

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」

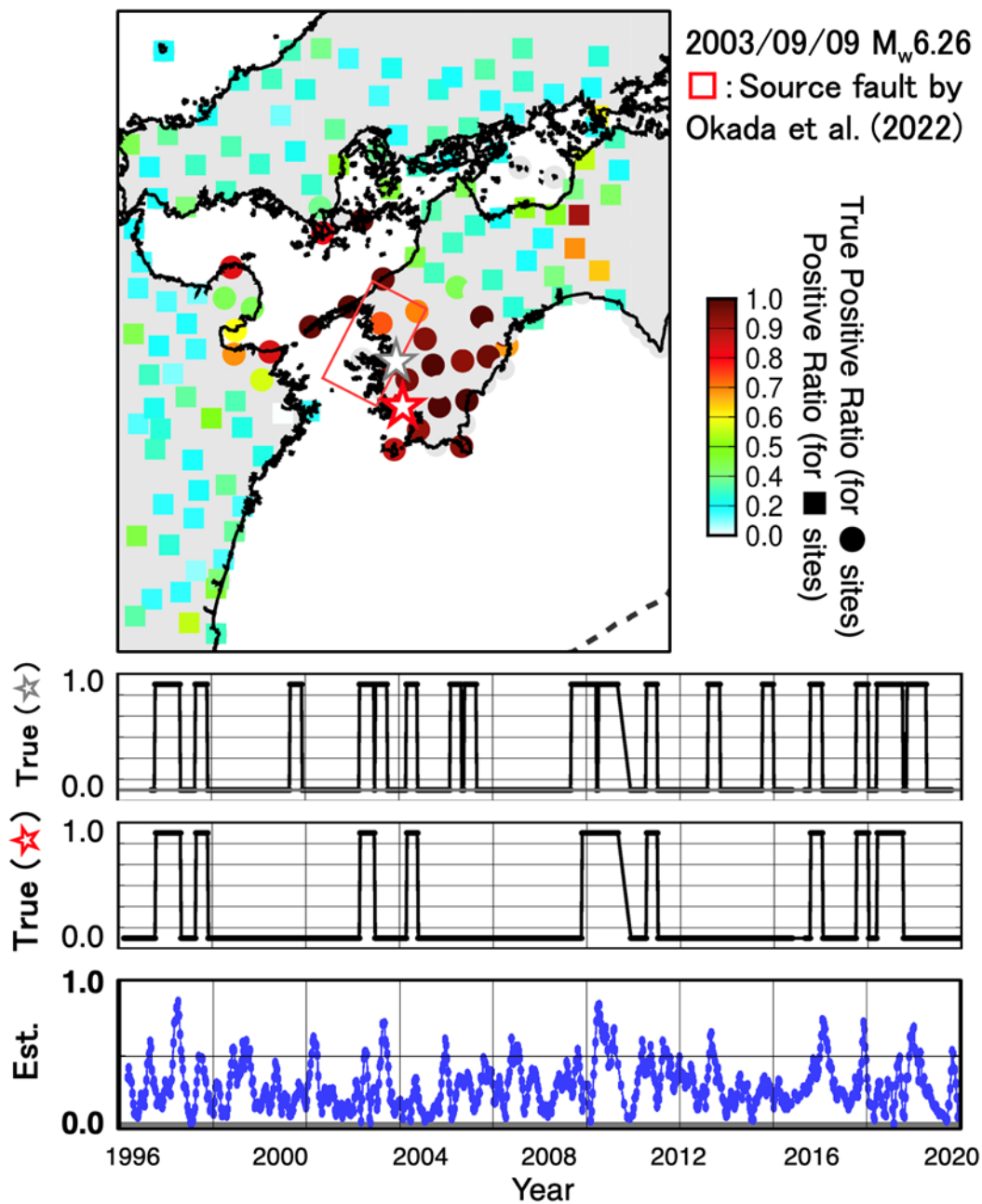
令和6年度
成果報告書

令和7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6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。

グラフィア



GNSS 時系列実データの機械学習による短期的スロースリップイベントの把握能力の評価。上段は四国西部で発生したイベントを跨ぐ時系列データに対する、各観測点でのイベントシグナル判定の割合を示したもの。丸で表示した観測点が閾値以上のシグナルが生じた点、周囲の四角で表示した観測点がそれ以外の点を表す。前者では高い値が空間的に連続して分布し、後者では比較的低い値にとどまっていることがわかる。下段には四国西部の1観測点の全期間の時系列を、10日間隔で、連続で入力した場合のイベントシグナル確率推定値の推移を示す。8 エポックごとの移動平均で表示しており、正解ラベルと比較すると既知イベントの大半について対応するピークの立ち上がりが見られる。また、隣接観測点における正解ラベルとも併せて比較すると、近隣の他のイベントによる閾値以下のシグナルに反応したピークもあることがわかる。

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6年度の業務の目的	3
(2) 令和6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	15
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	15
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	22
3. まとめ	222
4. 活動報告	22
(1) 会議・勉強会	22
(2) アウトリーチ活動	23
5. むすび	23

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	R6.4.1～R7.3.31	9,769,231 円	2,930,769 円
同・准教授	福島洋	R6.4.1～R7.3.31		
同・研究員	田中優介	R6.4.1～R7.3.31		
同・研究員	岡田悠太郎	R6.5.1～R7.3.31		
同・学術研究員	福島陸斗	R6.4.1～R6.7.31		
同・大学院生	中川亮	R6.4.1～R7.3.31		
統計数理研究所・	矢野恵佑	R6.4.1～R7.3.31	—	—

准教授				
東京大学・ 特任研究員	中田令子	R6. 4. 1～R7. 3. 31	—	—
海洋研究開発機構・ センター長	堀高峰	R6. 4. 1～R7. 3. 31	—	—
京都大学・教授	宮崎真一	R6. 4. 1～R7. 3. 31	—	—
同・教授	西村卓也	R6. 4. 1～R7. 3. 31	—	—
和歌山大学・講師	八谷大岳	R6. 4. 1～R7. 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atalog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する。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る。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る。

(d) 令和 6 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

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た統計的・機械学習手法の開発を継続する。測地データから断層すべりの時空間発展を直接推定する深層学習手法の開発を継続する。また、研究項目 (b) と連携して、測地データに含まれるノイズ特性を考慮し地殻変動検出手法の高度化を行う。

2) 【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

観測ノイズの時空間特性のモデル化を行う。得られたノイズ特性を詳細に検討し、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すると共に、研究項目 (a) と連携して、統計的・機械学習手法の高度化を進める。

3) 【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データ同化手法の実データへの適用を継続する。また物理方程式の不確実性を考慮した機械学習手法による断層すべり計算手法の高度化を行う。データ同化・物理深層学習両者による断層すべりモニタリングの結果の比較・検討を開始する。

4) 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、定期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。

5) 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。

(2) 令和6年度の成果

(a) 業務の要約

研究項目(a)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た。特に学習の安定性を高める改良を加え、検出能力の評価及びノイズの時空間特性との比較を進めた。研究項目(b)について、GNSS ノイズの時空間特性の網羅的把握を継続し、前年度開発したロバストなスペクトル推定手法を日本全域・長期間の GNSS 日座標値時系列に適用した。(a)(b)に関連して、前年度開発した広域地殻変動場の把握に向けた GNSS 変位速度場のクラスタリング手法を、全地球および台湾の GNSS データに適用した。研究項目(c)について、前年度開発した断層すべりの現状把握・短期推移予測のためのデータ同化手法のうち、物理深層学習(PINN)による手法を、豊後水道長期SSE を模した3次元断層モデルに拡張し、摩擦特性の空間分布逆推定手法を開発した。加えて、勉強会の定期的な開催、プロジェクトウェブサイトの更新を行った。

(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

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。地震動検出の分野では既に機械学習の活用が進んでいるが、GNSS 時系列への機械学習の適用は依然少なく、特に実データによる学習を試みた例はほぼ存在しない。そこで SSE の検出カタログが最も充実している、西南日本の GNSS 時系列を教師データとして用いた機械学習を行った。特に今年度は単点・複数点でのシグナル判定を試み、両者の利点・課題を比較議論することで

実用的な SSE 検出手法の形について検討を進めた。

まず西南日本全域の 770 ヶ所の電子基準点の日座標時系列から、Okada et al. (2022) による 284 個の短期的 SSE の検出カタログで一定以上の大きさの変位が推定されている観測点・時期の時系列をシグナルデータとして抽出した。次にシグナルがない観測点・期間の時系列をランダムに同じ数だけ抽出し、ノイズデータとした。いずれも長さは 121 エポックで、東西・南北の 2 成分を用いた。得られた約 26000 個のデータを 2:1 に分割し、学習データ・テストデータとした。これらのデータについて 2 層の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) と 2 層の線形層で特徴抽出・判定を行い、シグナル確率を推定する問題を設定した。モデル構造は地震波検出の一手法である Generalized Phase Detection (GPD, Ross et al., 2018) を参考とした。学習では交差エントロピーを損失関数として用い、テストデータで 75-76% 程度の正答率が得られた。またモデルパラメータの初期値を変えて 10 回の学習・判定を繰り返し試行したが、安定してほぼ同じ結果が得られた。判定傾向を確認したところ振幅の大きいシグナルデータほど見逃しの割合が低く、3 mm 以上のシグナルではほぼ見逃しがゼロだった。一方、誤検知の割合が高いノイズデータは数十日程度の周期の屈曲が顕著な例が多く、GNSS 時系列に見られる長周期ノイズが見かけのシグナルとして誤検知を引き起こすことが確認された。

上記のように正答率としては低いものの概ね直感に合う結果が得られたため、単点での判定から SSE を認識できるか検討した。図 1 に特定イベントのシグナルに対する検出率の空間分布を示す。いずれの事例でもシグナルが生じた観測点では高い検出率が空間的に連続して分布し、反対に閾値を超えるシグナルがない外側の地域では検出率が低い値にとどまるという合理的な結果が得られた。図 2 には 1 つの観測点の全期間の時系列を連続で与えた場合のシグナル確率推定値の推移を示す。大半の既知イベントでは対応するピークの立ち上がりが見られている一方、Okada et al. (2022) のカタログのどのイベントとも対応しないピークも多数見られた。以上のように時間方向については誤検知を見分ける手法が課題だが、単点の学習・判定でもある程度はイベント発生を把握できることが示された。

最後に単点の時と同じ時系列を用い、ドロネー三角網で隣接する 2 観測点の時系列を並べたデータも作成して同様の学習・判定を試みた。その結果、トータルの正答率は 78-79% と若干高くなったものの過学習が強まり、シグナルデータの正答率については却って低下する結果となった。今後は検出対象の SSE の時空間スケールも考慮し、何点程度の併用が最も情報量が増えるかさらに検討する。また単点での判定結果の時空間的配置に基づいて追加の判定 (アソシエーション) を行う方針についても検討を続け、最終的にいずれが検出能力・精度で優れるか明らかにすることで自動検出システムとしての形態を確立する。

上記研究の一部は本プロジェクトで雇用する研究員の自発的研究に基づいて STAR-E 関係者以外の他の研究機関の研究者との議論に基づいて実施された。

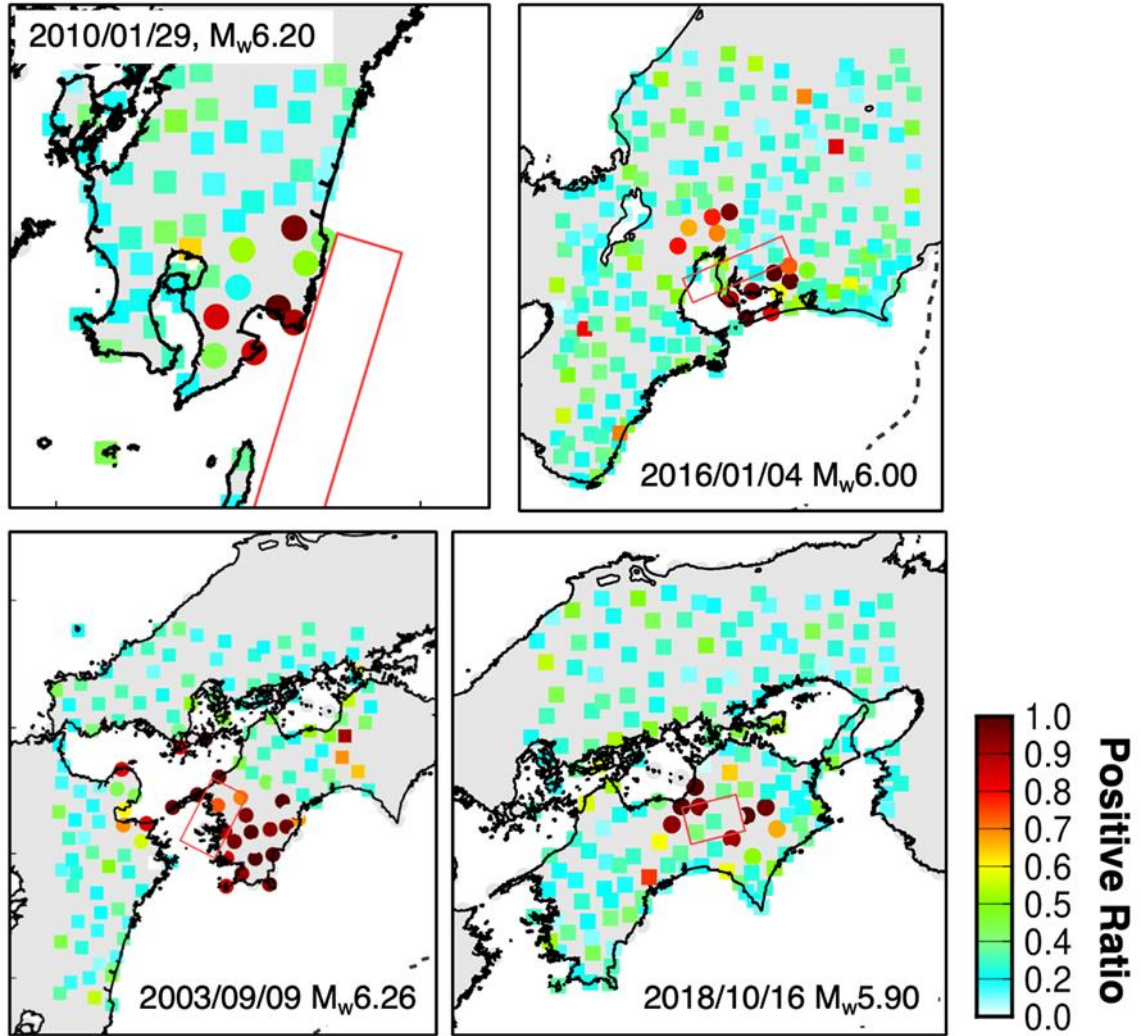


図1．特定イベントに対する各観測点における検出率の分布。イベントを跨ぐ時間窓を10日間隔で最大11個抽出し、モデルの初期値を変えてそれぞれ10回判定したため、最大で110回の判定を試みたことになる。それらのうちシグナル判定だった割合を表示したものである。丸で表示した観測点は閾値以上のシグナルが生じた点のため、同値は検出成功率に相当する。反対に四角で表示した周囲の地域の点は、閾値以上のシグナルがなかった点のため誤検出率に近い意味になる。いずれも Okada et al. (2022) のカタログによる矩形断層モデルを赤い長方形で表示。

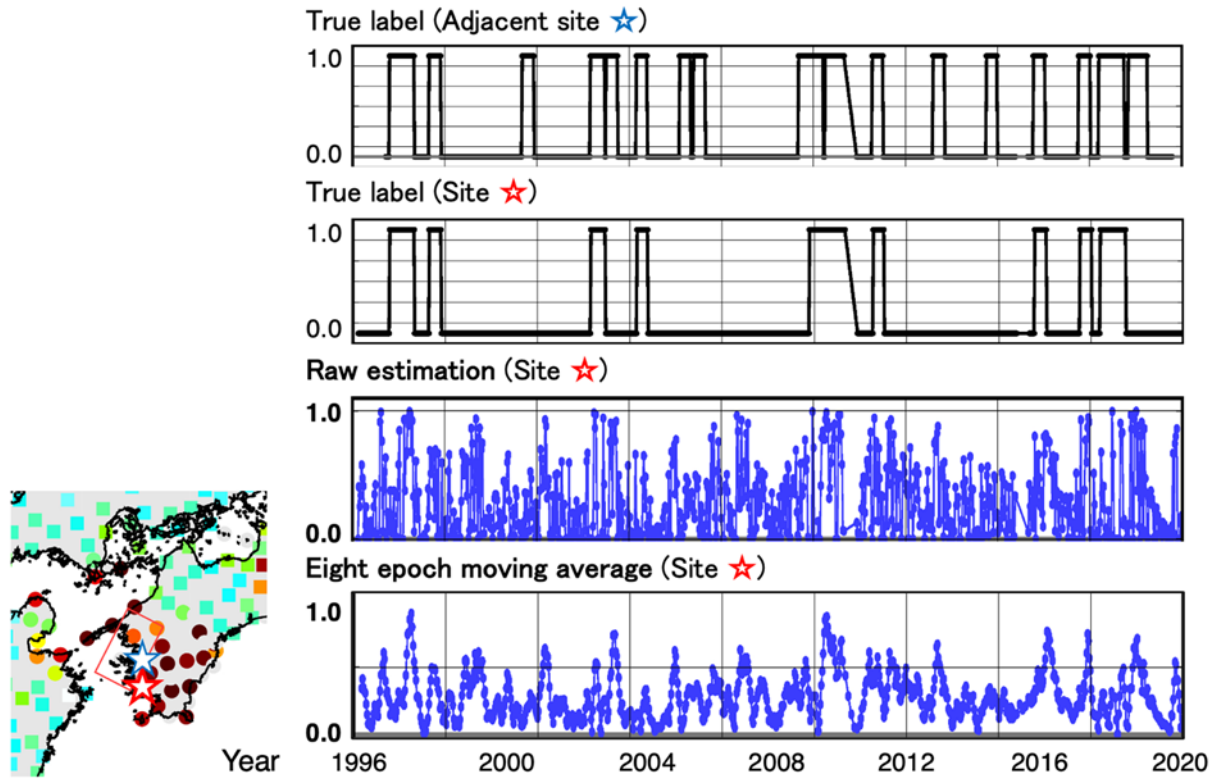


図2．1観測点の全期間の時系列を10日間隔で、連続で与えた場合のシグナル確率推定値の推移。上から3段目のようにそのままでは振動が激しいが、4段目のように適当な移動平均をとると傾向が明瞭になる。2段目の正解ラベルと比較すると、大半の既知イベントについて対応する確率のピークの立ち上がりが見られる。また1段目に表示した隣接観測点での正解ラベルとも対応するピークがあり、近隣イベントによる閾値以下のシグナルにも反応していることがわかる。

2) 【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

2-1) GNSS 時系列の周波数特性の網羅的把握

GNSS 時系列の時空間的な周波数特性(特にパワースペクトル)の網羅的な抽出を継続した。前年度までの予備的な解析から、低周波領域と高周波領域でパワースペクトルの振る舞いが異なることが分かったため、今回は混合型の理論スペクトル $S(f)$ を用いた。

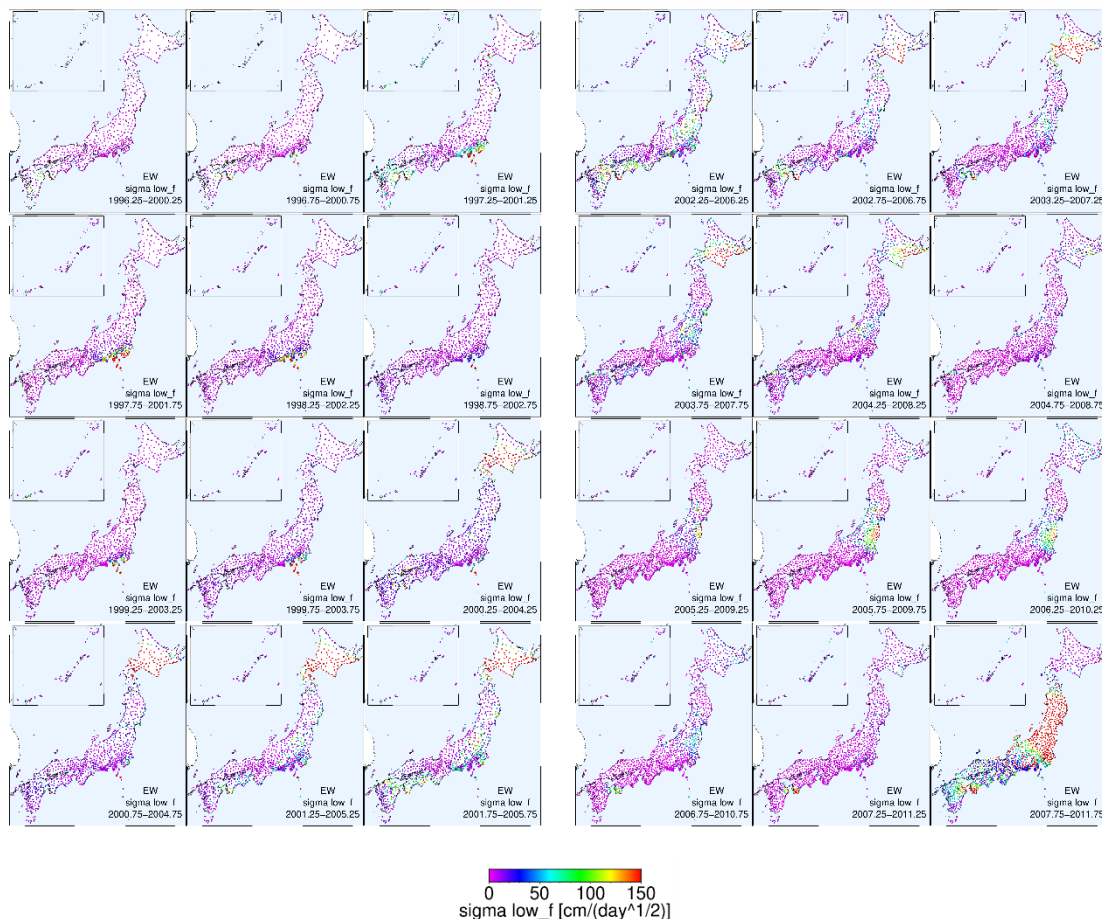
$$S(f) = S_{low}(f) + S_{high}(f) = \frac{\sigma_{low}^2}{\left\{1 + \left(\frac{f}{f_{c,low}}\right)^{\alpha_{low}}\right\}^2} + \frac{\sigma_{high}^2}{\left\{1 + \left(\frac{f}{f_{c,high}}\right)^{\alpha_{high}}\right\}^2} \quad (1)$$

ここで、 σ^2 、 f_c 、 α はそれぞれ振幅、コーナー周波数、傾きに関する物理量、であり、下付き添字の low, high はそれぞれ低周波成分・高周波成分を表す。

次に観測された GNSS 時系列から以下の手順で観測スペクトルを計算した。GNSS データとして、国土地理院によって整備されている GEONET 約 1400 点における F5 解を用いた。解析期間は 1996 年から 2023 年とし、半年ごとに時間窓を移動させながら 4 年間の時系列

を切り出し、切り出した時系列のパワースペクトルを計算した。この観測パワースペクトルに対し、独立に式(1)で示される理論スペクトル $S(f)$ をフィッティングし、モデルパラメータを推定した。この際、STAR-E 統計数理研究所課題と共同開発した時系列のスペクトル特性を頑健に推定する方法を用いた (Takabatake and Yano, 2023)。

図 3・4 にそれぞれ東西成分の低・高周波成分の振幅に関するパラメータ σ_{low}^2 , σ_{high}^2 の時空間分布を示す。図 3 から、2003 年十勝沖地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震といった巨大地震の余効変動、あるいは 2003 年ごろに発生した豊後水道長期的 SSE に伴って、時系列の低周波成分が増加し、理論スペクトルの低周波振幅が増大していることが分かる。一方、図 4 から、高周波成分（およそ 10 日より短周期）の振幅は 2003 年ごろまで時間の経過とともに小さくなっている。これは GNSS 衛星の軌道暦の決定精度の減少とよく対応しており、測位解析手法に起因する時間変化をとらえている可能性が考えられる。また、高周波数帯におけるノイズは必ずしもホワイトノイズにはなっておらず時間相関するノイズ特性を持つことが分かった。



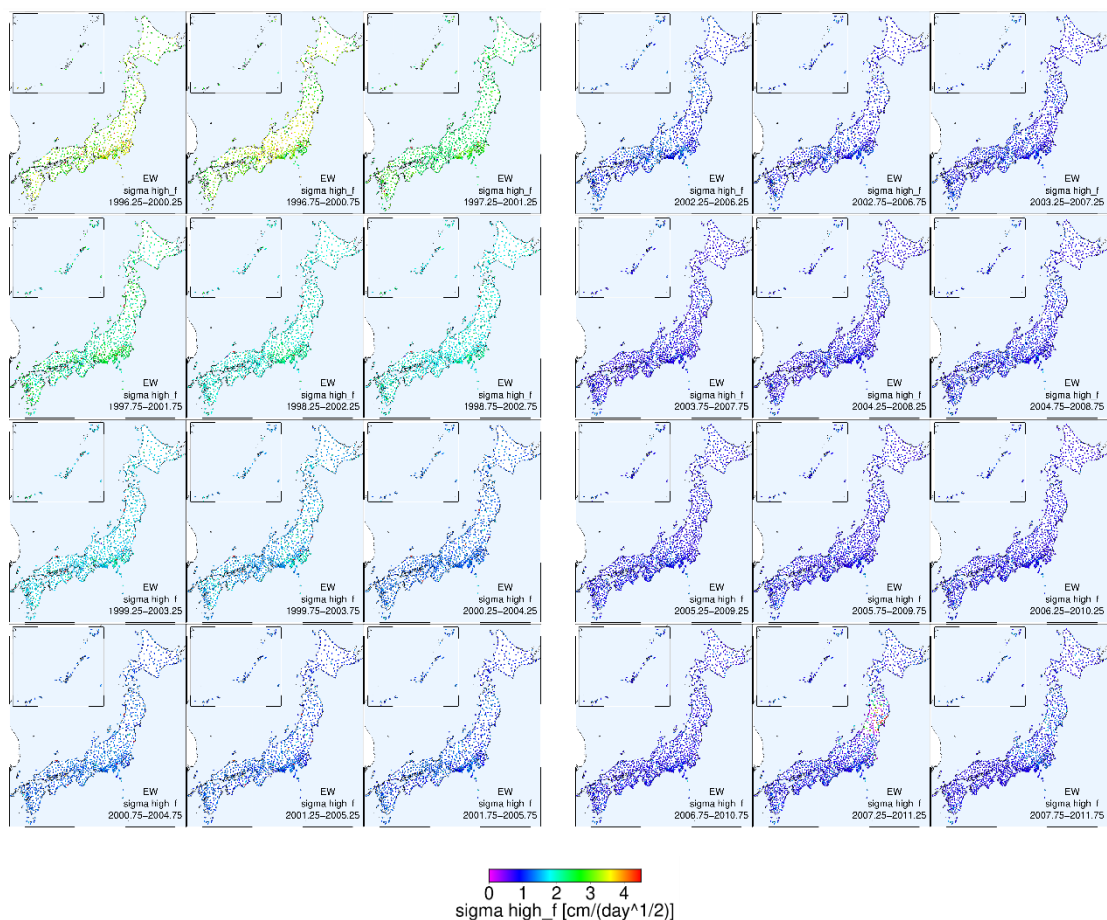


図 4. 高周波成分の振幅の空間分布の時間変化の例。

2-2) 広域地殻変動場の把握に向けた GNSS 変位速度場のクラスタリング手法の開発

昨年度開発した地殻ブロックの客観的同定方法を種々のデータに適用し論文を出版した (Takahashi, Yano, and Kano, 2025)。地殻ブロックの精緻な同定は、新しいマイクロプレートの発見に繋がり、また、プレートの相対運動によるひずみの分配状況の正確な理解にも繋がる (Tanaka et al., 2024)。本年度は開発手法を ITRF2008 モデルに付随する全地球の GNSS 速度ベクトル (Altamimi et al., 2012) および台湾の GNSS 速度ベクトルに適用した。

図 5 は、開発手法を全地球データに適用した結果であり、ITRF2008 プレート運動モデルにおけるプレートの割り当てと地理的により整合しており、誤分類が少ない。クラスタ数 $K=4$ では、ナスカプレートおよびオーストラリアーインドーアラビアのクラスタが現れる。クラスタ数 $K=14$ では、小規模クラスタの分布が浮かび上がっている。オーストラリアーインドーアラビアの入れ子構造のサブクラスタが登場し、これらは ITRF2008 のプレートラベルと正しく一致している。ただし、オーストラリア内でも細分化が見られ (ニューカレドニアおよびニュージーランド北島の緑および紺の矢印)、ナスカ (青および灰色の矢印) や太平洋 (マゼンタ) の内部でも細分化が出現している。

開発手法は高速に計算できるため、同定したブロックの安定性を評価することができる。図 6 は台湾データセットに対する安定性評価の結果を示しており、稜東-瑞穂断層帯の東側に沿ったクラスタの信頼度が比較的高く、信頼性のある結果を示している。

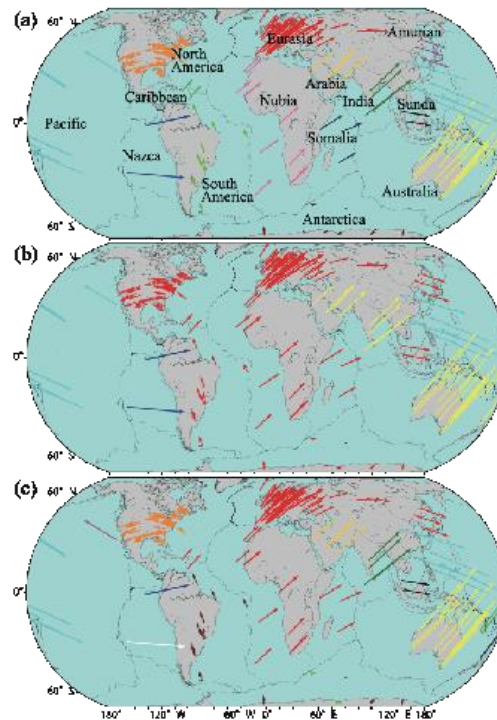


図 5. (a) ITRF2008 基準座標系に対する GNSS 水平速度 (矢印) の元データ。矢印の色は、ITRF2008 のプレート運動モデルにおけるプレートの割り当てを示す。(b) 開発手法を用いたクラスタリング結果 (クラスタ数 4)。矢印の色は、それぞれのクラスタへの割り当てを示す。(c) クラスタ数 14 の場合の比較可能なクラスタリング結果。

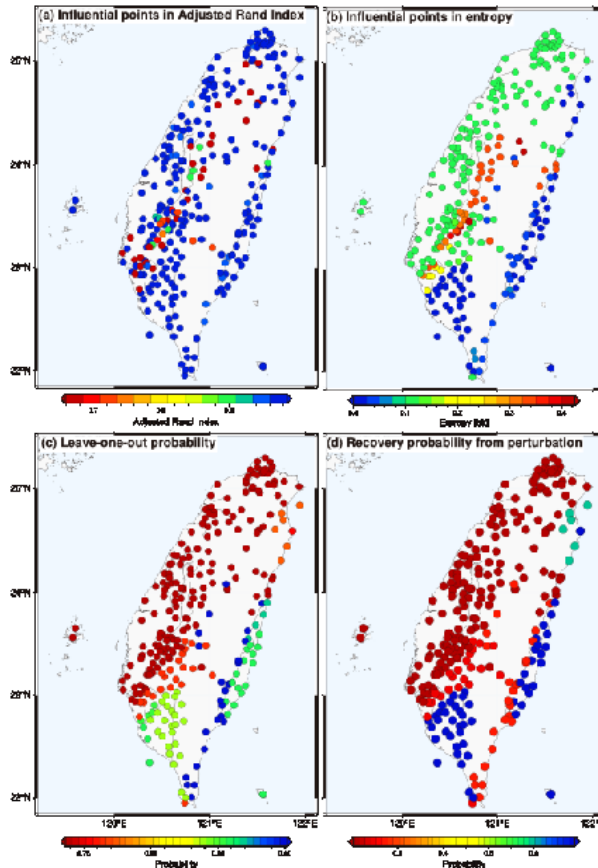


図6．台湾データセットにおける安定性の確認。(a) 調整ランド指数 (ARI) における影響度の高いポイントの地図。ARI の値が低いほど、その地点がクラスタリングに大きな影響を与えていることを示す。(b) シヤノンエントロピーに関する影響度の高いポイントの地図。エントロピー値の高い地点に関連するクラスタ構造は、より脆弱である可能性がある。(c) 一個抜き法 (leave-one-out) に基づく確率の地図。確率が高いクラスタは、1 地点を除いたりサンプリングに対してより頑健である。(d) ランダムな人工的摂動からのクラスタ復元確率の地図。確率が高いクラスタは、ランダムな人工的摂動に対してより頑健である。

3) 【研究項目(c)】 データ同化断層すべりモニタリングの確立

3-1) 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

データ同化断層すべりモニタリングの確立にむけ、前年度のばねブロックへの Physics-Informed Neural Networks (PINNs: Raissi et al., 2019) の適用を発展させ、より現実的な二次元平面断層モデルでの摩擦特性分布推定手法の開発に取り組んだ。断層すべり時空間発展を決定する速度状態依存則 (Dieterich, 1979) における摩擦パラメータ a , $a-b$, L の空間分布推定を目指し、図 7 に示すような豊後水道 SSE を模したパラメータ設定 (Hirahara and Nishikiori, 2019) で作成した模擬観測データから摩擦パラメータ推定を行う数値実験を行った。PINN による逆問題では、シミュレーション変数の時空間発展 (すべり速度 $v(x, y, t)$ と状態変数 $\theta(x, y, t)$) ・および推定したい摩擦パラメータの空間分布 ($a(x, y)$, $a-b(x, y)$, $L(x, y)$) をニューラルネットワーク (NN) で表し、初期条件・物理方程

式・観測データを満たすように定義した損失関数に基づき NN パラメータを最適化した。模擬観測データとしては (i) 断層面上のすべり速度、(ii) 地表での変位速度 という 2 つの異なるデータを用いた。地表観測データを用いた場合は、断層面上のすべり速度を地表変位から推定する必要があるため、摩擦パラメータ推定の逆問題としてはより難しい問題設定となる。

図 8 に断層すべり速度を観測データとして用いた際の結果を示す。理想的な観測データを用いた際に PINN を用いてどこまで摩擦特性を解像できるか調べるため、観測点としては現実的な解像度よりも密な 3,000 点の観測点を採用した。図 8 に示すように、PINN の最適化の結果、観測データに fit するすべり速度時空間発展・および真値に近い摩擦パラメータ空間分布を推定できた。摩擦特性分布推定においては、特に地震・SSE などの不安定滑りを引き起こす $a-b$ 負の領域(速度強化領域)の推定が重要であるが、PINN では事前情報なしに円状の速度強化パッチを推定に成功しており、摩擦特性空間分布推定における PINN のポテンシャルを裏付けている。

図 9 に地表変位速度を観測データとして用いた際の結果を示す。観測データとして、断層直上に 10km 間隔においた仮想 GNSS(120 点)で観測した地表変位 3 成分を用いた。PINN の最適化の結果、図 9 (b)に示すように地表変位データを再現するすべり速度が推定され、摩擦パラメータも円状の速度強化パッチをよく再現する推定結果が得られた。 $a-b$ 正の領域(速度強化領域)では $a-b$ は真値と差の大きい値となっている。これは速度強化領域のすべり速度推定の難しさ(この領域はプレート沈み込み速度で定常的にすべっており、SSE のシグナルと比べて地表変位速度から断層すべり速度の推定が難しい)、および速度状態依存摩擦則における $a-b$ 正の値の推定の難しさ($a-b$ 正の値は、不安定性を引き起こす $a-b$ 負の値に比べ、システム挙動に及ぼす影響力が小さく感度が低い)と整合的であり、手法に関わらず測地観測からの摩擦特性推定の問題に内在的に存在する困難であると考えられる。

以上の数値実験結果により、PINN を用いた摩擦特性推定手法が不均質摩擦特性の推定において効果的である可能性が示唆された。次年度以降の課題として、実際の GNSS 観測データへ PINNs を適用し、摩擦パラメータの空間分布の推定に取り組む予定である。

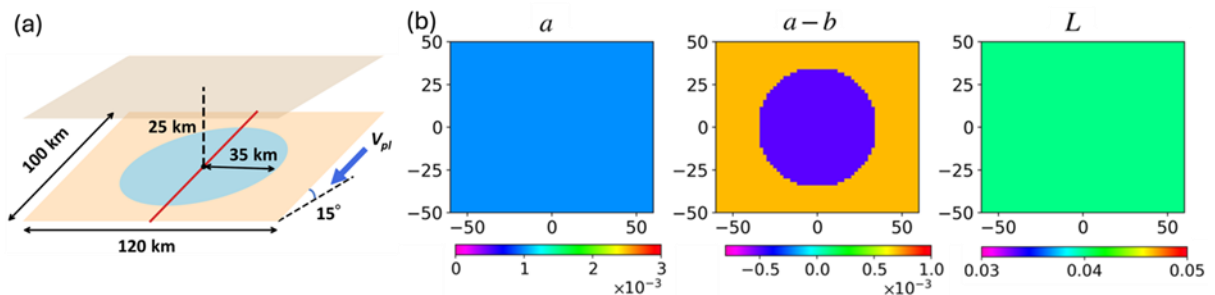


図 7. 本数値実験の問題設定。Hirahara and Nishikiori (2019) の豊後水道 L-SSE モデルに基づく。(a) 断層形状。Dip 角 15 度の平面断層であり、中心に円状の SSE パッチが存在する。(b) 模擬データ作成の際に用いた摩擦パラメータ分布(数値実験の真値)。 $a = 1 \times 10^{-3}$; $L = 4.0 \times 10^{-2}$ [m] で一様であり、 $a-b$ は SSE パッチ外で 7.0×10^{-4} 、パッチ外で -5.0×10^{-4} である。

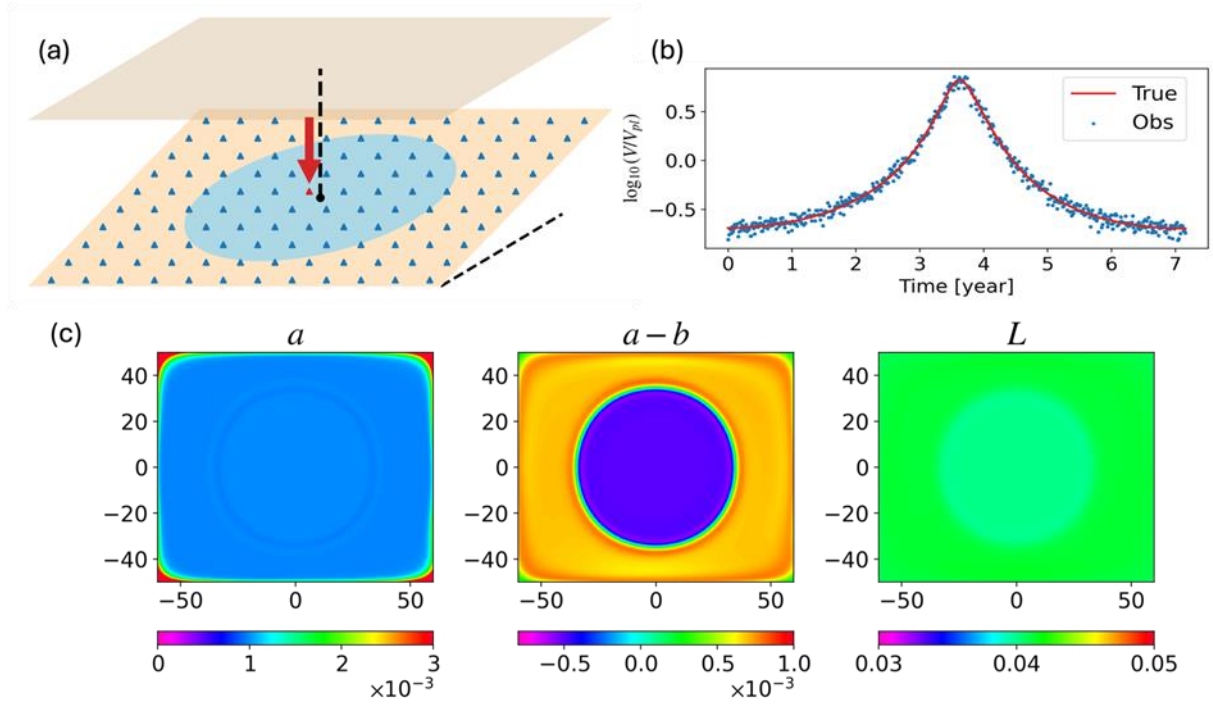


図 8．断層上観測点を用いた場合の数値実験の結果。(a) 模擬観測点分布。(b) (a) の赤点で示された観測点におけるすべり速度データ・および PINN での推定値。(c) 推定された摩擦パラメータ空間分布。

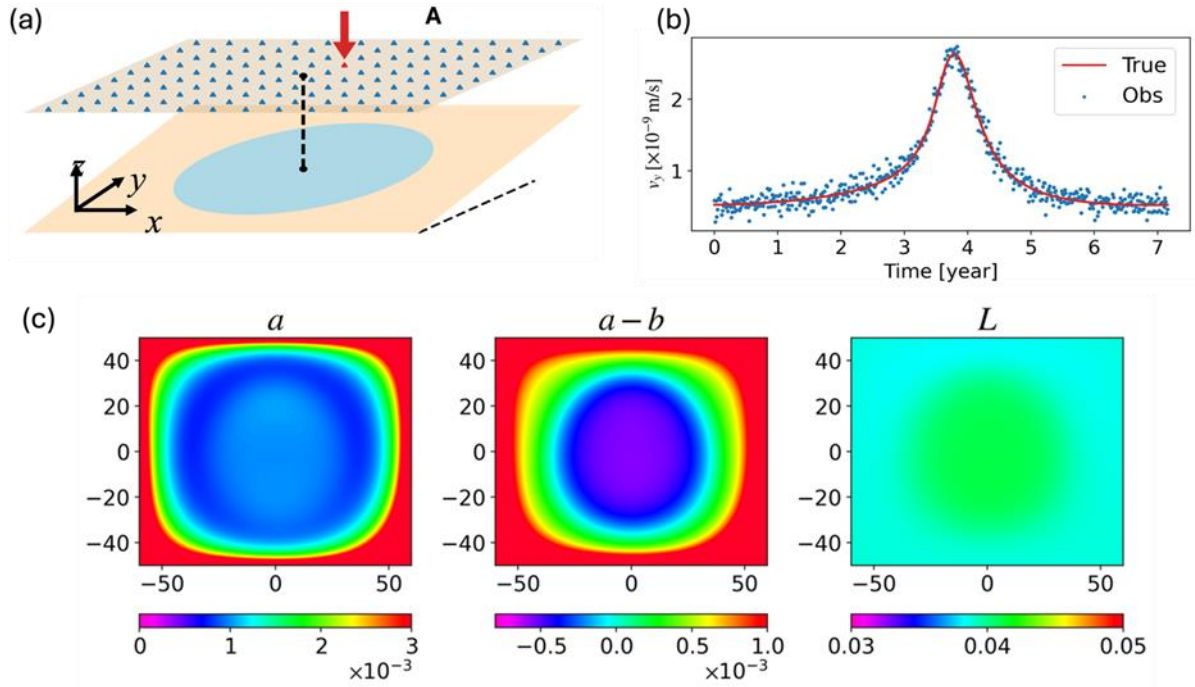


図 9．仮想 GNSS 観測点を用いた場合の数値実験の結果。(a) 模擬観測点分布。(b) (a) の赤点で示された観測点における地表変位速度 y 成分データ・および PINN での推定値。(c) 推定された摩擦パラメータ空間分布。

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.
- Ross, Z. E., Meier, M.-A., Hauksson, E., and Heaton, H. T.: Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning, *Bulletin of the Seismological Society of America* 108 (5A), 2894-2901, 2018
- Tabakatake, T. and Yano, K.: Towards a robust frequency-domain analysis: Spectral Rényi divergence revisited, 2023, arXiv:2310.06902.
- Takahashi, A., Yano, K. and Kano, M.: A GNSS-velocity clustering method applicable at local to global scales, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130, 2025.
- Tanaka, Y., Kano, M., Nishimura, T., Ohta, Y. and Yano, K.: Numerical experiment toward simultaneous estimation of the spatiotemporal evolution of interseismic fault slips and block motions in southwest Japan, *Earth Planets Space* 76(69), 2024.
- Altamimi, Z., Métivier, L., and Collilieux, X.: ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research*, 117(B7), 2012.
- Raissi, M., Perdikaris, P. and Karniadakis, G. E.: Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, *Journal of Computational Physics*, Vol.378, pp.686-707, 2019.
- Dieterich, J.H.: Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, pp.2161-2168, 1979.
- Hirahara, K. and Nishikiori, K.: Estimation of frictional properties and slip evolution on a long-term slow slip event fault with the ensemble Kalman filter: numerical experiments, *Geophysical Journal International*, Vol.219, pp.2074-2096, 2019.

4) 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、データ・手法に関する詳細な議論を促進するため、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) 結論ならびに今後の課題

研究項目 (a) 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、先行研究による検出カタログと概ね調和的な結果を高い精度で得られた。さらに検出精度の時空間特性を詳しく調べた結果、変位量が小さいほど検出困難性が高まるなど直感に合う傾向を確認できた。加えて検出精度とノイズ特性との対応関係も議論した。単独観測点における成果を論文にまとめた。次年度以降、最適な短期的 SSE 検出手法について検討を継続する。

研究項目 (b) では、前年度までの成果である状態空間モデルに基づくすべり・ブロック運動同時推定について、論文として公表した。GNSS ノイズの時空間特性の把握に向けて、ロバストなスペクトル推定手法を、実データへの適用に着手し、データのノイズ構成要因の議論と論文化を行った。また、広域地殻変動場の把握に向けた GNSS 変位速度場のクラスタリング手法を、全地球および台湾の GNSS データに適用し、論文化を行った。

研究項目 (c) では、前年度までに実施した、プレート境界の断層すべりの現状把握・短期推移予測のためのデータ同化手法の 2010 年に豊後水道で発生した長期的 SSE への適用結果を論文として公表した。また、データ同化に用いる物理モデルの不確実性を考慮して、PINNs を用いた断層すべりの数値計算手法の開発を継続し、より現実的な 3 次元断層モデルで、摩擦特性の空間分布に同手法が有効であることを確認した。

また、STAR-E 5 課題合同の勉強会を定期的に開催した。次年度以降も継続して実施し、課題の進捗状況と課題の共有を図ることで、円滑なプロジェクトの推進やプロジェクト間の連携を図る。

(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 32 件、うち海外計 4 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
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解析： （1）頑健なスペクトル解析法の開発（ポスター）	矢野 恵佑・ 加納 将行・ 高畠 哲也・ 田中 優介・ 太田 雄策	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5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解析： （2）GEONET F5解への適用（ポスター）	加納 将行・ 矢野 恵佑・ 高畠 哲也・ 田中 優介・ 太田 雄策	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	○

機械学習による地震学の牽引（口頭）	久保 久彦・ 直井 誠・ 加納 将行	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
Objective clustering of GNSS velocities based on parallel translation and Euler-vector estimation for the identification of crustal blocks（ポスター）	矢野 恵佑・ 加納 将行・ 高橋 温志	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
物理深層学習における Hessian行列を用いた不確実性定量化：摩擦パラメータ空間分布推定への応用（ポスター）	福嶋 陸斗・ 加納 将行・ 平原 和朗・ 大谷 真紀子	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
Data Assimilation for Fault Slip Monitoring and Short-Term Prediction of Spatio-Temporal Evolution of Slips: Application to the 2010 Long-Term SSE in the Bungo Channel, Japan（ポスター）	Kano, M., Y. Tanaka, D. Sato, T. Iinuma, T. Hori	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
西南日本のGNSS時系列の機械学習によるスロースリップのシグナルの自動検出（ポスター）	Tanaka, Y., M. Kano, K. Yano	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
Deep-learning-based fault slip estimation method using GNSS displacements: comparison with the least-squares-based method（ポスター）	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	

物理深層学習を用いた 長期的SSE発生域の摩擦 パラメータ空間分布推 定（口頭）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, J.-P. Avouac, K. Im	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
Deep-learning-based fault slip estimation method using GNSS displacements: comparison with the least-squares-based method（ポスター）	中川 亮・ 福島 洋・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 平原 和朗	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
InSAR tropospheric correction using dense GNSS tropospheric products （口頭）	Fukushima, Y., Y. Ohta, S. N. Sailellah	日本地球惑星 科学連合大会 2024年大会	2024年 5月	国内	
物理深層学習の3次元断 層すべり発展モデルへ の適用：スロースリッ プにおける順・逆問題 （口頭）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, J.-P. Avouac, K. Im	2024年度人工 知能学会全国 大会	2024年 5月	国内	
西南日本のGNSS地殻変 動時系列の深層学習に よるスロースリップの シグナルの自動検出 （口頭）	田中 優介・ 加納 将行	2024年度人工 知能学会全国 大会	2024年 5月	国内	
Inversion for the spatial distribution of frictional parameters on the long-term SSE fault with Physics-Informed Neural Networks（ポス ター）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J.-P. Avouac	2024 SCEC Annual Meeting	2024年 9月	国外	
Data assimilation for fault slip monitoring	Kano, M., R. Fukushima,	International Joint	2024年 9月	国内	

and short-term prediction of the 2010 Bungo Channel slow slip event: A comparison of Markov chain Monte Carlo method and physics-informed neural networks (ポスター)	Y. Tanaka, D. Sato, T. Iinuma, T. Hori	Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024			
Aseismic fault slip estimation from GNSS displacements using model-supervised deep neural interpolator (ポスター)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara, Y. Tanaka, Y. Okada	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024年 9月	国内	
頑健なスペクトル解析法に基づくGNSS時系列の時空間特性 (口頭)	矢野 恵佑・ 加納 将行・ 高畠 哲也・ 田中 優介・ 太田 雄策	日本地震学会 2024年度秋季 大会	2024年 10月	国内	
データ同化を用いた断層すべりの現状把握と短期推移予測手法の開発: 2010年豊後水道長期的スロースリップイベントへの適用 (口頭)	加納 将行・ 田中 優介・ 佐藤 大祐・ 飯沼 卓史・ 堀 高峰	日本測地学会 第 142回講演 会	2024年 10月	国内	○
物理深層学習を用いたスロースリップイベント発生域の摩擦パラメータ空間分布推定 (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J.-P. Avouac	日本測地学会 第 142回講演 会	2024年 10月	国内	
深層学習を利用したGNSS 変位空間補間器の実装と非地震性断層すべり推定 (口頭)	中川 亮・ 福島 洋・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・	日本測地学会 第 142回講演 会	2024年 10月	国内	

	平原 和朗・ 田中 優介・ 岡田 悠太郎				
西南日本のGNSS地殻変動時系列の深層学習によるスロースリップの自動検出（口頭）	田中 優介・ 加納 将行・ 矢野 恵佑	日本測地学会 第 142回講演会	2024年 10月	国内	
局所地域から全球スケールに適用可能な地殻ブロックの同定法：台湾のGNSSデータへの適用例（口頭）	矢野 恵佑・ 高橋 温志・ 加納 将行	日本測地学会 第 142回講演会	2024年 10月	国内	○
季節調整プログラム PySTELの開発とGNSSデータへの適用（ポスター）	岡田 悠太郎・ 上田 拓	日本測地学会 第142回講演会	2024年 10月	国内	
Aseismic fault slip estimation from GNSS displacements using model-supervised deep neural interpolator（ポスター）	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara, Y. Tanaka, Y. Okada	2024 AGU Fall Meeting	2024年 12月	国外	
Physics-Informed Neural Networks for Data assimilation in a model of Slow Slip Events with spatially variable friction（ポスター）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J.-P. Avouac	2024 AGU Fall Meeting	2024年 12月	国外	○
Improving the Accuracy of Tropospheric Delay Noise Corrections in InSAR: A Study of GNSS-Derived Delays Using Various Processing Approaches（口頭）	Sailellah, S. N., Y. Fukushima	The 7th Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics	2025年 2月	国外	

断層すべりモニタリングに向けたデータ同化手法の開発（口頭）	加納 将行	2024年度 固体地球科学データ同化/データ駆動型地球科学に関する研究会	2025年 2月	国内	
西南日本のGNSS地殻変動時系列の深層学習による検出結果の統合（口頭）	田中 優介・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 桑谷 立	2024年度 固体地球科学データ同化/データ駆動型地球科学に関する研究会	2025年 2月	国内	
地殻ブロック同定に向けたGNSS速度ベクトルの階層型クラスタリング手法の改良（口頭）	林 桃萌・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 高橋 温志・ 寺田 吉壱	2024年度 固体地球科学データ同化/データ駆動型地球科学に関する研究会	2025年 2月	国内	
情報科学を用いた測地データ解析と断層すべりモニタリングの高度化（口頭）	加納 将行	第19回日本統計学会春季集会	2025年 3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スリップ自動検出手法の構築（ポスター）	田中 優介・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 桑谷 立	第19回日本統計学会春季集会	2025年 3月	国内	
CNNと測地データを用いた断層すべり検出手法の開発（ポスター）	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	第19回日本統計学会春季集会	2025年 3月	国内	

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 5 件、うち海外計 5 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	主たる 成果
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	Kano, M., Y. Tanaka, D. Sato, T. Iinuma, T. Hori	Earth Planets Space	2024	国外	
Numerical experiment toward simultaneous estimation of the spatiotemporal evolution of interseismic fault slips and block motions in southwest Japan	Tanaka, Y., M. Kano, T. Nishimura, Y. Ohta, K. Yano	Earth Planets Space	2024	国外	
Detecting slow slip signals in southwest Japan based on machine learning trained by real GNSS time series	Tanaka, Y., M. Kano, K. Yano	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025	国外	
A GNSS-velocity clustering method applicable at local to global scales	Takahashi, A., K. Yano, M. Kano	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025	国外	
Physics-informed deep learning for forward and inverse modeling of inplane crustal deformation	Okazaki, T., K. Hirahara, T. Ito, M. Kano, N. Ueda	Journal of Geophysical Research: Machine Learning	2025	国外	

		and Computation			
--	--	--------------------	--	--	--

(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
A GNSS-velocity clustering method applicable at local to global scales	地殻ブロック同定のための地殻変動速度場クラスタリング手法を開発し、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

プロジェクト4年目である令和6年度はデータ同化断層すべりモニタリングシステムの構築に向けて、研究項目(a)(b)に対応する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を継続した。特に、前年度より開発しているGPDをベースとした短期的SSE自動検出手法の開発を継続し、単独観測点を用いた場合の性能評価を実施した。また、GNSS時系列の周波数特性の理解に向けたロバストなスペクトルモデル推定法のGNSSデータへの適用を試み、データに含まれる低周波成分・高周波成分それぞれの要因を検討した。研究項目(c)では、前年度までに従来型のデータ同化で2010年豊後水道長期的SSEがどの程度予測可能かの検証を終え、新たな手法として物理深層学習が摩擦特性推定や断層すべり予測へ有効であることを現実的なモデルで検証した。全体として予定通り進展しており、最終年度は成果のまとめと社会実装へのアウトプットに向けた現業機関との連携を実施する。

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2月10日

場所：日比谷三井カンファレンス・BASE Q ROOM6（ハイブリッド開催）

議事：1. 各課題の令和6年度の研究概要説明

2. 討論

上記の他、STAR-E 5 課題全体の勉強会を全4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 3 回研究者・学生向けイベント「2024 年度地震・測地データ活用 アイデアコンテスト」(2024/7-8)

(<https://evt-eudmrw20240505.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 4 回研究フォーラム (2024/12/23)

(<https://evt-cipwos20241016.eventcloudmix.com/>)

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 4 年目が終了した。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 年目は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、着実に成果が産まれている。特に本プロジェクトで雇用する研究員や関連する学生の成果が出ていることは、今後の「情報科学×地震学」分野を支える人材育成という観点でも重要である。また、今年度も STAR-E 各課題との交流を対面重視で継続して数多く実施し、充実した議論を設けることができた。最終年度はこれまでの成果をアウトプットさせると共に、テーマ間の融合や課題間の連携、また社会実装に向けた現業機関との連携の可能性を模索していきたい。

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
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解析： （1）頑健なスペクトル解析法の開発（ポスター）	矢野 恵佑・ 加納 将行・ 高畠 哲也・ 田中 優介・ 太田 雄策	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5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解析： （2）GEONET F5解への適用（ポスター）	加納 将行・ 矢野 恵佑・ 高畠 哲也・ 田中 優介・ 太田 雄策	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
機械学習による地震学の牽引（口頭）	久保 久彦・ 直井 誠・ 加納 将行	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
Objective clustering of GNSS velocities based on parallel translation and Euler-vector estimation for the identification of crustal blocks（ポスター）	矢野 恵佑・ 加納 将行・ 高橋 温志	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
物理深層学習におけるHessian行列を用いた不確実性定量化：摩擦	福嶋 陸斗・ 加納 将行・ 平原 和朗・	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内

パラメータ空間分布推定への応用（ポスター）	大谷 真紀子			
Data Assimilation for Fault Slip Monitoring and Short-Term Prediction of Spatio-Temporal Evolution of Slips: Application to the 2010 Long-Term SSE in the Bungo Channel, Japan（ポスター）	Kano, M., Y. Tanaka, D. Sato, T. Iinuma, T. Hori	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
西南日本のGNSS時系列の機械学習によるスローリップのシグナルの自動検出（ポスター）	Tanaka, Y., M. Kano, K. Yano	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
Deep-learning-based fault slip estimation method using GNSS displacements: comparison with the least-squares-based method（ポスター）	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
物理深層学習を用いた長期的SSE発生域の摩擦パラメータ空間分布推定（口頭）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, J.-P. Avouac, K. Im	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
Deep-learning-based fault slip estimation method using GNSS displacements:	中川 亮・ 福島 洋・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 平原 和朗	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内

comparison with the least-squares-based method (ポスター)				
InSAR tropospheric correction using dense GNSS tropospheric products (口頭)	Fukushima, Y., Y. Ohta, S. N. Sailellah	日本地球惑星科学連合大会2024年大会	2024年5月	国内
物理深層学習の3次元断層すべり発展モデルへの適用：スロースリップにおける順・逆問題 (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, J.-P. Avouac, K. Im	2024年度人工知能学会全国大会	2024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スリップのシグナルの自動検出 (口頭)	田中 優介・ 加納 将行	2024年度人工知能学会全国大会	2024年5月	国内
Inversion for the spatial distribution of frictional parameters on the long-term SSE fault with Physics-Informed Neural Networks (ポスター)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J.-P. Avouac	2024 SCEC Annual Meeting	2024年9月	国外
Data assimilation for fault slip monitoring and short-term prediction of the 2010 Bungo Channel slow slip event: A comparison of Markov chain Monte Carlo method and physics-informed neural networks (ポスター)	Kano, M., R. Fukushima, Y. Tanaka, D. Sato, T. Iinuma, T. Hori	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024年9月	国内

Aseismic fault slip estimation from GNSS displacements using model-supervised deep neural interpolator (ポスター)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara, Y. Tanaka, Y. Okada	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024年9月	国内
頑健なスペクトル解析法に基づくGNSS時系列の時空間特性 (口頭)	矢野 恵佑・ 加納 将行・ 高畠 哲也・ 田中 優介・ 太田 雄策	日本地震学会 2024年度秋季大会	2024年10月	国内
データ同化を用いた断層すべりの現状把握と短期推移予測手法の開発：2010年豊後水道長期的スロースリップイベントへの適用 (口頭)	加納 将行・ 田中 優介・ 佐藤 大祐・ 飯沼 卓史・ 堀 高峰	日本測地学会第142回講演会	2024年10月	国内
物理深層学習を用いたスロースリップイベント発生域の摩擦パラメータ空間分布推定 (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J.-P. Avouac	日本測地学会第142回講演会	2024年10月	国内
深層学習を利用したGNSS変位空間補間器の実装と非地震性断層すべり推定 (口頭)	中川 亮・ 福島 洋・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 平原 和朗・ 田中 優介・ 岡田 悠太郎	日本測地学会第142回講演会	2024年10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スリップの自動検出 (口頭)	田中 優介・ 加納 将行・ 矢野 恵佑	日本測地学会第142回講演会	2024年10月	国内
局所地域から全球スケールに適用可能な地殻	矢野 恵佑・ 高橋 温志・	日本測地学会第142回講演会	2024年10月	国内

ブロックの同定法：台湾のGNSSデータへの適用例（口頭）	加納 将行			
季節調整プログラム PySTELの開発とGNSSデータへの適用（ポスター）	岡田 悠太郎・ 上田 拓	日本測地学会第142回講演会	2024年 10月	国内
Aseismic fault slip estimation from GNSS displacements using model-supervised deep neural interpolator（ポスター）	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara, Y. Tanaka, Y. Okada	2024 AGU Fall Meeting	2024年 12月	国外
Physics-Informed Neural Networks for Data assimilation in a model of Slow Slip Events with spatially variable friction（ポスター）	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara, M. Ohtani, K. Im, J.-P. Avouac	2024 AGU Fall Meeting	2024年 12月	国外
Improving the Accuracy of Tropospheric Delay Noise Corrections in InSAR: A Study of GNSS-Derived Delays Using Various Processing Approaches（口頭）	Sailellah, S. N., Y. Fukushima	The 7th Japan-Taiwan Workshop on Crustal Dynamics	2025年2 月	国外
断層すべりモニタリングに向けたデータ同化手法の開発（口頭）	加納 将行	2024年度 固体地球科学データ同化/データ駆動型地球科学に関する研究会	2025年2 月	国内
西南日本のGNSS地殻変動時系列の深層学習による検出結果の統合（口頭）	田中 優介・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 桑谷 立	2024年度 固体地球科学データ同化/データ駆	2025年2 月	国内

		動型地球科学に関する研究会		
地殻ブロック同定に向けたGNSS速度ベクトルの階層型クラスタリング手法の改良（口頭）	林 桃萌・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 高橋 温志・ 寺田 吉壺	2024年度 固体地球科学データ同化/データ駆動型地球科学に関する研究会	2025年2月	国内
情報科学を用いた測地データ解析と断層すべりモニタリングの高度化（口頭）	加納 将行	第19回日本統計学会春季集会	2025年3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スリップ自動検出手法の構築（ポスター）	田中 優介・ 加納 将行・ 矢野 恵佑・ 桑谷 立	第19回日本統計学会春季集会	2025年3月	国内
CNNと測地データを用いた断層すべり検出手法の開発（ポスター）	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	第19回日本統計学会春季集会	2025年3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
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	Kano, M., Y. Tanaka, D. Sato, T. Iinuma, T. Hori	Earth Planets Space	2024	国外

slip event in the Bungo Channel, Japan				
Numerical experiment toward simultaneous estimation of the spatiotemporal evolution of interseismic fault slips and block motions in southwest Japan	Tanaka, Y., M. Kano, T. Nishimura, Y. Ohta, K. Yano	Earth Planets Space	2024	国外
Detecting slow slip signals in southwest Japan based on machine learning trained by real GNSS time series	Tanaka, Y., M. Kano, K. Yano	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025	国外
A GNSS-velocity clustering method applicable at local to global scales	Takahashi, A., K. Yano, M. Kano	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025	国外
Physics-informed deep learning for forward and inverse modeling of inplane crustal deformation	Okazaki, T., K. Hirahara, T. Ito, M. Kano, N. Ueda	Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation	2025	国外