

## 20 年間の高時間分解能 GNSS データに基づく東海地方の 長期及び短期スロースリップの時空間発展に関する研究

坂上啓

### 1. はじめに

1990 年代以降、世界各地の海洋プレート沈み込み帯における巨大地震の発生域周辺では、全地球的航法衛星システム (Global Navigation Satellite Systems; GNSS) を用いてスロースリップイベント (SSE) と呼ばれる非地震性の断層すべりが観測されている。本研究の対象領域である東海地方は南海トラフ沈み込み帯の東端に位置し、駿河―南海トラフからフィリピン海プレートが大陸のプレートの下に沈み込んでいる。他の地域と同様に、東海地方で発生する SSE は大地震発生領域よりも深い側で発生しており、GNSS 観測開始以降、2000 年頃から 2005 年頃と 2013 年頃から 2015 年頃の期間に観測されている。これらの SSE はすべりの継続時間の長さから長期的 SSE と呼ばれている一方、東海地方では短期的 SSE 呼ばれるすべりの継続期間が数日から 1 か月ほどの SSE も数か月から 1 年程の間隔で繰り返し発生していることが傾斜計と歪計を用いて観測されている。先行研究によってこれらの SSE のすべりの規模や時空間発展が調査されてきたが、長期的 SSE と短期的 SSE は別々に解析されてきた。また、2 つの長期的 SSE についてもそれぞれ期間を分けて解析が行われており、長期的 SSE の非発生時期は解析が行われていない。2 つの長期的 SSE のすべり域や時空間発展、規模の違いなどは報告されているが、2 つの長期的 SSE の規模やすべり域の違いが生じたメカニズムなどの議論はほとんど行われていない。

本研究では、国土地理院の GEONET に加えて GPS 大学連合 (JUNCO) の独自データも含めた稠密 GNSS 観測網のデータを用いて、東海地方のプレート間すべりに伴う地殻変動を抽出し、Network Inversion Filter (NIF) と呼ばれる時間発展インバージョンの手法を用いて 1997 年から 21 年間のすべりの時空間発展を推定した。NIF は東海地方長期的 SSE の先行研究でも使用されているが、本研究ではすべりの時間発展が過度に平滑化されるという従来の NIF の課題を解決し、時間解像度が向上した改良型 NIF を解析に使用した。NIF および改良型 NIF ではすべりやすべり速度の時間発展の推定に特定の関数形式を仮定しないため、多様なすべりの時間発展の推定が可能であり、長期と短期の SSE だけでなく 21 年間の固着の変化についても明らかになることが期待される。得られた結果から 2 回の長期的 SSE の規模やすべり域の違い、短期的 SSE やプレート間すべりの収支との関係について議論を行った。

### 2. GNSS データ解析

本研究では GNSS のデータ解析ソフトウェア GIPSY-OASIS II (version 6.1.1) を用いて GEONET と JUNCO の GNSS データを独自に統合解析し日座標値を推定した。得られた GNSS 時系列には SSE によ

る地殻変動に加えて、定常的なプレート運動、解析地域周辺で発生した地震や火山活動に起因する地殻変動と年周・半年周成分やアンテナ交換等の人為的なオフセット等が系統的なノイズとして含まれる。これらの地殻変動や系統的なノイズを無視して SSE のすべりの時空間発展を推定するスリップインバージョンを行うと推定結果に大きく影響すると考えられる。本研究では、スリップインバージョンの前処理として SSE 以外の地殻変動と系統的なノイズを補正し、1997 年から 21 年間の GNSS 時系列データを用いてフィリピン海プレート境界面上でのすべりの時空間発展の推定を行った。

### 3. インバージョン解析手法

インバージョン解析に使用した NIF は断層面でのすべりの時空間発展と GNSS 時系列に見られるノイズをカルマンフィルタを用いて定式化し、同時に推定する手法である。従来の NIF はすべりの時間発展の平滑化パラメタを解析期間全体を通して一定として解析を行うのに対して、改良型の NIF は平滑化パラメタを時間可変としてすべりの時間発展を推定することですべりの時間発展の解像度が向上した。

### 4. 東海地方のプレート間すべりモデル

インバージョン解析では 1999 年以前に観測が開始された GEONET の観測点 143 点の GNSS データを使用した。2000 年以降に設置された GEONET および JUNCO の観測点のデータを用いたインバージョン解析も実施したが、結果に解析期間中に観測点が増加したことが原因と思われる不自然なすべりが見受けられたため、本論文では 143 点のみを用いた結果について記す。

プレート間すべりの断層はフィリピン海プレート上面を仮定し、三角形要素を用いてプレート境界面の曲面を再現することでより現実的なプレート形状を再現した。グリーン関数は均質・等方半無限弾性媒質を仮定し、各三角形要素の一樣すべりによる地表変位を計算した。すべりの向きはアムールプレートに対して沈み込むフィリピン海プレートの収束方向に固定し、非負の拘束はせずすべりを推定した。すべり分布は空間基底関数を用いて表現した。空間基底関数の数  $M$  は、すべりの空間分布の平滑化の強さを規定し、 $M$  以外にも結果に影響するパラメタが複数存在する。解析に用いる各パラメタは次章で決定した。

### 5. すべりモデルのパラメタに関する検討

実観測時系列と長期的 SSE と短期的 SSE を模した人工データを用いて、改良型 NIF に用いる最適なパラメタを決定した。人工データを用いたすべりの再現性テストでは、陸域のすべり分布は概ね再現できたが、観測点が存在しない沖合では強く平滑化され解像度が低かった。すべりの時間発展は長期的 SSE と短期的 SSE とともに解析期間全体のモーメントの時間発展は概ね再現できたが、SSE を仮定した期間の前後 0.2-0.3 年ほどの期間に推定誤差 ( $1\sigma$ ) 以下ではあるがすべり速度が染み出す期間が見られた。改良型 NIF を解析に用いることで、 $M_w$  6.1 に相当する短期的 SSE の急激なすべりの加速を推定することが可能になったことが確認された。同じテストデータに対して従来の NIF を用いて解析を行うと、解析期間

全体を通して推定されたすべり分布とモーメント量は改良型 NIF と概ね同程度再現性があった。しかし、時間発展は強く平滑化され、特に短期的 SSE の期間にすべり速度の急激な加速は推定できなかった。

## 6. 結果

本研究で得られた 1 日毎にすべりとすべり速度の分布から、2000 年以降、浜名湖周辺で正のすべりが推定され、特にすべり量が大きかった浜名湖西側に位置する深さ 20-25 km の領域（以降、浅部領域）と浜名湖北側に位置する深さおよそ 30 km に位置する領域（以降、深部領域）でのすべりの履歴を参考に、すべりの傾向が変化した数か月から数年の時間幅の期間に区切り、すべりの時空間発展を調べた。

2000 年 9 月から 2001 年 9 月におよそ 5.7 cm のすべりが浅部領域で推定され、その後 2002 年 9 月にかけて深部領域へおよそ 30 km すべり域が移動する時間発展が推定された。その後、2011 年 3 月までの期間に推定されたすべりの中心の位置は概ね似たような位置に推定された。2002 年 9 月から 2005 年 12 月に推定されたすべりは平均 4.0-8.0 cm/yr で、すべりの履歴から直線的な時間発展ではなく断続的に加速と減速の繰り返すようなゆらぎがみられた。2005 年 12 月から 2011 年 3 月の期間に推定されたすべりは小さく、平均 1.4 cm/yr で緩やかにすべりの増加が継続していた。一方で、浅部領域ではすべりの増加がほとんど停止していたことが、すべりの履歴から示された。2011 年 3 月から 2013 年 1 月の期間には浅部・深部領域ともに有意なすべりは推定されなかったが、2013 年 1 月から 2015 年 9 月の期間に浅部領域でおよそ 5.5 cm のすべりが推定された。

1 か月ほどすべり速度が加速するような特徴的なすべり速度の時間変化も推定された。2006 年 1 月 9 日から 26 日の期間に 10-40 cm/yr のすべり速度が推定され、すべりの中心が志摩半島—伊勢湾—浜名湖北側にかけての深さおよそ 30 km の領域を北東方向におよそ 110 km 移動する時空間発展が推定された。この期間には LFT と LFE の活発な活動が観測されており、LFE と LFT の震央の位置は北東方向へと移動を示し、推定されたすべりの移動と概ね一致した。同様に 2 週間ほどの期間に速度が 20 cm/yr を超え、最大すべり速度が 30-40 cm/yr に達し、すべりの中心が志摩半島から浜名湖北側へと移動する時空間発展は 2014 年 1 月と 2017 年 11 月にも推定された。

## 7. 議論

推定されたすべりから計算される地表変位と観測された地殻変動を比較し、21 年間に推定されたすべりの時空間発展の妥当性について検討した。また、2000 年頃から 2005 年頃と 2013 年頃から 2015 年頃に推定されたすべりの時空間発展は東海地方長期的 SSE の先行研究と概ね調和的であった。

2006 年 1 月に推定されたすべり速度の時空間発展について、傾斜計のデータから推定された短期的 SSE の先行研究の結果と比較し、解放モーメント量やすべり分布、発生時期など大まかな時空間発展が一致することが確認された。また、同時に推定された長期的 SSE と短期的 SSE のすべりの中心が重ならないことが確認された。これまで GNSS 時系列から  $M_w$  6 前後の SSE のすべり速度の時空間発展を 1 日毎に推定した先行研究は世界的に見てもほとんどなく、改良型 NIF を解析に用いたことによってもたらされ

た画期的な成果である。しかし、推定されたすべり速度を定量的な議論に用いることは難しいことがすべりの再現性のテストで確認されている。

推定された 21 年間のすべりの履歴からデトレンド期間のバックスリップ速度を差し引いてプレート境界での歪みの蓄積・解放の収支について検討を行った。2000 年 9 月から 2005 年 12 月の期間に浅部領域と深部領域では推定されたすべり（以降、2000 年の長期的 SSE）は歪みを解放するすべりであった。2005 年 12 月から 2013 年 1 月の期間に浅部領域では 2000 年 9 月以前の固着の状態に戻っていたが、深部領域では 2000 年 9 月以前の固着の状態に戻らなかった。2013 年 1 月から 2015 年 9 月の期間に浅部領域ではプレート収束速度と同程度の速度ですべり、ほとんど歪みを蓄積・解放していなかったと考えられる。そして、深部領域ではほとんど歪みを解放せず、緩やかに歪みを蓄積していたと考えられる（以降、2013 年の長期的 SSE）。2000 年の長期的 SSE は浅部領域ですべりが開始し、深部領域へとすべり域が移動・拡大し、両方の領域で歪みを解放する長期的 SSE であったが、2013 年の長期的 SSE はすべり域が浅部領域に限られ、ほとんど歪みを蓄積・解放しない長期的 SSE であった。

2000 年の長期的 SSE 発生前の 1997 年 1 月から 2000 年 9 月の期間に浅部領域と深部領域ではプレート間固着により歪みを蓄積し、2000 年の長期的 SSE は浅部領域と深部領域で歪みを解放した。2013 年の長期的 SSE のすべり域は 2000 年の長期的 SSE の終息後から 2013 年の長期的 SSE の開始前の期間にひずみが蓄積されていた浅部領域に限られた。この期間に歪みがほとんど蓄積されていなかったことが、すべりが深部領域へ移動・拡大しなかった原因として考えられる。また、ひずみが十分に蓄積されなかったことが、2013 年の長期的 SSE の規模が小さく、すべり速度がバックスリップ速度を十分に超えなかった原因として考えられる。上記のことから、長期的 SSE の発生期間と非発生期間のプレート収束速度を基準としたすべり量の履歴（歪みの収支）を詳しく調べることで、今後発生する SSE の規模や発生領域の予測につながる可能性が示唆された。

## 8. 結論

1997 年から 21 年間の東海地方におけるプレート間すべりの時空間発展を推定し、長期的 SSE だけでなく短期的 SSE のすべりの時空間発展も詳細に推定した。長期的 SSE と短期的 SSE のすべりの中心が重ならないことが確認された。先行研究では、長期的 SSE が発生していない期間のプレート間すべりの解析はほとんど行われていなかったが、長期的 SSE の非発生時期を含む 21 年間のすべりの履歴を推定し、プレート収束速度を基準としたすべり量の履歴を詳しく調べることで、今後発生する SSE の規模や発生領域の予測につながる可能性が示唆された。しかしながら、この 21 年間に発生した長期的 SSE は 2 回に限られる。今後、東海地方では再び長期的 SSE が発生することが予想されており、南海トラフ沈み込み帯や世界各地の沈み込み帯でも長期的 SSE が繰り返し観測されている。これらの長期的 SSE の規模や発生領域とすべりの収支に関係があるかどうかを調査することで、今回解析した 2 回の長期的 SSE に限られた現象であるのか、東海地方長期的 SSE に見られる性質なのか、あるいは世界各地で観測される長期的 SSE に共通する性質であるのかという重要な課題が解決するだろう。