

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」

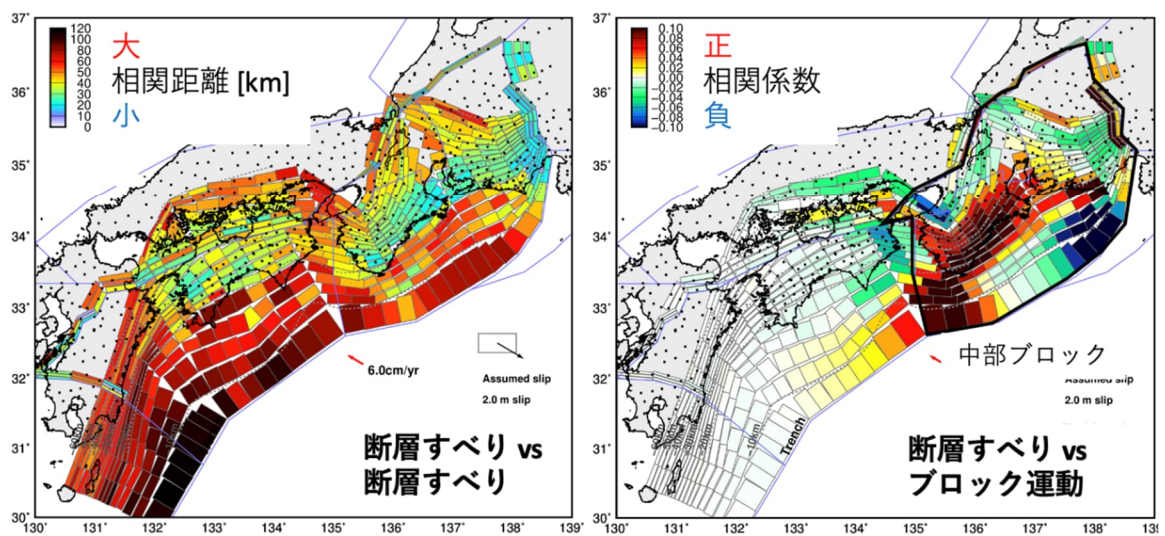
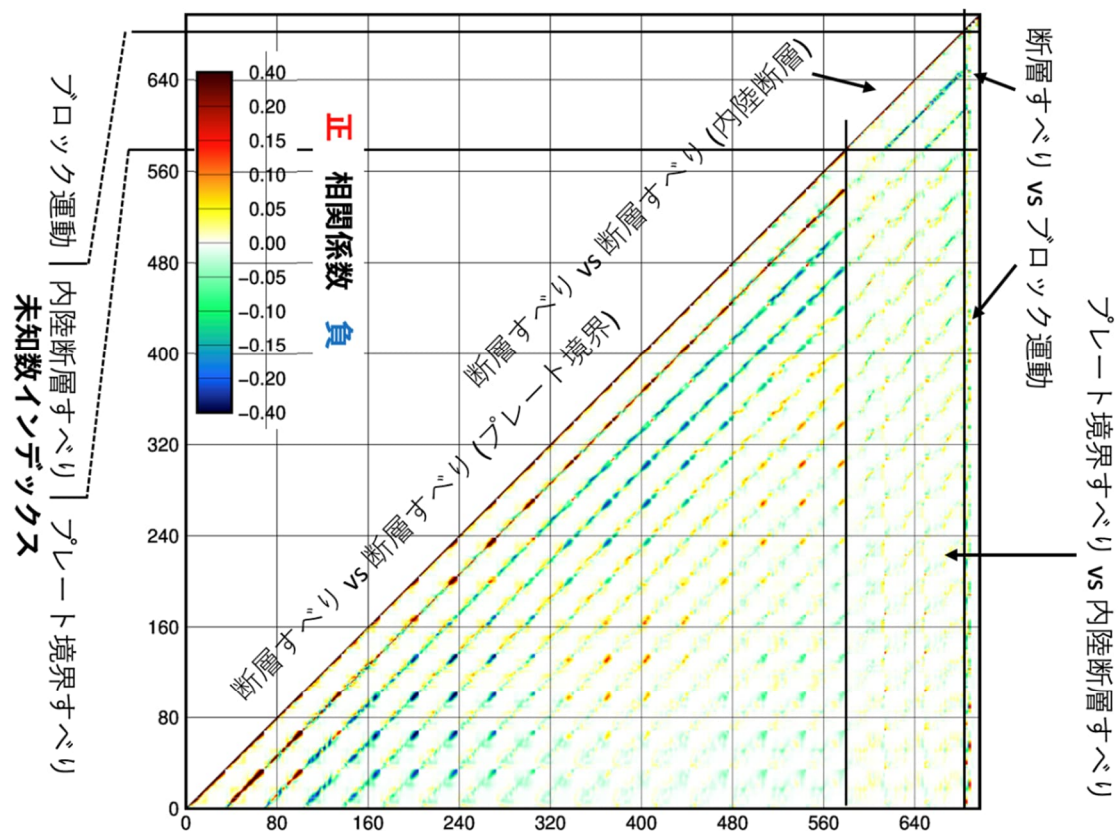
令和4年度  
成果報告書

令和5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4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



地震間断層すべり・ブロック運動の同時推定における、未知数間の相関構造。上段が相関係数行列の例で、各要素の値をカースケールで表示。ここから各小断層が持つ相関距離を算出したものが下段左の図で、観測点から遠い海溝寄りで特に遠くまで相関が伝播する。また観測点に近い内陸でもブロック運動を介して大きな相関距離を示している。下段右はブロック運動と断層すべりの相関を表示。正負の相関が混在し、ブロックがその場で回転する動きに対応する。これらのように観測点配置に応じた未知数の解像度に加えて、断層・ブロックの配置など問題設定自体がもたらす効果を多彩に把握可能である。

## 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4年度の業務の目的             | 3  |
| (2) 令和4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             | 20 |
| (d) 成果の論文発表・口頭発表等           | 21 |
| (e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定 | 26 |
| 3. まとめ                      | 27 |
| 4. 活動報告                     | 27 |
| (1) 会議                      | 27 |
| (2) 勉強会                     | 27 |
| (3) アウトリーチ活動                | 27 |
| 5. むすび                      | 28 |

## 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 | R4.4.1～R5.3.31 | 9,600,000 円 | 2,880,000 円 |
| 同・准教授       | 福島洋  | R4.4.1～R5.3.31 |             |             |
| 同・研究員       | 田中優介 | R4.4.1～R5.3.31 |             |             |
| 統計数理研究所・准教授 | 矢野恵佑 | R4.4.1～R5.3.31 | —           | —           |
| 東京大学・准教授    | 松田孟留 | R4.4.1～R5.3.31 | —           | —           |
| 東京大学・特任研究員  | 中田令子 | R4.4.1～R5.3.31 |             |             |

|                |      |                |   |   |
|----------------|------|----------------|---|---|
| 海洋研究開発機構・センター長 | 堀高峰  | R4.4.1～R5.3.31 | — | — |
| 京都大学・教授        | 宮崎真一 | R4.4.1～R5.3.31 | — | — |
| 京都大学・准教授       | 西村卓也 | R4.4.1～R5.3.31 | — | — |
| 和歌山大学・講師       | 八谷大岳 | R4.4.1～R5.3.31 | — | — |

(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<br>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る。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る。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、手法の開発に着手する。

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4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スパース推定手法の開発を継続する。解析領域を拡張し、西南日本の沈み込み帯や内陸地域のGNSSデータへの適用に着手する。関連して、地殻変動の空間分布を考慮したスパース推定手法の高度化の検討を継続して行う。また、成分分解の手法を利用した、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する。

##### 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

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の検討を継続する。具体的には、機械学習による特徴量変換を用いた手法の開発を継続して行うと共に、物理情報を考慮した深層学習手法の活用も開始する。また、ノイズ特性を反映した誤差共分散行列を利用した状態空間モデルによる断層すべり推定手法の検討を行う。豊後水道の長期的スロースリップイベント発生域の測地データを用いて開発手法の

有用性を評価する。

### 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検討を継続する。また、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する。また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、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、本課題で開発した手法を公開するための基盤を整備する。

## (2) 令和4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、スパース推定に基づく手法を開発し四国西部の短期SSE検知に適用した論文を出版し、また開発コードを公開した。さらに、解析領域を拡大すると共に、データ欠損を考慮したスパース推定手法の実装を行った。加えて、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の検討を開始し、数値実験により性能評価を行った。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を試みた。人工データによる数値実験と実データによる推定を併用し、観測時系列のノイズの周波数特性やその推定結果への影響を検証した。また、カルマンフィルターで状態ベクトルと共に推定される分散共分散行列の構造を詳細に調べ、未知パラメータ間の分離精度を検証した。研究項目(c)について、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手法の実装を開始した。2010年に豊後水道で発生した長期SSEを対象に、観測データの整備と数値実験によりMCMCを用いたデータ同化手法の評価を行った。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SSEの断層すべりの高精度な再現に成功した。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・英語版の作成を行った。

### (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) I1トレンドフィルタリングによる短期的スロースリップの網羅的検出

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、昨年度までの開発手法の改良の検討を行った。開発手法は今年度出版され(Yano and Kano, 2022)、開発手法により新たに発見された四国西部でのSSEについてカタログとして公開された。

開発手法を以下に簡単に説明する：開発手法は一次元の時系列に区分線形関数を適合さ

せる I1 トレンドフィルタリング、Mallows の Cp 規準、p-値結合法を組み合わせた手法である。複数観測点での一次元時系列を入力とし、イベント検知の確からしさ(確からしさの値が 1 に近いほど SSE が起こっている確信度が高く、0 に近いほど確信度が低いことを表す)の時系列を出力する。I1 トレンドフィルタリングは、一次元の観測時系列  $X(t)$  に対して、

$$\sum_t (X(t) - Z(t))^2 + \lambda \sum_t |Z(t) - 2Z(t-1) + Z(t-2)| \quad (1)$$

を最小にする時系列  $Z(t)$  を推定する手法である。式(1)において、第一項は観測時系列への合い具合を評価する項、第二項は推定された時系列の二回微分 (GNSS のような変位時系列の場合は変位加速度) のスパース性を評価する項である。I1 トレンドフィルタリングによるフィルタリング結果は区分線形になることが知られている (Kim et al., 2009)。

今年度は適用範囲の拡大に向け、開発手法の改良に関する検討を行った。はじめに、適用領域及び解析対象の期間の拡大において問題になる点を整理した。領域及び期間の拡大ではこれまでの四国の 39 点の GNSS 観測点の約 3 年から西南日本の 201 点の約 20 年のデータへの拡大を考えた(図 1)。検討の結果、拡大に向けて主に 3 つの課題があることを確認した。まず、期間の増加に伴い、より多くの欠損値を含んでしまうこと、特に、欠損には系統的なパターンがなく、欠損する期間も観測点によって異なることを確認した。次に、基準点処理、つまり、観測点変位の調整及び共通誤差の除去のため基準点の時系列を差し引く操作を通常行うが、基準点の変動の混入が適用範囲拡大の際に問題となりうることを確認した。最後に、観測点数・期間が増えることによる処理時間が大幅に増えてしまうことを確認した。

3 つの課題のうち、欠損値の処理に関しては、I1 トレンドフィルタリングでは、欠損値を埋める必要がないことを確認した。すなわち、(1)式の観測時系列への合い具合を評価する項において欠損している日を含めないようにすれば、欠損値がある場合でも I1 トレンドフィルタリングは機能する。実際に欠損値がある実データに適用した結果を図 2 に示す。

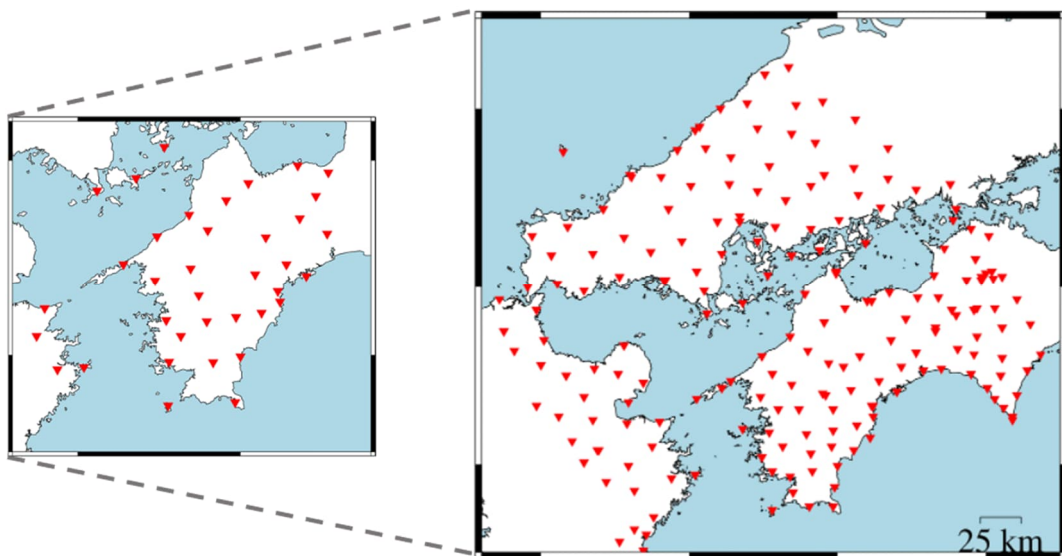


図 1．対象領域の拡大。左が昨年度までの対象領域及び GNSS 観測点、右が今年度検討した対象領域及び GNSS 観測点。

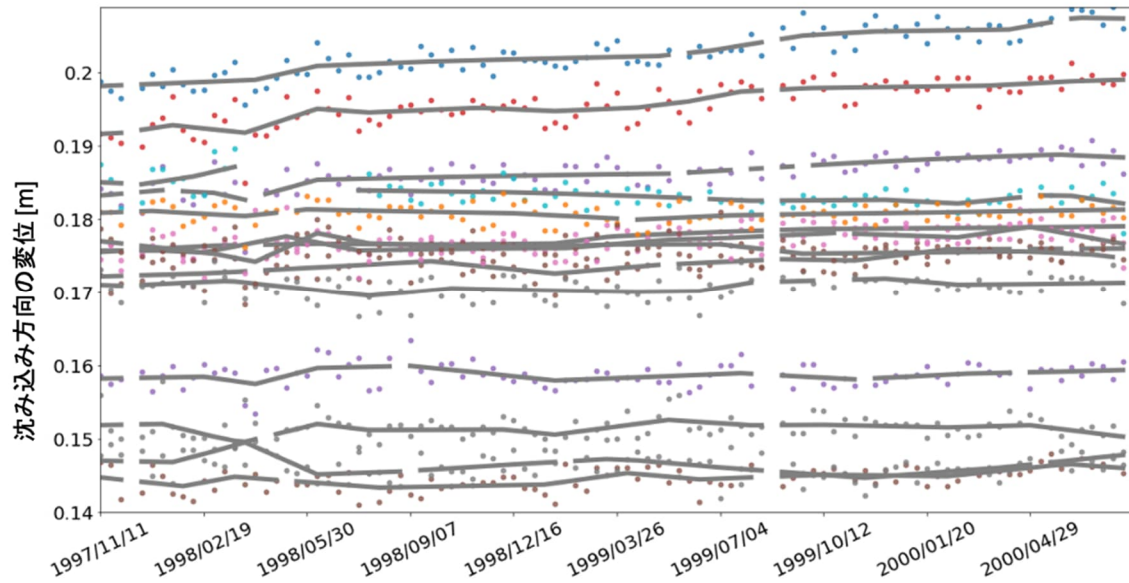


図 2. 欠損値が存在する場合の I1 トレンドフィルタリングの適用結果。色のついた点が各点ごとの地表変位の観測時系列で灰色の区分線形な曲線が I1 トレンドフィルタリングの結果である。ここで、時系列は水平二成分の観測点での変位をプレートの沈み込み方向に射影して表示している。

次年度以降は見つかった 3 つの課題のうち解決できていない 2 項目を重点的に検討する。まず、基準点の変動はノイズ源の一つであり、信号・ノイズ分離手法との組み合わせで次年度以降重点的に検討する。次に、計算時間の短縮については超母数決定に関する時間削減を検討するなどして対処する予定である。

## 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

今年度は新たに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検討した。具体的には、ノイズを含まない合成データを用いて SSE の空間分布を推定する深層学習手法の開発を行った。深層学習モデルの一種である畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network、以下 CNN) は手書き数字の識別や画像認識など、画像を入力とした場合に特に効力を発揮することが知られている。そこで地殻変動をその振幅の大きさに従い成分ごとに画像化し、その地殻変動の原因となっているプレート境界面の断層すべり推定を試みた。

CNN の学習に用いる合成データの生成手法を図 3 に示す。まずプレート境界を **dip** 方向に 17 個、**strike** 方向に 16 個の計 272 個の小断層に分割した (図 3 (a)(b))。次に、断層すべりの領域を矩形で仮定し、すべりを仮定する領域の端に相当する 2 点 A、B 及び領域内のすべり量をランダムに決定した。この矩形内ではすべり量は一様と仮定する。そのように決定された断層すべりの一例を図 3 (b) に示す。続いて生成した断層すべりに基づき、半無限均質弾性体を仮定し、2 種類の 3 成分地表変位場を計算した (図 3 (c)(d))。1 つめとして、国土地理院が運用する GNSS 観測点の 97 ヶ所における東西・南北・上下変位を計算し、各観測点を含むグリッドの代表値、観測点を含まないグリッドにおいては 0 とした。

2つめとして、全グリッドの中心に GNSS 観測点があると仮定し同様に 3 成分の変位を求めた。いずれの場合も高知県足摺岬以北の領域が南北 21 グリッド、東西 30 グリッドに分割されており、1 グリッドは約 8.5 km の辺を持つ正方形とした。

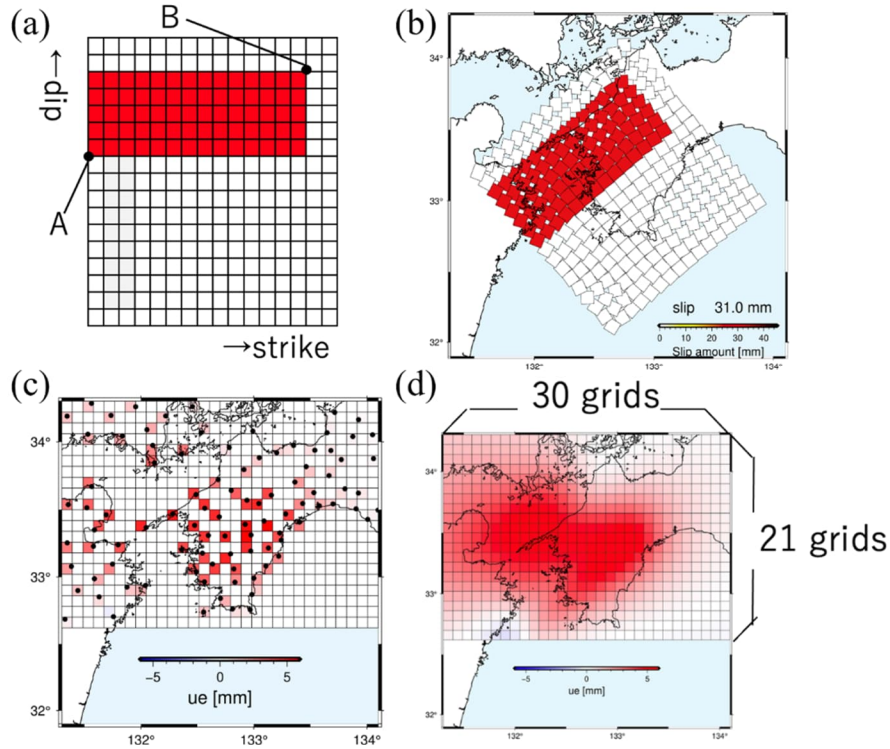


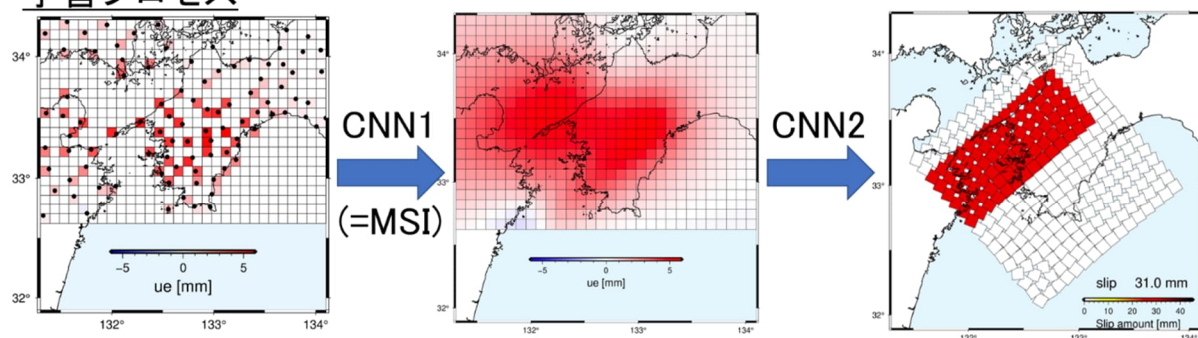
図 3．合成データの生成手法。(a) 矩形一様すべりの一例。ランダムな 2 点 A、B を端点とする。(b) (a) で定めたすべりを含む小断層群と四国・九州の位置関係。(c) (a) のすべりから計算される GNSS 観測点における東西変位量。GNSS 観測点を含むグリッドはその変異に基づき色付けされ、それ以外のグリッドは 0 とした。(d) (a) のすべりから計算される全グリッドの中心点における東西変位量。

本研究では図 4 に示すように学習及び適用のプロセスを経て 2 つの CNN を構築した。1 つ目が GNSS 観測点を含むグリッドのみでの変位 3 成分を示す画像から、全グリッドでの変位 3 成分を示す画像を再現する CNN1 である。これを **Model-supervised Interpolator** (以下、MSI) と呼ぶ。2 つ目が全グリッドでの変位 3 成分を示す画像からプレート境界の断層すべりを推定する CNN2 である。MSI と CNN2 の学習に用いる学習データ数はそれぞれ 25,000 と 15,000、適用に用いるテストデータ数は 6,000 である。各 CNN の推定精度の評価には以下の式(2)で定義される **variance reduction (VR)** を用いた。

$$VR = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_i R_i^2}{\sum_i T_i^2} \right) \quad (2)$$

上式において  $R_i$ 、 $T_i$  はそれぞれ  $i$  番目の要素における出力値と正解値の残差、正解値をそれぞれ表している。また、MSI における要素数  $i$  はグリッド数の 630 に、CNN2 における要素数は小断層数の 272 にそれぞれ対応している。

## 学習プロセス



## 適用プロセス

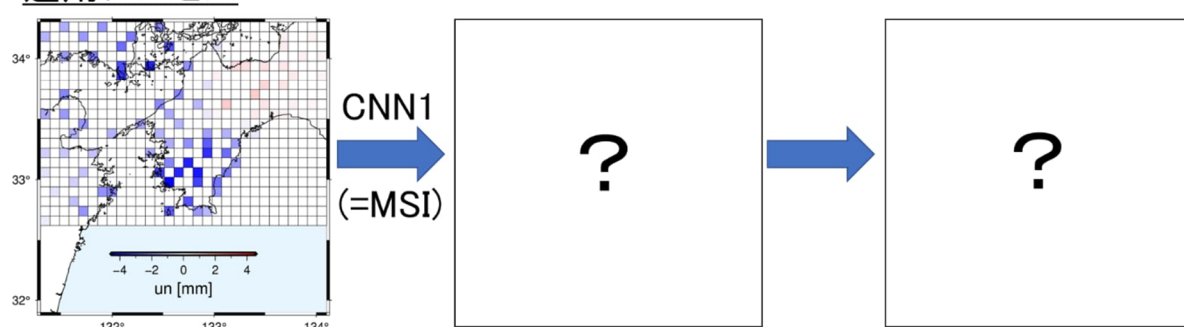


図4．2つのCNNモデルの構築フロー。CNN1(MSI)は離散的な変位画像から滑らかな変位画像を再現し、CNN2は滑らかな変位画像からすべり推定を行う。

図5(a)に正解の変位場を、図5(b)に適用プロセスにおいてMSIが出力した変位場を示す。このときMSIの再現精度はVR99.8%に達した。図から実際のGNSS観測点が存在しない海域での変位も含めて精度よく地殻変動場が再現できていることが確認できた。次に図5(c)に正解の断層すべりを、図5(d)に(b)に示されるMSIの出力変位場を入力3成分変位の一部としてCNN2を適用したすべり推定の結果をそれぞれ示す。この例のすべり推定精度は98.8%に達し、CNN2もMSIと同様に観測点が乏しい浅部のすべりに対しても高い精度で推定できていることが示された。6,000個のテストデータ全体に対する平均VRは92.3%であった。

来年度はノイズを含むデータを用いた学習を経て実際のデータに適用すること、空間分布だけではなく時間方向も含めた推定を行うことを視野に、本手法のブラッシュアップを進める予定である。

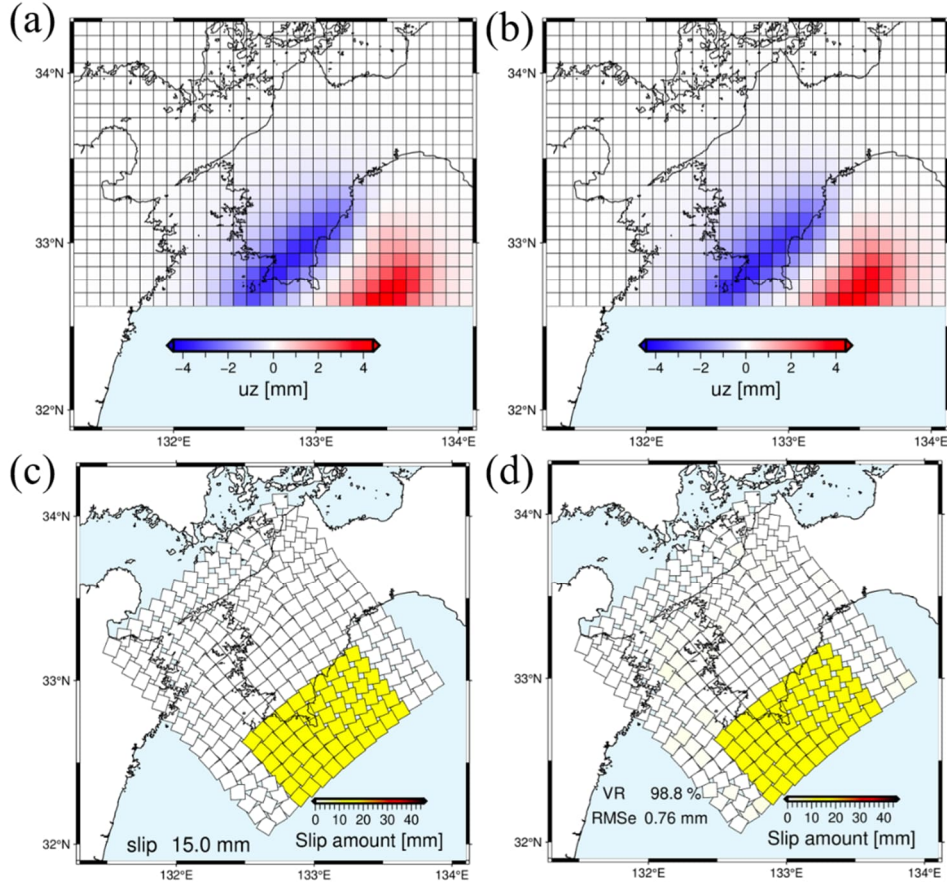


図 5. (a)(c)の正解すべりによって引き起こされる上下変位場。(b)(a)に対応する MSI の出力変位場。(c)正解すべりの一例。(a)や(b)のグリッドの南端よりも南に位置する小断層のすべりを含んでいる。(d)(b)に示される上下変位場を入力の一部として推定したすべり分布。

## 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を目指す。プレートの沈み込みによる歪みはプレート境界のすべりや固着だけでなく、陸のプレート内部の変形にも複雑に分配されている。ブロック運動モデルはプレート内部に複数のブロックを仮定し、その剛体運動や弾性変形、ブロック境界の断層のすべりの組み合わせで地震間の地殻変動を説明するモデルである (Nishimura et al., 2018)。令和 4 年度は同モデルを状態空間モデルに適用し、西南日本全域の約 25 年にわたる GNSS 時系列を観測量として、南海トラフ沈み込み帯の断層すべり・ブロック運動の時空間発展の同時推定を試みた。時刻  $k$  における状態方程式・観測方程式は以下ようになる。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{a}_k \quad (3)$$

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{\beta}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{G}_B & \mathbf{G}_S & \mathbf{G}_\varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{\Omega}_k \\ \mathbf{s}_k \\ \mathbf{\varepsilon}_k \end{pmatrix} + \mathbf{\beta}_k \quad (4)$$

式(3)は状態方程式を表す。 $\mathbf{x}_k$ は状態ベクトル、 $\mathbf{a}_k$ はシステムノイズである。ここでは断層すべり・ブロック運動の支配物理は何も仮定せず、現在の状態をそのまま次の時刻へ引き継ぐのみとしている。式(4)が観測方程式である。 $\mathbf{d}_k$ が観測量である累積変位、 $\mathbf{b}_k$ が観測ノイズである。また $\mathbf{\Omega}_k$ が剛体運動の方向と大きさを記述する回転ベクトル、 $\mathbf{\varepsilon}_k$ がブロックの弾性変形を記述する歪みテンソル、 $\mathbf{s}_k$ が各断層の累積すべりである。固着はブロックの相対運動に逆らう方向のすべりとして扱われる。これらの未知数と観測量をそれぞれ結びつけるグリーン関数 $\mathbf{G}_B$ 、 $\mathbf{G}_S$ 、 $\mathbf{G}_\varepsilon$ が、デザイン行列 $\mathbf{H}_k$ の中に配置される。式(3)(4)を用いて状態ベクトルとその分散・共分散行列の時間変化をカルマンフィルター（以降、KF）で推定する。

初めに断層すべりとブロック運動の推定・分離精度を数値実験で検証した。実験ではすべり・剛体運動・弾性変形に適当な正解の値をそれぞれ用意し、それらから期待される地表変位時系列を西南日本の770ヶ所のGNSS観測点について計算した。これらを適当な比率で足し合わせてノイズを加えることで模擬変位時系列データを生成し、これをKFに入力することで断層すべり・ブロック運動を同時推定した。ブロック・断層の配置については先行研究<sup>4)</sup>を踏襲した。図6に断層すべり・剛体運動の正解値と推定値の比較を示す。すべり分布は紀伊半島・四国東部・豊後水道周辺で大きな固着を示し、また剛体運動は西南日本の前弧側地域の西向きの動きを示す。推定値はこれらの大局的傾向はよく復元しているものの、すべりは最大で4割程度の過小推定となり、逆に剛体運動はその量が若干の過大推定となった。すなわちフィリピン海プレートの斜めの沈み込みによる前弧側地域の西向きの移動を説明する上で、両者のトレードオフが生じている。すべりの推定値と正解値の比率は概ね解析期間を通じて一定であり（図6(c)）、またすべりとブロック運動の比率を変えた場合もほぼ同様のトレードオフが生じた。このことからトレードオフの起こり方はブロックと断層の配置や数等の問題設定によってほぼ決定されていると考えられる。

上記の結果を受けて、状態ベクトルとともに推定される分散・共分散行列を用いた未知数間の相関構造を求めた。図7(a)に分散・共分散行列から換算される相関係数行列を示す。対角方向の斜めの縞模様が、深さ方向に隣接する小断層同士の相関に対応する。右下に離れるほど遠くの断層との相関に対応し、距離と共に相関の値が下がっていく様子が見て取れる。そこで各小断層と一定以上の相関値を示す小断層を抽出し、それらとの距離の平均を相関距離として表示したものが図7(b)である。観測点から遠く解像度の低い、九州沖の海溝寄りや深い側の小断層で特に大きな相関距離を示す(図中の①)。またブロックの外周の小断層が、剛体運動を介して遠くの断層まで相関を持つ(図中の②)。図7(c)に剛体運動を記述する回転ベクトルと各小断層のすべりの間の相関を示す。正負の相関が複雑に分布し、場所によって反対方向のすべりと相関することが分かる。この動きは、全体としてブロックがその場で回転する動きに対応しており、最もモーメントが小さく容易に作り出せる動きを記述していると考えられる。このように相関構造を用いて観測量に基づく未知数の解像度や不確実性だけでなく、断層・ブロックの配置のような問題設定自体がもたらす効果を把握可能である。次年度以降すべり・ブロック運動のトレードオフの原因を明らかにするため、詳細な議論を進める。その上で実データでの推定に向け、データが持つ情報量に即した問題設定の最適化を試みる。

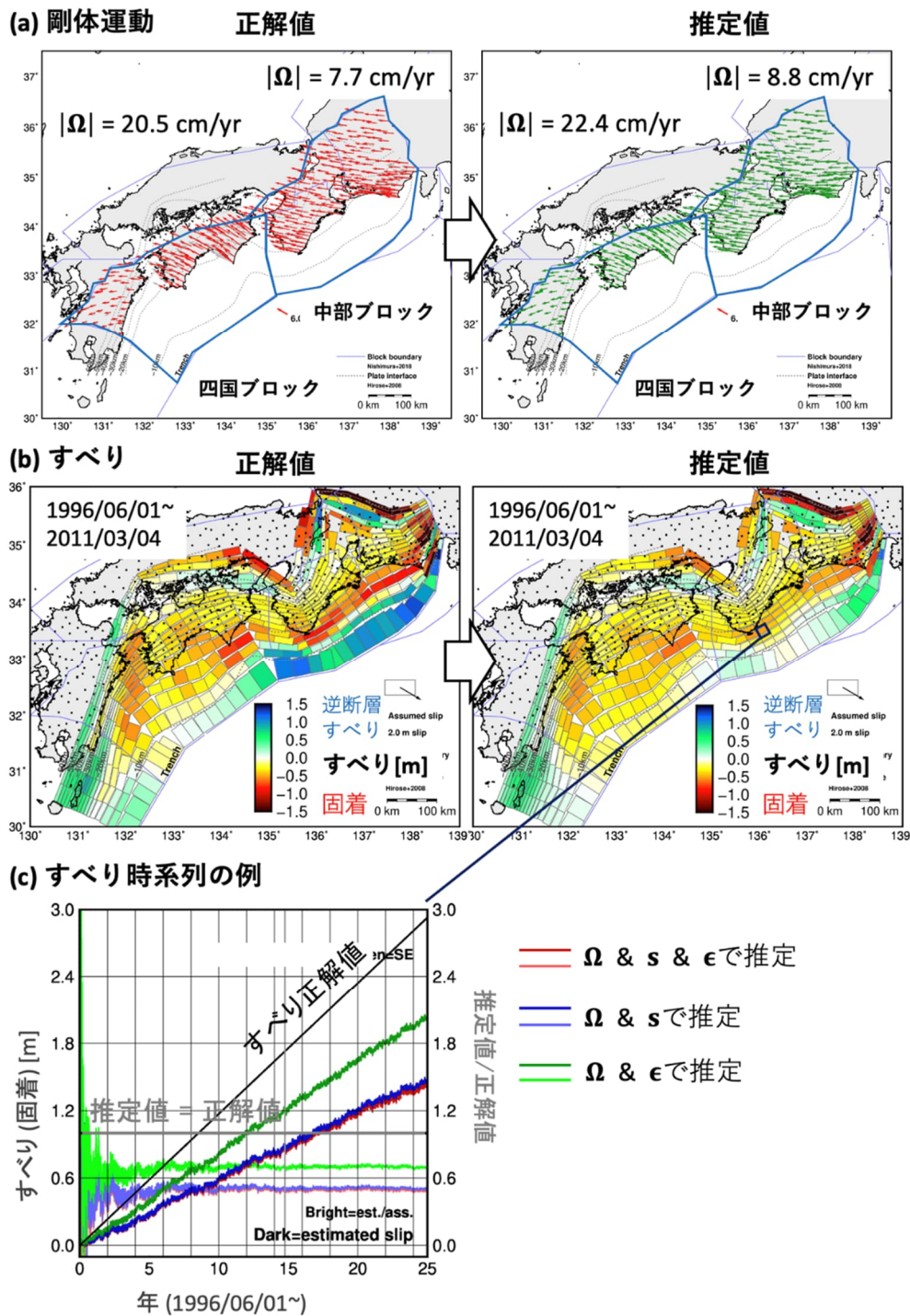


図6．断層すべり・剛体運動の推定値と正解値の比較。(a)剛体運動を記述する回転ベクトルの大きさと対応する地表変位場。ここでは西南日本の中央構造線より南側の、前弧側地域に東西2つのブロックを設定している。(b)1996年6月から2011年3月までの累積すべり分布。赤色が固着を表す。(c)紀伊半島付近の小断層における推定すべり時系列の例。黒色の斜め線が正解値で、赤色・青色・緑色の線が推定時系列。淡色の線はすべりの推定値と正解値の比率を示す。それぞれ左と右の縦軸を参照。

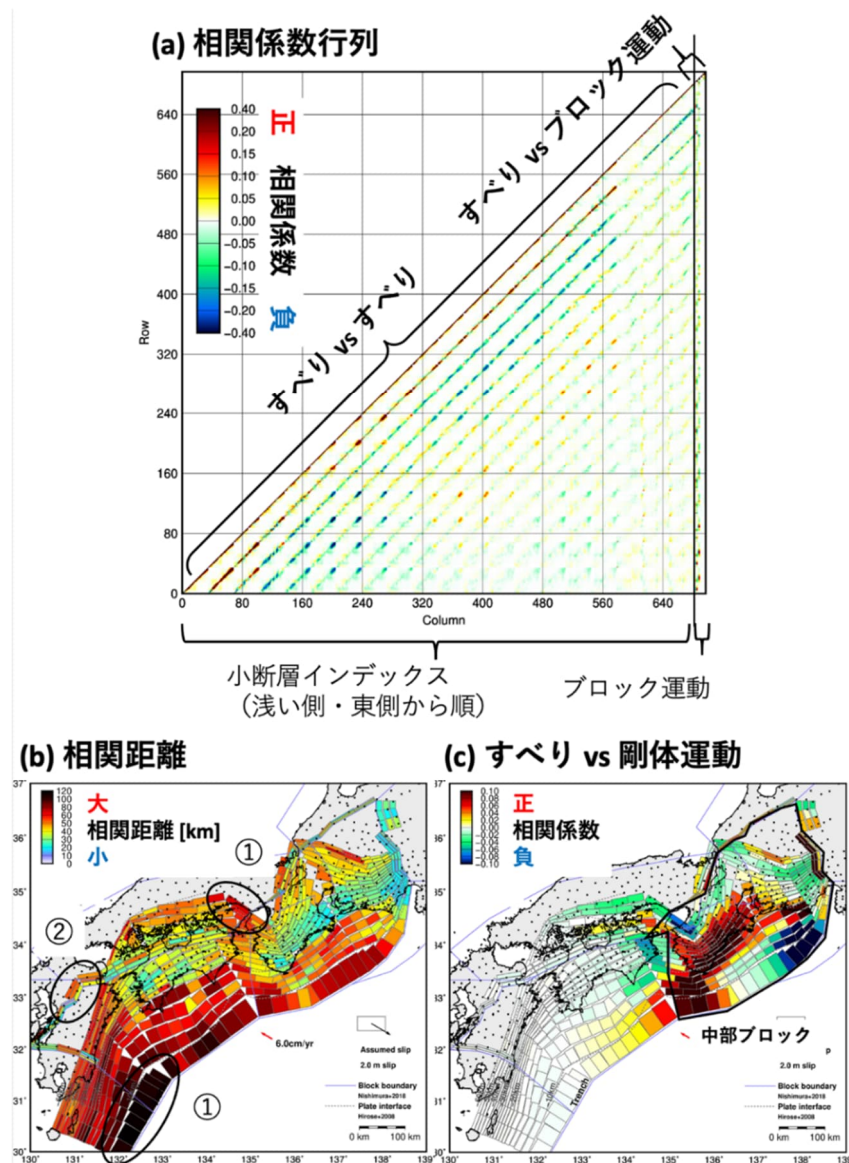


図 7. 未知数間の相関構造。(a)KF で推定される分散・共分散行列から換算される、未知数間の相関係数行列。正負の相関係数値をそれぞれ赤色・青色で表示。列方向の未知数のインデックスはプレート境界の浅い側・東側の小断層から内陸の小断層、回転ベクトル、歪みテンソルの順。(b)各小断層の相関距離を算出した結果。赤色が大きな相関距離を表し、平均的に遠くの小断層と相関を持つことを示す。(c)断層すべりと剛体運動の相関構造。前弧側地域の東半分にあたる中部ブロックの回転ベクトルと各小断層のすべりとの相関係数値をカラースケールで表示。

令和 4 年度はこの他に、西南日本の GNSS 時系列のノイズ特性の把握に向けて、時系列の周波数特性や相互の相関構造を網羅的に調べた。次年度以降、ノイズ特性の物理的意味も含めたより詳細な把握を進めるとともに、その結果を観測ノイズの分散・共分散行列へ組み込むことで状態空間モデルの高度化を行う。また民間 GNSS 観測点の活用による観測点増加の効果や観測点配置が推定にもたらす影響の検証、海底測地データや InSAR などの多項目測地データの併用にも取り組む予定である。

### 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

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手法の検討を開始した。

#### 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

豊後水道で 2010 年に発生した長期的 SSE を対象に、数値実験による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検証を行った。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、まずは 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 8 左)。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 (式(5)) (Rice, 1993) と速度状態依存摩擦構成則 (式(6)(7)) (Dieterich, 1979; Rice, 1983) に従う。

$$\tau_i(t) = \sum_j k_{ij}(v_{pl}t - s_j(t)) - \frac{G}{2v_s} v_i(t) \quad (5)$$

$$\tau_i(t) = \tau_{0i} + A_i \ln\left(\frac{v_i(t)}{v_0}\right) + B_i \ln\left(\frac{v_0 \theta_i(t)}{L_i}\right) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_i(t)}{dt} = 1 - \frac{v_i(t)\theta_i(t)}{L_i} \quad (7)$$

ここで、時間発展するシミュレーション変数はすべり速度  $v(t)$ 、状態変数  $\theta(t)$ 、せん断応力  $\tau(t)$ 、すべり  $s(t)$  であり、うち独立な変数は 2 つである。また、 $A$ 、 $B$ 、 $L$  は断層のすべり様式を既定する摩擦パラメータである。すべり速度と状態変数に関する初期条件と摩擦パラメータを各小断層に与えることで、断層すべりの時空間発展を計算することができる。本研究では、SSE 発生域に相当する円形パッチの内部と外部それぞれでは摩擦パラメータを一樣と仮定し、パッチ内部では  $A = 100$  kPa,  $B = 150$  kPa,  $L = 40$  mm (以下この値を真値とする)、パッチ外部では  $A = 100$  kPa,  $B = 30$  kPa,  $L = 40$  mm と設定した。また  $k_{ij}$  は小断層  $j$  が単位量すべったときの小断層  $i$  における応力変化量を表し、半無限均質等方弾性体を仮定して計算する。 $V_{pl}$  ( $=6.5$  cm/yr) はプレート沈み込み速度、 $G$  ( $=40$  GPa) は剛性率、 $v_s$  ( $=3$  km/s) は S 波速度、 $\tau_0$  はすべり速度  $v_0$  ですべっている時のせん断応力である。

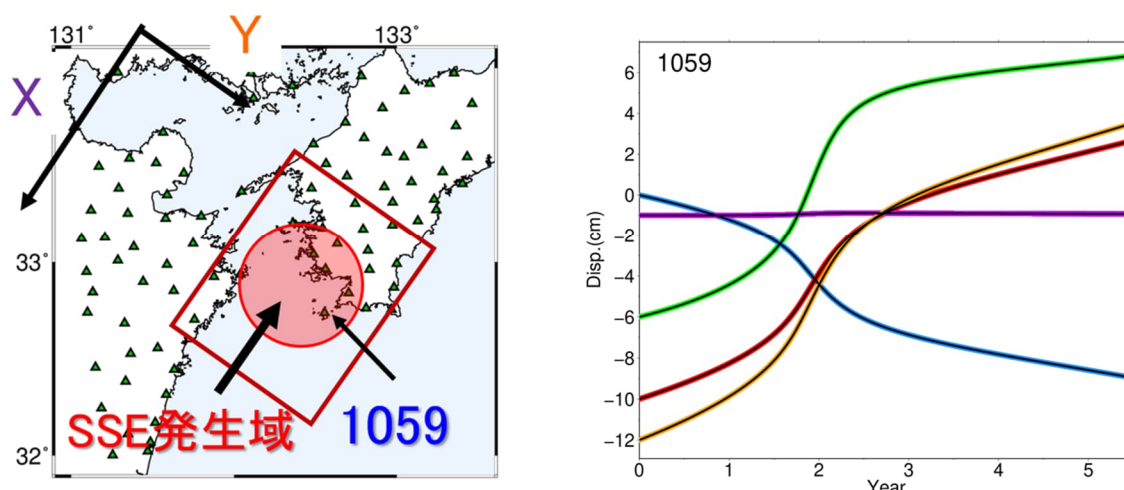


図 8. (左) 採用した断層モデル (Hirahara and Nishikiori, 2019)。赤四角が断層領域、赤丸が SSE 発生域、三角が GNSS 観測点を表す。(右) 観測点 1059 における変位時系列。赤・青・緑線がそれぞれ東西・南北・上下成分を、紫・橙線がそれぞれ海溝に平行・垂直な成分の時系列を表す。各色の背景にある黒線が MCMC による推定結果を用いた理論値を表す。

この設定で数値計算を行うと、約 7.2 年間隔で最大すべり速度 45 cm/yr、1.6 年の継続時間をもつ SSE が計算され、定性的に豊後水道で繰り返し発生する SSE を模した結果が得られる。本研究ではこの数値計算結果から Hirahara and Nishikiori (2019) で使用された 93 の GNSS 観測点における地表変位の擬似データを生成し、SSE 発生域の摩擦パラメータが未知として、MCMC を用いて摩擦パラメータの推定を試みた。尤度は観測点の座標値のばらつきを考慮した変位の残差二乗和で定義し、摩擦パラメータの事前分布は一様分布を仮定した。その結果、事後分布を最大にする摩擦パラメータとして  $A = 100.0$  kPa,  $B = 149.9$  kPa,  $L = 40.0$  mm と、真値との差が 1 % 以内の摩擦パラメータが求められた。得られた結果に基づき地殻変動を計算すると図 8 (右) のようになり、擬似データを再現していることが分かる。

また実観測データの同化に向けて観測データ解析を行った。前年度までに共有した GNSS の観測データに基づき、地震やアンテナ交換によるオフセットの除去を行い、2006 年～2012 年に渡る GNSS 観測時系列を生成した。この際数値実験と同様に Hirahara and Nishikiori (2019) で使用された 93 観測点を使用し、また 2007.5～2008.5 年のデータに基づき SSE 間の定常的な線形トレンドを除去した。得られた時系列を図 9 (左) に示す。また図 9 (右) に数値実験の際の擬似データから SSE 発生前の 1 年間のトレンドを除去したものを示す。両者を比較すると、GNSS の観測変位の時系列とモデルから計算した理論変位の時系列は概ねその外形は定性的に一致している。次年度以降、GNSS の実観測データの同化を行い、SSE の現状把握と短期推移予測に関する検討を行う。

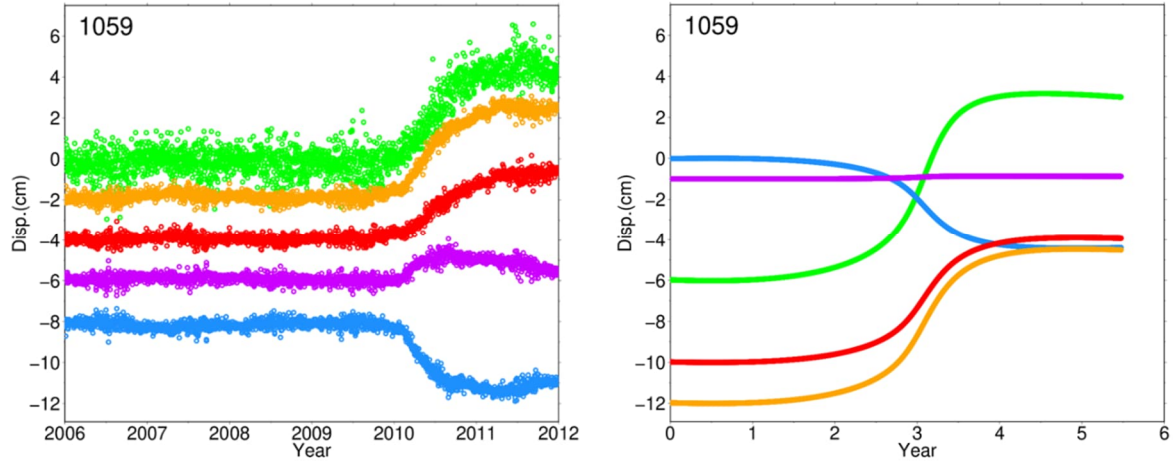


図 9. (左) GNSS 観測点 1059 (図 8 左) における変位時系列。赤・青・緑線がそれぞれ東西・南北・上下成分を、紫・橙線がそれぞれ海溝に平行・垂直な成分の時系列を表す。(右) 同観測点における理論変位時系列。図 8 (右) と同じ図であるが、SSE 発生前の時系列を元に線形トレンドを除去し、時刻方向に平行移動している。

### 3-2) Physics-informed neural networks に基づく断層すべり計算手法の開発

観測データとモデルの融合による断層すべりモニタリングの新たな方法として、今年度は深層学習を用いた物理方程式の求解手法である Physics-Informed Neural Networks(PINNs)(Raissi et al., 2019)の断層すべりへの適用可能性について検討を開始した。PINNs は初期・境界条件と偏微分方程式を損失関数として取り込み、損失関数を最小化するように学習させることでニューラルネットワーク (NN)を用いて偏微分方程式の解を近似する手法である。この手法では偏微分方程式の求解という順問題のみならず、データと NN の出力の残差を損失関数に加えることにより、方程式のパラメータを推定する逆問題にも応用が可能である。令和 4 年度は PINNs の利用による断層すべりモニタリングの最初のステップとして、PINNs による断層すべり計算手法を確立した。具体的には、一次元断層すべりモデルであるばねブロックモデルにおいて、すべり速度が遅い SSE の時間発展を PINNs により再現することを目指す。

断層すべりの時間発展を計算するモデルとして、摩擦のあるブロックを一定速度で引くばねブロックモデル(Yoshida and Kato, 2003)を採用した(図 10)。この系における支配方程式は以下のように記述できる。

$$\tau(t) = k(v_{pl}t - x(t)) - \eta v(t) \quad (8)$$

$$\tau(t) = \sigma \left( f_0 + a \ln \left( \frac{v(t)}{v_{pl}} \right) + b \ln \left( \frac{v_{pl}\theta(t)}{d_c} \right) \right) \quad (9)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = 1 - \frac{v(t)\theta(t)}{d_c} \quad (10)$$

これらの方程式は式 (8) ~ (10) において小断層数を 1 (すなわち  $i=j=1$ ) としたものと

等価である。ここで  $\tau(t)$  は時刻  $t$  でのせん断応力、 $x(t)$  はブロックの累積すべり量、 $v(t)$  はブロックの速度、 $\theta(t)$  は状態変数、 $k$  はばね定数、 $v_{pl}$  はプレート速度、 $a$ 、 $b$ 、 $d_c$  (式(6)(7)の  $L$ ) は摩擦パラメータ、 $\sigma$  は垂直応力、 $f_0$  は定数である。以上の式(8)～(10)を連立することにより系のすべり速度の時間発展が得られる。本研究では  $p=\log(v/v_{pl})$ 、 $q=\log(\theta v_{pl}/d_c)$  により定義した  $p$ 、 $q$  を用いて方程式を無次元化し、 $p$ 、 $q$  についての一階微分方程式を解くべき対象の方程式とした。また方程式のパラメータとしては試行錯誤的に決定した SSE を再現する値を採用した。時間可変のルンゲクッタ法による数値計算結果を図 1 1 に示す。最大すべり速度、再来間隔などの物理量において実際に観測される SSE に似た挙動を示していることが分かる。以下ではこの数値計算結果を PINNs で再現することを目的とする。

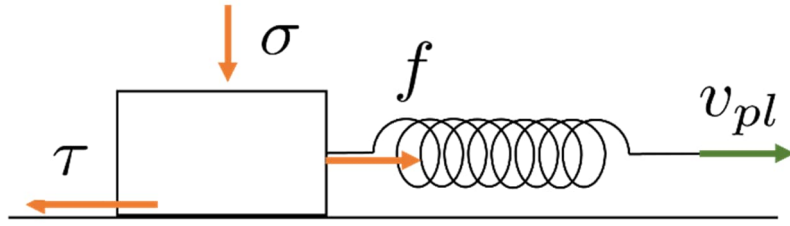


図 1 0．ばねブロックモデルの概要図。ばねのついたブロックが一定速度  $v_{pl}$  で引っ張られ、弾性力  $f$  と摩擦力  $\tau$ 、垂直応力  $\sigma$  が働いている。

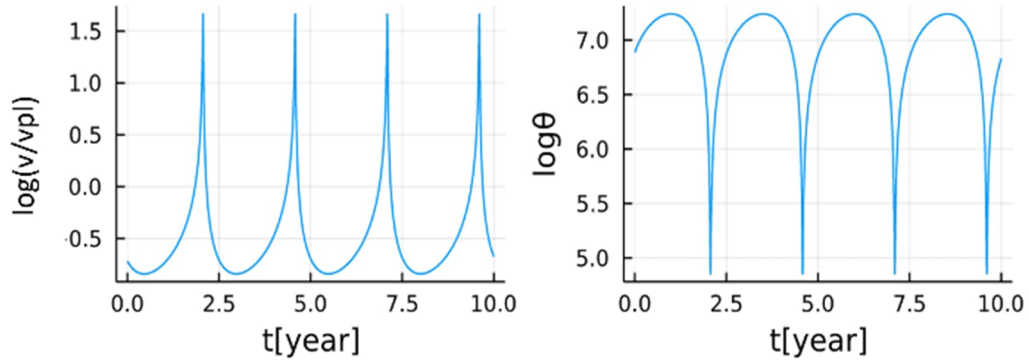


図 1 1．ばねブロックでの SSE 数値計算結果。左図がすべり速度の、右図が状態変数の時間発展を表す。

ばねブロックモデルにおける  $p(t)$ 、 $q(t)$  の時間発展を再現するために、活性化関数がハイパボリックタンジェントである 9 層全結合ニューラルネットワークを構成した。PINNs では初期・境界条件と微分方程式を損失関数として定義することにより、NN が解の挙動を学習する。本研究では、損失関数  $L$  を以下のように定義した。

$$L = L_{ini} + wL_{ode} \quad (11)$$

$$L_{ini} = (p_{NN}(0) - p_{ini})^2 + (q_{NN}(0) - q_{ini})^2 \quad (12)$$

$$L_{ode} = \frac{t^{*2}}{N} \sum_{i=1}^N \left( r_p(p_{NN}(t_i), q_{NN}(t_i))^2 + r_q(p_{NN}(t_i), q_{NN}(t_i))^2 \right) \quad (13)$$

$$r_p(p, q) = \frac{dp}{dt} - \left( a\sigma + \eta v_{pl} e^p \right)^{-1} \left( kv_{pl} (1 - e^p) - \frac{b\sigma v_{pl}}{d_c} (e^{-q} - e^p) \right) \quad (14)$$

$$r_q(p, q) = \frac{dq}{dt} - \frac{v_{pl}}{d_c} (e^{-q} - e^p) \quad (15)$$

ここで  $p_{NN}$  と  $q_{NN}$  は NN の出力、 $p_{ini}$  と  $q_{ini}$  は初期条件の値である。 $t_i$  は collocation point と呼ばれる微分方程式の誤差を評価する時刻であり、 $N$  は評価点数である。また、 $L_{ini}$  が初期条件の誤差を、 $L_{ode}$  が微分方程式の誤差を表しており、損失関数  $L$  はこれら 2 つの誤差を重み  $w$  で足し合わせたものである。この重み  $w$  は試行錯誤的に決定した。 $L_{ode}$  の計算の際は、無次元化のためばねブロックモデルの特徴的な時間量である  $t^* = d_c/v_{pl}$  の 2 乗を掛け合わせてある。このように定義された損失関数を L-BFGS 法を用いて最小化することにより NN の学習を行う。この際、collocation point として、方程式の解が未知の問題に適用することを想定し、特定の時間に対して重みづけをしない等間隔の時間ステップを採用した。この間隔は 100 時間であり、ばねブロックモデル問題の一般的な数値計算手法である Runge-Kutta 法と比べると、ピーク付近で collocation point は少ない。また、損失関数の重み  $w$  は 10 とした。

PINNs による計算結果を図 1 2 に示す。図 1 2 (左下) に示すように、PINNs による SSE の時間発展の計算結果は、数値解との相対誤差  $10^{-1}$  程度で一致していることが分かった。

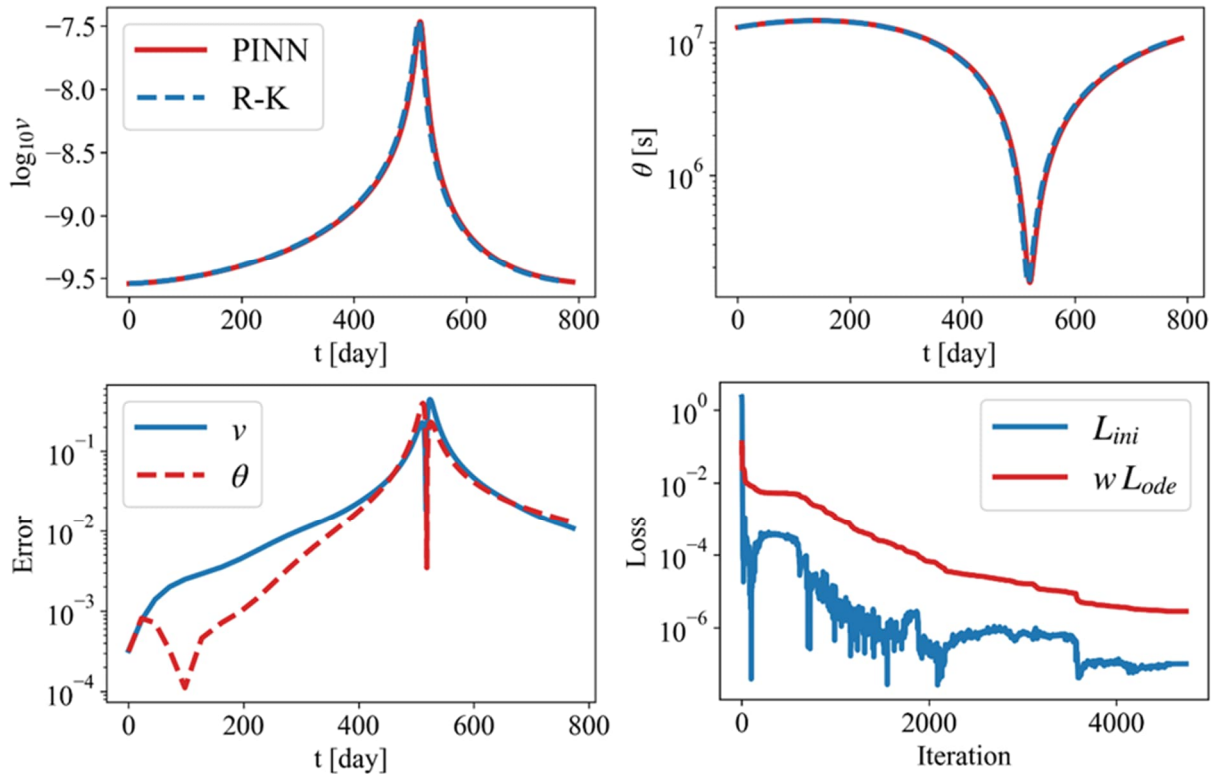


図 1 2 . PINNs での計算結果。(左上)  $v$  の時間発展。(右上)  $\theta$  の時間発展。赤線が PINNs の解、青線が数値計算の結果を示している。(左下)  $v$ 、 $\theta$  の数値計算解と PINNs 解の相対誤差。(右下)  $L_{ini}$  と  $L_{ode}$  の学習曲線。学習の収束条件は 1 回の更新当たりの損失関数の減少が一定値以下になった時点とし、4295 回の iteration で学習が終了した。

次に Causal-PINNs(Wang et al., 2022)の断層すべり計算への適用に取り組んだ。Causal-PINNs とは、PINNs では考慮できない因果律を考慮して NN の学習を行う手法である。断層すべり問題のような非線形問題では時系列が重要なため、Causal-PINNs の導入により計算精度・計算速度向上を目指した。Causal-PINNs では  $L_{ode}$  を以下のように定義する。

$$L_{ode} = \frac{t^{*2}}{N} \sum_{i=1}^N w_i \left( r_p(p_{NN}(t_i), q_{NN}(t_i))^2 + r_q(p_{NN}(t_i), q_{NN}(t_i)) \right)^2 \quad (16)$$

$$w_i = \exp \left( -\varepsilon \sum_{k=1}^{i-1} \left( r_p(p_{NN}(t_k), q_{NN}(t_k))^2 + r_q(p_{NN}(t_k), q_{NN}(t_k)) \right)^2 \right) \quad (17)$$

ここで  $\varepsilon$  はハイパーパラメータである。 $L_{ode}$  の計算の際に、各 collocation point において  $w_i$  による重みづけを行うことにより、損失関数の最適化を時系列前半から行うようにし、これにより学習に因果律を取り入れることができる。Causal-PINNs での計算結果を図 1 3 に示す。図 1 3 (左下) (右下) から計算精度は PINNs と同程度でありながら、収束までの iteration が PINNs よりも少なくなっていることが分かる。これは計算の高速化を意味しており、Causal-PINNs の導入により計算精度を保ったまま計算速度を向上させられる可能性が示唆された。

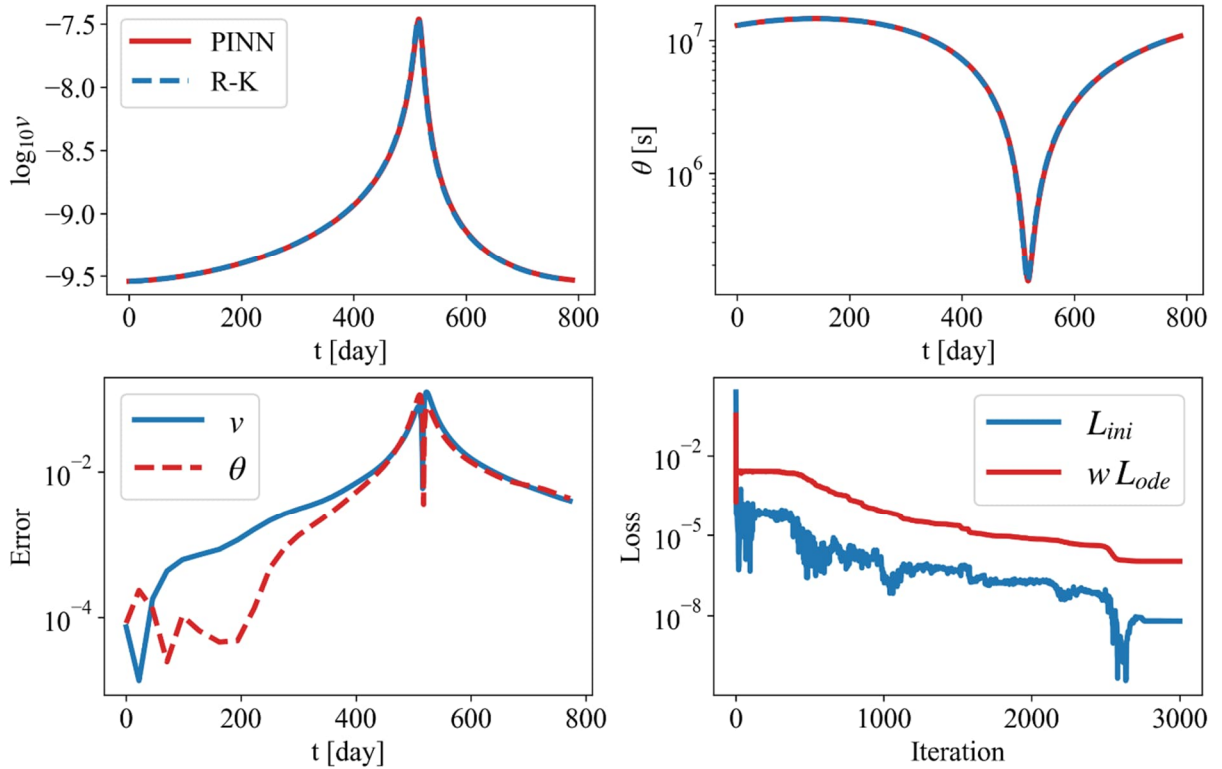


図 1 3. Causal-PINNs での計算結果。(左上)  $v$  の時間発展。(右上)  $\theta$  の時間発展。赤線が PINNs の解、青線が数値計算の結果を示している。(左下)  $v$ 、 $\theta$  の数値計算解と PINNs 解の相対誤差。(右下)  $L_{ini}$  と  $L_{ode}$  の学習曲線。学習の収束条件は 1 回の更新当たりの損失関数の減少が一定値以下になった時点とし、3002 回の iteration で学習が終了した。

今年度は PINNs を用いた断層すべり計算方法の確立を目指し、最初の段階としてばねブロックモデルにおいて SSE 時間発展の計算を行った。また Causal-PINNs の導入により計算速度向上が可能である可能性を示した。次年度以降は、PINNs を用いたすべり速度データからの摩擦パラメータの推定・地震すべりの計算・2次元断層モデルへの拡張などに取り組む。

#### 引用文献

- Yano, K. and Kano, M.: I<sub>1</sub> Trend Filtering-based Detection of Short-term Slow Slip Events: Application to a GNSS Array in Southwest Japan, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 127, 5, e2021JB023258, 2022.
- Kim, S., Koh, K., Boyd, S. and Gorinevsky, D.: I<sub>1</sub> Trend Filtering, *SIAM Review*, problems and techniques section, Vol.51, No.2, pp.339–360, 2009.
- Meade, B. J. and Loveless, J. P.: Block modeling with connected fault-network geometries and a linear elastic coupling estimator in spherical coordinates, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.99, No.6, pp.3124–3139, 2009.
- Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K. and Ochi, T.: Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, Vol.14, No.2, pp.535–551, 2018.
- 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.
- Ruina, A.: Slip instability and state variable friction laws, *Journal of Geophysical Research*, Vol.88(B12), pp.10359–10370, 1983.
- 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.
- Yoshida, S. and Kato, N.: Episodic aseismic slip in a two-degree-of-freedom block-spring model, *Geophysical Research Letters*, Vol. 30(13), 2003.
- Wang, S., Sankaran, S. and Perdikaris, P.: Respecting causality is all you need for training physics-informed neural networks, arXiv:2203.07474, 2022.

#### 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、勉強会を定期的に開催した。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）。また新型コロナウイルスの影響を考慮して基本的にオンラインでの開催（一部対面を含むハイブリッド開催）とした。また、STAR-E プロジェクト5課題全体の勉強会をオンラインで開催した。令和4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。また、プロジェクトのウェブサイトの英語版を作成するとともに、日本語版ウェブサイトではインタビュー記事を公開した（図14）。



図14. STAR-E 東北大課題ウェブサイト内インタビュー記事のスクリーンショット。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

研究項目（a）では、前年度開発したスパース推定による短期 SSE 検知手法の解析領域を拡大すると共に、データ欠損を考慮した手法の改良を行った。解析領域の拡大に際し計算時間の短縮が必要であるため、今後高速計算手法の検討を行う。また、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について、数値実験により性能評価を行った。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、状態空間モデルを用いた西南日本全域の断層すべり推定において、観測時系列のノイズの周波数特性やその推定結果への影響を検証した。また分散共分散行列の構造を詳細に調べ、未知パラメータ間の分離精度を検証した。推定結果は断層面・ブロックの配置等の問題設定に最も依存することが判明した。今後はデータが持つ情報量と分解可能な未知パラメータの上限を数理的に把握・決定し、問題設定自体を最適化する手

段を検討する。

研究項目(c)では、2010年に豊後水道で発生した長期SSEの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化手法を実装し数値実験を行った。次年度以降、実観測データへの適用により断層すべりの把握と短期推移予測の試行を試みる。また、物理方程式を考慮したニューラルネットワークであるPINNsによる断層すべりの数値計算方法の開発に着手し、1次元モデルでSSEの再現に成功した。今後2次元断層すべりへの拡張や摩擦特性の推定に関する逆問題への拡張を検討する。

また、東北大課題の勉強会とSTAR-E5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、うち国外計13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 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------|--------|
| Potential of Megathrust Earthquakes along the Southern Ryukyu Trench Inferred from GNSS Data (ポスター)                     | 加納 将行・池内 葵・西村 卓也・宮崎 真一・松島 健   | 日本地球惑星科学連合大会<br>2022年大会 | 2022年5月 | 国内     |
| PTS解析で推定された2011年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべり時空間発展に基づくプレート境界の摩擦特性の定量評価(口頭)                                                         | 田中 優介・太田 雄策・宮崎 真一             | 日本地球惑星科学連合大会<br>2022年大会 | 2022年5月 | 国内     |
| GNSSによって観測された能登半島群発地震に伴う地殻変動(口頭)                                                                                        | 西村 卓也・西川 友章・佐藤 大祐・平松 良浩・澤田 明宏 | 日本地球惑星科学連合大会<br>2022年大会 | 2022年5月 | 国内     |
| The 14 August 2021 Haiti Earthquake (Mw7.2): Coseismic and postseismic processes and implications on future hazard (口頭) | 福島 洋                          | 日本地球惑星科学連合大会<br>2022年大会 | 2022年5月 | 国内     |
| A friction law both for regular and slow earthquakes (ポスター)                                                             | 堀 高峰・青地 秀雄                    | 日本地球惑星科学連合大会<br>2022年大会 | 2022年5月 | 国内     |
| 日本海溝沿いの浅部プレート境界で発生する津波地震                                                                                                | 中田 令子・日野 亮太                   | 日本地球惑星科学連合大会            | 2022年5月 | 国内     |

|                                                                                                                                |                                                 |                                                               |            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------|----|
| の連動性について（ポスター）                                                                                                                 |                                                 | 2022年大会                                                       |            |    |
| An MCMC approach for determining earthquake hypocenters with 1-D velocity models around a structural boundary（口頭，invited）      | Ito, S., M. Kano, H. Nagao                      | Asia Oceania Geosciences Society 2022                         | 2022 年 8 月 | 国外 |
| Adjoint-Based Direct Data Assimilation for Optimizing Frictional Parameters and Predicting Postseismic Deformation（口頭，invited） | Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, K. Hirahara | SIAM Conference on Mathematics of Data Science (MDS22)        | 2022 年 9 月 | 国外 |
| GNSSを用いた地殻変動観測と地震研究への応用（口頭）                                                                                                    | 加納 将行                                           | 日本測地学会サマースクール2022                                             | 2022 年 9 月 | 国内 |
| 高次元・無限次元モデルにおける予測分布（口頭）                                                                                                        | 矢野 恵佑                                           | 2022年度統計関連学会連合大会                                              | 2022 年 9 月 | 国内 |
| Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench                     | Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide           | International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022 | 2022 年 9 月 | 国外 |
| 測地データに基づく沈み込み帯における断層の摩擦特性とすべりの多様性に関する研究（口頭）                                                                                    | 加納 将行                                           | 日本測地学会第138回講演会                                                | 2022年10月   | 国内 |
| 西南日本のプレート境界・ブロック境界の地震間断層すべり時間発展の同時推定（口頭）                                                                                       | 田中 優介・加納 将行・西村 卓也                               | 日本測地学会第138回講演会                                                | 2022年10月   | 国内 |
| GNSSデータへの深層学習の適用による短期的SSEの断層すべり直接推定（口頭）                                                                                        | 中川 亮・福島 洋・加納 将行・矢野 恵佑・平原 和朗                     | 日本測地学会第138回講演会                                                | 2022年10月   | 国内 |
| High-rate GNSSデータの同化による2003年十勝沖地震                                                                                              | 加納 将行・伊東 優治                                     | 日本地震学会2022年度秋季                                                | 2022年10月   | 国内 |

|                                                                                                                  |                                         |                                                    |          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|----|
| の初期余効すべりの推定（ポスター）                                                                                                |                                         | 大会                                                 |          |    |
| 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                       | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| 最小情報従属モデルを用いた混合ドメインデータの依存関係の解析：メカニズム解と深さの依存関係解析への適用（ポスター）                                                        | 矢野 恵佑・清 智也                              | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| 南海トラフ地震の連発確率について（口頭）                                                                                             | 福島 洋・西川 友章・加納 靖之                        | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| 複数GNSS観測網の統合解析に基づく能登半島群発地震に伴う地殻変動（口頭）                                                                            | 西村 卓也・平松 良浩・太田 雄策                       | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| ひずみ集中帯における稠密GNSS観測一山陰及び有馬-高槻断層帯における詳細速度分布（ポスター）                                                                  | 西村 卓也                                   | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| 高速・低速すべり共通の摩擦則での数値実験（ポスター）                                                                                       | 堀 高峰・青地 秀雄                              | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| M9地震サイクルにおけるM>7宮城県沖地震の繰り返し間隔の変化（口頭）                                                                              | 中田 令子・内田 直希・堀 高峰・日野 亮太                  | 日本地震学会<br>2022年度秋季大会                               | 2022年10月 | 国内 |
| Minimum information dependence modeling for mixed domain data（口頭）                                                | 矢野 恵佑                                   | 2022年度科学研究費シンポジウム「大規模複雑データの理論と方法論～新たな発展と関連分野への応用～」 | 2022年11月 | 国内 |
| Recurrence interval Intervals for M>7 Earthquakes Through a Cycle of M~9 Earthquake in the Middle Segment of the | Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, R. Hino | American Geophysical Union Fall Meeting 2022       | 2022年12月 | 国外 |

|                                                                                                                                            |                                      |                                              |          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|----------|----|
| Japan Trench (口頭)                                                                                                                          |                                      |                                              |          |    |
| Demonstrating the High Probability of Successive Occurrence of Nankai Megathrust Earthquakes (ポスター)                                        | Fukushima, Y., T. Nishikawa, Y. Kano | American Geophysical Union Fall Meeting 2022 | 2022年12月 | 国外 |
| Comparison of tropospheric delay correction methods of InSAR analysis using a mesoscale meteorological model: A case study from Japan (口頭) | Sailellah, S., Y. Fukushima          | American Geophysical Union Fall Meeting 2022 | 2022年12月 | 国外 |
| 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               | American Geophysical Union Fall Meeting 2022 | 2022年12月 | 国外 |
| 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                    | 「深層学習とデータ同化の協働による固体地球科学の深化」研究集会              | 2023年2月  | 国内 |
| 深層学習のGNSSデータへの適用による短期的SSE断層すべりの直接検出 (口頭)                                                                                                   | 中川 亮・福島 洋・加納 将行・矢野 恵佑・平原 和朗          | 「深層学習とデータ同化の協働による固体地球科学の深化」研究集会              | 2023年2月  | 国内 |
| 状態空間モデルに基づく西南日本のプレート間固着・ブロック運動の時空間発展の同時推定 (口頭)                                                                                             | 田中 優介・加納 将行・西村 卓也                    | 「深層学習とデータ同化の協働による固体地球科学の深化」研究集会              | 2023年2月  | 国内 |
| Recent advances of data science techniques in seismology (口頭)                                                                              | Yano, K.                             | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop        | 2023年3月  | 国外 |
| Various fault slip mode in the southern Ryukyu                                                                                             | Kano, M., S. Miyazaki, J.            | 2023 Slow-to-Fast                            | 2023年3月  | 国外 |

|                                                                                                                                                     |                                                                    |                                       |            |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------|----|
| subduction zone inferred from GNSS observations (ポスター)                                                                                              | Fukuda, M.<br>Nakamura, T.<br>Nishimura, T.<br>Matsushima          | Earthquake Workshop                   |            |    |
| Fault friction properties inferred from the early afterslip within one hour after the 2011 Tohoku-Oki EQ estimated by GNSS carrier phase change(口頭) | Tanaka, Y., Y.<br>Ohta, S. Miyazaki                                | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023 年 3 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.<br>Fukushima, M.<br>Kano, K. Yano, K.<br>Hirahara | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023 年 3 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.<br>Kano, K. Hirahara                             | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023 年 3 月 | 国外 |
| Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench (II) (ポスター)                              | Nakata, R., T.<br>Hori, H. Aochi, S.<br>Ide                        | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023 年 3 月 | 国外 |

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 7 件、うち国外計 6 件

| 掲載した論文(発表題目)                                                                                                      | 発表者氏名                | 発表した場所<br>(学会誌・雑誌等名)                         | 発表した時期 | 国内・外の別 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|--------|--------|
| I1 Trend Filtering-Based Detection of Short-Term Slow Slip Events: Application to a GNSS Array in Southwest Japan | Yano, K. M.,<br>Kano | Journal of Geophysical Research: Solid Earth | 2022   | 国外     |
| Time-independent                                                                                                  | Nishimura, T.        | Earth, Planets                               | 2022   | 国外     |

|                                                                                                                                        |                                      |                                    |      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------|----|
| forecast model for large crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data                                                        |                                      | and Space                          |      |    |
| Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault                                           | Ito, S., M. Kano, H. Nagao           | Geophysical Journal International  | 2022 | 国外 |
| 測地データに基づく沈み込み帯における断層の摩擦特性とすべりの多様性に関する研究                                                                                                | 加納 将行                                | 測地学会誌                              | 2022 | 国内 |
| Comparison of tropospheric delay correction methods for InSAR analysis using a mesoscale meteorological model: a case study from Japan | Sailellah, S., Y. Fukushima          | Earth, Planets and Space           | 2023 | 国外 |
| High Probability of Successive Occurrence of Nankai Megathrust Earthquakes                                                             | Fukushima, Y., T. Nishikawa, Y. Kano | Scientific Reports                 | 2023 | 国外 |
| Dependence of variance on covariate design in nonparametric link regression                                                            | Okuno, A., K. Yano                   | Statistics and Probability Letters | 2023 | 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

該当なし

3) 仕様・標準等の策定

該当なし

### 3. まとめ

プロジェクト2年目である令和4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、主として研究項目(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。昨年度に開発したスパース推定による短期的 SSE 検出手法については解析領域を拡張し、今年度からは断層すべりを直接推定する深層学習手法の開発に新たに着手した。また、西南日本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に向けて課題の整理を行った。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、解析技術の開発は当初の予定通り順調に進展している。加えて物理深層学習手法とも呼べる PINNs による断層すべりの数値計算手法の開発にも着手した。次年度以降も継続して測地データ解析手法の開発と今後の拡張の方向性を検討する。全体として課題実施期間後半に向け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：2023年2月10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4年度の研究概要説明  
2. 全体討論

#### (2)勉強会

- 2022/4/7 第8回勉強会（防災科学技術研究所・久保久彦氏）  
「地殻変動データを用いた断層すべり分布推定において断層面離散化が与える影響に関する一考察」
- 2022/6/28 第9回勉強会（理化学研究所・岡崎智久氏）  
「GNSS 速度データの統計解析による地殻変動の推定」
- 2023/2/27 第10回勉強会（理化学研究所・高橋温志氏）  
「球面上の剛体運動の考え方と GNSS 地殻変動データへの適用例」

上記のほか、STAR-E 5 課題全体の勉強会を全 10 回実施した。

#### (3)アウトリーチ活動

- 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」ウェブサイト インタビュー記事

- Vol. 1 「地震学×情報科学の融合で目指すは“ 天気予報の地震版 ”
- Vol. 2 「地殻変動×情報科学で「地震の発生予測」に挑む」

(<http://www.zisin.gp.tohoku.ac.jp/~stare/interview.html>)

- 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」英語版ウェブサイト

([http://www.zisin.gp.tohoku.ac.jp/~stare/index\\_en.html](http://www.zisin.gp.tohoku.ac.jp/~stare/index_en.html))

## 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2年目が終了した。今後の課題遂行に向けた準備期間という位置づけで課題を実施した1年目を受けて、2年目はいくつかの課題において本格的に研究を開始した。これまで新型コロナウイルス感染症の拡大を受けオンラインでの議論が中心であったが、今年度は関係機関を訪問し、対面での充実した議論を実施することができた。その甲斐もあり、断層すべり・ブロック運動の推定分離精度の評価や、地殻変動検出に向けた深層学習手法の開発、物理深層学習を用いた断層すべりの数値計算といった複数の課題において、論文化に向けた成果が得られつつある。次年度以降、これまでの成果を継続・発展させ、更なる成果を出せるよう尽力していきたい。また、次年度は対面での STAR-E の各課題との交流が予定されており、本課題だけでなく課題間の連携を通じた新たな「情報科学×地震学」研究が実施できるのではないかと期待している。

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 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|--------|
| Potential of Megathrust Earthquakes along the Southern Ryukyu Trench Inferred from GNSS Data (ポスター)                         | 加納 将行・池内 葵・西村 卓也・宮崎 真一・松島 健                     | 日本地球惑星科学連合大会2022年大会                                    | 2022年5月 | 国内     |
| PTS解析で推定された2011年東北地方太平洋沖地震の初期余効すべり時空間発展に基づくプレート境界の摩擦特性の定量評価 (口頭)                                                            | 田中 優介・太田 雄策・宮崎 真一                               | 日本地球惑星科学連合大会2022年大会                                    | 2022年5月 | 国内     |
| GNSSによって観測された能登半島群発地震に伴う地殻変動 (口頭)                                                                                           | 西村 卓也・西川 友章・佐藤 大祐・平松良浩・澤田 明宏                    | 日本地球惑星科学連合大会2022年大会                                    | 2022年5月 | 国内     |
| The 14 August 2021 Haiti Earthquake (Mw7.2): Coseismic and postseismic processes and implications on future hazard (口頭)     | 福島 洋                                            | 日本地球惑星科学連合大会2022年大会                                    | 2022年5月 | 国内     |
| A friction law both for regular and slow earthquakes (ポスター)                                                                 | 堀 高峰・青地 秀雄                                      | 日本地球惑星科学連合大会2022年大会                                    | 2022年5月 | 国内     |
| 日本海溝沿いの浅部プレート境界で発生する津波地震の連動性について (ポスター)                                                                                     | 中田 令子・日野 亮太                                     | 日本地球惑星科学連合大会2022年大会                                    | 2022年5月 | 国内     |
| An MCMC approach for determining earthquake hypocenters with 1-D velocity models around a structural boundary (口頭, invited) | Ito, S., M. Kano, H. Nagao                      | Asia Oceania Geosciences Society 2022                  | 2022年8月 | 国外     |
| Adjoint-Based Direct Data Assimilation for Optimizing Frictional Parameters and                                             | Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, K. Hirahara | SIAM Conference on Mathematics of Data Science (MDS22) | 2022年9月 | 国外     |

|                                                                                                            |                                       |                                                               |          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|----|
| Predicting Postseismic Deformation (口頭, invited)                                                           |                                       |                                                               |          |    |
| GNSSを用いた地殻変動観測と地震研究への応用 (口頭)                                                                               | 加納 将行                                 | 日本測地学会サマースクール2022                                             | 2022年9月  | 国内 |
| 高次元・無限次元モデルにおける予測分布 (口頭)                                                                                   | 矢野 恵佑                                 | 2022年度統計関連学会連合大会                                              | 2022年9月  | 国内 |
| Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench | Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide | International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022 | 2022年9月  | 国外 |
| 測地データに基づく沈み込み帯における断層の摩擦特性とすべりの多様性に関する研究 (口頭)                                                               | 加納 将行                                 | 日本測地学会第138回講演会                                                | 2022年10月 | 国内 |
| 西南日本のプレート境界・ブロック境界の地震間断層すべり時間発展の同時推定 (口頭)                                                                  | 田中 優介・加納 将行・西村 卓也                     | 日本測地学会第138回講演会                                                | 2022年10月 | 国内 |
| GNSSデータへの深層学習の適用による短期的SSEの断層すべり直接推定 (口頭)                                                                   | 中川 亮・福島 洋・加納 将行・矢野 恵佑・平原 和朗           | 日本測地学会第138回講演会                                                | 2022年10月 | 国内 |
| High-rate GNSSデータの同化による2003年十勝沖地震の初期余効すべりの推定 (ポスター)                                                        | 加納 将行・伊東 優治                           | 日本地震学会2022年度秋季大会                                              | 2022年10月 | 国内 |
| Physics-Informed Neural Networksのばねブロックモデルへの適用 (口頭)                                                        | 福島 陸斗・加納 将行・平原 和朗                     | 日本地震学会2022年度秋季大会                                              | 2022年10月 | 国内 |
| 最小情報従属モデルを用いた混合ドメインデータの依存関係の解析: メカニズム解と深さの依存関係解析への適用 (ポスター)                                                | 矢野 恵佑・清 智也                            | 日本地震学会2022年度秋季大会                                              | 2022年10月 | 国内 |
| 南海トラフ地震の連発確率について (口頭)                                                                                      | 福島 洋・西川 友章・加納 靖之                      | 日本地震学会2022年度秋季大会                                              | 2022年10月 | 国内 |
| 複数GNSS観測網の統合解析に基づく能登半島群発地震に伴う地殻変動 (口頭)                                                                     | 西村 卓也・平松 良浩・太田 雄策                     | 日本地震学会2022年度秋季大会                                              | 2022年10月 | 国内 |
| ひずみ集中帯における稠密GNSS観測一山陰及び有馬-高槻断層帯における詳細速度分布 (ポスター)                                                           | 西村 卓也                                 | 日本地震学会2022年度秋季大会                                              | 2022年10月 | 国内 |

|                                                                                                                                           |                                         |                                                    |          |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|----------|----|
| 高速・低速すべり共通の摩擦則での数値実験（ポスター）                                                                                                                | 堀 高峰・青地 秀雄                              | 日本地震学会2022年度秋季大会                                   | 2022年10月 | 国内 |
| M9地震サイクルにおけるM>7宮城県沖地震の繰り返し間隔の変化（口頭）                                                                                                       | 中田 令子・内田 直希・堀 高峰・日野 亮太                  | 日本地震学会2022年度秋季大会                                   | 2022年10月 | 国内 |
| Minimum information dependence modeling for mixed domain data（口頭）                                                                         | 矢野 恵佑                                   | 2022年度科学研究費シンポジウム「大規模複雑データの理論と方法論～新たな発展と関連分野への応用～」 | 2022年11月 | 国内 |
| Recurrence interval Intervals for M>7 Earthquakes Through a Cycle of M~9 Earthquake in the Middle Segment of the Japan Trench（口頭）         | Nakata, R., N. Uchida, T. Hori, R. Hino | American Geophysical Union Fall Meeting 2022       | 2022年12月 | 国外 |
| Demonstrating the High Probability of Successive Occurrence of Nankai Megathrust Earthquakes（ポスター）                                        | Fukushima, Y., T. Nishikawa, Y. Kano    | American Geophysical Union Fall Meeting 2022       | 2022年12月 | 国外 |
| Comparison of tropospheric delay correction methods of InSAR analysis using a mesoscale meteorological model: A case study from Japan（口頭） | Sailellah, S., Y. Fukushima             | American Geophysical Union Fall Meeting 2022       | 2022年12月 | 国外 |
| 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                  | American Geophysical Union Fall Meeting 2022       | 2022年12月 | 国外 |
| 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                       | 「深層学習とデータ同化の協働による固体地球科学の深化」研究集会                    | 2023年2月  | 国内 |
| 深層学習のGNSSデータへの適用による短期的SSE断層すべりの直接検出（口頭）                                                                                                   | 中川 亮・福島 洋・加納 将行・矢野 恵佑・平原 和朗             | 「深層学習とデータ同化の協働による固体地球科学の深化」研究集会                    | 2023年2月  | 国内 |
| 状態空間モデルに基づく西南日本のプレート間固                                                                                                                    | 田中 優介・加納 将行・西村 卓也                       | 「深層学習とデータ同化の協働によ                                   | 2023年2月  | 国内 |

|                                                                                                                                                     |                                                                            |                                       |         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------|----|
| 着・ブロック運動の時空間発展の同時推定（口頭）                                                                                                                             |                                                                            | る固体地球科学の深化」研究集会                       |         |    |
| Recent advances of data science techniques in seismology（口頭）                                                                                        | Yano, K.                                                                   | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023年3月 | 国外 |
| Various fault slip mode in the southern Ryukyu subduction zone inferred from GNSS observations（ポスター）                                                | Kano, M., S. Miyazaki, J. Fukuda, M. Nakamura, T. Nishimura, T. Matsushima | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023年3月 | 国外 |
| Fault friction properties inferred from the early afterslip within one hour after the 2011 Tohoku-Oki EQ estimated by GNSS carrier phase change（口頭） | Tanaka, Y., Y. Ohta, S. Miyazaki                                           | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023年3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                  | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023年3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                                        | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023年3月 | 国外 |
| Numerical simulation with a multiscale circular patch model in the northern segment along the Japan Trench (II)（ポスター）                               | Nakata, R., T. Hori, H. Aochi, S. Ide                                      | 2023 Slow-to-Fast Earthquake Workshop | 2023年3月 | 国外 |

## 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 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|--------|--------|
| l1 Trend Filtering-Based Detection of Short-Term Slow Slip Events: Application to a GNSS Array in Southwest Japan | Yano, K. M., Kano | Journal of Geophysical Research: Solid Earth | 2022   | 国外     |

|                                                                                                                                        |                                      |                                    |      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------|----|
| Time-independent forecast model for large crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data                                       | Nishimura, T.                        | Earth, Planets and Space           | 2022 | 国外 |
| Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault                                           | Ito, S., M. Kano, H. Nagao           | Geophysical Journal International  | 2022 | 国外 |
| 測地データに基づく沈み込み帯における断層の摩擦特性とすべりの多様性に関する研究                                                                                                | 加納 将行                                | 測地学会誌                              | 2022 | 国内 |
| Comparison of tropospheric delay correction methods for InSAR analysis using a mesoscale meteorological model: a case study from Japan | Sailellah, S., Y. Fukushima          | Earth, Planets and Space           | 2023 | 国外 |
| High Probability of Successive Occurrence of Nankai Megathrust Earthquakes                                                             | Fukushima, Y., T. Nishikawa, Y. Kano | Scientific Reports                 | 2023 | 国外 |
| Dependence of variance on covariate design in nonparametric link regression                                                            | Okuno, A., K. Yano                   | Statistics and Probability Letters | 2023 | 国外 |

(注) 発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること。