

GNSS データを用いた 2003 年十勝沖地震の余効変動のモデル化

地震学及び地球内部物理学分科 修士 2 回生 伊東優治

1. はじめに

2003 年十勝沖地震(M_w 8.0)は、千島海溝沿いで発生したプレート境界型地震である。1952 年にもほぼ同じ震源域でほぼ同じ規模の地震があったことが知られていることから[例えば Yamanaka and Kikuchi 2003]、この地域では $M8$ 級地震が繰り返し発生する可能性が考えられる。こうした地震サイクルに伴う地殻変動は GNSS で観測され、地震前はプレート間が固着して歪みが蓄積され、強く固着している領域が地震時にすべる領域と対応していること[例えば Ito et al. 2000]や、地震後に遷移的な地殻変動（余効変動）が生じる[例えば Ozawa et al. 2004]ことが明らかにされてきた。余効変動は地震に伴う歪みの解放から次の大地震へ向けて再び固着することによる歪みの蓄積の再開へと至る遷移的な地殻変動で、その主なメカニズムは余効すべり[例えば Marone et al. 1991]と粘弾性緩和[例えば Nur and Mavco 1974]であるとされる。このうち、余効すべりは地震時すべりの領域の周囲で発生する非地震性すべり[例えば Miyazaki et al. 2004]で、プレート境界の固着の回復過程を反映していると考えられる。粘弾性緩和は、これらのすべりによって生じた応力集中を緩和するようなアセノスフェアの流動による地殻変動である。観測された余効変動には粘弾性緩和の影響が含まれており、プレート間固着の回復過程を推定する上でその影響を考慮することは重要である。しかし、十勝沖地震に関して 2 年以上の余効変動を余効すべりと粘弾性緩和の両者を考慮してモデル化した先行研究はない[例えば Baba et al. 2006; 田中 2007]。

そこで本研究では、2003 年十勝沖地震発生から 2011 年東北地方太平洋沖地震発生までの約 7 年半の余効変動を余効すべりと粘弾性緩和の両者を考慮してモデル化し、余効すべり分布を推定することで固着の回復過程を調べた。また地震前の固着状態の推定も行い、余効すべり分布と比較することで地震前の固着に伴うすべり遅れがどの程度解消されたかを議論した。

2. データ解析

使用したデータは北海道内の GEONET 観測点 153 点における F3 解である。固定局は福江(0462)を使用した。最初に 1993 年北海道南西沖地震(M_w 7.7)による余効変動の影響をモデル計算[Tanioka et al. 1995; Ueda et al. 2003]によって補正した。次に、各観測点における地震前の定常変動速度を推定し、地震後へ外挿して除去した。その後、余効変動による変動を抽出するために、地震後のデータから季節変動するノイズと周辺で発生した $M6\sim7$ 級地震[木村・宮原 2013]による地震時変位を推定し除去した。最後に、時系列データを 1~6 ヶ月毎にダウンサンプリングした。ここで得られた 2003 年十勝沖地震の地震時変位と、2004 年釧路沖地震(M_w 7.1, 6.9), 2008, 2009 年十勝沖地震(それぞれ M_w 6.8, 6.4)の地震時変位、ダウンサンプリングした余効変動の時系列データを余効変動のモデル化に使用した。また、地震前の定常変動速度を地震前の固着分布の推定に用いた。

3. モデルと推定方法

2003, 2008, 2009 年十勝沖地震, 2004 年釧路沖地震による地震時すべり, 余効すべりを含む地震後のすべり, これらのすべりによって励起される粘弾性緩和からなる余効変動モデルを仮定する。粘弾性構造は弾性層（リソスフェア）と半無限粘弾性層（アセノスフェア）からなる水平成層構造[Itoh and Nishimura 2016]を仮定し、グリーン関数には水平成層構造内のすべりに伴う粘弾性応答の解[Wang et al. 2006]を使用した。安定してすべりを推定するために、先験情報として時空間的になめらかなすべり分布を仮定した。ただし、

地震時すべりと余効すべりが互いに相補的であることが知られている[例えば Miyazaki et al. 2004]ことから、時間的ななめらかさは地震後のすべりのみに仮定した。以上を踏まえて、2003、2008、2009 年十勝沖地震、2004 年釧路沖地震による地震時すべりと、余効すべりを含む地震後のすべりの分布と全点共通の並進成分を線形最小二乗法で推定した。

4. 結果と考察

推定された 2003 年十勝沖地震の地震時と地震後のすべりは互いに相補的であった (図 1)。こうした特徴は本震直後の 1 年間に關しては確認されている[Baba et al. 2006]が、より長期間に渡っても同様の特徴がみられることがわかった。具体的には、地震後のすべりは地震時すべりの領域の浅部延長と深部延長において卓越していたことがわかった。これらの領域では地震後約 7 年半に渡ってすべりが推定されたため、地震前の固着状態へは完全には回復していなかった可能性があることがわかった。一方で、地震時すべり領域とほぼ同じ深さの領域のうち、北東側で隣接している領域では 4 年後にはかなりすべりが小さくなっており、地震前の固着状態へとほぼ回復していた可能性があることがわかった。推定された地震後のすべり量から、地震時すべりの浅部延長ではプレート境界が完全に固着していた場合に蓄積されるすべり遅れの約 50 年分が地震後のすべりによって解消した可能性があることがわかった。また、地震時すべりの深部延長では推定された地震前の固着分布と地震後のすべりの比較から、地震後のすべりによって約 20~30 年分のすべり遅れが解消した可能性があることがわかった。こうした深部延長は温度条件等から大きな地震が発生しにくいと考えられる[例えば Scholz 1998]ため、地震後のすべりは蓄積されたすべり遅れの解消の重要なプロセスである可能性があると考えられる。ただし、先験情報の与え方にやや不十分な点があるため、現在の結果は暫定的なものであり、より定量的な議論は今後の課題である。

最後に、推定されたすべりによる地表の弾性・粘弾性応答を計算した。その結果、地震直後から 1 年ではほぼすべての変動が地震後のすべりによる弾性応答に起因したことがわかった。一方で、解析した全期間(約 7 年半)の累積変位では、直後の 1 年に変動が小さかった震源遠方の観測点においても変位が見られており、その原因として粘弾性応答が卓越していたことがわかった。また、震源域では粘弾性緩和による変位が陸向きを示しており、地震後のすべりによる海向きの変位と逆センスであることがわかった。したがって、粘弾性応答を無視してモデル化した場合には震源域付近の地震後のすべりを少なめに推定する可能性があることがわかった。

5. まとめ

本研究では、GNSS データを用いて 2003 年十勝沖地震の地震時すべりと約 7 年半に渡る地震後のプレート間すべりの時空間変化を推定した。その結果、余効すべりを含む地震後のすべりは地震時のすべり域の浅部と深部で卓越し、これらの領域では約 7 年半後においてもプレート間の固着状態が地震前の状態へ完全には回復していなかった可能性があることがわかった。推定されたすべりを用いたモデル計算より、震源遠方の余効変動の主な原因は粘弾性緩和であると考えられることがわかった。また、約 7 年半の地震後のすべりを推定する上で粘弾性緩和を無視すると余効すべりが小さめに推定されることが示唆された。

6. 謝辞

本研究では、国土地理院による GEONET 日々の座標値 (F3 解)、防災科学技術研究所による F-net モーメントテンソル解、気象庁による一元化震源を使用しました。また、宮崎真一博士 (京都大学)、山中佳子博士 (名古屋大学) には、それぞれプレート境界の等深線、地震時すべりのすべり分布のデータを提供していただきました。

7. 参考文献

- Baba et al. (2006) Offshore geodetic data conducive to the estimation of the afterslip distribution following the 2003 Tokachi-oki earthquake. *Earth Planet Sci Lett* 241:281-292
- Ito et al. (2000) Interplate coupling in northeast Japan deduced from inversion analysis of GPS data. *Earth Planet Sci Lett* 176:117-130
- Itoh and Nishimura (2016) Characteristics of postseismic deformation following the 2003 Tokachi-oki earthquake and estimation of the viscoelastic structure in Hokkaido, northern Japan. *Earth Planets Space* 68:156
- 木村・宮原 (2013) GEONET が捉えた地震に伴う地震カタログの整備 *国土地理院時報* 124:57-63
- Marone et al. (1991) On the mechanics of earthquake afterslip. *J Geophys Res* 96:8441-8452
- Miyazaki et al. (2004) Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties. *Geophys Res Lett* 31:L06623
- Nur and Mavco (1974) Postseismic Viscoelastic Rebound. *Science* 183:204-206
- Ozawa et al. (2004) Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw 8 Tokachi-oki earthquake in Japan. *Earth Planets Space* 56:675-680
- Scholz (1998) Earthquakes and friction laws. *Nature* 391:37-42
- 田中 (2007) 粘弾性による余効変動のモデリング *測地学会誌* 53:35-50
- Tanioka et al. (1995) Total analysis of the 1993 Hokkaido Nansei-Oki Earthquake using seismic wave, tsunami, and geodetic data. *Geophys Res Lett* 22:9-12
- Ueda et al. (2003) Postseismic crustal deformation following the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake, northern Japan: Evidence for a low-viscosity zone in the uppermost mantle. *J Geophys Res* 108(B3):2151
- Wang et al. (2006) PSGRN/PSCMP---a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. *Comput Geosci* 32:527-541
- Yamanaka and Kikuchi (2003) Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves. *Earth Planets Space* 55:e21-e24

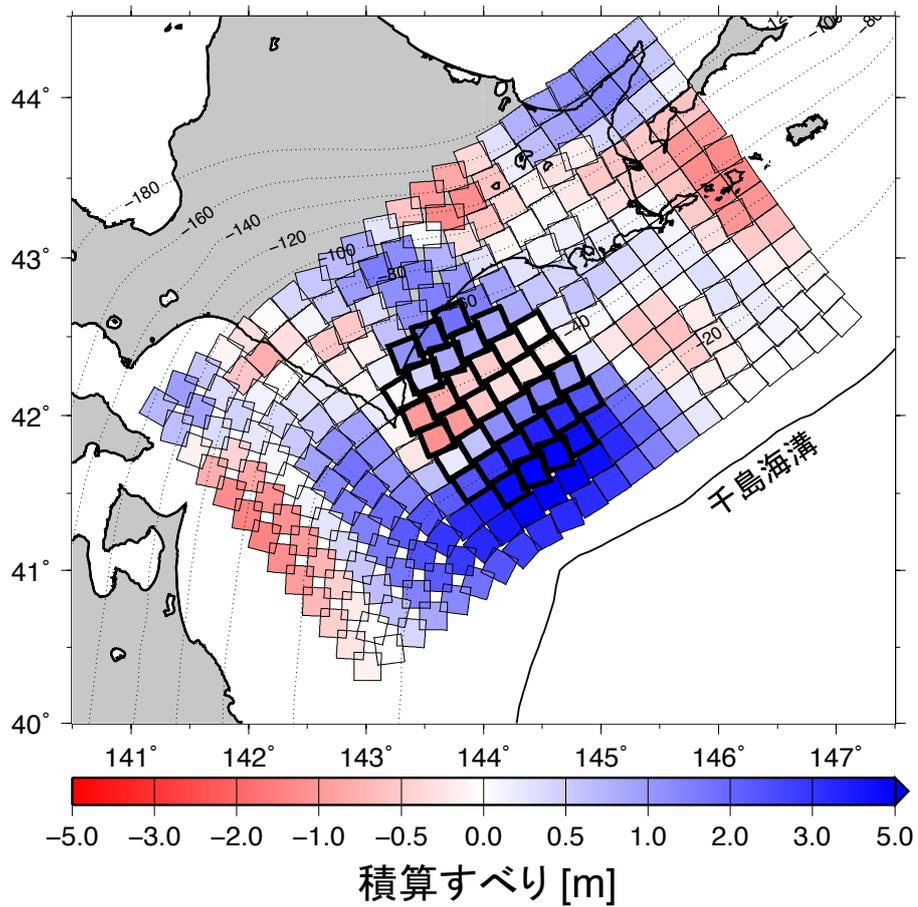


図 1：推定された約 7 年半に渡る地震後のプレート間すべり。太枠の小断層は地震時すべりが顕著（最大すべり量 3.5m の半分以上）だった領域を表す。