

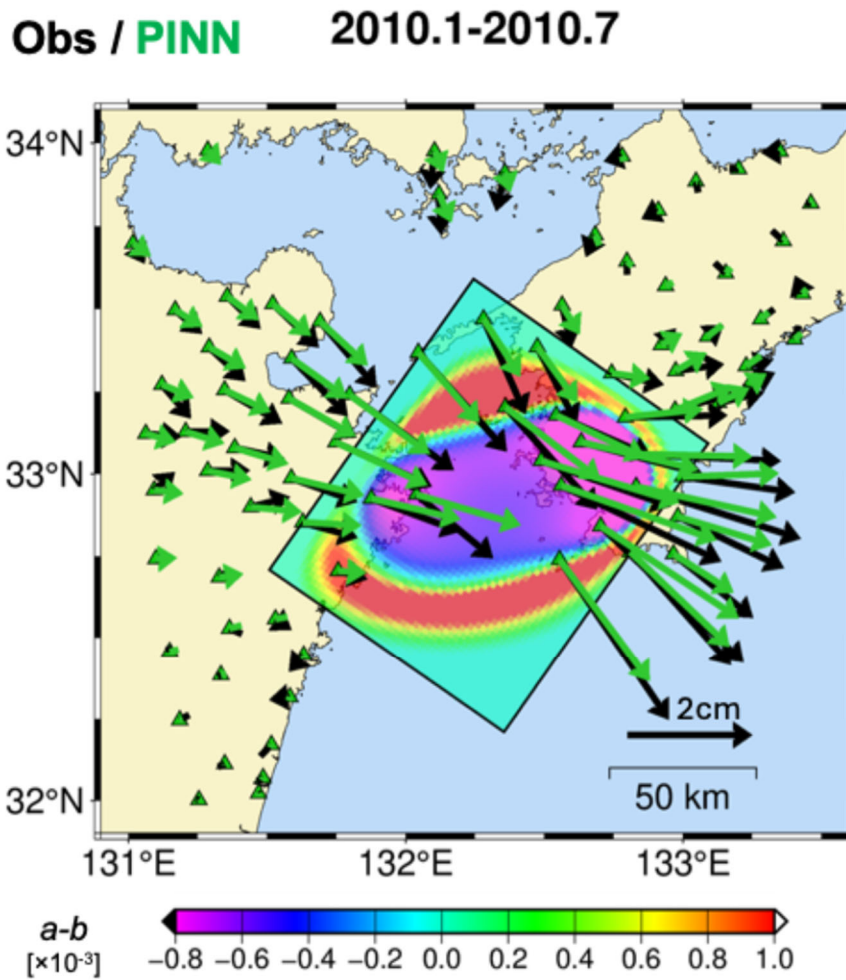
情報科学を活用した
地震調査研究プロジェクト
(STAR-E プロジェクト)
「データ同化断層すべりモニタリング
システムに向けた測地データ解析の革新」

令和7年度
成果報告書

令和8年5月

文部科学省研究開発局
国立大学法人東北大学

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した令和7年度「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-E プロジェクト）「データ同化断層すべりモニタリングに向けた測地データ解析の革新」」の成果を取りまとめたものです。



物理深層学習による2010年豊後水道スロースリップ発生域の摩擦特性推定結果。黒、緑の矢印は、それぞれ観測と物理深層学習による推定モデルによる地表変位を表す。

はじめに

日本列島では兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震を契機として、陸海域問わず稠密な地震・測地観測網が整備されている。このような膨大な地震・測地観測データを、近年のAI・データサイエンスなどの情報科学を用いたビッグデータ解析技術と融合させることで、新たな地震調査研究を推進するための、情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）を令和3年度より開始した。その一課題である本課題は、GNSSを中心とした測地観測網で得られる地殻変動データを対象として、統計学・機械学習に基づく革新的な測地データ解析手法を開発し、地震関連現象に伴う地殻変動検知の向上と、より正確な断層すべり現象の把握を行う。上記を通して、沈み込むプレート境界が現在どのようなすべり状態にあるのか、また今後どのように推移していくのか、さらには将来の巨大地震の発生にどのような影響を与えるか、を評価する“断層すべりモニタリングシステム”の確立を目指す。このモニタリングシステムは、将来的な測地データ解析・システムの自動化により、リアルタイムに断層すべりの現状把握や短期的な推移予測を可能とし、測地データに基づいた短期的な地震発生確率評価手法の確立に貢献し得るものである。

目次

グラビア i

はじめに ii

目次

1. 研究課題の概要	1
2. 研究成果の説明	1
(1) 業務の内容	1
(a) 業務の目的	1
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	1
(c) 5か年の年次実施計画	2
(d) 令和7年度の業務の目的	3
(2) 令和7年度の成果	4
(a) 業務の要約	4
(b) 業務の成果	4
(c) 結論ならびに今後の課題	17
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	17
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	24
3. まとめ	24
4. 活動報告	24
(1) 会議・勉強会	24
(2) アウトリーチ活動	24
5. むすび	25

1. 研究課題の概要

プレート沈み込み帯で繰り返し発生するプレート間巨大地震の発生予測に資する断層すべりモニタリングシステムの確立は、プレート境界が現在どのようなすべり状態にあり今後どう推移していくのかを把握し、それらが巨大地震の発生にどのような影響を与えるのか、を評価する上で重要である。断層すべりの現状把握方法として状態空間モデルを用いた測地データ解析が用いられているが、短期間の地殻変動現象の正確な把握や観測ノイズモデル特性の取り扱いに課題があり、すべりの短期推移予測ができる段階に達していない。そこで本課題では、統計学・機械学習の革新的な手法開発により、地殻変動検知能力の向上を図ることでデータを余すところなく有効活用し、同時に観測ノイズの特性を考慮した断層すべり推定の高度化を行う。加えて、高度化された断層すべり推定結果を用いた、運動学的モデルおよび断層面の摩擦の物理法則を考慮したデータ同化による断層すべり短期推移予測方法を開発する。以上を、南海トラフ全域の測地データを用いて検証し、リアルタイムな断層すべりの現状把握・短期推移予測の基盤となる断層すべりモニタリングシステムの確立を目指す。

2. 研究成果の説明

2. 1 業務題目：データ同化断層すべりモニタリングに向けた測地データ解析の革新

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

情報科学と地震学を融合した測地データ解析の革新により、短期的な地殻変動現象の検知能力向上・より正確な断層すべり推定に向けたデータ解析技術、およびデータ同化に基づく断層すべりの短期的な推移予測手法を確立することで、プレート沈み込み帯で生じる断層すべりの現状把握・短期推移予測に資する断層すべりモニタリングシステムの基盤の構築を目的とする。このうち、短期的な地殻変動現象の検知能力向上・より正確な断層すべり推定に向けたデータ解析技術の開発については課題実施期間の前半(令和3～5年度)に、データ同化に基づく断層すべりの短期的な推移予測手法を確立については、主として課題実施期間の後半(令和5～7年度)に実施する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
東北大学・助教	加納将行	R7. 4. 1～R7. 8. 31	8, 891, 484 円	2, 667, 445 円
同・教授	太田雄策	R7. 9. 1～R8. 3. 31		
同・准教授	福島洋	R7. 4. 1～R8. 3. 31		
同・助教	椋平祐輔	R7. 4. 1～R8. 3. 31		
同・助教	岡田悠太郎	R7. 4. 1～R8. 3. 31		
同・研究員	Yagizalp Okur	R7. 4. 1～R8. 3. 31		

京都大学・准教授	加納将行	R7.9.1～R8.3.31	1,172,005 円	351,601 円
同・教授	宮崎真一	R7.4.1～R8.3.31		
同・教授	西村卓也	R7.4.1～R8.3.31		
国土地理院・研究官	田中優介	R7.4.1～R8.3.31		
統計数理研究所・准教授	矢野恵佑	R7.4.1～R8.3.31	—	—
東京大学・特任研究員	中田令子	R7.4.1～R8.3.31	—	—
海洋研究開発機構・センター長	堀高峰	R7.4.1～R8.3.31	—	—
和歌山大学・講師	八谷大岳	R7.4.1～R8.3.31	—	—

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

年次実施計画を下表に示す。具体的な実施計画は以下に記載する。

	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度
研究項目(a)：統計学・機械学習による地殻変動検知能力の向上					
地殻変動検出	手法開発	手法の高度化	測地データへの適用・システム公開	—	—
地殻変動とノイズの分離	準備（既存研究調査・整理）	手法開発	測地データへの適用・システム公開	—	—
研究項目(b)：観測ノイズの特性を考慮した状態空間モデルの改良					
直接的なモデリング	準備（既存研究調査・整理）	手法開発	測地データへの適用・手法の比較検討	—	—
機械学習によるモデリング	準備（既存研究調査・整理）・手法開発	手法開発		—	—
研究項目(c)：データ同化断層すべりモニタリングの確立					
現状把握・短期推移予測	準備（既存データ同化手法調査・整理）		データ同化手法の議論・検討・手法開発	数値実験による検証 研究項目(a)(b)で得られた成果の実装	測地データへの適用・性能評価
南海トラフでの検証	準備（プレート形状・地下構造・観測データの整備）				

1) 令和3年度：研究項目(a)について、プレート境界で発生する地殻変動現象の検知能力向上に向けたスパース推定手法を開発し、四国西部のGNSSデータを対象に開発手法の検証を行った。また、各種測地データ（GNSS, InSAR, 傾斜計, 歪計）に含まれる信号・ノイズの分離、各々の時空間・周波数特性の定量的な把握手法の検討を開始した。研究項目(b)について、観測ノイズの特性を考慮した断層すべりの推定に向けた状態空間モデルの高度化について、ノイズ特性のモデリング方法の検討と機械学習による特徴量変換を用いた手法の検討を行った。研究項目(c)について、プレート境界の断層すべりの短期推移予測に資する既存データ同化手法の調査と、南海トラフ全域への適用に向けたプレート形状・地下構造などの計算基盤および観測データの整備に着手した。

2) 令和4年度：研究項目(a)について、前年度に続き GNSS を用いたスパース推定手法の開発を継続し、西南日本の沈み込み帯や内陸地域の地殻変動の検出に着手すると共に、地殻変動の空間分布を考慮した手法への拡張を検討した。併せて、空間的稠密な特性を持つ InSAR データ、地殻変動により高い感度を持つ傾斜・歪データの利点を考慮した手法への拡張も検討を開始した。また、各種測地データに含まれる信号・ノイズの分離手法の開発に着手した。研究項目(b)について、観測ノイズの特性を考慮した断層すべりの推定に向けた状態空間モデルの高度化を継続した。特に、ノイズ特性を反映した誤差共分散行列の利用について検討した。研究項目(c)について、プレート境界の断層すべりの短期推移予測に資する既存データ同化手法の整理と、南海トラフ全域への適用に向けたプレート形状・地下構造などの計算基盤の整備を継続した。

3) 令和5年度：研究項目(a)(b)について、前年度までに開発したスパース推定に基づく地殻変動検出システム、信号・ノイズの分離手法、観測ノイズの特性を考慮した断層すべりの推定に向けた状態空間モデルの開発を完成させた。以上により、沈み込み帯や内陸で発生する信号雑音比が低い未知の地殻変動の検出や既存イベントのカタログの充実、断層すべりのより正確な推定を通じた地震関連現象理解の深化を図った。研究項目(c)について、前年度までの検討に基づき、南海トラフでの適用を念頭に置いたデータ同化手法の検討を行い、手法の開発に着手した。

4) 令和6年度：研究項目(c)について、南海トラフでの断層すべりの現状把握・短期推移予測に向けて、前年度までに整理した観測データ・計算基盤と、構築したデータ同化手法に基づき、数値実験による検証を行った。同時に、研究項目(a)(b)の成果に基づき、断層すべりモニタリングシステムの入力となる測地データの解析を行った。その際、手法開発の更なる進展があれば適宜反映させた。

5) 令和7年度：前年度までの研究項目(a)(b)(c)の成果を融合し、南海トラフでの断層すべりの現状把握・短期推移予測を目的としたデータ同化手法を測地データに適用し、開発手法の性能を評価した。上記により、測地データ解析の高度化を通じた断層すべりモニタリングシステムを確立させた。その際、研究項目(a)(b)において手法開発の更なる進展があれば適宜反映させた。

(d) 令和7年度の業務の目的

1) 【研究項目(a)】 統計学・機械学習による地殻変動検知能力の向上

【研究項目(b)】 観測ノイズの特性を考慮した状態空間モデルの改良

研究項目(a)(b)で連携して、プレート境界で発生する短期間の地殻変動検出システムとしての最適な形態を検討する。また、モデル化された観測ノイズの時空間特性の推定誤差評価、広域地殻変動場の把握に向けたクラスタリングの安定性評価等を行う。

2) 【研究項目(c)】 データ同化断層すべりモニタリングの確立

プレート境界の断層すべりの短期推移予測に資する物理深層学習手法の実データへの適用を行う。各研究項目で開発した手法の相互の連携や併用の手段について、現業機関と連携して議論・検討等を行う。

3) プロジェクトの管理・運営

本プロジェクトの運営を円滑に推進するため、ミーティングの開催、今後の方針を議論するための現状の情報共有を継続して行う。また、国内外の学会等に参加し情報収集を行うと共に、得られた成果を発表する。

4) 自発的な研究活動等

自発的な研究活動等に関する実施方針に基づき、所属機関が認めた範囲で自発的な研究活動等を推進する。また、情報科学と地震学の融合分野における若手人材育成と、地震解析を専門とする研究者と連携し研究体制の強化を図る。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

研究項目(a)(b)について、プレート境界で発生する短期間の地殻変動現象の検知能力向上に向け、GNSS 時系列の実データの深層学習による短期的スロースリップ(SSE)のシグナルの自動検出手法の開発を継続し、プレート境界で発生する短期間の地殻変動検出システムとしての最適な形態を検討した。関連して、GNSS 時系列前処理の高度化手法の開発、InSAR を用いた断層クリープ検出およびデータの空間補完・ノイズ低減手法のための深層学習手法の開発を行った。研究項目(c)について、物理深層学習(PINN)による摩擦特性推定手法を、豊後水道長期 SSE の実観測データに適用し、同手法の有効性を検証した。各研究項目で開発した手法の相互の連携や併用の手段について、現業機関と連携して議論・検討等を行った。加えて、勉強会を定期的に行い、論文出版とプログラム公開を行った。

(b) 業務の成果

1) 【研究項目(a)】 統計学・機械学習による地殻変動検知能力の向上

【研究項目(b)】 観測ノイズの特性を考慮した状態空間モデルの改良

1-1) GNSS 時系列の深層学習による短期的 SSE の自動検出

地殻変動検知能力の向上を目指す研究内容として、GNSS 時系列の実データの深層学習による SSE シグナルの自動検出手法の構築に前年度に引き続き取り組んだ。特に今年度は単点・複数点によるシグナル判定の結果を比較した上で、単点での判定を時空間的に結合する方式での SSE モニタリングを構築する方針に決定し、その検討を進めた。

西南日本全域の 770 ヶ所の電子基準点の日座標時系列を用い、Okada et al. (2022) による短期的 SSE 検出カタログに基づいてシグナル・ノイズ時系列を抽出して学習データとした。ドロネー三角網で隣接する 2 観測点の時系列を並べたものを入力とした場合の学習・

判定結果が図 1 である。正答率は 77%程度で単点での学習・判定とほぼ同じ値である。また、3 mm 以上のシグナルで見逃しがゼロとなったが、これも単点の場合とほぼ同じ判定傾向である。本研究で扱っている SSE はモーメントマグニチュード (Mw) 6 前後のものが中心で、シグナルの空間的広がり概ね半径 30-40 km 以内である。対して電子基準点の配置間隔は平均 20 km 程度と近いスケールのため、隣接観測点を併用してもシグナル発生域の中心を飛び越えてしまう場合が多い。すなわち振幅の小さい不明瞭なシグナルを含むデータ、またはシグナル・ノイズが混在するデータが多くなる。このため、複数点を併用しても情報量が増えず、検出性能が向上しないと考えられる。

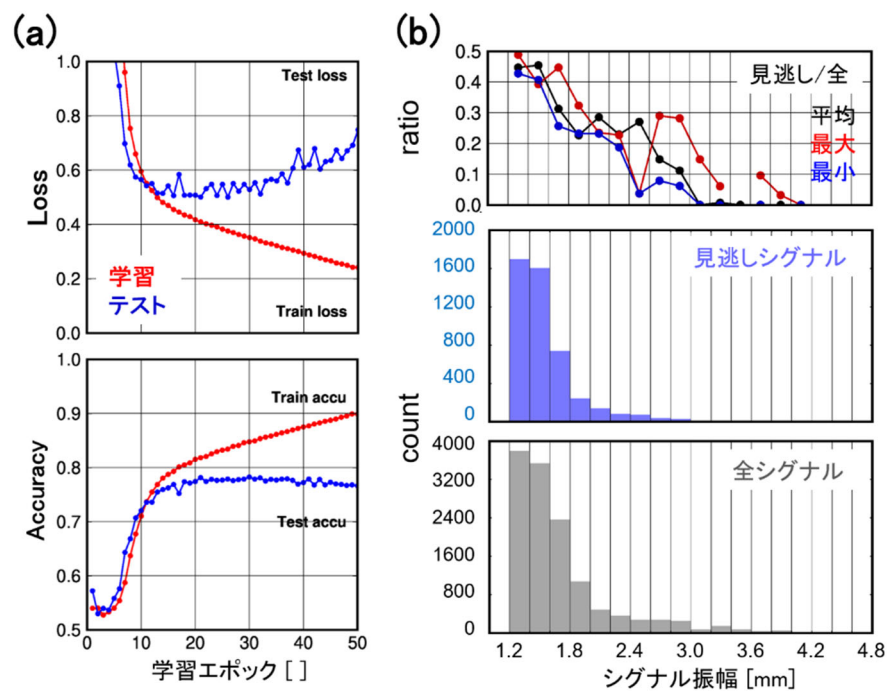


図 1. 隣接 2 観測点の時系列を併用して学習・判定を試みた結果。(a) 損失関数・正答率の値の推移。(b) シグナルの大きさと判定成績の関係。下段がテストで与えた全シグナルの分布、中段が見逃した（正解はシグナルだがノイズと判定された）シグナルの分布で、2 点のシグナルの平均振幅で表示。上段は見逃しの割合で、2 点のシグナル振幅の平均・最大・最小に対する 3 種類の結果を表示。いずれでも比率が左肩上がりの傾向となっており、小さいシグナルほど見逃しの割合が高いことが確認できる。

上記を受けて単点での判定を時空間的に結合する方式での SSE モニタリングを構築する方針に決定し、実際に長期連続の判定結果の挙動を確認した。最も SSE が多い豊後水道周辺の観測点の 25 年間の時系列を、単点のデータによる学習モデルに連続で入力した場合のシグナル確率の時空間分布を図 2 に示す。最低 0.2-0.3 程度の値が観測期間を通して常に示されており、これが現状のモデルにおけるノイズレベルといえる。また確率 0.5 以上のデータ点は合計で 4902 あり、このうち 3 分の 1 にあたる 1643 が正解ラベルと対応する。基本的に正解のシグナルの期間・観測点の一部のみを検出しており、取りこぼしが多い結果となったが、学習用データの増幅や学習手法の改良でモデルの性能が向上すれば、さ

らに検出を増やせる可能性がある。一方、残る 3 分の 2 の 3259 は対応する正解イベントがなく基本的に誤検知と考えられるが、これらは 1 観測点のみで孤立した検出が多い。一定期間内に隣接 2 観測点以上で検出した場合に限定すれば、個数は低減する。採用条件と検出数の状況を表 1 に示す。前後 10 日以内・隣接 2 観測点以上まで条件を絞れば、誤検知の 4 割を棄却可能である。ただし正検知もある程度放棄することになる点は注意を要する。プレート境界で発生する SSE のすべり方向や観測点との位置関係はある程度決まっているため、より高度な採用条件を考案しうる。以上のように時空間関係に着目した判断基準について検討を進めた。

上記研究は外部の現業機関に所属する研究協力者の協力に基づいて実施された。

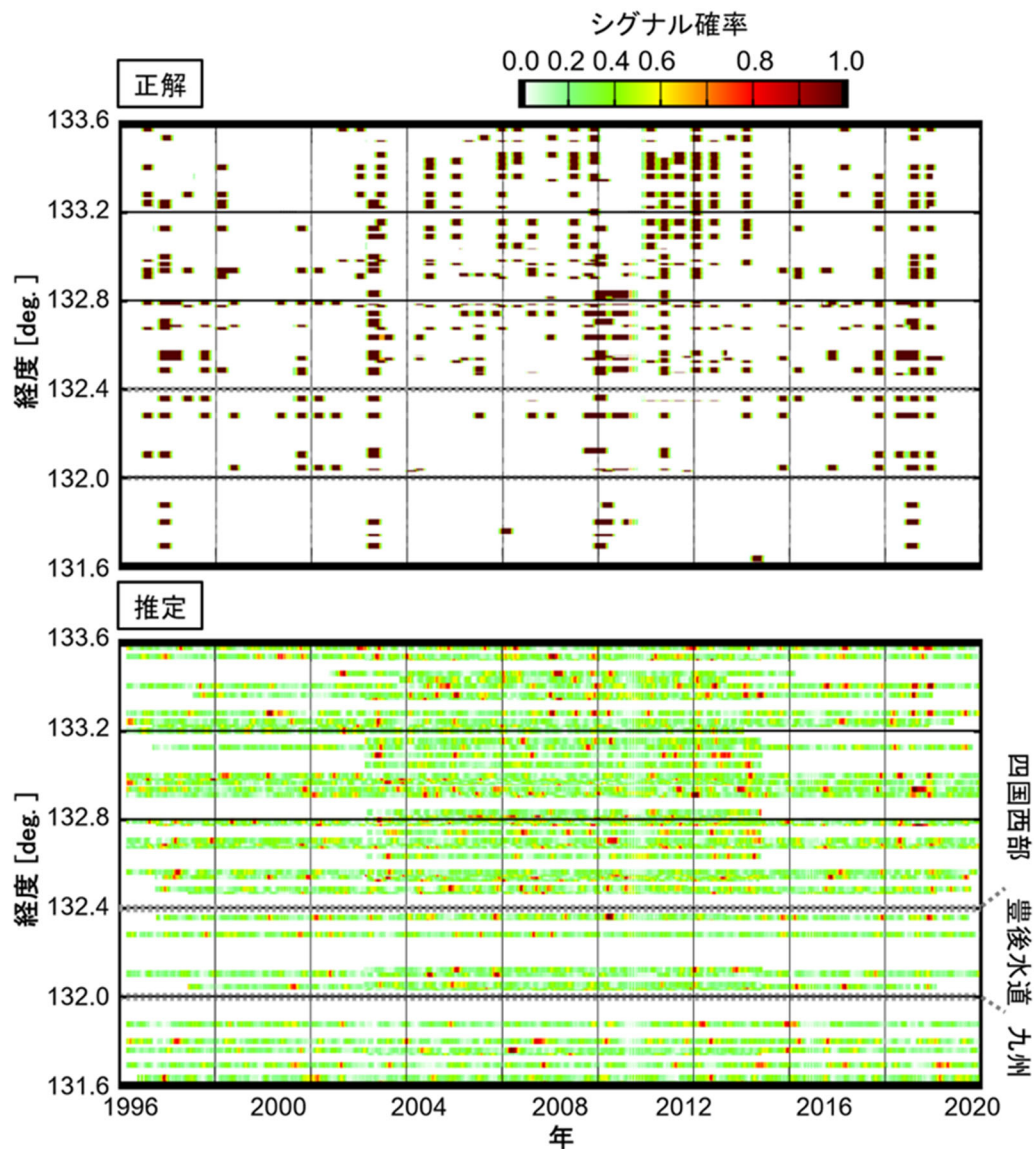


図 2. 四国西部から九州の 60 観測点の全観測時系列を、10 日おきに学習モデルに入力した場合のシグナル確率の推移。6 エポック移動平均の値をカラースケールで表示。横軸が時間、縦軸が経度で、図の上方が東である。

表 1. 図 2 で示した結果における、シグナル検出の個数。シグナル確率 0.5 以上のデータ点を検出と見なし、正解ラベルでもシグナルであるものを正検知、そうでないものを誤検知と呼称。最上段が生 の推定結果における個数で、以下が採用条件による個数の変化。生 の結果に対する減少幅を括弧内に表示。

[点・エポック]	検出総数	正検知数	誤検知数
生 の推定結果	4902	1643	3259
隣接 2 点以上 前後 30 日	3794	1380 (-16.1%)	2414 (-25.9%)
隣接 2 点以上 前後 20 日	3527	1331 (-19.0%)	2196 (-32.6%)
隣接 2 点以上 前後 10 日	3189	1254 (-23.7%)	1935 (-40.6%)

1-2) 時定数の短い過渡的な変動を含む GNSS 座標時系列の季節調整の高度化

GNSS データには、陸水変動等に起因する 1 年の周期を持つ季節変動が記録される。長期的 SSE 等の継続期間の長い微小変動の検出・モデリングの際には、季節変動を事前に取り除く必要がある。近年の GNSS データ解析では、季節変動の振幅の年変化や複雑なトレンド変化を表現できる、局所回帰に基づく季節調整手法である STL (Cleveland et al., 1990) が、従来用いられている関数モデル回帰の代替手法として注目されている。一方で、STL は推定の際にトレンド成分に強い平滑化を適用するため、余効変動等の継続期間の短い過渡変動 (以後 episodic 成分) を表現することができない。そこで、episodic 成分を含む時系列に対しても季節調整を実施できる新手法 Seasonal-Trend-Episodic decomposition based on Loess (STEL)を開発した (岡田・上田, 2025)。

STEL は、季節変動成分とトレンド成分を局所回帰により再帰的に推定するという STL のアルゴリズムに、ユーザー定義の手法を用いて episodic 成分を推定する機構を組み込んだ手法である。人工データを用いた検証 (図 3) では、STEL は季節変動・トレンド・episodic の各成分を高精度で分解できることがわかった。また、開発手法を実データに適用し、従来の関数モデル回帰による季節調整手法と比較した結果、STEL は従来手法と比較して、振幅が年変化する季節変動をよりよく表現できることが明らかになった (図 4)。

提案手法は論文として発表されただけでなく、Fortran/Python で実装されたプログラムがオープンソースで公開されており、他の研究 (Okada, Nishimura, and Freymueller, accepted; Okada, Ohta et al., in revision) でも積極的に活用されるとともに、その有効性が実証されている。

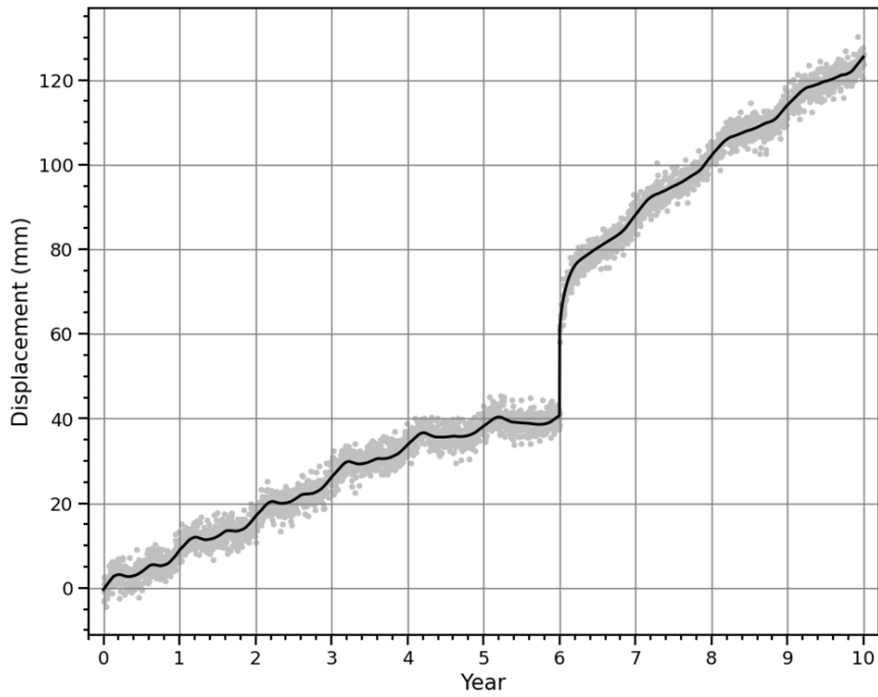


図 3. 人工データに対する STEL の適用例。灰色の丸は人工データを、黒線は推定された季節変動・トレンド・episodic 成分の和を示す。

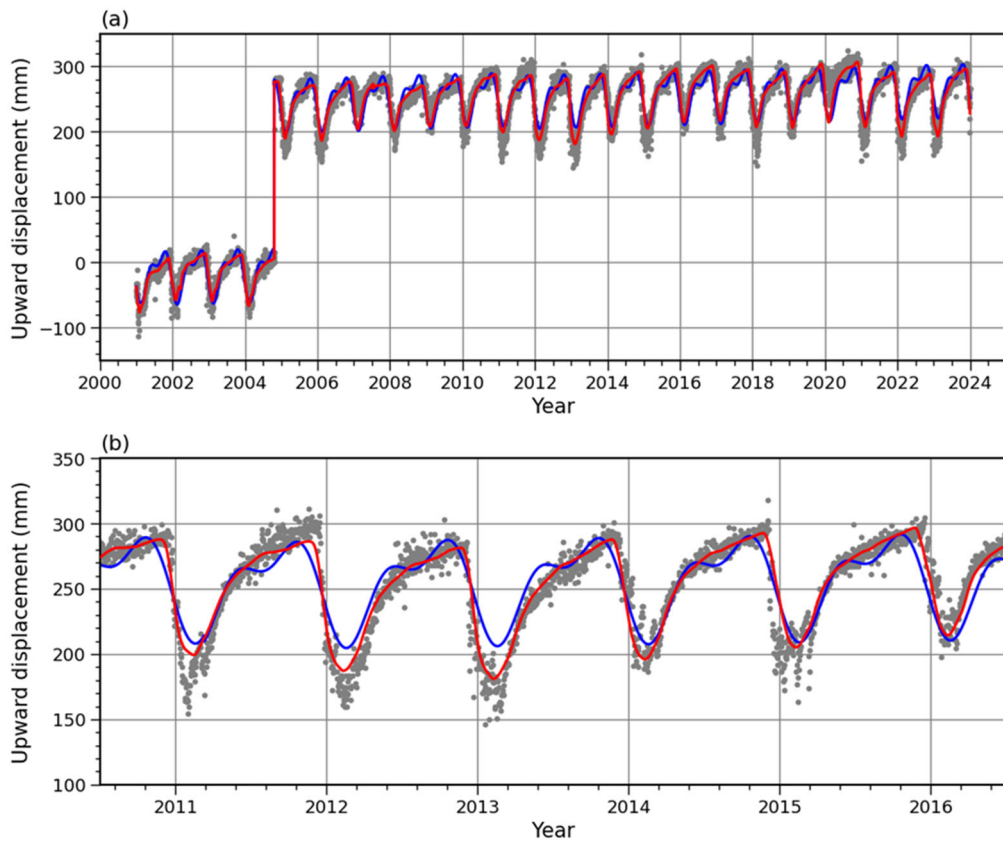


図 4. GEONET 小千谷 (新潟県小千谷市) の上下成分の座標値 (灰色丸) に対する STEL (赤線) と関数モデル回帰 (青線) の適用結果。(a) 時系列全体での比較。(b) 2010 年から 2016 年までのデータでの比較。

1-3) InSAR 時系列を用いた断層クリープ速度変化の検出

InSAR 解析では面的にデータを取得できるため、断層のクリープ領域の高精度な把握に適している。一方で、データ取得間隔が疎であり、ノイズレベルが高いため、クリープ速度の微小な時間変化を検出した事例は限定的である。そこで本研究では、フィリピン断層におけるクリープを対象に、InSAR から得られる変位時系列から、断層クリープの時空間変動を検出する深層学習手法を開発した。まず、dislocation model (Okada, 1985) を用いて、フィリピン断層におけるすべりに伴う地殻変動場を多数のすべりパターンについて計算した。この正解変位場に大気ノイズを加算し、合成データを作成した。また、誤検出を抑制するため、全体の 10%に正解変位場がゼロとなるケースを含めた。これらの合成データに対し、U-Net 構造 (Ronneberger et al., 2015) を持つ畳み込みニューラルネットワーク (CNN) モデルを作成し、学習を行った (図 5 a)。

学習したモデルの評価のため、学習済みモデルを異なるシードで独立に生成した 50,000 サンプルに適用した。性能評価には、信号対雑音比 (SNR) および Variance Reduction (VR) を用いた。その結果、SNR が約 1%以上の場合にモデルが地殻変動場を効果的に抽出でき、このとき Variance Reduction は約 80%を超える (図 5 b, c)。また、非常に低い SNR 条件においても、シグナルの特性に依存するものの、約 0.1%程度までの再構成に成功する例が確認された。

学習したモデルを 2017 年 6 月 3 日から 7 月 15 日の期間における ALOS-2 下降軌道の LOS 変位データに適用した。このデータは Mw 6.5 レイテ地震およびその Mw 5.8 余震に伴う地震時変位を捉えている。モデルによる予測変位を Dianala et al. (2020) により推定された地震時すべりモデルからの理論変位と比較したところ、両者はよく一致し、本手法が実観測データに含まれた断層すべりに起因する変形パターンを復元可能であるといえる (図 6)。

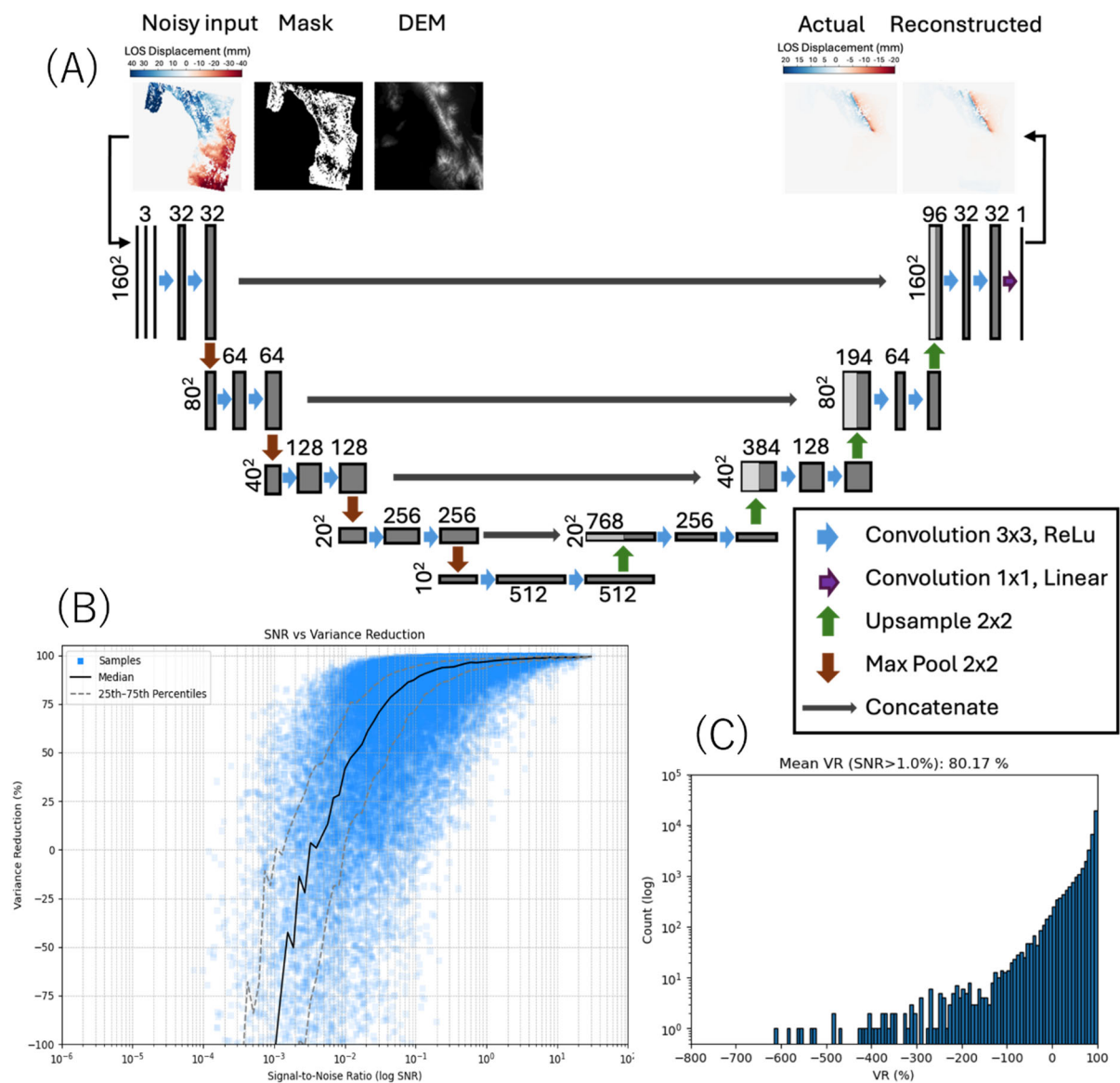


図 5. (A) 使用した CNN モデル。本モデルは、ノイズを含む視線方向の変位、有効ピクセルを示すバイナリマスク (Huang et al., 2020)、および正規化されたデジタル標高モデル (DEM) (Rouet-Leduc et al., 2021) からなるマルチチャネル入力を用いる。出力はノイズ低減された変位場である。(B) モデル性能評価。50,000 の合成データに対する SNR と VR の関係を示す。青色の四角は各サンプルを表し、黒の実線は VR の中央値、破線は第 25～第 75 パーセンタイルの範囲を示す。(C) SNR が 1%以上のサンプルにおける VR の頻度分布。

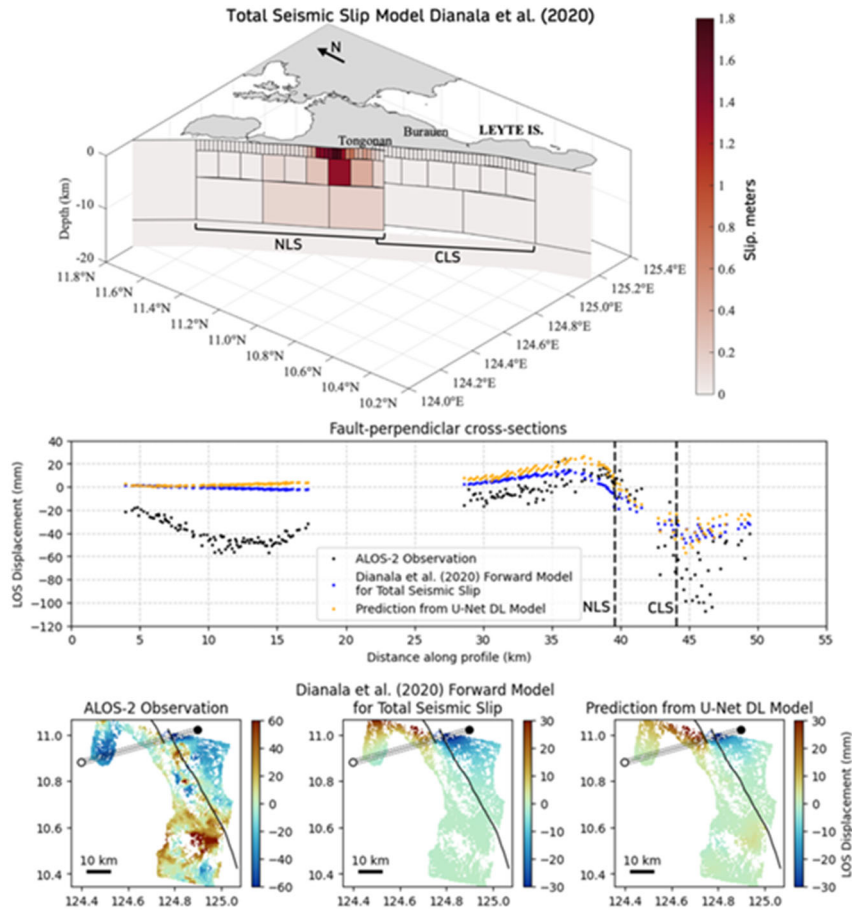


図6. 2017年レイテ地震系列における観測およびモデル化された衛星視線方向（LOS）の変位の比較。上段：Dianala et al. (2020) による地震時すべり分布。中段：断層直交方向に沿ったLOSプロファイル。ALOS-2観測（灰色）、既存のすべりモデル（Dianala et al., 2020）からの計算値（青）、およびU-Netによる予測（橙）を示す。下段：LOS変位マップ。ALOS-2観測、フォワード計算結果、およびモデル予測結果を表す。

1-4) 深層学習を用いた InSAR/GNSS データの空間補完・ノイズ低減手法の開発

面的な観測を行う InSAR と、高時間解像度の観測を実施できる GNSS は、相補的な地殻変動観測手法である。大地震のすべり分布推定等、両者を統合的に用いた解析は広く実施されている一方、微小変動解析手法は、それぞれの観測手法で独自に発展してきた（e.g., Okada et al., 2022; Rouet-Leduc et al., 2021）。そこで本研究では、微小変動解析の更なる高度化を目指して、深層学習を用いて InSAR/GNSS データを統合的に解析する手法を開発した。

開発したモデルでは、先行研究（Nakagawa et al., in prep.; Rouet-Leduc et al., 2021）に倣い、CNN を用いて観測手法ごとの入力をノイズ低減・空間補完した後、得られた特徴マップを結合し再度畳み込むことで、2つのブロックで得られた情報の統合を行う（図7）。モデルの訓練は、実データのノイズ特性を考慮し作成した人工データを用いて実施した。人工データを用いたモデル性能の検証では、正解変位の最大振幅が数 mm の事例で

も、水平・上下成分における正解とモデル出力の間の平均的な VR がそれぞれ約 80%、約 60% と、モデル出力は高い精度で正解データと整合することを確認した。また、モデルにおける InSAR データの寄与を調べるために、GNSS データのみを用いたモデルを追加で作成し、人工データを用いた性能比較を行った。その結果、InSAR と GNSS の両者を用いることで、空間短波長変動の再現能力が向上することが明らかとなった。このことから、開発手法は、これまで報告事例が世界的にも限定的である、内陸活断層における微小変動等に対して有効であることが期待される。

さらに、実観測データに対する手法の有効性を確認するため、2019 年 5 月に日向灘地域で発生した Mw 6.2 のプレート境界地震前後のデータに対しモデルの適用を行った。得られた結果は、短波長の変動の少ない、滑らかな変位パターンを示す (図 8 a-c)。この変位パターンが対象とした地震の変位として妥当なものか確認するために、モデル出力を用いてグリッドサーチによる矩形断層推定を実施した。得られた断層モデル (Mw 6.5) は、地震波データに基づき推定された CMT 解 (Mw 6.2) と、規模と水平位置の両面で整合的な結果となった (図 8 d)。

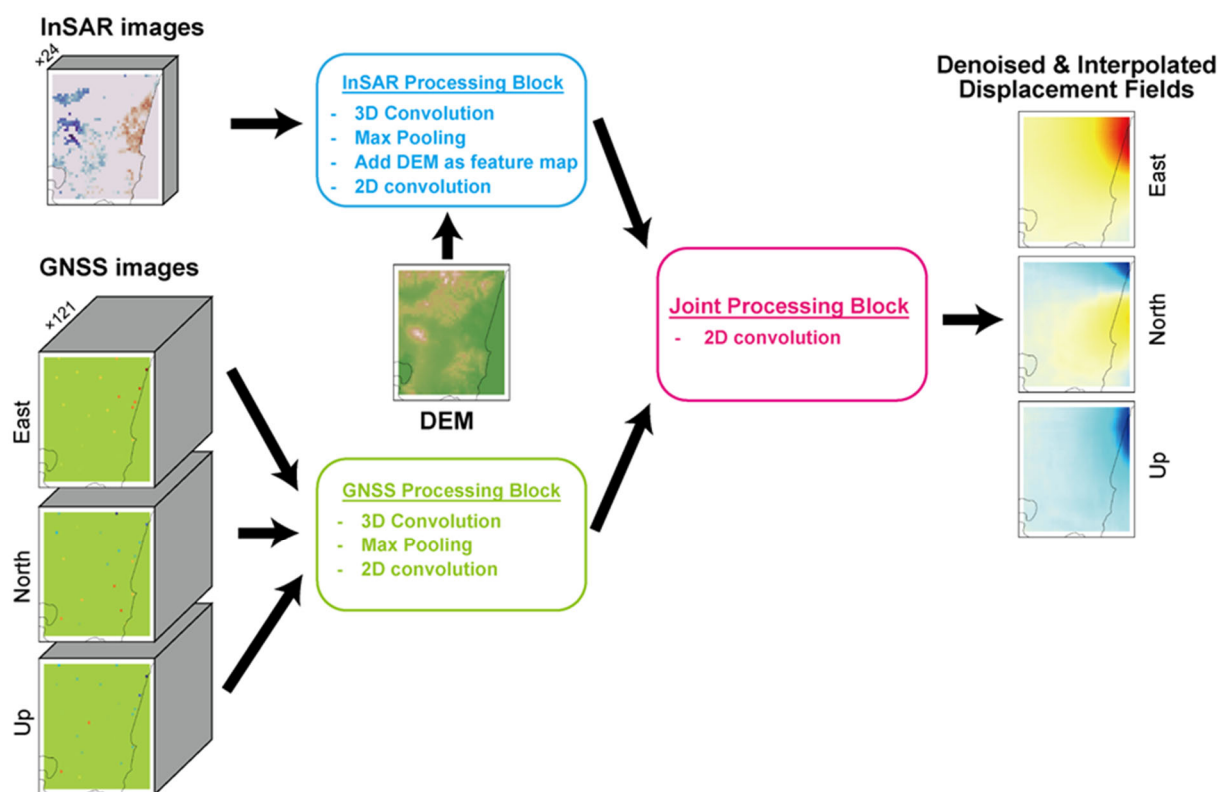


図 7. 開発した深層学習モデルの構造。

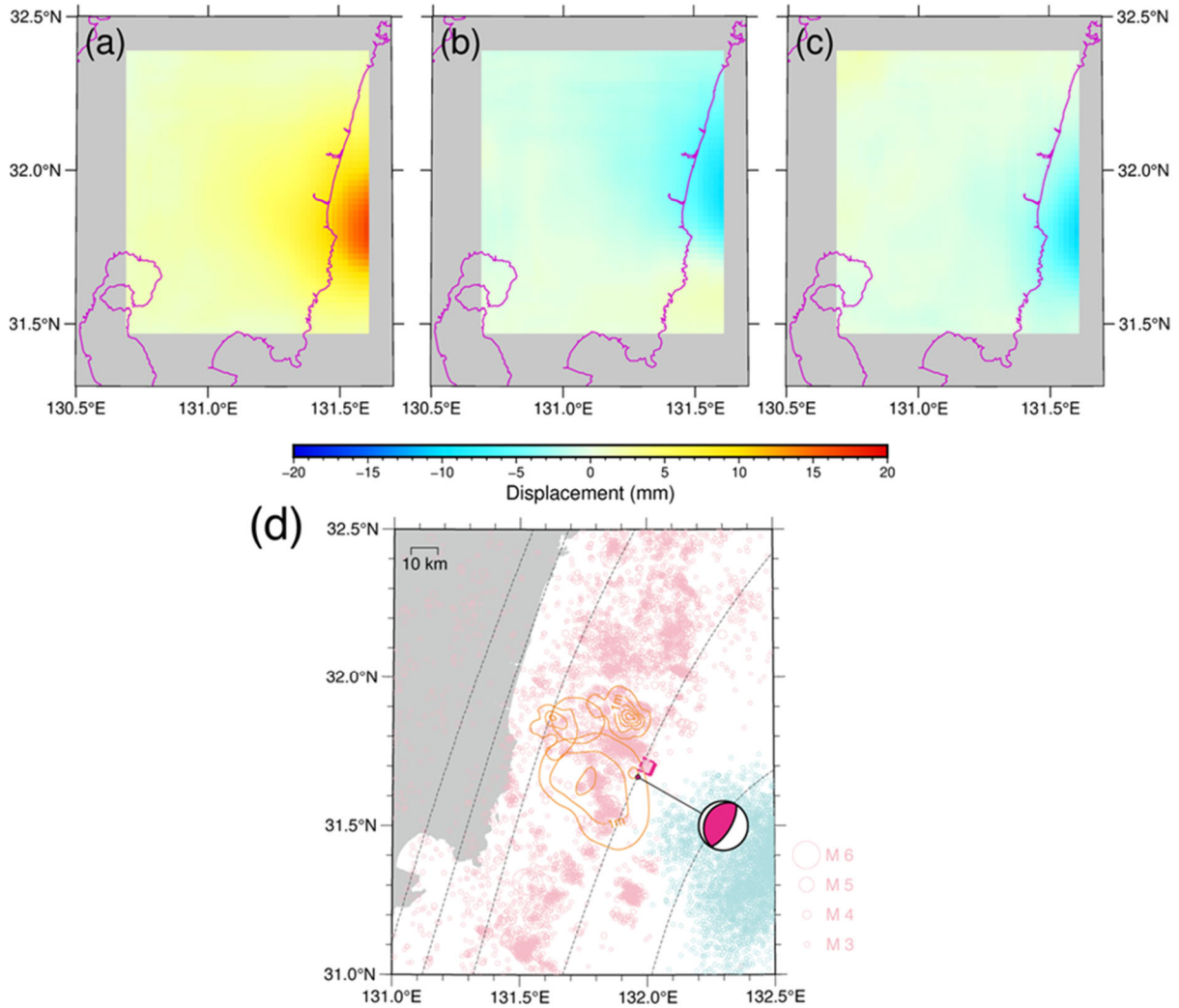


図 8. 2019 年 5 月の地震前後のデータに開発したモデルを適用した結果。(a)東西成分。(b)南北成分。(c)上下成分。(d) (a)-(c)を用いて推定した地震断層モデル (桃色矩形) と地震波から推定された震源位置 (桃色丸) の比較。薄桃色の丸はこの地域のプレート境界地震 (気象庁カタログ) を、薄水色の丸はスロー地震 (Yamashita et al., 2021) をそれぞれ示す。また、橙色の等値線はこの地域の大地震のすべりモデルを示す (Yagi et al., 1999; Itoh, 2025; Zhang et al., 2025)。

2) 【研究項目(c)】 データ同化断層すべりモニタリングの確立

2-1) 物理深層学習 (PINN) に基づく摩擦特性推定・断層すべり予測手法の開発

データ同化に基づく断層すべりモニタリングの確立を目指し、前年度に二次元平面断層モデル上で実施した Physics-Informed Neural Networks (PINNs) による摩擦特性推定の数値実験 (Fukushima et al., 2025) を踏まえて、実観測データへの適用を行った。2010 年の豊後水道 SSE を対象とし、GEONET 全 86 観測点の時系列変位データを用いて、速度状態依存摩擦則における摩擦パラメータ a 、 $a-b$ 、 L の空間分布を推定した。本 SSE は、摩擦特性の空間分布を仮定しマルコフ連鎖モンテカルロ法により推定を行った Kano et al.

(2024) (以下 K24) の解析対象でもあり、同一データに対して PINN を適用し結果を比較した。PINN による逆解析では、すべり速度 $v(x, y, t)$ と状態変数 $\theta(x, y, t)$ の時空間発展、ならびに摩擦パラメータ $a(x, y)$ 、 $a-b(x, y)$ 、 $L(x, y)$ の空間分布をニューラルネットワークで表現する。これらが物理法則（準動的弾性と速度状態依存摩擦則）と観測データの両方を満たすように損失関数を構成し、ネットワークのパラメータを最適化した。

図 7 に示すとおり、PINN による推定モデルは、K24 モデルに比べて地表地殻変動の時空間パターンを高精度に再現した。推定された摩擦特性は、SSE が発生する豊後水道下に $a-b < 0$ の速度弱化域が広がり、その周囲を $a-b > 0$ の速度強化域が取り囲むという構造を示す。とりわけ四国南西部では、強い速度弱化特性と小さな特性すべり距離 L が推定され、核形成長さが相対的に小さい領域が同定された。この条件付き不安定領域で SSE が核形成し、その後豊後水道へ伝播するという力学像は、2009 年 7 月から 2010 年 1 月に四国南西部からすべりが開始し、2010 年 1 月から 2010 年 7 月に豊後水道へ大きなすべりが広がったという観測変位の時空間パターンと整合的である。実際、四国南西部の GNSS 観測点では 2009 年 7 月から滑らかな南東方向の変位増加が記録されており、同地域直下での SSE 核形成を示唆している。一方、九州の観測点では 2009 年 7 月～2010 年 1 月に顕著な変位が見られないものの、2010 年 1 月以降に急激な増加が生じており、四国南西部からのすべり西方伝播と整合する。摩擦特性の空間不均質を推定する PINN とは対照的に、均質な摩擦パッチを仮定する K24 モデルは SSE 領域全体で一様かつ緩慢な核形成を生じさせ、2010 年 1 月以降のすべり速度の急増を説明できない。これらの結果は、SSE の時空間発展推定における摩擦特性の空間不均質の導入の重要性を示している。

以上より、PINN に基づく摩擦特性推定手法を実データに適用し、摩擦不均質を推定する逆問題を解くことで、従来のデータ同化手法に比べて観測データへの適合度を向上させられることを示した。本成果は、断層すべりモニタリングにおける摩擦不均質の考慮の重要性を裏づけるとともに、高自由度のデータ同化を実現する PINN の有効性と潜在力を示唆する。

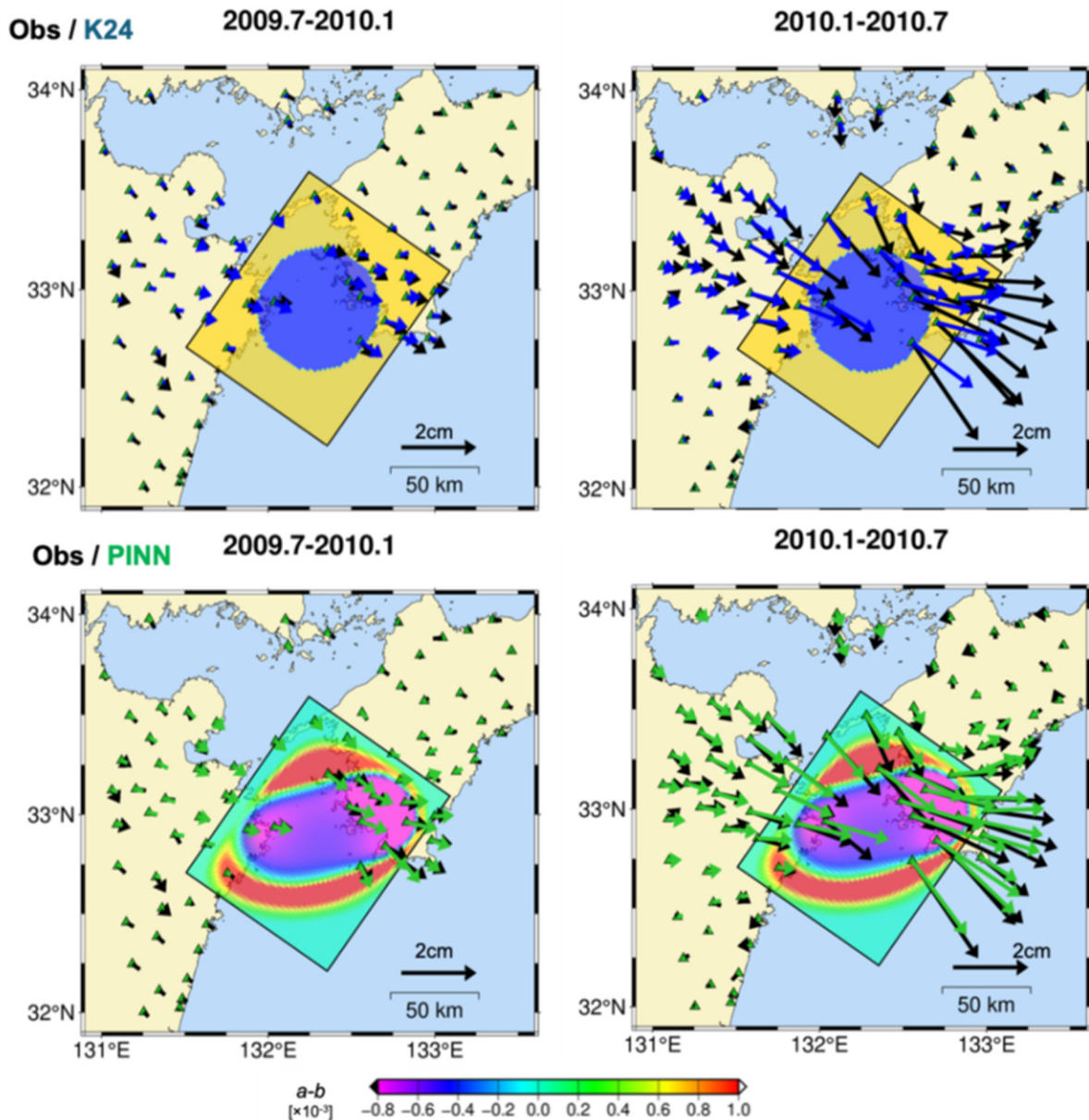


図9. PINNによる摩擦特性(a-b)推定結果。左図は2009年7月から2010年1月、右図は2010年1月から2010年7月の変位場を示す。黒、青、緑の矢印は、それぞれ観測、K24モデル、PINNモデルによる変位を表す。

引用文献

- Okada, Y., Nishimura, T., Tabei, T., Matsushima, T. and Hirose, H.: 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, 2022.
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., and Terpenning, I.: STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess, J. Off. Stat. 6(1), 3-33, 1990.
- 岡田悠太郎, 上田拓: 季節調整手法 STL の開発と GNSS 日座標データへの適用, 測地

- 学会誌 71, 1-11, 2025.
- Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), pp. 1135-1154, 1985.
 - Rouet-Leduc, B., Jolivet, R., Dalaison, M., Johnson, P. A., and Hulbert, C.: Autonomous extraction of millimeter-scale deformation in InSAR time series using deep learning, *Nat Commun* 12, 6480, 2021.
 - Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, in *Lecture Notes in Computer Science*, Cham: Springer International Publishing (Lecture notes in computer science), pp. 234-241, 2015.
 - Dianala, J.D.B., Jolivet, R., Thomas, M.Y., Fukushima, Y., Parsons, B. and Walker, R.: The Relationship Between Seismic and Aseismic Slip on the Philippine Fault on Leyte Island: Bayesian Modeling of Fault Slip and Geothermal Subsidence, *J Geophys Res: Solid Earth*, 125, e2020JB020052, 2020.
 - Huang, D., Yin, L., Guo, H., Tang, W. and Wan, T.R.: FAU-net: Fixup initialization channel attention neural network for complex blood vessel segmentation, *Applied sciences (Basel, Switzerland)*, 10(18), p. 6280, 2020.
 - Yamashita, Y., Shinohara, M., and Yamada, T.: Shallow tectonic tremor activities in Hyuga-nada, Nankai subduction zone, based on long-term broadband ocean bottom seismic observations, *Earth Planets Space*, 73, 196, 2021.
 - Yagi, Y., Kikuchi, M., Yoshida, S., and Sagiya, T.: Comparison of the coseismic rupture with the aftershock distribution in the Hyuga-nada Earthquakes of 1996, *Geophys Res Lett*, 26(20), 3161-3164, 1999.
 - Itoh, Y.: Coseismic Slip and Early Afterslip of the 2024 Hyuganada Earthquake Modulated by a Subducted Seamount, *Geophys Res Lett*, 52(2), e2024GL112826, 2025.
 - Zhang, X., Li, S., and Chen, L.: Unexpected megathrust slip evolution revealed by the 2024 Mw 7.1 and the 2025 Mw 6.8 Hyuga-nada earthquakes in southwest Japan, *Earth Planet Sci Lett* 662, 119384, 2025.
 - Fukushima, R., Kano, M., Hirahara, K., Ohtani, M., Im, K., and Avouac, J.-P.: Physics-informed deep learning for estimating the spatial distribution of frictional parameters in slow slip regions, *J Geophys. Res: Solid Earth*, 130, e2024JB030256, 2025.
 - Kano, M., Tanaka, Y., Sato, D., Iinuma, T. & Hori, T. Data assimilation for fault slip monitoring and short-term prediction of spatio-temporal evolution of slow slip events: application to the 2010 long-term slow slip event in the Bungo Channel, Japan. *Earth Planets Space* 76, 1-12 (2024).

3) プロジェクトの管理・運営

本プロジェクトの運営を円滑に推進するため、STAR-E プロジェクト 5 課題全体の勉強会を継続して開催した。対面中心のハイブリッド形式で、特に研究員間の交流を積極的に実施する方針で行った。併せて、課題ごとの小ミーティングを行った。上記を通して、基礎的な知識や、各課題の進捗・研究成果の共有と今後の方針に関する議論を行った。

(c) 結論

研究項目 (a) (b) では、GNSS 時系列の深層学習による SSE のシグナルの自動検出を継続した。最適な検出手法を検討した後、単点での判定を時空間的に結合する方式での SSE モニタリングを構築する方針に定め。長期間のデータへの適用を実施した。また、地殻変動現象の検出の高度化に向けて、季節調整モデルを用いた GNSS 時系列前処理の高度化手法の開発を行った。派生研究として、深層学習を用いた InSAR による断層クリープ検出手法を開発し、フィリピン断層の地震時すべりでその性能を評価した。さらに、GNSS と InSAR を併用することにより、データの空間補完・ノイズ低減手法のための深層学習手法の開発し、2019 年に日向灘で発生した地震時変動で有効性を示した。研究項目 (c) では、前年度までに開発した、PINN による摩擦特性空間分布推定手法を、2010 年に豊後水道で発生した長期的 SSE へ適用し、同地域の摩擦特性の空間分布を明らかにした。

上記研究成果の実用化に向けて、現業機関との連携の可能性について議論を行った。関連する論文の出版、プログラムの公開、また、STAR-E プロジェクト 5 課題全体の勉強会を定期的に開催した。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 26 件、うち海外計 3 件

発表した成果（発表 題目、口頭・ポスタ ー発表の別）	発表者氏名	発表した場所 （学会等名）	発表し た時期	国内・ 外の別	主たる 成果
Spatio-temporal evolution of the 2010 Bungo slow slip event revealed by Physics-Informed Neural Networks with rate and state friction (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	○
On the recurrence of slow slip events using the Brownian Passage Time distribution: Four	Yano, K., M. Kano, T. Hori, K. Ariyoshi	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	

case studies in Japan (ポスター)					
大規模言語モデルを用いた地震サイクルシミュレーション・データ同化コードの自動生成 (ポスター)	加納 将行、 平原 和朗、 亀 伸樹、 岡崎 智久	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	
ニューラル作用素による地震サイクル計算および長周期地震動予報の検討 (ポスター)	岡崎 智久、 縣 亮一郎、 加納 将行、 佐藤 大祐、 染矢 真好、 福島 陸斗	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	
地震研究における大規模言語モデル活用の挑戦 (口頭)	久保 久彦、 Wu Stephen、 加納 将行、 加藤 慎也、 小穴 温子、 岡崎 智久、 岡田 望海、 亀 伸樹、 小寺 祐貴、 佐藤 大祐、 椎名 高裕、 下條 賢梧、 溜渕 功史、 直井 誠、 西山 竜一、 平原 和朗、 宮本 崇、 山田 真澄	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	
深層学習とGNSSを用いた断層すべり検出手法開発と四国西部における適用 (口頭)	中川 亮、 福島 洋、 加納 将行、 矢野 恵佑、 田中 優介、 岡田 悠太郎、	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	

	平原 和朗				
InSAR・GNSSデータを用いた深層学習による断層すべりが引き起こした3次元変位場の抽出の試み（口頭）	岡田 悠太郎、 福島 洋	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	
Utilizing Dense Tropospheric Delay Products from GNSS in InSAR Noise Correction（口頭）	サイレラー サルディラ、 福島 洋、 太田 雄策	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	
Softbank独自基準点における共通誤差成分の予備的解析（ポスター）	岡田 悠太郎、 太田 雄策、 大舘 未来、 福島 洋	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年 5月	国内	
西南日本のGNSS地殻変動時系列の深層学習によるスローリップ自動検出（口頭）	田中 優介、 加納 将行、 矢野 恵佑	2025年度人工知能学会全国大会	2025年 5月	国内	○
Frictional heterogeneity estimated from 2010 Bungo Slow Slip Events by Physics-Informed Neural Networks（ポスター）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025	2025年 9月	国内	○
On the recurrence of slow slip events using the Brownian Passage Time distribution: Four case studies in Japan（ポスター）	Yano, K., M. Kano, T. Hori, K. Ariyoshi	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025	2025年 9月	国内	
Detection of short-term slow slip	Tanaka, Y., M. Kano,	IAG Scientific	2025年 9月	国外	○

signal based on deep learning of the real GNSS displacement time series of southwest Japan (ポスター)	K. Yano, T, Kuwatani	Assembly 2025			
PINNを用いた断層すべりモニタリング手法の開発 (口頭)	加納 将行、 福嶋 陸斗、 大谷 真紀子、 平原 和朗、	数値解析が切り開く新たな情報社会～データ駆動型から「富岳NEXT」～」研究集会	2025年 10月	国内	○
南海トラフにおけるプレート固着・すべり予測システムのプロトタイプ構築 (ポスター)	堀 高峰、 中田 令子、 飯沼 卓史、 日吉 義久、 加納 将行、 佐藤 大祐	日本地震学会 2025年度秋季大会	2025年 10月	国内	
深層学習によるInSAR・GNSSデータからの断層すべり起因の微小変位場の検出：2019年Mw 6.2日向灘地震への適用 (ポスター)	岡田 悠太郎、 福島 洋	日本地震学会 2025年度秋季大会	2025年 10月	国内	
物理深層学習による摩擦不均質推定：2010年豊後水道SSE (口頭)	福嶋 陸斗、 加納 将行、 平原 和朗、 大谷 真紀子	日本測地学会 第144回講演会	2025年 10月	国内	
頑健なスペクトル解析法に基づくGNSS時系列の周波数特性の推定 (口頭)	矢野 恵佑、 加納 将行、 田中 優介、 高畠 哲也、 太田 雄策	日本測地学会 第144回講演会	2025年 10月	国内	○
深層学習によるInSAR・GNSSデータからの断層すべり起因の微小変位場の検	岡田 悠太郎、 福島 洋	日本測地学会 第144回講演会	2025年 10月	国内	

出：2019年Mw 6.2日 向灘地震への適用 (口頭)					
Interactions of Aseismic and Seismic Slips of the Philippines Fault on Leyte Island Revealed by InSAR and GNSS Time-Series (口頭)	Okur, Y. Y. Fukushima, K. Ching, Y. Sharma,	日本測地学会 第 144 回講 演会	2025年 10月	国内	
Data Assimilation for Monitoring Fault Slip Behavior (口頭)	Kano, M.	Internationa l Workshop on Interdiscipl inary Research of Information Science and Seismology	2025年 11月	国内	○
Detection of Short- Term Slow Slip Signal Based on Machine Learning of Real GNSS Observations (口 頭)	Tanaka, Y.	Internationa l Workshop on Interdiscipl inary Research of Information Science and Seismology	2025年 11月	国内	○
Decadal Creep Variations, Shallow Slip Deficits and Earthquake Hazard on Leyte' s Philippine Fault from InSAR-GNSS (2006-2023) (口頭)	Okur, Y. Y. Fukushima, K. Ching, Y. Sharma,	20TH APRU Multi- Hazards Symposium and Conference	2025年 11月	国外	
Interactions of Aseismic and	Y. Okur, Y. Fukushima,	AGU Fall Meeting 2025	2025年 12月	国外	

Seismic Slips of the Philippines Fault on Leyte Island Revealed by InSAR and GNSS Time-Series (ポスター)	K. Ching, Y. Sharma				
PINNを用いた摩擦不均質推定とスローリップの時空間発展の予測 (口頭)	加納 将行、 福嶋 陸斗	「科学的機械学習 (SciML) による固体地球科学の加速」研究集会	2026年 1月	国内	
PINN-based frictional heterogeneity estimation and short-term forecast of fault slip evolution during the 2010 Bungo Channel slow slip event (口頭)	加納 将行、 福嶋 陸斗	Slow-to-Fast 地震学A03・B03班合同合宿	2026年 2月	国内	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計9件、うち海外計7件

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Physics-informed deep learning for estimating the spatial distribution of frictional parameters in slow slip regions	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J. P. Avouac	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025	国外
Development of an adjoint-based data assimilation method toward predicting SSE evolution: Two-step optimization of	Ohtani, M., N. Kame, M. Kano	Earth Planets Space	2025	国外

frictional parameters and initial strength on the fault				
Spatio-temporal characteristics in the GEONET F5 solution in the frequency domain estimated based on the robust spectral analysis	Kano, M., K. Yano, Y. Tanaka, T. Takabatake, Y. Ohta	Earth Planets Space	2025	国外
Weak and Shallow Secondary Frictional Faults Revealed by Large Earthquakes in Haiti	Raimbault, B., R. Jolivet, E. Calais, Y. Fukushima, S. Smithe	Geophysical Research Letters	2025	国外
Interactions of aseismic and seismic slips of the Philippine Fault on Leyte Island revealed by InSAR and GNSS time-series	Okur, Y., Y. Fukushima, K. Ching, Y. Sharma	Progress in Earth and Planetary Science	2025	国外
プレート境界の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究の進展	加納 将行	システム制御情報 学会誌「システム ／制御／情報」	2025	国内
Seismic implications of creeping and coupled segments along the Philippine fault in Leyte from GNSS and InSAR data	Sharma, Y., K. E. Ching, R. J. Rau, T. C. Bacolcol, J. E. Fungo, A. Pelicano, K. M. Johnson, Y. Fukushima	Remote Sensing of Environment	2026	国外
季節調整手法STELの開発とGNSS日座標データへの適用	岡田 悠太郎、 上田 拓	測地学会誌	2026	国内
Recurrence analysis on slow slip events in Japan using renewal processes	Yano, K., M. Kano, T. Hori, K. Ariyoshi	Earth Planets Space	2026	国外

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

該当なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
PINN_3DSSE: Frictional Parameter Estimation on Slow Slip Events	PINN を用いた摩擦特性空間分布推定手法を開発し、プログラムを公開した。

3) 仕様・標準等の策定

該当なし

3. まとめ

本プロジェクトは令和7年度で最終年度である5年目を終えた。研究項目(a)(b)に関して、短期的な地殻変動現象の検知能力向上に向けて、これまで開発してきたGPDをベースとした短期的SSE自動検出の最適形態を検討した。その結果、単独観測点への適用結果の結合が現状の最適手法と考え、長期間の地殻変動データでSSEの検出を行った。また本プロジェクトで開発した手法をInSARデータのような他の地殻変動データへと拡張を試みた。研究項目(c)に関しては、物理深層学習による摩擦特性推定を実観測データに適用し、SSE発生域の摩擦特性の空間分布を地殻変動データから明らかにした。またこれまで開発した手法の実用化に向けた現業機関との議論を行った。

4. 活動報告

(1) 会議・勉強会

- 情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-E プロジェクト) 進捗報告会

日時：2025年11月18日

場所：TKP 新橋カンファレンスセンター

議事：1. 各課題の令和7年度の研究概要説明
2. 全体討論

上記の他、STAR-E 5 課題全体の勉強会を全5回実施した。

(2) アウトリーチ活動

- 情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-E プロジェクト) 第4回研究者・学生向けイベント「2025年度地震・測地データ活用 アイデアコンテスト」(2025/7-8)
(<https://evt-wivzie20250430.eventcloudmix.com/>)

- 情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-E プロジェクト) 第 5 回研究フォーラム (2026/03/03)
(https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/projects/20251107-ope_dev02-1.pdf)

5. むすび

令和 3 年度途中より STAR-E プロジェクトが開始し最終年度が終了した。準備期間の 1 年目、課題の遂行を本格的に開始した 2・3 年目を受けて、4・5 年目を通してこれまで実施してきた、断層すべり・ブロック運動の推定分離精度の評価、地殻変動検出に向けた様々な深層学習手法の開発、GNSS 速度場のクラスタリング、データ同化や物理深層学習を用いた断層すべりの数値計算・摩擦特性推定・断層すべり予測手法の開発といった様々なテーマについて論文が出版された。特に最終年度はこれまでの成果をアウトプットすることを意識して、現業機関との連携の可能性に向けて議論を行ってきた。プロジェクトの機関は終了となるが、本プロジェクトで開発した様々な手法は今後の地震研究の基盤となるであろう。

本課題では国土地理院による GNSS 観測網 GEONET のデータを使用しました。

様式第 2 1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目 情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト (STAR-E プロジェクト)
「データ同化断層すべりモニタリングに向けた測地データ解析の革新」
機関名 国立大学法人 東北大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Spatio-temporal evolution of the 2010 Bungo slow slip event revealed by Physics-Informed Neural Networks with rate and state friction (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
On the recurrence of slow slip events using the Brownian Passage Time distribution: Four case studies in Japan (ポスター)	Yano, K., M. Kano, T. Hori, K. Ariyoshi	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
大規模言語モデルを用いた地震サイクルシミュレーション・データ同化コードの自動生成 (ポスター)	加納 将行、 平原 和朗、 亀 伸樹、 岡崎 智久	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
ニューラル作用素による地震サイクル計算および長周期地震動予報の検討 (ポスター)	岡崎 智久、 縣 亮一郎、 加納 将行、 佐藤 大祐、 染矢 真好、 福嶋 陸斗	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
地震研究における大規模言語モデル活用の挑戦 (口頭)	久保 久彦、 Wu Stephen、 加納 将行、	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内

	加藤 慎也、 小穴 温子、 岡崎 智久、 岡田 望海、 亀 伸樹、 小寺 祐貴、 佐藤 大祐、 椎名 高裕、 下條 賢梧、 溜渕 功史、 直井 誠、 西山 竜一、 平原 和朗、 宮本 崇、 山田 真澄			
深層学習とGNSSを用いた断層すべり検出手法開発と四国西部における適用（口頭）	中川 亮、 福島 洋、 加納 将行、 矢野 恵佑、 田中 優介、 岡田 悠太郎、 平原 和朗	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
InSAR・GNSSデータを用いた深層学習による断層すべりが引き起こした3次元変位場の抽出の試み（口頭）	岡田 悠太郎、 福島 洋	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
Utilizing Dense Tropospheric Delay Products from GNSS in InSAR Noise Correction（口頭）	サイレラー サ ルディラ、 福島 洋、 太田 雄策	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
Softbank独自基準点における共通誤差成分の予備的解析（ポスター）	岡田 悠太郎、 太田 雄策、 大舘 未来、 福島 洋	日本地球惑星科学 連合2025年大会	2025年5 月	国内
西南日本のGNSS地殻変動時系列の深層学習による	田中 優介、 加納 将行、 矢野 恵佑	2025年度人工知能 学会全国大会	2025年5 月	国内

スロースリップ自動検出 (口頭)				
Frictional heterogeneity estimated from 2010 Bungo Slow Slip Events by Physics-Informed Neural Networks (ポスター)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025	2025年9月	国内
On the recurrence of slow slip events using the Brownian Passage Time distribution: Four case studies in Japan (ポスター)	Yano, K., M. Kano, T. Hori, K. Ariyoshi	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2025	2025年9月	国内
Detection of short-term slow slip signal based on deep learning of the real GNSS displacement time series of southwest Japan (ポスター)	Tanaka, Y., M. Kano, K. Yano, T. Kuwatani	IAG Scientific Assembly 2025	2025年9月	国外
PINNを用いた断層すべりモニタリング手法の開発 (口頭)	加納 将行、 福嶋 陸斗、 大谷 真紀子、 平原 和朗	数値解析が切り開く新たな情報社会～データ駆動型から「富岳NEXT」～ 研究集会	2025年10月	国内
南海トラフにおけるプレート固着・すべり予測システムのプロトタイプ構築 (ポスター)	堀 高峰、 中田 令子、 飯沼 卓史、 日吉 義久、 加納 将行、 佐藤 大祐	日本地震学会2025年度秋季大会	2025年10月	国内
深層学習によるInSAR・GNSSデータからの断層すべり起因の微小変位場の検出：2019年Mw 6.2日向灘地震への適用 (ポスター)	岡田 悠太郎、 福島 洋	日本地震学会2025年度秋季大会	2025年10月	国内

物理深層学習による摩擦不均質推定：2010年豊後水道SSE（口頭）	福嶋 陸斗、 加納 将行、 平原 和朗、 大谷 真紀子	日本測地学会第 144 回講演会	2025年 10月	国内
頑健なスペクトル解析法に基づくGNSS時系列の周波数特性の推定（口頭）	矢野 恵佑、 加納 将行、 田中 優介、 高畠 哲也、 太田 雄策	日本測地学会第 144 回講演会	2025年 10月	国内
深層学習によるInSAR・GNSSデータからの断層すべり起因の微小変位場の検出：2019年Mw 6.2日向灘地震への適用（口頭）	岡田 悠太郎、 福島 洋	日本測地学会第 144 回講演会	2025年 10月	国内
Interactions of Aseismic and Seismic Slips of the Philippines Fault on Leyte Island Revealed by InSAR and GNSS Time-Series（口頭）	Okur, Y. Y. Fukushima, K. Ching, Y. Sharma,	日本測地学会第 144 回講演会	2025年 10月	国内
Data Assimilation for Monitoring Fault Slip Behavior（口頭）	Kano, M.	International Workshop on Interdisciplinary Research of Information Science and Seismology	2025年 11月	国内
Detection of Short-Term Slow Slip Signal Based on Machine Learning of Real GNSS Observations（口頭）	Tanaka, Y.	International Workshop on Interdisciplinary Research of Information Science and Seismology	2025年 11月	国内
Decadal Creep Variations, Shallow	Okur, Y. Y. Fukushima, K. Ching,	20TH APRU Multi- Hazards Symposium and	2025年 11月	国外

Slip Deficits and Earthquake Hazard on Leyte's Philippine Fault from InSAR-GNSS (2006-2023) (口頭)	Y. Sharma,	Conference		
Interactions of Aseismic and Seismic Slips of the Philippines Fault on Leyte Island Revealed by InSAR and GNSS Time-Series (ポスター)	Y. Okur, Y. Fukushima, K. Ching, Y. Sharma	AGU Fall Meeting 2025	2025年12月	国外
PINNを用いた摩擦不均質推定とスロースリップの時空間発展の予測 (口頭)	加納 将行、 福島 陸斗	「科学的機械学習 (SciML) による固体地球科学の加速」研究集会	2026年1月	国内
PINN-based frictional heterogeneity estimation and short-term forecast of fault slip evolution during the 2010 Bungo Channel slow slip event (口頭)	加納 将行、 福島 陸斗	Slow-to-Fast地震学A03・B03班合同合宿	2026年2月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Physics-informed deep learning for estimating the spatial distribution of frictional parameters in slow slip regions	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J. P. Avouac	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025	国外

Development of an adjoint-based data assimilation method toward predicting SSE evolution: Two-step optimization of frictional parameters and initial strength on the fault	Ohtani, M., N. Kame, M. Kano	Earth Planets Space	2025	国外
Spatio-temporal characteristics in the GEONET F5 solution in the frequency domain estimated based on the robust spectral analysis	Kano, M., K. Yano, Y. Tanaka, T. Takabatake, Y. Ohta	Earth Planets Space	2025	国外
Weak and Shallow Secondary Frictional Faults Revealed by Large Earthquakes in Haiti	Raimbault, B., R. Jolivet, E. Calais, Y. Fukushima, S. Smithe	Geophysical Research Letters	2025	国外
Interactions of aseismic and seismic slips of the Philippine Fault on Leyte Island revealed by InSAR and GNSS time-series	Okur, Y., Y. Fukushima, K. Ching, Y. Sharma	Progress in Earth and Planetary Science	2025	国外
プレート境界の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究の進展	加納 将行	システム制御情報学会誌「システム／制御／情報」	2025	国内
Seismic implications of creeping and coupled segments along the Philippine fault in Leyte from GNSS and InSAR data	Sharma, Y., K. E. Ching, R. J. Rau, T. C. Bacolcol, J. E. Fungo, A. Pelicano,	Remote Sensing of Environment	2026	国外

	K. M. Johnson, Y. Fukushima			
季節調整手法STELの開発とGNSS日座標データへの適用	岡田 悠太郎、 上田 拓	測地学会誌	2026	国内
Recurrence analysis on slow slip events in Japan using renewal processes	Yano, K., M. Kano, T. Hori, K. Ariyoshi	Earth Planets Space	2026	国外