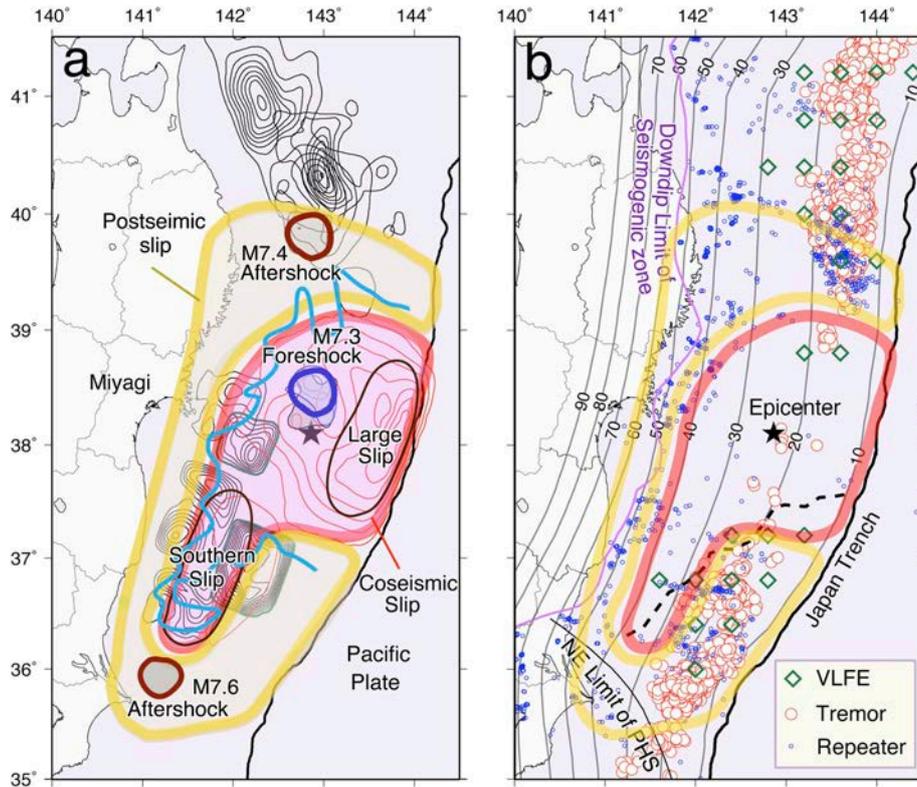


図16. 2011年M9東北沖地震の震源域周辺の(a)大規模なプレート間滑りイベントと(b)小規模なプレート間滑りイベント (Uchida and Burgman, 2021bより改変、東京大学地震研究所 [課題番号 : ERI_12]、東北大学理学研究科 [課題番号 : THK_09])

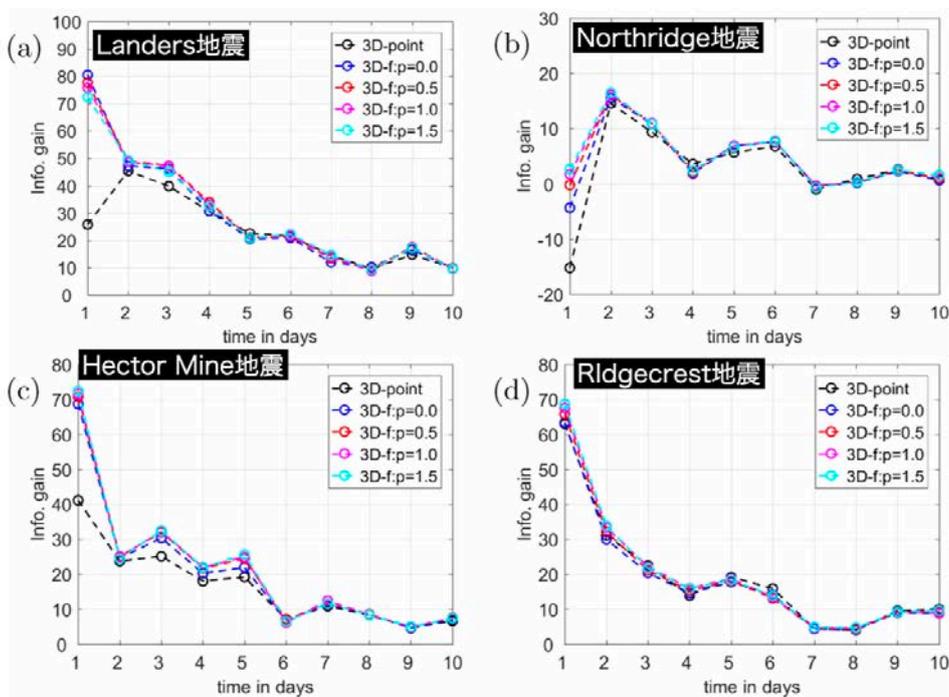


図17. 3次元点震源ETAS及び3次元有限断層ETASモデルによる余震予測の成績 (Guo et al., 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号 : ERI_13])

2次元点震源ETASモデルによる予測を基準にした情報利得を、本震からの経過日数に対してプロット。凡例の p は3次元有限断層ETASモデルで用いた大森・宇津余震減衰式の p 値。

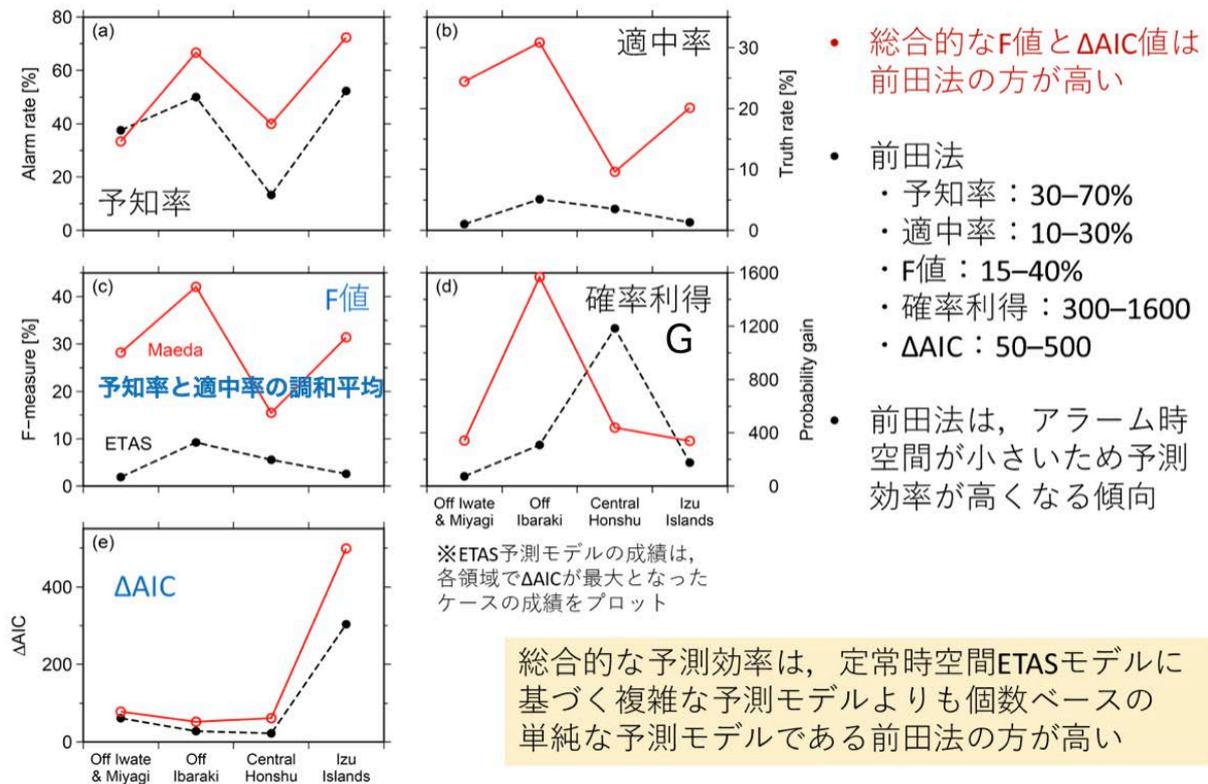


図18. 岩手・宮城沖、茨城沖、本州中部、伊豆諸島での前田法とETASモデルによる短期地震予測の成績 (Hirose et al, 2021cより改変、気象庁 [課題番号：JMA_01]、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13])

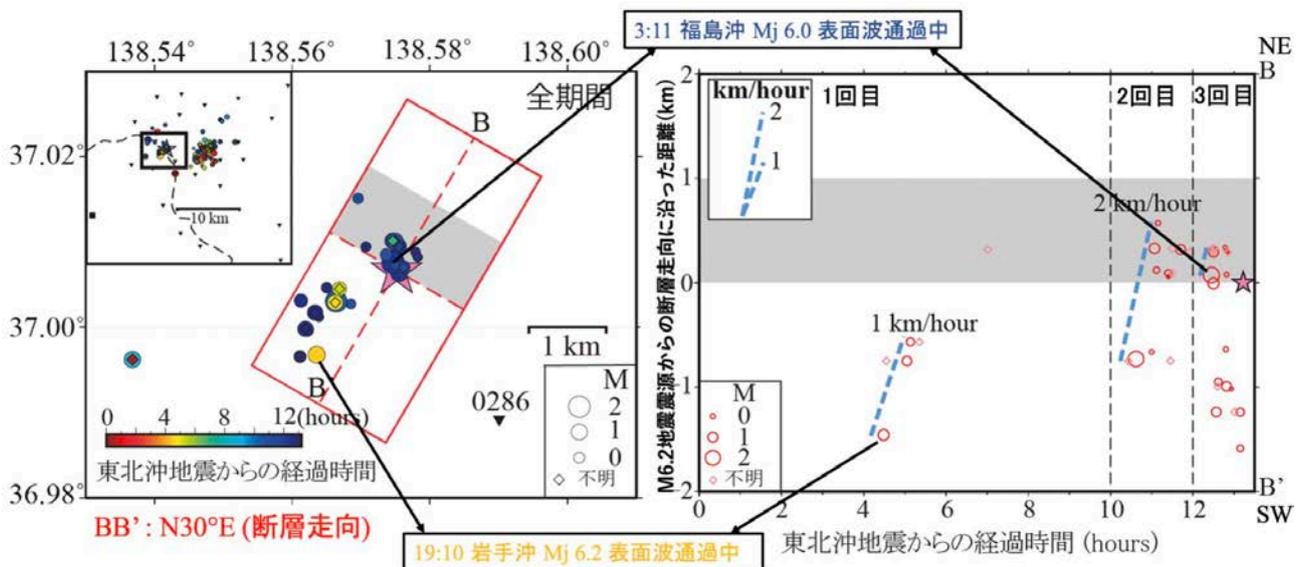


図19. 2011年M9東北沖地震の13時間後におきた長野県北部M6.2地震の前震活動 (Shimojo et al, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13])

(左図)震源分布。星印はM6.2地震の破壊開始点。赤い長方形はその震源断層。(右図)M6.2の地震断層の走向にそって活動の時空間分布を示した。

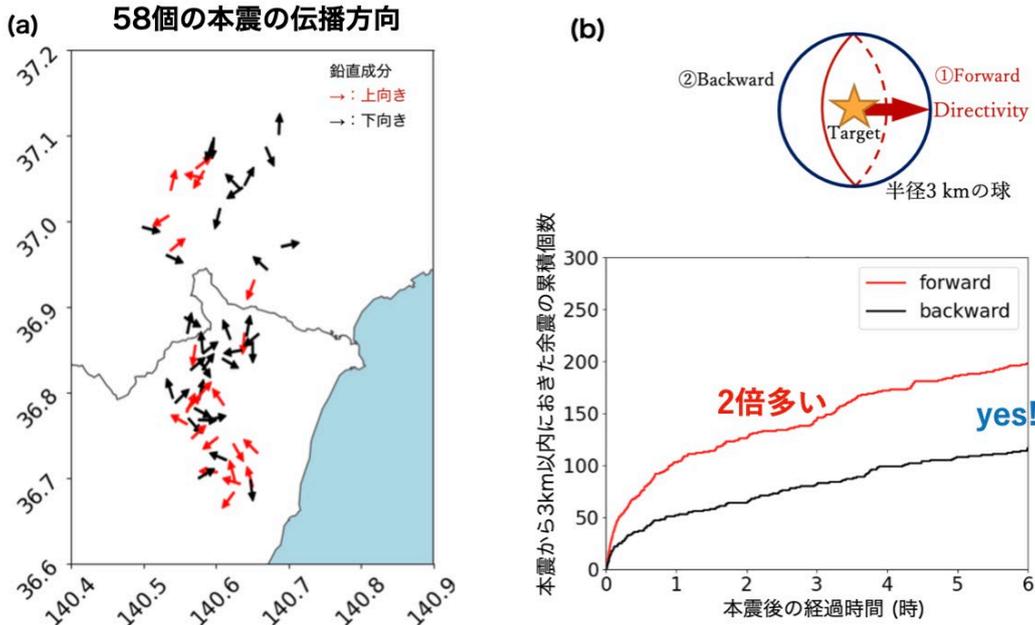
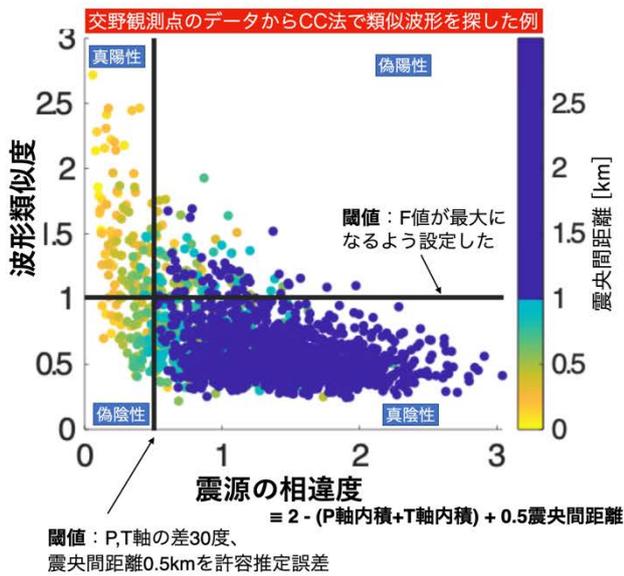


図20. 小地震の破壊伝播の指向性が余震活動に及ぼす影響（横谷，2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_13]）

(a)明瞭な指向性をもった地震の破壊伝播方向。(b)本震の破壊フロントが向う側と遠ざかる側に分けてカウントした余震個数(気象庁地震カタログに基づく)。



昨年度開発した類似波形の超高速検出法(2bit-ahash, khash)と従来のCC法による検出について、「震源位置およびメカニズムの一致」という「繰り返し地震検出」の観点からのパフォーマンスを、2018年大阪北部地震後の実データ[JMA震源, Uchideメカニズム]を用いて評価した。

$$F値 = \frac{2a}{2a + b + c}$$

観測点	波形類似度指標	a: 真陽性	b: 偽陰性	c: 偽陽性	d: 真陰性	F値
交野	2bit-ahash	97	71	64	1427	0.589
	khash	87	81	47	1444	0.576
	CC	104	64	120	1371	0.530

波形類似度を測るのに用いた指標により検出結果はもちろん違うが、F値(感度と特異度の調和平均)で見れば、まあ、同程度。

図21. 波形類似度と震源の相違度の比較（高山・他，2021より改変、立命館大学 [課題番号：RTM_02]）

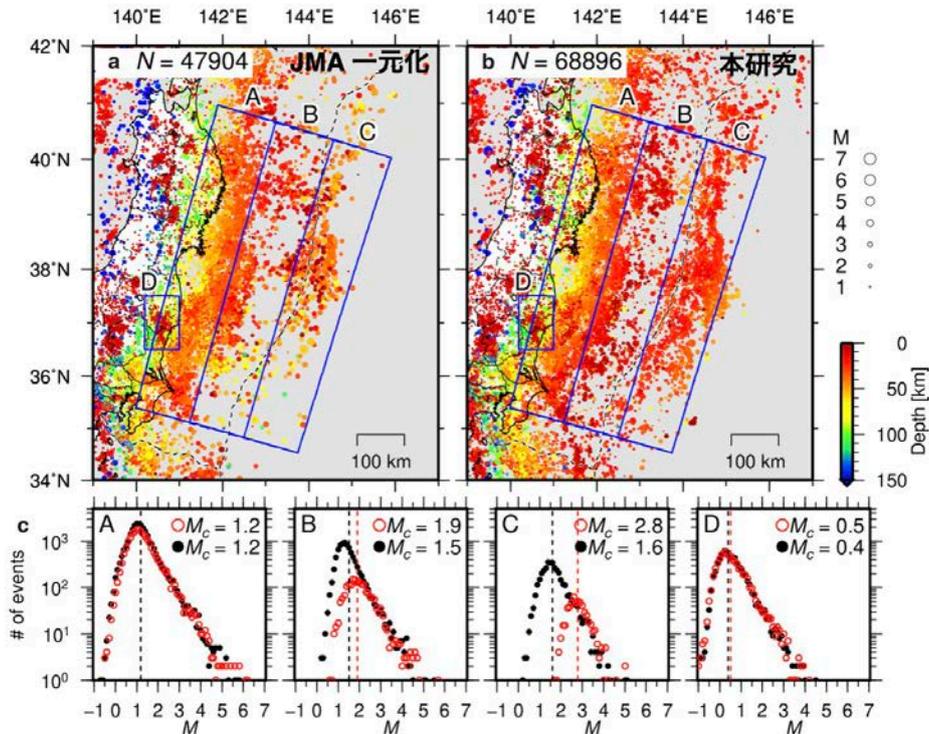


図22. S-netを含む基盤的地震観測網のデータから、機械学習による自動ノイズ除去法を適用して作成した震源カタログ (Tamaribuchi et al., 2021より改変、気象庁 [課題番号: JMA_01])

下段の規模別頻度分布には、JMA一元化カタログによるものを赤丸、本研究によるものを黒丸で示した。

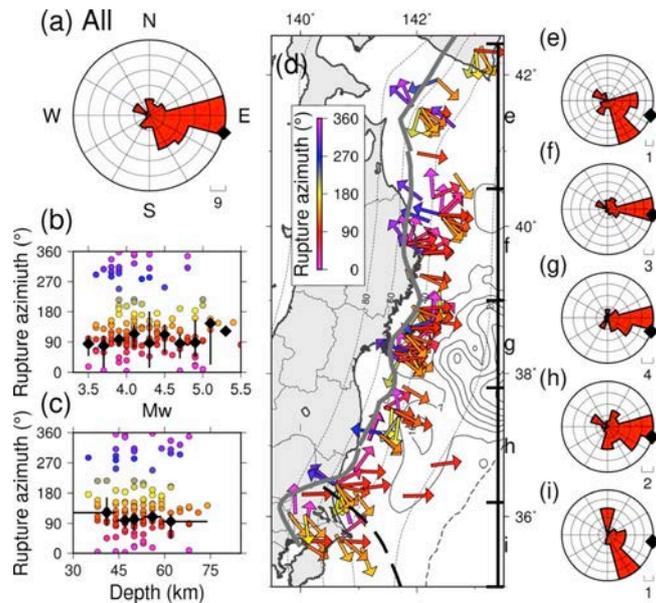
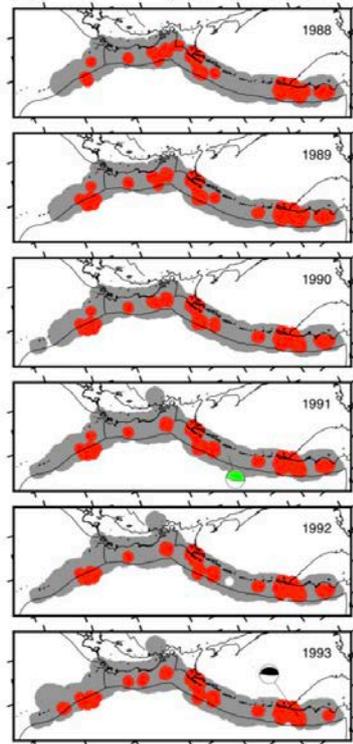


図23. プレート境界地震の破壊伝播方向の方位依存性の推定結果 (Yoshida et al., 2022より改変、東北大学理学研究科 [課題番号: THK_09])

(a)破壊の進行方向の頻度分布。黒いひし形はメカニズム解データに基づくupdip方向。(b, c)破壊の進行方向とモーメントマグニチュード、セントロイド深さとの関係。(d)破壊の進行方向。破線はフィリピン海プレートの北東限 (Uchida et al., 2009)、灰色線はプレート境界型地震の下限 (Igarashi et al., 2001; Uchida et al., 2009; Kita et al., 2010)。黒線は東北沖地震のすべり分布 (Iinuma et al., 2012)。 (e-i) (d)で示した各領域の頻度分布。

アラームマップの例: 赤がアラームON, 灰がアラームOFF域。



1988-2015のM7.5-8.5全て(8個)をターゲットにした場合のROC。

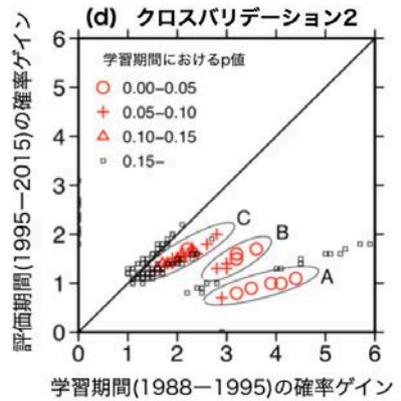
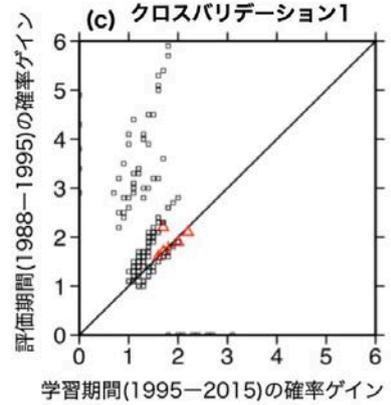
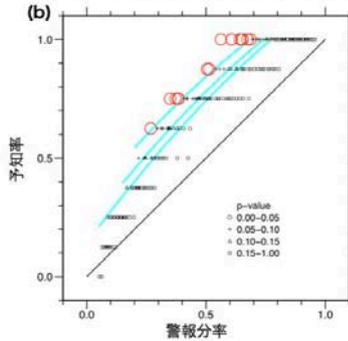


図24. 長期静穏化によるM7.5-7.8地震の試行予測成績とクロスバリデーション (Katsumata and Nakatani, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

(a) 黒白のビーチボールは警報ONの時空におきた予測対象地震。緑白のビーチボールは警報OFFの時空におきた予測対象地震(見逃し)。(d)では過学習が起きており、A、B、Cの楕円は過学習メカニズムの内実に対応

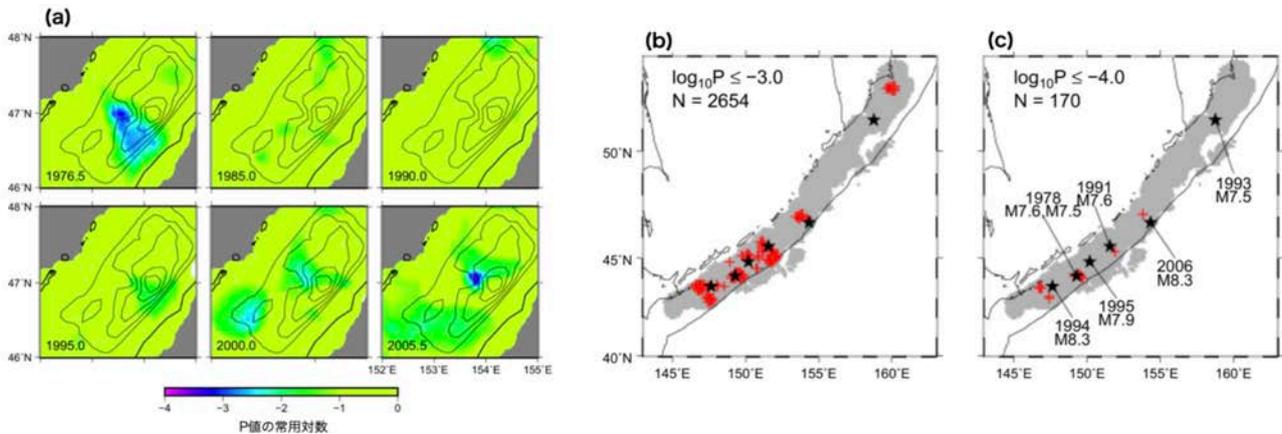


図25. PMAP法による静穏化現象の検出 (Katsumata and Zhuang, 2020より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

(a) 2006年11月15日のM8.3地震の震源域でのP値分布のスナップショット。コンターは2006年11月15日のM8.3地震の滑り量1、4、7、10、13m(Lay et al., 2009)。(b) P値が0.1%以下である静穏化が検出された位置を赤十字で示す。星印は、研究期間におきたM7.5以上の地震。(c) P値が0.01%以下の静穏化が検出されたグリッドの位置を赤十字で示す。星印は、研究期間におきたM7.5以上の地震。

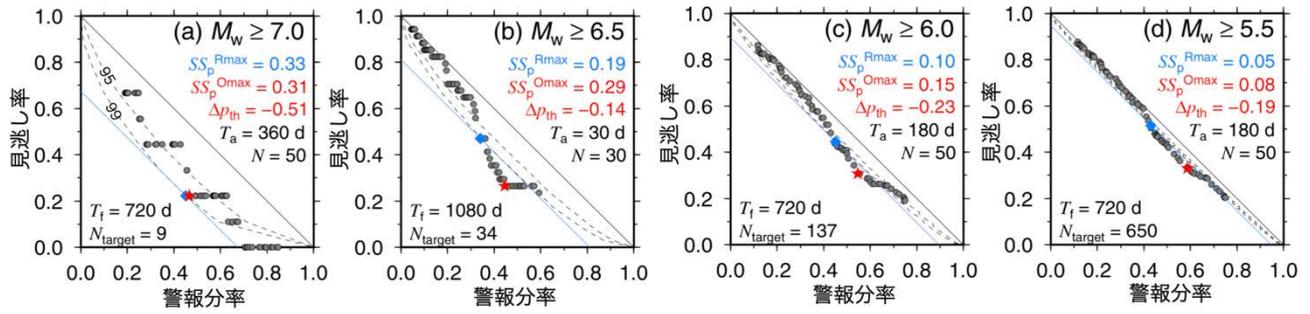


図26. 背景地震活動の潮汐同期に基く、トンガ・ケルマディック地域の地震予測成績を示すROCダイアグラム (Hirose et al., 2022より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、気象庁 [課題番号: JMA_01])

(a)M7.0以上、(b)M6.5以上、(c)M6.0以上、(d)M5.5以上の地震を予測対象とした場合。黒実線は無相関の場合に期待される関係。破線は帰無仮説(無相関)を有意水準99%および95%で棄却する閾値コンター。各パネルの右上に予測対象とする地震の下限マグニチュードを示した。左下に示した N_{target} は予測対象地震の数。赤い星はピアスのスキルスコアが最大(値 SS_p^{Omax})になるよう最適化した予測モデルの成績で、そのモデルのパラメタ (T_f (潮汐同期の変化をみる期間), Δp_{th} (同期が強くなったと判断するシュスター値変化の閾値), T_a (警報の持続期間), N (シュスター値計算に使うイベント数))の値を各図に示した。青い菱形は99%有意のコンター上でスキルスコアが最大(値 SS_p^{Rmax})になるところ。青い細線は $SS_p = SS_p^{Rmax}$ のコンター。

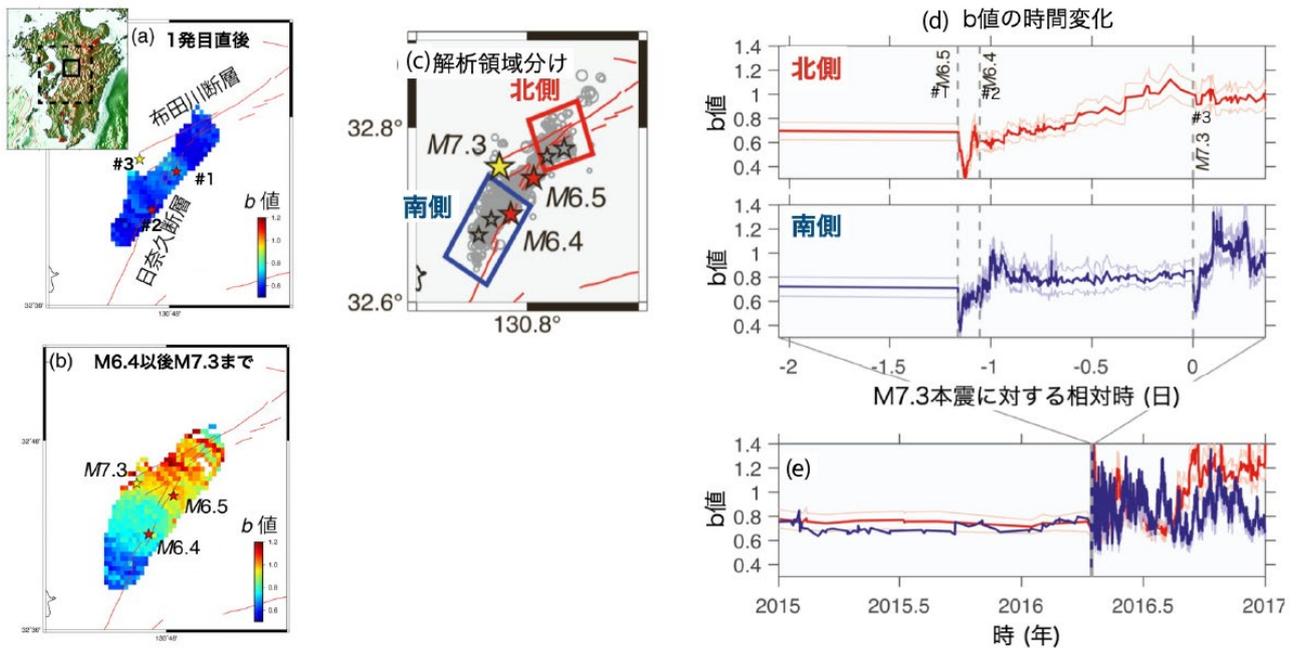


図27. 2016年熊本地震系列における b 値の時空間変化 (楠城, 2021, Nanjo et al., 2022より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

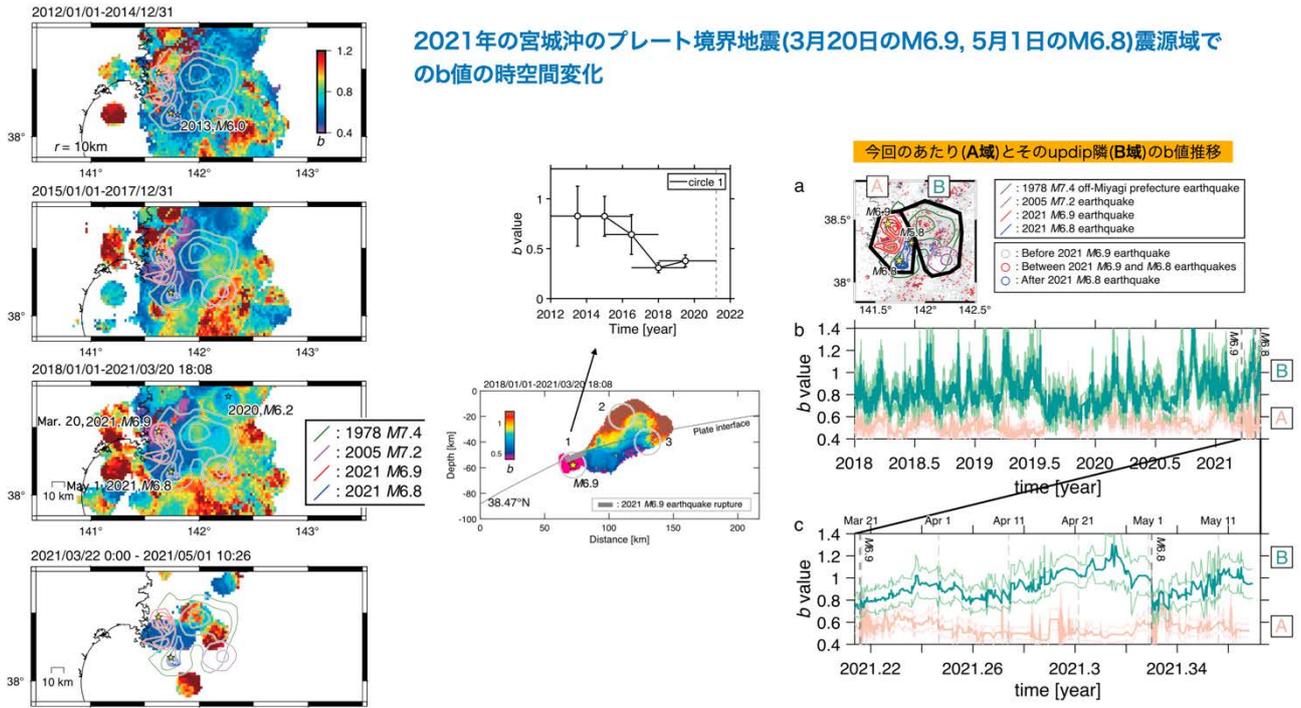


図28. 2021年宮城県沖のプレート境界型地震の震源域における b 値の時空間変化 (Nanjo and Yoshida, 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])。

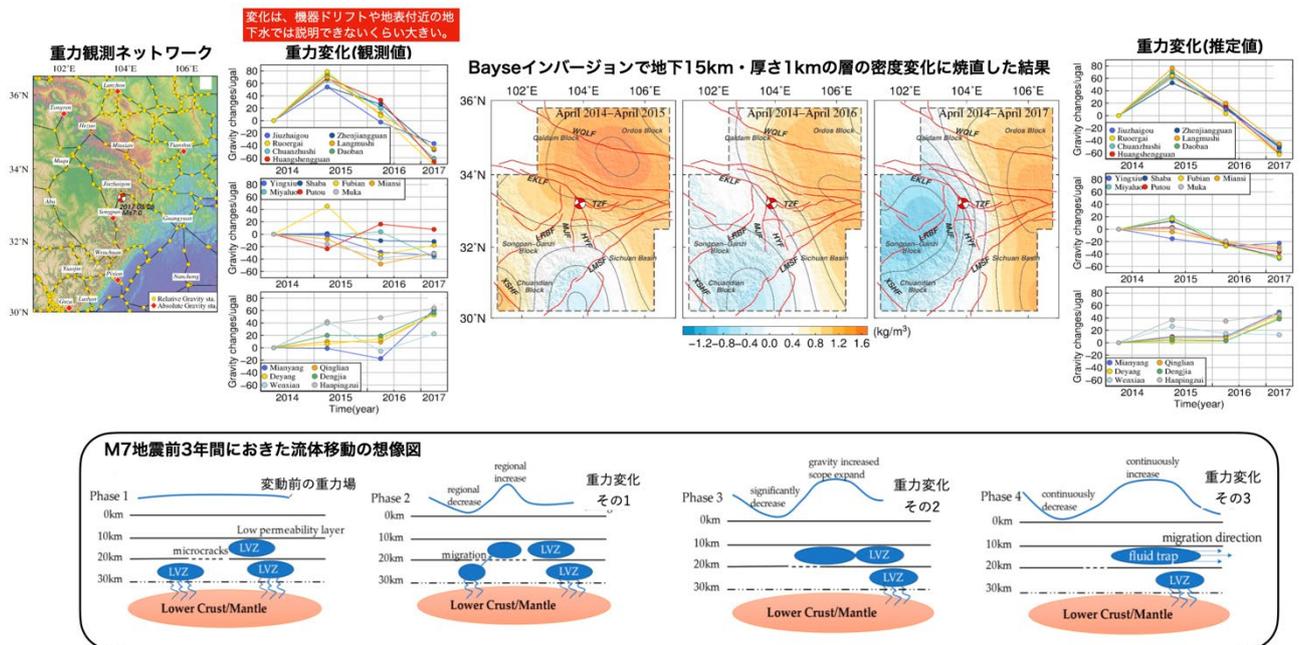


図29. 2018年8月8日チベット高原東縁Jiuzhaigou地震(M7)数年前の広域重力変化 (Yang et al., 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

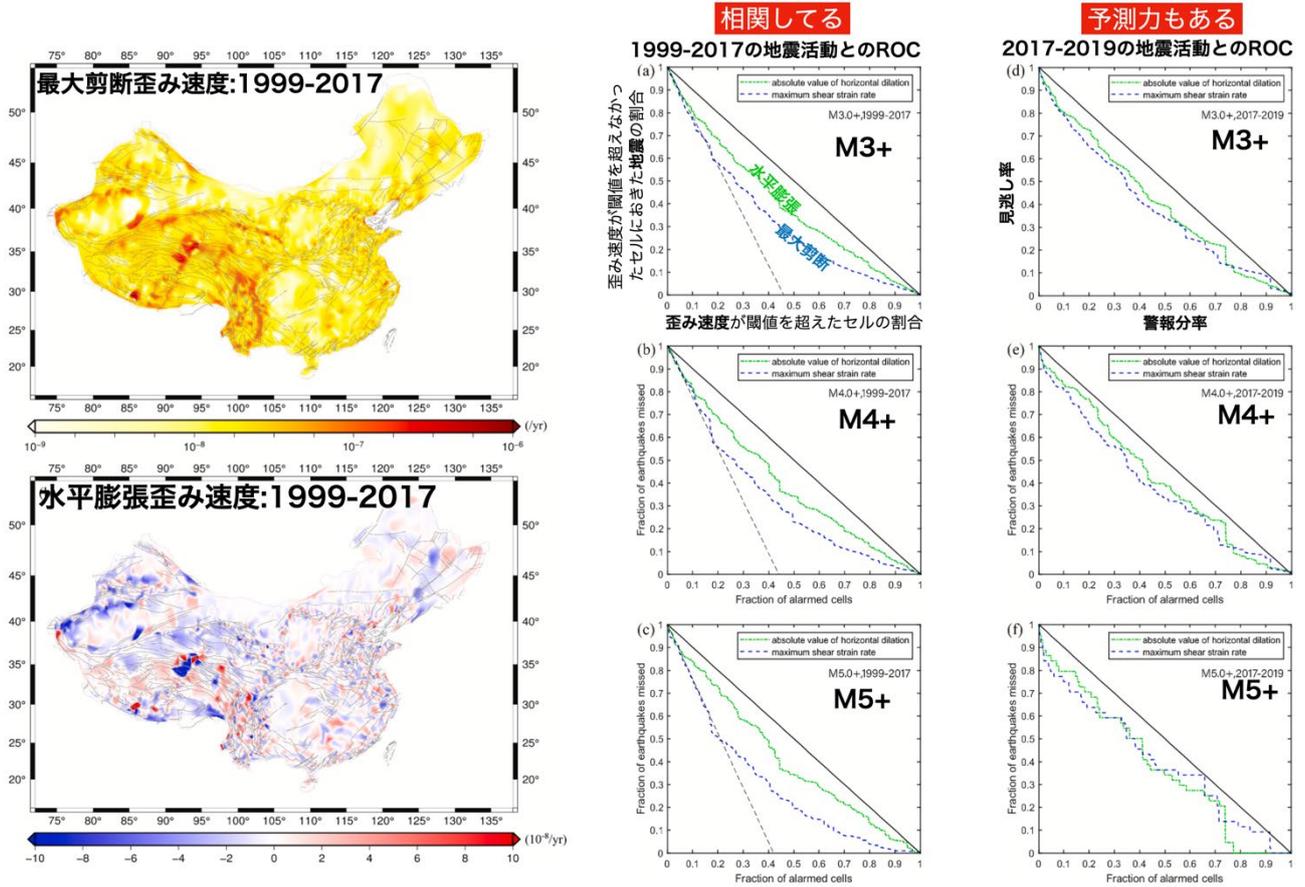


図30. 中国全土のGNSS歪みレートと背景地震活動の比較 (Xiong et al., 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13])

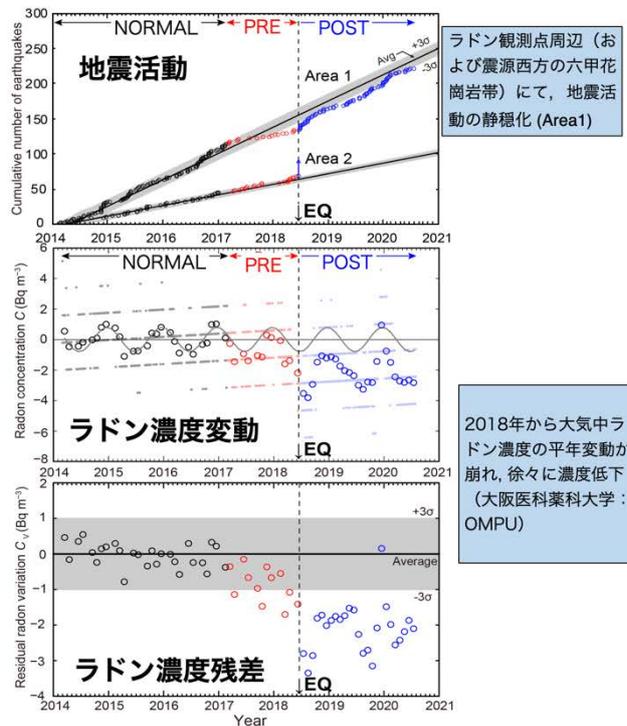
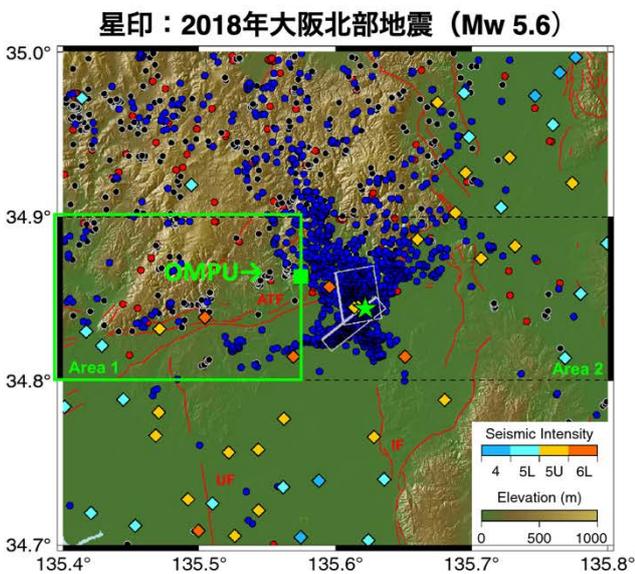
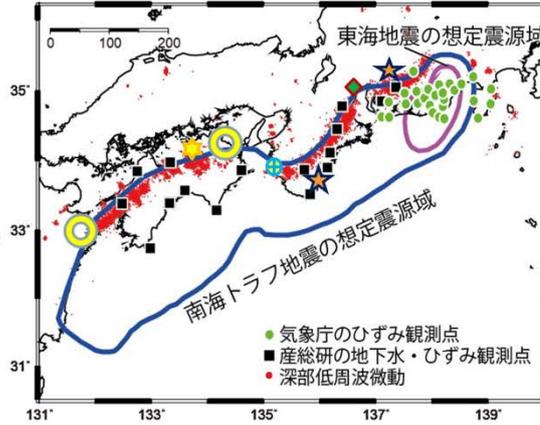
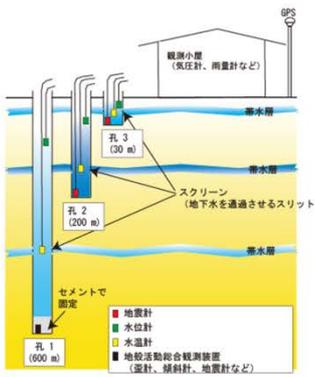


図31. 2018年大阪府北部地震に先行した大気中ラドン濃度変動 (Muto et al., 2021より改変、東北大学 [課題番号: THK_10])

産総研の地下水・ひずみ総合観測施設

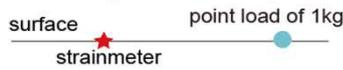


- ◆ 2016年から、バツカー設置による間隙水圧観測
- ★ 2020年から、既存井戸利用の歪み観測点建設
- ☆ 2022年1月に振興会から移管(石井式ひずみ計)
- ⊕ 2021年度に新規整備中(地下水・歪み観測)
- 2022年度に新規設置予定(地下水・歪み観測)

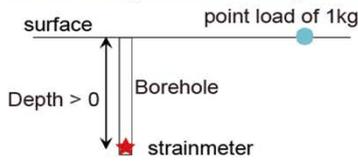
図32. 南海トラフ地下水・歪み観測網の整備状況（産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]）

ひずみ計データのキャリブレーションに必須

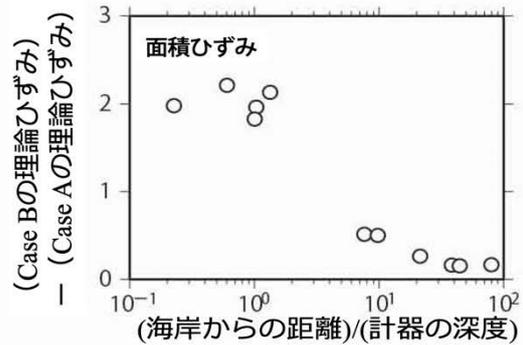
Case A: 計器が地表
→GOTIC2による理論潮汐計算



Case B: 計器の設置深度を考慮
→海洋潮汐の理論潮汐計算のため修正GOTIC2を開発



(Kamigaichi, Matsumoto & Hirose, 2021, GJI)



産総研のひずみ計の位置での理論ひずみの差

(海岸からの距離)/(計器の深度) < 20の時	深さ600m
計器の設置深度を考慮する必要あり	12 km
(海岸からの距離)/(計器の深度) < 2	1.2km
Case A、Bは顕著な違いあり	

図33. 設置深度を考慮した海洋潮汐による理論ひずみの計算（Kamigaichi et al., 2021より改変、産業技術総合研究所 [課題番号：AIST09]）

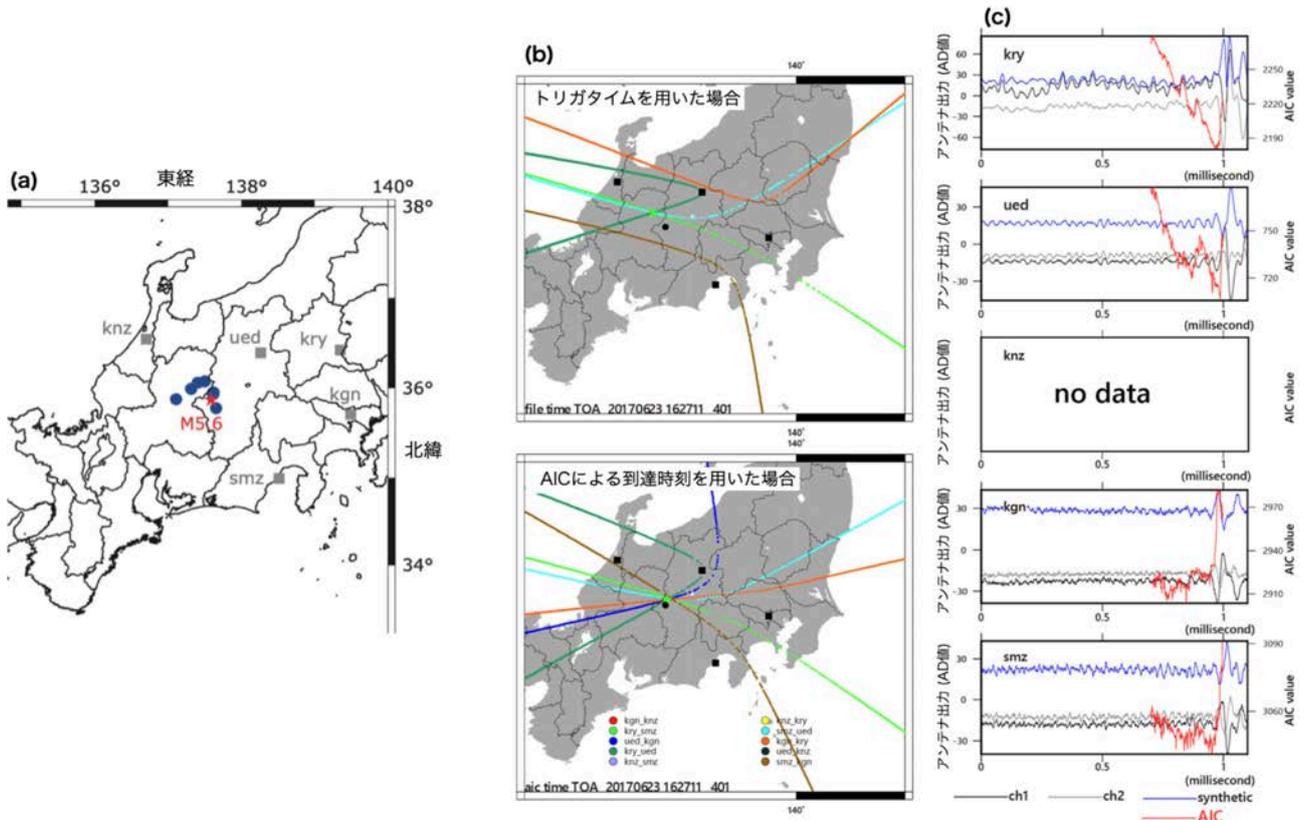


図34. 地震前兆の可能性のあるVLF帯電磁波パルスの観測例 (Nagao et al., 2021より改変、東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_13]、千葉大学 [課題番号: CBA_01])

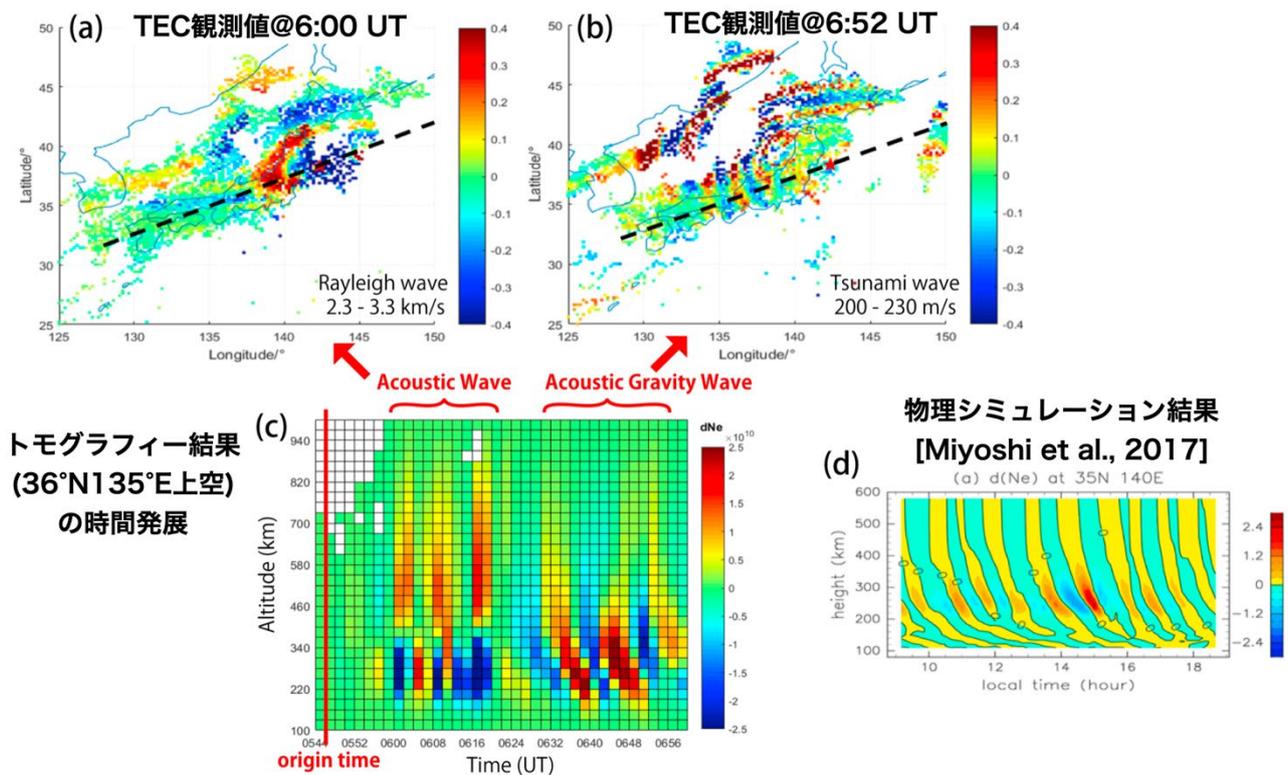


図35. 東北沖地震(2011031105h46mUT)の地震動および津波で励起された電離圏電子変動の3次元構造 (宋, 2022より改変、千葉大学 [課題番号: CBA_01])

火山

「火山」計画推進部会長 中道 治久
(京都大学防災研究所)
副部会長 前野 深
(東京大学地震研究所)

火山の噴火災害を軽減するためには、火山噴火の発生の場所・規模・時期を予測することおよび火山噴火現象に対応する噴火災害の推移を予測することが重要である。またこれらの予測のためには、火山噴火現象を解明することも重要である。「火山」計画推進部会では、「火山活動の事象分岐の条件・論理を明らかにし、火山活動推移モデルを構築し、発災の原因である火山噴火を予測すること」を上位目標にすえ、低頻度で大規模な現象を含む火山現象の解明とモデル化、火山活動を支配する場の解明とモデル化、中長期的な火山活動の評価、観測手法の開発および体制の整備に関する研究を推進している。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料・考古データ、地質データ等の収集と解析

ウ. 地質データ等の収集・集成と分析

長期間における火山現象とそれに伴う災害を正確に把握するためには、地質データ等を収集して調査・分析を行い、データベースを整備・拡充することが重要である。

マグマの状態と噴火様式の関連性を調べるために、富士火山の爆発的噴火による噴出物の全岩化学組成の分析およびRhyolite-Meltsプログラムによる熱力学的解析を進め、マグマ供給系について考察した。その結果、定圧および減圧どちらの条件の結晶分化においても、組成変化の傾向を再現するためにはマグマ中の初期含水量が低い必要があることがわかった。また冷却や減圧に伴うマグマの密度変化を考慮すると、深部マグマ溜まりからマグマが上昇開始するためには、より深部からのマグマ注入による過剰圧の獲得が必要であることもわかった(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_02])。約7500年前の摩周カルデラ形成期の降下火砕物(Ma-g~j)を対象に地質調査および採取した軽石試料の発泡度、気泡数密度の分析を行い、噴火後半にかけて発泡度が増大し、気泡数密度が低下していく傾向を明らかにした(公募研究[課題番号: KOB021])。白根火砕丘群の各噴出物の層序・分布調査、薄片記載と全岩化学組成分析等の物質科学的解析を行い、白根火砕丘群の溶岩と火砕丘構成物(火砕堆積物)がそれぞれ固有の組成範囲と組成変化傾向をもっていることを明らかにした。また、本白根火砕丘群に見られる小火口の活動履歴調査により、計4個の火口の活動年代(2700年前、1700年前、700年前、400年)や、火砕丘群本体の形成後もVEI 1程度の水蒸気噴火が頻発していたことを明らかにした(富山大学[課題番号: TYM_01])。将来噴火する可能性の高い活火山の中長期的活動評価と予測のため、火山の地質図作成を進め、恵山火山地質図を出版したほか、日光白根火山の地質図及び論文をまとめた(草野・他, 2021)。伊豆大島では海陸をつなぐ沿岸部水深400 m程度までの範囲で精密海底地形地質調査を実施した。また、大規模火砕流分布図シリーズとして「始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図」をWeb公開した。日本列島の火山の基礎情報を最新の知見に基づいて収集・整理するため、日本の火山データベースに桜

島と富士山の完新世噴火イベントのデータを公開するとともに、20万分の1日本火山図を更新・拡充した（宝田・他，2021）（産業技術総合研究所〔課題番号：AIST03〕）。

（２）低頻度大規模地震・火山噴火現象の解明

低頻度で大規模な火山噴火現象の発生履歴、規模等を解明するためには、史料・考古データ、地質データ等の分析を着実に進める必要がある。

伊豆大島の大規模噴火（Y1やY4など）の推移で見られる斜長石斑晶量の増加と同様に、中規模噴火から小規模噴火への長期的推移において斜長石斑晶量がしだいに増加していることを明らかにした。このことは噴火規模により時間スケールは異なるものの、斜長石増加の共通の仕組みが存在することを示唆する。また、大中規模噴火噴出物の岩石組織や粒子物性を比較したところ、噴火強度と噴出物の微細構造・組織に相関があることがわかった。西之島については2019-2020年噴火における噴火様式や化学組成の劇的変化が、より深部に由来する苦鉄質マグマの上昇に起因していることを明らかにした（Maeno et al., 2021）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_03〕）。カルデラ噴火については、噴火準備段階からの活動の推移・履歴を把握するとともに、その推定精度を上げる手法の開発・改良を進める必要がある。支笏カルデラ試料のU-Th放射非平衡の解析を行い、二成分マグマ混合によって生成された珪長質噴出物のうち一方の端成分マグマの生成率を15 km³/万年程度と推定した。阿寒カルデラの後カルデラ活動についての解析では阿寒富士を対象に物質科学的解析を進め、マグマ供給系やマグマ生成条件を解明した（Kuritani et al., 2021）（北海道大学〔課題番号：HKD_02〕）。鬼界カルデラを対象にした研究航海により、海底電位差磁力計等の長期海底観測機器の回収・設置と、航走観測、試料採取を行った。また、鬼界カルデラ周辺の島においても地質調査を行うとともに、これまでの研究航海により取得した地球物理学的観測データの解析や堆積物・岩石試料の物質科学的解析を進めた。ピストンコア試料とドレッジ試料については全岩化学組成分析および火山ガラスの化学組成分析を行い、鬼界火山全体のマグマの多様性および噴火活動ステージにおける特徴を明らかにした（神戸大学〔課題番号：KOBEO1〕）。

（４）火山現象の解明とモデル化

ア．火山現象の定量化と解明

多様な火山現象を理解するためには、多項目の観測を行い、進行する火山現象を時空間的に定量化するとともに、火山噴出物の分析、マグマの物理・化学的な実験および数理モデルによる理論解析を行う必要がある。

ドローンと無人ヘリコプターを用いた空中磁気観測の実施及びデータ解析を行っており、三宅島において無人ヘリコプターと同じ範囲でドローンを用いた空中磁気測量を行った。そして、磁化強度分布の推定から、カルデラリム下の強い磁性と、カルデラ内側の弱い磁性が見出されたことから、2000年噴火によるカルデラ崩壊によるカルデラ内の磁性の弱化もしくは磁化方向のランダム化が示唆された（図1）。また、西之島の2019年から2020年の噴火活動に対して、衛星赤外画像と地形変化から噴出率・噴出量の推定と噴出状況を明らかにし、3ステージからなる噴火活動モデルを提案した（図2、Kaneko et al., 2022）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_07〕）。2020年11月に阿蘇山にて空中電界変動観測を開始し、2021年10月14日および20日の噴火に伴う空中電界変動を比較した

ところ、20日の変動が14日の変動に比べて20倍以上大きいことを明らかにした（東北大学理学研究科[課題番号:THK_03]）。火山活動にともなって放出されるマグマ起源の二酸化炭素を面的に測定するための小型かつ安価な装置の開発を進めており（図3）、二酸化炭素センサー部を更新することにより、既存機と同等の性能が得られた（東京工業大学[課題番号:TIT_02]）。弥陀ヶ原火山の地獄谷において2015年から毎年水準測量を実施しており、2016年から2020年にかけて最大6 cm程度の沈降を検出した。この沈降は、噴気活動が継続している紺屋地獄・新噴気帯の直下の深さ50 mに長さ650 m、幅425 m、傾斜角67度の割れ目が59 cm開口することで説明された（図4）（富山大学[課題番号:TYM_02]）。地震波ノイズの相互相関を用いて連続的に測定した地震波速度変化量と波形相関の低下量の異常度を定量的に評価する手法を開発し、2016年10月8日の阿蘇山の爆発的噴火に前駆する異常度の増大を検出した。また、火山灰自動採取・可搬型分析装置および自動火山灰分類システムを開発・改良し、機械学習を用いて火山灰の構成物の割合を自動把握し、マグマ性噴火および非マグマ性噴火を即時判定する技術の有効性を確認した（防災科学技術研究所[課題番号:NIED01]）。岩石磁気学および古地磁気学手法を用い、阿蘇火山中岳新期山体および最新期火砕丘の噴火活動時期の分類と年代測定を行った（穴井・他、2021）（公募研究[課題番号:KOB023]）。

イ. マグマ溜まりと火道内過程のモデル化

火道内をマグマが上昇する際に発生する現象の再現実験を行い、マグマ中の塩素の濃度分布パターンの変化を明らかにし、天然の溶岩の塩素濃度分析結果と比較することで、溶岩内部の脱ガス現象を明らかにした（Yoshimura and Nakagawa, 2021）（北海道大学[課題番号:HKD_03]）。十和田火山・御蔵山溶岩ドーム試料の岩石記載と浸透率測定実験を行ったところ、石基は微小な斜長石を骨格とした多孔質構造で、大量のシリカ鉱物が気相成長した痕跡が認められた。また、空隙率に対して高い浸透率が得られた。これらの結果をもとに、空隙率に対する浸透率の高さが溶岩ドームの爆発性の支配要素であることを示した（東北大学理学研究科[課題番号:THK_04]）。阿蘇山と桜島にてMulti-GASの火山ガス組成観測を行うとともに、福徳岡ノ場2021年噴火の二酸化硫黄放出率の時系列変化を衛星データから明らかにした（産業技術総合研究所[課題番号:AIST06]）。

（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

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造解明

火山地域においては、火山活動を支配する場のモデル化を進めるために、地震波速度・減衰構造や比抵抗構造等を明らかにすることが必要である。

鬼界カルデラを対象とする、研究船「かいめい」によるKM21-5航海において、海底磁力計の回収と海底電位差磁力計の設置を行った。また、薩摩硫黄島、竹島、黒島に陸域用磁力計を設置することで、海陸電磁気観測網を構築した。また、KM22-01航海にて、海底掘削および無人探査機により海底観察および地質試料採取を行い、鬼界アカホヤ噴火による大規模火砕流堆積物の分布を推定した（神戸大学[課題番号:KOB01]、海洋研究開発機構[課題番号:JAMS03]）。火山人工地震探査データからH/V比とサイト増幅特性を求めて、火山地帯における地震波動場の特性の検討を行った。その結果、人工地震のコーダ波と雑微動から推定した相対的サイト増幅係数は一致することが明らかになった（図5）

(東北大学理学研究科[課題番号: THK_08])。2018年本白根山噴火直後に草津白根火山で実施した空中磁気測量データから磁化分布を推定し、逆帯磁と地質構造との対応を見出した(Koyama et al., 2021)。また、2018年本白根山噴火に伴う傾斜記録の初動付近の解析から、Terada et al. (2021)が推定した開口割れ目の下端部に新たな増圧源を見出した。さらに、湯釜火口湖の化学組成成分の時間変動予測モデルを構築した(Terada et al., 2022)(東京工業大学[課題番号: TIT_03])。鹿児島湾および南西諸島海域を対象に、ヘリウム-3をトレーサーとして用いる海底火山活動調査を実施し、ヘリウム-3が始良カルデラの同じマグマ溜まりに起源をもつ若尊カルデラと桜島火山の活動度の違いを反映していることを明らかにした(Nakajima et al., 2022)(東京大学大気海洋研究所[課題番号: AORI02]、公募研究[課題番号: KOB013])。蔵王火山の御釜周辺での気象観測と御釜湖の水溫・溶存物質濃度の観測を行い、熱流量変化の解析から、御釜への流入水は有意な熱量を持つ地下水起源であることを明らかにした(Chikita et al., 2022)(公募研究[課題番号: KOB022])。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 中長期的な火山活動の評価

ア. 火山噴火の長期活動の評価

火山噴火の長期活動については、火山ごとに噴火の特徴と履歴を明らかにするとともに、年代測定精度の向上や階段ダイアグラムの高精度化、物質科学的解析に基づいて評価を行う必要がある。

高精度なテフラ対比を行うため、テフラの気泡組織および鉱物組織の解析環境を整備し、実際に解析に着手した。岩石組織のデータをこれまでに取得したテフラの化学組成・粒子形状データと組み合わせることで、テフラのキャラクタリゼーションを進めた。また山中湖のコアを用いて湖沼堆積物のC14年代測定を実施し、年代-深度モデルの構築を進めた(Yamamoto et al., 2021; Ota et al., 2021)(山梨県富士山科学研究所[課題番号: MFRI_01])。伊豆大島、浅間山、霧島山において、過去数100年の噴火を対象とした噴出物の地質調査を行い、テフラ層の区分や特徴の明確化と、岩石鉱物化学組成・組織など物質科学的情報の収集を進めた。とくに霧島山については歴史時代の大規模噴火の推移や小規模噴火を含む中長期履歴を明らかにするための調査を行い、火砕堆積物の分布や層区分を検討した。13世紀御鉢噴火については、粒子物性および岩石組織の定量解析を進め、噴火推移に応じた系統的变化を明らかにした(東京大学地震研究所[課題番号: ERI_03])。白根火砕丘群噴出物のうち噴出年代が不明な溶岩群について、古地磁気年代や放射性炭素年代の測定を実施した(富山大学[課題番号: TYM_01])。中長期的活動評価と予測のため、雌阿寒岳、秋田焼山、御嶽山では地表踏査による噴火履歴調査を継続して実施した。また活動的火山で高分解能な噴火履歴を解明するために、白山火山及び御嶽山の岩石試料を対象としたK-ArおよびAr/Ar年代測定を実施し、10万年前より若い火山噴出物の噴火年代を明らかにした(産業技術研究所[課題番号: AIST03])。

イ. モニタリングにより火山活動の評価

火山活動の評価において、数ヶ月から数年の中期的な時間スケールについては、多項目の地球物理学的・地球化学的なモニタリングにより火山の状態を把握することにより、

火山現象と噴火の関係を定量的に明らかにする必要がある。

火山活発化指数 (VUI) の試験的導入を進めており、VUIの評価項目として熱消磁 (地磁気変化) の導入を検討した (橋本, 2022)。また、吾妻山 (Ichiki et al., 2021) と十勝岳 (Tanaka et al., 2021) では3次元比抵抗構造が高分解能で推定された (北海道大学 [課題番号: HKD_04])。阿蘇火山と吾妻山を対象にVUI策定作業を進め、吾妻山について作業を完了させた (北海道大学 [課題番号: HKD_04]、京都大学理学研究科 [課題番号: KUS_02])。定期船 (フェリー) 搭載の簡易トラバース装置にて薩摩硫黄島、口永良部島、諏訪之瀬島の二酸化硫黄放出率の観測を行い、口永良部島の二酸化硫黄放出率の2020年5月頃からの指数関数的な減少と、2021年後半の数10トン/日もしくは検出限界以下レベルへの低下を明らかにした (東京大学大学院理学系研究科 [課題番号: UTS_06])。時間分解能の高い歴史記録を有する世界の噴火20事例を収集した噴火推移データベースを作成し、福岡ノ場火山およびHunga Tonga火山の噴火事例を収録してデータベースの上で過去の噴火事例と比較できるようにした。また、霧島新燃岳の2011年噴火と2018年噴火の近傍堆積物の層序および組織の解析からブルカノ式噴火発生メカニズムの解明を進めた (Matsumoto et al., 2021) (産業技術総合研究所 [課題番号: AIST10])。草津白根山、浅間山、伊豆大島、桜島、霧島山について、GNSSデータに対する時間依存インバージョンの手法を適用し、マグマ溜まりの時間変化を推定した。草津白根山については、2017年後半から見られた体積膨張が2021年から停滞していることが分かった (Munekane, 2022) (国土地理院 [課題番号: GSI_03])。雌阿寒岳、草津白根山、伊豆大島にて全磁力の繰り返し観測から熱的活動の推定を行うとともに、雌阿寒岳と草津白根山においては磁気測量により磁気異常分布を明らかにした (気象庁 [課題番号: JMA_04])。草津白根山の湯釜火口湖の湖水採取・分析を行い、1982年以降の噴火の前後で上昇した湖水のMg/Cl比が2019年以降にわずかに上昇して増減を繰り返していることを明らかにした (Yaguchi et al., 2021)。また、焼岳の1962年噴火の火山灰を分析し、火山灰が熱水変質帯由来であり、黄鉄鉱や石膏などの鉱物種と多量の水溶性成分が存在することを明らかにした (Yaguchi et al., 2022) (気象庁 [課題番号: JMA_05])。北海道駒ヶ岳にて温泉水の地球化学的観測と火口での噴気温度観測、山麓での地下水位連続観測を行った。さらに、これらのデータに加えて、噴出物中の熱水変質鉱物の検討を行い、火山体内部の熱水系について検討した (Takahashi, 2022) (北海道立総合研究機構 [課題番号: HR0_01])。

(5) 火山活動推移モデルの構築による火山噴火予測

火山噴火予測の精度向上に向けて、噴火事象系統樹をさらに発展させ、火山噴火に先行する現象、噴火発生、噴火規模や様式の時間変化、終息までを一連の現象として捉える火山活動推移モデルを構築する必要がある。

インドネシアの火山を対象に火山活動推移モデルの構築を進めた。グントール火山において過去30年間の火山性地震のエネルギー放出率を評価した。1847年の最後の噴火から現在までの約170年間の噴火活動休止期における地震活動が最近30年間の活動と同様と仮定すれば、170年間のエネルギー積算値は220GJ程度となり、あり得る最大噴火規模はVEI4と推定される。また、2021年12月4日にスメル火山で火砕流が山頂から南東方向に16 km流下したが、火砕流に前駆する火山構造性地震の発生頻度は低く、2021年1月2月の火砕流発生以降は岩石崩落もない (図6)。そのため、マグマの急速な貫入による溶

岩ドーム崩落によって火砕流が発生したのではなく、溶岩ドームの不安定性による自己崩壊で火砕流が発生したと推定した（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI06]）。桜島火山を対象に地震、GNSS、伸縮、傾斜、ガスの連続観測ならびに火山灰のサンプリング調査を行った。また、繰り返し水準測量と重力測定から、桜島中央部における年間最大7mmの地盤沈降と、年間最大4.3 microgalの重力増加が継続していること（図7）が明らかになり、この重力増加は地盤沈降だけでは説明出来ず、桜島直下の質量増加を示唆している。2017年以降の南岳活動期において、始良カルデラから桜島へのマグマ移動は顕著ではないが継続しており、gas-richな噴火などにより脱ガスが卓越しているため、その分、桜島直下における質量増加が進行したと解釈できる。また、複数の地震観測点の波形相関を用いて、桜島におけるB型地震と連続微動を自動検出し、震源決定を行ったところ、両者ともに山頂火口下の深さ4 kmまでに分布し、水平方向の分布は深部へ貫入したと推定されているダイクの走向に沿っていることが明らかになった（Permana et al., 2021）（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]）。観測データの解析結果や物質科学的データの分析結果を整理して、火山活動推移のモデル化と噴火事象系統樹の分岐判断指標の作成を進めた。その一環として、大地震の発生による噴火の誘発を調べたところ、大地震の発生により0.5 micro strain以上の膨張という条件を満たす領域にある火山においては、VEIが2以上の噴火発生数が、大地震発生後数年間は2-3倍程度高まることが明らかになった（Nishimura, 2021）（東北大学大学院理学研究科[課題番号：THK_11]）。蔵王山の過去800年間の噴火推移の類型化を進め、テフラ層内の岩相変化および噴出物の岩石学的特徴をもとに噴火推移の解明を試み、マグマ水蒸気噴火と小規模マグマ噴火の発生順序を明らかにした（Takebe et al., 2021）（公募研究[課題番号：KOB015]）。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

（2）地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ウ. 火山噴出物による災害誘因の即時予測手法

噴火発生直後に火山噴出物などの災害誘因を高精度かつ即時的に予測する手法を開発することは重要である。

堆積物解析手法の高度化と、噴出物時系列解析・分析手法の高度化を目指した研究を霧島、阿蘇、諏訪之瀬島、榛名等の活動的火山で実施した。2021年10月阿蘇中岳噴火の際には、火山データ共有システムJVDNを活用した複数機関の連携による降灰調査をはじめて実施し、降灰分布や噴出量の迅速な推定を行うとともに、システムの有用性と問題点の洗い出しを行った。草津白根火山2018年水蒸気噴火における噴出物分布と複数手法により検討した噴出量に関する論文を出版した（Kametani et al., 2021）。西之島における2019-2020年噴火および2021年噴火の噴出物の調査および試料採取、地形データの取得を環境省と協力して実施した。西之島の採取試料の化学組成分析により、2020年噴火の際の安山岩から玄武岩質安山岩への劇的な化学組成変化のタイミングに制約を与えることができたほか、2021年も玄武岩質安山岩による活動が継続していることなどを明らかにした（東京大学地震研究所 [課題番号：ERI_17]）。

5. 研究を推進するための体制の整備

（1）推進体制の整備

火山災害の軽減するためには、火山活動の推移を把握し、必要に応じて発生しうる火山災害への対策を講じる必要がある。

2021年6月と12月に火山噴火予知連絡会本会議を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。また、本会議とは別に火山活動の検討が必要とされた火山では、部会を設置して集中検討体制を確保することとしており、口永良部島部会を2021年6月と12月に、霧島山部会と草津白根山部会を6月にそれぞれ開催し、火山活動の検討を行った（気象庁〔課題番号：JMA_08〕）。

（3）研究基盤の開発・整備

火山現象の解明と予測のための研究を進め、災害関連情報の迅速な発信や、火山活動評価の高度化をするためには、観測基盤を維持・整備するとともに、必要に応じて観測体制の強化をする必要がある。

全国50火山を対象に地震計、空振計、GNSS、監視カメラ等による連続監視観測を継続した。また、GNSS繰り返し測定や熱の機動観測を実施し、口永良部島、阿蘇山、桜島などにおいて二酸化硫黄放出率観測を実施した（気象庁〔課題番号：JMA_12, JMA_15〕）。光計測技術を用いた地震計と重力計の開発を進めるとともに、それらを光ファイバで接続することによって地下深部や火山近傍に観測網を構築するための手法の確立を目指している。その一環として、小型絶対重力計を開発して南極にて観測を実施した（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_20〕）。桜島火山に設置した超軽量高解像度ミュオグラフィ観測システムからの画像データを機械学習することで噴火判定を導出する技術（MuNET-2）を開発し、2019年以降の画像と南岳火口の噴火との関係を見出した（図8）（東京大学地震研究所〔課題番号：ERI_21〕）。航空機による南方諸島および南西諸島における海域火山の定期巡回監視観測を実施した。なお、福徳岡ノ場および西之島については監視体制を強化し、月1回程度の監視観測を実施した。また、測量船により硫黄島の海域火山基礎情報調査を実施した（海上保安庁〔課題番号：JCG_04〕）。

これまでの課題と今後の展望

「火山」計画推進部会には、41の研究課題に加えて、当該年度の公募研究が10課題あり、地震火山観測研究計画において最大の計画推進部会（以下、部会）である。そのため、課題間の連携やそれぞれの課題における研究の深化のための取り組みも部会の重要な役割と考えられる。そのため、単独課題による研究集会に加えて、部会に関係の深い総合研究グループによる研究集会や複数課題による合同研究集会が開催されている。桜島大規模噴火総合研究グループ研究集会が12月21日・22日に鹿児島市で開催されたほか、北海道大学の課題（HKD_04）と京都大学理学研究科の課題（KUS_02）合同の研究集会が5月24日・25日に、東北大学理学研究科の課題（THK_11）の研究集会が2022年1月13日・14日にオンラインでそれぞれ開催された。また、部会全体の研究集会は2月15日・17日・24日にオンラインで開催した。このように、各課題は部会と総合研究グループの両方で研究の議論をする形が定着した。

この3年間における部会の研究課題に見られた様々な進展の特徴について以下にまとめる。なお、火山活動の状態や分岐・遷移を表すパラメータ間の相互関係が見えてきたことについては昨年度の報告書で述べたとおりであるので省略する。

この3年間における進展の特徴の一つ目は、観測手法や分析および解析手法の開発が大きく進展したことである。無人機を使った空中磁気観測においては、従来利用されている無人ヘリコプターに加えて電動ドローンの使用も進んでいる。無人ヘリコプターの運用において人工衛星経由による遠隔操作手法が確立されたことから、長時間飛行が可能な無人ヘリコプターは比較的広域の観測用、電動ドローンは小規模で低コストの観測用という住み分けが進んだ（東京大学地震研究所[課題番号:ERI_07]）。また、年代測定手法のひとつであるU-Th放射非平衡測定法が確立されたことで、カルデラ形成噴火の準備段階としてのマグマ停留時間が解明された（北海道大学[課題番号: HKD_02]）。二酸化硫黄放出率のトラバース測定装置（東京大学理学系研究科[課題番号:UTS_06]）と二酸化炭素放出率測定装置（東京工業大学[課題番号:TIT_02]）といった地表における火山ガス観測装置の高度化が進み、前者は定期船フェリーに搭載され火山監視データの取得に活用されている。一方、二酸化硫黄放出率の推定には人工衛星データが活用され、二酸化硫黄放出率を数百キロスケールで求めることや、一定時間間隔でのサンプリングが可能となった（北海道大学[課題番号:HKD_04]、産業技術総合研究所[課題番号:AIST06]）。火山モニタリングにおける人工衛星の活用に関しては、可視光や熱赤外観測や測地観測が従来から行われているが、マルチパラメータ化がさらに進んだと言えよう。人工衛星による観測は広範囲を把握できる特徴があるため大規模噴火のモニタリングに欠かせないことから、多様な衛星データ活用のための体制整備をさらに進めていくべきであろう。

この3年間における進展の特徴の二つ目は、広い時間および空間スケールにおいて分析や解析の分解能が向上したことである。例えば、古地磁気年代測定の導入により年代測定が高精度化されることで、テフラ層序から草津白根火山の完新世の噴火履歴の詳細が明らかになった（富山大学[課題番号: TYM_01]）。また、火山灰の高時間分解能サンプリングにより、火山灰構成粒子の時間変化が明らかになり、新燃岳2018年噴火の3つのステージにおける火道内プロセスの推定に貢献した（産業技術総合研究所[課題番号:AIST10]）。さらに、温泉水の高頻度サンプリング装置を用いることで、十勝岳の温泉水分析の時間分解能が向上し、Cl濃度やCl/SO₄比の変化と火映発生との対応関係の議論が進んだ（北海道立総合研究機構[課題番号: HRO_01]）。空間分解能の向上は火山深部構造の解明において見られ、例えば、草津白根山の湯釜火口周辺だけでなく本白根山、横手山、志賀高原を含めた領域での3次元比抵抗構造が明らかになり、草津白根山の広域のマグマ熱水系モデルの構築が行われた（東京工業大学[課題番号: TIT_03]）。

成果リスト

- 穴井千里・宮縁育夫・宇津木充・吉川慎・望月伸竜・渋谷秀敏・大倉敬宏, 2021, 古地磁気・岩石磁気学的手法を用いた阿蘇火山中岳火口周辺域の完新世噴出物の分類と噴火年代の再検討, 火山, 66, 3, 171-186, doi:10.18940/kazan.66.3.171.
- Chikita, K., A. Goto, J. Okada, T. Yamaguchi, S. Miura and M. Yamamoto, 2022, Hydrological and chemical budgets of Okama crater lake in Active Zao Volcano, Japan, Hydrology, 9, 2, 28, doi:10.3390/hydrology9020028.
- Cole, R.P., White, J.D.L., Dürig, T., Büttner, R., Zimanowski, B., Bowman, M.H., Conway, C.E., Leonard, G.S., Pure, L.R., Townsend, D.B., 2021, Controls on andesitic glaciovolcanism at icecapped volcanoes from field and experimental studies, Geology,

49, 1069-1073, doi:10.1130/G48735.1.

- 藤原 寛・山崎誠子・永塚弘樹, 2021, SPTを用いた重液分離の一例: K-Ar年代測定のための火山岩石基試料の分離, 地質学雑誌, 127, 727-732, doi:10.5575/geosoc.2021.0032.
- 橋本武志, 2021, 火山の活動不安定評価における熱消磁現象の活用と噴火予測の可能性, 地学雑誌, 130, 771, doi:10.5026/jgeography.130.771.
- Hotta, K., S. Kusumoto, H. Takahashi and Y.S. Hayakawa, 2022, Deformation source revealed from leveling survey in Jigokudani valley, Tateyama volcano, Japan, Earth Planets Space, 74, 32, doi:10.1186/s40623-022-01593-7.
- Ichiki, M., T. Kaida, T. Nakayama, S. Miura, M. Yamamoto and Y. Morita, 2021, Magma reservoir beneath Azumayama Volcano, NE Japan, as inferred from a three-dimensional electrical resistivity model explored by means of magnetotelluric method, Earth Planets Space, 73, 150, doi:10.1186/s40623-021-01451-y.
- 石塚吉浩・山元孝広・中野 俊・吉本充宏, 2021, 富士火山、須走期噴出物の噴出量見積もり, 地質調査総合センター研究資料集, 715, 6.
- Kametani, N., Ishizaki, Y., Yoshimoto, M., Maeno, F., Terada, A., Furukawa, R., Honda, R., Ishizuka, Y., Komori, J., Nagai, M., Takarada, S., 2021, Total mass estimate of the January 23, 2018, phreatic eruption of Kusatsu-Shirane Volcano, central Japan, Earth, Planets and Space, 73, doi:10.1186/s40623-021-01468-3.
- Kaneko, T., F. Maeno, M. Ichihara, A. Yasuda, T. Ohminato, K. Nogami, S. Nakada, Y. Honda, and H. Murakami, 2022, Episode 4(2019-2020) Nishinoshima activity: Abrupt transitions in the eruptive style observed by image datasets from multiple satellites, Earth Planets Space, doi:10.1186/s40623-022-01578-6.
- 今野裕三・高島帆風・小檜山雅之・吉本充宏・久保智弘, 2021, 火山災害対応における認知バイアスを克服するための訓練ツール, 地域安全学会論文集, 39, 233-243.
- Koyama, T., W. Kanda, M. Utsugi, T. Kaneko, T. Ohminato, A. Watanabe, H. Tsuji, T. Nishimoto, A. Kuvshinov and Y. Honda, 2021, Aeromagnetic survey in Kusatsu-Shirane volcano, central Japan, by using an unmanned helicopter, Earth Planets Space, 73, 139, doi:10.1186/s40623-021-01466-5.
- 草野有紀・及川輝樹・石塚吉浩, 2021, 日光白根火山1649年噴火の復元, 火山, 66, 327-346, doi:10.18940/kazan.66.4.327.
- Kuritani, T., E. Sato, K. Wada, A. Matsumoto, M. Nakagawa, D. Zhao, K. Shimizu, and T. Ushikubo, 2021, Conditions of magma generation at the Me-akan volcano, northern Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 417, 107323, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107323.
- Maeno, F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Kaneko, T., Tamura, Y., Yoshimoto, M., Nakano, S., Takagi, A., Takeo, M., Nakada, S., 2021, Intermittent growth of a newly-born volcanic island and its feeding system revealed by geological and geochemical monitoring 2013-2020, Nishinoshima, Ogasawara, Japan, Frontiers in Earth Science, 9, 773819, doi:10.3389/feart.2021.773819.
- Matsumoto, K. and N. Geshi, 2021, Shallow crystallization of eruptive magma inferred from volcanic ash microtextures: a case study of the 2018 eruption of Shinmoedake

- volcano, Japan, *Bull. Volcanol.* 83, 31, doi:10.1007/s00445-021-01451-6.
- Minami Y., Matsumoto K., Geshi N., Shinohara H., 2022, Influence of hydrothermal recharge on the evolution of eruption styles and hazards during the 2018–2019 activity at Kuchinoerabujima Volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 74, 21, doi:10.1186/s40623-022-01580-y.
- 南 裕介・中川光弘・佐藤鋭一・和田恵治・石塚吉浩, 2021, 雌阿寒岳火山ポンマチネシリにおける過去1000年間の火山活動史, *火山*, 66, 211–227, doi:10.18940/kazan.66.3_211.
- Munekane, H., 2022, Modeling long-term volcanic deformation at Kusatsu-Shirane and Asama volcanoes, Japan, using the GNSS coordinate time series, *Earth Planets Space*, 73, 192, doi:10.1186/s40623-021-01512-2.
- Nakajima, M.E., N. Takahata, K. Shirai, T. Kagoshima, K. Tanaka, H. Obata and Y. Sano, 2022, Monitoring the magmatic activity and volatile fluxes of an actively degassing submarine caldera in southern Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 317, 106–117, doi:10.1016/j.gca.2021.10.023.
- Nishimura, T., 2021, Volcanic eruptions are triggered in static dilatational strain fields generated by large earthquakes, *Scientific Reports*, 11, 17325, doi:10.1038/s41598-021-96756-z.
- Ota, K., Yokoyama, Y., Miyairi, Y., Yamamoto, S., Miyajima, T., 2021, Lake water dissolved inorganic carbon dynamics revealed from monthly measurements of radiocarbon in the Fuji Five Lakes, Japan, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9, doi:10.1525/elementa.2020.00149.
- Permana, T., T. Nishimura, H. Nakahara and N. Shapiro, 2021, Classification of volcanic tremors and earthquakes based on seismic correlation: application at Sakurajima volcano, Japan, *Geophys. J. Int.*, 229, 1077–1097, doi:10.1093/gji/ggab517.
- Tada, N., Ichihara, H., Nakano, M., Utsugi, M., Koyama, T., Kuwatani, T., Baba, K., Maeno, F., Takagi, A., Takeo, M., 2021, Magnetization structure of Nishinoshima volcano, Ogasawara island arc, obtained from magnetic surveys using an unmanned aerial vehicle, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 419, 107349, doi:10.1016/j.jvolgeores.2021.107349.
- Takahashi, R., 2022, Mineralogical and geochemical investigations for subvolcanic hydrothermal alteration environments at an active volcano: An example of Hokkaido-Komagatake volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 423, doi:10.1016/j.jvolgeores.2022.107497.
- 宝田晋治・金田泰明・池上郁彦・松本恵子・西野佑紀・下司信夫・川邊禎久・中野 俊・星住英夫・石塚吉浩・工藤崇・及川輝樹・古川竜太, 2021, 産総研地質調査総合センターの火山データベース, *Proceedings of the International Meeting on Eruptive History and Informatics (福岡大学)*, 2021-1, 97–103, ISSN:2189-5163.
- Takebe, M., M. Ban, M. Sato and Y. Nishi, 2021, The temporal variation of magma plumbing system of the Kattadake pyroclastics in the Zao volcano, northeastern Japan, *Minerals*, 11, 4, 430, doi:10.3390/min11040430.
- Yamada, H., Tateyama, K., Naruke, S., Sasaki, S., Torigata, S., Honda, R., Kubo, T.,

- Yoshimoto, M., Fujii T., 2021, Impact resistance of steel materials to ballistic ejecta and shelter development using steel deck plates, *Journal of Applied Volcanology*, 10, doi:10.1186/s13617-021-00105-8.
- Yamamoto, S., Nishizawa, F., Yoshimoto, M., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., Suga, H., Ohkouchi, N., 2021, Dating Lake Sediments Using Compound-Specific ¹⁴C Analysis of C16 Fatty Acid: A Case Study From the Mount Fuji Volcanic Region, Japan., *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2020GC009544, doi:10.1029/2020GC009544.
- Yamamoto T., Nakano S., Ishizuka Y., 2021, Temporal variations of eruption rate and magma composition at Fuji Volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, 73, 169, doi:10.1186/s40623-021-01505-1.
- Tanaka, R., Y. Yamaya, M. Tamura, T. Hashimoto, N. Okazaki, R. Takahashi and T. Mogi, 2021, Three-dimensional inversion of audio-magnetotelluric data acquired from the crater area of Mt. Tokachidake, Japan, *Earth Planets Space*, 73, 172, doi:10.1186/s40623-021-01502-4.
- Terada, A., W. Kanda, Y. Ogawa, T. Yamada, M. Yamamoto, T. Ohkura, H. Aoyama, T. Tsutsui and S. Onizawa, 2021, The 2018 phreatic eruption at Mt. Motoshirane of Kusatsu-Shirane volcano, Japan: Eruption and intrusion of hydrothermal fluid observed by a borehole tiltmeter network, *Earth Planets Space*, 73, 157, doi:10.1186/s40623-021-01475-4.
- Terada, A., M. Yaguchi and T. Ohba, 2022, Quantitative assessment of temporal changes in quaqueous hydrothermal activity in active crater lakes during unrest based on a time-series of lake water chemistry, *Front. Earth Sci.*, 9, 740617, doi:10.3389/feart.2021.740671.
- Yaguchi, M., T. Ohba and A. Terada, 2021, Groundwater interacting at depth with hot plastic magma triggers phreatic eruptions at Yugama Crater Lake of Kusatsu-Shirane volcano (Japan), *Front. Earth Sci.*, 9, 741742, doi:10.3389/feart.2021.741742.
- Yaguchi, M., T. Ohba, Y. Hirayama and N. Numanami, 2022, Volcanic ash from the June 17, 1962 eruption of Yakedake volcano: stereomicroscopic, XRD, and water-soluble components analyses, *J. Disaster Res.*, 17, 257, doi:10.20965/jdr.2022.p0257.
- 吉本充宏, 2021, 富士山の噴火への課題—将来の噴火に備えて—, *建設工業調査会ベース設計資料*, 189, 21-25.
- Yoshimura, S. and M. Nakagawa, 2021, Chlorine heterogeneity in volcanic glass as a faithful record of silicic magma degassing, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 126, e2020JB021195, 1-24, doi:10.1029/2020JB021195.

三宅島磁化強度分布推定

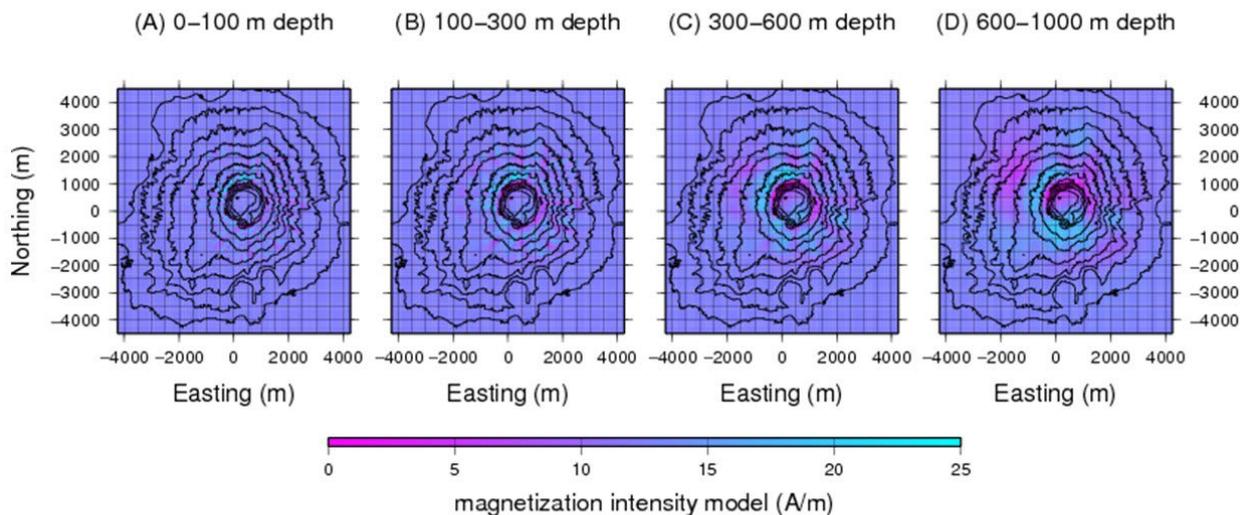


図1. 三宅島の磁化強度分布（東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_07]）
カルデラリム下は強い磁性を示す一方、カルデラ内は弱い磁性を示す。

衛星赤外面像による火山の観測

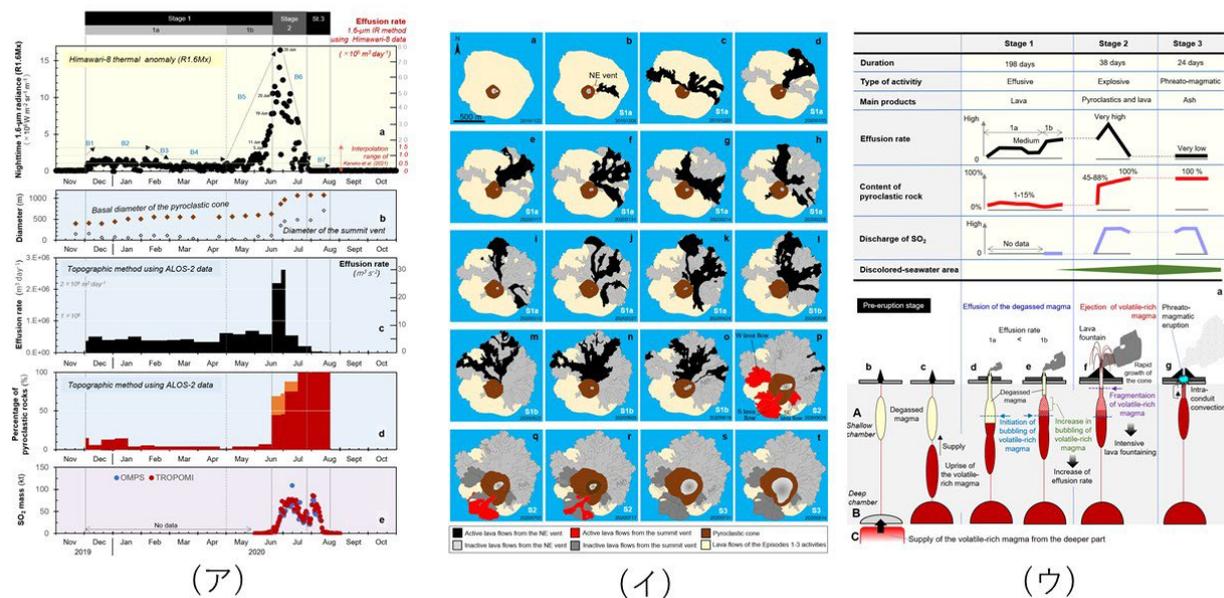


図2. 衛星赤外面像による西之島の観測（東京大学地震研究所 [課題番号: ERI_07]）

(ア) : 各種観測量の時間変化。a ひまわり8号1.6 μ mバンドの輝度。b ALOS-2画像による火砕丘の基底径と火口径。c 同じ画像を用いて地形的手法にて推定した噴出率。d 噴出率に占める火砕岩の割合。e 紫外光-可視光センサーによる二酸化硫黄放出率。

(イ) : ALOS-2画像から判読した噴火状況の推移。

(ウ) : 噴火推移のまとめと噴火様式変化を説明するモデル。

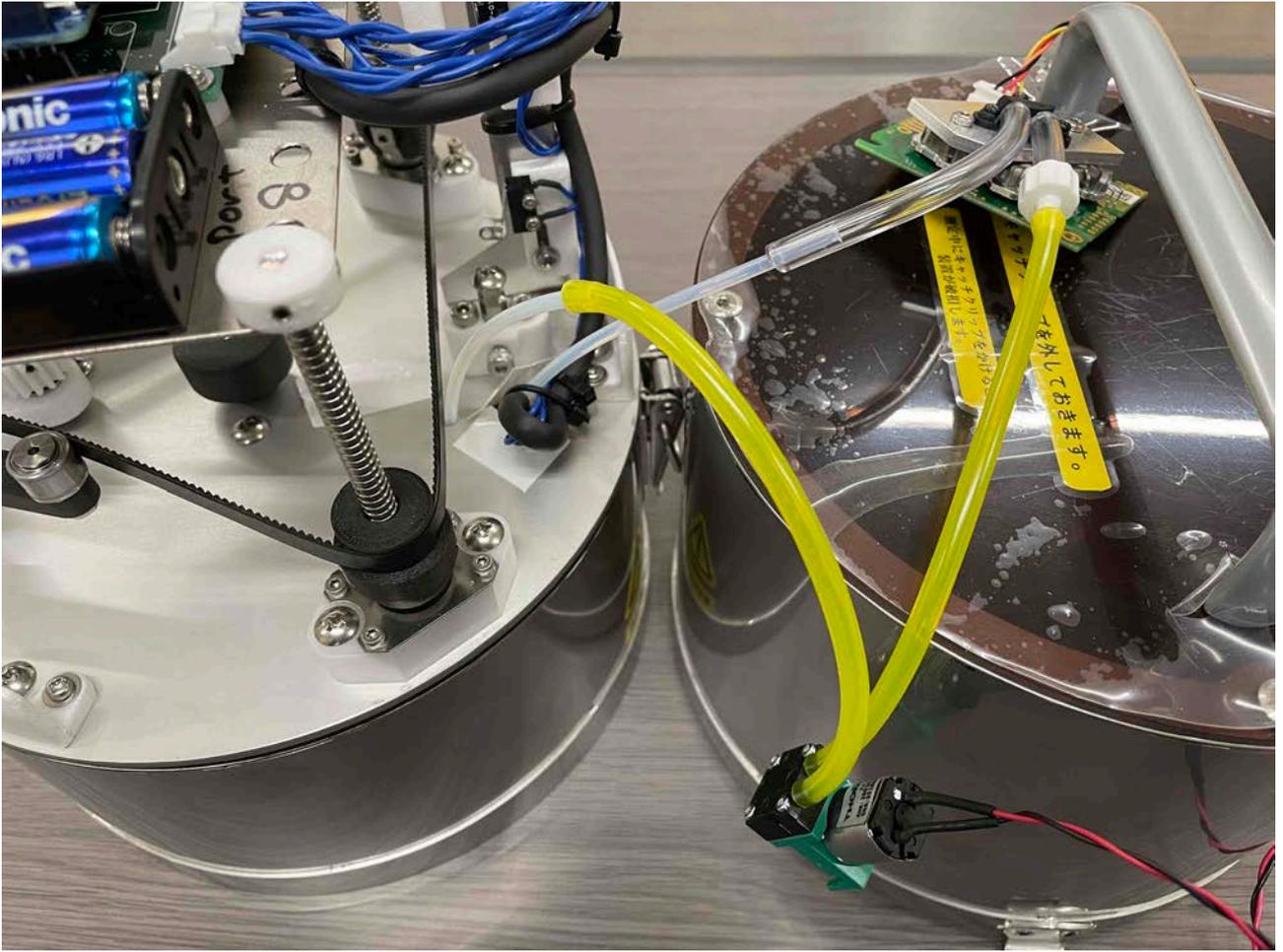


図3. 二酸化炭素放出率測定装置（東京工業大学[課題番号:TIT_02]）
新たな二酸化炭素センサーとポンプシステムを示す。

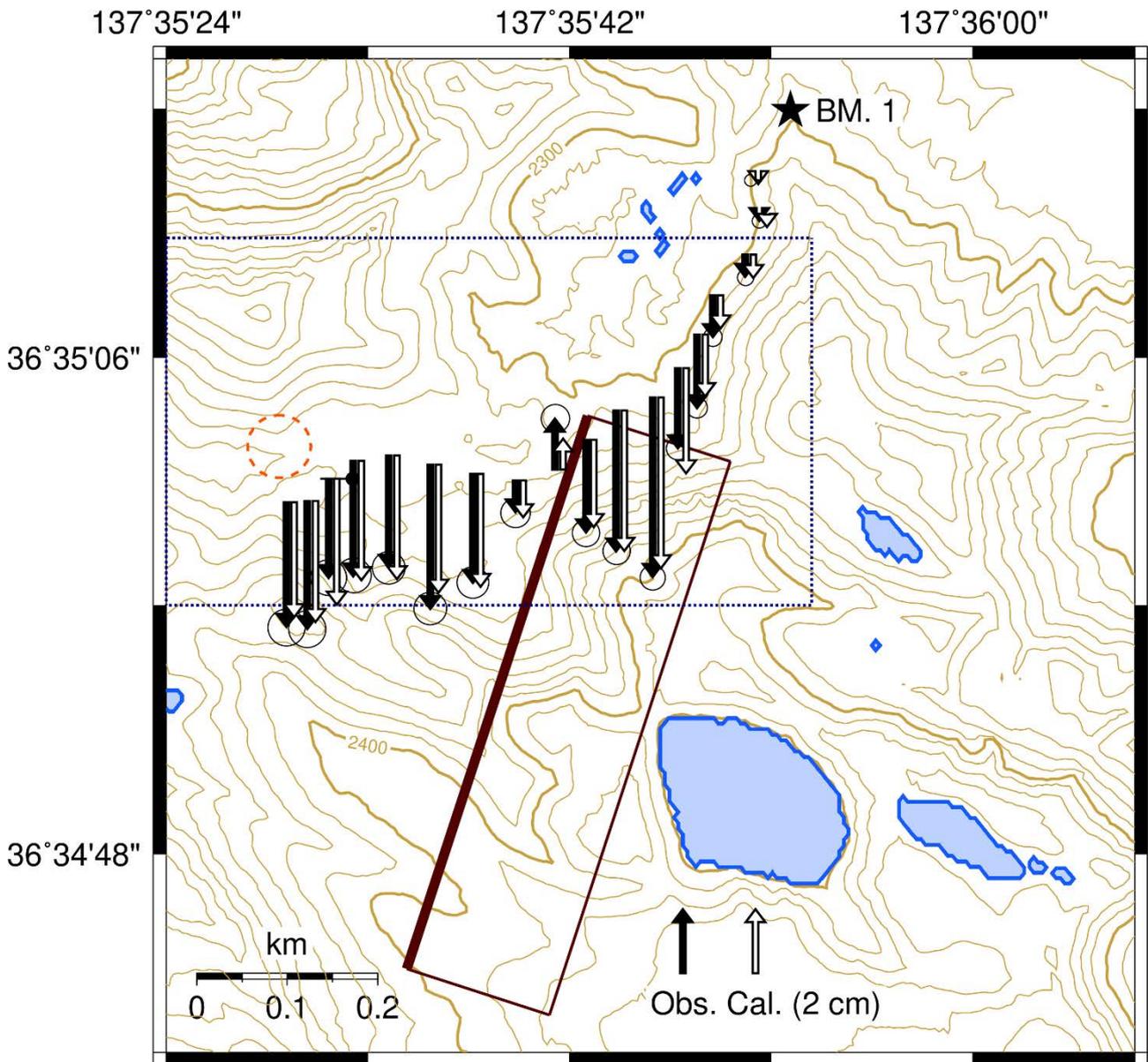


図4. 水準測量による2016年と2020年のBM. 1に対する上下変動（富山大学[課題番号:TYM_02]）
 上下変動は矢印（黒は観測値，白は計算値）で示される。また、茶色実線の長方形は上下変動から推定された割れ目の位置（太線が上端）を示す。

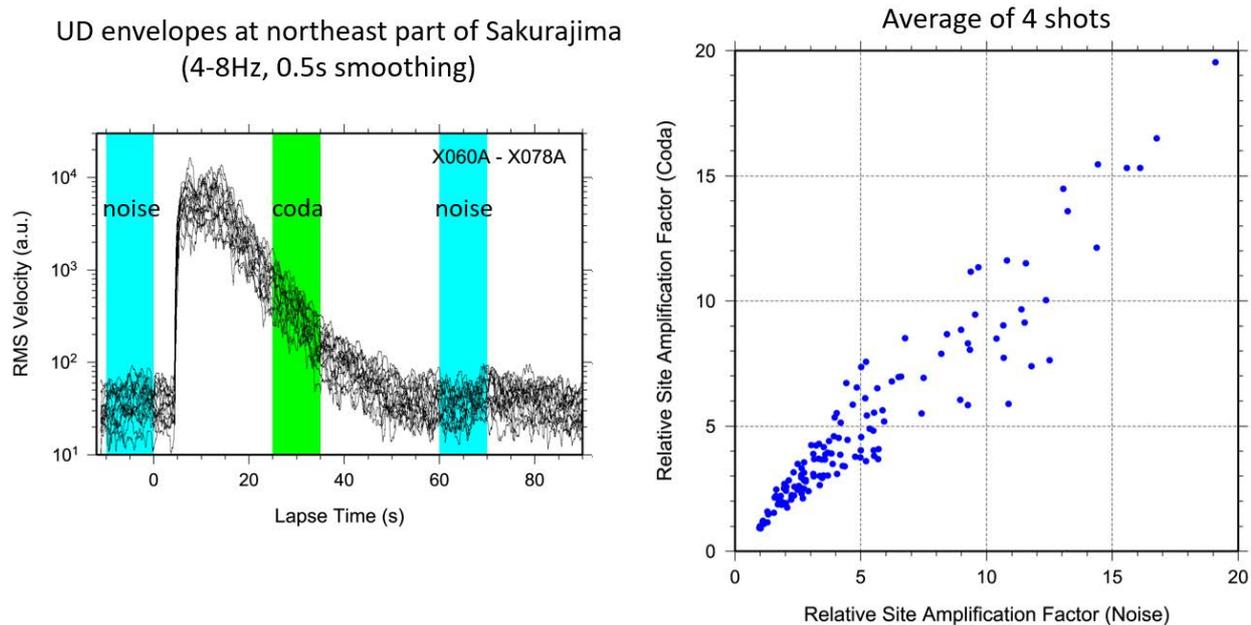


図5. コーダ波・雑微動を用いて推定した相対的サイト増幅特性の関係（東北大学大学院理学研究科[課題番号:THK_08]）

左：人工地震探査における桜島北東地域の観測点のエンベロープ波形

右：相対的サイト増幅値（横軸：ノイズ部、縦軸：コーダ部）

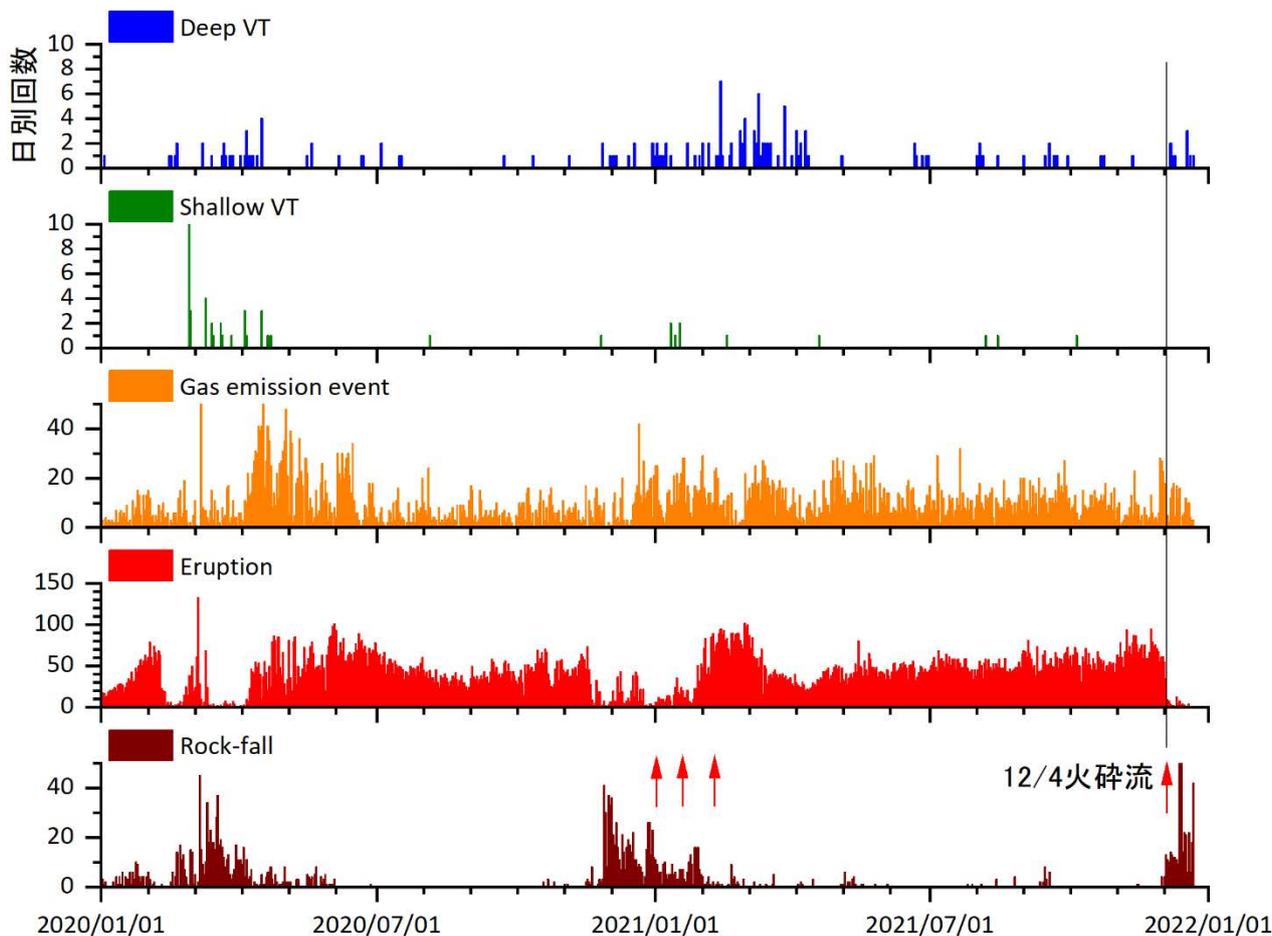


図6. スメル火山の火山性地震の日別発生回数と噴火回数（2020年～2021年）（京都大学防災研究所[課題番号:DPRI06]）

1 段目：深い火山構造的な地震、2 段目：浅い火山構造的な地震、3 段目：ガス放出イベント、4 段目：噴火、5 段目：岩石崩落。赤矢印は火砕流発生時刻を示す。

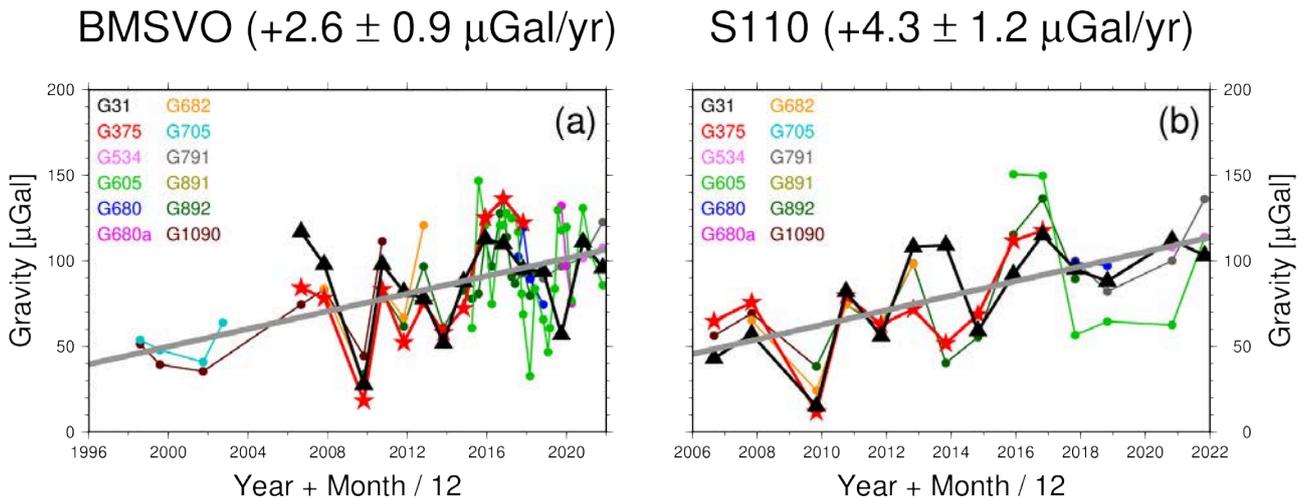


図 7. 桜島火山における相対重力変化（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI07]）

左図：ハルタ山重力点における1998年～2021年の重力変化

右図：大正噴火火口至近の重力点における2006年～2021年の重力変化

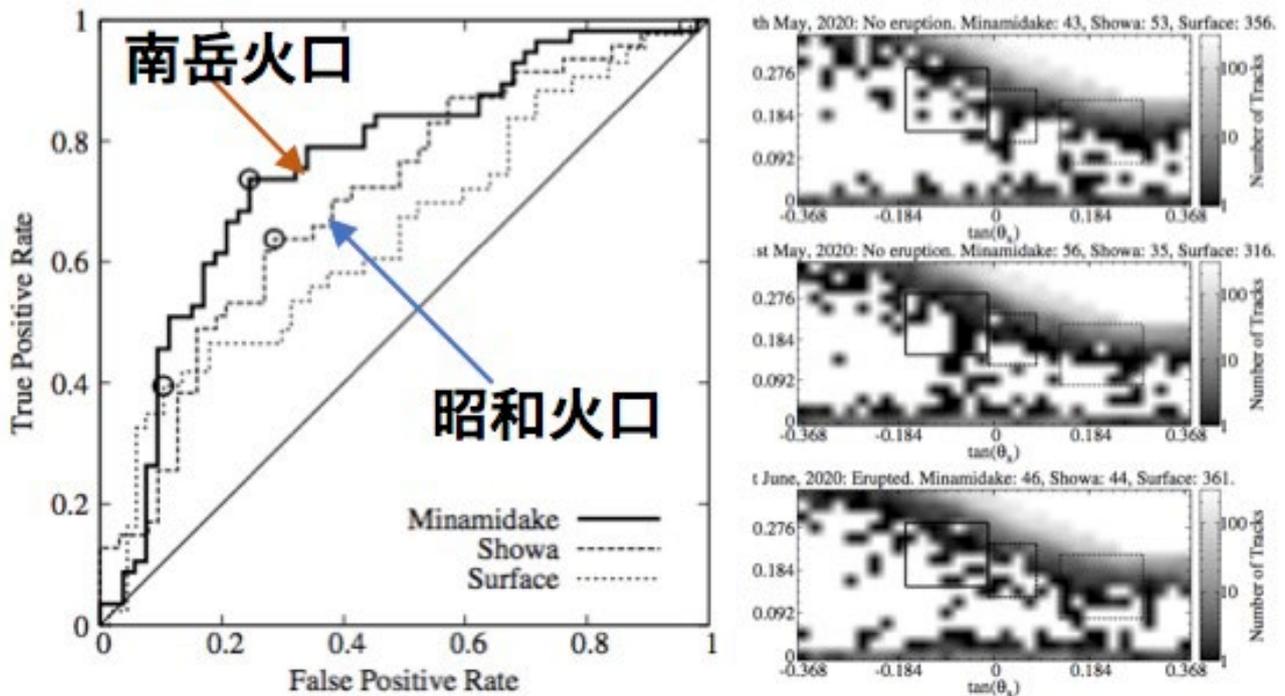


図 8. 桜島の各種入力データに対するROC曲線（Receiver Operating Characteristic curve）（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_21]）

南岳火口、昭和火口、その他の領域において判定した結果が示されている。