

現在の応力場と活断層の活動度との関係

Relation between stress field around active fault and fault activity

行竹 洋平^{1*}, 武田 哲也², 吉田 明夫¹

Yohei Yukutake^{1*}, Tetsuya Takeda², Akio Yoshida¹

¹ 神奈川県温泉地学研究所, ² 防災科学技術研究所

¹Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefecture, ²National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

1. はじめに

内陸域の現在の応力場が活断層にどのような作用を及ぼしているかを把握することは、活断層の活動性を評価したり、その周辺のテクトニクスとの関係を議論するために重要と考えられる。Morris et al., (1996) は断層近傍の応力情報から、断層面上に作用するせん断応力と法線応力の大きさとの比 (Slip tendency) を推定し、Slip tendency が大きい断層はその応力のもとですべりやすい状態にあるとみなし、断層の活動性に対する評価手法を考案した。本研究では、日本内陸域における地震メカニズム解データを用いて、活断層周辺の応力場を詳細に決定し、Morris et al., (1996) の手法を用いて、現在の応力場が活断層にどのように作用していると考えられるのか調べた。

2. 応力場および Slip tendency の推定方法

内陸域の応力場の推定には、行竹ほか (2012, SSJ) において決定されたメカニズム解データを用いた。この研究では、基盤地震観測網のデータをもとに、P 波極性と実体波の振幅データを用い、マグニチュードの下限 2 までの地震を対象にメカニズム解が決定された。本発表では、中部地方から近畿地方にかけての領域を解析対象とし、この領域内で決定できた 3500 個のメカニズム解データを使用した。これらのメカニズム解から応力インバージョン法を用いて、活断層周辺の応力解 (主応力軸方向および応力比) を推定した。ここでは、Hardebeck and Michael (2006) によって開発された、Damped Inversion 法を用い、緯度・経度方向に 0.2 度間隔のグリッドを設けて、グリッド内に 8 個以上のメカニズム解データがある領域に対して応力解を推定した。

活断層の位置、走向、傾斜については、産業技術総合研究所活断層データベース (<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/>) から情報を得た。それぞれの活断層 (断層活動セグメント) の地表トレースから 10km 範囲内にあるグリッド点で応力解が決定されている場合、それをその活断層周辺の応力解とし、Slip tendency の推定に使用した。近傍に応力解が推定されなかった活断層については、解析対象から除外した。

応力インバージョンによって推定される応力解は、主応力軸の方向と主応力の大きさの相対比 (応力比) のみである。Slip tendency を求めるためには、それ以外に間隙水圧、絶対応力値、差応力の情報が必要となる。そこで本解析では、間隙水圧については静水圧を仮定し、Revera and Kanamori (2002) に従い上載圧 (gz) の 1/3 とした。絶対応力値については、主応力軸の一つが鉛直方向に求まった場合、その主応力の大きさが上載圧と等しいと仮定した。差応力については、Yukutake et al., (2007) の結果を参考にし、深さ 1km 毎の勾配を 15MPa/km と仮定した。これらの手順をもとに、深さ 5km における各断層セグメントに作用するせん断応力と法線応力の大きさの比、Slip tendency を求めた。

3. Slip tendency と活断層の平均変位速度との関係

調査領域内の 168 個の活断層 (断層活動セグメント) について、Slip tendency を求めることができた。ここでは、Slip tendency と活断層の活動度を示す指標である平均変位速度を比較した。その結果、平均変位速度が 1m/year の A 級の活断層についてはほとんどが Slip tendency の値が大きいことが分かった。A 級の活断層の内、Slip tendency の値が比較的小さかったのは、中央構造線の一部に含まれる、五条谷セグメント、根来セグメント、紀伊水道セグメント、父尾セグメントであった。また、平均変位速度が 1m/year 以下の小さい活断層については、Slip tendency の値が大きいものから小さいものまで幅を持って分布している傾向があることが分かった。Slip tendency の大きな断層セグメントの空間分布をみると、現在のひずみ速度の大きな領域 (ひずみ集中帯) に多い傾向が見られる。

謝辞

本研究では、防災科研 Hi-net、気象庁、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学の波形データを使用させて頂いた。活断層情報は産業技術総合研究所活断層データベース (<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/>) から取得した。本研究は科研費 MEXT/JSPS (23740347) の助成を受けたものである。

キーワード: 応力場, 活断層, 活動度, すべり易さ

Keywords: Stress field, Active fault, Slip tendency

断層方位分布に対するすべり傾向係数の最適化による有効摩擦係数の決定 Determination of effective friction coefficient by optimizing slip tendencies on fault plane orientation distribution

佐藤 活志^{1*}Katsushi Sato^{1*}¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻¹ Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ.

断層面上の摩擦係数は造構運動をコントロールする重要なパラメタの一つだが、伏在断層や地質時代の断層の摩擦係数を評価することは難しい。本研究は、断層群の方位分布から、それらが活動した当時の有効摩擦係数を決定する統計的手法を提案する。

地質断層や地震動は断層すべりの痕跡であり、応力条件が摩擦係数によって規定されるすべり条件を満たした証拠である。通常の応力逆解析法は、断層群の方位から主応力軸と応力比で記述される規格化応力テンソルを決定する。Angelier (1989) は、破壊規準や摩擦則を導入することで応力の絶対値をも決定する手法を提案した。この手法では、断層面にはたらく有効法線応力 (σ_n) と剪断応力 (σ_s) を表すモールダイアグラム上の点の分布から、有効摩擦係数 (μ) を決定できる。すべり条件として $\sigma_s / \sigma_n = \mu$ を採用し、直線的な点の分布範囲の限界を直線 $\sigma_s / \sigma_n = \mu$ とみなすのである。しかしながら、グラフ上でこの直線を認定する作業は任意性を伴う。本研究のねらいは、この任意性を排除して有効摩擦係数を決定することである。

本研究の新手法は、 σ_s / σ_n で定義されるすべり傾向係数 (Morris et al., 1996) を用いる。この指標は、地質断層や地震の発震機構解から計算され、断層すべりの起こりやすさの評価に用いられている (例えば, Collettini and Trippetta, 2007; McFarland et al., 2012)。天然の断層群の方位分布は、すべり傾向係数が大きいほど頻度が大きいという傾向を持つ (Lisle and Srivastava, 2004)。そこで新手法は、断層方位分布がすべり傾向係数の逆数 (σ_n / σ_s) に対して単調減少するような確率分布関数で表現できると仮定し、その関数が含むパラメタを最適化する。もし最適化された関数が頻度が0となる急減部を持つならば、そのときのすべり傾向係数が有効摩擦係数に一致すると解釈できる。

新手法を、房総半島東部に分布する更新統上総層群の小断層群に適用した。変位が数 cm ~ 数 m 規模の正断層を主体とする断層方位データを取得し、応力逆解析を行ったところ、東西引張の単一の応力の下で形成された断層群であることが示された。新手法を適用した結果、有効摩擦係数は $\mu = 0.45 + 0.34 / -0.09$ となり、比較的小さな値が得られた。ブートストラップ法により見積もられた誤差は大きいものの、第四紀のやわらかい堆積層に発達した断層群の摩擦係数として妥当な結果だと考えられる。

References

- Angelier, J., 1989, Jour. Struct. Geol., 11, 37-50.
Collettini, C. and Trippetta, F. 2007, Earth Planet. Sci. Lett., 255, 402-413.
McFarland, J.M., Morris, A.P., Ferrill, D.A., 2012, Comp. Geosci., 41, 40-46.
Morris, A., Ferrill, D.A. and Henderson, D.B., 1996, Geology, 24, 275-278.
Lisle, R.J. and Srivastava, D.C., 2004, Geology, 32, 569-572.

キーワード: 応力逆解析, 有効摩擦係数, すべり傾向係数, 方位分布, 小断層解析

Keywords: stress tensor inversion, effective friction coefficient, slip tendency, orientation distribution, fault-slip analysis

臨時観測データを用いて推定した東北日本の応力場 -プレート収束と地形効果- Crustal stress field formed by plate convergence and topography in northeastern Japan

吉田 圭佑^{1*}, 長谷川 昭¹, 岡田 知己¹
Keisuke Yoshida^{1*}, Akira Hasegawa¹, Tomomi Okada¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター
¹RCPEVE, Tohoku University

We estimated the crustal stress field in northeastern Japan prior to the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake based on earthquake focal mechanisms determined using seismograms from temporary and permanent seismic networks deployed in this area. Results show that the arc and back-arc are characterized by spatially uniform margin normal compression. However, the fore-arc has different stress orientations. The Kitakami and Abukuma mountain ranges in the north and south have s_1 axis oriented nearly N-S and vertical, respectively, and the region in between without mountain range has a similar stress field to the arc and back-arc. This indicates that the margin normal compression in the arc and back-arc is not caused mainly by the coupling with the Pacific plate but perhaps by the convergence of the Eurasia plate from the back-arc side. Anomalous stress fields in the mountain ranges of the fore-arc are probably due to gravitational force.

Spatially homogeneous margin normal compression is observed throughout the arc and back-arc as already mentioned, but the stress field even in those regions might also be influenced by the topography. Using the distribution of the generalized stress ratio (Simpson, 1997), we found a clear spatial correlation between strike-slip fault stress regime (i.e. higher sv) and high mountain ranges in those regions, which again suggests that the prevailing stress field has been influenced by topographic loading, though the s_1 orientation is constant.

キーワード: stress field, focal mechanism, topography, plate convergence

東北地方太平洋沖地震発生前の福島県いわき地域での応力の時間変化 Temporal stress change around the Iwaki-city in northeast Japan before the 2011 Tohoku earthquake

大坪 誠^{1*}, 今西 和俊¹, 宮川 歩夢¹

Makoto Otsubo^{1*}, Kazutoshi Imanishi¹, Ayumu Miyakawa¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan/AIST

We present the temporal heterogeneities of the crustal stress before the 2011 Tohoku earthquake around the Iwaki-city using the small magnitude earthquakes. Otsubo et al. (2008; *Tectonophysics*, 457, 150-160) proposed a stress tensor inversion method to separate stresses from earthquake focal mechanism data from spatially and temporary varying state of stress. The method is applied to focal mechanisms of the earthquakes collected by Imanishi et al. (2012; *Geophys. Res. Lett.*, 39, L09306).

The inversion method revealed two normal-faulting stress states, corresponding to two stress periods and the transition between the two stress periods corresponds to the period between 2005 and 2008. In the stress period I from 2003 to 2005, a WNW-ESE trending tri-axial extensional stress is dominant. The stress ratio increases from the stress periods I ($\Phi = 0.5$) to II ($\Phi = 0.8$) in this area. The temporal changes of S3-axis orientation and stress ratio of stress state had induced by the event that occurred during 2005 and 2008. We interpret that the changes of the stress period from I to II are induced by the extension during the post-seismic deformation of the M 7-class earthquake. We estimate the magnitude of the change of differential stress from the Stress B to A. The differential stress of the Stress A is estimated at ~ 3 times as large as at the differential stress of the Stress B under these assumptions.

We revealed that the pre-shock normal-faulting stress regime had been built up by 2003, furthermore the differential stress of the pre-shock normal-faulting stress was increased by the post-seismic deformations of the M 7-class earthquake before the 2011 Tohoku earthquake. The increase of the differential stress has contributed to the stress accumulation that can be sufficient to cause an inland earthquake by amount of stress change of the 2011 Tohoku earthquake around the Iwaki-city.

A part of this research project has been conducted as the regulatory supporting research funded by the Secretariat of Nuclear Regulation Authority (Secretariat of NRA), Japan.

キーワード: 多重逆解法, 発震機構, 海溝型巨大地震, 余効変動, 活断層, 福島県浜通りの地震

Keywords: multiple inverse method, focal mechanism, large trench type earthquake, post-seismic deformations, active fault, 2011 Iwaki earthquake

東北地方太平洋沖地震による誘発地震の応力降下量 Stress drops of induced earthquakes associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake

今西 和俊^{1*}

Kazutoshi Imanishi^{1*}

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

東北日本の内陸部で発生する地震は東西方向に圧縮軸を持つ逆断層が一般的である。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）により誘発された陸域の地震の中には、東西圧縮の逆断層とは異なるタイプのものがある。例えば、福島県浜通り周辺では正断層型の誘発地震、秋田県中部では横ずれ型の誘発地震が発生しており、どちらもT軸が震源域の方向を向いている。このような誘発地震が発生する原因として、東北沖地震による静的応力変化により、応力場が変化した可能性が指摘されている（Kato et al., 2011; Yoshida et al., 2011）（仮説1）。一方、Imanishi et al. (2012) は東北沖地震発生前の微小地震解析により、福島県浜通り周辺はもともと局所的に正断層場であったことを突き止め、このことが広域応力場と異なるタイプの地震が誘発された重要な要因であった可能性が高いと結論した（仮説2）。また、Terakawa et al. (2013) は間隙水圧の増加が要因であった可能性を指摘している（仮説3）。東北沖地震に伴う静的応力変化を計算すると、福島県浜通り周辺や秋田県中部では大きくて1 MPa程度と見積もられる。もし仮説1のように応力場の変化が生じたのであれば、東北沖地震発生前の差応力レベルは1 MPa程度もしくはそれ以下であったことになる。さらに言うと、誘発地震の応力降下量が1 MPaを超えることは無いことになる。差応力レベルを推定することは困難であるが、誘発地震の応力降下量を推定することは容易である。そこで本研究では、誘発地震の応力降下量をもとに、どの仮説が妥当であるかを検討した。

対象としたのは福島県浜通り周辺の正断層型の誘発地震と秋田県中部の横ずれ型の誘発地震である。Imanishi & Ellsworth (2006) の Multi-Window Spectral Ratio (MWSR) 法により、マグニチュード3.5以上の誘発地震の応力降下量を推定した。波形データは周辺のHi-net観測点の記録を利用した。MWSR法では経験的グリーン関数となる地震が必要であるが、解析対象の地震よりもマグニチュードが1以上小さい、震源が近くて波形の相似性が高い、という条件をもとに選んだ。推定された応力降下量はどちらの地域でも10 MPa前後であり、現段階で1 MPaを下回るものは見つからない。この結果は、誘発地震の発生を説明する上で、仮説1は難しいことを示唆している。以上より、仮説2と仮説3の可能性が残されるが、両方のメカニズムが関与していることも充分考えられる。ただし、仮説3のメカニズムが関与する場合には、間隙水圧が増加しても誘発地震の応力降下量（10 MPa前後）を上回る断層強度が保持されている必要がある。

謝辞：解析には防災科研（Hi-net）の波形データを利用させていただきました。

キーワード: 誘発地震, 東北地方太平洋沖地震, 応力降下量, 応力場, MWSR法

Keywords: induced earthquake, the 2011 Mw 9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, stress drop, stress field, MWSR method