

12-2 余効変動と粘弾性 —基本的理解—

Postseismic deformation and viscoelasticity -Fundamental understandings-

平原和朗 (京都大学大学院理学研究科)

Kazuro Hirahara (Graduate School of Science, Kyoto University)

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震により、陸域から日本海溝にかけて東向き大きな地震時地殻変動が生じ、その後陸域では余効すべりから期待されるように東方への余効変動が生じた。ところが、大すべり域直上の海底は逆の西方への余効変動を示した。これは地震後すぐに断層面が固着して海底を西方へ変動させた可能性を示し、当初研究者を悩ませた。しかし、上部マントルは弾性応答に加えて地震後遅れて変動し応力を緩和させる流動特性を持つ粘弾性媒質から成り、地震により生じた上部マントル内でのゆっくりとした流動を考えると説明がつく。教科書¹⁾に載っている話であるが、実際に目にしたのは初めてであった。ここではまず、余効変動を引き起こす3つの要因について基礎的事項を紹介し、特に主要な要因である粘弾性緩和について、簡単のため弾性—粘弾性層の2層モデルを用いてその変動パターンを解説する。

2. 余効変動を生じさせる要因

地震後に観測されるゆっくりした地殻変動（余効変動）の発生要因として、

- 1) 間隙弾性反発 (poroelastic rebound :PE)
- 2) 余効すべり (afterslip)
- 3) 粘弾性緩和 (viscoelastic relaxation)

が挙げられる。

1) は、間隙流体を含む多孔質弾性体中で生じる変動で、地震時に圧縮（伸張）された領域では、地震後に間隙流体が流出（流入）し、収縮・沈降（伸張・隆起）する。観測された時定数は、週～月で、変動は流体拡散に支配され、その拡散係数は透水係数/流体粘性率に比例する。2) は、岩石の摩擦則である速度状態依存則を考えると、震源域（速度弱化域 $a-b < 0$ ）で生じた地震時すべりにより震源域延長部（速度強化域 $a-b > 0$ ）で励起される地震後のゆっくりすべりによる変動である。観測されている時定数は、月～年であり、対数時間依存性を示す。3) は、地殻下部や上部マントルの粘弾性層に励起された流動により引き起こされる広域変動である。媒質モデルとしては、剛性率 (μ) を持つ弾性バネと粘性率 (η) をもつダッシュポットを直列したマックスウェル粘弾性モデルが良く用いられ、このモデルの変動は指数関数的に減衰する時間依存性を示し、時定数は、 η/μ に比例する。また、地震波の減衰モデルであるバネとダッシュポットを並列したフォークトモデルとマックスウェルモデルを直列に繋いで、地震直後には早い減衰、その後減衰が緩やかになるふたつの時定数を持つバーガーズモデルも用いられている。これらは応力と歪速度が線形関係にある線形レオロジーであるが、岩石は高温高压条件では応力と歪速度が非線形性を示す。ふたつの時定数を持つバーガーズモデルはその代用という面があり、多くの場合、解析には線形レオロジーが用いられている。なお、観測された時定数は、年～数十年である。

3. 弾性—マックスウェル粘弾性層から成る成層構造モデル中での粘弾性緩和による余効変動

東北地方太平洋沖地震では、断層および断層周辺の多孔質弾性体構造（間隙率分布や透水率構造等）が不明で、また時定数が短く変動が断層周辺に限られることもあり、1)については研究が少なく、主として2)と3)に関する研究が行われている。

ここでは、海域で観測された震源域直上での地震時変動とは逆向きの西向き余効変動に関連して、粘弾性媒質中での流動について、弾性層とマックスウェル粘弾性層から成る2層成層モデルを示す。第1図は、教科書¹⁾に載っている、厚さHの弾性層中での逆断層すべりによる地表での4時刻($t/t_R=1, 2, 4$; $t_R=\eta$ (粘性率) / μ (剛性率))での累積余効変動を表す。教科書の図は、右傾斜になっているが、東北地方太平洋沖地震を考慮して、左傾斜にしている。

横軸は、弾性層厚(H)で規格化した水平距離を示している。上図は水平変動、中図は上下変動を地震時すべり量で規格化した値で示している。下図は半無限マックスウェル粘弾性層の上に弾性層がある成層構造モデルを示し、縦軸は深さで弾性層厚(H)で規格化され表示されている。断層は地表距離0から角度30°で左傾斜しており、地震時すべりは一様で弾性層を断ち割るものとしている。震源域直上では、水平および上下余効変動とも、断層すべりによる地震時変動と逆向きの変動が現れているのが分かる。

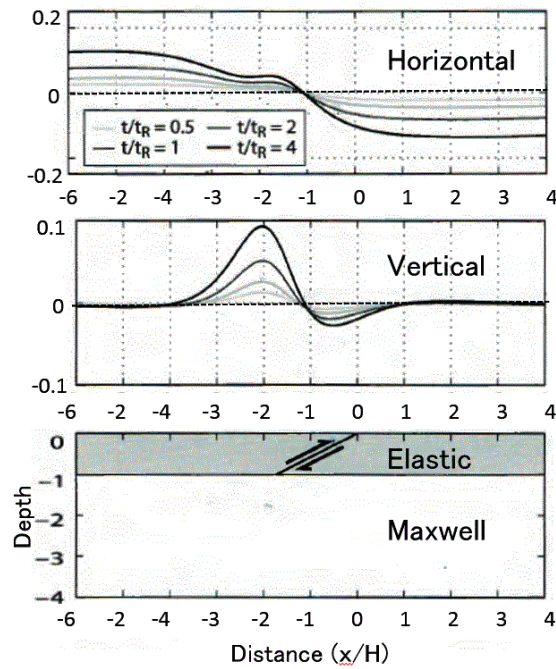
続いて、2011年東北地方太平洋沖地震により励起された余効変動解析の一例を示す²⁾。この例でも、単純な弾性・粘弾性2層構造モデルを仮定し、陸域および海域で観測された地震時および余効変動データを解析し、地震時すべりに加え、余効すべりによる粘弾性緩和も考慮して、余効すべりを推定している。最適解を得るパラメータとして、弾性層厚Hは50km、弾性層内の剛性率 μ は30GPa、マックスウェル粘弾性層の剛性率 μ は60GPa、粘性率 η は $9 \times 10^{18} \text{Pa} \cdot \text{s}$ としている。第2図は、宮城県沖海底地殻変動観測点(MYGI, MYGW)および陸域GNSS観測点(0918)を通る垂直断面に投影した、地震時変動ベクトル(青矢印)と2011年3月10日~9月10日間の累積余効変動ベクトル(赤矢印)を比較して示したものである。変動ベクトルのスケールは違うが、地震時では、断層の上盤側では東向きの変動(青矢印)を示すのに対し、震源域直上では、地震時とは逆の西向きの余効変動(赤矢印)が生じて、観測データを説明している。地震時には断層下盤側に西向きの変動が生じるが、その後粘弾性層にこの地震時と同じ向きに大きな粘性流動が遅れて励起され、この粘性流動が弾性層の震源域直上で地震時とは逆向きの変動を生み出していることが分かる。

4. おわりに

ここでは、基本的な理解のため、単純な成層粘弾性モデルを示したが、他の講演で示されたように、実際に観測した余効変動データを十分に説明するには、3次元不均質粘弾性モデルや非線形レオロジーモデルを用いる必要があることに注意を要する。

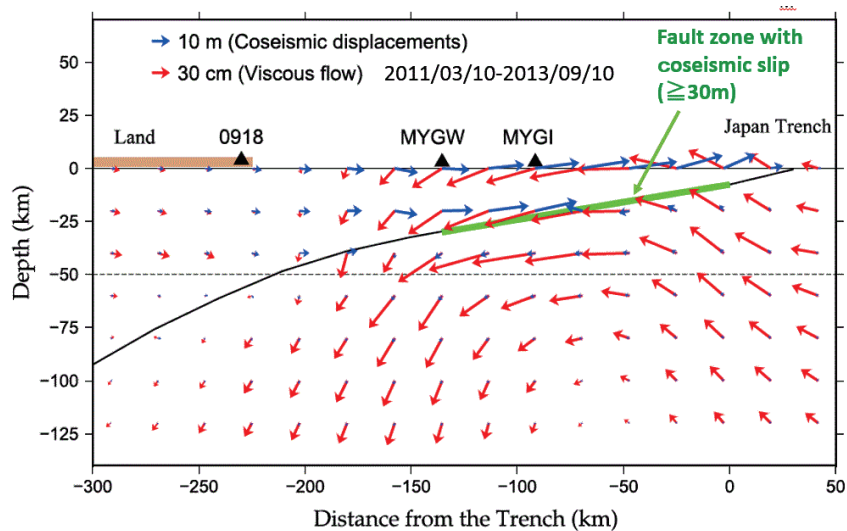
参考文献

- 1) Segall, P. (2010) Earthquake and Volcano Deformation, pp.432, Princeton Univ. Press.
- 2) Yamagiwa, S., et al. (2015) Geophys. Res. Lett., 10.1002/2014GL061735.



第 1 図 弾性—マックスウェル粘弾性層からなる成層モデル中での逆断層すべりによる余効変動
 上図：水平変動，中図：上下変動，下図：2 層成層モデルと断層の幾何学形状
 (教科書¹⁾の第 6.21 図の右傾斜断層を左傾斜逆断層に改変)

Fig.1 Postseismic displacements due to a thrust fault that cuts an elastic layer overlying a Maxwell half-space. Top: Horizontal displacements Middle: Vertical displacements Bottom: Viscoelastic model and the fault geometry (The right-dipping thrust fault in Fig.6.21¹⁾ is modified for the left-dipping one.)



第 2 図 3 観測点 (0918, MYGW, MYGI) を通る垂直断面に投影した地震時変動 (青矢印) および地震後半年間の余効変動 (赤矢印). 茶色線, 黒実線, 黒破線は, 陸域, プレート境界, 弾性層とマックスウェル粘弾性層の境界を示す. (論文²⁾の第 4 図を改変.)

Fig.2 Coseismic displacements (blue arrows) and cumulative displacements due to viscoelastic relaxation (red arrows) in half-year projected onto the vertical section through stations, 0918, MYGW, and MYG. The brown, the solid black, and the broken black lines indicate the area of land, the plate boundary, and the boundary between elastic and viscoelastic layers, respectively. (Fig.4²⁾ is modified.)