

粘弾性緩和と上盤の変形しやすさの不均質分布を考慮した
千島沈み込み帯南部のプレート境界の固着分布のモデル化

Megathrust locking modeling in the southern Kurile subduction zone
considering viscoelastic relaxation and non-uniform compliance of upper plate

○伊東優治・西村卓也・Kelin WANG・Jiangheng HE

○Yuji ITOH, Takuya NISHIMURA, Kelin WANG, Jiangheng HE

We present a new megathrust locking model in the southern Kurile subduction zone where many tsunamigenic megathrust earthquakes have occurred. Previous locking models include physically unreasonable features such as slip deficit rates exceeding the plate convergence rate of 8 cm/yr and/or deep locking at depth where stick-slip behavior of faults is not expected. We address these problematic features by incorporating interseismic viscoelastic relaxation and non-uniform compliance of upper plate into locking models using Finite Element Method. Land GNSS velocities before the 2003 M_w 8.0 Tokachi-oki earthquake are inverted to the megathrust locking. The obtained full locking depth before the 2003 event is shallower than a rupture dimension of it, which suggests that shrinking of locked area of the megathrust and/or invasion of seismic rupture into low locking degree area. However, another model in which full locking covers the 2003 rupture dimension can fit the horizontal GNSS reasonably, so the shallowing of full locking depth needs careful interpretation.

1. はじめに

千島海溝南部では2003年十勝沖地震(M_w 8.0、以降、十勝沖地震)や、大津波を伴うM9級地震を含む多くのプレート境界型地震が発生してきた。GNSSで観測された地殻変動を基に、大地震間のプレート間固着の分布が推定されてきた(例えば Ito et al., 2000, EPSL; Itoh et al., 2019a, JGR; Suwa et al., 2006, JGR)。しかしながら、先行研究によるモデルは、約8 cm/yrのプレート収束速度を超えるすべり欠損速度や、温度構造等から断層が固着しないと考えられる深さにおける固着を含んでおり、物理的な解釈の上で問題がある。これらの先行研究を含む多くの研究では、弾性変形のみを考慮して大地震間の固着分布をモデル化していた。しかしながら最近、固着による粘弾性緩和の考慮の重要性が指摘されている(例えば Li et al., 2015, JGR)。粘弾性緩和を考慮することで弾性変形のみの場合よりもより遠方へ短縮変形が伝わるため、弾性変形のみモデルと比べて固着分布の下限が浅くなることが示されている。また、グリーン関数が大きくなることから、推定されるすべり欠損速度を小さくする効果があると考えられる。しかしながら、先行研究による千島海溝南部の固着モデルは粘弾性モデル(Hashimoto et al., 2012, GJI)の場合

でも先述の問題点は解決していなかった。本研究に先立って、Itoh et al. (2019b, GRL)は走向方向に一樣な固着分布を仮定し、固着に伴う粘弾性緩和だけでなく、熱流量や地震波速度構造、減衰構造から期待される上盤のプレートの弾性変形しやすさ(プレートの厚さと剛性率)の不均質構造を考慮することが、先述の問題点を解決するために必要であることを示した。本研究では、固着による粘弾性緩和と Itoh et al. (2019b)で得られた不均質構造を考慮し、より詳細な固着分布の推定を行う。

2. モデル

本研究では有限要素法を用いて単純化した沈み込み帯の3次元地下構造モデルを用いる。具体的には、海溝付近のマントルウェッジの一部で、弾性的に振る舞うCold Noseよりも陸側の上盤プレートの厚さ(25 km)と剛性率(48 GPa)が前弧から背弧まで一様である「均質モデル」と、Itoh et al. (2019b)による、厚さと剛性率が前弧・火山弧・背弧域で異なる「不均質モデル」の2つを考える。不均質モデルでは前弧域、火山弧域、背弧域のそれぞれで、プレートの厚さが、25 km、7.5 km、10 kmで、剛性率が48 GPa、16 GPa、48 GPaである。いずれのモデルでも、マントルウェッジと海洋マントルにはBurgers Rheologyを仮定し、その

Maxwell 粘性率はそれぞれ 1.0×10^{19} Pa s、 1.0×10^{20} Pa s とし、Maxwell 粘弾性体の剛性率は 64GPa とした。

構築した 2 つのモデルを基に弾性及び粘弾性グリーン関数を作り、Itoh et al. (2019b) の手順で解析した十勝沖地震前の GNSS 観測による地殻変動から、プレート境界の固着分布を推定した。推定の際には、固着分布の滑らかさに加え、得られるすべり欠損速度の範囲に制限を加えた。具体的には、プレート収束方向と、その直交方向のすべり欠損速度が、それぞれ $0 \sim 8$ cm/yr、 $-2 \sim 2$ cm/yr となるようにした。推定には Matlab のパッケージ lsqin を用いた。

3. 結果・考察

均質モデル・不均質モデルのいずれの場合も、弾性グリーン関数を用いた場合、深さ 80 km まで完全固着（プレート収束速度に等しいすべり欠損速度）が分布したが、観測データは十分に説明されなかった。均質モデルで粘弾性グリーン関数を用いた場合は完全固着域の下限が 50 km 程度となった。しかし、観測データは十分に説明されなかった。不均質モデルで粘弾性グリーン関数を用いた場合、完全固着域はさらに浅くなり、観測データも十分に説明された。

次に、1952 年十勝沖地震 ($M 8.1$)、1968 年十勝沖（三陸沖）地震 ($M_w 8.3$)、1973 年根室沖地震 ($M_w 7.8$) で生じた地震後の粘弾性緩和を不均質モデルで計算し、その影響を補正したデータで再度固着分布を推定したところ、これらの地震のすべり域におけるすべり欠損速度が大きくなった

(Figure)。補正によって観測データの陸向き成分は大きくなったが、推定結果から計算される残差二乗和はやや小さくなったため、観測データには過去の大地震による粘弾性緩和の影響が含まれていると考えられる。このモデルを本研究における最適なモデルとする。

推定された完全固着分布の下限は、過去の大地震のすべり域や、十勝沖地震の本震のすべり域よりも浅かった。このことは、本震に先駆けた固着域の縮小や、固着が小さな領域への動的な破壊の侵入の可能性を示している。ただし、2003 年十勝沖地震や 1973 年根室沖地震のすべり域の大部分が完全に固着しているモデルでも、上下成分に顕著なミスフィットが見られたものの、水平成分はある程度説明されたことから、実際には図に示した最適モデルよりも完全固着の下限が深い可能性は排除できない。こうした地震間の固着分布やその時間変化の可能性を調べるためには、水準測量等 GNSS 時代以前のデータへ遡って固着やすべりのモデル化を実施するほか、不均質構造モデルの更なる改良が必要と考えられる。

最適モデルでは海溝付近の断層は完全固着していたが、完全にクリープしているモデルでも陸上 GNSS データを同様に説明できたため、海溝付近の断層の挙動を陸上データからは解像できなかった。しかしながら、根室沖から釧路沖にかけては、S-net で微動が観測されなかったこと（例えば Nishikawa et al., 2019, Science）等から、海溝付近の断層も固着していると考えられる。

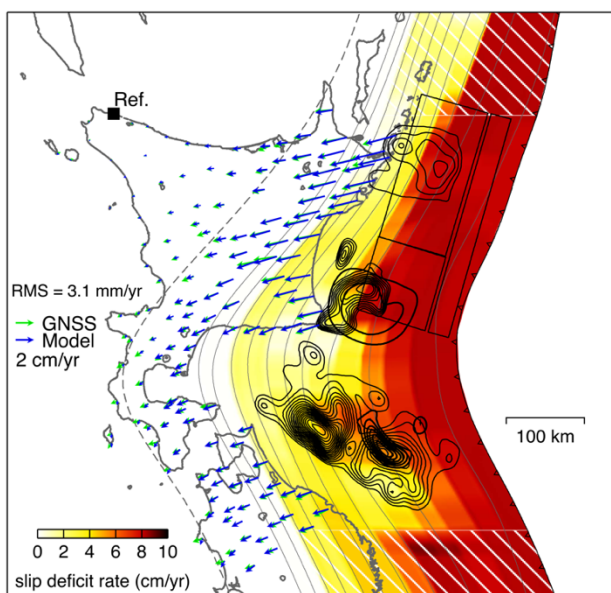


Figure: The preferred megathrust locking model using the viscoelastic Green's functions with non-uniform compliance of upper plate and the GNSS velocities corrected for the effects of the 1952 $M 8.1$, 1968 $M_w 8.3$ and 1973 $M_w 7.8$ earthquakes. Fitting of horizontal GNSS velocities and model prediction are shown with green and blue vectors, respectively. Contours and rectangles show slip models of past $M 8-9$ earthquakes.