

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」

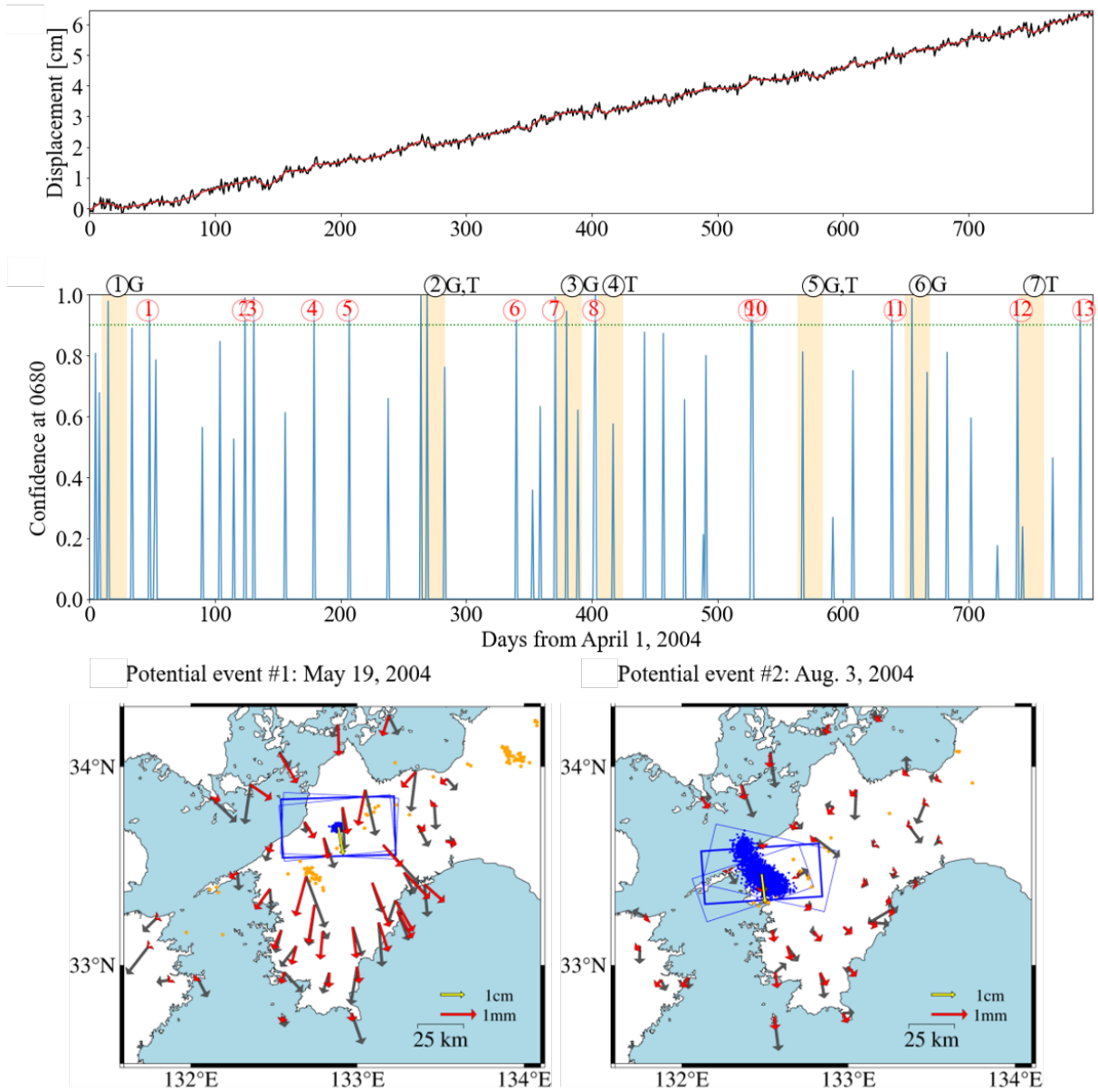
令和3年度
成果報告書

令和4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3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



スパース推定を用いた短期的スロースリップイベント（SSE）検出の例。上段の図は四国西部のGNSS観測点におけるフィッティング結果を表す。中段の図は推定結果の信頼度の時系列を表すが、黒の数字で示す既知の7個のSSEを捉えている他、これまでに発見されていなかった12個のSSEの候補（赤数字）を発見した。下段の図はそのうち2つのSSEに対してマルコフ連鎖モンテカルロ法により断層モデルを推定した結果を表す。新たに発見されたSSEも既知のSSE同様の領域で発生していることが分かった。

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）が令和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
1.1 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	1
(2) 研究実施日程	3
2. 研究成果の説明	3
(1) 業務の内容	3
(a) 業務題目	3
(b) 担当者	3
(c) 業務の目的	4
(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	4
(e) 令和3年度業務目的	5
(2) 令和3年度の成果	6
(a) 業務の要約	6
(b) 業務の成果	6
(c) 結論ならびに今後の課題	14
(d) 引用文献	15
(e) 成果の論文発表・口頭発表等	15
(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	20
3. まとめ	21
4. 活動報告	21
(1) 会議	21
(2) 勉強会	21
(3) アウトリーチ活動	22
5. むすび	23

1. 研究課題の概要

1.1 研究概要の説明

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。

(1) 研究者別の概要

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	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	【研究項目(a)(b)(c)】 各研究項目の課題進捗状況の統括とプロジェクトの管理・運営を行った。また、プレート境界の断層すべりの短期推移予測に資する計算基盤の調査を行い、今後のデータ同化手法の開発に関する知見を得た。	R3. 7. 8～ R4. 3. 31	5,000,000円	1,500,000円
同・准教授	福島洋	【研究項目(a)(b)】 多項目測地観測データを用いた断層すべり推定の高度化に向けた手法開発に関する議論を行い、今後の断層すべり推定手法の開発方針に関する知見を得た。	R3. 7. 8～ R4. 3. 31		
同・助教	中田令子	【研究項目(c)】 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と計算基盤の整備を行い、今後のデータ同化手法の開発に関する知	R3. 7. 8～ R4. 3. 31		

		見を得た。			
同・研究員	Nematollah Ghayournaj arkar	【研究項目(b)(c)】 断層すべり推定手法の高度化に向けて、データ同化や情報科学を測地データに適用した既存研究の調査を行い、既存研究の課題に関する知見を得た。	R3.10.1 ～ R4.3.31		
統計数理研究所・准教授	矢野恵佑	【研究項目(a)(b)】 スパース推定を用いた地殻変動推定手法を検討、GNSSデータに適用し、SSEの検出を行った。また深層学習を用いた断層すべり推定に関する議論を通して、今後の断層すべり推定手法の開発方針を定めた。	R3.7.8～ R4.3.31	—	—
理化学研究所・ユニットリーダー	松田孟留	【研究項目(a)(b)】 測地観測データの信号・ノイズ分離に向けた手法開発に関する議論を行い、今後のデータ解析手法の開発の方針を定めた。	R3.7.8～ R4.3.31	—	—
海洋研究開発機構・センター長	堀高峰	【研究項目(c)】 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と計算基盤の整備を行い、今後のデータ同化手法の開発に関する知見を得た。	R3.7.8～ R4.3.31	—	—
京都大学・教授	宮崎真一	【研究項目(a)(b)】 測地観測データを用いた断層すべり推定の高度化に向けた手法開発に関する議論を行い、今後の手法開発の方針を定めた。	R3.7.8～ R4.3.31	—	—
京都大学・准教授	西村卓也	【研究項目(a)(b)】 深層学習を用いた断層すべり推定手法に関する議論を行い、今後の研究方針を定めた。また、GNSS観測データを解析し共有サーバを整備し、課題内での共有を行った。	R3.7.8～ R4.3.31	—	—

和歌山大学・講師	八谷大岳	【研究項目(b)】機械学習を用いた断層すべり推定手法を検討し、断層すべりを推定した。	R3.7.8～ R4.3.31	—	—
----------	------	--	--------------------	---	---

(2) 研究実施日程

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
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				←								→
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				←								→
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				←								→
④ プロジェクトの管理・運営				←								→

(注) 研究代表者、研究分担者等別に作成すること

2. 研究成果の説明

(1) 業務の内容

(a) 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」

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東北大学	助教	加納将行
東北大学	准教授	福島洋
東北大学	助教	中田令子
東北大学	研究員	Nematollah Ghayournejarkar
統計数理研究所	准教授	矢野恵佑
理化学研究所	ユニットリーダー	松田孟留
海洋研究開発機構	センター長	堀高峰

京都大学	教授	宮崎真一
京都大学	准教授	西村卓也
和歌山大学	講師	八谷大岳

(c) 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。

(d) 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する。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する。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する。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する。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する。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する。

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タログの充実、断層すべりのより正確な推定を通じた地震関連現象理解の深化を図る。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。

(e) 令和3年度業務目的

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を開発し、四国西部の GNSS アレイをテストベッドとして開発した手法の検証を行う。さらに、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行う。また、測地データに含まれる信号・ノイズの分離に向け、各々の時空間・周波数特性等の定量的な把握に向けた研究を開始し、同時に成分分解の手法を検討する。

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を検討する。具体的には、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う。豊後水道の長期的スロースリップイベント (SSE) 発生域の GNSS アレイをテストベッドとして開発した手法の検証に着手する。

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開始する。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および観測データの整備に着手する。

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を開催し、今後の方針を議論するための現状の情報共有を行う。併せて、手法開発のテストベッドとするための観測データセットの共有を行う。また、データ・手法に関する議論を促進し、進捗や研究成果をリアルタイムで共有するための体制を整備する。

(2) 令和 3 年度の成果

(a) 業務の要約

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、11 トレンドフィルタリングを用いたスパース推定手法を開発し、四国西部の GNSS データに適用することで、既知の SSE の検出に加え新たな SSE の検出に成功した。検出した SSE に関する断層モデルを推定し、今回検出した SSE が断層すべりの地震学的指標である低周波地震とも時空間的に同期していることを示した。また、機械学習を用いた特徴量変換を利用した Normalizing Kalman Filter による断層すべり手法を開発した。八重山諸島の GNSS データに適用したところ、従来の Kalman Filter に比べて観測とモデルの残差が大きく減少したと共に、複数回の SSE のすべりのばらつきが抑えられたことから、より正確に断層すべりが推定できることが示された。加えて、データ同化や情報科学を測地データに適用した既存研究を調査しプロジェクト内で共有すると共に、GNSS 観測データの共有サーバの整備、勉強会の定期的な開催、プロジェクトウェブサイトの作成を行った。

(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

測地データに基づく地殻変動検知能力の向上に向けて、令和 3 年度は、スパース推定に基づく SSE の自動検出手法の開発およびプログラム公開を行った。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 11 トレンドフィルタリング、Mallows の C_p 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。11 トレンドフィルタリング¹⁾

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。11 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¹⁾。ここで λ はハイパーパラメータであり、 λ が大きくなると区分の数が少なくなり、 λ が小さくなると区分の数が多くなる。この λ の決定は Mallows の C_p ²⁾ を用いて行う。Cp 規準を基に観測時系列に区分線形関数が適合しやすい観測点を探し、その観測点における観測時系列の区分変化点を SSE 開始候補点として、複数の観測点で変化が存在するかを検定する。次に、複数観測点での検定の p-値を p-値結合法を用いて統合する。そして統合された $1-p$ を検知確からしさとする。開発手法は既存の赤池情報量規準(AIC)を用いた SSE 自動検出手法³⁾と比べ、移動窓幅といった恣意的な調整パラメータの仮定が不要といった利点があり、さらに副次的に時系列のフィルタリング結果が得られる。

まず、SSE を模した変位を含む擬似的な GNSS 変位時系列に対して、開発手法を適用し手法の性能評価を行った。図 1 に本課題での開発手法と従来の AIC を用いた検知手法の比較結果を示す。図 1 (a) はある観測点での擬似変位時系列、図 1 (b) は本課題での開発手法による検出確からしさの時系列、図 1 (c) (d) はそれぞれ窓幅を 100 日、10 日に固定した場合の AIC を用いた検知手法による検出確からしさの時系列である。図中の灰色の線が擬似変位時系列を生成する際に設定した SSE の発生日を表す。このタイミングで検出確からしさが高くなっているほど、適用した手法の性能が良いことを示す。開発手法は AIC を用いた手法に比べて、SSE 発生のタイミングで確からしさが明瞭なピークを示しており、SSE 発生をより正確に検出していることが分かる。また、図 1 (e) - (g) は、イベント検知を定義する確からしさの閾値を変化させたときの、それぞれの受信者操作特性 (ROC) 曲線である。図中に示す R は、SSE の発生を仮定したタイミングと、検知されたタイミングのずれの日数を意味しており、すべての SSE に対して発生から $\pm R$ 日以内に検知されている割合を縦軸に、 $\pm R$ 日以内に SSE が発生していないにも関わらず検知と判定した割合を横軸に示してある。ROC 曲線は左上に近いほど手法の性能が良いことを示す。いずれの図においても、開発手法が AIC を用いた手法に比べて、検知能力が高い (低誤検知率・高検知率である) ことを示している。

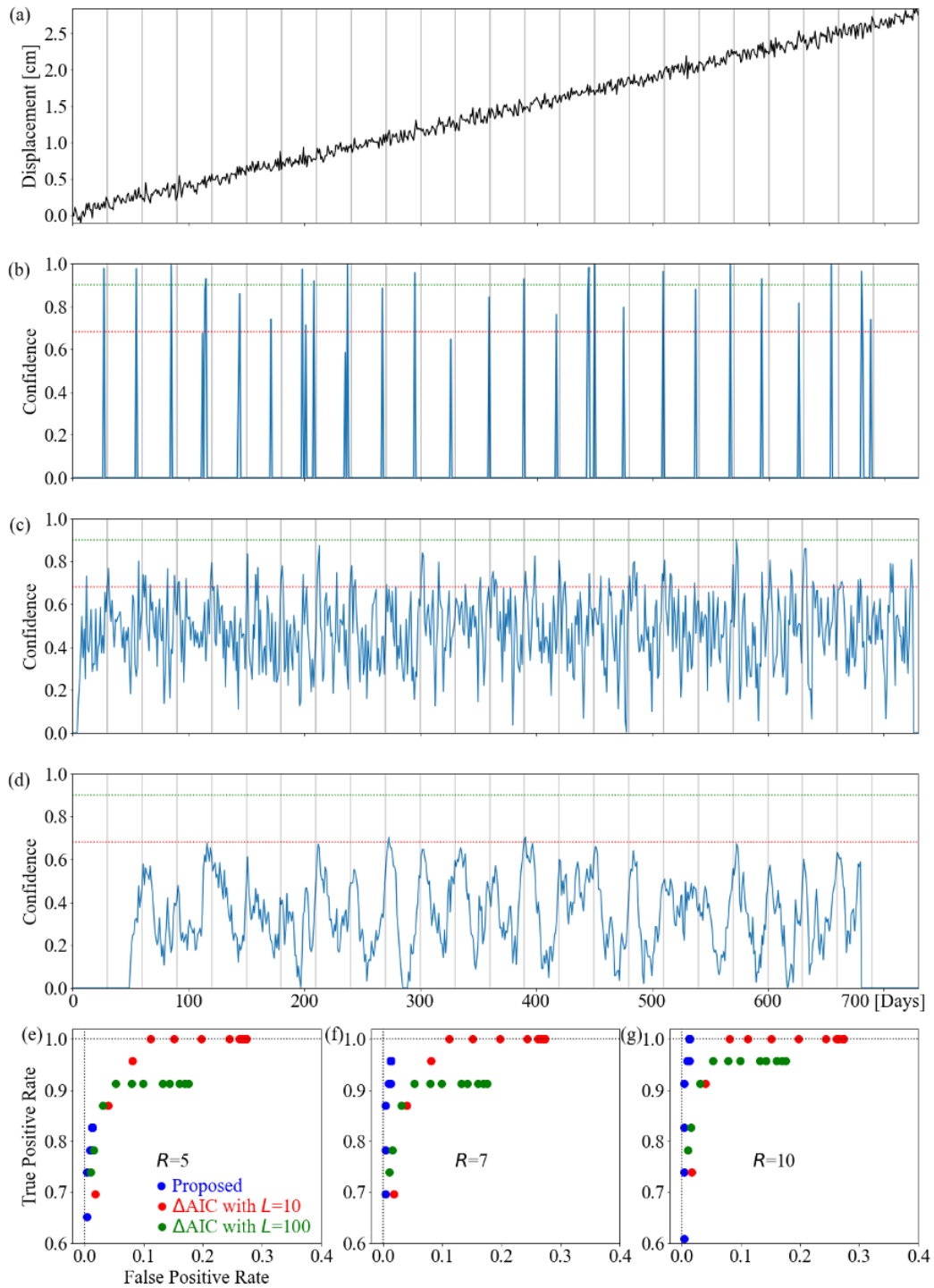


図 1 . SSE 自動検出法の性能比較。(a) 擬似 GNSS 時系列の例。(b) 開発手法による検知確からしさの時系列。(c) (d) AIC を用いた手法による検知確からしさの時系列。用いる窓幅は(c) 100 日、(d) 10 日とした。(e)-(g) 検知の定義の変化による ROC 曲線。青が開発手法、赤が AIC (窓幅 10 日) を用いた手法、緑が AIC (窓幅 100 日) を用いた手法の結果を示す。また R は SSE の発生を仮定したタイミングと、検知されたタイミングのずれの日数を意味しており、すべての SSE に対して発生から $\pm R$ 日以内に検知されている割合を縦軸に、 $\pm R$ 日以内に SSE が発生していないにも関わらず検知と判定した割合を横軸に示してある。

次に、開発手法を四国西部における GNSS 実観測データに適用した結果を示す。国土地理院による GNSS 観測網 GEONET で得られた 2004 年 4 月 1 日から 800 日間の観測データを用いた。まず、観測点のうち、実際の観測時系列が区分線形関数に適合している観測点を Mallows の C_p 規準の振る舞いをもとに精査した。図 2 (a) に区分線形関数がよく適合した観測点を、また図 2 (b) に C_p 規準が 11 トレンドフィルタリングのハイパーパラメータ λ に対してどのように変化するかを示す。この観測点においては C_p 規準が下に凸の形をしていることから、実際に使う λ を C_p 規準最小点として一意に決めることができ、区分線形関数がよく適合していることを示している。図 2 (c) に開発手法によるフィルタリング結果を、(d) に検知結果を示す。GNSS データに対して AIC を用いて検出された³⁾、もしくは傾斜計により検出された⁴⁾、既知の 7 個の SSE を捉えている他、これまでに発見されていなかった 12 個の SSE の候補を発見した。

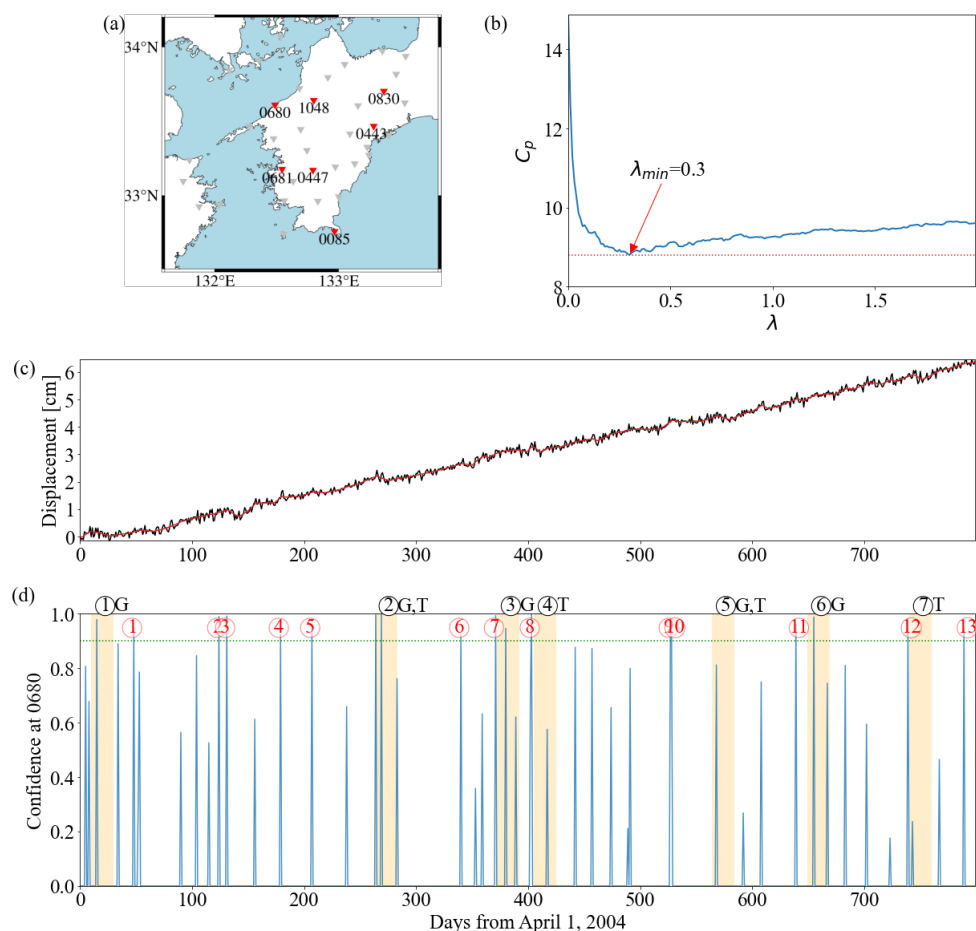


図 2. 開発手法の四国西部 GNSS データへの適用。(a) 利用した四国西部の GNSS 観測点 (灰色の逆三角) と区分線形関数がよく適合した観測点 (赤色の逆三角)。(b) Mallows の C_p 規準の振る舞いの例。(c) 開発手法によるフィルタリング結果。黒線が観測時系列、赤線がフィルタリング結果を表す。(d) 観測点 0680 における検知の例。赤色の番号をつけた箇所が新しく検知した SSE の発生日、黒色の番号をつけた箇所は既知の SSE の発生日。オレンジ色の影はその前後 10 日を表す。G は GNSS を用いて検知された既知の SSE³⁾ を、T は傾斜計を用いて検知された既知の SSE⁴⁾ を表す。

新たに検出した SSE に対してベイズ的逆解析を行い、断層モデルを推定した例を図 3 に示す。逆解析には半無限弾性体中の矩形一様断層すべりモデル⁵⁾と正規分布に従う観測誤差を仮定し、Markov chain Monte Carlo (MCMC)を用いた。逆解析によって決定された断層は³⁾で推定された既知の SSE の断層位置と整合的な場所に決まった。また、断層の位置は SSE の地震学的指標でもある低周波微動の震源(図 3 の橙丸)⁶⁾とも対応することを確認した。

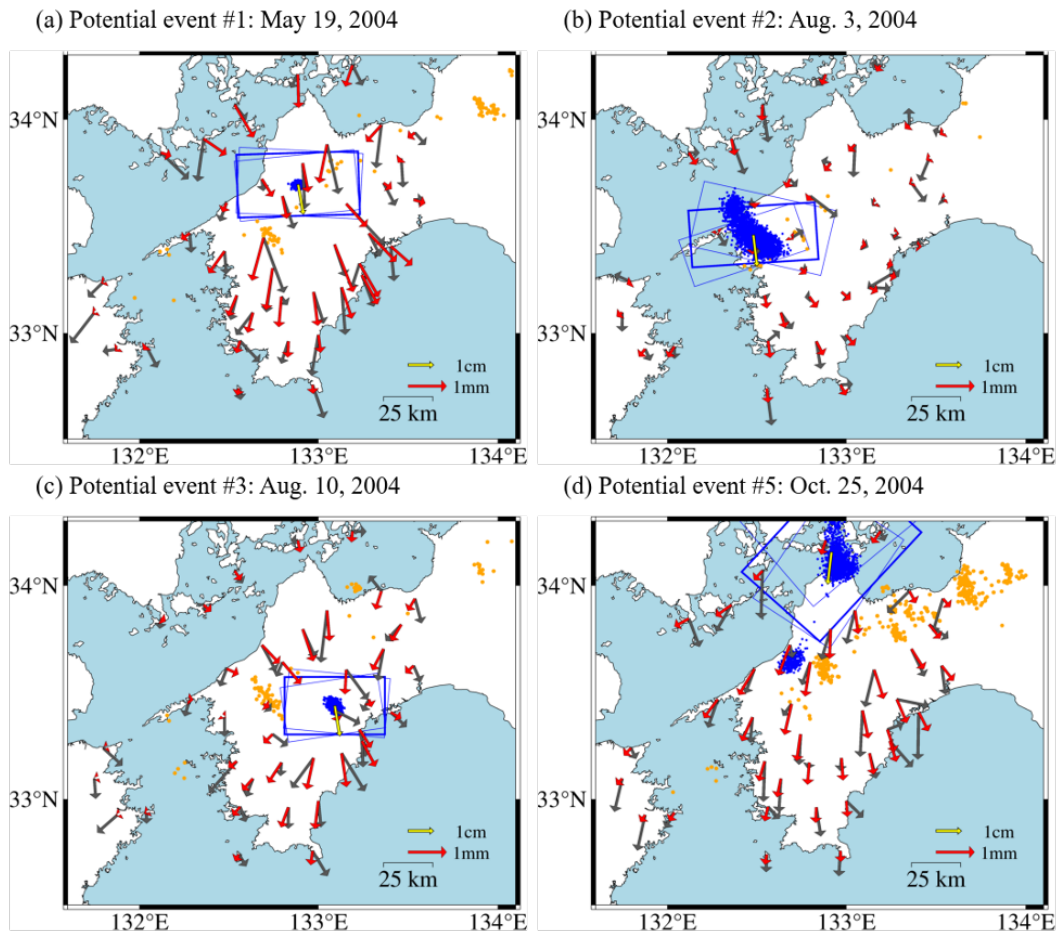


図 3. ベイズ逆解析を用いた断層すべり推定の例。青点は断層中心位置の事後標本を、青四角は断層大きさの事後標本(上下 4 分位点および中央値)を表す。黄矢印は断層のすべり方向を表す。赤矢印は理論変位、黒矢印は観測変位を表す。橙丸は低周波微動⁶⁾の震源を表す。

開発手法の適用範囲の拡大に向け、(1)歪計・傾斜計といった GNSS 以外の各種測地データへの適用、(2)内陸域など他地域の SSE の検知に際してどのような点が問題となるかを議論した。四国西部の GNSS と比較して、降水・積雪・植林などによる様々なノイズが顕著に含まれる観測点も多いことから、ノイズ・信号の分離と組み合わせで適用する必要があることを確認した。分離においてはノイズ源の理解が重要なため、測地データに含まれるノイズ起源に関する議論も行った。次年度以降も継続して議論するとともに適用範囲を拡大するための手法改良を試みる。

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に向けて、令和3年度は機械学習による特徴量変換を利用する手法である Normalizing Kalman Filter⁷⁾ (以下 NKF) の利用可能性について検討を開始した。状態空間モデルを用いた解析で広く用いられている通常の Kalman Filter (以下 KF) では観測方程式を線形とし、観測ノイズを正規分布と仮定する。例えば断層すべりの推定の問題を単純な形で表すと、以下の観測方程式で記述できる。

$$\mathbf{d}(t) = \mathbf{G}\mathbf{s}(t) + \mathbf{e}(t) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{d}(t)$ は時刻 t における観測データ、 $\mathbf{s}(t)$ は興味の対象である断層すべりに伴う応答関数、 $\mathbf{e}(t)$ が観測ノイズの項である。しかしながら、実際には観測ノイズには非線形な物理法則を潜在的に内包する可能性があり、断層すべり推定に用いられている既存手法である Network Inversion Filter⁸⁾では、観測方程式に時間相関するノイズの項、空間相関するノイズの項を加えることで、残った誤差項が正規分布に従うという仮定の下で計算を行う。一方、NKF では式(2)を以下の式(3)のように拡張する。

$$\mathbf{d}(t) = f_i(\mathbf{G}\mathbf{s}(t) + \mathbf{e}(t)) \quad (3)$$

式(3)に含まれる f_i は非線形な変換であり、逆関数が計算可能な複数の写像の合成写像で構成される。これにより、正規分布のような単純な確率分布を複雑な分布に変換することが可能となる。NKF では非線形変換 f_i を Neural Network を用いてモデル化し、 f_i^{-1} により観測データ $\mathbf{d}(t)$ を逆変換した後、KF を用いて断層すべり $\mathbf{s}(t)$ の時間発展を推定する。この操作を繰り返し、観測値と推定値の残差が最小になるような非線形変換 f_i を推定する。

令和3年度は既存の断層すべりの時間発展が解析済みである八重山諸島に設置された GNSS データに NKF の適用を試みた。GNSS データとして、八重山諸島に設置された12の観測点(図4)において2010年から2013年に得られた水平2成分の時系列を使用した。その際、非線形変換 f_i として6層の Affine Coupling を採用した。解析の流れを図5に示す。また断層モデルとして矩形一枚の一樣すべりを仮定した。上記の条件で、NKF を用いて解析を行い、さらに KF を用いた場合の結果と比較した。

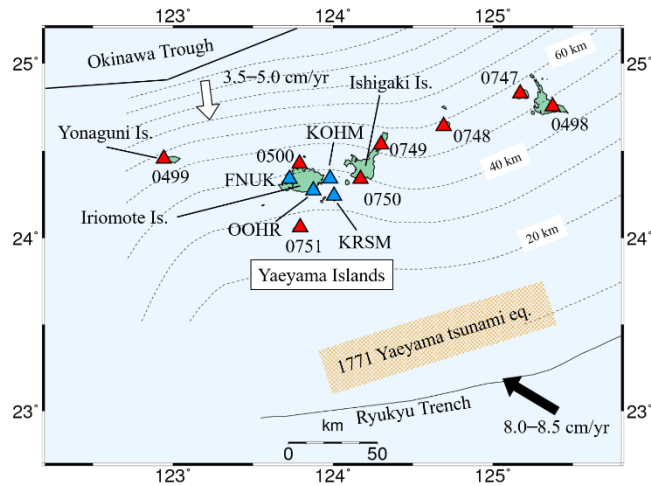


図4. 解析に使用した八重山諸島のGNSS観測点分布⁽⁹⁾より引用)。赤三角が国土地理院GEONETの観測点、青三角が京都大学による観測点を表す。

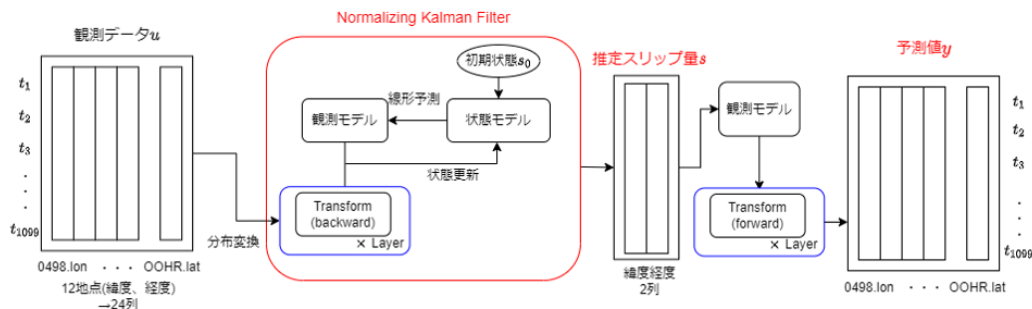


図5. Normalizing Kalman Filter を用いた断層すべり解析の流れ。

図6は12の観測点の水平2成分それぞれに対して、観測値と推定値との残差二乗和(RMSE)を示したものである。いずれの観測点においても、NKFがKFに比べて残差が小さくなっており、観測点に依らず安定した観測時系列の推定値が得られていることを示している。これはNKFにおいて分布変換を与えたことで、観測点ごとのスケールを合致させた予測が得られたことによる。

図7に推定した断層すべりの時系列を示す。既存研究⁽⁹⁾により、解析期間中に5回のSSEが発生していることが確認されており、NKFおよびKFどちらでも5回のSSEに対応する断層すべりが推定された(図7の赤丸印)。どちらの手法においても概ね同様の断層すべりの時系列が得られているが、NKFを用いた場合に、KFと比べて、すべりのばらつきが抑えられ、特に3、5回目のSSEの解像度が向上していることが分かった。

上記のように、機械学習による特徴量変換を用いた手法であるNKFを用いると、単純なKFに比べて観測量の再現の精度が大きく向上し、安定した断層すべりの推定が可能であることが分かった。次年度以降、得られた結果の解釈や今後の課題の整理・拡張の方向性の検討を行う。また、ノイズモデルの高度化による従来の手法を拡張した断層すべり推定のアプローチの検討を行い、NKFを用いるアプローチとの比較を行う。

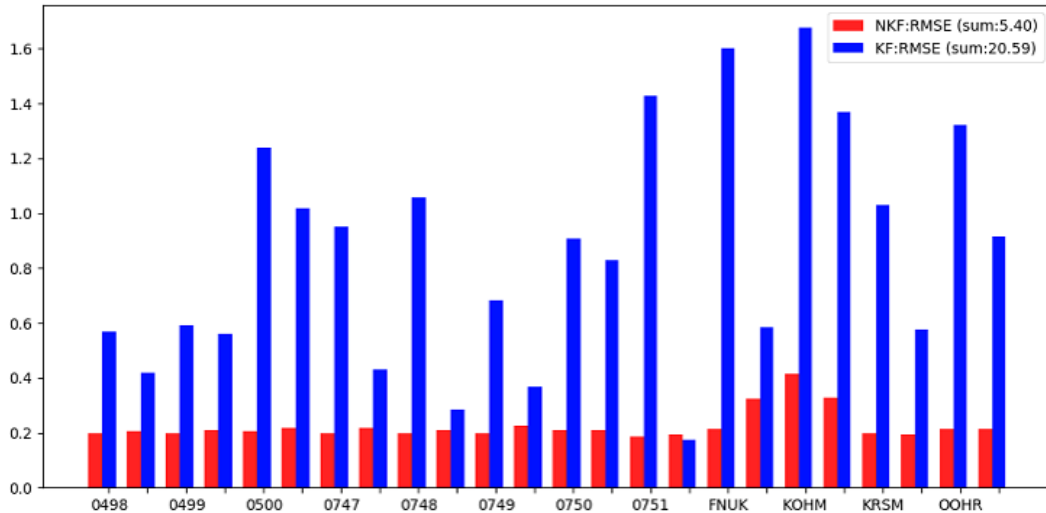


図6. 各 GNSS 観測点における残差二乗和の比較。横軸の数字または文字が観測点名を、赤・青がそれぞれ NKF、KF による結果を表す。

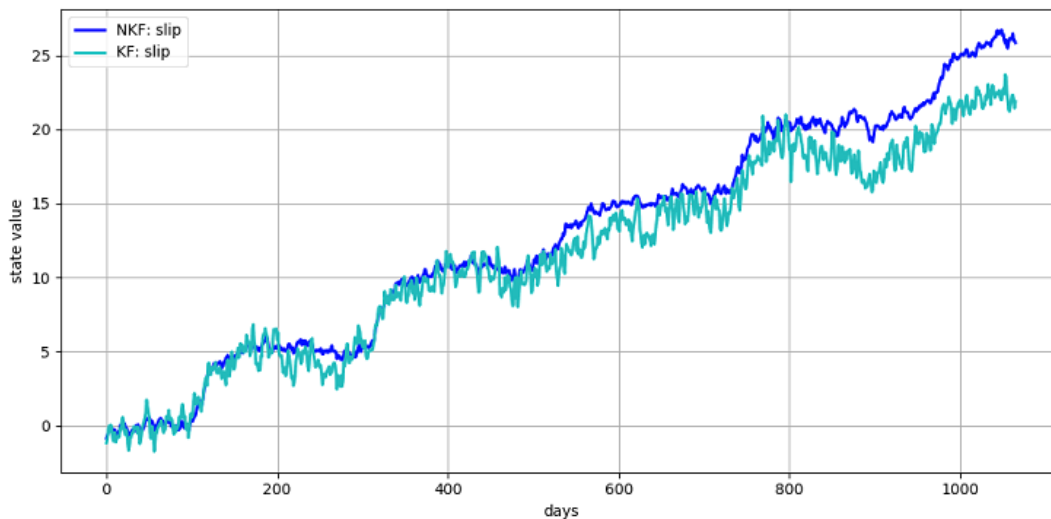


図7. NKF (青線)、KF (緑線) により推定された断層すべりの時系列

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開始した。また、南海トラフ全域への適用に向けた観測データの整備、計算基盤の整理を行った。観測データについては、国土地理院によって整備されている GNSS 観測網 (GEONET) 全観測点と大学が所有する GNSS 観測点で得られた観測データを GIPSY-X ソフトウェアを用いて解析した。得られた観測点座標の時系列について、共有サーバを整備し、課題内でデータの共有を開始した。計算基盤については、フィリピン海プレートのプレート形状や使用可能なグリーン関数ライブラリの調査を行った。これらを踏まえて、今後断層すべりモニタリングで使用する計算設定の検討を行う。

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、プロジェクト全体でビジネスミーティングと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。令和3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を作成し（図8）、同ページにおいて各研究項目で開発したプログラムをオープンソースとして公開するための検討を開始し、一部を公開した。



図8. ウェブサイトのトップページのスクリーンショット。

(c) 結論ならびに今後の課題

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を開発し、四国西部のGNSSデータに適用することで、沈み込み帯で発生するSSEの検出に成功した。今後は解析期間・領域を拡張すると共に、内陸で発生する地殻変動現象の検出に向けた手法の改良や、観測点の空間分布を考慮した手法の高度化、GNSS以外の測地データに適用可能な手法の検討が課題である。

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、機械学習による特徴量変換を用いた手法の検討を行い、八重山諸島のGNSSアレイを用いた初期的な成果を得た。今後は推定された結果の解釈や、課題・拡張の方向性の検討を行う。

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開始し、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に着手し、使用する観測データの整備を行った。

また、月1回程度の勉強会とビジネスミーティングを定期的で開催した。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) 引用文献

- 1) Kim, S., Koh, K., Boyd, S. and Gorinevsky, D.: l₁ Trend Filtering, SIAM Review, problems and techniques section, Vol.51, No.2, pp.339-360, 2009.
- 2) Tibshirani, R. and Taylor, J.: Degrees of freedom in lasso problems, Annals of Statistics, Vol.40 No.2, pp.1198-1232, 2012.
- 3) Nishimura, T., Matsuzawa, T. and Obara, K.: Detection of short-term slow slip events along the Nankai Trough, southwest Japan, using GNSS data, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.118, No.6, pp.3112-3125, 2013.
- 4) Sekine, S., Hirose, H. and Obara, K.: Along-strike variations in short-term slow slip events in the southwest Japan subduction zone, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.115, B9, B00A27, 2010.
- 5) Okada, Y: Internal deformation due to shear and tensile faults in half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992.
- 6) Kato, A. and Nakagawa, S.: Detection of deep low-frequency earthquakes in the Nankai subduction zone over 11 years using a matched filter technique, Earth, Planets and Space, Vol.71, No.128, 2020.
- 7) de Bézenac, E., Rangapuram, S. S., Benidis, K., Bohlke-Schneider, M., Kurle, R., Stella, L. et al. : Normalizing kalman filters for multivariate time series analysis, Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 2995-3007, 2020.
- 8) Segall, P. and Matthews, M.: Time dependent inversion of geodetic data, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.102, B10, pp.22391-22409, 1997.
- 9) Kano, M., Fukuda, J., Miyazaki, S. and Nakamura, M.: Spatiotemporal evolution of recurrent slow slip events along the southern Ryukyu subduction zone, Japan, from 2010 to 2013, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol.123(8), pp.7090-7107, 2018.

(e) 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

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

Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-slipping Fault (ポスター)	Ito, S., M. Kano, H. Nagao	Asia Oceania Geosciences Society 2021	2021年8月	国外
予測分布論の最近の進展 (口頭)	矢野 恵佑	日本数学会 2021年度秋季 総合分科会	2021年9月	国内
擬ベイズ事後分布に基づく予測評価のための情報量規準 (口頭)	矢野 恵佑・伊庭幸人	2021年度統計 関連学会連合 大会	2021年9月	国内
最小情報コンピュータモデルとその拡張 (口頭)	清 智也・矢野 恵佑	2021年度統計 関連学会連合 大会	2021年9月	国内
ノンパラメトリックリンク回帰における漸近分散の共変量依存性 (口頭)	奥野 彰文・矢野 恵佑	2021年度統計 関連学会連合 大会	2021年9月	国内
地震波速度不連続面の検出のためのスパース正則化に基づく地震波トモグラフィ (口頭)	倉田 澄人・山中 遥太・矢野 恵佑・駒木 文保・椎名 高裕・加藤 愛太郎	2021年度統計 関連学会連合 大会	2021年9月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測 (ポスター)	加納 将行・宮崎 真一・石川 洋一・平原 和朗	日本地震学会 2021年度秋季 大会	2021年10月	国内
11トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出 (口頭)	矢野 恵佑・加納 将行	日本地震学会 2021年度秋季 大会	2021年10月	国内
構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出 (口頭)	倉田 澄人・山中 遥太・矢野 恵佑・駒木 文保・椎名 高裕・加藤 愛太郎	日本地震学会 2021年度秋季 大会	2021年10月	国内
2011年東北地方太平洋沖地震後の宮城県沖地震の準備過程 (ポスター)	中田 令子・日野 亮太	日本地震学会 2021年度秋季 大会	2021年10月	国内
MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地	椎名 高裕・加納 将行・倉田 澄人・加藤 愛太郎	日本地震学会 2021年度秋季 大会	2021年10月	国内

震波速度分布の推定（ポスター）				
PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定～2011年東北地方太平洋沖地震の事例～（ポスター）	田中 優介・太田雄策・宮崎 真一	日本地震学会 2021年度秋季大会	2021年10月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測（ポスター）	加納 将行・宮崎真一・石川 洋一・平原 和朗	日本測地学会 第136回講演会	2021年11月	国内
11トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出（口頭）	矢野 恵佑・加納将行	日本測地学会 第136回講演会	2021年11月	国内
2021年8月14日ハイチ地震（Mw7.2）のInSAR解析による地殻変動の特徴（口頭）	福島 洋	日本測地学会 第136回講演会	2021年11月	国内
Using InSAR for evaluating the accuracy of seismically-derived earthquake locations and focal mechanism solutions（口頭）	Ghayournajarkar, N., Y. Fukushima	日本測地学会 第136回講演会	2021年11月	国内
InSAR を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震時における仙台市内の谷埋め盛土での変動検出（口頭）	宮嶋 愛菜・福島洋	日本測地学会 第136回講演会	2021年11月	国内
Mitigation of tropospheric delay noise in InSAR analysis using meso-scale meteorological models: A case study of Japan（口頭）	Sailellah, S., Y. Fukushima	日本測地学会 第136回講演会	2021年11月	国内
Automatic error-term separation approach in InSAR time-series analysis and application to Arima-Takatsuki Fault	Fukushima, Y.	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国外

Zone, western Japan (口頭)				
Using InSAR for Evaluating the Accuracy of Seismically-derived Earthquake Locations and Focal Mechanism Solutions (口頭)	Ghayournajarkar, N., Y. Fukushima	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国外
Complex Fault Rupture Geometry and Slip Distribution of the Mw7.2 Nippes Earthquake, Haiti (口頭)	Rimbault, B., R. Jolivet, E. Calais, Z. Duputel, Y. Fukushima	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国外
Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake (口頭)	Calais, E., S. Symithe, T. Monfret, B. Delouis, A. Lomax, F. Courboux, J.P. Ampuero, P.E. Lara, Q. Bletery, J. Cheze, A. Deschamps, B. de Lepinay, B. Rimbault, R. Jolivet, S. Paul, S. St Fleur, D. Boisson, Y. Fukushima, Z. Duputel, L. Xu, L. Meng	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国外
予測の情報量規準 (口頭)	矢野 恵佑	情報計測オンラインセミナー	2021年12月	国内
On estimating generalization gaps via the functional variance in overparameterized models	Yano, K.	CMStatistics 2021	2021年12月	国外

地殻変動データを用いた沈み込み帯の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究（口頭）	加納 将行	第31回 AI・データ利活用研究会	2022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・外の別名
Potential of megathrust earthquakes along the southern Ryukyu Trench inferred from GNSS data	Kano, M., A. Ikeuchi, T. Nishimura, S. Miyazaki, T. Matsushima	Earth Planets Space	2021年10月	国外
A convolutional neural network-based classification of local earthquakes and tectonic tremors in Sanriku-oki, Japan, using S-net data	Takahashi, H., K. Tateiwa, K. Yano, M. Kano	Earth Planets Space	2021年10月	国外
Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone	Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose	Earth Planets Space	2022年1月	国外
Bayesian-based joint determination of earthquake hypocenters and 1-D velocity structures divided by a structural boundary	Shiina, T., M. Kano	Geophysical Journal International	2022年2月	国外
Using InSAR for evaluating the accuracy of locations and focal mechanism	Ghayournajarkar N., Y. Fukushima	Geophysical Journal International	2022年2月	国外

solutions of local earthquake catalogues				
Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake	Calais, E., S. Symithe, T. Monfret, B. Delouis, A. Lomax, F. Couboulex, J.P. Ampuero, P.E. Lara, Q. Bleter, J. Chèze, A. Deschamps, B. de Lépinay, B. Raimbault, R. Jolivet, S. Paul, S. St Fleur, D. Boisson, Y. Fukushima, Z. Duputel, L. Xu, and L. Meng	Science	2022年3月	国外
Structured regularization based local earthquake tomography for the adaptation to velocity discontinuities	Yamanaka, Y., S. Kurata, K. Yano, F. Komaki, T. Shiina, A. Kato	Earth Planets Space	2022年3月	国外

(f) 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
L1 trend filtering based detection of short-term slow slip events	地殻変動データに対して外れ値処理結果・11トレンドフィルタリング結果・Cp 規準値・検知確からしさを出力する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

プロジェクト初年度である令和3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に着手した。具体的には、短期的な地殻変動現象検出に対するスパース推定手法の開発においては、新たなSSEの検出に成功し、また、NKFを使用した状態空間モデルによる断層すべり推定においては、より正確に断層すべりが把握できる可能性を示した。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。次年度以降も継続して測地データ解析手法の開発の継続を行い、一定の成果を示した手法については今後の拡張の方向性の検討を、開発に着手した手法についてはその性能評価を目指す。併せて研究項目(c)に関しては観測データや計算基盤の整備など、課題実施期間後半に向けて準備が予定通り進展しており、来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) キックオフミーティング

日時：2021年12月13日 9時～13時

場所：オンライン開催

- 議事：1. プロジェクトの趣旨説明
2. 各課題の概要説明
3. 全体討論

- 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1回研究フォーラム

日時：2022年2月19日 9時30分～12時

場所：オンライン開催

- 議事：1. プロジェクト紹介
2. 各課題の概要説明
3. 民間企業の講演

(2) 勉強会

- 2021/7/26 第1回勉強会 (統計数理研究所・矢野恵佑氏)

「ll trend filtering based detection of short-term slow slip events: Application to a GNSS array in southwest Japan」

- 2021/9/24 第2回勉強会 (京都大学・西村卓也氏)
「GNSS の概要と地殻変動研究への応用」
- 2021/10/27 第3回勉強会 (東北大学・福島洋氏)
「InSAR による地殻変動研究」
- 2021/12/7 第4回勉強会 (東京大学・伊東優治氏)
「キネマティック GPS による 1 日以下のサンプリング間隔データを用いた Cascadia スロースリップの時空間発展の推定」
- 2021/12/21 第5回勉強会 (理化学研究所・松田孟留氏)
「時系列データの振動子分解」
- 2022/2/16 ランチミーティング (東北大学・中川亮氏)
「InSAR 及び GNSS を用いた 2018 年豊後水道 SSE の解析」
- 2022/3/10 第6回勉強会 (東北大学・田中優介氏)
「GNSS 搬送波位相変化に基づく断層すべりの時空間発展推定の主要成果と今後」
- 2022/3/30 第7回勉強会
「インバージョン解析で現れる誤差についての考察」 (京都大学・深畑幸俊氏)
「Introduction of covariance components in slip inversion of geodetic data following a non-uniform spatial distribution」 (海洋研究開発機構・縣亮一郎氏)

(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) (その2)
“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”」地震本部ニュース令和3年(2021年)冬号
(<https://www.jishin.go.jp/main/herpnews/2021/win/herpnews2021win.pdf>)
- 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
(<http://www.zisin.gp.tohoku.ac.jp/~stare/index.html>)
- 第31回 AI・データ利活用研究会「地殻変動データを用いた沈み込み帯の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究」
(https://www-mmds.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/structure/activity/ai_data.php?id=33)

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1年目が終了した。1年目は今後の課題遂行に向けた準備期間という位置づけで、勉強会を通じた既存研究の調査や現状の情報共有・各研究項目内での課題についての議論を中心に行ってきた。本課題は全国各地の研究機関が参画しており、新型コロナ感染症の拡大を受け十分に対面で議論ができない中での課題開始となったが、オンラインでの議論を頻繁に増やすことで課題の円滑な実施を試みた。そのような状況下で、スパース推定を用いた地殻変動現象の検出や機械学習を用いた断層すべり推定の課題においては GNSS データの適用を行い、一定の成果が得られつつある。その他の課題においても、次年度からに向けて各課題の具体的な問題設定に関して方向性が定まってきており、次年度以降徐々に成果が得られるだろうと期待している。

本課題では国土地理院による GNSS 観測網 GEONET のデータを使用させていただいた。

様式第21

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
Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-slipping Fault (ポスター)	Ito, S., M. Kano, H. Nagao	Asia Oceania Geosciences Society 2021	2021年8月	国際
予測分布論の最近の進展 (口頭)	矢野 恵佑	日本数学会2021年度秋季総合分科会	2021年9月	国内
擬ベイズ事後分布に基づく予測評価のための情報量規準 (口頭)	矢野 恵佑・伊庭 幸人	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
最小情報コピュラモデルとその拡張 (口頭)	清 智也・矢野 恵佑	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
ノンパラメトリックリンク回帰における漸近分散の共変量依存性 (口頭)	奥野 彰文・矢野 恵佑	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
地震波速度不連続面の検出のためのスパース正則化に基づく地震波トモグラフィ (口頭)	倉田 澄人・山中 遥太・矢野 恵佑・駒木 文保・椎名 高裕・加藤 愛太郎	2021年度統計関連学会連合大会	2021年9月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測 (ポスター)	加納 将行・宮崎 真一・石川 洋一・平原 和朗	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
11トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出 (口頭)	矢野 恵佑・加納 将行	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
構造正則化を応用した地震波トモグラフィ法による速度不連続面の検出 (口頭)	倉田 澄人・山中 遥太・矢野 恵佑・駒木 文保・椎名 高裕・加藤 愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
2011年東北地方太平洋沖地震後の宮城県沖地震の準備過程 (ポスター)	中田 令子・日野 亮太	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内

MCMC法を用いた2004年新潟県中越地震震源域周辺の地震波速度分布の推定 (ポスター)	椎名 高裕・加納 将行・倉田 澄人・加藤 愛太郎	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
PTS解析による地震時の動的な破壊過程から初期余効すべりまでの連続的な推定 ～2011年東北地方太平洋沖地震の事例～ (ポスター)	田中 優介・太田 雄策・宮崎 真一	日本地震学会2021年度秋季大会	2021年10月	国内
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測 (ポスター)	加納 将行・宮崎 真一・石川 洋一・平原 和朗	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
11トレンドフィルタリングによる西南日本GNSSアレイからの短期スロースリップ現象の検出 (口頭)	矢野 恵佑・加納 将行	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
2021年8月14日ハイチ地震 (Mw7.2) のInSAR解析による地殻変動の特徴 (口頭)	福島 洋	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
Using InSAR for evaluating the accuracy of seismically-derived earthquake locations and focal mechanism solutions (口頭)	Ghayournajarkar, N., Y. Fukushima	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
InSAR を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震時における仙台市内の谷埋め盛土での変動検出 (口頭)	宮嶋 愛菜・福島 洋	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
Mitigation of tropospheric delay noise in InSAR analysis using meso-scale meteorological models: A case study of Japan (口頭)	Sailellah, S., Y. Fukushima	日本測地学会第136回講演会	2021年11月	国内
Automatic error-term separation approach in InSAR time-series analysis and application to Arima-Takatsuki Fault Zone, western Japan (口頭)	Fukushima, Y.	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国際

Using InSAR for Evaluating the Accuracy of Seismically-derived Earthquake Locations and Focal Mechanism Solutions (口頭)	Ghayournajarkar, N., Y. Fukushima	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国際
Complex Fault Rupture Geometry and Slip Distribution of the Mw7.2 Nippes Earthquake, Haiti (口頭)	Raimbault, B., R. Jolivet, E. Calais, Z. Duputel, Y. Fukushima	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国際
Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake (口頭)	Calais, E., S. Symithe, T. Monfret, B. Delouis, A. Lomax, F. Courboux, J.P. Ampuero, P.E. Lara, Q. Bletery, J. Cheze, A. Deschamps, B. de Lepinay, B. Raimbault, R. Jolivet, S. Paul, S. St Fleur, D. Boisson, Y. Fukushima, Z. Duputel, L. Xu, L. Meng	American Geophysical Union Fall Meeting 2021	2021年12月	国際
予測の情報量規準 (口頭)	矢野 恵佑	情報計測オンラインセミナー	2021年12月	国内
On estimating generalization gaps via the functional variance in overparameterized models	Yano, K.	CMStatistics 2021	2021年12月	国際
地殻変動データを用いた沈み込み帯の断層すべりの現状把握・短期推移予測に資するデータ同化研究 (口頭)	加納 将行	第31回 AI・データ活用研究会	2022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
Potential of megathrust earthquakes along the southern Ryukyu Trench inferred from GNSS data	Kano, M., A. Ikeuchi, T. Nishimura, S. Miyazaki, T. Matsushima	Earth Planets Space	2021	国際
A convolutional neural network-based classification of local	Takahashi, H., K. Tateiwa, K. Yano, M. Kano	Earth Planets Space	2021	国際

earthquakes and tectonic tremors in Sanriku-oki, Japan, using S-net data				
南海トラフ地震情報を使った防災対応上の潜在的課題群の抽出法の開発	大谷 竜・兵藤 守・林能成・橋本 学・堀 高峰・川端 信正・隈本 邦彦・岩田 孝仁・横田 崇・谷原 和憲・入江 さやか・福島 洋	日本地震工学会論文集	2021	国内
Citizen seismology helps decipher the 2021 Haiti earthquake	Calais, E., S. Symithe, T. Monfret, B. Delouis, A. Lomax, F. Courboux, J.P. Ampuero, P.E. Lara, Q. Bletery, J. Chèze, A. Deschamps, B. de Lépinay, B. Rimbault, R. Jolivet, S. Paul, S. St Fleur, D. Boisson, Y. Fukushima, Z. Duputel, L. Xu, and L. Meng	Science	2022	国際
Bayesian-based joint determination of earthquake hypocenters and 1-D velocity structures divided by a structural boundary	Shiina, T., M. Kano	Geophysical Journal International	2022	国際
Using InSAR for evaluating the accuracy of locations and focal mechanism solutions of local earthquake catalogues	Ghayournajarkar N., Y. Fukushima	Geophysical Journal International	2022	国際
Development of a detection method for short-term slow slip events using GNSS data and its application to the Nankai subduction zone	Okada, Y., T. Nishimura, T. Tabei, T. Matsushima, H. Hirose	Earth Planets Space	2022	国際
Structured regularization based local earthquake tomography for the adaptation to velocity discontinuities	Yamanaka, Y., S. Kurata, K. Yano, F. Komaki, T. Shiina, A. Kato	Earth Planets Space	2022	国際

(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。