

3次元有限要素法を用いた2011年東北沖地震による地殻変動および内部応力のモデリング

橋間 昭徳 [1]
[1] 東大地震研

Modeling of crustal deformation and internal stress due to the 2011 Tohoku-oki earthquake, Japan

Akinori Hashima[1]
[1] ERI, Univ. Tokyo

The 2011 Tohoku-oki earthquake caused as large as 5 m displacements on land, and tens of meters in the offshore. Megathrust earthquakes of this kind forms large strain and stress in the surrounding areas, which are relaxed in decadal timescale. Its surface expression is postseismic deformation. Two mechanisms have been considered for postseismic deformation: the afterslip around the mainshock and viscoelastic relaxation in the asthenosphere. Analysis of postseismic deformation is thus crucial for studies of earthquake generation and viscosity structure.

In this study, we construct a finite element model incorporating the Pacific and Philippine Sea slab geometries based on seismicity. Elastic structure is assigned following the studies of seismic tomography. Fault slip is expressed by a constraint equation defining relative displacements between two sides of the fault. We impose fixed boundary condition on the sides and bottom of the model region.

Using this model, we compute 3-year displacements due to viscoelastic relaxation assuming various viscosity structures. Then, we invert the residual displacements subtracting computed from the observed to obtain afterslip distribution. The optimum model is determined by the minimum of the summation of residuals. Viscosity structure is explored by starting from simple uniform structure and adding the effect of known structure in a stepwise way such as the layering, the oceanic/continental contrast, the cold nose, depth variation of the Philippine Sea slab, and the anomalous low viscosity layer at the bottom of the Pacific plates.

The optimum viscosity structure contains the low viscosity region at the depth of 150-300 km on the continental side and the bottom of the Pacific plates. The elastic thickness on the continental side is 25 km and the cold nose exists within the horizontal distance smaller than 200 km from the trench. The depth of the Philippine Sea slab is determined at 100 km. The low viscosity region at the bottom of the Pacific plate is indispensable to explain the observed westward displacements in the offshore. The inverted afterslip exists between the north and south of the mainshock between past tsunamigenic sources. The displacements due to viscoelastic relaxation and afterslip are of the similar magnitude but distributed complimentary; viscoelastic effect in the south Tohoku and afterslip effect in the north Tohoku and Kanto. The observed horizontal and vertical displacements can thus be explained by considering the both effects.

Using the optimum model, we compute temporal change of the crustal stress. Basically, the stress due to the northeast Japan is extensional of the order of 0.1-1 MPa directing the source region. This stress is gradually propagated westward and the stress pattern changes from normal-fault to strike-slip type. Such stress evolution can explain postseismic change in the focal mechanisms of the crustal earthquakes. Also, it is consistent with change in the seismic velocity on land.

2011年東北沖地震は陸域で最大5m、海域で数十mの変動を引き起こした。このような巨大地震は周辺領域に大きな歪と応力変化をもたらす、その後、数年～数十年スケールの時間をかけてゆっくり解消される。その地表での表れが余効変動である。余効変動を引き起こすメカニズムは、本震の震源域の延長部における余効すべりとアセノスフェアにおける粘弾性緩和の2つが考えられている。したがって、余効変動の解析は、震源過程や粘性構造の推定のために極めて重要である。

本研究では、東北沖地震の余効変動を解析するため、観測に基づく太平洋・フィリピン海プレート上面の形状を取り入れた有限要素モデルを構築した。弾性構造は地震波トモグラフィによる構造を与えた。断層すべりは、断層面の上面と下面に相対変位を与える拘束条件により表現した。また、境界条件はモデル領域の側面と底面で変位固定条件とした。

このモデルを用い、様々な粘性構造を仮定して粘弾性緩和による3年間の変位を計算する。東北沖地震後3年間の観測変位データから粘弾性緩和による計算変位を差し引いた残差変位をインバージョンし、プレート境界面上の余効すべりを求める。そして、粘弾性緩和と余効すべりによる計算変位と観測変位の残差の自乗和を最小にするようなモデルを最適モデルとする。粘性構造としては、簡単な一様粘性構造から出発し、既存研究の知見にもとづき陸側マントルウェッジの成層構造、海側マントル、陸側マントル先端の低温部(Cold nose)、フィリピン海プレートの深さの下限、太平洋プレート下部の低粘性領域の効果を段階的に追加した構造モデルを検討した。

解析の結果得られた最適粘性構造では、低粘性領域が大陸側の深さ150-300kmと沈み込む海洋プレートの屈曲部分の下部に存在し、大きな粘性緩和を起こす。大陸側の弾性層の厚さは25km、Cold noseの存在領域は海溝から200kmまで、フィリピン海プレートの沈み込みの下限は100kmとなった。海域で観測されている西向きの変位は、太平洋プレート下部の低粘性層における粘弾性緩和を考慮しなければ説明できない。また、得られた余効すべりは本震すべり域の北端と南端に過去の津波地震の波源域との間に挟まれるように存在する。

粘弾性緩和と余効すべりによる地震後の変動の大きさは同程度だが空間分布が異なる。粘性緩和は東北地方南部、余効すべりは関東地方と東北地方北部の変位に寄与する。両者の寄与は相補的で、両者を合わせると全域の観測変位を水平・上下成分ともに説明することができる。

以上で得られたモデルを用いて、地殻応力の時間変化を計算した。東北日本における応力変化は基本的に震源域方向への0.1~1 MPa オーダーの伸張応力である。時間とともに、応力変化は西方に広がる一方、応力パターンは正断層タイプから横ずれタイプへと変化する。このような応力変化は、巨大地震後のプレート内地震のメカニズム解の変化を説明することができるほか、巨大地震に伴う陸域の地震波速度の変化とも調和的である。