

海溝型巨大地震サイクル後半における東北日本前弧域の沈降メカニズム  
 Mechanism of interseismic subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a  
 gigantic earthquake cycle

○篠島 僚平・芝崎 文一郎・岩森 光・西村 卓也・中井 仁彦

○Ryohei SASAJIMA, Bunichiro SHIBAZAKI, Hikaru IWAMORI, Takuya NISHIMURA, Yoshihiko NAKAI

The forearc in Northeast Japan subsided at rates of 3–4 mm/year in the interseismic ~100 years before the 2011 Tohoku earthquake ( $M_w$ 9.1). This study attempts to understand the mechanism of the vertical displacement of the forearc during gigantic earthquake cycles via numerical modeling. The results suggest that the interseismic subsidence rate in the forearc increases with the duration of the locking of the asperity of the gigantic earthquake, due to the increasing slip deficit rate on the deeper parts of the plate interface. The increasing slip deficit rate is caused by both the decreasing the shear stress in the shear zone owing to the continuous locking of the asperity and the increasing the mobility of the continental lithosphere owing to the viscoelastic relaxation in the mantle wedge.

## 1. はじめに

牡鹿半島を中心とした東北日本前弧域は、2011年東北沖地震( $M_w$ 9.1)以前約100年間に渡り3–4 mm/yearの速度で沈降しており、東北沖地震時にも大きく沈降したが、地震後は急速に隆起をしている。なぜ地震間に前弧域が沈降をしていたのかについて、これまで二つの異なるモデルが提唱されていた。一つは、半無限弾性体を仮定したモデルで、プレート境界の非常に深部(深さ100 km)に及ぶすべり遅れによって引き起こされていたというモデル(e.g., Suwa *et al.*, 2006; Ikeda, 2014; Nishimura, 2014)。もう一つは、弾性-粘弾性の水平成層構造を仮定したモデルで、その場合深部のすべり遅れは必要なく浅部のすべり遅れだけで前弧域の沈降を説明できるとされた(Sagiya, 2015; Hashima and Sato, 2017)。このように本問題においては、仮定したレオロジー構造によって結果が大きく異なる、という問題があった。よって、東北沖地震前の前弧域の沈降メカニズムを明らかにするためには、可能な限り現実的なレオロジー構造を用いたモデリングが不可欠である。そのメカニズムを明らかにする事は、 $M_w$ 9クラスの海溝型巨大地震に伴う地震間の地殻変動の理解につながり、海溝型巨大地震のリスク評価、特に同様に前弧域の沈降が続いている北海道東部の沖合の海溝型巨大地震についての理解を深める上で重要である。

本研究では、有限要素法を用いて詳細な不均質

レオロジー構造を考慮したプレート間固着及び巨大地震に伴う地殻変動のシミュレーションを行うことにより、巨大地震サイクルを通じた東北日本の上下変動、特に巨大地震前100年間の前弧域の沈降メカニズムの解明を試みた。

## 2. 手法

本研究では、有限要素法を用いて東北沖の巨大地震サイクルを通じた島弧-海溝系の二次元の変形場のシミュレーションを行なった。可能な限り現実的なレオロジー構造を考慮するため、マンテル対流のシミュレーション結果(Horiuchi and Iwamori, 2016)等に基づく温度構造とマンテルの含水量分布、そして圧力と地震間の平均歪み速度を、岩石流動実験に基づく鉱物の粘性流動則に代入する事で、不均質レオロジー構造(粘性率分布)を構築した。また、プレート境界の浅部アスペリティ(東北沖地震時大滑り域)・プレート境界クリープ域・深部の粘性せん断帯の区分を考慮し、プレート境界クリープ域は薄い低粘性層をプレート境界に沿って配置する事で自由にすべれるようにして安定摩擦すべりを近似的に表現した。粘性せん断帯の粘性率は、観測に合うように調整を行い、これが実質唯一のコントロールパラメータである。以上のモデルにより、東北沖巨大地震サイクル(1サイクルは600年(Sawai *et al.*, 2015))を通じたプレート間固着及び巨大地震に伴う地殻変動のシミュレーションを行なった。

### 3. 結果・議論

モデル結果では、巨大地震サイクル中盤～後半にかけて前弧域の沈降速度が増加していく事が示された。これは、プレート境界深部のすべり遅れ速度が浅部アスペリティの固着継続時間と共に増加していったためである。

続いて、なぜプレート境界深部のすべり遅れ速度が浅部アスペリティの固着継続時間と共に増加していったのかを調べるため、複数の特殊なレオロジー構造の元でシミュレーションを行い、マントルの粘弾性緩和や粘性せん断帯の個々の影響を調べた。その結果、この現象は以下の2つの影響: (1) マントルウェッジで粘弾性緩和が進行する事で陸側プレートが薄い板のようになって引きずり込まれ易くなる効果、(2) 浅部アスペリティの固着が深部プレート境界に及ぼすすべり遅れが粘性せん断帯へ進展する効果、によって引き起こされている事が分かった。

以上の結果は、2011年東北沖地震前約100年間に渡り観測されていた東北日本前弧域の沈降は、東北沖地震の浅部大滑り域(>50 m)のアスペリティが数百年に渡り固着を継続した結果生じた現象を見ていた可能性が高い事を示唆している。

また、モデル結果では巨大地震後数十年～数百年をかけて前弧域が大きく隆起をする事を示した(1-1.5 m/50年)。これは主に、マントルウェッジ及びプレート境界深部の粘性せん断帯における粘弾性緩和とそれに律速される時定数の長い余効すべりによって生じたものである。これとよく似た現象が、北海道東部沿岸における地質学的海岸隆起史研究によって見つかっており、17世紀初頭に発生した $M_w$ 9クラスの海溝型巨大地震後、約60年をかけて沿岸域が1.5 m隆起をした事が明らかになっている(Sawai *et al.*, 2004)。以上の事から、東北日本前弧域でも同様に時定数の長い大きな地震後隆起が生じる事が予想される。

そして、その北海道東部の前弧域は、東北沖地震前の東北日本前弧域と同様に、過去60年以上に渡る速い沈降が観測されている(e.g., Suwa *et al.*, 2006)。本研究結果と上述の17世紀の現象から、その沈降は北海道東方沖で17世紀初頭に発生した $M_w$ 9クラスの海溝型巨大地震のアスペリティが約400年に渡り固着を継続しているために生じている現象である事を示唆している。この事から、

そのアスペリティには現時点で30-35 mのすべり遅れが蓄積されていると考えられる。

### 4. 結論

・年代の古い沈み込み帯において、海溝型巨大地震のアスペリティの固着が数百年に及ぶと、マントルウェッジと粘性せん断帯における粘弾性緩和によりプレート境界深部のすべり遅れ速度が増加し、直上の沈降速度の増加を引き起こす。

・2011年東北沖地震前約100年間に渡り観測されていた東北日本前弧域の沈降は、東北沖地震の浅部大滑り域のアスペリティが数百年に渡り固着を継続した結果生じた現象を見ていた可能性が高い。

・北海道東部の前弧域も東北と同様に地震間に沈降を続けており、それは17世紀初頭に発生した海溝型巨大地震のアスペリティが約400年に渡り固着を続けている結果生じている沈降の可能性が高く、そのアスペリティには現時点で30-35 mのすべり遅れが蓄積されていると考えられる。

### 5. 引用文献

- Hashima, A. and Sato, T. (2017) *Earth Planets Space* 69(1), 23.
- Horiuchi, S. and Iwamori, H. (2016) *J. Geophys. Res. Solid Earth* 121(5), 3238-3260.
- Ikeda, Y. (2014) *Episodes* 37(4), 234-245.
- Nishimura, T. (2014) *J. Disaster Res.* 9(3), 294-302.
- Sagiya, T. (2015) *Int. Assoc. Geod. Symp.* 145, 73-78.
- Sawai, Y. *et al.* (2004) *Science* 306, 1918-1920.
- Sawai, Y. *et al.*, (2015) *Geophys. Res. Lett.* 42(12), 4795-4800.
- Suwa, Y. *et al.* (2006) *J. Geophys. Res.* 111(B4), B04402.

### 6. 謝辞

東北大学の岡田知己准教授には内陸地震の再決定震源分布を提供して頂きました。JAMSTECの飯沼卓史研究員には2011年東北沖地震のすべり分布を提供して頂きました。本研究はMEXT科研費26109007, 26109006の助成を受けています。ここに深く感謝を記したいと思います。