

不均質岩石レオロジーを考慮した東北沖地震後地殻変動解析

Analysis on post-seismic deformation of Tohoku Oki Earthquake by heterogeneous rock rheology

(日本地質学会推薦)

代表研究者	東北大学	武藤 潤	Tohoku University	Jun MUTO
協同研究者	建築研究所	芝崎文一郎	Building Research Institute	Bunichiro SHIBAZAKI
	海洋研究開発機構	飯沼 卓史	Jamstec	Takeshi IINUMA
	北海道大学	大園 真子	Hokkaido University	Mako OHZONO

By two-dimensional finite element modeling (FEM), we succeeded in reproducing the geodetic observation for postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. Our model takes into account of the thick lithosphere–asthenosphere boundary layer and low viscosity zones beneath volcanoes. The model was able to reproduce small-scale (<20 km) deformation (e.g., subsidence around Quaternary volcanoes) in postseismic deformation observed by the dense geodetic network. The afterslip has a peak at the downdip limit of the main rupture region on the subducting plate interface and is consistent with the estimate by small-repeating earthquakes. The combination of afterslip and viscoelastic relaxation estimated by a heterogeneous rheology model explains the observations well even on small scales.

研究目的

2011年に発生した Mw9.0 の東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震と略記）は、地震時に東北日本太平洋岸沿岸部に大きな沈降を引き起こした。一方、地震直後から東北地方沿岸部は隆起を開始し 5 年たった現在も隆起を続けている（地震後の地殻変動を余効変動と呼ぶ）。地震後の隆起は、地震前の地殻変動を上回る速度で進行しているが、本震時の沈降分は未だ回復していない。大きく沈降した東北日本弧沿岸部に沈降はいつ回復するのであろうか？ また次の三陸沖での大地震はいつだろうか？ さらに内陸の第 4 紀火山へどのような影響をあたえるか？ これらの間に答えるためには、現在観測されている余効変動の機構を理解し、精確にモデル化する必要がある。

現在、観測されている余効変動は、地震を発生した断層がゆっくりと非地震性にすべる余効すべりと

上部マントルなどでの広域的な流動（粘弾性緩和）が起こる（たとえば、Wang et al., 2012）。時間の経過により、余効すべりが徐々に収まり、プレートは次の地震に向けて、固着回復を回復していく。従って、M9 地震後のプレート境界の固着状況を予測するためには、現在観測されている余効すべりと粘弾性緩和を詳細に観測で分離する必要がある。

これまでの測地学的研究においては、簡単な粘弾性モデルを構築することで、粘弾性緩和に伴う変位を計算し、観測値から差し引き、逆解析による余効すべりを推定している。しかし、粘弾性緩和解析は仮定するレオロジー（物質の粘性や流動する特性）構造に強く依存することが知られている（例えば、Katagi et al., 2008）。従って、東北日本弧のレオロジー不均質構造を考慮に入れない単純な粘弾性解析では、その寄与を正しく評価することは難しい。本研究は我々がこれまで提唱してきた東北日本の不均質

レオロジーモデルを、有限要素法 (FEM) に導入することで、地球内部の岩石の物理的性質を考慮した余効変動 (粘弾性緩和) 解析を行う。これにより、東北沖地震直後の余効すべりの高精度評価が可能となり、プレート固着の回復過程や東北地方沿岸部の上下変動のより精緻な予測が可能になると期待される。

研究経過

東北沖地震後の余効変動をモデル化するために、岩石の遷移レオロジー挙動を含んだ有限要素法を構築した。FEM は地震学から観測されているプレート形状や地殻の構造 (コンラッド面やモホ面) を含んでいる。我々が過去に提唱した東北沖の不均質粘弾性モデル (Muto et al., 2013) を FEM モデルに導入することで、温度や岩石の違いといったレオロジー不均質特性を考慮した余効変動解析を行った。

余効変動のデータは、国土地理院の提供する GEONET および東北大学が鳴子火山周辺に所有する GPS データを用いた (Iinuma et al., 2015)。また海上保安庁および東北大学が所有する 7 点の海底観測の結果も使用した。これらの測地学的観測データを用いて、本震時に最大すべりが観測された日本海溝周辺-気仙沼-酒田を通る 2 次元側線を作成した。Iinuma et al. (2012) による地震時の地殻変動をもとに 2 次元側線上でのすべりを推定した。また地震後の 9 ヶ月間 (2011/4/11~2011/12/10) における海陸の GPS 座標値から、地震後の水平および垂直変動量を計算した。余効変動の 2 次元側線に沿う水平データから、陸域では全体に東向きが、海底では西向きの運動が観測された。一方、垂直変動は島弧に直交する方向で、不均質性を示す。海底では沈降し、前弧では隆起、火山フロントから背弧側では弱く沈降する。また、東北大学が鳴子火山周辺に持つ GPS データからは、火山周辺での局所的な大きな東向き変位と沈降が見られた。この局所的変形領域の側線に沿う水平幅は 10 km であった。

陸域での東向き変位を過大評価せず、海底での西向きを過小評価しないという条件のもと、最適な粘弾性モデルの構築を行った。Muto et al. (2013) を考慮した不均質レオロジーモデルでは、内陸の水平変動だけでなく、複雑な垂直変動も比較的良好に説明できることが明らかになった。このモデルにおいて、海底観測で見られた西向き変位と沈降は、沈み込む

海洋プレート直下の深さ約 100 km におけるマン托ルの流動で再現できる。一方、過去の水平変動にのみ注目した研究では、深さ 45km の部分に低粘性層をおき、この部分が大きく変形することで西向き変位を作り出していた。最適モデルにおける低粘性層を深さ 45km とした場合、西向き変位と沈降を過大評価する。一方、沈み込む前の太平洋プレートの直下では、地震波の低速度領域が深さ 80km 以深で観測されている。以上から、太平洋プレート直下深さ 80~100km 程度でのアセノスフェアの流動が、海底での西向き変位と沈降を作り出していることが明らかになった。

本研究で得られた最適粘弾性モデルと内陸のレオロジー構造を含んだ様々な粘弾性モデルから、島弧内陸の小規模なレオロジー不均質によって生じる粘弾性変形を詳細に調べた。前弧域の強い隆起は、冷たくて固い (高粘性) 前弧の存在でよく説明できる。一方、火山フロントから背弧にかけて見られた沈降は、火山フロント付近の低粘性領域の存在が必要不可欠である。これらの事実は、余効変動の垂直変動成分は、内陸のレオロジー構造を強く反映する可能性を示している。

特に、東北大学の GPS 観測網から明らかになった、鳴子火山周辺での局所的な沈降をモデル化することで、火山直下の低粘性領域の粘弾性特性を決定することに成功した。火山フロント直下に様々な粘性率とサイズ (側線に沿う水平幅と低粘性体の上面深さ) を持つ低粘性体を配置することで、観測データとの比較を行った。低粘性体の幅を大きくすると局所的沈降域の幅は大きくなり、その深度や粘性率を調整することで観測量を再現できる。以上から、 10^{18} Pas 程度の粘性率をもつ低粘性体を、水平幅 10km でその上面深さを 10km とすることで、観測される局所的な沈降を再現できることが明らかになった。

得られた粘弾性モデルを使って、余効すべりの推定を逆解析により行った。解析には、Okada (1985) による DC3D を用いて変位を計算し、負のすべりを許す条件と非負の条件の 2 点から行った。負・非負の両条件下において、地震時すべりの下限延長部に最大値約 0.6 m のすべりが推定された。負のすべりを許容した条件では、海底付近に最大 0.5 m に相当する負の余効すべり (正断層すべり) が推定された。一方、非負の拘束条件で得られた余効すべりも地震時すべりの下限延長部に同程度の 0.6 m のすべりが

推定されたが、負のすべりを許したモデルに比べて幅の広いすべり分布を示す。

観測による変位から、本研究で得られた様々な粘弾性モデルによる粘弾性緩和変位を差し引き、推定された余効すべりによる変位との比較を行った。最適粘弾性モデルとそれを用いた余効すべりの解析では、水平、垂直変動とも比較的良好に観測量を復元できることが分かった。一方、非負の拘束条件で推定された余効すべりを用いた場合、前弧から海底付近で観測との差が大きくなり、観測量をうまく復元できなかった。

考察

東北沖地震後 9 ヶ月間において、国土地理院が開発する GEONET 観測網に加えて、東北大学の持つ地殻変動観測網を用いることで、通常の余効変動解析で見られる島弧全体スケールの変動から、幅 20km 以下の第 4 紀火山周辺で発生したより小さいスケールの地殻変動も明らかにすることに成功した。また不均質粘弾性モデルとの比較から、余効変動の垂直変動成分が内陸のレオロジー不均質を強く反映する可能性を明らかにした。特に鳴子火山周辺の観測データを再現するモデルの構築により、低粘性体の水平幅と上面の深さを規定することに成功した。鳴子火山を含む 2008 年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺では、地震波および電気伝導度を用いた地殻の構造探査(トモグラフィ)が行われている(Ogawa et al., 2015; Okada et al., 2015)。特に鳴子火山直下では、直径 10km の円筒上の速度・比抵抗異常体が、モホ面から垂直に深さ 5~10km 程度まで立ち上がることが報告されている。これらの物性異常は、様々な岩石の物性では説明できず、岩石中に含まれるマグマ(メルト)や水などの流体の存在を強く示唆することから、鳴子火山直下の火道を占めるマグマの存在によるものと考えられている。このことは、余効変動観測と詳細なモデリングを用いて、構造探査の結果と独立に、低粘性体の形状の推定に成功したことを示している。

また推定された低粘性体の粘性率 (10^{18} Pas) は、鳴子火山周辺で 2008 年に発生した岩手・宮城内陸地震後の余効変動から推定された粘性率とほぼ同値 (Ohzono et al., 2012) である。一方、火山岩岩石学では、噴火前のマグマの粘性率は斑晶の含有率や含水量に依存せず、 SiO_2 含有量に強く依存することが

経験的に知られている (Takeuchi, 2015)。岩石学的研究から、鳴子火山は流紋岩質マグマからなる (Ban et al., 2005) ため、Takeuchi (2015) によるコンパイルでは、マグマ自体の粘性率は 10^6 Pas 程度になっても良い可能性が推定される。今後は、測地学的データの時系列解析や地球物理学的な観測から推定される 3 次元的構造を考慮したモデリングにより、巨大地震が第 4 紀火山などに及ぼす効果の定量的な評価を行っていく。

最適粘弾性モデルを用いて推定された余効すべりは、負・非負の拘束条件によらず、本震すべり域の下限に 0.6 m 程度であった。このことは、モデルの拘束条件によらず、本震すべり域下限での余効すべりは精度よく推定されていると考えられる。また、本研究の推定値は、微小繰り返し地震の分布から推定された余効すべり分布と非常に調和的であった (Uchida and Matsuzawa, 2013)。一方、半無限弾性体を使った解析から、本研究より 2 ヶ月ほど短い期間において、この領域で最大 2 m に相当する余効すべりが推定されている (Ozawa et al., 2012)。この違いは、詳細な粘弾性モデルで観測された地殻変動の大部分を説明でき、推定される余効すべりは弾性モデルでの最大 25% 程度にまで減少することを意味している。本研究や微小繰り返し地震から推定される余効すべりの領域は、再来周期 40 年程度で M7~8 程度の宮城県沖地震のアスペリティに相当する。従って、巨大地震後に、次の活動が注視されている宮城県沖におけるプレート間固着の回復モニタリングには、不均質レオロジーモデルを用いた余効変動観測が必要不可欠であることを明確に示している。

一方、前弧から海域直下にかけて推定された最大 0.5 m に達する負の余効すべり(正断層すべり)の存在とその物理的意味に関しては、今後の検討課題とせざるを得ない。本研究で行った解析は、プレートの定常的な沈み込み(年間 8 cm の西進)を差し引いていないため、観測期間(9 ヶ月)において推定された負のすべりの最大 10% 程度は定常的な沈み込みに起因するものである。また正断層すべりが推定された領域は、地震後に正断層すべりが観測されている領域(本震時に大きくすべった領域)に相当する (Asano et al., 2012) が、この地域の東側には観測点が存在しないため、その推定精度は低い。今後は、東北沖で増強される海底観測網によるデータ (Kido et al., 2015) や粘弾性変位と余効すべり変位の推定を

繰り返す行うといった取り組みでその推定精度上げるとともに、その物理的意味を明らかにしていく。

東北日本弧の熱構造および地震学的構造を考慮したレオロジーモデルを用いた有限要素法解析から、局所的な余効変動が東北日本弧のレオロジー不均質を強く反映している可能性を指摘することに成功した。またこれらの細かいスケールのレオロジー不均質を考慮することで、測地学的観測へのフィッティングは大幅に向上する。例えば過去の簡単な粘弾性モデルを使った解析では、火山フロントなど局所的な低粘性対の存在による不均質の影響が示唆される領域で、モデルと観測量との差が大きくなっている。東北沖地震本震とその後の余効変動により、東北日本全域が東西に大きく伸張し、蔵王などの第4紀火山の活動が活発化している。本研究で推定された火山直下の粘性特性は、東西伸張変形が進行する現在、第4紀火山に関する余効変動の効果を定量的に評価することに大きく貢献する。今後、巨大地震後の余震活動やプレート固着の回復過程をモニターするためには、東北日本全域を含んだ3次元解析を行う必要がある。これにより、東北沖のプレート境界における摩擦特性の3次元不均質を明らかにし、本震を起こしたアスペリティ周辺への地震発生ポテンシャルの評価に貢献していく。以上の成果の一部は、Muto et al. (2016)として、米国地球物理学会のレター誌 (Geophysical Research Letters) において報告した。

参考文献

1. Asano, Y., et al. (2011), Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquakes, *Earth Planet. Space*, 63, 669-673.
2. Ban, M., K. Takahashi, T. Horie., and N. Toya (2005), Petrogenesis of mafic inclusions in rhyolitic lavas from Narugo Volcano, Northeastern Japan, *J. Petrol.*, 46, 1543-1563, doi:10.1093/petrology/egi025.
3. Katagi, T., S. Yoshioka, and M. Hashimoto (2008), Influence of temperature- and depth-dependent viscosity structures on postseismic deformation predictions for the large 1946 Nankai subduction zone earthquake, *Tectonophysics*, 454, 1-13.
4. Kido, M., et al. (2015), Progress in the project for development of GPS/Acoustic technique over the last 4 years, *Int. Assn. Geodesy Symp.*, 145, doi:10.1007/1345_2015_127.
5. Muto, J. et al. (2013), Two-dimensional viscosity structure of the northeastern Japan islands arc-trench system, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50906.
6. Ogawa, Y. et al. (2014), Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan, *Earth Planets Space*, 66, 158, doi:10.1186/s40623-014-0158-y.
7. Okada, Y. (1985), Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
8. Okada, T., et al. (2014), Seismic velocity structure in and around the Naruko volcano, NE Japan, and its implications for volcanic and seismic activities, *Earth Planets Space*, 66, 114, doi:10.1186/1880-5981-66-114.
9. Takeuchi, S. (2015), A melt viscosity scale for preeruptive magmas, *Bull. Volcanol.*, 77, 41, doi:10.1007/s00445-015-0929-8.
10. Uchida, N., and T. Matsuzawa (2013), Pre- and postseismic slow slip surrounding the 2011 Tohoku-oki earthquake rupture, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 374, 81-91, doi:10.1016/j.epsl.2013.05.021.
11. Wang, K., Y. Hu, and J. He (2012), Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic

Earth, Nature, 484, 327–332,
doi:10.1038/nature11032.

研究の発表

口頭発表

1. Muto, J., Shibazaki, B., Ohzono, M. (2014) Strain fields of the NE Japan associated with heterogeneous rheological structure during subduction zone earthquake cycles, 2014 AOGS, Sapporo, Japan (2014.7.30).
2. Shibazaki, B., Muto, J., Nakai, Y., Iinuma, T. (2014) Three-dimensional Rheological Structure of the Northeastern Japan Arc and Its Viscoelastic Deformation after the 2011 Tohoku-oki Earthquake, 2014 AOGS, Sapporo, Japan (2014.7.30).
3. 武藤 潤 (2014) 岩石の遷移粘弾性レオロジー特性と東北沖地震後の余効変動. 地殻ダイナミクスキックオフシンポジウム、京都大学防災研

究所、京都 (2014.10.17) .

4. Muto, J., Shibazaki, B., Iinuma, T. (2014) FEM modeling on post-seismic deformation of the Tohoku Oki EQ illuminating rheological heterogeneity of island arc lithosphere. Gordon Research Conference, Andover (NH), USA (2014.9.1).
5. 武藤 潤・芝崎文一郎・飯沼卓史・西村卓也 (2015) 地震間一地震後の東北日本弧の垂直変動のモデル化：レオロジー不均質の効果. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会、幕張メッセ (2015.5.26) .

誌上発表

1. Muto, J., B. Shibazaki, T. Iinuma, Y. Ito, Y. Ohta, S. Miura, and Y. Nakai (2016), Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2016GL068113.