

(1) 実施機関名：

東北大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）東北地方をはじめとした沈み込み帯で発生する内陸地震の総合的研究

（英文）Comprehensive study on inland earthquakes occurring in subduction zones, including the Tohoku district

(3) 関連の深い建議の項目：

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

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 史料・考古・地形・地質データ等の収集と解析・統合

ア. 史料の収集・分析とデータベース化

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

(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

イ. 内陸地震

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解とモデル化

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

4 地震・火山噴火に対する防災リテラシー向上のための研究

(2) 地震・火山噴火災害に関する社会の共通理解醸成のための研究

6 観測基盤と研究推進体制の整備

(1) 観測研究基盤の開発・整備

イ. 観測・解析技術の開発

(5) 本課題の5か年の到達目標：

内陸やプレート境界上盤・日本海東縁地域で発生する地震の長期評価・強震動予測への貢献や地震活動の推移予測を目指し、活断層（大規模地震）や群発地震を対象とした多項目観測・研究を実施する。「都市圏・生活圏における活断層等で発生する地震や過去の被害地震」、「群発地震などの近年活発な地震活動が見られる地域」、「東北沖地震などプレート境界大地震前後のその影響を大きく受ける時期の活動」について、文理融合の視点を含めて、総合的な観測研究を実施する。「都市圏・生活圏における活断層等で発生する地震や過去の被害地震」として、特に、東北中南部（A地域）を重点的に取り組む地域とする。具体的にはA-1(長町・利府線断層帯～双葉断層帯～福島盆地西縁断層帯・会津盆地東縁/西縁断層帯～長井盆地西縁断層帯を含む領域；例：双葉断層帯北端付近)及びA-2（岩手県南部～宮城県北部にかけて2008年岩手・宮城内陸地震を含む領域；例：北上低地西縁断層帯南部及びその周辺）とする。断層帯端や境界に注目し、断層延長部や接続部での連続性・セグメンテーションとそれらの原因について、浅部構造探査等により得られる断層像と地球物理学的に得られる地殻全体の構造を合わせて全体像を明らかにする。各研究結果を反映させて対象領域内のシナリオ地震の構築とそれに基づくハザード（強震動）評価を行い、歴史地震とその被害も踏まえつつ、ハザード（強震動）評価や被害事例の社会との共有による被害想定的高度化や防災リテラシー向上への活用の方策に

について検討を行う。

「群発地震などの近年活発な地震活動が見られる地域」は、B地域（東北地方、関東地方などの各群発地震活動域；例：山形・福島県境付近、茨城県北部～福島県南東部付近、栃木県北部）を重点的に取り組む領域とする。各地域の活動の理解の高度化とそれらの相互比較により、応力・地殻内流体・断層（弱面）などの群発地震の推移を支配するプロセスの解明を行い、群発地震が発生する場所の特徴を抽出する。また、群発地震活動が大規模地震に発展する事例の理解のため、群発地震活動と周辺の大規模断層帯等との関係（構造の連続性など）を明らかにする。

A,B両地域及び広域共通の課題として、「東北沖地震などプレート境界大地震前後のその影響を大きく受ける時期の活動」の理解や地殻深部から浅部地震発生域への流体供給路の解明を進め、災害軽減のための基盤となる地震発生場の理解のため、東北地方を始めとした沈み込み帯の内陸地震等の全体像を示す。

#### (6) 本課題の5か年計画の概要：

長町・利府線断層帯～双葉断層帯～福島盆地西縁断層帯を主要な対象とし、震源断層のシナリオ化、地盤構造と合わせた強震動評価に基づく脆弱性の抽出、対象断層帯周辺自治体の防災計画における課題解決に向けて、以下の4つのサブテーマについて、テーマ間の密接な連携のもと、研究を実施する。

##### 1) 活断層などで発生する大規模地震の発生ポテンシャル評価や地震シナリオ構築

これまでなされた研究、例えば、2008年岩手・宮城内陸地震で見られたような地震発生層内の地震波速度高速度域や地震発生層下の地震波速度低速度域の広がりや震源域との広がりとの関係など、発生したM7クラス等の大規模地震の詳細を調べるとともに、その知見を踏まえ、注目すべき活断層帯や発生した大規模地震及びその周辺等での地震発生ポテンシャル評価を行う。これまで評価されている活断層帯の長さやセグメンテーションについて、浅部構造探査・高密度地震観測/電磁気探査/地殻変動観測からなる、多項目観測により検証を行う。断層浅部の分岐やダメージゾーンなどの幾何学的構造と挙動、内陸活断層における地震発生層内での断層の端や複数の断層の連続性、地震発生層下部を含む断層への応力ひずみ蓄積の高精度把握を行う。地域史料群を活用した地形復元による歴史地震災害の詳細な実態解明を行い、構造や震源分布の比較による震源の描像を行う。断層及びその周囲の構造や応力の不均質性及びその意味を明らかにするとともに、地震の放射エネルギー・破壊パターンの複雑性と地震発生テクトニクスとの関係を踏まえ、対象とする活断層帯や領域でのシナリオ地震の提案と地盤構造の精緻化による強震動予測の高度化を目指す。歴史地震による被害の解明とあわせ、将来発生が予測される災害（リスク）について、その予防や防災意識の啓発による被害軽減への方策について検討を行う。

##### 2) 群発地震などの地震活動の推移予測に向けた理解の高度化

東北沖地震後に発生した内陸の群発地震などを対象に、詳細な震源分布・地震波速度・速度異方性・比抵抗構造などの推定や物質科学的研究により、発生場の理解をさらに進める。群発地震や前震活動の背景地震活動度は、地震活動推移の把握・予測のための鍵となる地殻内の応力変化・流体圧変化・非地震性滑りに関する貴重な情報源となる。推定した背景地震活動度のモニタリング及びモデリングに基づき、地震活動の推移の把握・予測を試みる。また、群発地震活動を端緒とした大規模地震の発生の理解のため、群発地震活動と周辺の断層等との関係を明らかにする。

##### 3) 東北沖地震前後の地震活動や地殻変動のモニタリングと数値モデルによる再現及び予測

東北日本沖合から内陸域までの応力場・断層構造の全体像の解明及び東北沖地震の余効変動の詳細な理解と余効変動により変化する地震活動評価を目的とした、観測・実験・モデルからなる総合研究を実施する。東北沖地震との比較として、プレート境界大規模地震である1611年慶長地震や1896年三陸地震津波などの前後の内陸等の地震活動についても検討を行う。

##### 4) 上記に関わる物理・化学的素過程を明らかにする研究

応力や流体圧の時空間変化・地震発生に関与した流体量と流体の移動速度について、さらに地震発生層内やその深部での非弾性変形に与える水の影響について、物理的・物質科学的視点で研究を行う。弾性や摩擦係数に異方性が認められる環境が応力インバージョンに与える影響を実験的に評価する。年次計画：2024年度～2028年度にわたり各研究を随時実施する。地震観測については、第2次計画において整備した臨時観測網を継続し、新たな地震活動域や観測点の空白域に新たに臨時観測網を整備する。加えて、短期稠密観測を双葉断層北部等、各地域で実施する。2024年度は能登半島地震震源域を対象とした稠密地震観測を各大学との合同観測として実施する。2027年度には双葉断層北部等に

においてDASを用いた超稠密観測を実施する。比抵抗構造探査については、2024~2027年の4年間に双葉断層北部や山形県-福島県県境付近等を対象とした稠密探査を行う。浅部重力構造探査については、現計画で実施した双葉断層帯の検討を進めるとともに、同様の脊梁および前弧側の活断層の理解を深めるため、北上低地西縁断層帯南部の出店断層及びその南側の一関-石越撓曲線に至る活断層について、2024~2025年度に、既存の反射法地震探査測線に沿って探査を実施することにより、正断層構造と重力異常の対応を確認したのち、2026~2028年度に、岩手県一関市付近に複数の東西測線を設定して探査を実施する。以上の知見を踏まえた、震度等の評価・予測を、双葉断層北部などで行う。得られた評価・予測を適切に社会と共有するための手法構築のため、対象となる断層等の周辺の自治体において、2025年度に既存の強震動予測地図の理解を測り本課題で提示する評価及び予測の情報を適切なものとするとともに2028年度に提示する情報の共有の有効性の確認を、それぞれアンケート調査により実施する。

## (7) 令和6年度の成果の概要：

### ・今年度の成果の概要

#### 1. 能登半島地震に関する成果

##### 1-1.余震分布や先駆的活動の震源分布

- ・2024年能登半島地震が、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ことを示した (Yoshida et al., 2024, GRL)。 (図1-2)
- ・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 (Matsumoto & Yoshida, 2024, EPS) (図1-2)

##### 1-2.断層モデルおよび余効変動 (図1-3, 1-4)

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。

##### 1-3.震源域の応力場と断層の滑りやすさの関係 (田上・岡田、2024等)

2024年能登半島地震 (M 7.6) 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。M 7.6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、M 7.6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。

##### 1-4.震源域陸域のS波スプリッティングと地震波速度構造 (岡田・2024年能登半島地震陸域余震観測グループ、2024；高木・他、2024等)

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Vp, (低Vs,) 高Vp/Vs領域が確認できる。また震源域付近は低Vp, 低Vp/Vsとなっている。高Vp, (低Vs,) 高Vp/Vs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<sub>2</sub>が濃集した低Vp, 低Vp/Vsの領域が示唆される。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ーを適用し、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。

##### 1-5.地震に伴う地震波速度構造の時間変化 (Paris et al., 2024)

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なった。

#### 2. 東北地方における成果

## 2-1.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 (Yoshida, 2023, SRL). (図2-1)

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 (Yoshida et al., 2024, JGR). (図2-2)

## 2-2.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滑りやすさとの関係 (Tagami et al., 2024)

日本海東縁地域の断層は応力場に対して滑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滑りにくい面であるが高間隙圧流体により滑りを起こしている可能性を指摘した。

## 2-3.浅部構造の把握に基づく断層の描像の高度化 (岡田真介・他、「内陸で発生する被害地震」2024年度研究集会で報告)

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・精査を行なっている

## 2-4. 東北地方南部の比抵抗構造 (若尾・他, 2024等)

山形-福島群発地震域を含む広域的な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。

## 2-5.2011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 (図2-3, 2-4)

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幅の局所的な歪み収縮が確認された。

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。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、短波長の歪み速度の観測結果と整合する。

## 2-6. 泥質片岩の強度・すべり速度と間隙水圧との関係 (図2-5)

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℃、封圧1000MPaと1250MPa、歪み速度 $3 \times 10^{-4}$  /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。

## 2-7. 摩擦特性に対する間隙水の影響

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 (Yabe, 2025) .

## 3. 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。

2024年青森県陸奥湾の地震に関しては、青森県からの要望を受けて、仙台管区気象台と共同で、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気象

台・管区気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。仙台管区気象台との定期的な意見交換はメール等で月1回程度に加え、対面で年3回実施することで今年度から開始した。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。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望  
総合的研究グループ「内陸で発生する被害地震」の主要課題の一つとして、本計画に従い、研究成果を得ている。能登半島地震については詳細な震源分布・余効変動・震源域の地震波速度構造・応力場・地震波異方性構造、等を得ており、能登半島地震の理解に貢献している。

(8) 令和6年度の成果に関連の深いもので、令和6年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

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, 査読有, 謝辞有

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>, 査読有, 謝辞有

Yoshida, K., Emoto, K., Takemura, S., Matsuzawa, T. (2024), 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>, 査読有, 謝辞無

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>, 査読有, 謝辞無

Yoshida, K., Takagi, R., Fukushima, Y., Ando, R., Ohta, Y., Hiramatsu, Y. (2024), 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>, 査読有, 謝辞無

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](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/11_11.pdf), 査読無, 謝辞無

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](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/11_11.pdf), 査読無, 謝辞無

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>, 査読有, 謝辞有

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・卜部厚

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>., 査読無,謝辞有

・学会・シンポジウム等での発表

Keisuke Yoshida, 2024, The 2024 Mw7.5 Noto Peninsula, Japan, Earthquake initiated in Fluid-Driven Swarm Activity, Seismological Society of America 2024 Annual Meeting

吉田圭佑, 高木涼太, 福島 洋, 安藤亮輔, 太田雄策, 内田直希, 平原 聡, 木村 洲徳, 岡田知己, 日野亮太, 酒井慎一, 平松良浩, 松本聡, 2024, 2024年Mw7.5能登半島地震の震源断層において数年間継続した微小地震のマイグレーションと本震の発生過程, 日本地球惑星科学連合2024年大会.

吉田圭佑, 2024, 地殻流体の移動に関して発生したと考えられる近年の日本の内陸地震, 日本地球惑星科学連合2024年大会.

Keisuke Yoshida, 2024, Rupture Initiation of the 2024 Mw7.5 Noto Peninsula, Japan, Earthquake that Occurred within a Complex Fault Network, International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes.

Keisuke Yoshida, 2024, Earthquake Swarms in Japan Triggered by Upward Fluid Migration following the 2011 M9 Tohoku Earthquake and the 2024 Mw7.5 Noto Peninsula Earthquake, International Workshop on: Swarm-like Seismicity ...What We Know, What We Don't Know, and What We Need to Learn.

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, 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

岡田知己, 2024, 「内陸で発生する被害地震」総合的研究グループ, 第43回日本自然災害学会学術講演会, スペシャルセッション2 「分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究 -災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第3次)での取り組み-」.

岡田 知己・Martha Savage Martha・高木 涼太・吉田 圭佑・松本 聡・江本 賢太郎・山中 佳子・勝俣 啓・前田 拓人・石瀬 素子・酒井 慎一・宮澤 理穂・寺川 寿子・大園 真子・八木原 寛・今西 和俊・内田 直希・田上 綾香・藤村 遼太郎・平原 聡・木村 洲徳・澁谷 拓郎・野田 博之・西川 友章・長岡 愛理・船曳 祐輝・平松 良浩, 2024a, 2024年能登半島地震震源域陸域のS波スプリッティングと地震波速度構造, 2024年度地球惑星科学連合大会, U15-P52

岡田 知己・Martha Savage・田上 綾香・藤村 遼太郎・高木 涼太・吉田 圭佑・松本 聡・江本 賢太郎・山中 佳子・勝俣 啓・前田 拓人・石瀬 素子・酒井 慎一・宮澤 理穂・八木原 寛・今西 和俊・内田 直希・平原 聡・木村 洲徳・寺川 寿子・大園 真子・澁谷 拓郎・椎名 高裕・平松 良浩<sup>12</sup>, 2024b, 能登半島地震震源域陸域におけるS波スプリッティングと地震波速度構造, 2024年度日本地震学会秋季大会, S06-05

田上 綾香・岡田 知己・Martha Savage・松澤 暢・藤村 遼太郎・立岩 和也・吉田 圭佑・木村 洲徳・平原 聡・高木 涼太・山田 太介・太田 雄策, 2024, 2024年能登半島地震における応力場に対する断層のすべりやすさの評価, 2024年度地球惑星科学連合大会, U15-P05

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, 024年度日本地震学会秋季大会, S22-06

藤村 遼太郎・岡田 知己・水田 達也・Martha Savage・高木 涼太・吉田 圭佑・酒井 慎一・勝俣 啓・大園 真子・小菅 正裕・前田 拓人・山中 佳子・片尾 浩・松島 健・八木原 寛・木村 洲徳・平原 聡・

河野 俊夫・松澤 暢・田上 綾香, 2024a東北地方の上部地殻におけるS波偏向異方性の起因推定, 2024年度地球惑星科学連合大会, SCG55-P07

藤村 遼太郎・岡田 知己・水田 達也・Martha Savage・高木 涼太・吉田 圭佑・酒井 慎一・勝俣 啓・大園 真子・小菅 正裕・前田 拓人・山中 佳子・片尾 浩・松島 健・八木原 寛・田上 綾香・木村 洲徳・平原 聡・河野 俊夫・松澤 暢, 2024b, 東北地方の上部地殻におけるS波偏向異方性の起因推定(3), 2024年度日本地震学会秋季大会, S06-04

高木 涼太, 吉田 圭佑, 岡田 知己, 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

(9) 令和6年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(10) 令和7年度実施計画の概要:

当初予定通り研究を実施する。

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。ソフトバンク独自基準点データを含めた稠密GNSSデータを活用した高精細なひずみ分布マップの推定を行なう。今後も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。

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。

能登半島地震についても研究を実施する予定である。

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滑り分布・余震分布を規定した地下の不均質構造を明らかにする。

能登半島地震については、アウトリーチ活動として重要な対象である。本課題においても、豪雨災害も含めて地元の復興状況を踏まえつつ、金沢大学や京都大学防災研究所で計画されているシンポジウムやアンケート調査に協力するほか、観測でお世話になっている自治体・地元住民に対する研究成果の報告会を、金沢大学や京都大学防災研究所に協力いただきながら、主体的に実施する予定である。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

岡田知己, 矢部康男, 市來雅啓, 太田雄策, 内田直希, 高木涼太, 吉田圭佑, 中原恒, 武藤潤, 三浦哲

他機関との共同研究の有無: 有

岡田真介(岩手大学), 芝崎文一郎(建築研究所), 土屋範芳(八戸高等専門学校), 福島洋(東北大学災害科学国際研究所), 蛭名裕一(東北大学災害科学国際研究所), 大園真子(北海道大学), 勝俣啓(北海道大学), 山中佳子(名古屋大学), 片尾浩(京都大学防災研究所), 松島健(九州大学), 坂中伸也(秋田大学), 加藤愛太郎(東京大学地震研究所), 臼井嘉也(東京大学地震研究所), 岡崎啓史(広島大学), 北村真奈美(産業総合技術研究所), 朝比奈大輔(産業総合技術研究所)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

電話: 022-225-1950

e-mail: zisin-yoti-aob@grp.tohoku.ac.jp

URL: <https://www.aob.gp.tohoku.ac.jp>

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：岡田知己

所属：東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

## 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)

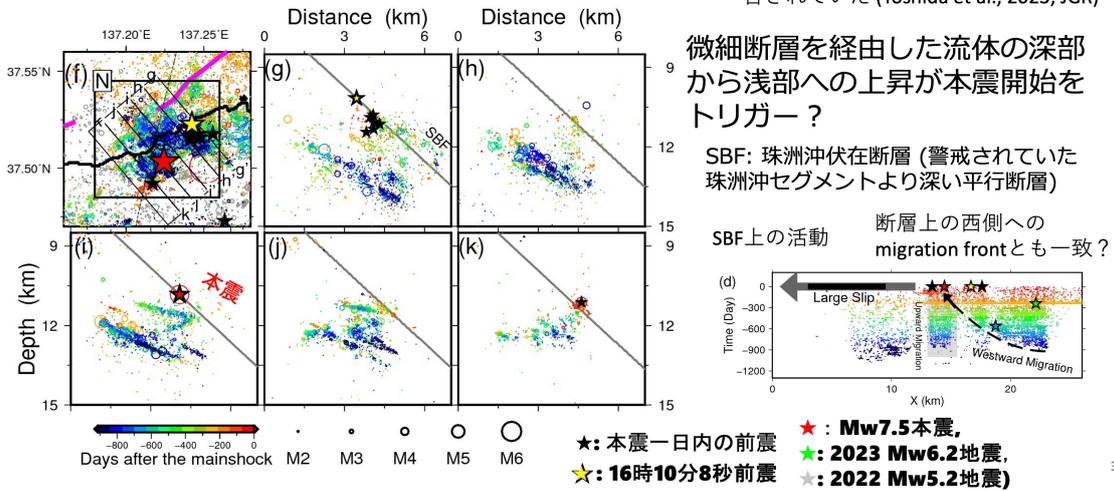


図1-1

## 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

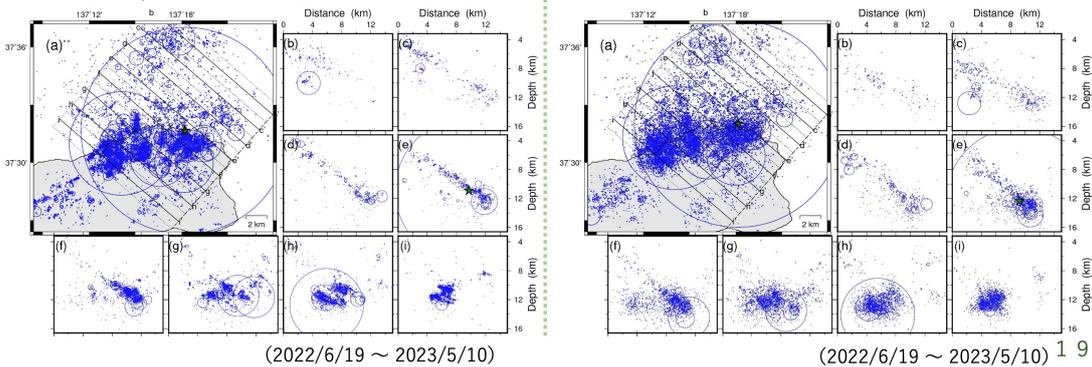
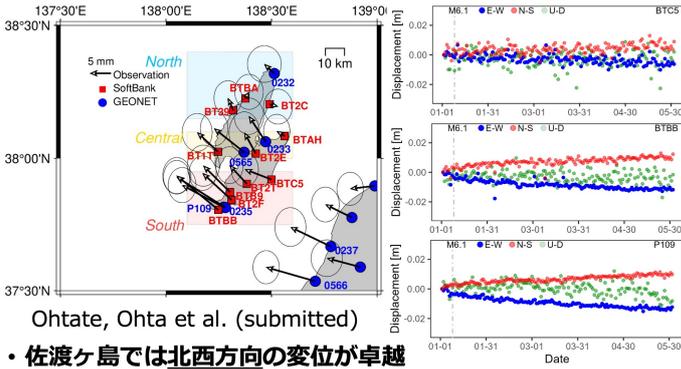


図1-2

同じ領域、同じ期間で、分割せずに通常のDD法で再決定した先行研究のデータをプロットしたものが右図。今回1日ごとに再決定したものの方がややぶれはある。

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

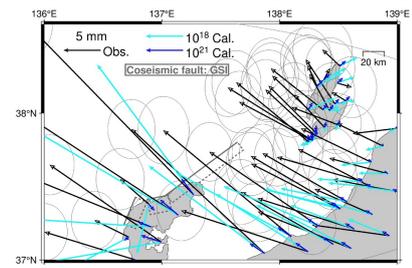


Ohtate, Ohta et al. (submitted)

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

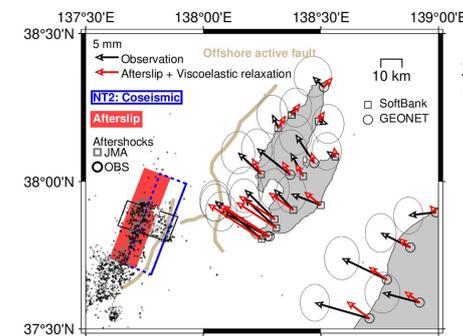
- 半解析的境界要素法 (Barbot and Fialko, 2010a; Barbot and Fialko, 2010b) を用いて、地震時の断層すべりによる応力擾乱から期待されるマクスウェル粘弾性媒質の緩和を計算
- 上部地殻・下部地殻・マンツルの3層構造を仮定
- マンツルの粘性率は $10^{19}$  Pa·sに固定し、下部地殻の粘性率を変えて計算 (ここでは $10^{18}$ と $10^{21}$  Pa·sの場合を示す)
- 剛性率30 GPa, 地殻密度 $2.8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, ポアソン比0.25

図1-3

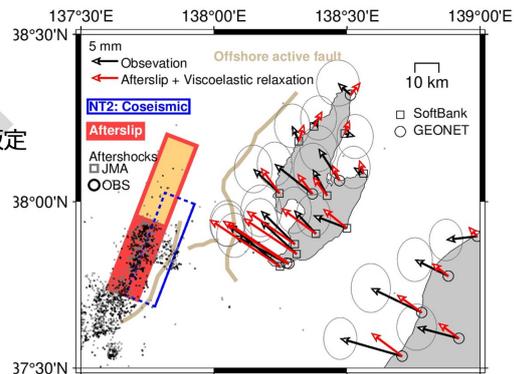
3. 佐渡ヶ島西方沖における余効すべりの寄与を検証

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



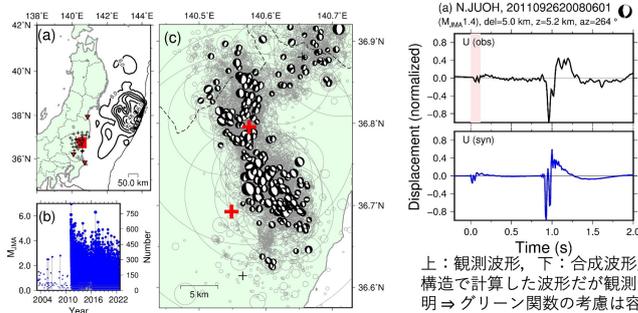
- 観測データと同様の北西方向の変位を再現  
 余効すべりの発生を示唆
  - 中部での変位量が観測データと比較して小さい
  - 中央域での観測データを誤差の範囲で説明可能特に、推定した余効すべりの主要部分は余震が周囲と比較して集中して発生している領域と一致
- Fujii and Satake (2024) による地震時断層モデルの北端パッチであるNT2の断層面を参考にしつつ、その深部延長に余効すべりが生じていたと仮定
  - JMAの震源カタログ□とOBSによる再決定震源○ (Shinohara et al., 2024, 2024.1/24 ~ 2/22, M >= 1.5)
  - 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1-4

# 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ボアホール観測点



70個の地震の変位波形 (元記録の時間積分)

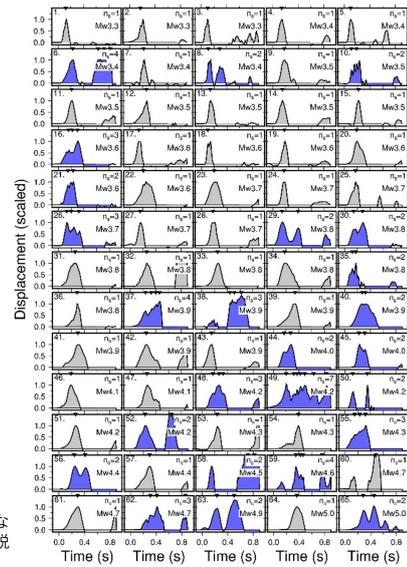
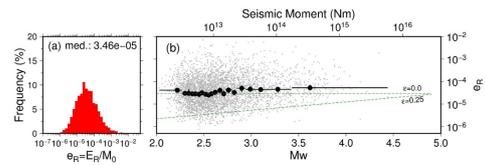
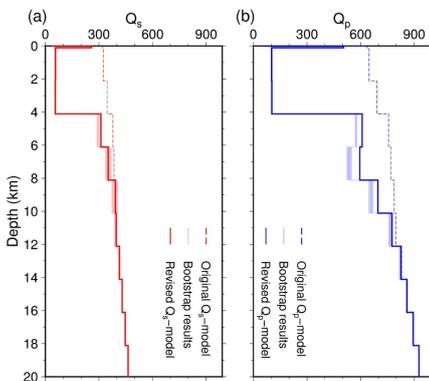


図2-1

変位波形はモーメントレート関数を近似。右の青は複雑性の強い波形。

# 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)。経験的關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)。

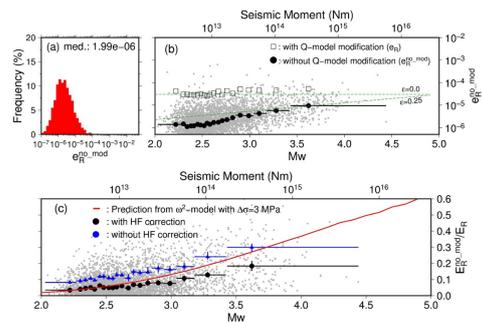


図2-2

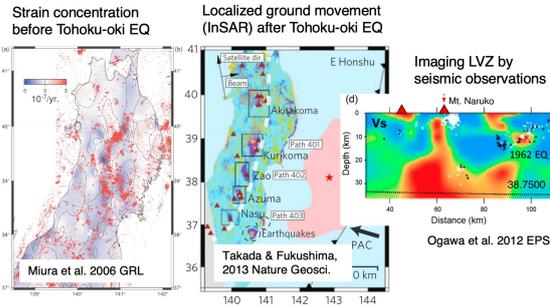
茨城県北部のデータを使用。不適切なQの仮定は中小地震に猛威を振るう。おそらく浅部減衰は普遍的である。

# 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

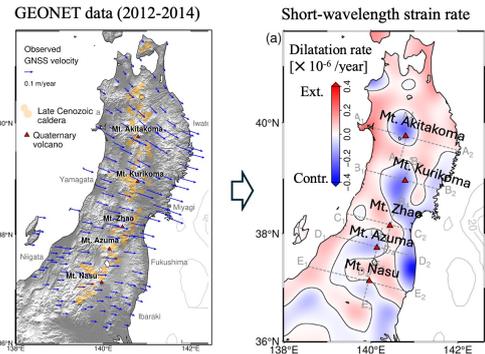
- ・地質学的・地球物理学的研究により、日本東北地方の第四紀火山の地下には低粘性層 (LVZ) が存在することが示唆
- ・LVZは、2011年東北沖地震の前後に局所的な地殻変動を引き起こす可能性



## 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

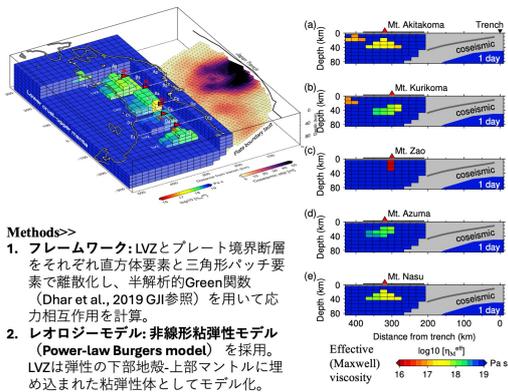


Methods>>  
 ステップ1: GNSS速度場を長波長成分と短波長成分に分解。  
 ステップ2: 短波長の速度場をShen et al. (1996, JGR)に基づいて歪み速度に変換

- ・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2-3

## 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

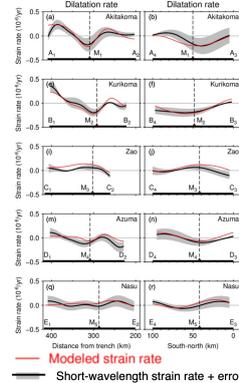


### Methods>>

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

Genozoic (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。

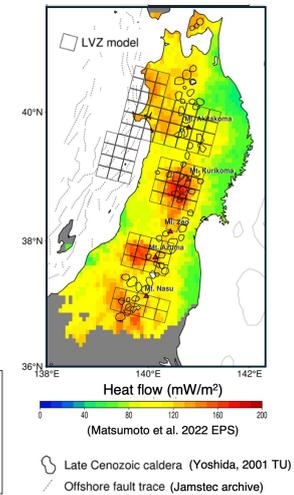
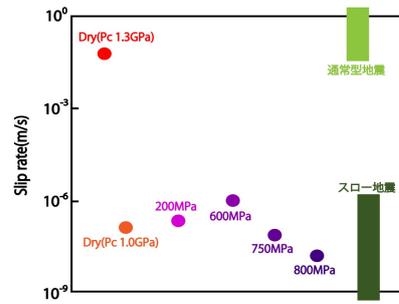
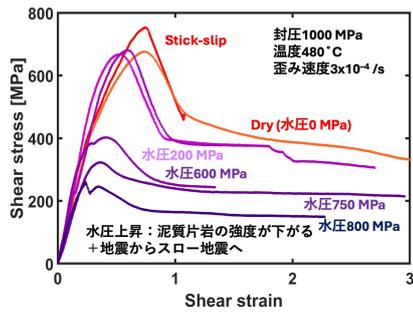


図2-4



臨界破壊サイズ: 物質の摩擦特性と弾性特性による。

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 $3 \times 10^{-4}$  /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。

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

図2-5