

2 (4) 内陸で発生する被害地震

「内陸で発生する被害地震」総合研究グループ長 岡田知己
(東北大学理学研究科)

内陸の地震は、人間の生活圏の近くで発生するため被害が大きくなりやすく、過去にも多くの被害地震が内陸で発生している。そこで本計画では、陸域で発生する被害地震を新たな総合的研究の対象とする。内陸域の大規模地震や群発地震の発生要因、強震動発生メカニズム、歴史地震の研究を通じて、いくつかの地域において今後発生が想定される地震像を提示し、それに基づく強震動等の災害誘因予測を目指す。また、浅部地盤構造調査や構造物モニタリング調査に基づき、リスク評価手法の研究にも取り組む。さらに、社会との情報共有によるリスク低減の方法も検討する。

5. 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(4) 内陸で発生する被害地震

内陸やプレート境界上盤、日本海東縁地域で発生する大規模地震や群発地震を対象として、文理融合の取組を含めた総合的研究を実施した。地震に伴う災害について、応力や地殻内流体の時空間変化と地震活動との関連性の研究、断層近傍の強震動発生メカニズムの研究、歴史地震の研究とその成果を考慮しつつ、リスク評価手法の確立を目指した。都市圏、近年の大規模地震の発生域周辺、群発地震など活発な地震活動域、プレート境界大地震の発生前後の内陸地震活動域など、高いリスクを生じうる領域において、それぞれの特色に合わせた重点的な観測研究が行われた。さらに、内陸地震を対象とした長期予測、中短期予測、災害誘因予測手法の開発に向けた研究が行われた。また、計画期間に発生した内陸被害地震として、2024年能登半島地震の各種調査が機動的に実施された。2025年1月29日にグループの研究集会を行い、2024年能登半島地震についての各課題の成果や各地域での研究成果と手法を共有することで、現象の包括的理解を図った。

1) 2024年能登半島地震に関する成果

1-1. 能登半島地震に関する臨時観測の実施

能登半島における臨時観測(GNSS地殻変動観測、電磁気観測、地震観測、ひずみ観測)を継続して行った(図1, 京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10], 平松・他, 2024, 東北大学理学研究科[課題番号:THK_11])。電磁場連続観測については、磁場参照点の整備を進めた(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10], Yoshimura et al., 2024)。

1-2. 余震分布や先駆的活動の震源分布

2024年能登半島地震は、群発地震が微小亀裂を通じて深部から浅部に移動し、大断層に浸入した周辺から開始したことが示された(図2, 東北大学理学研究科[課題番号:THK_11], Yoshida et al., 2024)。

計算コストの高い高精度震源再決定を、低計算コスト・準リアルタイムで行うアルゴリズムを作成し、能登半島の群発地震に適用した(図3, 東北大学理学研究科[課題番号:

THK_11], Matsumoto and Yoshida, 2024)。

1-3. 断層モデルおよび余効変動

臨時観測点, GEONET 観測点, ソフトバンク観測点記録を用いた GNSS 地殻変動観測により, M7.6 能登半島地震後の余効変動を粘弾性緩和と余効すべりにより説明し, 将来の変動を予測した(図4, 京都大学防災研究所[課題番号: DPRI10])。

ソフトバンク独自基準点データを含めた稠密 GNSS データの有効性の検証のための研究を進めた。その一例として, 2024 年能登半島地震後の余効変動において, 佐渡島西方において余効すべりが卓越している可能性を指摘した(図5, 図6, 東北大学理学研究科[課題番号: THK_11, THK_12(観測研究基盤部会)], 大館・他, 2024)。

1-4. 地表地震断層の考察

能登半島地震の際の地表地震断層を考察した。令和5年度に実施した熊本地震の地表変位の再検討の結果, 地震後に現地調査により確認された地震断層変位量が, 周辺数百メートルの変形を捉えておらず, 過小評価になっていたことを再確認した。その割合は最大2倍に及ぶ可能性があることを念頭においた。能登半島北岸沖断層は海底にあるため地形調査をすることができないが, 20 km程度南方の志賀町の, 富来川南岸断層に沿って地震断層が現れたことを確認した。地震直後に変位が確認された場所は限定的で, 盛土の変形を地震断層と誤認しているとの批判もあったが, 5月までの再調査により, 3 km以上の範囲に南方隆起で左横ずれを伴う変形が生じたことが確実であることが判明した(名古屋大学環境学研究科[NGY_06], 鈴木・渡辺, 2024)。ずれの量は縦ずれ・横ずれとも見かけ最大30~40 cmである。また注目に値することは, この断層線近傍の建物被害が激しいことであり, この程度の地震断層でも何らかの強震動発生に寄与した可能性がある。富来川南岸断層はこれまで北陸電力による反射法地震探査で南方へ45度程度で傾下する逆断層であることが判明している。またその後の写真判読調査により, その北東方では従来富来川断層と呼ばれていた断層に続くことがわかり, 総延長は10 kmを超える可能性が高いことが判明した。なおこの断層の地震時の活動は, 活断層固有の変位ではない。断層面に沿う余震活動は乏しく, 本震時のみの付随的な活動であったと考えられる。

1-5. 震源域の応力場と断層のすべりやすさの関係

2024 年能登半島地震 (M7.6) やそれに関連する断層群の応力場に対するすべりやすさの評価を行なった。M7.6 地震や関連する断層群は, いずれも高い Slip Tendency の値を示すことから, M7.6 地震前の応力場に対してすべりやすい傾向にある。能登半島地震は複数の断層が連動破壊した地震であると推察される。各断層のすべり履歴などの他の要因を考慮する必要はあるが, 連動破壊や余震としての遅れ破壊を起こしても不自然でない条件(例えば, カイコウラ地震: Matsuno et al., 2022) にあった/あると推察される(東北大学理学研究科[課題番号: THK_11], 田上・岡田, 2024)。

1-6. 震源域陸域の地震波速度構造

Okada et al. (2024)の地震波速度構造を用いて2024年能登半島地震および関連する地震の震源決定を行った。低ブーゲー重力異常域の直下・2024年M7.6地震震源や2023年

M6.5地震震源及びそれらの余震・断層モデルの深部に、高 V_p 、(低 V_s)、高 V_p/V_s 領域が確認できる。また震源域付近は低 V_p 、低 V_p/V_s となっている。高 V_p 、(低 V_s)、高 V_p/V_s 領域の原因として第三紀に形成されたカルデラの古いマグマ溜まりが考えられる。それを經由し、周囲への水の移動により、地震活動が発生するとともに、震源域付近に長期の地震活動と関連した水と共に移動した SiO_2 が濃集した低 V_p 、低 V_p/V_s の領域が示唆される(図7, 東北大学理学研究科[課題番号:THK_11], 岡田・2024年能登半島地震陸域余震観測グループ, 2024)。

能登半島の群発地震発生域において、2023年に実施した地震計ノードを用いた稠密地震観測データに常時微動表面波トモグラフィを適用し、2024年能登半島地震及び先行した群発地震を規定した不均質構造を明らかにした。また、能登半島地震陸域余震域をカバーする稠密地震観測を新たに実施した(東北大学理学研究科[課題番号:THK_11], 高木・他, 2024)。

1-7. 応力降下量や応力テンソル解析による流体の影響の評価

能登半島北東部の群発地震の静的応力降下量の時空間分布や震源メカニズム解および応力テンソルの解析から群発地震活動における流体の影響を評価した(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10], Fukuoka et al., 2024, Takano et al., 2024)。

1-8. 地震に伴う地震波速度構造の時間変化

臨時観測網のデータも用いて常時微動に伴う地震波速度の時間変化について検討を行った(東北大学理学研究科[課題番号:THK_11], Paris et al., 2024)。

1-9. 地震による誘発地震

M7.6能登半島地震による日本列島での誘発地震活動を調査したところ、火山地帯を中心に広域にわたり誘発地震が確認された(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10], An et al., 2024)。

1-10. 人材育成と内陸地震発生時への対応

これまで余震観測の経験のない若手研究者に、M7.6能登半島地震の臨時余震観測調査に同行してもらい、地震計設置に関する技術を現場で継承した。なお、余震観測は他機関と協力して行った(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10], 平松・他, 2024)。

1-11. 能登半島地震を対象としたリスクコミュニケーションモデル構築

能登半島北東部の群発地震の群発地震および令和6年能登半島地震に関する総合調査の成果を被災自治体および地方気象台と共有し、意見交換を行なった(京都大学防災研究所[課題番号:DPRI10], 平松, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d; 平松・他, 2024)。

能登半島地震で被災した学校及び地域を訪問し、地震発生時の避難行動、避難所運営、心のケアに関するヒアリングを実施した。これは、住民らの地震活動に関する理解を醸成するためのリスクコミュニケーションモデル構築に向けた基礎資料となる。

1-12. その他関連する他部会の成果

史料・考古部会では、1729年能登半島の地震の余震について地震後2週間は有感の余震（気象庁震度2以上）が継続した可能性を示した（東京大学地震火山史料連携研究機構[課題番号：HMEV01, HMEV02]）。

現象解明部会では、以下の成果があった。事前情報をもとに構築したモデルを用いて、動的破壊シミュレーションを実施し、本震時観測記録と比較検証した（東京大学理学系研究科[課題番号：UTS_04]）。能登半島地震の余震について三次元速度構造を考慮したCMT解析、および地震直後の短時間（1時間程度）の地震動からその後の揺れを予測する手法の改良、が実施された（防災科学技術研究所[課題番号：NIED02]）。能登半島地震の解析として（1）三次元速度構造を用いた震源際決定、（2）アレイデータを用いたバックプロジェクション解析、を実施した（産業総合技術研究所[課題番号：AIST06]）。

観測研究基盤部会では、能登半島東端に設置した臨時地震観測により、直前の前震活動と本震との関係の検討が行われた（九州大学[課題番号：KYU_04]）。

2) 東北地方における成果

2-1. 東北地方から北海道にかけての日本海東縁地域および内陸地域の応力場と断層のすべりやすさとの関係

日本海東縁地域の断層は応力場に対してすべりやすい面である一方、内陸地域の断層は応力場に対してすべりにくい面であるが高間隙圧流体によりすべりを起こしている可能性を指摘した（図8, 東北大学理学研究科[課題番号：THK_11], Tagami et al., 2024）。

2-2. 浅部構造の把握に基づく断層の描像の高度化

前計画に引き続き、宮城県仙台平野南部の重力異常探査から得られた断層の構造について仙台湾を含む周辺の断層分布を含めて考察・精査を行なった（東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]）。

2-3. 東北地方南部の比抵抗構造

山形-福島群発地震域を含む広域的地殻比抵抗構造の再解析を行い、山形-福島群発地震域が Fault-Valve モデルで調和的に解釈できることを突き止めた。それを反映して群発地震に直接到達するような流体イメージは確認できなかった（東北大学理学研究科[課題番号：THK_11], 若尾・他, 2024）。

2-4. 2011年東北沖地震の余効変動からみた、日本東北地方の第四紀火山周辺における低粘性層（LVZ）の3次元レオロジー推定

地質学的・地球物理学的研究により、日本東北地方の第四紀火山の地下には低粘性層（LVZ）が存在することが示唆される。そのようなLVZは、2011年東北沖地震の前後に局所的な地殻変動を引き起こす可能性がある。5つの第四紀火山（秋田駒ヶ岳、栗駒山、蔵王山、吾妻山、那須岳）周辺の低粘性層（LVZ）のレオロジーを理解することを目的として研究を行った。その結果、これら5つの火山周辺で、約80 km幅の局所的なひずみ収縮が確認された（図9, 図10, 東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]）。

1) LVZは深さ15 km付近で狭く（幅20-40 km）、深さ55 km付近で広く（幅80-100 km）なる。

2) LVZ の粘性:

遷移粘性: 10^{17} Pa · s

定常粘性: 約 10^{18} Pa · s

3) LVZ の形状と粘性の変動は、火山フロントに沿った弧に平行なレオロジーの不均質性を示唆する。また、Cenozoic (新生代) のカルデラ分布および熱流量の分布と整合性を示すとともに、短波長のひずみ速度の観測結果と整合する。

2-5. その他関連する他部会の成果

史料・考古部会からは、1894 年庄内地震の被害の検討が行われた (東京大学地震火山史料連携研究機構 [課題番号: HMEV01, HMEV02])。

3) 京都府南部を対象とした調査

3-1. DAS を用いた研究

分布型音響センシング技術である DAS を用いて測定した地震記録を解析した。下部地殻に存在すると考えられている地震波反射帯の構造を推定 (図 11, 京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI10], Miyazawa, 2024) したほか, DAS の振幅記録から震源メカニズムを求めることに成功した (京都大学防災研究所 [課題番号: DPRI10], 船曳・宮澤, 2024)。

3-2. その他関連する他部会の成果

史料・考古部会において、京都府南部をはじめとした全国の発掘調査で検出した「地震痕跡」について、「全国遺跡大規模地震痕跡データセット」の公開が 2025 年 1 月 24 日より始められた (奈良文化財研究所 [課題番号: NAB_01])。

4) 震源の物理や断層形成に関わる成果

4-1. 観測に基づく震源物理に関する成果

近地地震波形の単純な時間積分に基づき、直接的に中小地震 (Mw3.3-5.0) 地震の破壊過程の複雑性・多様性を明らかにした (図12, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Yoshida, 2024)。

近地波形と合成波形の比較により、地殻浅部の減衰を評価。深さ 4 km に、従来考えられていたよりも強い減衰を検知した。改訂した減衰構造により中小地震の放射エネルギーに成功した (図13, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Yoshida et al., 2024a)。

4-2. 室内実験および数値シミュレーションによる摩擦・破壊過程

室内実験結果より、摩擦特性に対する間隙水の影響は、間隙圧のような力学的なものだけでなく、岩石-水反応による化学的な過程も重要であることが、摩擦すべりに伴う AE 活動の解析から明らかとなった (図 14, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Yabe, 2025)。

深部スロー地震発生域に存在すると考えられる泥質片岩の高温高压変形実験をおこなった (図 15, 東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11])。実験条件は温度 480°C , 封圧 1000 MPa と 1250 MPa, ひずみ速度 3×10^{-4} /s, 間隙水圧は 0 MPa (乾燥条件) から 800 MPa

である。間隙水圧の上昇とともに泥質片岩の強度は減少し、ピーク応力から定常応力にいたる応力降下速度も減少した。

接触面の凝着状態を表す「構造」発展則パラメータを変化させることで「安定すべり」から「stick-slip」までを表現できる上下負荷面摩擦モデルを、接触力境界条件として導入した動的-一相系微小変形弾性解析法を開発した。これを単純せん断場に適用した結果、法線応力の非一様化に伴う局所的すべりの促進／抑制により、すべり伝播過程が現れ波動が生成されること、初期値境界値問題の帰結として局所的な摩擦力変動／応力再配置が評価可能であることなどを示した（名古屋大学環境学研究科[課題番号：NGY_06]，安池・他，2024）。

4-3. その他関連する他部会の成果

中短期予測部会からの成果として、 b 値を用いた大地震確率の短期予測について、大きな地震が発生した直後から、さらなる大地震の短期的な発生確率を迅速に自動更新評価するスキームが提案された（東京大学地震研究所[課題番号：ERI_12]）。

5) 災害誘因評価・強震動予測に関する成果

5-1. 断層の浅部形状やパラメータ決定の効果に関する研究

変動学的知見等を踏まえた詳細な地表地震断層の属性を組み入れたモデルに基づく強震動計算の高度化に資するため、今年度は地震調査委員会「2016年熊本地震の観測記録に基づく強震動評価手法の検討について（中間報告）」で検討された断層モデルに対して、断層浅部に詳細な地表断層形状を反映させ、強震動の試算を行った。さらに、断層モデルのパラメータの不確実性が断層近傍強震動に与える影響を見積もるため、断層パラメータ（断層面積、地震モーメント、アスペリティ面積比）を確率変数として確率密度関数によって表現した断層パラメータの設定方法を検討した。単純なケースについての強震動試算によりパラメータの分布が強震動のばらつきに与える影響を調べた（名古屋大学環境学研究科[NGY_06]）。

5-2. その他関連する他部会の成果

災害誘因評価・即時予測部会では、静岡県森町における地すべり地域において2020年10月から2022年5月まで実施した地震計アレイによる観測記録の解析が行われた（名古屋大学環境学研究科[課題番号：NGY_04]）。

6) アウトリーチ活動

アウトリーチ活動は総合的研究グループの活動として重要であると捉えている。1-11.において述べた京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]による能登半島地震関連の活動以外に以下の活動を行った。

東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]では、2024年青森県陸奥湾の地震に関し、青森県からの要望を受けて、仙台管区气象台と共同で、青森県知事立会いのもと地震活動に関する解説を行なった。内陸の有感地震が頻発した場合には地方气象台・管区气象台への問い合わせも多く寄せられており、対応を協力して行なっている。これまで、仙台管区气象台との定期的な意見交換をメール等で月1回程度実施してきたが、今年度からは

年3回の対面での意見交換を開始した。教員・学生等の研究発表も行い、本課題による成果も適宜、仙台管区気象台に提供しているとともに研究者育成の機会としている。また、2024年12月3日に東京大学地震研究所サイエンスカフェにおいて、「内陸地震」に関する話題提供を行った。

名古屋大学環境学研究科[課題番号:NGY_06]では、屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯(恵那山-猿投山北断層帯)が活動した場合に被害が発生し得ると考えられる東濃地域および尾張・西三河地域を対象に実施した不確実性を有する活断層情報の提供のあり方を検討するためのアンケート調査結果を解析し論文化した(橋富・鷺谷, 2024)。また、同断層帯が活動した場合の震度予測をもとに、電力と石油燃料の供給について検討した。電力については、当該地域に立地する基幹送電網(公称電圧500kVおよび275kV)を構成する鉄塔の位置データ(別プロジェクトで作成)をもとに震度別曝露基数を既存の地震シナリオ別に明らかにした。また、石油燃料については、住民拠点SSの震度別曝露数を確認した。

これまでの課題と今後の展望

当グループにおいては、2024年能登半島地震を「被害を伴う内陸地震」として、グループや関連する部会の課題において精力的に研究が行われた。その結果、2024年能登半島地震が複数枚の断層の連動破壊であることやその先駆的群発地震活動も含めて流体が関与することが指摘された。一方で、先駆的群発地震活動と本震との関わりや長期的な地殻変動・地殻構造形成と地震活動や地震時すべり・余効すべり等の短期的地殻変動の関連など未だ不明な点が多い。

引き続き、2024年能登半島地震発生前の前駆的活動の特徴を詳細に調べる。2024年度に実施した能登半島地震余震域の稠密地震観測データを活用し、2024年能登半島地震の複雑なすべり分布・余震分布を規定した地下の不均質構造を明らかにする。比抵抗構造と地震波速度構造はそれぞれ地下の流体の分布・状態を知るための重要な情報である。再解析した比抵抗構造と地震波速度構造の相互比較から定量的な流体量の推定を試み、地殻のレオロジー構造についての足掛かりとする。一方、ソフトバンク独自基準点データを含めた稠密GNSSデータを活用した能登半島地震の余効変動や注目すべき領域やさらに全国的な高精細なひずみ分布マップの推定とともに、内陸のレオロジー不均質性を考慮した地殻変動解析及びモデル化を進めることで、内陸の時空間変動場の理解を進めるとともに、地震活動との関係も探っていく必要がある。

観測に加えて、実験でも間隙水圧の影響を検討していく必要がある。泥質片岩の強度・すべり速度と間隙水圧との関係について、来年度は、より幅広い有効圧力下での泥質片岩の高温高压変形実験をおこなう予定である。特に高封圧下(>1250 MPa)や高間隙水圧下(>900 MPa)での変形実験を実施する予定である。高温高压下での岩石の変形挙動を理解することにより、地球内部で発生している多様な断層すべり挙動についての理解を深めたい。

地震断層近傍の強震動は内陸地震の被害原因として重要であり、そのメカニズムを解明して事前予測可能にすることは被害軽減に大きく貢献するものである。予測の不確実性に関する検討やその防災への反映方法も含め、分野連携で取り組む。

対話的・双方向的リスクコミュニケーション・モデルを提案するために、能登半島にお

いて地球科学的観測を継続し、現象の解明と市民シンポジウムの開催をいくつか時期・場所・会場等でおこなう予定である。また、リスクコミュニケーション・モデルの検証とフィードバックを、阿武山地震・防災サイエンスミュージアム等の他地域でも、それぞれの調査研究結果を活用して行い、災害の軽減に貢献することを目指す。

成果リスト

- An, L., B. Enescu, Z. Peng, M. Miyazawa, H. Gonzalez-Huizar, and Y. Ito, 2024, Dynamically triggered seismicity in Japan following the 2024 Mw7.5 Noto earthquake. *Earth Planets Space* 76, 181, doi:10.1186/s40623-024-02127-z
- Fukuoka, Y., Y. Hiramatsu, and T. Yamada, 2024, Linking the spatiotemporal distribution of static stress drops to source faults in a fluid-driven earthquake swarm, northeastern Noto Peninsula, central Japan. *Earth, Planets and Space*, 76:125, doi:10.1186/s40623-024-02074-9.
- 橋富彰吾・鷺谷威, 2024, 不確実性を有する活断層情報の提供のあり方に関する研究, 災害情報 No.22-2, pp.207-218.
- 平松良浩, 2024a, 火山防災協議会を念頭に, 2年前からトップとの意見交換会や住民対象シンポジウム, 日本災害情報学会ニュースレター, 97, 3-3.
- 平松良浩, 2024b, 令和6年能登半島地震のメカニズム, 建築雑誌, 139, 1788, 3-3.
- 平松良浩, 2024c, 令和6年能登半島地震の背景とメカニズム, 日本地震工学会誌 52号, 2-5.
- 平松良浩, 2024d, 令和6年能登半島地震と群発地震と海底活断層, 消防防災の科学, 夏季(157)号, 21-28.
- 平松良浩・青木賢人, 2024, 石川県における被害想定と地域住民への啓発活動, 日本地震工学会誌 53号, 7-10
- 平松良浩・岡田知己・吉田圭佑・高木涼太・篠原雅尚・酒井慎一・蔵下英司・西村卓也・太田雄策・木下陽平・宮崎真一・後藤忠徳・笠谷貴史・吉村令慧・田中愛幸・宮澤理稔・荒木英一郎・森下知晃・鹿兒島渉悟・石山達也・立石良・安江健一・廣内大助・松多信尚・宍倉正展・岩田知孝・浅野公之・大堀道広・村田晶・石川浩一郎・山岸邦彰・須田達・山崎新太郎・青木賢人・林紀代美・武田公子・田中純一・井口克郎・佐々木大輔・原裕太・吉田浩・松本聡・江本賢太郎・山中佳子・勝俣啓・前田拓人・石瀬素子・古谷元・小林俊一・高原利幸・金澤伸一・保坂吉則・王功輝・ト部厚志・片岡香子・高清水康博・永松伸吾・由比政年・犬飼直之・榎田真也・有田守・馬場俊孝・二宮順一・郷右近英臣・林豊・多々納裕一・梶谷義雄・中山晶一郎・藤生慎, 2024, 2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査その1, 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集 61 1-16, <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/290615>.
- 船曳祐輝・宮澤理稔 2024, 光ケーブル直下で観測された地震のDASによる震源メカニズム推定, JpGU, STT36-06
- 大舘未来, 太田雄策, 三井雄太, 2024, 2024年能登半島地震の地震後地殻変動における粘弾性緩和と余効すべりの寄与-超稠密 GNSS 観測網による検証-, 日本測地学会第142回講演会, 42.
- 岡田知己・2024年能登半島地震陸域余震観測グループ, 2024, 令和6年能登半島地震について

- (序報) (4) 能登半島北東部の地震波速度構造と震源分布との関係, 地震予知連絡会会報, 112, 693-696, https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/11_11.pdf
- Matsumoto, R. & Yoshida, K, 2024, Quasi-Real-Time Earthquake Relocation and Monitoring in the Northeastern Noto Peninsula, *Earth, Planets and Space* volume 76, 131, <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02079-4>
- Miyazawa, M., 2024, Inclined bending seismic reflection layer in the crust illuminated by distributed fibre-optic-sensing measurements in western Japan, *Sci. Rep.*, 14, 25877, doi:10.1038/s41598-024-77024-2
- 有田上綾香・岡田知己, 2024, 令和6年能登半島地震について(序報)(3)震源域の応力場に基づく各断層モデルの活動の評価, 地震予知連絡会会報, 112, 688-692, https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/11_11.pdf
- Nicolas Paris・伊東 優治・Florent Brenguier・Qing-Yu Wang・Quentin Higuieret・盛 一笑・高木 涼太・内田 直希・岡田 知己・平原 聡・木村 洲徳・酒井 慎一, 2024, 2024年能登半島地震(Mw 7.5)に伴う地震時地震波速度変化, 2024年度日本地震学会秋季大会, S22-06
- 鈴木康弘・渡辺満久, 2024, 令和6年能登半島地震における富来川南岸断層の活動とその意義, 日本惑星科学連合, HDS09-10.
- Tagami, A., Matsuno, M., Okada, T., Sakai, S., Ohzono, M., Katsumata, K., Kosuga, M., Yamanaka, Y., Katao, H., Matsushima, T., Yakiwara, H., Hirahara, S., Kono, T., Hori, S., Matsuzawa, T., Kimura, S., Nakayama, T., 2024. Stress field in northeastern Japan and its relationship with faults of recent earthquakes. *Earth, Planets Sp.* 76, 39. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01986-w>
- 高木 涼太, 吉田 圭佑, 岡田 知己, 2024, 詳細な3次元S波速度構造に基づく先行した群発地震と2024年Mw7.5能登半島地震の関係, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P13
- Takano, S., Y. Hiramatsu, and Y. Yukutake, 2024, The role of fluids in earthquake swarms in northeastern Noto Peninsula, central Japan: insights from source mechanisms, *Earth, Planets and Space*, 76:151. doi:10.1186/s40623-024-02099-0.
- 若尾尚幸, 本山葵, 市來雅啓, 小川康雄, 上嶋誠, 浅森浩一, 内田利弘, 長谷英彰, 小山崇夫, 坂中伸也, 山谷祐介, 相澤広記, Boonchaisuk Songkhun, 海田俊輝, 2024, 東北地方南部広帯域MT観測網から推定した会津・米沢・吾妻地域地殻比抵抗構造, 日本地球惑星科学連合2024年大会
- Yabe. Y., 2025, Humidity dependence of AE activity in sheared quartz gouges and its implication for the micromechanics of friction, *Earth, Planets and Space*, 77:4, DOI: 10.1186/s40623-024-02132-2
- 安池 亮・豊田智大・野田利弘, 2024, 上下負荷面摩擦モデルによるstick-slip現象および非一様なすべり伝播過程の数値解析, 第36回中部地盤工学シンポジウム, 87-94.
- Yoshida, K., 2024, Direct Evidence for Diverse Source Complexity in Small Earthquakes (Mw 3.3-5.0) Obtained from Near-Source Borehole Seismic Data, *Seismological Research Letters* (2024) 95 (4): 2409-2421, <https://doi.org/10.1785/0220230431>
- Yoshida, K., Emoto, K., Takemura, S., Matsuzawa, T., 2024a, Near-Source Waveform Modeling to Estimate Shallow Crustal Attenuation and Radiated Energy of Mw 2.0-4.5 Earthquakes, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(9), e2023JB028523,

<https://doi.org/10.1029/2023JB028523>

Yoshida, K., Takagi, R., Fukushima, Y., Ando, R., Ohta, Y., Hiramatsu, Y., 2024b, Role of a Hidden Fault in the Early Process of the 2024 Mw7.5 Noto Peninsula Earthquake, *Seismological Research Letters*, 51, 16, <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>

Yoshimura, R., Hiramatsu, Y., Goto, T., Kasaya, T., Miyamachi, R., Nakagawa, J., Yamashita, N., Amano, R., Fukata, M., Sugii, A., Inui, T., Yamazaki, K., Komatsu, S., Iwahori, T., Yoshikawa, M., Namigishi, A., Nagaoka, A., Tatsuyama, Y., Sawada, A., Zhang, C., Fukuoka, M., Jinde, Y., Oshima, Y., Kanazawa, M., 2024, Characteristics of the resistivity structure around the earthquake swarm activity leading up to the 2024 Noto (Mw7.5) earthquake, 26th Electromagnetic Induction Workshop, 4P11

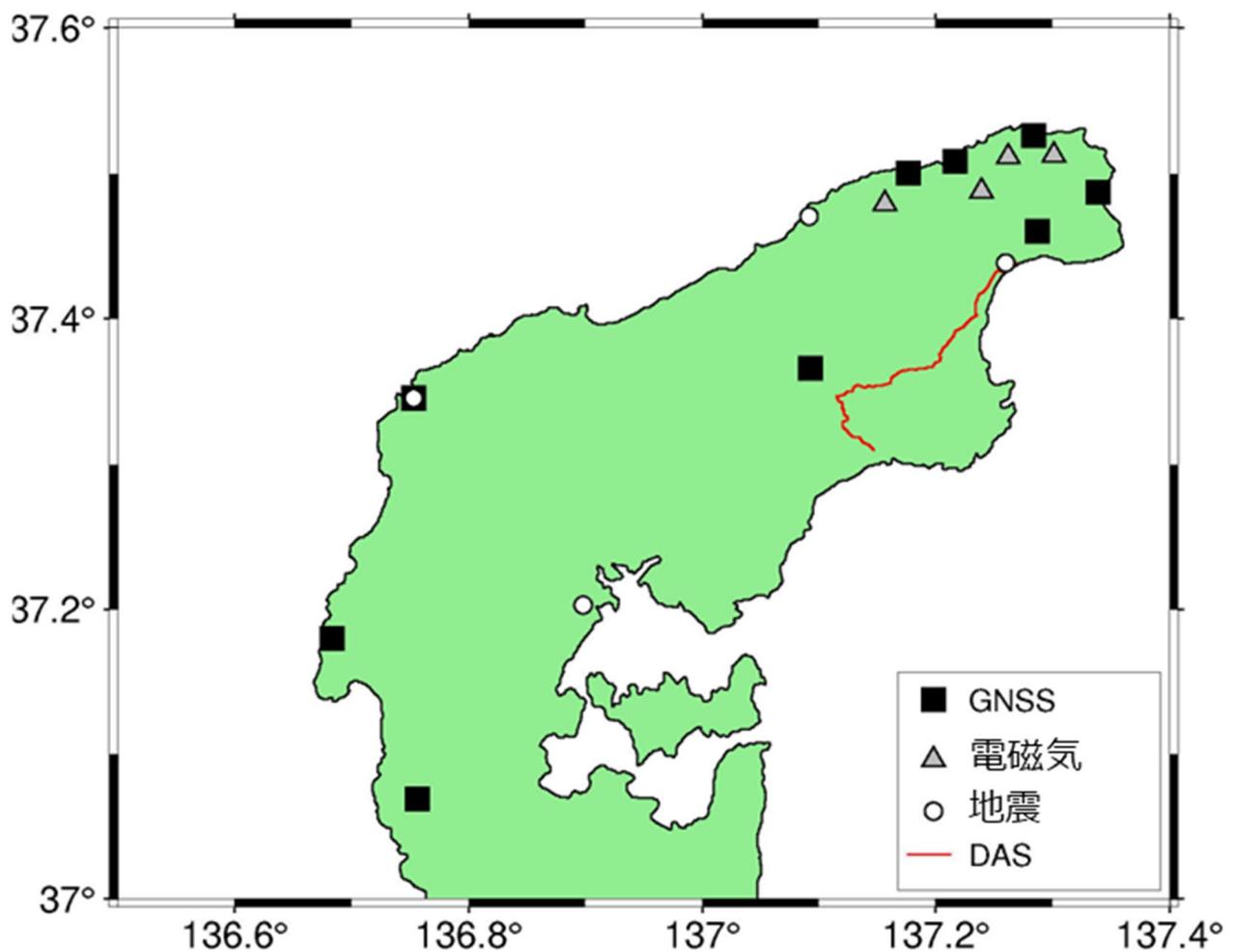
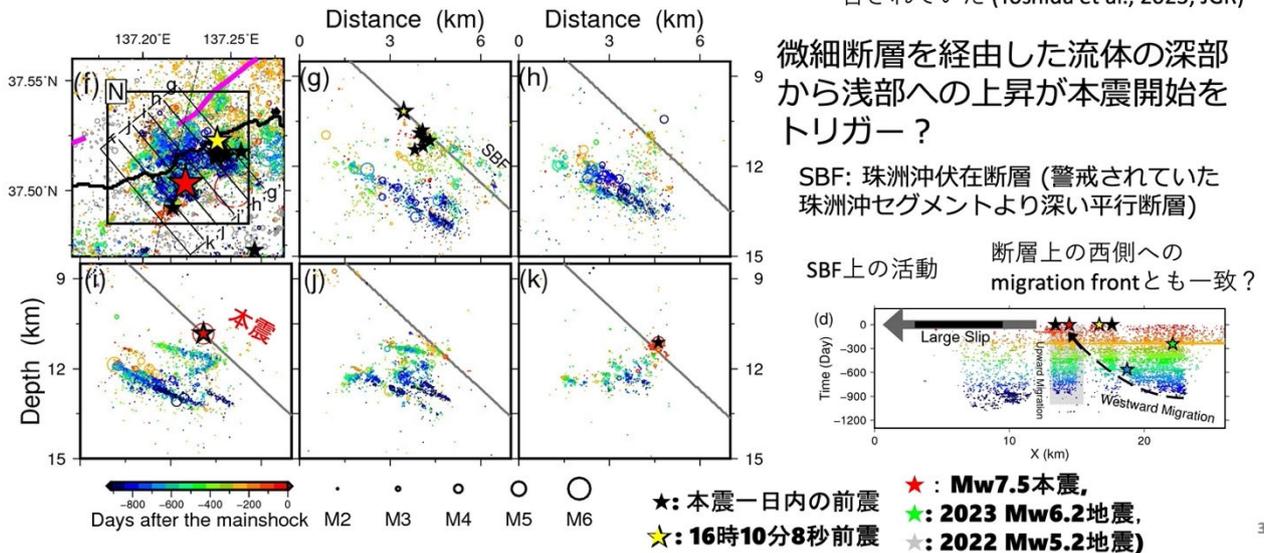


図1. 能登半島における臨時観測点地図 (京都大学防災研究所[課題番号: DPRI10])
令和6年度における本研究課題に関連する臨時観測点。

2024年能登半島地震は、群発地震が微小亀裂を通じて深部から浅部に移動し大断層に浸入した周辺で開始した (Yoshida et al., 2024, GRL)

このマイグレーションは先行研究でも報告されていた (Yoshida et al., 2023, JGR)



微細断層を經由した流体の深部から浅部への上昇が本震開始をトリガー?

SBF: 珠洲沖伏在断層 (警戒されていた珠洲沖セグメントより深い平行断層)

SBF上の活動 断層上の西側への migration frontとも一致?

図 2. 2024年能登半島地震の震源時空間分布

(東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Yoshida et al., 2024b)

計算コストの高い高精度震源再決定を、低計算コスト・準リアルタイムで行うアルゴリズムを作成 (Matsumoto & Yoshida, 2024, EPS)

作成したアルゴリズムによる
準リアルタイム再決定震源分布

単純な時間分割で逐一再決定した震源分布

計算コスト削減のため、波形相関による到達時刻差データを使用した Double-Difference法 (Waldhaue & Ellsworth, 2000)の方程式を修正。

⇒ 気象庁一元化震源と似て、面構造の解像度は低い

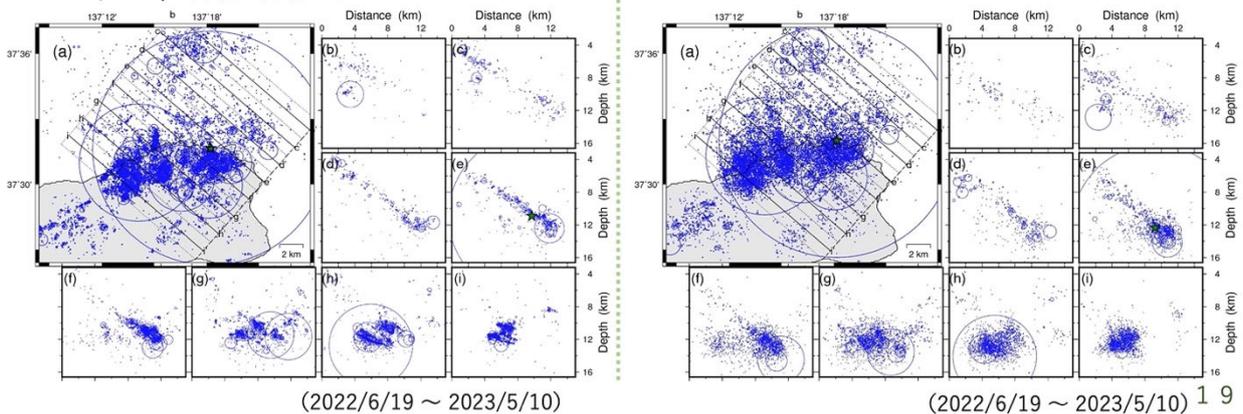


図 3. 準リアルタイム処理による2024年能登半島地震の震源分布

(東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Matsumoto and Yoshida, 2024)

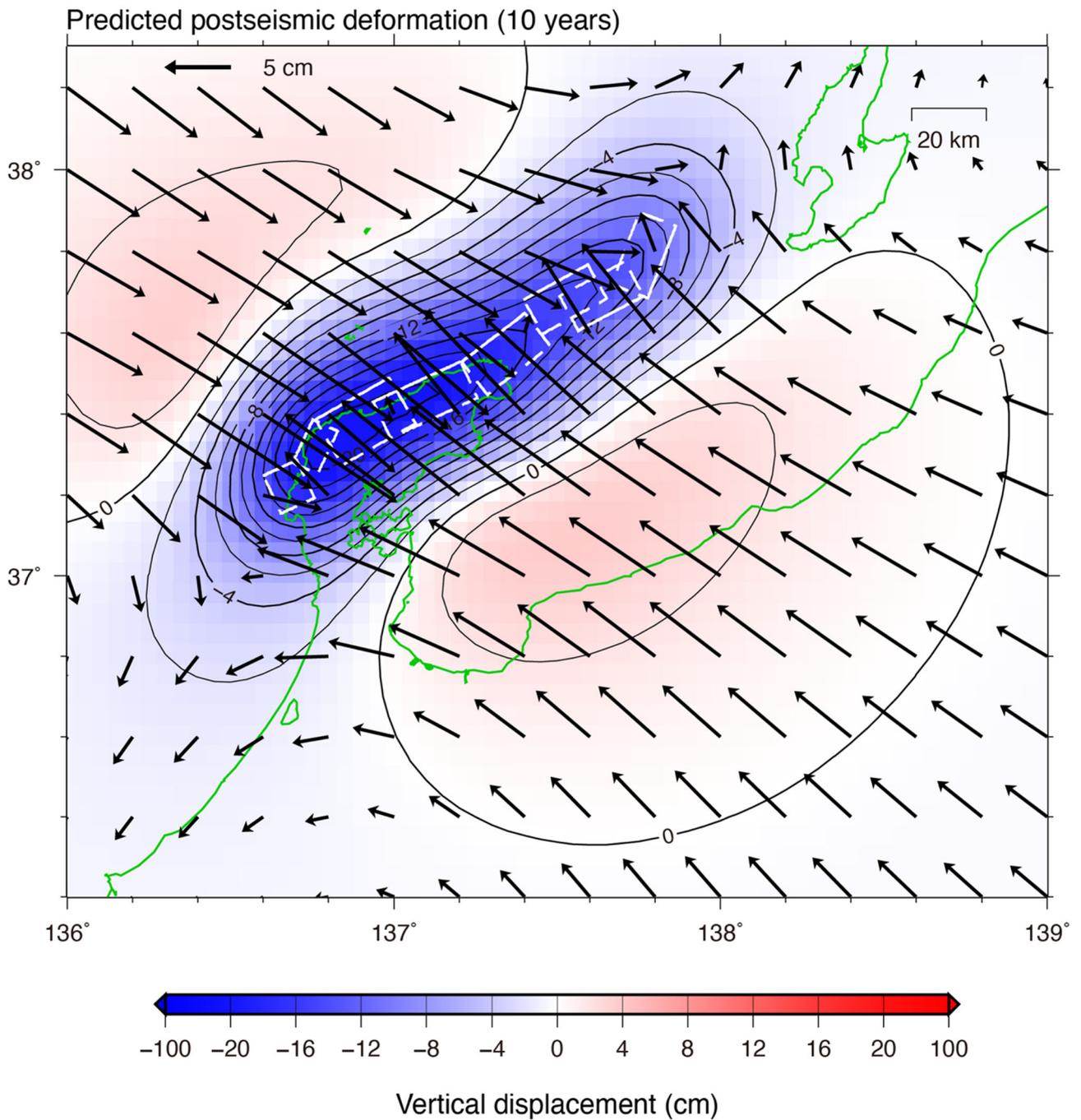
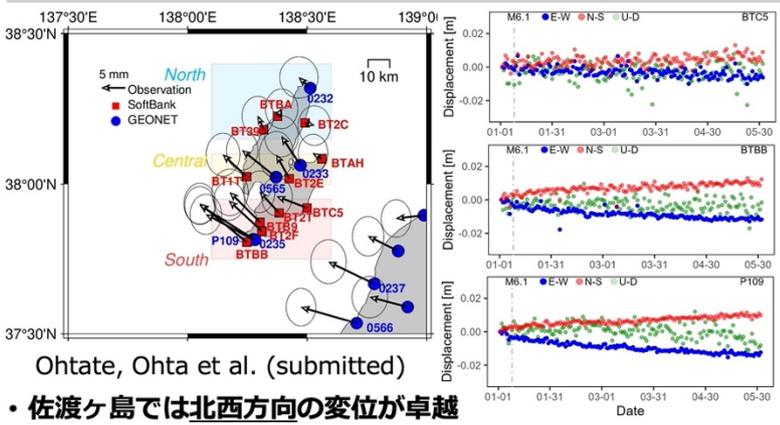


図4. 能登の粘弾性緩和から予測される変動（京都大学防災研究所[課題番号：DPR110]）モデルに基づく10年後の変動の予測。全体的に北西方向への水平変動が見られるほか、地震時に隆起した能登半島北部全体がゆっくりと沈降する。

稠密GNSS観測網に基づく2024能登半島地震後の佐渡島西方沖における余効すべり

1. GNSSデータ | 地震後5か月間 (1/2 ~ 1/6) の余効変動変位

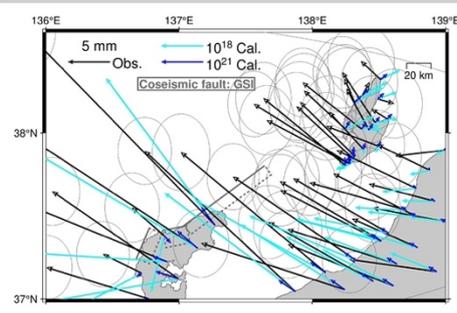


Ohtate, Ohta et al. (submitted)

・佐渡ヶ島では北西方向の変位が卓越

- ・ Gipsy-X Ver. 2.2. による精密単独測位法
- ・ 固定局：
GEONETは0388, P209 1025, SBはBN13, BN7S, BN3Cの平均値
- ・ 定常成分の除去：
地震前の定常期間 (GEONETは2019.1/1 ~ 2021.12/31, SBは2020.1/1 ~ 2022.12/31) の時系列に下記の関数をフィッティング
 $u(t) = at + b + c\sin(2\pi t) + d\cos(2\pi t) + e\sin(4\pi t) + f\cos(4\pi t)$

2. 粘弾性緩和変位の寄与を検証



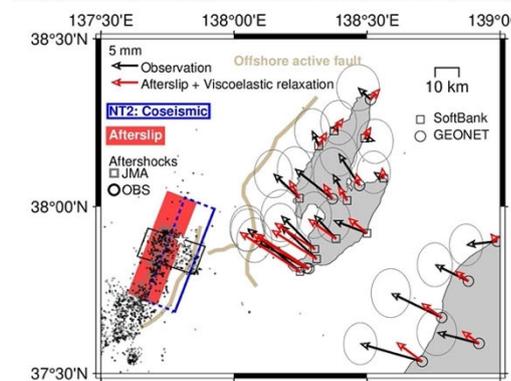
- ・ 下部地殻の粘性率に寄らず佐渡ヶ島における粘弾性緩和変位は北東方向
➢ 粘弾性緩和変位のみでは佐渡島の観測データを説明できない

- ・ 半解析的境界要素法 (Barbot and Fialko, 2010a; Barbot and Fialko, 2010b) を用いて、地震時の断層すべりによる応力擾乱から期待されるマクスウェル粘弾性媒質の緩和を計算
- ・ 上部地殻・下部地殻・マンテルの3層構造を仮定
- ・ マンテルの粘性率は 10^{19} Pa sに固定し、下部地殻の粘性率を変えて計算 (ここでは 10^{18} と 10^{21} Pa · s の場合を示す)
- ・ 剛性率30 GPa, 地殻密度 2.8×10^3 kg/m³, ポアソン比0.25

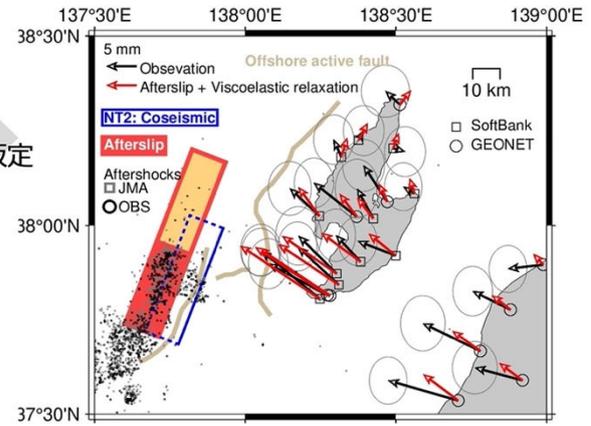
図 5. 稠密GNSS観測に基づく2024能登半島地震後の佐渡島西方沖における余効すべり (1)
(東北大学理学研究科[課題番号: THK_11], 大館・他, 2024)

3. 佐渡ヶ島西方沖における余効すべりの寄与を検証 Ohtate, Ohta et al. (submitted)

地震時滑りの深部延長での余効すべりを仮定



北部でのすべりも仮定



- ・ 観測データと同様の北西方向の変位を再現
➢ 余効すべりの発生を示唆
 - ・ 中部での変位量が観測データと比較して小さい
 - ・ 中央域での観測データを誤差の範囲で説明可能
特に、推定した余効すべりの主要部分は余震が周囲と比較して集中して発生している領域と一致
- ・ Fujii and Satake (2024) による地震時断層モデルの北端パッチであるNT2の断層面を参考にしつつ、その深部延長に余効すべりが生じていたと仮定
 - ・ JMAの震源カタログ□とOBSによる再決定震源○ (Shinohara et al., 2024, 2024.1/24 ~ 2/22, M >= 1.5)
 - ・ 赤で塗りつぶした矩形の地震モーメントはMw換算でMw 6.56、その北部延長のオレンジ色の矩形はMw 6.16

図 6. 稠密GNSS観測に基づく2024能登半島地震後の佐渡島西方沖における余効すべり (2)
(東北大学理学研究科[課題番号: THK_11], 大館・他, 2024)

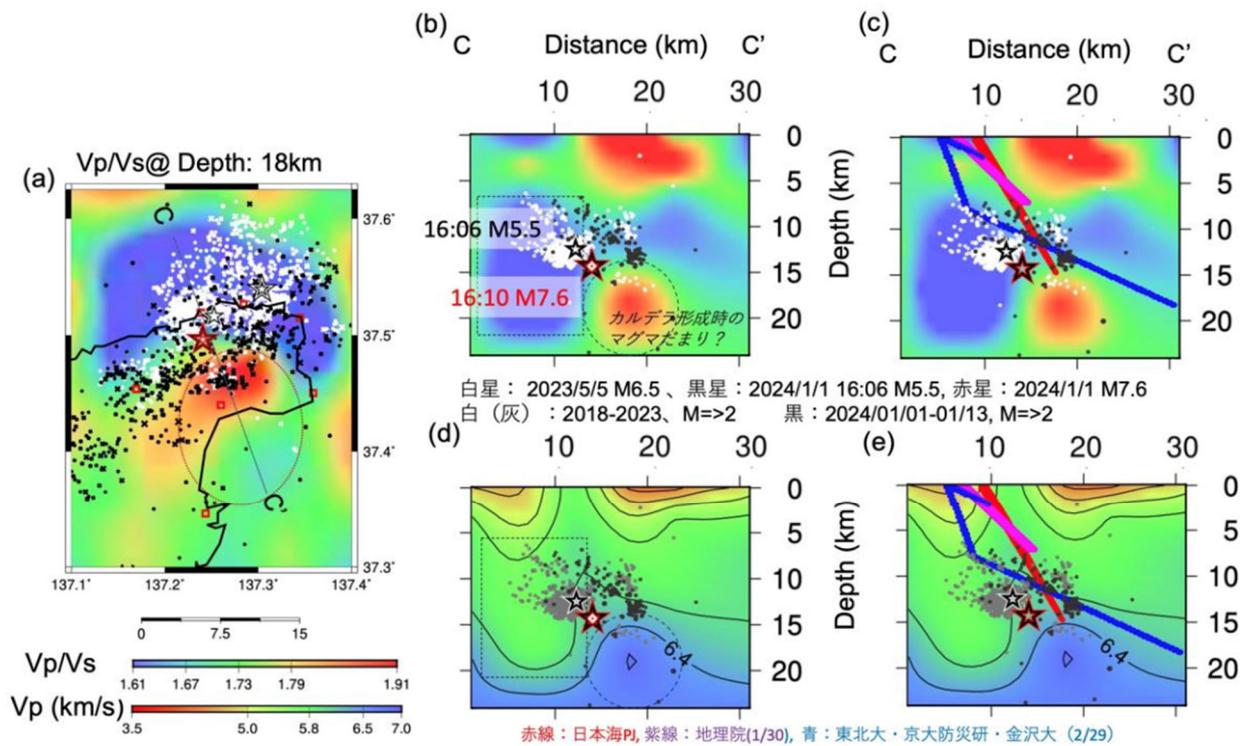


図7. 能登半島北東部の地震波速度構造（東北大学理学研究科[課題番号：THK_11]，岡田・2024年 能登半島地震陸域余震観測グループ，2024，）

(a) 深さ 18km の V_p/V_s 分布。赤点線の楕円は低重力異常域を示す。白星，黒星，赤星はそれぞれ 2023 の M6.5 の地震，2024/1/1 16:06 M5.5 の地震，16:10 能登半島地震の震央を示す。白は M7.6 発生前の地震，黒は 7.6 発生後の地震を示す。(b) V_p/V_s の C-C' 鉛直断面図。破線の丸は高 V_p ，高 V_p/V_s 領域，破線の四角は低 V_p ，低 V_p/V_s 領域を示す。(c) (b) に 3 つの断層モデルを重ねて示す。赤線は日本海プロジェクトによる断層モデル 5)，紫は国土地理院によるモデル（2024/1/30 付）。青は太田・山田（2024）による断層モデルを示す。(d) V_p の C-C' 鉛直断面図。灰色は M7.6 発生前の地震。黒は 7.6 発生後の地震を示す。(e) は (b) に 3 つの断層モデルを重ねて示す。(a) の赤四角は使用した観測点を示す。

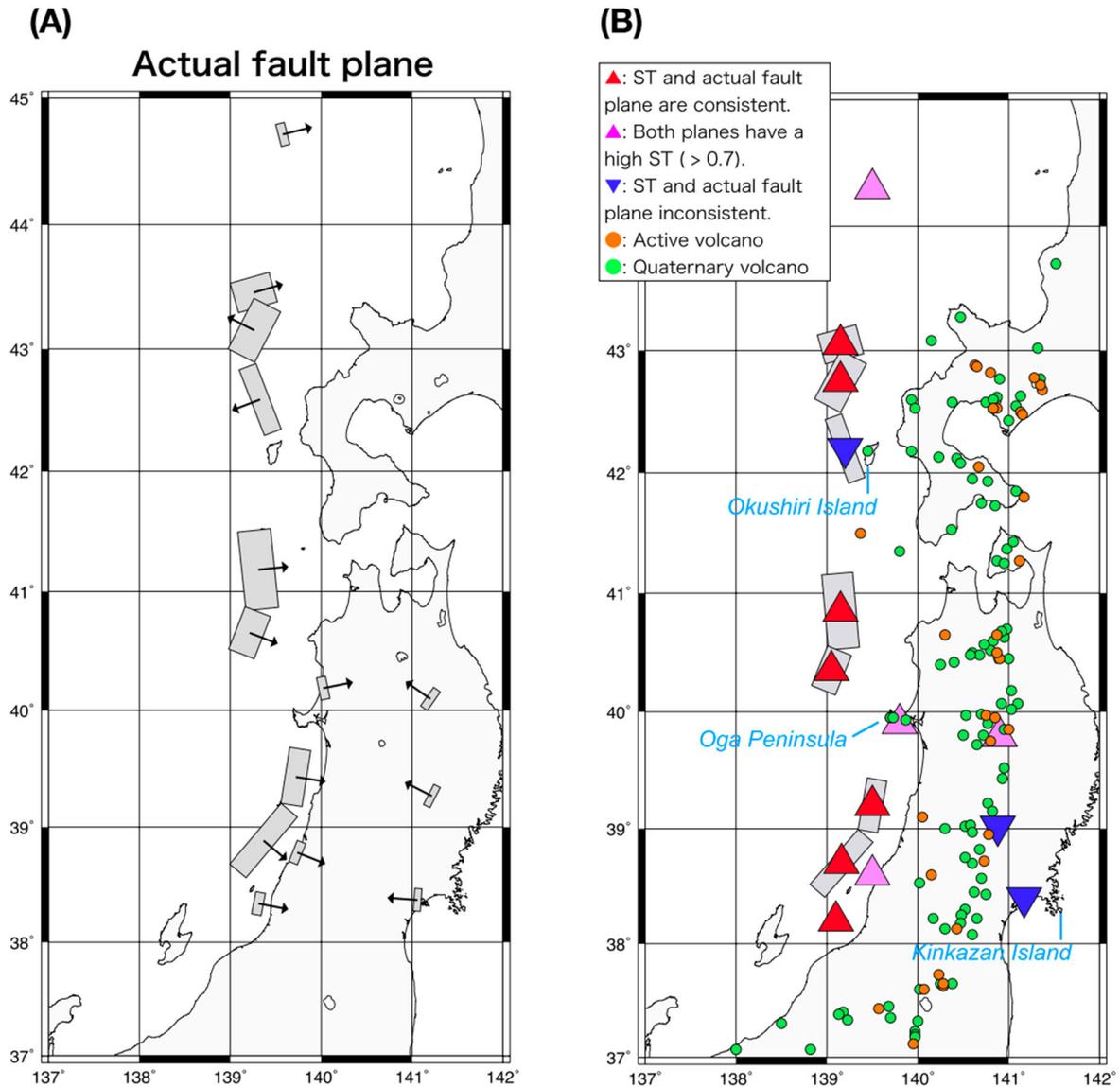


図 8. 日本海東縁地域と東北地方内陸地域における断層面と応力場との関係 (東北大学理学研究科[課題番号: THK_11], Tagami et al., 2024)

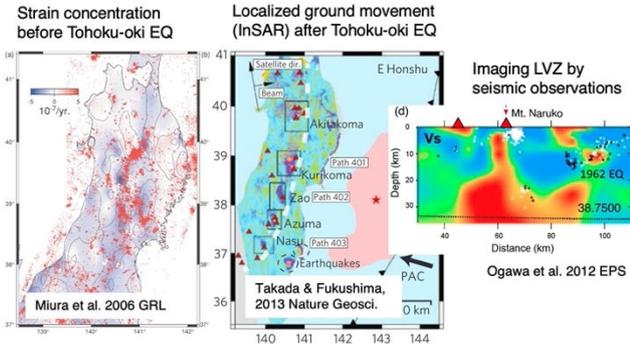
(A) 実際に地震を起こした断層面。矢印は傾斜方向を示す。(B) 赤三角はSlip Tendencyの大きな節面と実際の断層面が合うもの、桃三角はどちらの節面もほぼ同じSlip Tendencyを持つもの、青三角はSlip Tendencyの小さな節面と実際の断層面が合うもの。オレンジおよび緑の小丸は活火山と第四紀火山をそれぞれ示す。

2011年東北沖地震の余効変動からみた、日本東北地方の第四紀火山周辺における低粘性層 (LVZ) の3次元レオロジー推定



背景

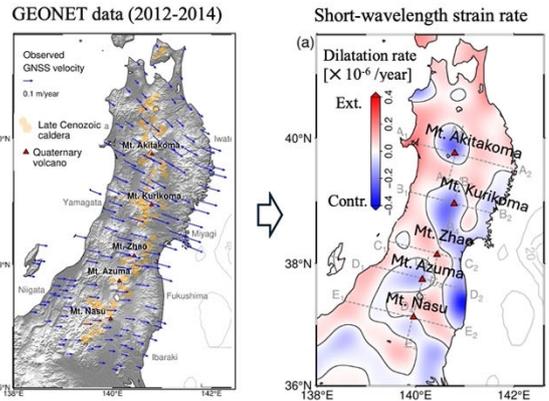
- ・地質学的・地球物理学的研究により、日本東北地方の第四紀火山の地下には低粘性層 (LVZ) が存在することが示唆
- ・LVZは、2011年東北沖地震の前後に局所的な地殻変動を引き起こす可能性



Aim of the study:

5つの第四紀火山 (秋田駒ヶ岳、栗駒山、蔵王山、吾妻山、那須岳) 周辺の低粘性層 (LVZ) のレオロジーを理解

短波長ひずみ速度の計算



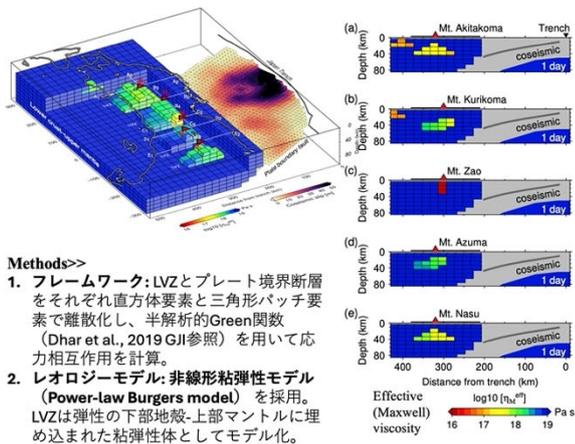
Methods>>
 ステップ1: GNSS速度場を長波長成分と短波長成分に分解。
 ステップ2: 短波長の速度場をShen et al. (1996, JGR) に基づいて歪み速度に変換

・日本東北地方の5つの火山周辺で、約80 km幅の局所的な歪み収縮が確認された。

図9. 2011年東北沖地震の余効変動による3次元レオロジー推定 (1)
 (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11])

LVZレオロジーの3次元数値モデリング

3-D rheological model of LVZ for five volcanoes

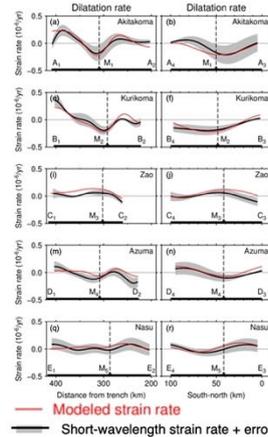


Methods>>

1. フレームワーク: LVZとプレート境界断層をそれぞれ直方体要素と三角形パッチ要素で離散化し、半解析的Green関数 (Dhar et al., 2019 GJI参照) を用いて応力相互作用を計算。
2. レオロジーモデル: 非線形粘弾性モデル (Power-law Burgers model) を採用。LVZは弾性の下部地殻-上部マントルに埋め込まれた粘弾性体としてモデル化。

- 1) LVZは深さ15km付近で狭く (幅20-40 km)、深さ55km付近で広く (幅80-100 km) なる。
- 2) LVZの粘性:
 遷移粘性: 10^{17} Pa s
 定常粘性: 約 10^{18} Pa s
- 3) LVZの形状と粘性の変動は、火山フロントに沿った弧に平行なレオロジーの不均質性を示唆

Modeled strain rate explains short-wavelength strain rate



3次元LVZモデルの重要性

Cenozoic (新生代) のカルデラ分布および熱流量の分布と整合性を示す。短波長の歪み速度の観測結果と整合する。

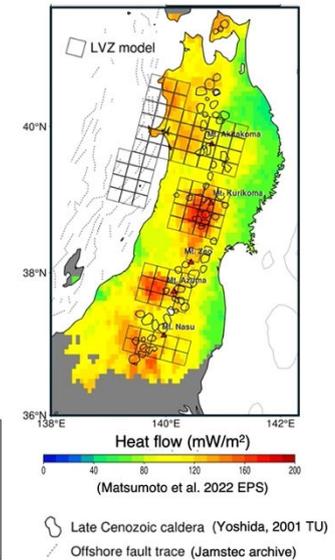


図10. 2011年東北沖地震の余効変動による3次元レオロジー推定 (2)
 (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11])

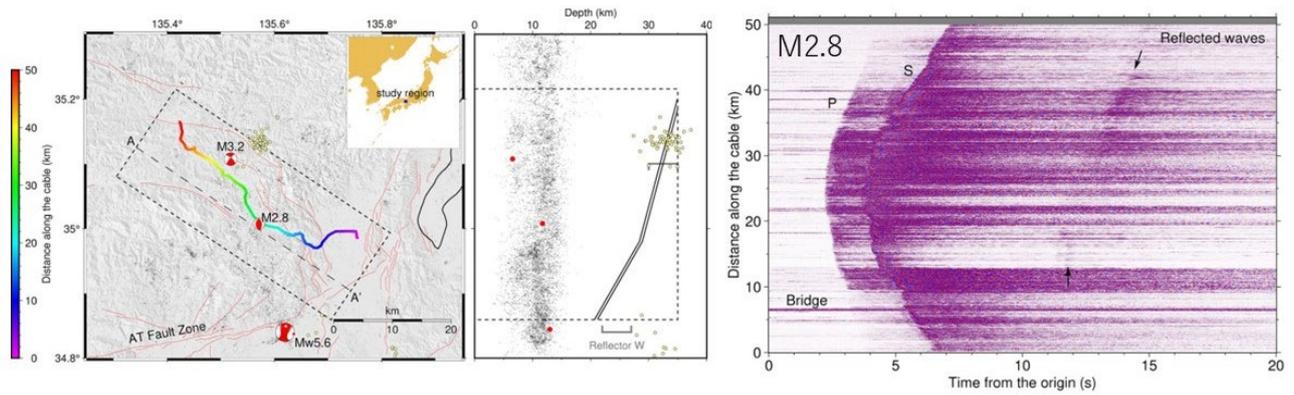
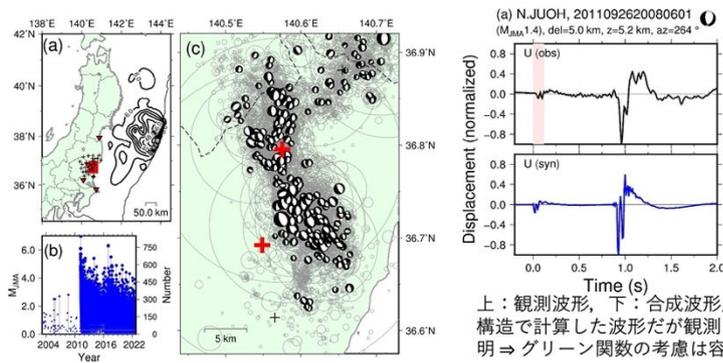


図11. 京都国道9号のDAS観測による地下構造推定（京都大学防災研究所[課題番号：DPRI10]）
 京都国道9号沿いの光ケーブル（左図）を利用したDAS観測によってとらえられたM2.8地震の記録（右図）。後続波として下部地殻からの反射波が記録されており、屈曲しながら北傾斜する低速度の反射帯（中図）によるものと考えられる。

近地地震波形の時間積分に基づき、直接的に中小地震 (Mw3.3-5.0)地震の破壊過程の複雑性・多様性を明らかにした (Yoshida, 2023, SRL)

オメガ二乗モデルなどの単純な Source model (e.g., Brune, 1970)ではモデル化できない中小地震が少ないことを示唆。

茨城県北部の Hi-net観測点における高品質（速度）波形：
 近傍で大量の地震が発生 & 硬い岩盤に囲まれたポアホール観測点



上：観測波形，下：合成波形。単純な構造で計算した波形だが観測をよく説明 ⇒ グリーン関数の考慮は容易。

70個の地震の変位波形 (元記録の時間積分)

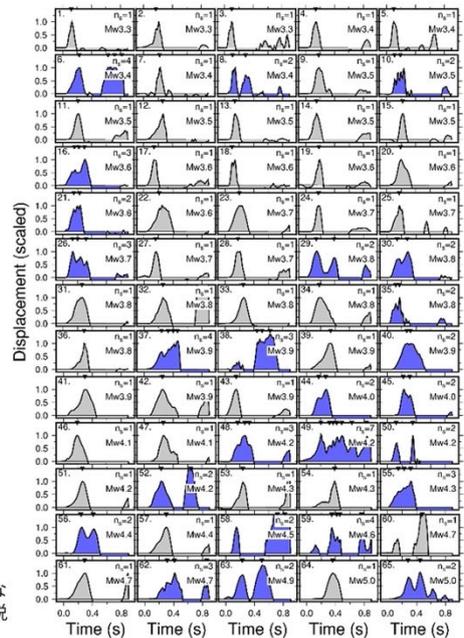
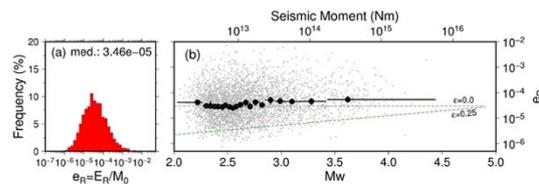
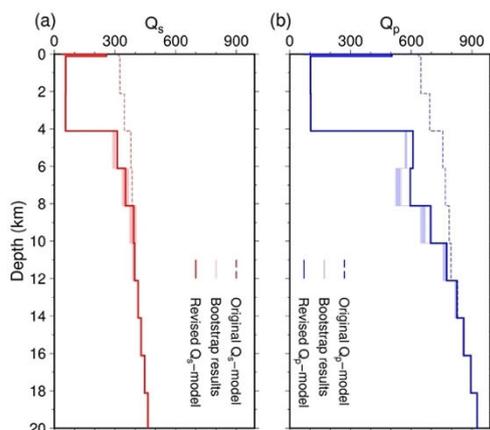


図12. 中小地震の破壊過程の複雑性と多様性
 （東北大学理学研究科[課題番号：THK_11], Yoshida, 2024）

近地波形と合成波形の比較により、地殻浅部の減衰を評価。深さ 4 km に、従来考えられていたよりも強い減衰を検知 (Yoshida et al., 2024, JGR).



適切な Q を用いることにより、中小地震に対して大地震と同程度の scaled energy を得た (上段)。経験的関係をそのまま用いた場合には、小地震の放射エネルギーを大きく過小評価してしまう (下段)。

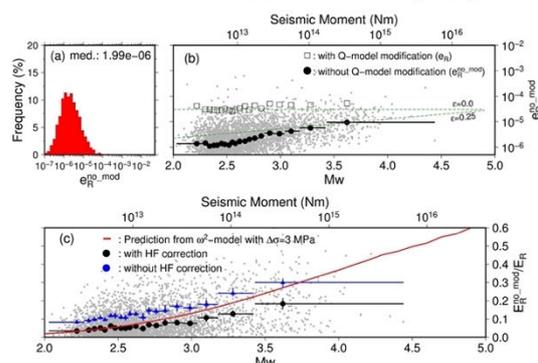


図13. 地殻浅部の減衰構造評価 (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Yoshida et al., 2024a)

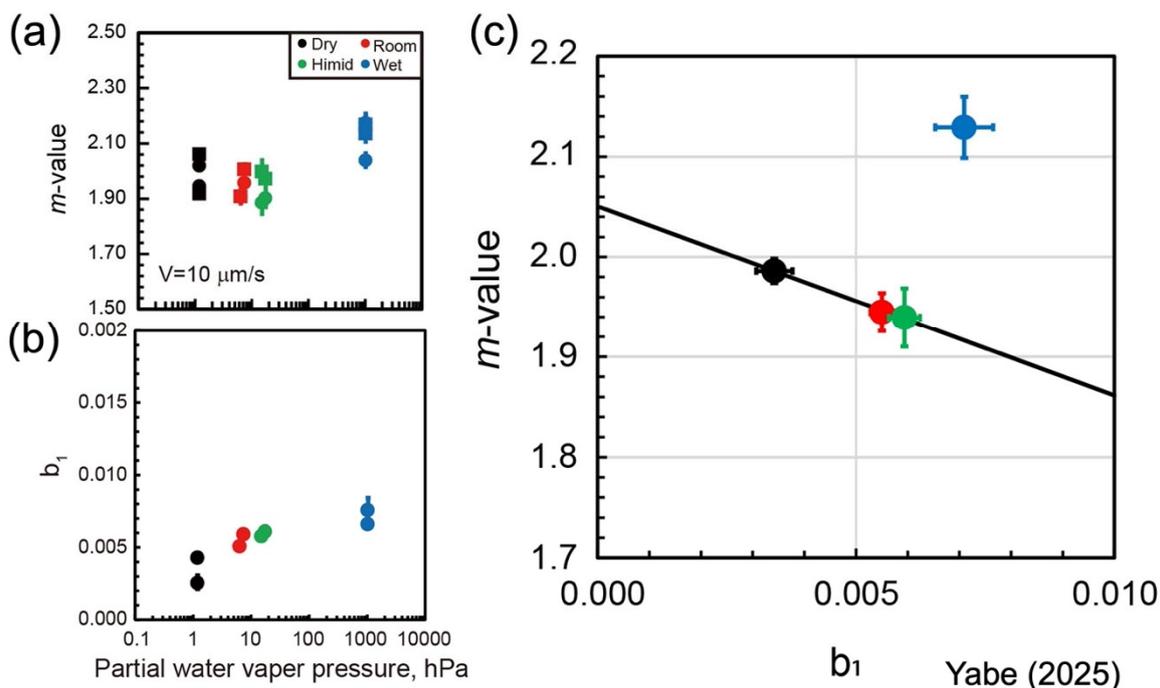
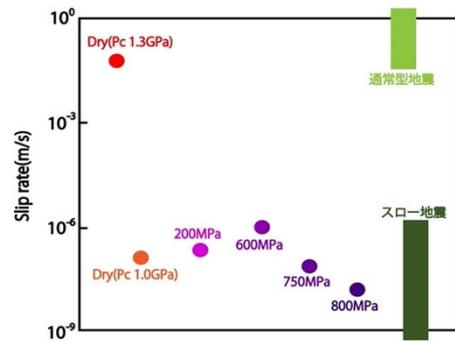
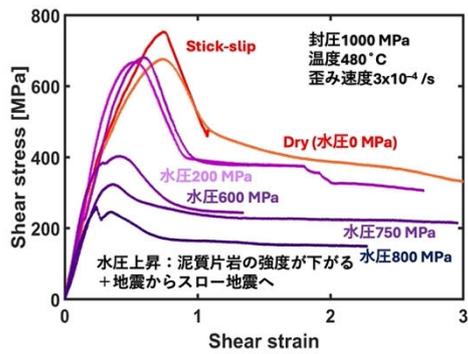


図14. 摩擦特性に対する間隙水の影響 (東北大学理学研究科 [課題番号: THK_11], Yabe, 2024) (a) 石英ガウジの摩擦すべりに伴うAEの m 値と (b) ガウジ内の真実接点の強度回復率 (速度状態依存摩擦則の発展項) b_1 の湿度依存性。湿度は水蒸気分圧で評価し、飽和濃度 (Wet) の水蒸気分圧は1013hPaとした。(c) AEの m 値と b_1 の関係。水が気相 (水蒸気) で存在しているときは m 値と b_1 は負の相関 (相関係数 -1) を示すが、液相の水があると、両者の関係は顕著に異なる。



臨界破壊サイズ: 物質の摩擦特性と弾性特性による。

$$L_c = \frac{GD_c}{(1-\nu)(b-a)(\sigma_n - \alpha P_p)}$$

今年度は深部スロー地震発生域に存在すると考えられる泥質片岩の高温高压変形実験をおこなった。実験条件は温度480°C、封圧1000MPaと1250MPa、歪み速度 3×10^{-4} /s、間隙水圧は0 MPa (乾燥条件)から800 MPaである。間隙水圧の上昇とともに泥質片岩の強度は減少し、ピーク応力から定常応力にいたる応力降下速度も減少した。

来年度は、より幅広い有効圧力下での泥質片岩の高温高压変形実験をおこなう予定である。特に高封圧下 (>1250 MPa) や高間隙水圧下 (>900 MPa) での変形実験を実施する予定である。高温高压下での岩石の変形挙動を理解することにより、地球内部で発生している多様な断層すべり挙動についての理解を深めたい。

図15. 深部スロー地震発生域に存在すると考えられる泥質片岩の高温高压変形実験 (東北大学理学研究科[課題番号: THK_11])