

(1) 実施機関名：

京都大学理学研究科

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）地震サイクルにおける断層すべりのモデリングにおけるデータ同化研究

（英文）Data assimilation study on the fault slip during earthquake cycles

(3) 関連の深い建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) 地震発生確率の時間更新予測

ア. 地震発生の物理モデルに基づく予測と検証

(4) その他関連する建議の項目：

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

5 分野横断で取り組む地震・火山噴火に関する総合的研究

(1) 南海トラフ沿いの巨大地震

(5) 令和5年度までの関連する研究成果（または観測実績）の概要：

地表面で観測されたGNSSによる地殻変動データから、直接プレート境界面の摩擦特性を推定し、断層すべりの推移予測するデータ同化手法開発を行った。地震発生域深部で発生する長期的スロースリップ(L-SSE)を対象に、アンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)に基づくデータ同化手法を開発した。速度状態依存摩擦則に従う孤立した一様円形パッチを仮定したL-SSEモデルを構築し、これを用いた数値実験においてEnKFの有効性を示した(Hirahara & Nishikiori, 2019)。実際に豊後水道L-SSEを対象として2009-2011年のGNSS地表観測データへ適用し(藤田, 2019)、1回のL-SSE発生を含む観測を概ね説明可能なモデルを得ることに成功した。同化の実現には初期アンサンブルの適切な設定が重要であることを示し、更に、L-SSE発生期間中において、そのイベントの終了時期といった数か月程度の短期的な予測の可能性を示した。

また準周期的な繰り返しイベント毎のすべり分布の変化など観測されるL-SSEの複雑性を再現し、より良いすべり予測を得るために、対象領域を日向灘沖～四国沖の複数L-SSEセグメントへと広げたモデルによる同化を目指した。前述の通り同化の実現には初期アンサンブルを適切に設定する必要があるが、このように広い領域でのL-SSEのセグメント化メカニズムは必ずしも明らかになっておらず、まずメカニズムの理解を進める必要があった。大畠(2023)は摩擦特性や断層面形状の走向方向の不均質がなくとも、走向方向に長い断層ではすべりの発達に伴い応力不均質自己組織化され、L-SSEのセグメント化・L-SSEの伝播が起こることを数値計算により見出した。一定速度载荷の下でL-SSEの発生場所は固定され、その領域サイズは主に断層幅と摩擦特性に依存する臨界角形成サイズとの比で決まる。ただし近隣の地震発生領域の固着の強さや、地震発生等による大きな応力擾乱によってL-SSE発生場所・サイズ・発生間隔が変化する様子も数値実験で観察された。

アジョイント法については、プログラムの整備により計算時間を短縮し、2003年十勝沖地震の余効すべり時に得られたGNSSデータに適用した。地震後15日間に得られた1日ごとのGNSSデータの同化により摩擦特性の空間分布を推定し、得られた摩擦特性により、その後15日間の地殻変動の予測を行い、観測されたGNSS時系列が再現可能であることを検証した(Kano et al. 2020)。さらに、より正確な余効変動の現状把握と推移予測に向けて、地震発生直後の高時間分解能な地殻変動データが重要であることから、データ処理として高サンプリングのGNSSデータをItoh et al. (2021)の手法に基づ

いて前処理し、地震後5日間の6時間間隔の変位時系列データを得た。このデータに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC）を用いて摩擦特性の空間分布を推定した。得られた摩擦特性の空間分布で観測変位の時系列データは説明可能であるが、このためには摩擦特性が空間的に不均質である必要があることが分かった。また、2010年に豊後水道で発生した長期的SSEのGNSSデータにMCMCを適用し、地殻変動データの再現とSSEの短期推移予測を計算した。その結果、SSEが発生するという摩擦特性の事前情報の有無によって、予測される断層すべりの様式が大きく異なることが分かった。

さらに、データ同化と異なるアプローチとして物理深層学習（PINN）による手法を検討した。ばねブロックモデルを用いて模擬されるSSEを対象に、PINNが断層すべりの数値計算、摩擦特性の推定、断層すべりの短期推移予測に有効であることを確認した。今後、より現実的な問題設定への拡張を通してデータ同化による結果との比較が期待される。

(6) 本課題の5か年の到達目標：

本課題では、物理モデルによる地震発生予測のプロトタイプの完成を目指している。具体的には以下の通り。

A. 豊後水道と琉球における現実的なプレート形状を用いたSSEデータ同化

- (a) 豊後水道および琉球海溝を対象とし、現実的なプレート形状のモデルを用いて、SSEデータ同化システムを構築する。データ同化手法により得手・不得手があるので、アジョイント法とアンサンブルカルマンフィルターの2つの手法で同化システムを構築する。ある程度できているので、早期に完成を目指す。
- (b) (a)で開発したモデルを用いて双子実験を行い、摩擦パラメータの推定を行う。また、摩擦パラメータと物理量の初期値の同時推定を試行する。
- (c) プレート境界にSSE発生域に加えて固着域がある場合に対して(b)と同様の実験を行う。
- (d) 実データを用いた同化実験を行い、SSE発生、および、固着域の固着状態の時間発展の予測可能性を評価する。
- (e) (a)~(d)と並行して、八重山地域における独自のGNSS観測を継続する。

B. 粘弾性応答関数の取り込みを実装する。

C. Physics Informed Neural Network による摩擦パラメータの推定手法を開発する。データ同化システムでの利用を試行する。

(7) 本課題の5か年計画の概要：

物理法則に基づいた断層すべりの予測を目指し、日向灘沖~四国沖の複数セグメントで発生するSSEを対象としたEnKFデータ同化を実施する。これまでの研究で、走向方向に長い断層上での自発的な応力不均質の形成というこれまで見過ごされていたSSEのセグメント化メカニズムが見出されたが、実際のSSE発生域においては、さらに断層面形状や周囲の断層面固着状態の時空間不均質などを考慮する必要がある。令和6・7年度は、これらを考慮したシミュレーションにより各要素がどのように実際のSSEの挙動、セグメント化を支配するのかを明らかにする。令和8・9年度には、その結果を踏まえて、EnKFを用いたデータ同化の実現に重要となる初期アンサンブルの設定を行い、実際の観測データに対してデータ同化を実施する。令和10年度は、データ同化の実施により構築した数値モデルの現状のデータ再現能力と予測能力を評価する。

また物理深層学習（PINN）を用いた摩擦特性推定・断層すべり予測手法を、実際のSSEに適用する。令和6年度は物理深層学習（PINN）を用いた摩擦特性推定・断層すべり予測手法を2次元断層モデルに拡張し、より現実的な問題設定におけるPINNの有効性を検証する。令和7年度は、現実的なプレート形状を導入し、データ同化による摩擦特性推定・断層すべり予測に関する数値実験を行う。平面形状の場合の結果と比較を行う。この結果に基づき、令和8年度に実観測データへの適用により摩擦特性の推定を行う。また令和9年度には得られた摩擦特性により次のSSEの発生やSSEの時空間発展の断層すべりの予測の試行を試みる。令和10年度は、より現実的に、運動学的に固着域を置いたときの過去の断層すべり状態の推定および将来予測の試行を行う。上記をデータ同化とPINNを用いた手法で検証する。

また巨大地震後の余効変動に対するデータ同化適用において、粘弾性変形・余効すべりを考慮した同化手法開発および数値モデルの改良を行う。令和6・7年度はEnKF及びアジョイント法の適用・非線形数値モデルに対する両者の性能を比較する。東北地方太平洋沖地震後の余効変動等実際の問題に適用する。令和8年度からは、剛性率の不均質構造を考慮できるよう数値モデルの改良を行い、変形やすべりの推定・推移予測の向上を図る。

(8) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

宮崎真一（京都大学理学研究科）,大谷真紀子（京都大学理学研究科）

他機関との共同研究の有無：有

加納将行（東北大学理学研究科）,研究協力者：岩田貴樹（広島県立大学）,研究協力者：平原和朗（香川大学）,スタンフォード大学,統計数理研究所

(9) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等：京都大学理学研究科

電話：

e-mail：

URL：

(10) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：宮崎真一

所属：京都大学理学研究科