

応力逆解析のための解空間

A parameter space for stress tensor inversion

佐藤 活志 [1]; 山路 敦 [1]; 大坪 誠 [1]

Katsushi Sato[1]; Atsushi Yamaji[1]; Makoto Otsubo[1]

[1] 京大・理・地球惑星

[1] Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ.

応力テンソルインバージョンは、規格化応力テンソル、すなわち主応力方位と応力比を決定する手法である。応力比は、 $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ で定義され、3つの主応力値の間の比を表す。主応力方位と応力比による表現は学術的な意味を捉えやすいものだが、最適解を探索するためにあらゆる規格化応力テンソルを列挙するには不向きである。なぜなら、方位の変化がテンソルそのものに与える影響の大きさは、応力比に依存するためである。Sato and Yamaji (2006) は、この問題を解決する5次元パラメータ空間を提案した。この空間では、単位球面上の点が規格化応力テンソルに1対1対応し、2点間の距離が規格化応力テンソル同士の違いの尺度である「stress difference」(Orife and Lisle, 2003) に等しいことである。Stress difference は、応力状態の違いによって生じる断層の滑り方向の変化の期待値に1対1対応する (Yamaji and Sato, this meeting) という性質があり、応力逆解析の問題を扱うために適した尺度であるといえる。

本パラメータ空間は、応力逆解析において次のように活用される。

(1) 最適解を探索するための一様なグリッド (解の候補の集合) を、5次元単位球上に一様分布する点群として定義することができる (Sato and Yamaji, 2006)。このグリッドは stress difference という尺度に従って一定間隔に応力テンソルを配置するものである。一様グリッドによって精度が均一化され、また解の探索に要する時間が短縮される。さらに、一様な応力テンソル群には、軸性応力 ($\Phi = 0, 1$) よりも三軸応力 ($\Phi \sim 0.5$) が多く含まれるという知見も得られた。

(2) 応力テンソルインバージョンを簡明な幾何問題として解くことができる。ひとつの断層スリップデータに適合する応力テンソルは、5次元単位球上の半大円上の点に対応することがわかった (Fry, 1999, 2001 を改変)。これを用いて、Yamaji et al (2006) は Hough 変換によるインバージョン手法を提案した。この手法では、断層データ群によって指定される半大円群を重ね合わせることで単位球面上に適合度分布を定義し、その極大値を与える点が表す応力テンソルを求める。複数のピークを検出することで、不均一な断層スリップデータ (複数の応力に起因する断層の混合) も処理することができる。

(3) 不完全な断層データを逆解析に利用できるようになった。露頭にあらわれた地質時代の断層を観察するとき、断層面上の擦痕を観察できず、変位の方位がわからない場合や、変位のマーカーが無いために剪断センス (正断層と逆断層の区別) が判定できない場合がある。そのような不完全データも、応力に対して弱い制約を課すことができ、その制約条件をパラメータ空間の領域として表現することができる。不完全データに対する応力の適合領域を、完全データと併せて重ね合わせることで、前述の Hough 変換によるインバージョン法が不完全データにも拡張される。ところで、地震の震源解データも、2つの節面から断層面を特定できないという点で不完全データである。2つの節面の両方を許すような適合領域を与えることで、節面の選択を必要としないインバージョンが構成できる。

(4) 統計的な手法の適用が容易になった。例として、情報量規準を用いて不均一な断層データから読み取るべき応力テンソル数を決定する手法を紹介する (佐藤, 本大会 で詳述)。まず、Hough 変換法で得られる5次元球面上の適合度分布に、EM アルゴリズムを用いて混合 von Mises-Fisher (vMF) 分布を当てはめる。混合する分布数を様々に変えて、最小記述長 (MDL) 原理で最適モデルを決定する。混合された vMF 分布の集中度パラメータによって、解の安定性を評価することもできる。この安定性は、stress difference の尺度に従って測られる。

本発表のパラメータ空間は、応力逆解析の解析プロセスの見通しを良くするものである。この空間の利用を利用すれば、様々なインバージョンの手法を幾何学的に評価できるだろう。