

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」

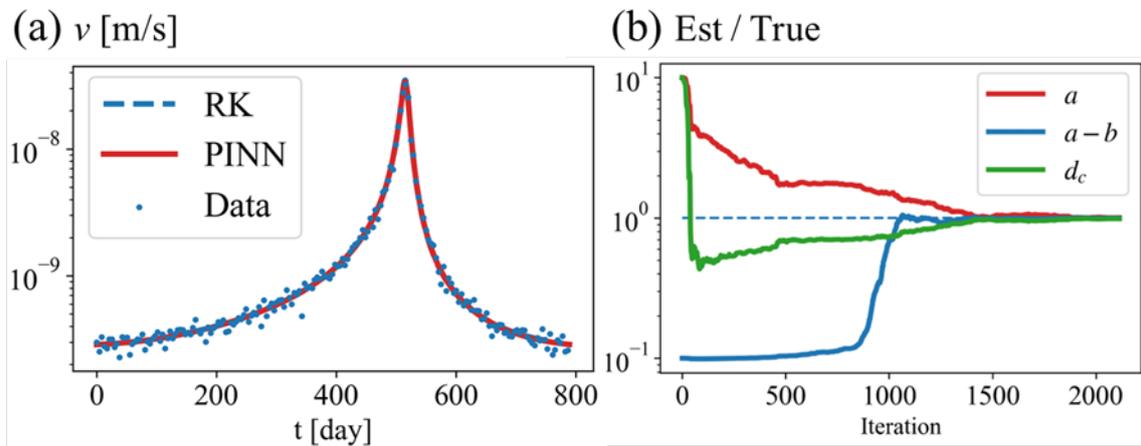
令和5年度
成果報告書

令和6年5月

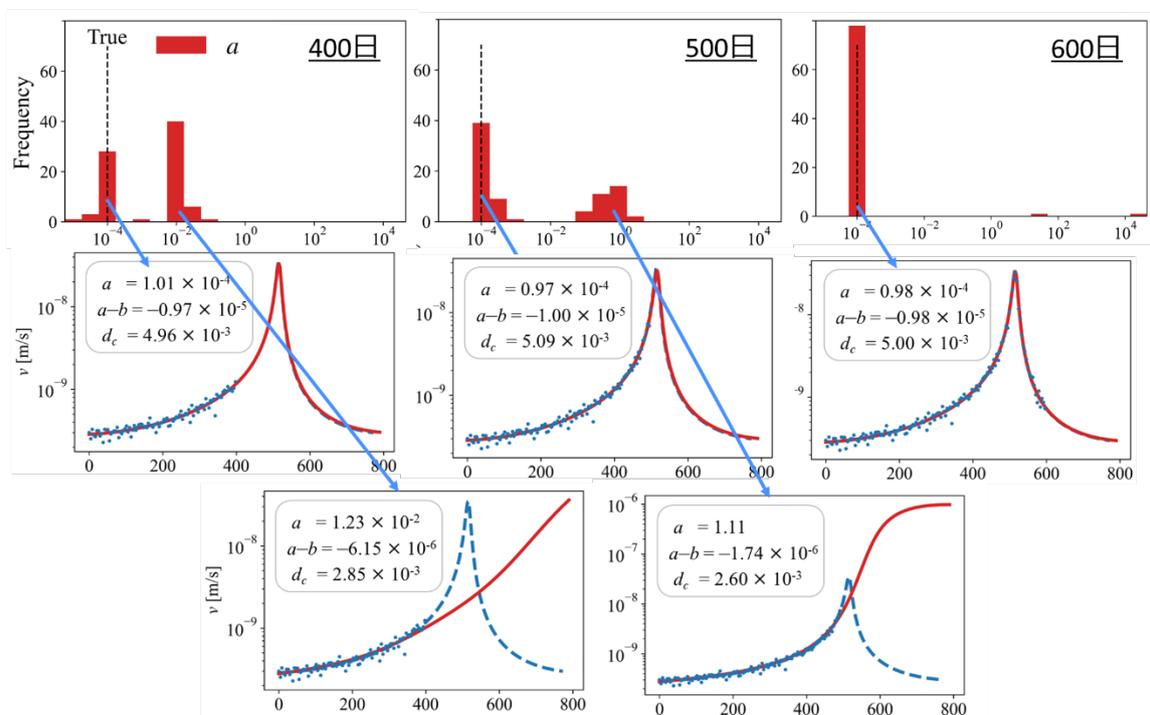
文部科学省研究開発局
国立大学法人東北大学

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5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。

グラビア



12/15



物理深層学習 (PINNs) を用いたばねブロックモデルにおける摩擦特性推定・およびすべり予測結果。(上図) (a) に示す 1 サイクル SSE の断層すべり速度をデータとして与えて摩擦特性を推定した。結果、(b) に示される通り、摩擦パラメータ a , $a-b$, d_c を精度よく推定できている。(下図) PINNs によるすべり予測結果。観測データをサイクルの一部に限り、摩擦パラメータ推定・および滑り予測を行った。400 日・500 日の観測データを用いた場合、摩擦パラメータ a の推定値は 2 山になり、それぞれに対応して成功例・失敗例の両方が見られた。一方、600 日の観測データを用いた場合はほぼすべての推定値が真値に収束し、すべり予測にも成功した。

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5年度の業務の目的	3
(2) 令和5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	22
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	23
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	29
3. まとめ	299
4. 活動報告	30
(1) 会議	30
(2) 勉強会	30
(3) アウトリーチ活動	30
5. むすび	30

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	R5. 4. 1～R6. 3. 31	9,446,923 円	2,834,076 円
同・准教授	福島洋	R5. 4. 1～R6. 3. 31		
同・研究員	田中優介	R5. 4. 1～R6. 3. 31		
同・大学院生	中川亮	R5. 4. 1～R6. 3. 31		
統計数理研究所・准教授	矢野恵佑	R5. 4. 1～R6. 3. 31	—	—
東京大学・特任研究員	中田令子	R5. 4. 1～R6. 3. 31	—	—

海洋研究開発機構・センター長	堀高峰	R5. 4. 1～R6. 3. 31	—	—
京都大学・教授	宮崎真一	R5. 4. 1～R6. 3. 31	—	—
同・教授	西村卓也	R5. 4. 1～R6. 3. 31	—	—
同・学部生	福嶋陸斗	R5. 4. 1～R6. 3. 31	—	—
和歌山大学・講師	八谷大岳	R5. 4. 1～R6. 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う。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う。その際、手法開発の更なる進展があれば適宜反映させる。

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5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。西南日本の沈み込み帯や内陸地域の測地データへの適用に資する手法の改良を行う。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行う。また、研究項目 (b) と連携して、測地データに含まれる信号を分離する手法の開発を行う。

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する。特に測地データに含まれるその他の地殻変動信号との同時推定に向けて両者の分離精度評価を行う。その結果に基づいて、西南日本全域の測地データから断層すべりの時空間発展推定とその不確実性評価を行う。また、機械学習による特徴量変換を用いた断層

すべり手法の開発を継続する。

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開発に着手する。豊後水道の長期的スロースリップイベントに適用することを念頭に、数値シミュレーションによる手法の検証を行い、さらに実観測データへの適用を試みる。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開発を継続する。

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、月1回程度の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。

(2) 令和5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に新たに着手し、検出精度とノイズの時空間特性の比較を行った。また、前年度までに開発した地殻変動データから断層すべりを直接推定する深層学習手法を詳細に検討し、従来の逆解析手法と比較した。研究項目(b)について、西南日本の25年間のGNSS 時系列を観測量とし、西南日本の沈み込み帯のプレート間固着・ブロック運動の時空間発展の状態空間モデルに基づく同時推定の試みを継続した。特に分散・共分散行列を活用した断層すべり不確実性の評価手法の検討を進めた。また、GNSS ノイズの時空間特性の網羅的把握に着手した。(a)(b)に関連して、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開発した。研究項目(c)について、前年度までに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を2010年豊後水道長期的SSEに適用し、実観測データでその有効性の検証を進めた。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、物理深層学習(PINN)を用いた断層すべりの数値計算手法を1次元断層モデルに適用し、摩擦特性推定や断層すべりの予測性能を検証した。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に今年度から新たに着手した。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 時系列の実データを用いた機械学習で、まず単点でのSSEシグナル判

定を試みた。

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 の検出カタログに基づいて学習用データを作成した。初めに同カタログで推定された各イベントの断層モデルを用い、一定以上の大きさの変位が期待される観測点・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 16000 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。モデル構造は地震動検出のために考案された一手法である Generalized Phase Detection (Ross et al., 2018) を参考にし、時系列にシグナルを含む確率を推定する問題を設定した。損失関数は交差エントロピーを用いた。

学習の結果、データ数が少ないため多少の過学習が見られるものの、テストデータで 96-97% 程度の精度が得られた。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、9 割前後のテストデータは 10 回とも正解するなど安定した判定がなされている。また Okada et al. (2022) では検出イベントを信頼性が高い” Class1” と比較的低い” Class2” に分類しているが、本研究でも Class2 のシグナルで見逃し率が 2 倍以上高くなった。実データを直接学習する大きな利点は、現実のノイズの複雑な時空間特性を直接考慮した議論が可能になることである。図 1 に 10 回の試行のうち 1 回以上の見逃しがあったシグナルデータの傾向を示す。予想通り変位量が小さいものに集中しており (a)、また夏季に多くなる傾向がある (b)。ただし夏季に小規模な SSE が多いことを反映した見かけの傾向の可能性があり、ノイズの季節性と検出性能との関係は引き続き議論を要する。

図 2 に検出性能の空間傾向を示す。観測点ごとの検出成功率は四国西部で最も高いが (a)、これは同地域で規模の大きい SSE が頻繁に発生しており、明瞭なシグナルデータが最も多く供給されているためである。今回の学習自体が四国西部に偏って最適化されている可能性もあり、データの公平性の向上は将来課題である。一方で誤検知率の空間分布はデータ数によらず不規則となった (b)。実際に誤検知が起りやすいノイズデータを確認するといずれも明瞭な時系列の屈曲を示し、目視でも非定常な変動と誤認しうるものが多かった。また Grad-CAM による可視化でも時系列の屈曲が判定で重視されていることが示された。ただし西南日本の現実の SSE は主に南東方向の変動を生じるのに対して、それ以外の方向の変動を示す例も見られ、シグナルの方向は考慮できていない可能性がある。

以上のように検出のしやすさは主にシグナルの大きさに対応する一方、誤検知の起りやすさの傾向は不規則であり、ノイズの時空間特性の複雑さを示す結果となった。現状の学習データは手持ちの時系列の 12-13% 程度しか含んでおらず、今後はアンサンブル学習等を用いて広域・長期のノイズ特性を余すところなく取り込む手法を検討する。また GNSS 時系列のノイズは長周期側でパワーが高く、図 2 に示したような見かけの変動は頻繁に生じうる。そのため単点での判定には限界がある。最終的には複数観測点の併用を前提とした手法の高度化を進め、西南日本に限らず普遍的に利用可能な SSE 検出の枠組みを構築することを目指す。

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。

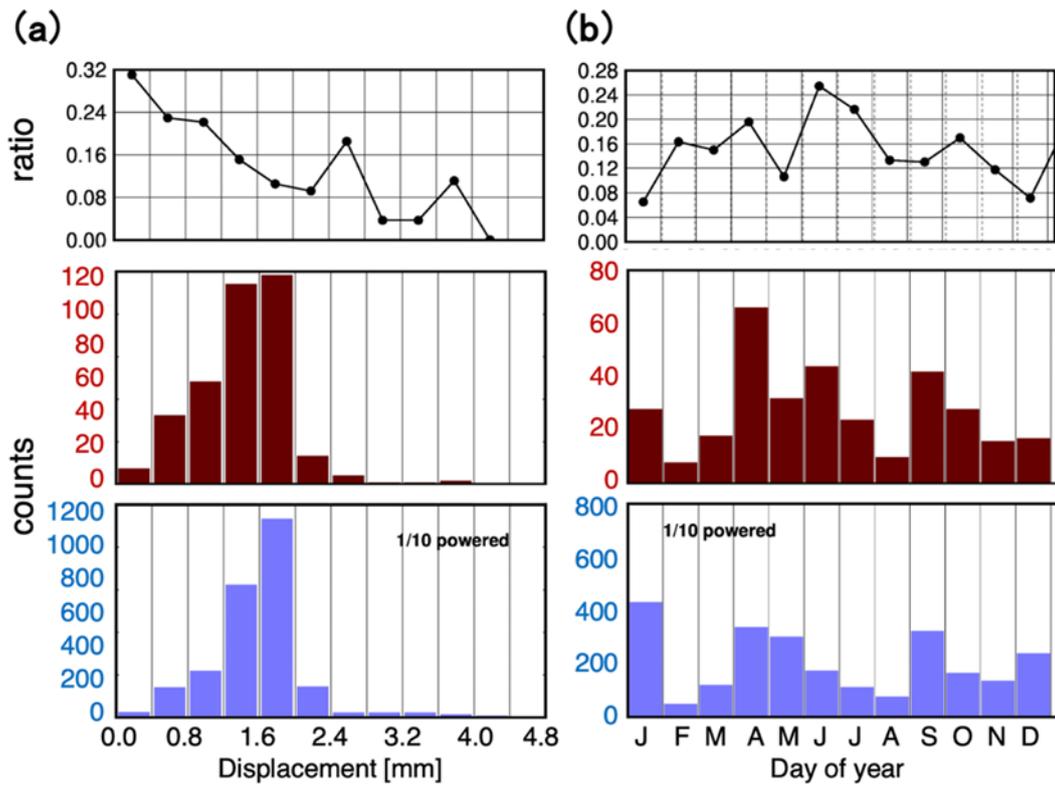


図1. テストデータの判定で、10回の試行のうち1回以上見逃しがあったシグナルデータの傾向。中段が見逃しがあったシグナル、下段が全てのシグナルについてのヒストグラムで、上段が両者の比率を表す。(a)シグナルの変位量に対するヒストグラム。変位量が小さいほど見逃しの比率が高くなる。(b)シグナルの発生時季に対するヒストグラム。概ね各binが各月に対応し、6・7月付近で見逃しの比率が高くなる。

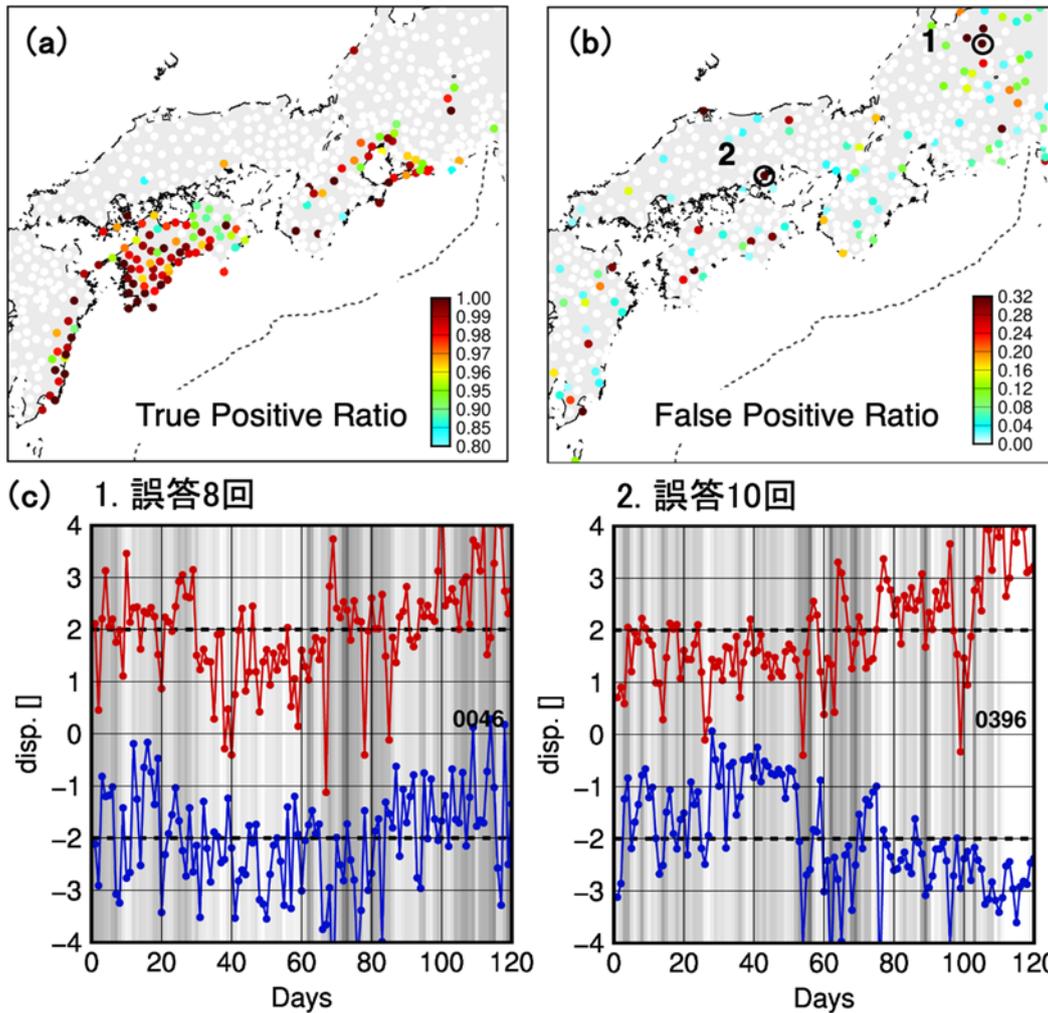


図2. 検出性能の空間傾向と誤検知しやすいノイズデータの例。(a)各観測点のシグナルデータに対する検出成功率 (True Positive Ratio)。10回の試行をまとめた総正答回数と、シグナルデータの個数の10倍との割り算で算出した。(b)各観測点のノイズデータに対する誤検知率 (False Positive Ratio)。算出方法は検出成功率と同様。(c)誤検知が多いノイズデータの例。(b)で丸印を付した、誤検知率が高い2つの観測点における例を表示した。いずれも赤色が東西、青色が南北の動きを表す。2.の例は時間窓後半で東西成分が正・南北成分が負の方向に変動しており、現実のSSEのシグナルと同じ南東方向の変動を示している。対して1.の例は2成分とも正の方向で、北東方向の変動となっている。背景の灰色は Grad-CAM で算出されるヒートマップの値で、時系列の各部分が推定値に与えた影響度合いを表す。

1-2) 地殻変動データから断層すべりを推定する深層学習手法の開発

前年度から開発を進めている地殻変動データから断層すべりを直接推定する深層学習手法に関して、今年度は(1)ノイズを含む合成データへの学習と適用、および(2)従来の逆問題解析手法の推定精度との比較に取り組んだ。前年度までに提案した手法は、GNSSデータから直接かつ半自動的に短期的SSEの断層モデルを推定することを目的とし、2つの畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いるものである。この2つのCNNでは、それぞれ

(a)ある期間の GNSS 観測点における変位から空間に連続的な変位場を推定、(b) (a)で得られた変位場からプレート境界のすべり分布を推定している。これまで四国西部を対象領域に手法の検証を進めてきた。今年度は、これまでに実際に検出された SSE の件数は深層学習モデルの学習には不十分であるため、断層すべり、変位場、GNSS 変位すべてのデータを人工的に生成し、観測ノイズを模した空間的にランダムなノイズを Takamatsu et al. (2023) に基づいて作成し、学習に用いた。また、従来の逆問題解析手法との比較を行った。

図 3 に提案手法および従来手法のすべり推定結果の例を示す。従来手法として非負拘束の下での最小二乗法を採用した。真のすべり分布(a)から計算されるノイズなしの GNSS 変位(b)に 3 パターンのノイズを加え(c)、それぞれに従来手法(d)と提案手法(e)を適用した。従来手法はすべりが発生していない領域においても、すべりを推定しているのに対し、本手法はすべりの発生領域に推定を限定できていることが分かる。また、以下の式(1)で定義される Variance Reduction (VR)で推定の精度を定量的に求めた結果からも、本手法の推定がより正確であると言える。式中で、 S_i^{true} 、 S_i^{est} は i 番目の小断層における正解すべり量、推定すべり量をそれぞれ表している。

$$VR = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_i (S_i^{true} - S_i^{est})^2}{\sum_i S_i^{true2}} \right) \quad (1)$$

また、同様の推定を 100 パターンのノイズを加えた人工変位データに対して行い、二乗平均平方根誤差(Root Mean Square Error; RMSE)に基づいて検出成功/失敗をラベリングした。図 4 に 30km 四方の断層すべりにおいて検出成功となったノイズの割合を小断層ごとに示す。(a)~(c)の図はそれぞれ(a)従来手法の検出成功割合、(b)本手法の検出成功割合、(c)両手法の残差((b)-(a))を示す。両手法ともにプレート境界深部よりも観測点直下など浅部での検出成功割合が高く、特に本手法では土佐湾直下で発生するすべりの検出成功割合が約 50%と高い結果となった。この領域における本手法の優位性は(c)からも読み取ることができ、土佐湾周辺では最大約 40%、それ以外の観測点直下では最大約 20%、従来手法の検出成功割合を上回っていた。

次年度以降は実データへの適用を経て、既知イベントとの比較による本手法の整合性の検証および未発見イベントの検出を視野に、西南日本全体への拡張を含めて本手法のブラッシュアップを進める。

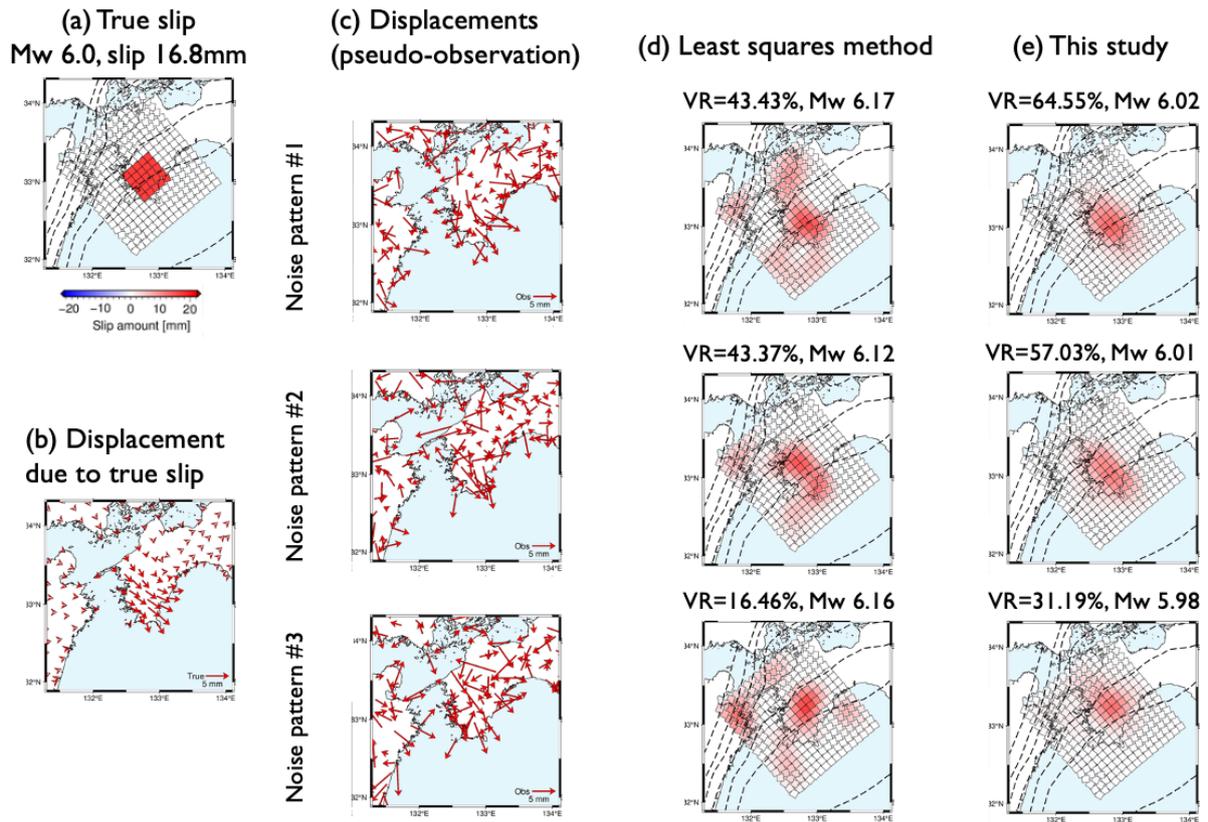


図3. 提案手法および従来手法の人工データへの適用例。(a)真の断層モデル。(b)真の断層モデルから期待される変位。(c)3パターンのノイズをそれぞれ(b)に加えた擬似観測データ。(d)(e)擬似観測変位から従来手法、提案手法でそれぞれ推定される断層モデル。VRと推定モーメントマグニチュード(Mw)が図の上に併記されている。

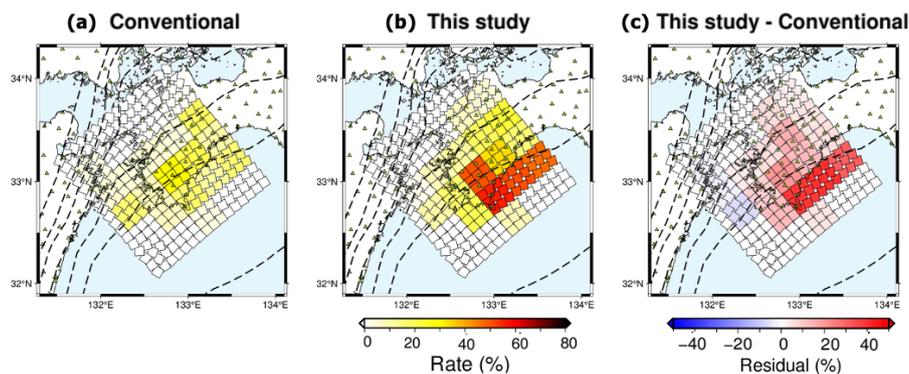


図4. (a)(b)従来手法、提案手法それぞれのRMSEに基づく検出成功割合。(c)本手法の検出成功割合と従来手法の検出成功割合の差((b)-(a))。

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) 断層すべり・ブロック運動の時空間発展の大規模同時推定

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向けて、ブロック運動モデルに基づく地震間断層すべり時空間発展の大規模同時推定に前年度に引き続き取り組んだ。西南日本全域の743ヶ所のGEONET観測点の25年分の日座標時系列を観測量として、プレート境界と内陸の断層帯の場所ごとの断層すべり、及びそれらに囲まれたブロックの剛体運動の時間発展を状態空間モデルのもとで同時推定する数値実験を行った。特に今年度は定常なプレート間固着に加えて、東海・紀伊水道・豊後水道の三つの地域で発生する長期的SSEのすべりも推定対象に加えた。数値実験で与える正解値は、先行研究で推定された現実の長期的SSEのすべり量・すべり範囲・継続期間に合わせて設定した。

その結果、東海のSSEのすべりは正解の範囲より深い側に染み出し、観測量に対する感度が高い陸寄りに推定されやすい傾向が得られた(図5)。対して紀伊水道では主に浅い側、すなわち解像度が悪い沖側に推定されやすくなった。さらに豊後水道では浅い側・深い側・西隣のいずれにもすべりが染み出す傾向が見られた。これに対して未知パラメータと共に推定される分散・共分散行列から、3つのSSEのすべり域と周囲の断層域との相関度合いを表示したのが図6である。東海では正解のすべり域の陸寄り、紀伊水道では陸寄りと沖側、豊後水道では陸寄り・沖側・西隣の小断層に対して比較的高い相関が見られ、これらの方向にすべり範囲の不確実性が大きくなることが示されている。いずれも数値実験で示されるすべり範囲のバイアスと合致する傾向である。

上記のように断層すべりの範囲の推定不確実性は地域ごとに異なる傾向を示し、その様子は共分散行列で示される小断層間の相関構造から評価可能であることが示された。これにより推定された断層すべり域のうちどこまでが本当か評価可能であり、結果の解釈に有用である。ただし、すべり範囲の不確実性は断層・観測点配置などの問題設定によって決まる本当の不確実性に加え、平滑化拘束の影響やグリーン関数等モデルの不完全性の影響が組み合わさったものである。したがって図6に示された相関の物理的意味は慎重な議論を要する。次年度以降は実データの解析のための準備としてグリーン関数や小断層の設定手法の改良、平滑化拘束の最適化といったモデルの高度化を加える。また、データが持つ情報量に即した小断層・ブロックの数の設定など、問題設定自体の最適化のための情報量規準を検討する。

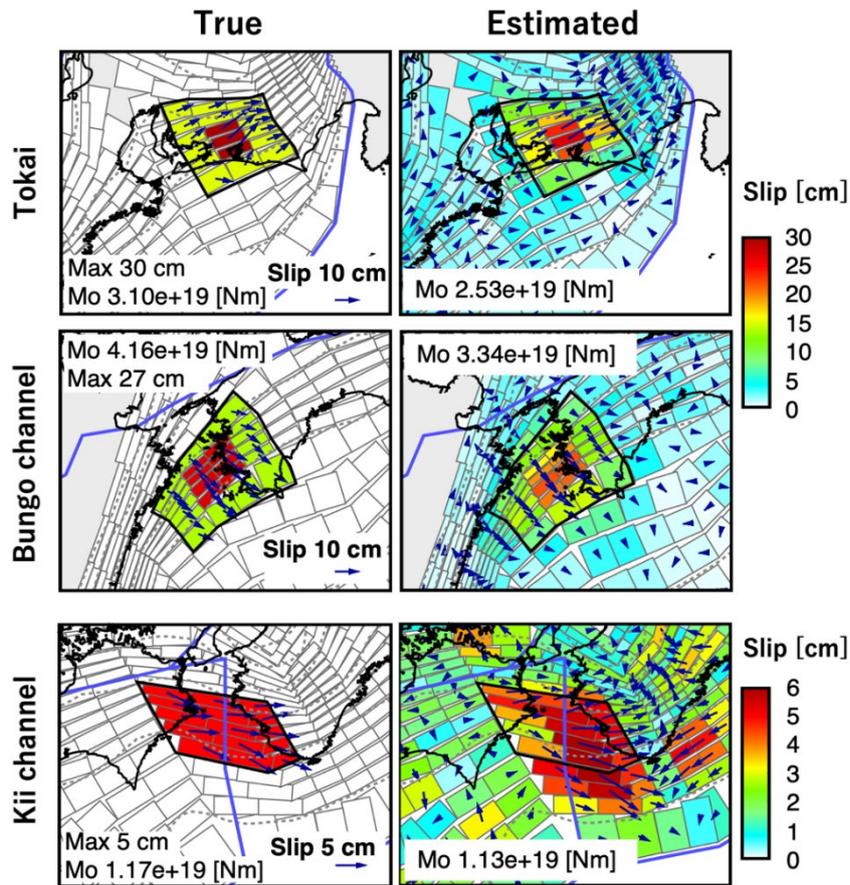


図5. 数値実験で推定された東海・紀伊水道・豊後水道の長期的SSEのすべり。左の列が与えた正解値・右の列が推定値で、カラーと矢印ですべりの方向と大きさを示す。また黒枠の範囲の換算モーメントをそれぞれ記している。3つの地域いずれも正解の範囲の外にすべりが染み出して推定されており、黒枠の範囲のモーメントとしては全て過小推定になっている。東海では正解の範囲の深い側に隣接する小断層でも若干のすべりが推定されており（カラーに注目）、紀伊水道では浅い側、豊後水道ではその両方に加えて西隣にもすべりが染み出している。（Tanaka et al. in revision）

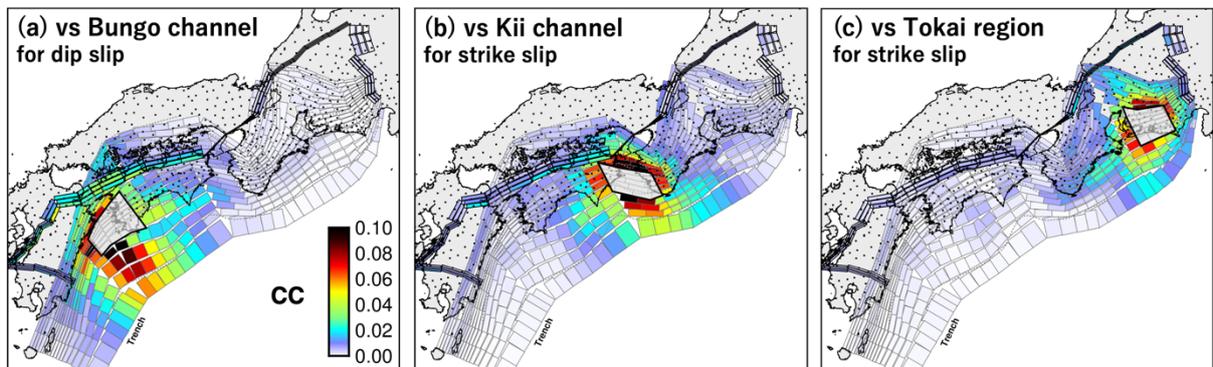


図6. 共分散行列に示される3つのSSEのすべり域とそれ以外の小断層との相関。各小断層について、黒枠内の小断層との相関係数の平均絶対値を表示。仮定した小断層に対して東海と紀伊水道のSSEはStrike slip、豊後水道についてはDip slipが卓越するため、それらに対する結果を表示した。

2-2) GNSS 時系列の周波数特性の網羅的把握

断層すべりの推定の高度化に向けて、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)の網羅的な抽出を開始した。GNSS データとして、一般的に誰でも使用可能な国土地理院が公開する F5 解を使用した。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、今回は混合型のスペクトル形状を用いる。これにより、(1)フラットなノイズを表現できる、(2)異なるスペクトル減衰を表現できる、(3)原点付近で発散する/しないを選択できる、といったことが可能になる。地球物理学的には、低周波領域のスペクトルは GNSS 特有の観測点に依存した固有の動きを含み、一方で高周波領域では GNSS データ前処理方法の改良によってフラットなノイズになることが期待される。

まず、網羅的な抽出に向け、時系列のスペクトル特性を頑健に推定する方法を STAR-E 統計数理研究所課題と共同し開発した (Takabatake and Yano, 2023)。開発手法は 2 つのスペクトル密度 S 、 \tilde{S} に対して以下で定義される spectral Rényi divergence に基づきスペクトルパラメータを推定する：

$$D_\alpha[S:\tilde{S}] \equiv \frac{1}{2(1-\alpha)} \int \left[\log \{ \alpha \tilde{S}(f) + (1-\alpha)S(f) \} - \alpha \log \tilde{S}(f) + (1-\alpha) \log S(f) \right] df, \quad (2)$$

この手法は特に観測スペクトルに周波数領域での外れ値(モデルで考慮していないシャープなスペクトルピーク等)や時系列領域での外れ値(地震やアンテナ交換などのオフセット、欠損補完や前処理に伴うアーティファクト)の存在に対して頑健にスペクトル特性を推定することができる。Takabatake and Yano (2023)は、理論的に開発手法が Whittle 尤度法などの従来の近似尤度ベースの手法よりも頑健であることを示した。さまざまな外れ値を含む大量のデータに適用するためには、このような頑健性は必須の性質であると言える。この理論的な性質はパワースペクトルの計算法に依存しないことも分かった。ただし、実際上はパワースペクトルの計算法によって多少の性能変化があり、観測を離散フーリエ変換して利用するのが現状では最も良いことが数値的に分かった。

開発した手法を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 解に適用を試みた。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(3)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。

$$S(f) = S_{low}(f) + S_{high}(f) = \frac{\sigma_{low}^2}{\left\{ 1 + \left(\frac{f}{f_{c,low}} \right)^{\alpha_{low}} \right\}^2} + \frac{\sigma_{high}^2}{\left\{ 1 + \left(\frac{f}{f_{c,high}} \right)^{\alpha_{high}} \right\}^2} \quad (3)$$

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。図 7 に従来の Whittle 尤度に基づくフィッティングと、提案手法によるフィッティングの比較の例を示す。従来手法は外れ値に強く影響を受けて観測スペクトル全体を説明できていないのに対し、提案

手法の場合はこれらの外れ値に影響なくフィッティングできていることが分かる。図 8 に東西成分の低周波成分の振幅に関するパラメータ σ_{low}^2 の時空間分布を示す。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。

今後は推定された膨大なモデルパラメータの時空間的な特徴を整理するとともに、パラメータの推定誤差について検討する予定である。

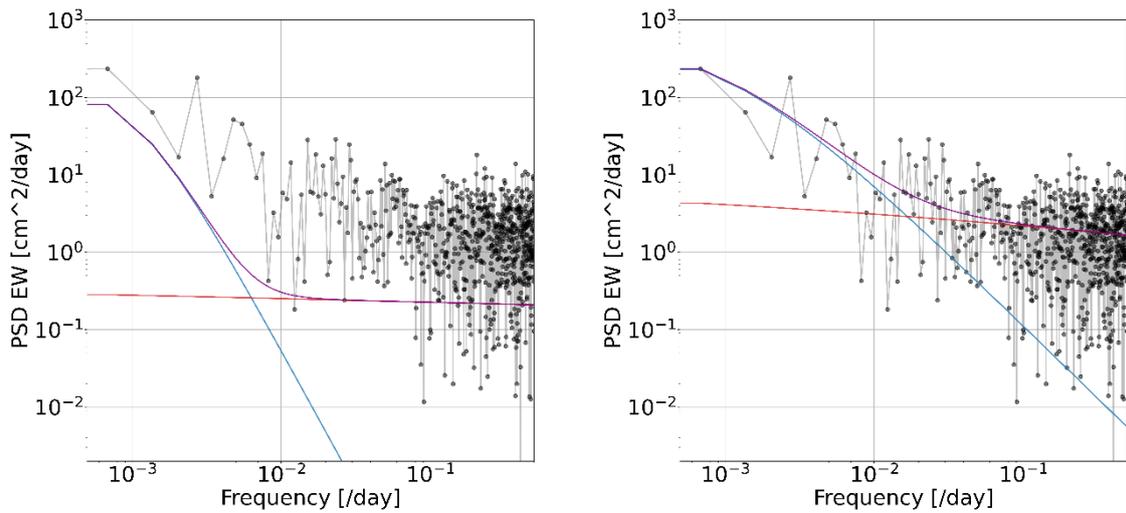


図 7. (左) Whittle 尤度に基づくフィッティングと、(右) 提案手法によるフィッティングの例。紫線が理論スペクトルのフィッティング結果を、青線・赤線がそれぞれ低周波成分、高周波成分の項を表す。

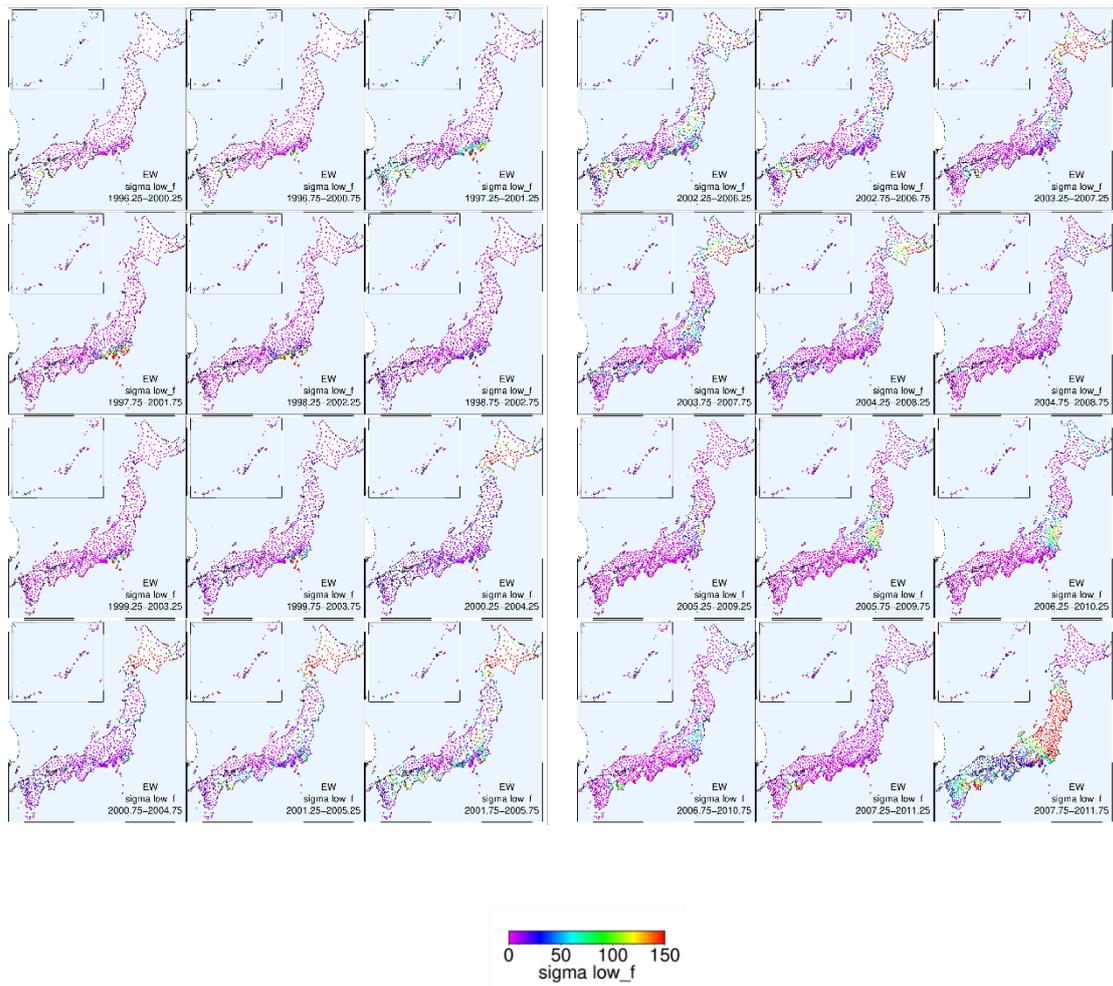


図8. 低周波成分の振幅の空間分布の時間変化の例。

2-3) 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

断層すべりの推定の高度化に向けて、局所地域から広範地域まで広さを問わず使える地殻ブロックの客観的同定方法を開発した。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. in revision)。Thatcher (2007, 2009)は、GNSS観測データを用いて、それまで知られていたものより多くの地殻ブロックを同定し、GNSS観測データからの地殻ブロックを適切に同定できることを示唆した。これにより、適切な地殻ブロック構造を仮定するための客観的な同定方法が近年提案されている。Simpson et al. (2012)、Savage and Simpson (2013a, 2013b)、Takahashi et al. (2019)は、GNSS速度データの速度ベクトル空間での階層的クラスタリングを用いて、それぞれサンフランシスコ湾・モハベ砂漠・台湾における地殻ブロックの同定を行った。Savage and Wells (2015)、Savage (2018)、Takahashi and Hashimoto (2022)は、オイラーベクトルを用いた非階層的クラスタリングを用いて、それぞれ太平洋岸北西部・西南日本・ニュージーランドにおける地殻ブロックの同定を行った。しかしながら、速度ベクトル空間でのクラスタリング

は必ずしも回転運動を考慮できず、一方でオイラーベクトルによるクラスタリングは階層型にする事が難しく、また必ずしも観測点の隣接性が考慮できない。そこで、これらの問題点を解決すべくそれぞれのアプローチの統合を目指し、地殻ブロックの新たな客観的同定法を開発した。

開発手法はオイラーベクトルによる回転運動と接ベクトルの平行移動を利用する。まず、2点 P, Q の GNSS の位置座標 r_P, r_Q と速度ベクトル v_P, v_Q を用いてオイラーベクトルを推定する。その推定値を $\hat{\omega}_{PQ}$ と書く。推定値 $\hat{\omega}_{PQ}$ の当てはまりによって2点 P, Q の速度ベクトルの非類似度

$$d_{EV}(P, Q) \equiv \sqrt{\|v_P - r_P \times \hat{\omega}_{PQ}\|^2 + \|v_Q - r_Q \times \hat{\omega}_{PQ}\|^2}, \quad (4)$$

を定める。一方で、GNSS 速度ベクトルを球面上の相異なる2点に分布する接面に平行なベクトル（接ベクトル）と見なし、この接ベクトルを移動させる「平行移動」 $\Pi_{\gamma(P,Q)}$ （図9）を導入し、地理的に離れた2点の速度ベクトルの非類似度

$$d_{PT}(P, Q) \equiv \|v_P - \Pi_{\gamma(P,Q)} v_Q\|^2, \quad (5)$$

を定める。ここで、この「平行移動」を用いて先行研究で提案された速度ベクトル空間でのクラスタリングを説明する事ができる。2つの非類似度の和を用いた階層クラスタリングを行うことで、平行移動と回転運動のいずれも考慮した局所地域から広域までどの領域範囲にも適用可能な GNSS 速度ベクトルの階層クラスタリングが可能となる。開発手法を Altamimi et al. (2012) が構築した ITRF2008 プレートモデルおよび公開データを用いて、観測点の位置座標と速度ベクトルのみから客観的にプレート情報の復元ができることを確認した（図10）。

今後は開発したクラスタリングを日本全土に適用し、適用結果を状態空間モデルに組み込む予定である。

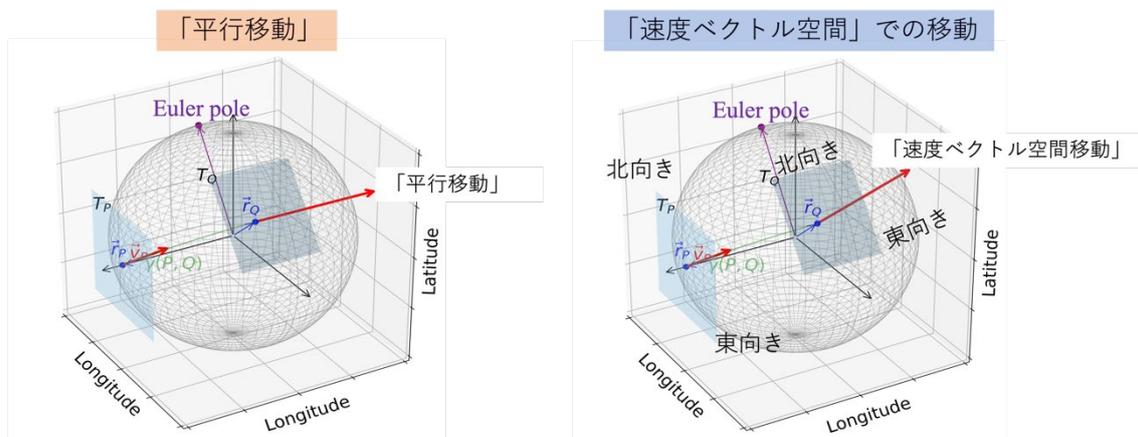


図9. 開発手法の概要：平行移動により球上の2点間の速度ベクトルの距離を測ることが

できる(左図)。一方、速度ベクトルをそのまま比較してしまうと右図のようなミスマッチが発生する。

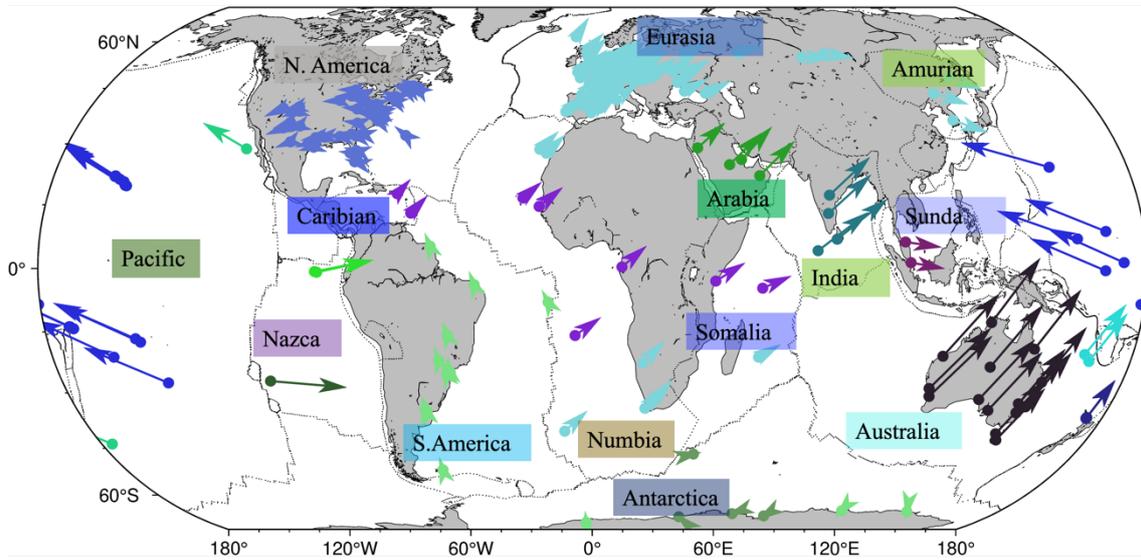


図 1 0 . 開発手法による GNSS 速度ベクトルのクラスタリング結果。すでに知られているブロックに対応したクラスタリング結果に概ねなっている。そのほかにも細かなブロックがある可能性も示唆している。

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) 豊後水道長期的 SSE のデータ同化断層すべりモニタリング手法の開発

前年度までに豊後水道で 2010 年に発生した長期的 SSE を対象に、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) によるデータ同化断層モニタリング手法の開発を行い、数値実験でその性能を検証した。豊後水道の断層すべりの時空間発展を計算する断層モデルとして、Hirahara and Nishikiori (2019)で採用された矩形平面断層モデルを採用した(図 1 1 a)。このモデルは豊後水道近傍のプレート沈み込み帯を 1 枚の矩形平面断層で近似し、領域を 3000 枚の同じ大きさの小断層で分割したものである。この際、領域内部に円形のパッチを配置し、パッチ内で SSE が発生すると仮定する。各小断層 i は以下の弾性体の準動的な運動方程式 (Rice, 1993) と速度状態依存摩擦構成則 (Dieterich, 1979; Rice, 1993) に従う。開発手法は、断層のすべり様式を既定する SSE パッチ内の摩擦パラメータを地殻変動データの同化により推定するものである。今年度は開発手法を 2010 年ごろに発生した長期的 SSE を捉えた GNSS 実観測データに適用し、仮定した単純なモデルによるデータの再現性や短期推移予測の能力を調べた。

図 1 1 右に 2008.5-2011.5 年の 3 年間のデータを同化した場合の結果を示す。大まかな傾向として観測時系列を再現できていることが分かる。次に同化するデータの期間を 0.5 年から 0.5 年刻みで変化させ摩擦パラメータを推定し、それによる短期推移予測を試みた(図 1 2)。図から明らかなように、SSE の発生に伴って、予測結果も SSE の挙動を示し、データの期間が長くなるにつれて、より正確な予測が可能になっている。ただし、この推定では、摩擦パラメータに対する事前情報として断層パッチが巨大地震のような不安定す

べりを起こさないという条件を課している。この条件を課さない場合はすべりの加速と共に地震発生を予測する結果が得られた。SSE が発生する場所で巨大地震が発生しないということは断定できない(つまり摩擦パラメータに事前分布で制約を必ずしも与えられない)ため、最大すべりケースとしてはこのような地震が発生する予測もあり得るということは今後念頭に置いておくことが重要であると考えられる。

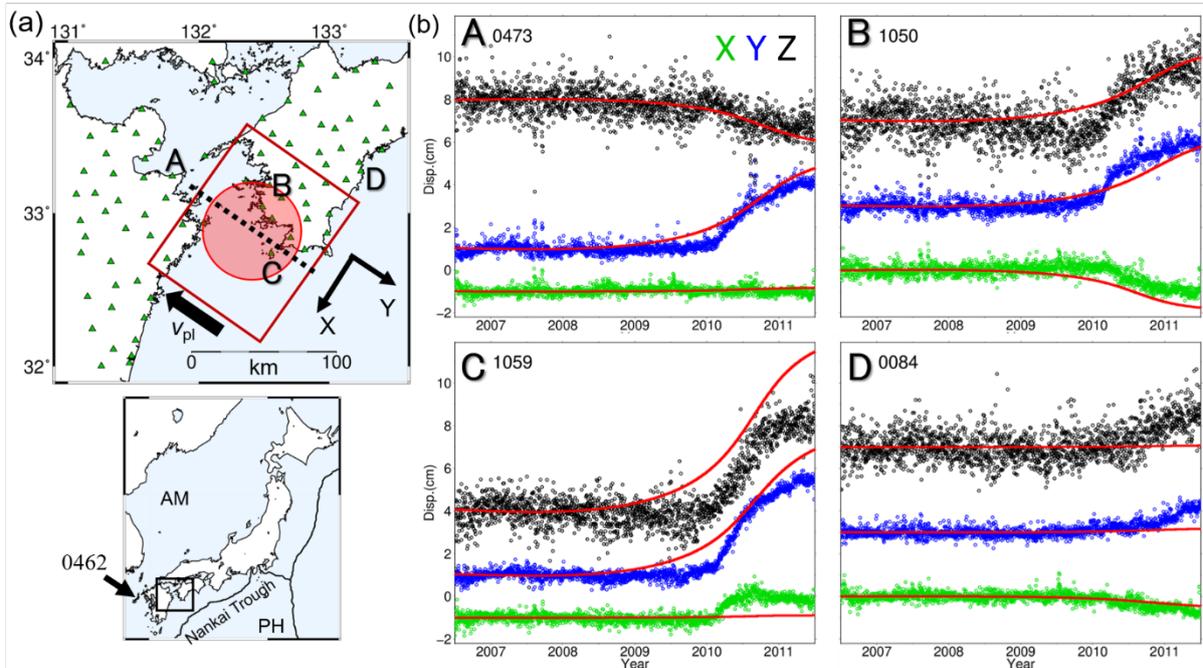
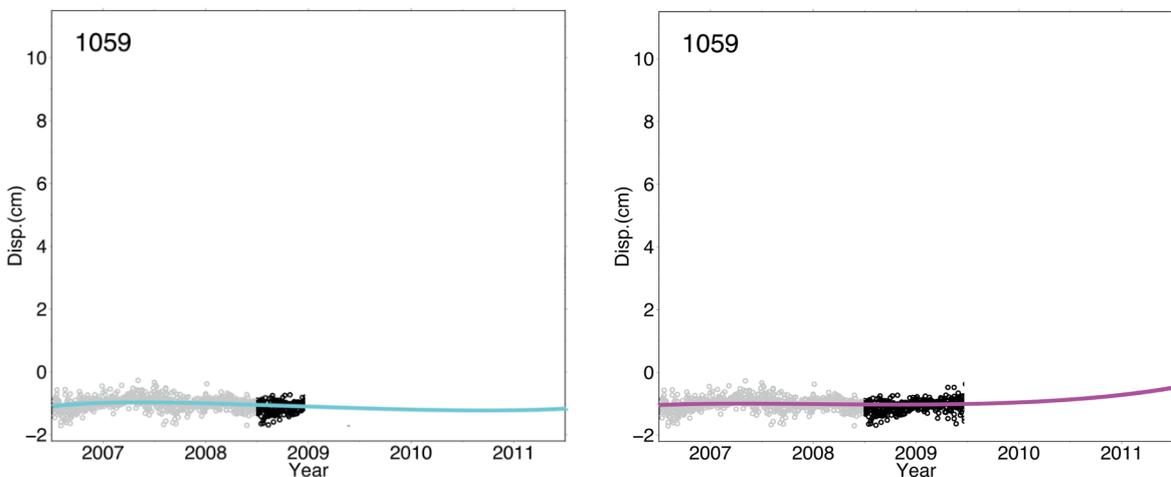


図 1 1. (a) 採用した断層モデル (Hirahara and Nishikiori, 2019)。赤四角が断層領域、赤丸が SSE 発生域、三角が GNSS 観測点を表す。(b) GNSS データへのデータ同化結果の例。緑・青・黒丸がそれぞれ海溝に平行・垂直な水平成分・上下成分の時系列を、赤線が推定された摩擦パラメータ 100 サンプルにより計算された地殻変動を表す。観測点 A-D の位置は(a)に示した。(Kano et al., in revision)



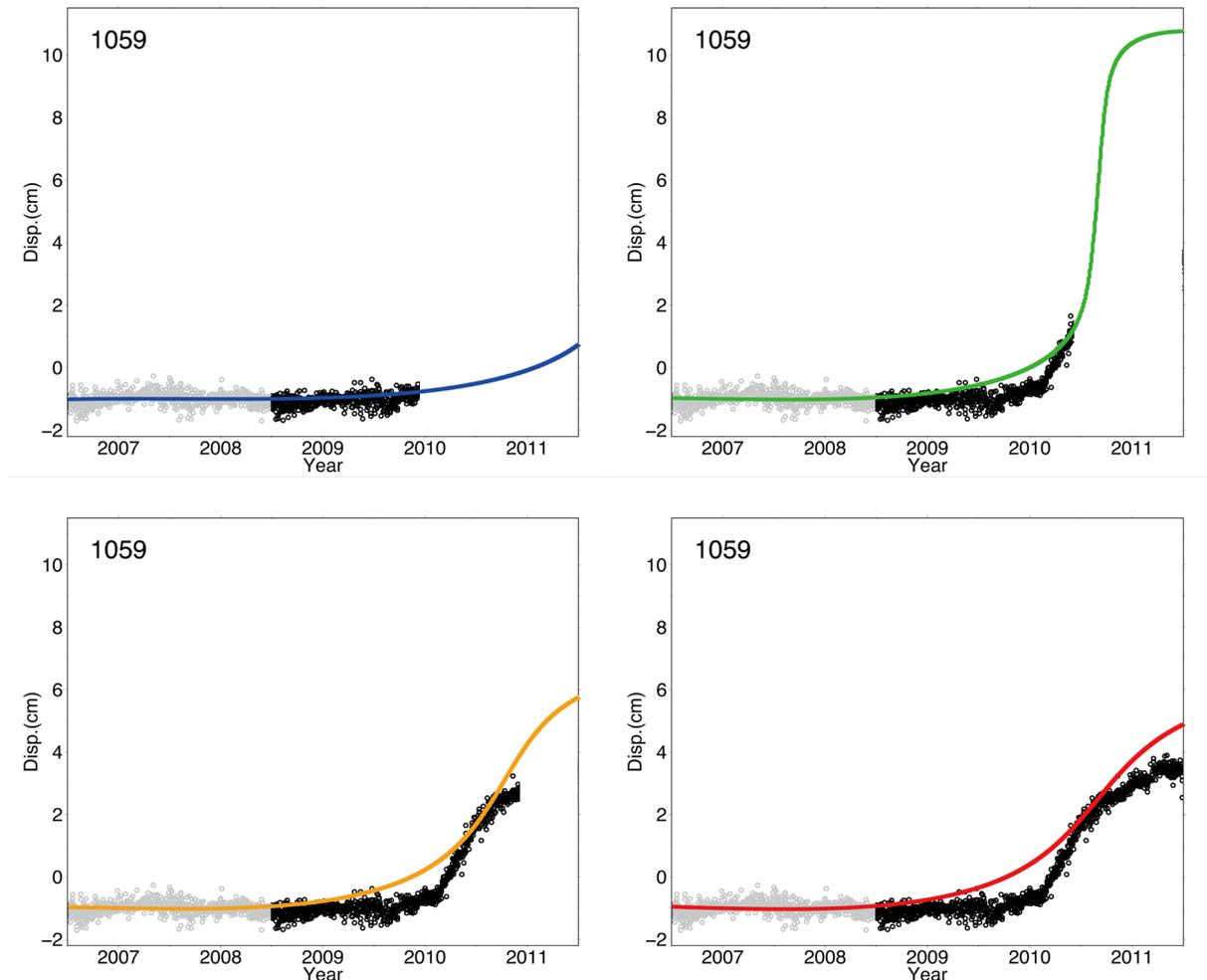


図 1.2. GNSS 観測点 1059 における推移予測結果の例。各図において黒丸がデータ同化した時系列、色線がデータ同化により推定された摩擦パラメータによる予測結果である。同化する時系列を長くするほどより予測が正確になることが分かる。

3-2) 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、データ同化に用いる物理モデルの不確実性を考慮できる手法として、前年度に引き続き物理深層学習 (Physics-Informed Neural Networks: PINNs, Raissi et al., 2019) を用いた手法開発に取り組んだ。まず断層すべりモデルの挙動を決定する重要なパラメータである速度状態依存則における摩擦パラメータ a , $a-b$, dc の推定を目指し、1 自由度ばねブロックモデルにおいて SSE の模擬観測データから摩擦パラメータを求める数値実験を行った。前年度取り組んだ PINNs の順問題としてのすべり数値計算では、すべり速度 $v(t)$ と状態変数 $\theta(t)$ の時間発展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。逆問題としての摩擦パラメータ推定は、損失関数にデータとの誤差を評価する項を追加し、NN パラメータと同時に推定したい摩擦パラメータを最適化することにより実行できる。模擬観測データとしては、1 サイクルの SSE の数値計

算結果に Gaussian ノイズを付与したものをを用いた。その結果、図 1 3 に示すように、PINN により摩擦パラメータをすべり速度から推定することができた。このように、摩擦パラメータ推定において PINNs が有効な手法であることがわかる。

次に、現在進行中の SSE 観測データからすべり発展推移を予測する状況を想定した数値実験に取り組んだ。前述の数値実験では 1 サイクルに相当する約 800 日間のデータを用いたのに対し、本実験ではサイクル前半 400 日・500 日・600 日の観測データを与える。この限られた観測データから摩擦パラメータを推定し、物理モデルに基づいてその後のすべり発展を求めることで、すべり予測を目指した。最適化の際の初期値依存性を考慮するため、3 つの観測データに対して NN パラメータ・および摩擦パラメータの初期値を変えた計 80 ケースでそれぞれ最適化を行い、摩擦パラメータ推定・すべり予測を行った。結果を図 1 4 に示す。400 日・500 日の観測データを用いた場合、初期値に応じてすべり予測の成功例・失敗例の両方が見られ、推定摩擦パラメータのヒストグラムは 2 つのピークを持つ分布となった。一方、600 日の観測データを用いた場合ではほぼすべてのケースで摩擦パラメータ推定・およびすべり予測に成功した。600 日の観測データはすべり速度ピークの時刻の後の観測を含んでいるため、摩擦パラメータを 1 つに拘束するためにはすべり時刻ピーク後のデータが重要であると分かる。すべり始めの情報だけでは fast 地震のオーダーまですべり速度が上がるのか、途中で加速が止まって SSE 的挙動を示すか分からないことを考慮すると、この結果は物理的に整合的だと考えられる。この観測期間の不足によるすべり発展の不確定性を考慮してすべり予測を行うためには、パラメータを確率分布として扱いその分布を評価できる Bayesian-PINNs (Yang et al., 2021) の適用が有効であることが想定され、確率的すべり予測のために今後重要な課題であると考えている。また次年度以降の課題として、実データへの適用を見据えて 2 次元断層を用いた地震サイクルモデルへと 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。

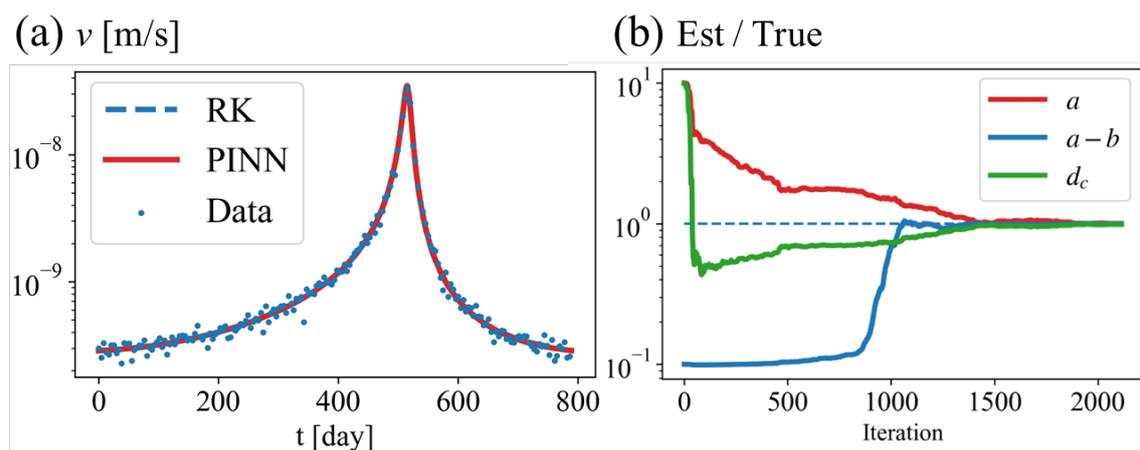


図 1 3. PINN による摩擦パラメータ推定の結果。(a) すべり速度の模擬観測データ(青点)と PINN の出力(赤線)。数値計算解(青線)の上に PINN の出力が重なっており、PINN が正解のすべり速度時間発展を計算できている。(b) 摩擦パラメータ推定値を真値で規格化した値。縦軸は log スケールであり、真値の 10 倍・0.1 倍の初期値から始めた場合でも最終的に真値に収束した。

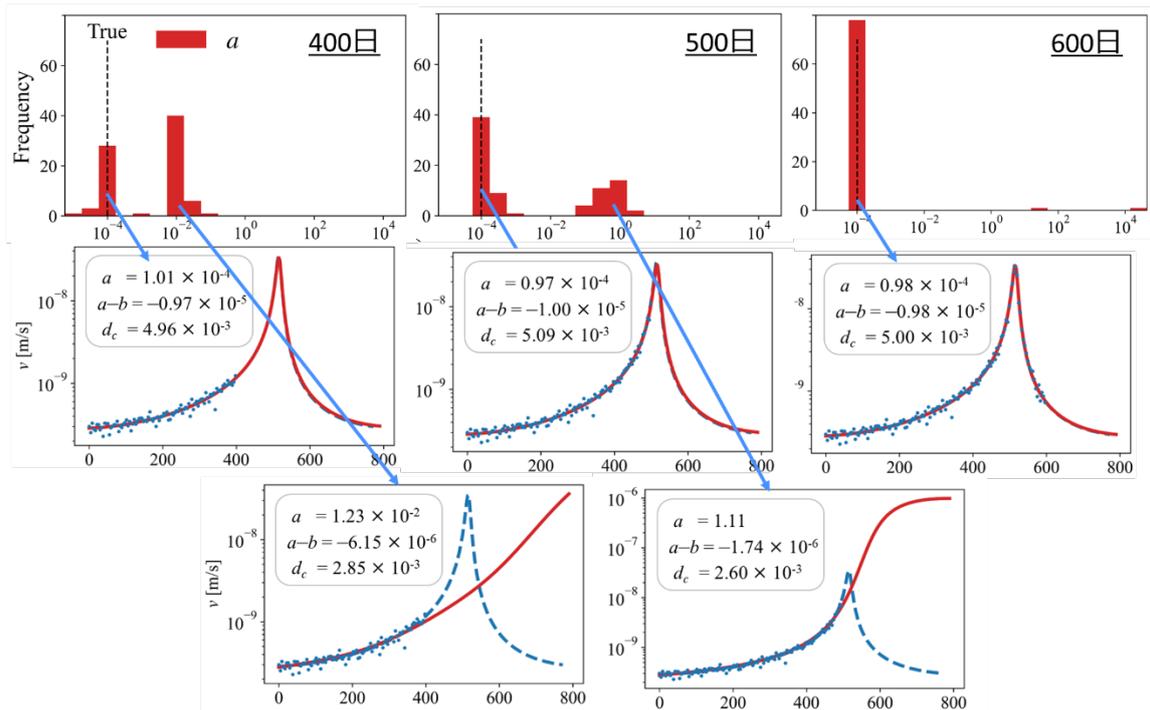


図 1 4. PINN によるすべり予測結果。各観測データにおける a の推定値のヒストグラム、および各観測データでの予測成功例・失敗例を示す。下側のグラフで赤線が PINN の予測結果・青点線が真のすべり発展であり、青点が使用したデータである。400 日・500 日の観測データを用いた場合、パラメータ推定値は 2 つのピークを持つのにに対し、600 日の観測データを用いた場合はほぼすべての推定値が真値に収束している。

今年度は PINNs を用いた摩擦特性推定・断層すべり予測手法の確立を目指し、ばねブロックモデルにおいて有効性を検証した。成果は Fukushima et al. (2023) として国際誌に出版され、対応するプログラムを本課題のウェブサイトで公開した。次年度以降は、実観測データへの応用に向けて 3 次元断層モデルへの拡張などに取り組む。

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
- Takamatsu, N., Muramatsu, H., Abe, S., Hatanaka, Y., Furuya, T., Kakiage, Y., Ohashi, K., Kato, C., Ohno, K. and Kawamoto, S.: New GEONET analysis strategy at GSI: daily coordinates of over 1300 GNSS CORS in Japan throughout the last quarter century. Earth Planets Space 75, 49, 2023.
- Tabakatake, T. and Yano, K.: Towards a robust frequency-domain analysis:

- Spectral Rényi divergence revisited, 2023, arXiv:2310.06902.
- Thatcher, W.: Microplate model for the present-day deformation of Tibet, *Journal of Geophysical Research* 112(B01401), 1-13, 2007.
 - Thatcher, W.: How the continents deform: The evidence from tectonic geodesy, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 237-262, 2009.
 - Simpson, R. W., Thatcher, W., and Savage, J. C: Using cluster analysis to organize and explore regional GPS velocities, *Geophysical Research Letters*, 39(18), 2012.
 - Savage, J. C., and Simpson, R.W.: Clustering of GPS velocities in the Mojave Block, southeastern California, *Journal of Geophysical Research* 118, 1747-1759, 2013a.
 - Savage, J. C., and Simpson, R. W.: Clustering of velocities in a GPS network spanning the Sierra Nevada Block, the Northern Walker Lane Belt, and the Central Nevada Seismic Belt, California-Nevada, *Journal of Geophysical Research*, 2013b.
 - Takahashi, A., Hashimoto, M., Hu, J. C., Takeuchi, K., Tsai, M. C., and Fukahata, Y.: Hierarchical cluster analysis of dense GPS data and examination of the nature of the clusters associated with regional tectonics in Taiwan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(5), 5174-5191, 2019.
 - Savage, J. C., and Wells, R. E.: Identifying block structure in the Pacific Northwest, USA, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(11), 7905-7916, 2015.
 - Savage, J. C.: Euler-vector clustering of GPS velocities defines microplate geometry in southwest Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(2), 1954-1968, 2018.
 - Takahashi, A, and Hashimoto, M.: Cluster Analysis of Dense GNSS Velocity Field Reveals Characteristics Associated With Regional Tectonics in New Zealand, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127 (11), 2022.
 - Altamimi, Z., Métivier, L., and Collilieux, X.: ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research*, 117(B7), 2012.
 - 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.
 - Rice, J.R.: Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, pp.9885-9907, 1993.
 - Dieterich, J.H.: Modeling of rock friction 1. Experimental results and constitutive equations, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, pp.2161-2168, 1979.

- 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.
- Yang, L., Meng, X., and Karniadakis, G. E.: B-PINNs: Bayesian physics-informed neural networks for forward and inverse PDE problems with noisy data, *Journal of Computational Physics*, 425, 109913, 2021.
- Fukushima, R., Kano, M., and Hirahara, K.: Physics-informed neural networks for fault slip monitoring: Simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring-slider system, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023.

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、勉強会を定期的で開催した。勉強会では関連する研究を行っている様々な分野の方に講演を依頼し、プロジェクト内外問わず幅広く参加者を募った(一部の勉強会を除く)。またこれまでオンライン中心で開催していたが、今年度は対面中心のハイブリッド開催とし、顔を突き合わせて活発な議論を行った。また、STAR-E プロジェクト 5 課題全体の勉強会についても前年度より継続して開催した。こちらも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。令和 5 年度に開催した勉強会の概要は「4. 活動報告」に記載する。

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に着手し、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。また、前年度開発した地殻変動データから断層すべりを直接推定する深層学習手法を詳細に検討し、従来の逆解析手法と比較した。次年度以降、実観測データへの適用及び論文化を目指す。

研究項目 (b) では、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、分散・共分散行列の構造に基づくすべり不確実性の評価手法を高度化した。特にすべり範囲の不確実性の空間不均質を明らかにした。また、本内容について論文投稿を行った。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開発し、実データへの適用に着手した。今後は日本全域を対象として GNSS データ時系列の時空間特性を把握し、論文化・データの公開を行う。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開発し、全地球および台湾の GNSS データに適用した。今後は論文化を目指す。

研究項目 (c) では、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を、2010年に豊後水道で発生した長期的 SSE の GNSS データに適用した。同化するデータ期間に応じてすべりの予測結果が変化することを示した。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を開発し、1次元モデルで摩擦特性推定や断層すべりの予測性能を検証した。今後は3次元断層すべりの計算への拡張を行うと共に、摩擦特性の空間分布を推定する逆問題手法の開発に取り組む。豊後水道の長期的 SSE の GNSS データに適用し、PINN とデータ同化による結果を比較・検討する。

また、東北大課題の勉強会と 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を行う。

(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 36 件、うち海外計 9 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
Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event (ポスター)	Kano, M., Y. Tanaka, T. Iinuma, T. Hori	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内
西南日本のプレート境界すべり・ブロック運動の時空間発展の大規模同時推定に向けた未知パラメータ推定・分離精度評価 (口頭)	田中 優介・加納将行・太田 雄策・西村 卓也・矢野 恵佑	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内
Direct estimation of the fault slip of short-term slow slip events from GNSS data using deep learning (口頭)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内
Physics-Informed Neural Networks for modeling slow slip events in a spring-slider system with a rate and state friction law (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内

Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench (III) (口頭)	Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide,	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内
Comparison of the GNSS tropospheric delays from different processing tools for InSAR correction (ポスター)	Sailellah, S., Y. Fukushima	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内
Unwrapping dense and complex SAR interferograms: Examples from the 2023 Turkey Earthquake ()	Fukushima, Y., Y. Okur	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年 5月	国内
Physics-Informed Neural Networksのばねブロックモデルへの適用 (口頭)	福嶋 陸斗・加納 将行・平原 和朗	2023年人工知能学会全国大会	2023年 6月	国内
状態空間モデルに基づく西南日本の地震間断層すべり・ブロック運動の時空間発展の大規模同時推定 (口頭)	田中 優介・加納 将行・太田 雄策・西村 卓也・矢野 恵佑	震源インバージョンワークショップ	2023年 7月	国内
Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event (ポスター)	Kano, M., Y. Tanaka, T. Iinuma, T. Hori	28 th IUGG General Assembly	2023年 7月	国外
Simultaneous estimation of the spatio-temporal evolution of fault slip and block motion in the southwest Japan subduction zone (ポスター)	Tanaka, Y., M. Kano, Y. Ohta, T. Nishimura, K. Yano	28 th IUGG General Assembly	2023年 7月	国外

Direct estimation of the fault slip of short-term slow slip events from GNSS data using deep learning (口頭)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	28 th IUGG General Assembly	2023年7月	国外
Physics-Informed Neural Networks for modeling slow slip events in a spring-slider system with a rate and state friction law (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	28 th IUGG General Assembly	2023年7月	国外
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 (口頭)	加納 将行・矢野 恵佑・田中 優介・中川 亮・福島 陸斗	2023年度統計関連学会連合大会	2023年9月	国内
スペクトル密度に対するダイバージェンスについて: 確率分布間のダイバージェンスからの新たな視点 (口頭)	矢野 恵佑・高島 哲哉	2023年度統計関連学会連合大会	2023年9月	国内
Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench (IV) (ポスター)	Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023	2023年9月	国内
Physics-informed Neural Networks for fault slip monitoring: simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring slider system (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023	2023年9月	国内
Objective clustering of GNSS velocities based on parallel translation and rotational motion for the identification of crustal	Yano, K., A. Takahashi, M. Kano	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023	2023年9月	国内

Blocks (ポスター)				
物理深層学習の断層すべり計算への適用：ばねブロックモデルにおけるSSE数値計算・摩擦特性推定・すべり予測 (口頭)	福嶋 陸斗・加納 将行・平原 和朗	日本測地学会第140回講演会	2023年10月	国内
平行移動とオイラーベクトル推定に基づくGNSS速度ベクトルのクラスタリングによる地殻ブロックの同定 (口頭)	矢野 恵佑・高橋 温志・加納 将行	日本測地学会第140回講演会	2023年10月	国内
西南日本のプレート境界すべり・ブロック運動の時空間発展の推定・分離精度評価 (ポスター)	田中 優介・加納 将行・太田 雄策・西村 卓也・矢野 恵佑	日本測地学会第140回講演会	2023年10月	国内
Creep characteristics along the central part of the Philippines Fault on Leyte Island from ALOS-2 time-series analysis (口頭)	Okur, Y., Y. Fukushima	日本測地学会第140回講演会	2023年10月	国内
Statistical modeling and machine learning studies on the forecast of earthquakes and fault slip (口頭)	Fukushima, Y.	Symposium on statistical modeling, machine Learning, and artificial intelligence insights for natural hazard and risk studies	2023年10月	国外
Symposium on statistical modeling, machine Learning, and artificial intelligence insights for natural hazard and risk studies (口頭)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	Symposium on statistical modeling, machine Learning, and artificial intelligence	2023年10月	国外

		insights for natural hazard and risk studies		
機械学習による西南日本のGNSS時系列中の短期SSE自動検出の試み（口頭）	田中 優介・加納 将行	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
平行移動とオイラーベクトル推定に基づくGNSS速度ベクトルのクラスタリングによる地殻ブロックの同定（口頭）	矢野 恵佑・高橋 温志・加納 将行	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
マルチスケール円形パッチモデルを用いた地震発生サイクルの数値シミュレーション（口頭）	中田 令子・堀 高峰・青地 秀雄・井出 哲	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
物理深層学習の断層すべり計算への適用：ばねブロックモデルにおけるSSE数値計算・摩擦特性推定・すべり予測（口頭）	福嶋 陸斗・加納 将行・平原 和朗	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
日本の活断層や火山の微小変動検出を目的としたInSARデータへの深層学習適用の困難性（口頭）	福島 洋	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
Applicability of Multiscale Circular Patch Model in Numerical Simulation of Earthquake Generation Cycle（ポスター）	Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年 12月	国外
Challenges in using Artificial Intelligence on InSAR in the Japanese context（口頭）	Fukushima, Y.	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年 12月	国外
Spectral Rényi divergence and its robustness（口頭）	Yano, K.	The ISI-ISM-ISSAS Joint Conference	2023年 12月	国外

GNSSデータへの深層学習の適用による短期的SSEの断層すべり推定	中川 亮・福島洋・加納 将行・矢野 恵佑・平原和朗	「次世代型高密度多点観測に基づく地震・火山災害軽減に関する研究」研究集会	2024年 2月	国内
物理深層学習の3次元SSEモデルへの適用（口頭）	福島 陸斗・加納将行・平原 和朗・大谷 真紀子・J. P. Avouac・K. Im	2023年度研究集会「機械学習×地震研究」	2024年 3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）	福島 陸斗・加納将行・平原 和朗・大谷 真紀子・J. P. Avouac・K. Im	2023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	2024年 3月	国内
Spectral Rényi divergence and its application（口頭）	矢野 恵佑	2023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	2024年 3月	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計4件、うち海外計4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
Recurrence intervals for $M > 7$ Miyagi-ken-Oki earthquakes during an $M \sim 9$ earthquake cycle	Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, R. Hino	Progress in Earth and Planetary Science	2023	国外
Physics-informed neural networks for fault slip monitoring: Simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2023	国外

slip events in a spring-slider system				
Recent advances in earthquake seismology using machine learning	Kubo, H., M. Naoi, M. Kano	Earth, Planets and Space	2024	国外
Minimum information dependence modeling	Sei, T., K. Yano	Bernoulli	2024	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
Physics-Informed Neural Networks for Fault Slip Monitoring: Simulation, Frictional Parameter Estimation, and Prediction on Slow Slip Events in a Spring-Slider System	物理深層学習を用いて断層すべりを数値計算し順問題を解く、また摩擦特性を推定する逆問題を解く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3年目である令和5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。前年度に開発した断層すべりを直接推定する深層学習手法の開発に加えて、今年度からはGPDをベースとした短期的SSE自動検出手法の開発に新たに着手した。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た。研究項目(c)への基礎情報となる地殻変動の検知とより正確な断層すべりの把握に向けて、解析技術の開発は予定通り順調に進展している。加え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が分かってきた。従来のデータ同化手法との比較が今後の検討課題と言える。全体として予定通り進展しており、次年度以降も最終目的である断層すべりモニタリングシステムの確立に向けた準備を継続して行う。

4. 活動報告

(1) 会議

- 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：2024年2月22日

場所：TKP 新橋カンファレンスセンター（ハイブリッド開催）

議事：1. 各課題の令和5年度の研究概要説明
2. 討論

(2) 勉強会

- 2024/1/22 第11回勉強会（京都大学・野末陽平氏）
「歪み速度場推定の新手法の開発：スパースモデリングの適用」
- 2024/2/27 第12回勉強会（京都大学・上田拓氏）
「日本の地殻内地震発生数とせん断ひずみエネルギー密度変化の空間的相関関係」

上記のほか、STAR-E 5 課題全体の勉強会を全5回実施した。

(3) 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2回研究者・学生向けイベント「地震・測地データ活用 アイデアコンテスト」（2023/6-9）
(<https://evt-ejimju20230620.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3回研究フォーラム（2023/12/22）
(<https://star-e-project-20231222.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3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年目を受けて、3年目はGNSS時系列の周波数特性の理解、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、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を実施した。いくつかのテーマにおいては論文化や論文投稿に至った内容もあり、着実に成果が出始めている。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、今年度はSTAR-E各課題との交流を対面重視で数多く実施し、充実した議論を設けることができた。次年度以降もこれまでの成果を継続・発展させると共に、テーマ間の融合や課題間の連携を充実させていきたい。

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
Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event (ポスター)	Kano, M., Y. Tanaka, T. Iinuma, T. Hori	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内
西南日本のプレート境界すべり・ブロック運動の時空間発展の大規模同時推定に向けた未知パラメータ推定・分離精度評価 (口頭)	田中 優介・加納 将行・太田 雄策・西村 卓也・矢野 恵佑	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内
Direct estimation of the fault slip of short-term slow slip events from GNSS data using deep learning (口頭)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内
Physics-Informed Neural Networks for modeling slow slip events in a spring-slider system with a rate and state friction law (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内

Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench (III) (口頭)	Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide,	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内
Comparison of the GNSS tropospheric delays from different processing tools for InSAR correction (ポスター)	Sailellah, S., Y. Fukushima	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内
Unwrapping dense and complex SAR interferograms: Examples from the 2023 Turkey Earthquake ()	Fukushima, Y., Y. Okur	日本地球惑星科学連合大会2023年大会	2023年5月	国内
Physics-Informed Neural Networksのばねブロックモデルへの適用 (口頭)	福嶋 陸斗・加納将行・平原 和朗	2023年人工知能学会全国大会	2023年6月	国内
状態空間モデルに基づく西南日本の地震間断層すべり・ブロック運動の時空間発展の大規模同時推定 (口頭)	田中 優介・加納将行・太田 雄策・西村 卓也・矢野 恵佑	震源インバージョンワークショップ	2023年7月	国内
Data assimilation for reproducing and predicting the fault slip behavior in the 2010 Bungo Channel long-term slow slip event (ポスター)	Kano, M., Y. Tanaka, T. Iinuma, T. Hori	28 th IUGG General Assembly	2023年7月	国外
Simultaneous estimation of the spatio-temporal	Tanaka, Y., M. Kano, Y. Ohta, T. Nishimura, K. Yano	28 th IUGG General Assembly	2023年7月	国外

evolution of fault slip and block motion in the southwest Japan subduction zone (ポスター)				
Direct estimation of the fault slip of short-term slow slip events from GNSS data using deep learning (口頭)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	28 th IUGG General Assembly	2023年7月	国外
Physics-Informed Neural Networks for modeling slow slip events in a spring-slider system with a rate and state friction law (口頭)	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	28 th IUGG General Assembly	2023年7月	国外
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 (口頭)	加納 将行・矢野 恵佑・田中 優介・中川 亮・福嶋 陸斗	2023年度統計関連学会連合大会	2023年9月	国内
スペクトル密度に対するダイバージェンスについて: 確率分布間のダイバージェンスからの新たな視点 (口頭)	矢野 恵佑・高島 哲哉	2023年度統計関連学会連合大会	2023年9月	国内
Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench (IV) (ポスター)	Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023	2023年9月	国内
Physics-informed Neural Networks for fault slip	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	International Joint Workshop on Slow-to-	2023年9月	国内

monitoring: simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring slider system (口頭)		Fast Earthquakes 2023		
Objective clustering of GNSS velocities based on parallel translation and rotational motion for the identification of crustal Blocks (ポスター)	Yano, K., A. Takahashi, M. Kano	International Joint Workshop on Slow-to- Fast Earthquakes 2023	2023年9 月	国内
物理深層学習の断層す べり計算への適用：ば ねブロックモデルにお けるSSE数値計算・摩 擦特性推定・すべり予 測 (口頭)	福嶋 陸斗・加納 将行・平原 和朗	日本測地学会第 140回講演会	2023年 10月	国内
平行移動とオイラーベ クトル推定に基づく GNSS速度ベクトルのク ラスタリングによる地 殻ブロックの同定 (口 頭)	矢野 恵佑・高橋 温志・加納 将行	日本測地学会第 140回講演会	2023年 10月	国内
西南日本のプレート境 界すべり・ブロック運 動の時空間発展の推 定・分離精度評価 (ポ スター)	田中 優介・加納 将行・太田 雄策・ 西村 卓也・矢野 恵佑	日本測地学会第 140回講演会	2023年 10月	国内
Creep characteristics along the central part of the Philippines Fault on	Okur, Y., Y. Fukushima	日本測地学会第 140回講演会	2023年 10月	国内

Leyte Island from ALOS-2 time-series analysis (口頭)				
Statistical modeling and machine learning studies on the forecast of earthquakes and fault slip (口頭)	Fukushima, Y.	Symposium on statistical modeling, machine Learning, and artificial intelligence insights for natural hazard and risk studies	2023年10月	国外
Symposium on statistical modeling, machine Learning, and artificial intelligence insights for natural hazard and risk studies (口頭)	Nakagawa, R., Y. Fukushima, M. Kano, K. Yano, K. Hirahara	Symposium on statistical modeling, machine Learning, and artificial intelligence insights for natural hazard and risk studies	2023年10月	国外
機械学習による西南日本のGNSS時系列中の短期SSE自動検出の試み(口頭)	田中 優介・加納 将行	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年10月	国内
平行移動とオイラーベクトル推定に基づくGNSS速度ベクトルのクラスタリングによる地殻ブロックの同定(口頭)	矢野 恵佑・高橋 温志・加納 将行	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年10月	国内
マルチスケール円形パッチモデルを用いた地震発生サイクルの数値	中田 令子・堀 高峰・青地 秀雄・井出 哲	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年10月	国内

シミュレーション（口頭）				
物理深層学習の断層すべり計算への適用：ばねブロックモデルにおけるSSE数値計算・摩擦特性推定・すべり予測（口頭）	福島 陸斗・加納 将行・平原 和朗	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
日本の活断層や火山の微小変動検出を目的としたInSARデータへの深層学習適用の困難性（口頭）	福島 洋	日本地震学会 2023年度秋季大会	2023年 10月	国内
Applicability of Multiscale Circular Patch Model in Numerical Simulation of Earthquake Generation Cycle（ポスター）	Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年 12月	国外
Challenges in using Artificial Intelligence on InSAR in the Japanese context（口頭）	Fukushima, Y.	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年 12月	国外
Spectral Rényi divergence and its robustness（口頭）	Yano, K.	The ISI-ISM- ISSAS Joint Conference	2023年 12月	国外
GNSSデータへの深層学習の適用による短期的SSEの断層すべり推定	中川 亮・福島 洋・加納 将行・矢野 恵佑・平原 和朗	「次世代型高密度多点観測に基づく地震・火山災害軽減に関する研究」研究集会	2024年2 月	国内
物理深層学習の3次元SSEモデルへの適用（口頭）	福島 陸斗・加納 将行・平原 和朗・大谷 真紀子・J. P. Avouac・K. Im	2023年度研究集会「機械学習×地震研究」	2024年3 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）	福島 陸斗・加納 将行・平原 和朗・ 大谷 真紀子・J. P. Avouac・K. Im	2023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	2024年3 月	国内
Spectral Rényi divergence and its application（口頭）	矢野 恵佑	2023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	2024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
Recurrence intervals for $M > 7$ Miyagi- ken-Oki earthquakes during an $M \sim 9$ earthquake cycle	Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, R. Hino	Progress in Earth and Planetary Science	2023	国外
Physics-informed neural networks for fault slip monitoring: Simulation, frictional parameter estimation, and prediction on slow slip events in a spring-slider system	Fukushima, R., M. Kano, K. Hirahara	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2023	国外
Recent advances in earthquake seismology using machine learning	Kubo, H., M. Naoi, M. Kano	Earth, Planets and Space	2024	国外
Minimum information dependence modeling	Sei, T., K. Yano	Bernoulli	2024	国外