

## (1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

## (2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）日本列島の地震―火山噴火の基本場解明：地殻とマントルにおける物質、温度・流動・変形、応力場

（英文）Understanding of basic fields of earthquakes and volcanic eruptions in Japanese islands: stress and strain, fluid-magma, temperature, and flow fields in the crust and mantle

## (3) 関連の深い建議の項目：

## 1 地震・火山現象の解明のための研究

(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

エ. 地震発生と火山活動の相互作用の理解とモデル化

## (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

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

イ. 内陸地震

ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

## (5) 本課題の5か年の到達目標：

地震・火山現象の機構の解明には、物質場、温度場、流動―変形場、応力場など基本場の理解が不可欠である。基本場とその性質の理解に基づいてこそ、初めて異常が定義・検出でき、なぜ異常（例えば地震破壊やマグマの発生・移動といった時空間的に局在した現象）が発生するのか、その機構に定量的制約を課することができる。本課題では、前期の課題を引き継ぎ、まずはそれら基本場について、これまでよりもより包括的かつ高精度に求めると共にその生成メカニズムについて理解を深める。さらに各基本場の情報を合わせることで、Geofluid Mappingを核として、まずはprimitiveなものになることが予想されるが、その統合的理解を行うことを目標とする。具体的には、栗駒火山周辺域や日光・足尾地域など特定の地域において、Geofluid Mappingから得られる地殻流体の組成込みの分布と、震源分布、応力場、地表および地殻内変形場、温度場等とを比較することで、地殻の変形や地震の発生が流体の分布とどのように関わっているのかを明らかにする。さらに、地殻の変形や応力場が地殻流体の分布や移動をどのように規定しているのか、つまりは地殻流体と変形・応力場の相互作用について理解を深める。

## (6) 本課題の5か年計画の概要：

〔物質場〕深部流体やマグマの分布を定量的にとらえつつ、上昇・移動過程を明らかにすることを大きな目標とする。このため、地下水（温泉水、鉱泉水、湧水を含む）や溶岩の野外調査・試料採取と分析（主成分・微量および同位体組成）・データ解析（多変量統計解析、機械学習手法を含むプロセス推定）・シミュレーションを組み合わせ、沈み込むスラブからの脱水に始まり、マントル・地殻中の移動と反応、マグマの生成過程、湧出・噴火に至るまでの基本場と日本列島に沿ったそれらの場の変化の解明を目指す。また、地震火山活動が活発な日光・足尾地域において、電磁気MT法観測を実施し、地下の電気伝導度構造を明らかにする。実験的・数値的研究を基に、亀裂の選択配向も考慮して、アスペリティ接触が生じている現実的な亀裂のモデルを構築する。上記の電気伝導度や岩石バルク物性に関する最新の研究成果を取り入れつつ、栗駒火山周辺域や跡津川断層域、本課題でMT法観測を実施する日光・足

尾地域などに対してGeofluid Mapping（岩質、液体の種類や組成・量・分布のマイクロ形状パラメターの同時推定）を適用し、地殻流体の分布を組成込みで推定する。

〔温度・流動－変形場〕本研究課題で構築してきた対流－流体発生と移動の数値モデル、およびマグマ生成温度・圧力条件に基づくマントル温度構造推定に基づき、日本列島下の温度構造-流れ場の確度の高い推定を行う。「沈み込み帯のdislocation model」の開発を引き続き着実に行うことにより、海洋プレートの沈み込みに伴う島弧の3次元的な変形をそのメカニズムも含め明らかにすると共に、観測データに基づき地形や重力異常分布、応力状態、火山分布などに関する比較沈み込み学的研究も進める。スパースモデリングを導入することにより、GNSSの観測データから活断層スケールでの地殻変動場の高解像度推定を行うと共に、地殻内部の変形場についても、ガウス過程に基づく逆解析手法を導入することにより、弾性歪みと非弾性歪みの区別含め、空間解像度を大きく上げて推定する。

〔応力場〕大地震時に滑り分布から期待される応力変化と観測応力場の時空間変化の比較により、空間変化も含めた絶対応力についてよりの確な拘束を課す。そのため、M7級の内陸地震を対象に、誤差も含めて高精度に滑り分布を推定することに加え、地震波形解析とAI技術を組み合わせ当該地域のモーメントテンソル解を高精度に多数求める。ガウス過程に基づく応力逆解析を用いて応力場の時空間変化を求めることで、応力の载荷過程や地震後の緩和過程の検出を目指す。

## (7) 令和6年度の成果の概要：

### ・今年度の成果の概要

#### 〔物質場〕

封圧増加に伴う含水岩石の弾性波速度および電気伝導度の変化について、マイクロック内のアスペリティ接触を考慮した解析を行い、クラック閉鎖に伴うアスペリティ接触の増加およびクラック開口の減少を定量的に評価した。前年度はアスペリティ接触部が塑性変形することを仮定したが、今年度は弾性変形から塑性変形まで幅広く考慮した。アスペリティ接触部がどのように変形するかは、媒質の物性だけでなく、クラックの表面形状によって決まる。現時点では表面形状については情報が無いためパラメータ化して扱った。

ある封圧での真の接触面積は、弾性変形の場合の方が塑性変形の場合よりも大きい。そのため、塑性変形の場合は少数の大きなアスペリティ接触、塑性変形の場合は多数の小さなアスペリティ接触が生じる（図1）。真の接触面積が大きくなる弾性変形の場合であっても、接触面積の割合が20%程度に達すると、ほぼ固相の弾性波速度を示すようになる。この接触状態では、クラック内の液相連結は保たれている。したがって、弾性波速度に対しては閉鎖状態であっても、電気伝導度に対しては閉鎖していないという状態がクラックの閉鎖状態であると考えている。クラックの連結は圧力変化にほとんど依存しないため、電気伝導度変化はもっぱらクラック開口の変化によって決まる。このように考えることで、地殻内部で観測されている小さな地震波速度変化（<10%）、大きな電気伝導度変化（数桁）を同時に説明することができる。

計画通り、地震火山活動が活発な日光・足尾地域でMT法観測を実施した。観測期間中、地磁気活動が活発であり、S/N比の高い観測データを取得できた。その結果、0.01秒弱から10000秒近い広い帯域で良好なMT応答関数を得ることができた。応答関数から逆解析により3次元電気比抵抗構造を推定した結果、日光白根山と男体山の下の地殻に低比抵抗域が分布することを明らかにした。この低比抵抗域は、先行研究で低速度、低Q域とされており、日光白根山と男体山のマグマ供給系を示している可能性がある。この低比抵抗域の上端付近では2013年にM6.3の内陸地震が起きている。低比抵抗域は流体に富んでいると考えられ、その流体が地震の発生に関与した可能性を示唆する。

連結した亀裂内に（流体などの）低比抵抗物質が存在する場合を対象に、岩石のバルク比抵抗を与えるmixingモデルを解析的に導出した。亀裂に選択配向がある場合にも対応したモデルであり、横等方性 (transverse isotropy) に従う任意の選択配向に適用可能である。従来モデルでは互いに孤立した亀裂を仮定しているのに対して、開発したモデルは亀裂が互いに連結した状態を想定しているため、地下の低比抵抗域を解釈する上でより適切である。横等方性の選択配向を有する亀裂に対しては弾性波速度の理論モデルも導出されており、開発した電気比抵抗のモデルを用いることで、地震波速度と電気比抵抗の異方性について理論的な比較が可能となった。

地震・火山活動に重要な役割をはたしていると考えられる「地殻流体の実態と分布」をとらえるため、ケーススタディとして跡津川断層沿いなど深部流体湧出が期待される大きな構造線沿いの既存の湧水データを精査した。今年度は、岐阜県高山～白川郷にかけて分布する代表的な湧水・泉源を選定し、調査・サンプリングを行った。またこれらの試料について、主要溶存成分濃度分析およびヘリウ

μ同位体比分析を行い、高いNaCl濃度（～3%）およびマントル由来のヘリウム成分を含む湧水が広く分布することを見出した。当該地域には深部流体のフラックスがあると推定される。これらを実験的情報とし、前計画において構築した定量的GeofluidMappingの手法を応用し、予察的な結果を得た。すでに公表されている地震波速度構造（Nakajima et al., 2010）と電気伝導度構造（Usui et al., 2021）に基づき、ベーズ統計に基づく同時解析・インバージョンを行ない、当該地域の2次元断面（北西-南東方向～70km、深さ40kmの断面）における地殻流体の分布を得つつある。今後、計算条件をさらに吟味し、より確からしい推定を行う予定である。

並行して、マントルでのマグマ生成から上昇・噴出にいたるまでの全過程を解読するために、  
\*テストフィールドとしての、富士・箱根の岩石・地球化学的研究、  
\*沈み込んだプレートから地表までの流体・マグマの移動時間を制約するため、ウラン系列中間核種（ $^{238}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ - $^{226}\text{Ra}$ ）について、迅速かつ平易な放射非平衡の新たな分析手法開発、を開始した。ウラン系列中間核種の同位体比を簡易・迅速に測定するための手法開発について、現時点ではJB-3標準岩石試料（富士山溶岩試料）において $^{226}\text{Ra}$ と $^{230}\text{Th}$ に関する同位体比を精度良く測定できることが確かめられた（図2）。

箱根火山については、既存の約200試料から選定した溶岩試料について、同位体分析を開始した。富士山は、北米-ユーラシア-フィリピン海プレートの三重会合点近くに位置し、活発な地殻変動域に形成されている。「新富士」は約17,000年前の富士宮期以降の活動によって形成されているが、富士山ハザードマップは5600年前以降の須走期の噴火履歴を基に作成されている。一方、約10万～17,000年前の星山期に形成された「古富士」の山体と噴火履歴はあまり理解されていない。今回、富士山山頂から東方向に18~20 km離れた2地点の調査により、古富士に由来する馬伏川岩屑なだれ堆積物とテフラ層が確認された。岩屑なだれ堆積物には玄武岩質溶岩礫と植物片が含まれ、放射性炭素年代測定により約18,931-18,764年前（ $2\sigma$ ）とされる。これは、星山期終盤に古富士が東方向に大規模に崩壊したことを意味する。スコリア層も数枚確認され、それらは爆発的な噴火活動に由来し、古富士の活動が山体崩壊直前にあったことを示唆している。新富士起源のテフラ層を構成するスコリア粒子と比べ、相対的に大きく、稀に直径15 cmほどの火山弾に似たスコリアも含まれていることから、（A）星山期終盤に、より爆発的な噴火が起きていた、（B）給源の主火口からの距離が短かった。これら2つの要因が考えられる（図3）。

#### [温度・流動場]

玄武岩質マグマの組成を化学プローブとして用い、「日本列島下のマントルの含水量とポテンシャル温度」を推定するための岩石学と機械学習の手法開発を開始した。その一環として、白色化クラスタ解析（Iwamori et al., 2017）を日本列島全体の火山岩同位体組成に応用し、沈み込んだプレートの流体量、溶融度、温度構造などについて制約を得つつある。特に中部日本下では沈み込んだ2枚のプレート（太平洋、フィリピン海）が覆い重なるため、流体量が多く、かつ低温の場が出現し、沈み込んだスラブ、特に太平洋スラブの脱水が深部にずれ込むことが確認された。このため、中部日本では火山帯が大きく背弧に向かって折れ曲がり、かつ幅が広がる。さらにこの深部脱水の一部は能登半島下で起こり、2020年以来継続する地震・地殻変動活動に寄与している可能性が示唆された（岩森・中村、2024; Iwamori and Nakamura, accepted）。

#### [応力・変形場]

地震波形の振幅比を用いた解析により、2011年と2016年にMw5.9地震が繰り返し発生した茨城県北部地域において、約30,000個の中小地震（図4）のモーメントテンソル解の推定に成功した（Yoshida et al., 2024, JGR）。

2024年能登半島地震発生域における断層構造と微小地震のマイグレーションを明らかにし、本震発生への流体関与の可能性を示した（Yoshida et al., 2024, GRL）。図5は本震震源直下の微細断層構造（図5 a-e）と微小地震の時間発展（図5 f-k）を示しており、流体が本震前に深部の微細断層を通じて震源付近にまで移動していたことを示唆している。図6は、本震が開始した断層上における微小地震の西方向へのマイグレーションを示しており、この更に西側に本震に伴う大隆起域が位置している。

物理法則を組み込む深層学習(Physics-Informed Neural Network: PINN)による地震時地殻変動解析を、プレート沈み込み境界などの記述に用いられる面内問題に応用した（Okazaki et al., 2025）。地表の地殻変動データから地下の断層運動を推定する逆解析に取り組み、従来法と異なり数学的正則化なしで安定解が得られた（図7, 8）。これはPINNを用いることで物理的要請に基づき合理的な推定

を行える可能性を示唆している。

2024年能登半島地震について、グリーン関数の誤差を明示的に取り入れたPDTI (Potency density tensor inversion; Shimizu et al., 2020) 法を用いて震源過程を推定した。その結果、初期破壊が10秒ほどかけて静かに成長し、その後東西約150 kmに渡って複数の断層を次々と破壊する複雑な震源過程が明らかとなった(図9)。また、2024年能登半島地震に先立つ同地域での群発地震活動は地下深部からの流体によって引き起こされたと考えられているが、東北沖地震後の大規模な余効変動による伸張的運動により流体の上昇が容易となる環境が整えられていたことを指摘した(Nozue & Fukahata, 投稿中)。

世界で初めてスパースモデリングを用いてGNSSデータから地殻の歪み速度を推定する方法を定式化し、模擬データに適用してその有効性を確かめ、実際の観測データに適用した(図10; Nozue & Fukahata, 2025)。

・「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

本研究では、圧力下で岩石内部のクラックがどのように閉じるか、それがどのように観測量に反映されるかについて理解を深めることができたと考えている。この理解を地震波速度および電気伝導度の解釈に応用することで、より確度の高い流体分布を推定することができる。これは地震発生および火山活動を支配する場の解明に貢献するものである。また、地震波速度および電気伝導度から推定される流体分布は、地震活動や火山活動の予測を行う上で基礎となるデータであり、活動場の理解を通して災害軽減に貢献するものである。

今後の展望としては、地震発生を考えると、流体の情報として重要なのは量よりもむしろ流体圧である。クラック内部でのアスペリティ接触を考えた場合、弾性波速度はクラック密度、接触部の大きさ、数で決まる。一方、電気伝導度はクラック密度、接触部の大きさ、数、有効開口で決まる。したがって、接触部の大きさや数、有効開口を有効圧(=封圧-流体圧)の関数として理解できれば、観測量からクラック密度や有効圧を推定することが可能になる。この実現を目指して、今後は流体圧をコントロールした物性測定を行う。

日光・足尾地域のMT法観測で明らかになった、日光白根山と男体山のマグマ供給系と考えられる地殻の低比抵抗域とその上端付近で発生した内陸地震(M6.3)の関係は地殻流体が本地域の火山および地震活動に関与している可能性を示唆するものであり、地震活動、火山活動及びそれらの総合作用の理解を目指すという中項目(5)の[エ]に直接的に貢献する。また、小項目[ウ]の火山のマグマ供給系の解明にも直接的に貢献するとともに、小項目[イ]の内陸地震の破壊と地下構造の関係の解明のためにも重要な情報を与えている。

新規開発したmixingモデルを用いることで比抵抗構造から地下の流体量や亀裂の選択配向を定量的に推定することができる。地下岩石の電気比抵抗は多かれ少なかれ異方性を有していると考えられ、異方性を有する比抵抗構造を定量的に解釈するためには開発したモデルが必要である。そのため、開発したモデルは小項目[イ]、[ウ]、[エ]に関し、地下構造(地下流体分布)と地震・火山活動の関係を理解する上で今後重要なツールとなり得る。このように、地下のGeofluidの分布や圧力(水溶液超臨界流体、マグマなど)を定量的にとらえることにより、変動現象の基本場の理解が各段に進む。

「地震発生及び火山現象を支配する場の解明とモデル化」の基礎となる断層構造と応力場の推定に必要な高精度の震源分布と大量のメカニズム解を得ることに成功した。PINNによる地震時地殻変動の順・逆解析の基本的枠組みを確立も、モデル化の基礎となる重要な成果である。

このように、地味ではあるが「地震発生及び火山現象を支配する場の解明とモデル化」の基礎となる知見を着実に積み重ねており、長期的視点において災害の軽減に大いに資する成果が上がっている。

(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

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

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*, 95 (4): 2409–2421, <https://doi.org/10.1785/0220230431>, 査読有, 謝辞無
- 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
- Okazaki, T., Hirahara, K., Ito, T., Kano, M. and Ueda, N., 2025, Physics-informed deep learning for forward and inverse modeling of inplane crustal deformation, *Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation*, accepted, 査読有, 謝辞有
- Okuwaki, R., Yagi, Y., Murakami, A., and Fukahata, Y., 2024. A multiplex rupture sequence under complex fault network due to preceding earthquake swarms during the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula, Japan, earthquake, *Geophysical Research Letters*, 51, e2024GL109224. <https://doi.org/10.1029/2024GL109224>, 査読有, 謝辞無
- Nozue, Y. and Fukahata, Y., 2025, Geodetic data inversion to estimate a strain-rate field by introducing sparse modeling. *Earth Planets Space*, 77:12. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02115-3>, 査読有, 謝辞無
- Ishizu, K., Goto, T., Fukahata, Y., Koike, K., Vachiriatienchai, C., and Siripunvaraporn, W., 2025, Inversion algorithm determining sharp boundaries in electrical resistivity tomography, *Geophysics*, in press. <https://doi.org/10.1190/geo2024-0385.1>, 査読有, 謝辞無
- Watanabe, T., Tomioka, A., and Yoshida, K. 2024, The closure of microcracks under pressure: inference from elastic wave velocity and electrical conductivity in granitic rocks. *Earth, Planets and Space*, 76:153, <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02103-7>, 査読有, 謝辞有
- Usui, Y., 2024, Electrical conductivity model for transversely isotropic rocks with interconnected cracks, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 354, 107226, doi: 10.1016/j.pepi.2024.107226, 査読有, 謝辞有
- Kondo, Y., Obayashi, M., Sugioka, H., Shiobara, H., Ito, A., Shinohara, M., Iwamori, H., et al., 2024, Seismic image of the central to southern Andean subduction zone through finite-frequency tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129, e2024JB028844. <https://doi.org/10.1029/2024JB028844>, 査読有, 謝辞無
- 岩森 光・中村 仁美, 2024, 冷たい沈み込み帯としての中部日本と能登半島下でのスラブ深部脱水. *地震ジャーナル*, 78, 2-12. [https://doi.org/10.60191/ej.2024.78\\_2](https://doi.org/10.60191/ej.2024.78_2), 査読無, 謝辞無
- Iwamori, H., Nakamura, H. (accepted), Bend of volcanic front around Asama Volcano and deep dehydration beneath the Noto peninsula: constraints from regional magma geochemistry. In: “Asama Volcano —Portrait of the most active and hazardous andesitic volcano near the Tokyo metropolitan area—” (Aramaki, S., Takahashi, M., Takeo, M., Yasui, M. and Aoki, Y., eds. Series of “Active Volcanoes of the World” , Springer), 査読無, 謝辞無
- Takashi Yuguchi, Kyoka Endo, Satoshi Suzuki, Yasuhiro Ogita, Shuhei Sakata, Tatsunori Yokoyama, Takumi Imura, Takeshi Ohno, Eiji Sasao, 2025, Growth processes of zircon crystals in a granitic magma chamber, variation in U/Pb age, titanium concentration, and Th/U in relation to internal texture. *Lithos*, 494-495, 107909-107909. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107909>, 査読有, 謝辞無
- Takashi Yuguchi, Takenori Kato, Yasuhiro Ogita, Minori Watanabe, Hayoto Yamazaki, Asuka

Kato, Daichi Itoh, Tatsunori Yokoyama, Shuhei Sakata, Takeshi Ohno, 2024, Crystallization processes of quartz in a granitic magma: Implications for the magma chamber processes of Okueyama granite, Kyushu, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 265, 106091-106091. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2024.106091>, 査読有, 謝辞無

Yusuke Sawaki, Hisashi Asanuma, Shuhei Sakata, Mariko Abe, Hisahiro Ueda, Wataru Fujisaki, Takeshi Ohno, 2024, Zircon Trace-Element Compositions in Cenozoic Granitoids in Japan: Revised Discrimination Diagrams for Zircons in I-Type, S-Type, and A-Type Granites. *Island Arc*, 33: e12539. <https://doi.org/10.1111/iar.12539>, 査読有, 謝辞無

西澤達治, 吉本充宏, 亀谷伸子, 岩森光, 安田敦, 富士山のマグマ供給系解明に向けた基礎研究. *山梨県富士山科学研究所年報*, 第27号, 42-43., 査読有, 謝辞無

東郷洋子, 森川徳敏, 高橋正明, 高橋浩, 清水徹, 中村仁美, 風早康平, 清水日奈子, 都井美穂, 瀬口寛樹, 福田和幸, 朝川暢子, 清水裕子, 常木俊宏, 森田澄人 (2025) 地質標本館特別展「プレートテクトニクスがつくるなぞの温泉『深部流体』」開催報告. *GSJ 地質ニュース* Vol. 14, p 35-37, 査読無, 謝辞無

#### ・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* (招待講演)

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, 地殻流体の移動に関係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* (招待講演)

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*

岡崎智久・平原和朗・伊藤武男・加納将行・上田修功, 2024, 物理深層学習PINNによるInplane地殻変動の順・逆解析, *日本地震学会秋季大会*, S21-09.

岡崎智久・平原和朗・伊藤武男・加納将行・上田修功, 2024, 物理法則を組み込む深層学習PINNによるInplane地殻変動解析, *日本測地学会講演会*, 18.

深畑幸俊, 2024, 断層すべりインバージョンにおける誤差についての考察 *日本地震学会2024年秋季大会*, S01-14

Y. Fukahata, Y. Mori, 2024, 3-D Numerical Simulation of Island Arc Deformation based on the Dislocation Model for Plate Subduction and its Insight into Topographic Evolution of Island Arcs, *EGU2024*, EGU24-14479

深畑幸俊・森祐太朗, 2024, 琵琶湖はなぜそこにあるのか?, *日本地球惑星科学連合2024年大会*, HGM03-07

Nozue Y and Fukahata Y (2025), Influence of the 2011 Tohoku-oki earthquake on the strain-rate field around the Noto Peninsula, O14, *Taoyuan-Taiwan*

Nozue Y and Fukahata Y (2024), 能登地域の歪み速度場に対する2011年東北沖地震の影響, *日本地*

球惑星科学連合2024年大会, U16-P04, 千葉市

Nozue Y and Fukahata Y (2024), Influence of the 2011 Tohoku-oki earthquake on the strain-rate fields around the Noto Peninsula, Geo-INQUIRE Corinth Summer School 2024, No.5, Corinth-Greece

T. Nishizawa Y. Fukahata, (2024), Parameterization of Outer-rise Seismic Normal Faults and its Implication to Subduction Zone Tectonics, 日本地球惑星科学連合2024年連合大会, SCG55-P04

西沢貴志 深畑幸俊, (2024) 沈み込み帯の変位の食い違いモデルに基づく中央沈降帯の形成メカニズム, 日本測地学会第142回講演会, P24

T. Nishizawa Y. Fukahata, (2025), Formation Mechanism of Central Lowland Zone based on Dislocation Model for Plate Subduction, Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics

西沢貴志, (2024), 中央沈降帯（内海）はどこで形成されるのか?, 理学共創イノベーションコンソーシアム, P21

岩野 英樹、仁木 創太、浅沼 尚、坂田 周平、折橋 裕二、平田 岳史, 2024, 後期更新世火山年代学のためのアパタイトU-Th非平衡年代測定の開発, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG51-11

澤木 佑介、坂田 周平、大野 剛, 2024, Host rocks of Hadean zircons; based on comparison with the zircons in Japanese Cenozoic granitoids, 日本地球惑星科学連合2024年大会, MIS23-P08

小出鯉太郎, 深畑幸俊, 2024, 弾性-粘弾性成層構造媒質中の断層運動が作る非直観的な変位場について, 日本地球惑星科学連合2024年連合大会, SCG55-P11

小出鯉太郎, 深畑幸俊, 2024, 弾性-粘弾性成層構造媒質中の逆断層および水平断層が作る非直観的な変位場について, 日本地震学会2024年秋季大会, S03P-05

渡邊了, 2024, 弾性波速度・電気電度から推定される圧力下におけるマイクロクラックの構造、日本地球惑星科学連合2024年大会、SCG55-07

Watanabe, T., Yoshida, K., and Tani, K., 2024, Surface topography of microcracks in a granitic rock, 日本地球惑星科学連合2024年大会、SCG55-P06

白井嘉哉, 上嶋誠, 坂中伸也, 山谷祐介, 小川康雄, 市來雅啓, 本蔵義守, 黒木英州, 北関東MT観測グループ, 2024, Magnetotelluric explorations of the three-dimensional electrical resistivity structure under the Nikko-Ashio area, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2024年秋季年会, R003-04

Satoru Haraguchi, Kenta Ueki, Hikaru Iwamori, 2024, Geochemical characteristics of the Japan Arc based on the logarithmic distribution of chemical data for each rock facies, Japan Geoscience Union Meeting, SGL18-07

Yusuke Katsuki, Shuhei Sakata, Tatsuji Nishizawa, Masaki Takahashi, Shun-ichi Nakai, Hitomi Nakamura, Satoru Haraguchi, Hikaru Iwamori, 2024, Latent thermodynamic parameter in the chemical compositional variation of basalts of the Fuji volcano, central Japan, identified by unsupervised machine learning, Japan Geoscience Union Meeting, SVC30-07

Hikaru Iwamori, Hitomi Nakamura, Noritoshi Morikawa, Satoru Haraguchi, Shuhei Sakata, 2024, Cycling of groundwaters and deep-seated fluids beneath Kyushu: unsupervised machine learning of geochemical data, Japan Geoscience Union Meeting, SMP21-02 Invited Oral

西澤達治, 吉本充宏, 亀谷伸子, 安田敦, 2024, 1万9千年前の星山期終盤における富士山の火山活動, 日本地球惑星科学連合2024年大会, S-VC30-06

中村 仁美, 横尾 亮彦, 岩森 光, 森川 徳敏, 西澤 達治, 森 俊哉, 2024, 阿蘇火山火口湖湯だまりにおける地球化学的研究, 日本火山学会秋季大会, B3-11

Mizuki Ishida, Yuki Hieda, Shuhei Araki, Koichiro Fujinaga, Toru Shimizu, Masaharu Tanimizu, Hitomi Nakamura, Hikaru Iwamori, Shiki Machida, Shigekazu Yoneda, Kentaro Nakamura,

Kato Yasuhiro, 2024, Genesis of the enriched volcanic rocks at Sapporo-dake and Soranumadake in southwestern Hokkaido: Insights into the formation of the Toyoha polymetallic deposit, Japan Geoscience Union Meeting, SMP21-P03

Nozue Y. and Fukahata Y., 2024, 能登地域の歪み速度場に対する2011年東北沖地震の影響, 世界の沈み込み帯におけるSlowとFastの破壊現象の実像に関する研究集会, No.12, 岐阜県高山市

西沢貴志, 2024, 中央沈降帯（内海）はどこで形成されるのか?, 京都大学大学院教育支援機構奨励 沈研究員によるポスター発表会・研究交流会, P2

西沢貴志 深畑幸俊, 2025, 地形・重力異常から読み解く沈み込み帯の多様性, 京都大学防災研究所 令和6年度研究発表講演会, P45

Zhang, H., Morishige, M., and Iwamori, H., 2024, The effects of coordinate systems on mantle convection and the cooling of oceanic lithosphere, Japan Geoscience Union Meeting, SCG48-P10

Tamura, T., Yokoyama, T., Kuritani, T., Nakagawa, M., Gill, J.B., Iwamori, H., and Ueki, K., 2024, Mo-Sr-Nd-Pb isotopic compositions in Quaternary volcanic rocks: Northeast Japan (Hokkaido, Tohoku) arc and Izu islands, Japan Geoscience Union Meeting, SGC33-03

Chatterjee, S., Iwamori, H., Bandyopadhyay D., Guo, P., Tegner, C., Haraguchi, S., and IODP Expedition 396 scientists, 2024, Unsupervised machine learning approach for regional geochemical data from North Atlantic Igneous Province: Implications for LAB and plumerift interaction, Japan Geoscience Union Meeting, MGI28-04

Kuwatani, T., Nagata, K., Sakai, T., and Iwamori, H., 2024, Estimation of lithology and geofluid parameters from seismic velocities and electrical resistivity using Bayesian inference, Japan Geoscience Union Meeting, MGI28-P01

坂田 周平、大野 剛, 2024, Development of practical measurement method for  $^{238}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$ - $^{226}\text{Ra}$  disequilibria in volcanic rocks using ICP-MS/MS, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG51-P04

岩野 英樹、仁木 創太、浅沼 尚、坂田 周平、折橋 裕二、平田 岳史, 2024, 後期更新世火山年代学のためのアパタイトU-Th非平衡年代測定の開発, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG51-11

澤木 佑介、坂田 周平、大野 剛, 2024, Host rocks of Hadean zircons; based on comparison with the zircons in Japanese Cenozoic granitoids, 日本地球惑星科学連合2024年大会, MIS23P08

山本 伸次、伊藤 正一、大野 剛、小宮 剛、坂田 周平、青木 翔吾, 2024, Hydrogen isotope compositions in early earth mantle from apatite inclusions in detrital early Archean zircons from the Jack Hills metaconglomerate, W. Australis, 日本地球惑星科学連合2024年大会, BCG06-02

(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：

項目：火山：構造：MT・AMT観測

概要：日光・足尾地域における広帯域MT法観測

既存データベースとの関係：

調査・観測地域：栃木県、群馬県栃木県日光市、群馬県片品村、群馬県沼田市、群馬県みどり市日光・足尾地域 36.661877 139.417034

調査・観測期間：2024/4/17-2024/11/13

公開状況：公開留保中（公開時期・ポリシー未定）

(10) 令和7年度実施計画の概要：

[物質場]

(1) 岩石試料内部のマイクロクラックについて、SEM観察により表面形状を調べ、アスペリティ接触部の変形モードを明らかにする。(2) 石英ガラスと方解石単結晶の円板試料を用いてクラック閉鎖のモデル実験を行い、塑性変形がクラック閉鎖に及ぼす影響を明らかにする。(3) 含水岩石試料の弾性波速度・電気伝導度測定を封圧下で行う。流体圧を変えることで、クラック閉鎖を有効圧の関数として理解する。

日光・足尾地域の3次元比抵抗構造について、得られた比抵抗の値がどの程度確からしいか定量的な評価を行う。さらに、地下の物性(流体量や温度)の定量的な見積もりを行う。また、新規開発したmixingモデルでは全ての亀裂が連結したネットワークに属しているという仮定をしているが、実際は流体を含んでいても電気比抵抗などの輸送特性に寄与しない亀裂が存在する。ランダムに生成した複数の亀裂モデルに対して数値シミュレーションを行うことにより、輸送特性に寄与する亀裂の割合(backbone fraction)の統計的な特徴を調べ、mixingモデルを拡張する。

前年度の結果に基づき、深部流体のサンプリング・分析、およびそれらに基づくGeofluid Mappingをさらに進める。富士・箱根の火山発達史や特徴的噴火・イベントをカバーするように補完調査・分析を行い、元素・同位体組成データセットを構築する。構築した組成データベースについて、教師なし機械学習手法によるデータ構造の把握と、それに基づく成因解析を開始する。新開発の放射非平衡測定方法の信頼性を、標準岩石(JB-3, JR-2)の分析を通して評価する。

[温度・流動場]

前年度に引き続き、玄武岩質溶岩組成に基づく「日本列島下マンツルの含水量とポテンシャル温度」の解析手法の開発・高度化を進める。マンツル対流モデルにC-H-O流体を含む系の溶融・メルト組成再現の定式化を組み込む。前年度に定式化したスパスモデルとガウス過程の手法をそれぞれの模擬データに適用し、手法の有効性と限界を確かめる。

[応力・変形場]

2024年能登半島地震震源域において中小地震のモーメントテンソル解を推定し、応力場の時空間分布を明らかにする。

PINNを用いて3次元構造における地震時地殻変動の実データ解析に取り組み、現実的な地形・地下構造を考慮した断層すべり逆解析を実施する。歪み集中域や火山地域を対象に、測地データからPINNを用いて地下のモーメントテンソル体積密度の空間分布を推定し、地殻内の変動様式を議論する。

沈み込み帯の変位の食い違いモデルを用いて、島弧の長期的変形の理論的理解を進める。また、逆解析手法を高度化することにより、測地データから地殻の変形を、地震波データから地震の破壊過程をより高い信頼度で高精度に推定する手法を開発するとともに、実データへの適用も進めていく。

#### (11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

深畑幸俊(京都大学防災研究所), 岩森光(東京大学地震研究所), 白井嘉哉(東京大学地震研究所), 坂田周平(東京大学地震研究所), 中村仁美(産業技術総合研究所), 吉田圭佑(東北大学), 西澤達治(富士山火山防災研究センター), 岡崎智久(理化学研究所), 渡辺了(富山大学)

他機関との共同研究の有無：無

#### (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：京都大学防災研究所

電話：0774-38-4226

e-mail：fukahata.yukitoshi.3e@kyoto-u.ac.jp

URL：

#### (13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：深畑幸俊

所属：京都大学防災研究所

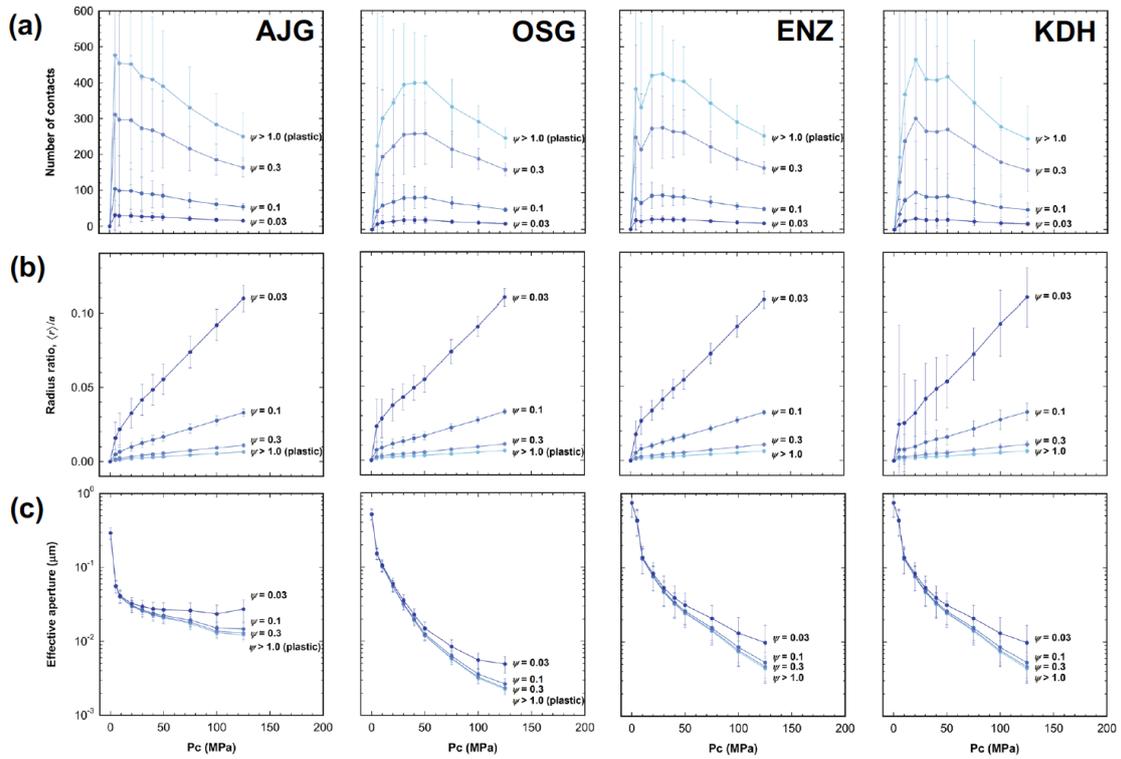


図 1

封圧増加に伴うクラック内のアスペリティ接触の数，およびクラックと接触部の半径比，有効開口の変化。Plasticity index が大きいほど塑性変形の寄与が大きい。岩石試料は庵治花崗岩 (AJG)，大島花崗岩 (OSG)，塩山花崗閃緑岩 (ENZ)，勝原閃緑岩 (KDH) である。間隙流体圧は大気圧に保っている。

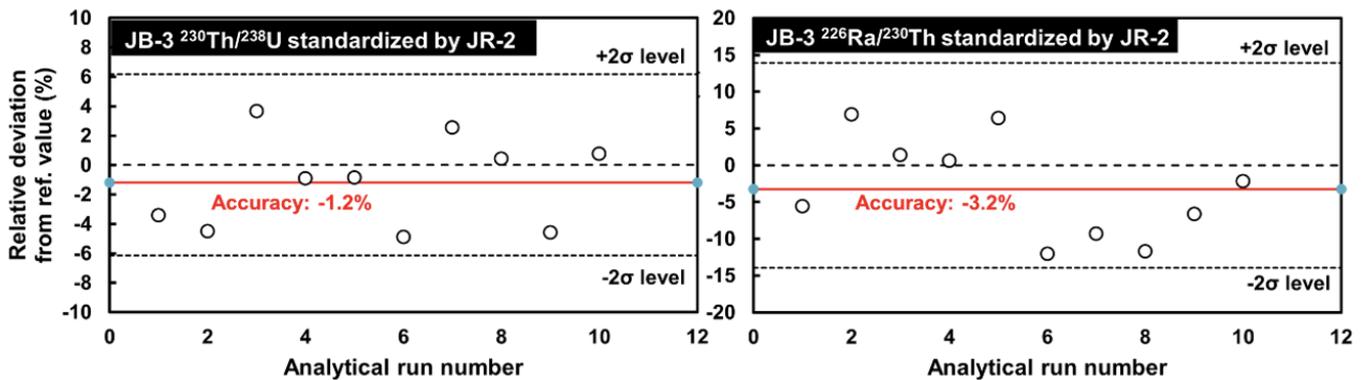


図 2

JB-3標準試料の $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ 測定テスト結果

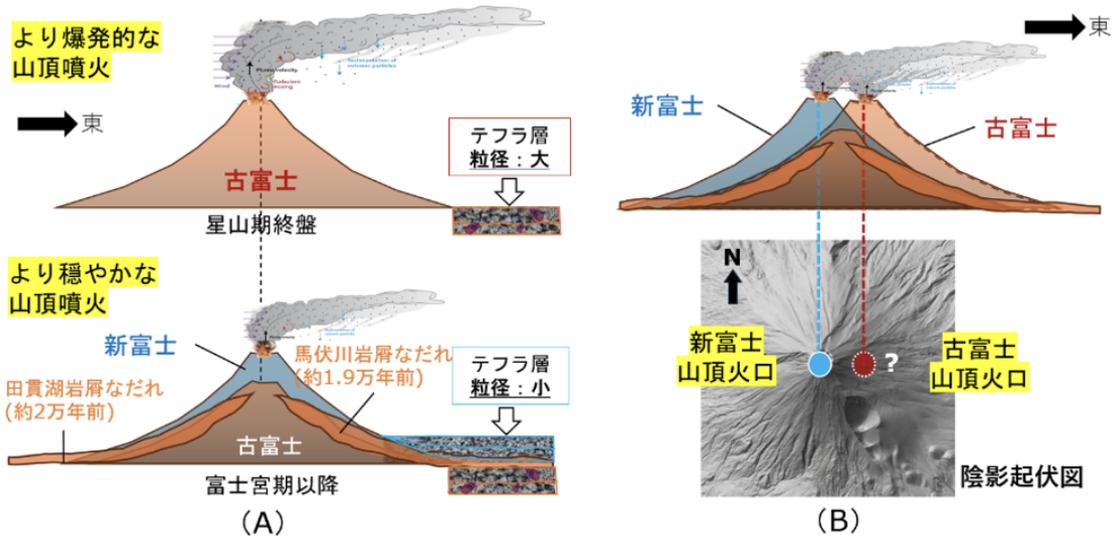


図3

星山期終盤の古富士から富士宮期初期の新富士形成にかけての富士山の活動モデル。(A) 星山期終盤の古富士は、新富士よりも爆発的な噴火を繰り返していた。(B) 古富士の主火口は、新富士の山頂火口よりも東側に位置していた。(A) または (B)、あるいは両方の影響により、古富士のテフラを構成するスコリアの粒径が新富士よりも相対的に大きくなった可能性がある。

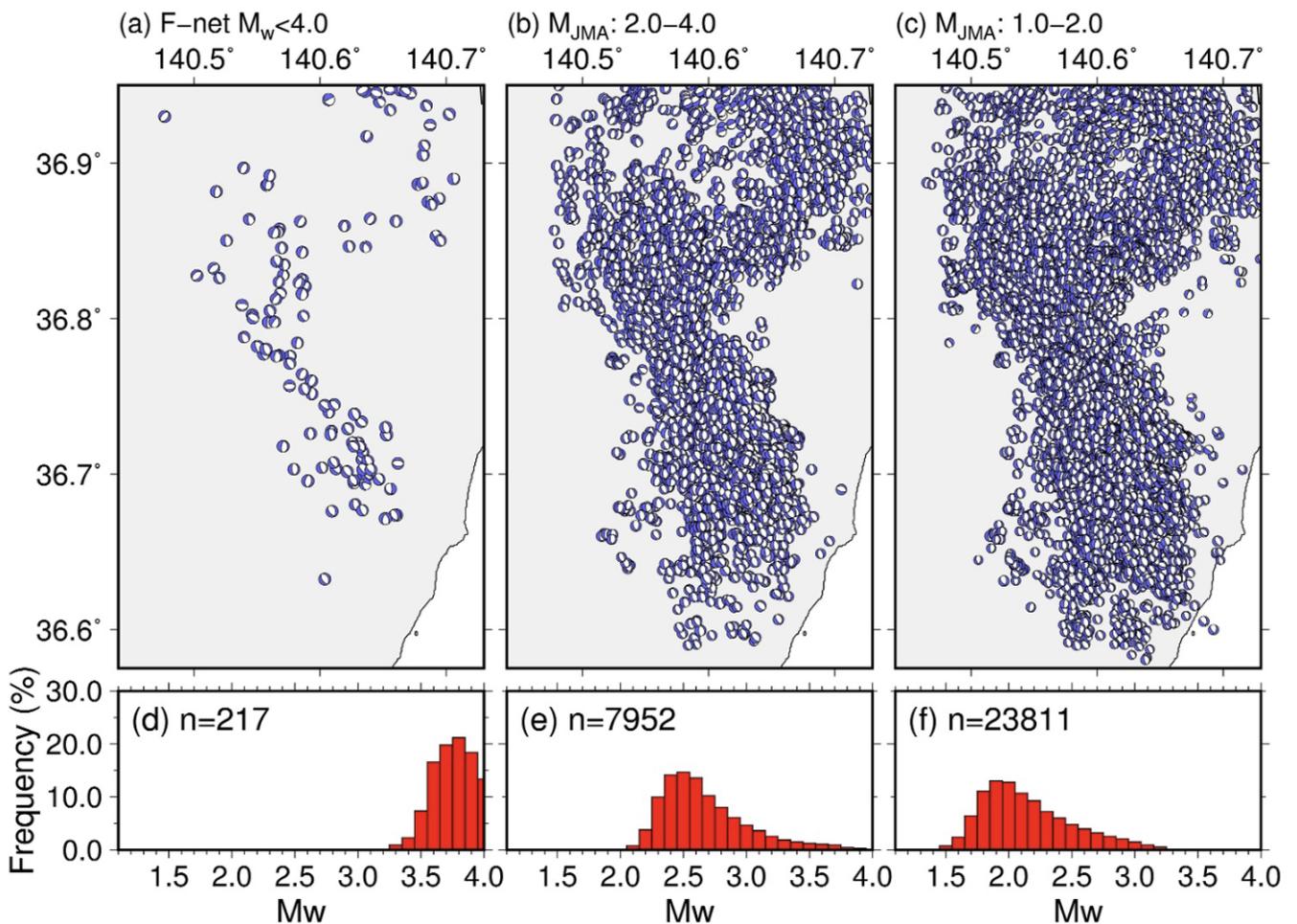


図4

モーメントテンソル解の分布 (Yoshida, Emoto et al., 2024)。(a) F-netカタログによる  $3.5 < M_w < 4.0$  のリ

ファレンスイベントのモーメント・テンソル解。(b) 推定した M 2.0-4.0の地震のモーメントテンソル解。(c) 推定した M1.0-2.0の地震のモーメントテンソル解。(d)、(e)、(f): それぞれ (a)、(b)、(c)の Mwの頻度分布。

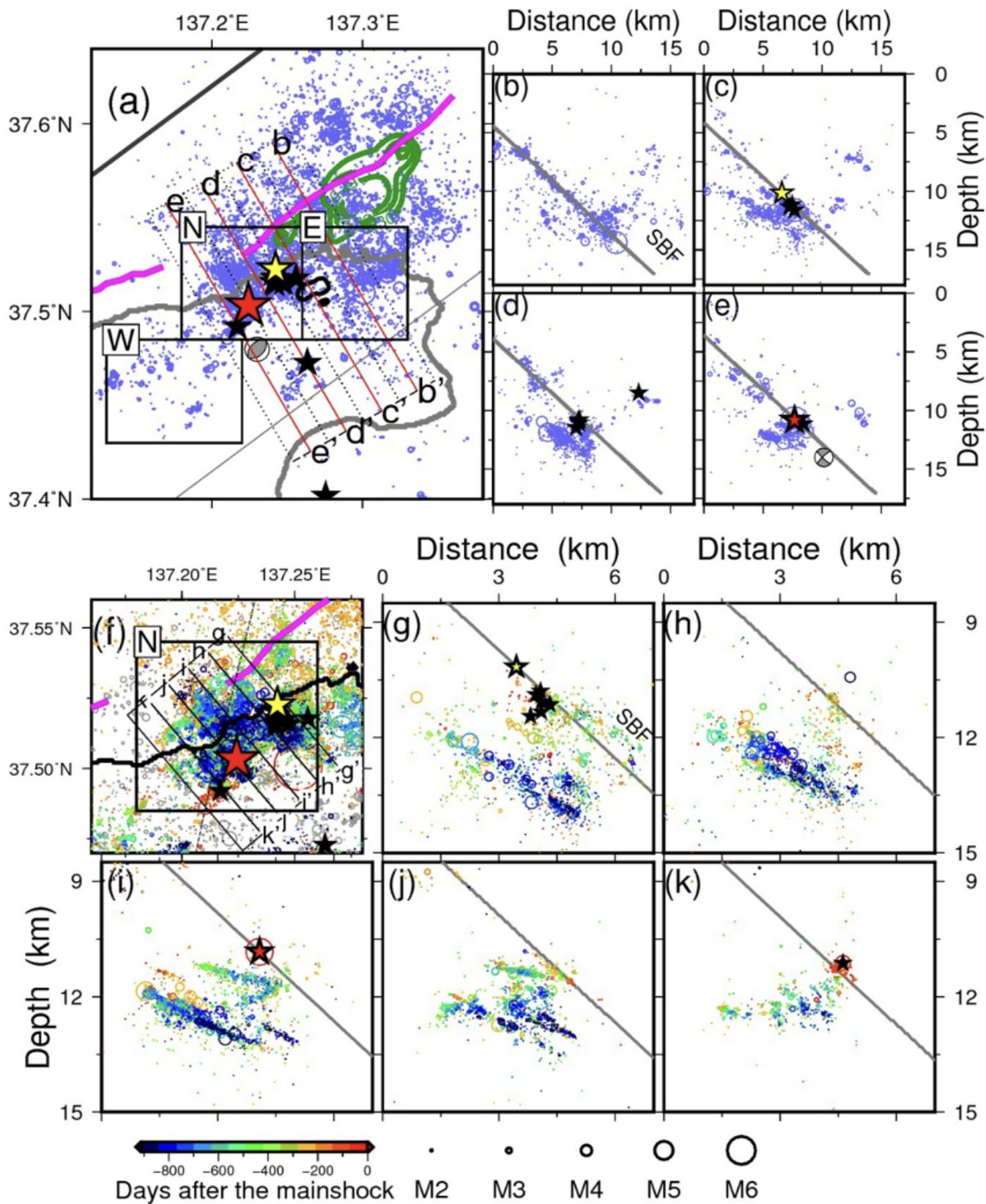


図5

2024年能登半島地震の震源付近の拡大図 (Yoshida, Takagi et al., 2024)。 (a)-(e) 青丸は本震発生前300日以内の地震を表す。赤星と黄星はそれぞれ本震と直前の前震の震源位置を示す。黒星は本震発生前から1日以内の地震を示す。灰色のビーチボールは、非地震性すべりの点震源近似を表す。 (a) 平面図。 (b)-(e) 断面図。 (f)-(k) 本震震源付近の時空間分布。 カラースケールは各地震の発生時刻を示す。 (f) 平面図。 (g)-(k) 断面図。

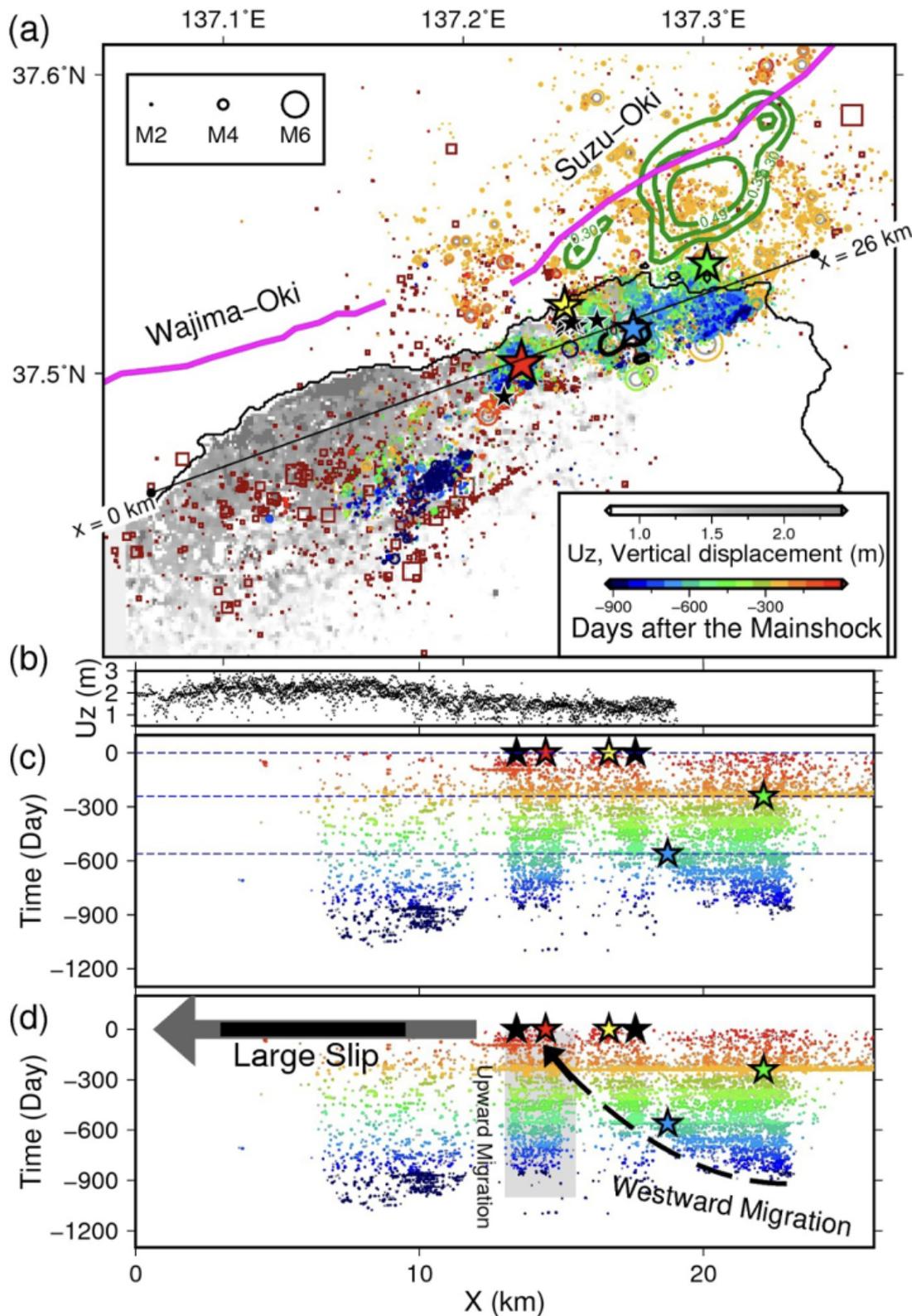


図6

(a) 本震破壊が開始した断層（珠洲伏在断層; SBF）上での微小地震の移動と本震時準鉛直変位 (Yoshida, Takagi et al., 2024)。円は本震発生前の地震の震源を示し、色は発生時を表す。濃赤色の四角は余震を示す。背景色は本震時準鉛直変位を、緑と黒のコンターは、それぞれ 2023年 Mw6.2地震と 2022年 Mw5.2地震の地震時すべり分布を表す。赤、緑、シアン、黄、黒の星印は、それぞれ本震、2023年 Mw6.2地震、2022年 Mw5.2地震、本震直前の前震、および本震発生1日以内の前震の震源を示す。(b) x軸から1km以内の本震時準鉛直変位。(c)および (d) x軸方向 (aに示す) における SBF上での微小地震の移動。(d)には解釈を示す。

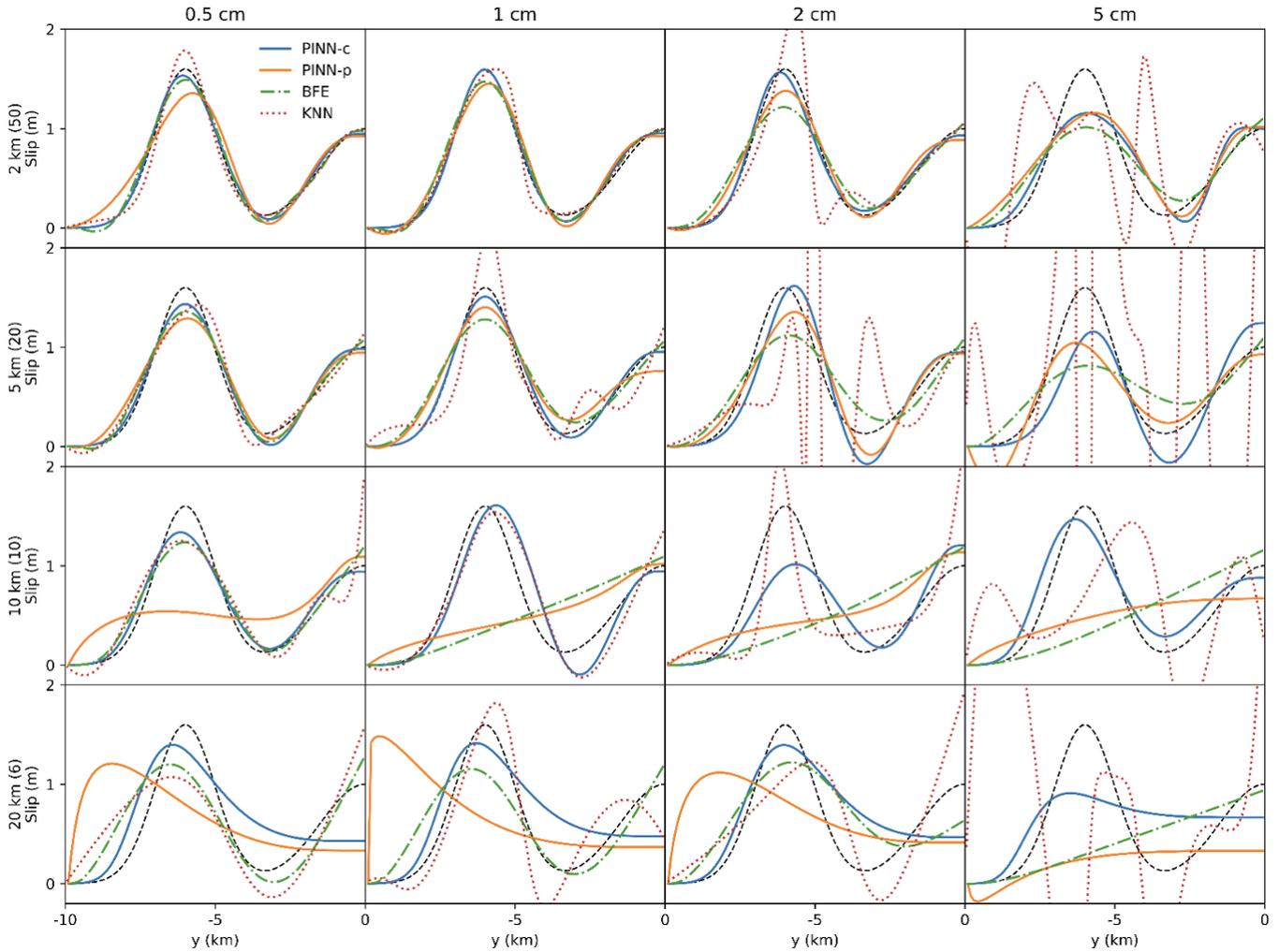


図7

PINN (physics-informed neural network)による面内歪みにおける断層すべり推定結果 (数値実験)。仮定した滑り分布 (黒破線) から計算される地表変位を観測データとして異なる手法で推定した。単一のすべり分布に対し、観測点間隔 (行)・観測誤差 (列) を変更して実験した。PINN-c: PINN (直交座標)、PINN-p: PINN (極座標)、BFE: 基底関数展開 (平滑化条件あり)、KNN: 運動学的ニューラルネットワーク。PINN-cは標準的手法であるBFEより高解像度 (2つのピークを良く再現) で、正則化を陽に課していないにもかかわらず推定が安定している。

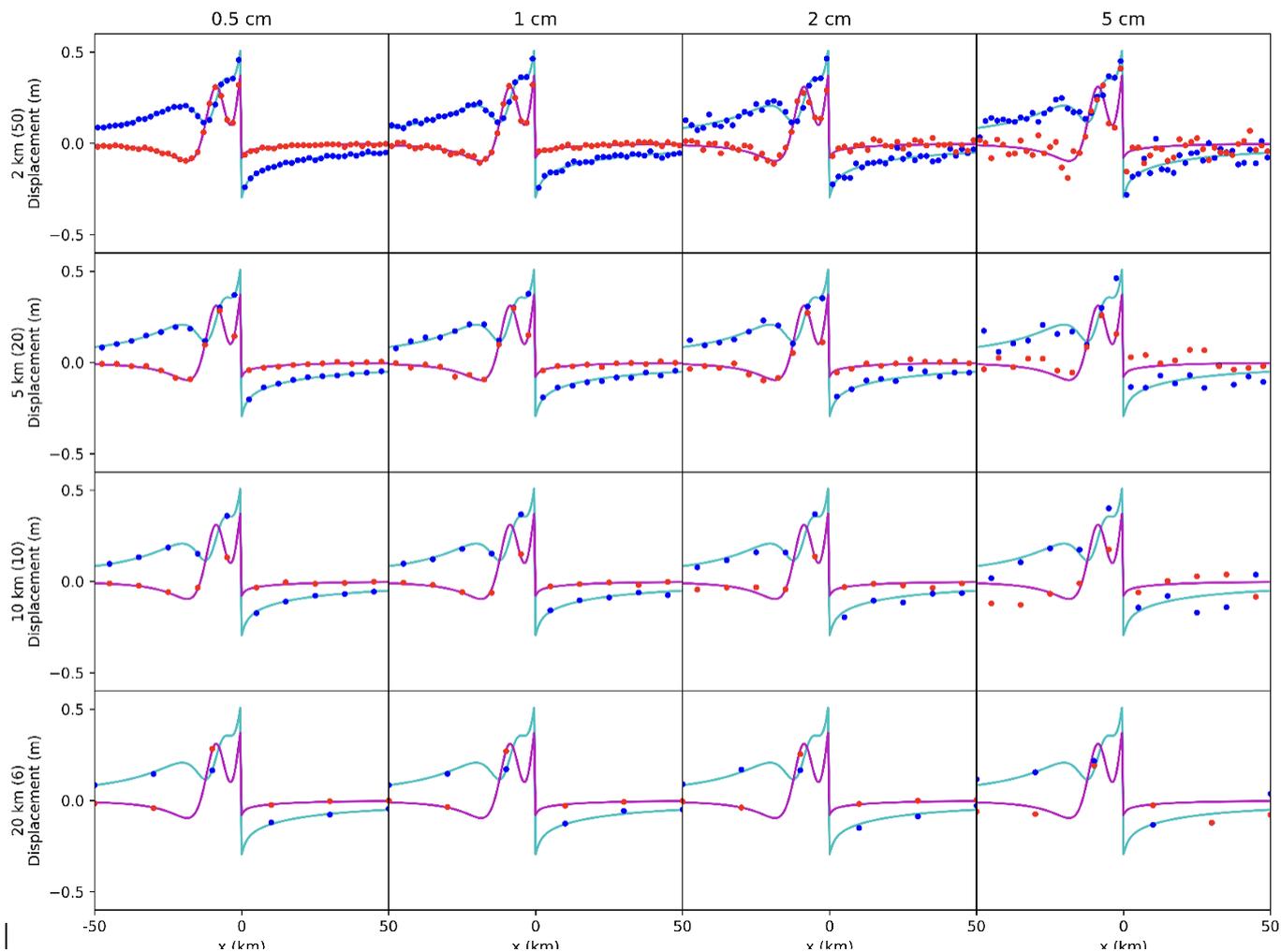


図8  
逆解析に使用した地表変位データ（青：水平、赤：鉛直成分）。実線は解析解を表す。

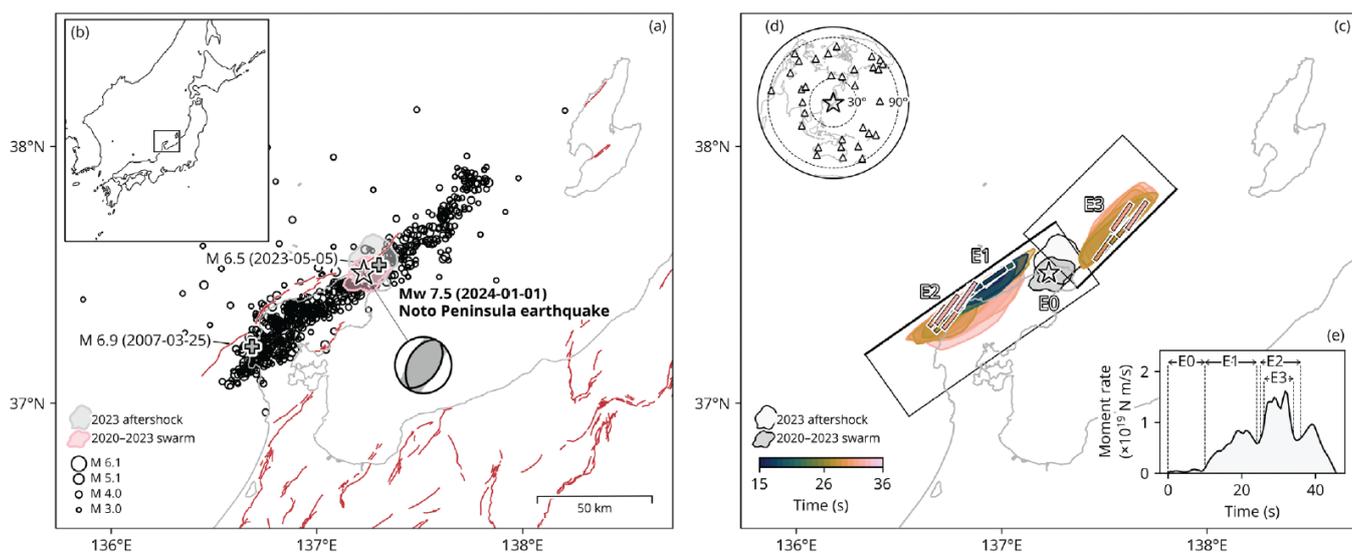


図9  
2024年能登半島地震の破壊過程の概略。(a)気象庁が決定した能登半島地震の余震（丸印）と最近の主要地震の震源（+印）。ピンク色の領域は2020～2023年の群発地震域、灰色の領域は2023年5月に発生したM

6.5能登半島地震の余震域である。赤線は活断層，星印は本震の震源位置を表す。本研究で得られたモーメントテンソル解も震源の南東に示されている。(c) 断層すべりの時空間分布の概略。(d)に示した観測点の遠地実体波を用いて推定した。地震発生後の時間で色分けした領域 (E1~E3)は、この地震で大きな断層すべりが求められた領域を示す。(e)はモーメントレート関数を表す。

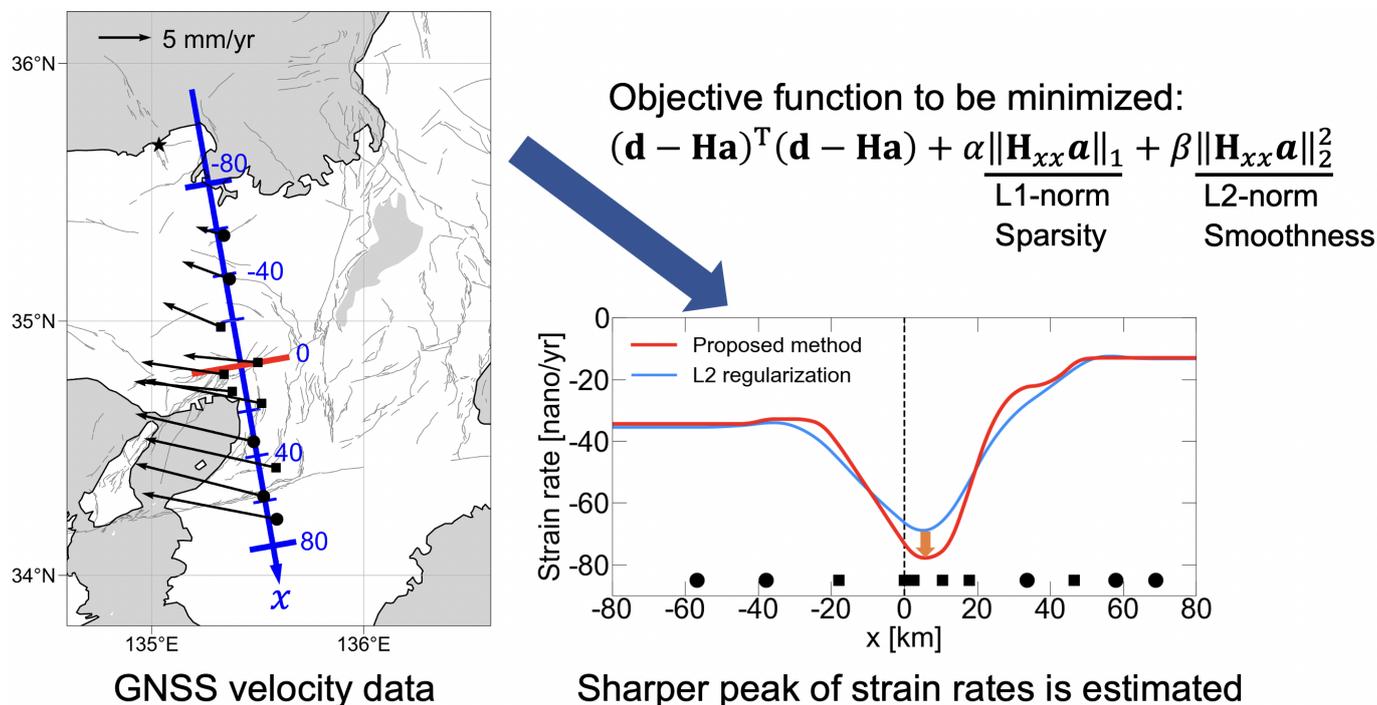


図10

(左) 有馬高槻構造線（赤線）に直交する方向に取った測線上（青線）のGNSSデータの変位速度ベクトル（黒矢印）。（右上）スパースモデリングの評価関数。L1ノルムを新たに導入することで、解にスパース性が要求される。（右下）標準的な手法（青線）とスパースモデリングを用いた提案手法（赤線）との結果の比較。点線は有馬高槻構造線の地表位置を表す。提案手法により平滑化の影響が緩和されることで、歪み速度のより顕著な局在化が推定された。