

SCG061-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 14:00-16:30

計算グリッドの見直しによる応力インバージョンの改良 Improvement of stress tensor inversion by the revision of computational grid

山路 敦^{1*}, 佐藤 活志¹

Atsushi Yamaji^{1*}, Katsushi Sato¹

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.

応力インバージョンに使う計算グリッドを、球コードを利用することで改良し、応力の分解能を向上させることができた。球コードというのは、この場合、5次元空間の単位球面上にほぼ等間隔に分布する、6万個の点の集合である。この配置をつくるために、まず、この球面上にランダムに6万個の点をばらまいて初期配置とし、数値的最適化を行った。具体的には、それらの点が同一電荷を持つ粒子の位置を表すとして、全静電ポテンシャルを最小化する配置を、パソコンで3ヶ月かけて計算した。

応力インバージョンでは、それらの点ひとつひとつが異なる応力状態を表す。本研究により、6万通りの応力状態がほぼ「等間隔」に定義されたことになる。

それら応力状態の集合を計算グリッドとして、多重逆解法に組み込んだ。応力をいくつか仮定し、100条ほどの断層がそれらのいずれかで動いたとして人工データを生成し、同法で処理して仮定した応力たちが検出できるか検討した。その結果、従来の計算グリッドを使う場合より、応力の分解能をあげることができた。

キーワード: 応力インバージョン, テクトニクス, 球コード, 発震機構, 断層

Keywords: stress tensor inversion, tectonics, spherical code, focal mechanism, fault

SCG061-P02

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 14:00-16:30

地震波振幅データを用いた応力場と個々のメカニズム解の同時決定 Simultaneous determination of tectonic stress field and individual focal mechanisms from seismic amplitude data

今西 和俊^{1*}

Kazutoshi Imanishi^{1*}

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

対象とする領域内で複数の断層すべりデータが得られていれば、3つの主応力の方向とその応力比の情報を推定することができる。これは応力テンソルインバージョン法と呼ばれている手法であり、地質学と地震学の両分野において広く活用されている。応力テンソルインバージョン法を地震学で適用する際、発震機構解を入力データとするのが一般的である(例えば、Gephart and Forsyth, 1984; Michael, 1984)。一方、1990年代に入ると発震機構解推定の元となるP波初動極性をデータとし、応力場を直接的に推定するという優れた方法が提案されてきた(例えば、Horiuchi et al., 1995; Loohuis and van Eck, 1996; Abers and Gephart, 2001)。本研究ではこの方法をさらに発展させるため、振幅データも同時に利用する方法に拡張することを試みた。

解析手順はP波初動極性を利用する方法と基本的に同じであり、2つのループの入れ子になっている。外部ループは応力場に関するもので、主応力の方向、応力比を適当な間隔に区切ってサーチする。内部ループは個々の地震の発震機構解推定に関するもので、外部ループで与えられた応力場で説明できる発震機構解(SFM; Stress-consistent Focal Mechanisms)の中で残差が最も小さい解を探索する(P波初動極性をデータとする方法では極性不一致の個数が最小となる解を探索する)。この際、SFMは走向と傾斜角を適当な間隔で区切って与え、それぞれの走向&傾斜角の組み合わせに対してすべり角をWallace-Bott 仮説(断層すべりは断層面に作用するせん断応力の方向におこる)に基づき求める。解析対象の地震全てについて同様の探索を行い、残差の総和Sを求める。以上の2つのループの結果、Sが最小になる応力場が推定されると同時に、個々の地震の発震機構解も決定されることになる。以下では便宜上、振幅データを用いた推定法をASTI法(Amplitude-based Stress Tensor Inversion)、極性データを用いた推定法をPOSTI法(Polarity-based Stress Tensor Inversion)と呼ぶことにする。

手法の有効性を確認するため、人工的に作成した20個の発震機構解データを用いた数値実験を行った。断層の走向と傾斜はランダムに与え、すべり角はWallace-Bott 仮説で期待される角度に10度の誤差を与えた。応力テンソルインバージョン解析の入力データとなるP波振幅値(P波極性)は、それぞれの解に対して20個作成した。その際、観測点は震源球状にランダムに分布していると仮定した。この人工データを用いた数値実験の結果では、どちらの方法でも正しい応力場を推定することができた。しかし、発震機構解については、POSTI法では入力データと異なる解になる地震がいくつかあった。各地震の入力データを10個に減らした場合、ASTI法では依然として正しい応力場が推定されたが、POSTI法では異なる結果が推定されるようになった。観測データが少ない地震が大多数のデータセットの場合、ASTI法の適用が有効であると同時にPOSTI法による結果には注意が必要であろう。

参考文献

- Abers, G., and J. Gephart (2001), *J. Geophys. Res.*, 106(B11), 26523-26540.
Gephart, J., and D. Forsyth (1984), *J. Geophys. Res.*, 89(B11), 9305-9320.
Horiuchi, S. et al. (1995), *J. Geophys. Res.*, 100(B5), 8327-8338.
Loohuis, J. and T. van Eck (1996), *Phys. Chem. Earth*, 21, 267-271, doi:10.1016/S0079-1946(97)00047-5
Michael, A. (1984), *J. Geophys. Res.*, 89(B13), 11517-11526.

キーワード: 応力場, メカニズム解, 地震波振幅データ, 応力テンソルインバージョン

Keywords: stress field, focal mechanism, seismic amplitude data, stress tensor inversion

SCG061-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 14:00-16:30

応力逆解析における応力距離の重要性とその物理的意味 Importance of stress distance in stress inversion analysis and its physical meaning

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.

断層スリップデータから地殻応力を推定する手法として、応力逆解析法が広く普及している。応力状態が時間的・空間的に変化する場合、異なる応力に起因する断層が混在したデータセットが得られ、複数の応力を区別して検出することが求められる。応力テンソルを客観的に区別するためには、違いを測る尺度が必要である。また、最適解の精度を記述するなどの統計的な扱いや、異なる手法による解析結果の比較においても、応力の違いの尺度は有用であろう。しかし、応力テンソルどうしの違いを定義するのは容易ではない。応力逆解析が決定しようとするのは、規格化された応力テンソルであり、3つの主応力軸方位と応力比の計4つのパラメータで記述される。これらは、応力楕円体の方位と形を表す。2つの楕円体を比較するとき、方位の違いと形の違いをどのように総合するかが問題となる。

Orife and Lisle (2003) は、この問題の解決として stress difference という尺度を提案した。彼らは様々な応力テンソルの違いを計算してみせ、この尺度が良好な性質を持っていることを示した。例えば、 σ_2 と σ_3 の値がほぼ等しく応力楕円体が prolate 型に近い場合、 σ_1 軸の方位が共通の応力テンソルたちの間では stress difference は小さい値をとる。Stress difference は有用な尺度だったが、その性質が経験的にしか分かっていないことと、物理的意味が明らかでないことが問題であった。

Yamaji and Sato (2006) は stress difference に物理的意味を与えた。異なる応力は、断層面上に異なる方向の剪断応力を作らせる。Yamaji and Sato (2006) は、ランダムな方位の断層面における剪断応力方向の違いの期待値が、stress difference に「ほぼ」一対一対応することを発見した。言い換えれば、stress difference は断層面上の剪断応力方向の違いを基準に、応力テンソルの違いを測るのである。この性質は、Wallace-Bott 仮説（剪断応力方向が断層の滑り方向に一致するというモデル）に立脚する多くの応力逆解析法に親和的と言える。なぜなら、それらの手法は断層の滑り方向の違いが応力の違いを表すと考えているからである。

前述の物理的意味は、残念ながら、近似的かつ経験的なものであった。発表者は stress difference の定義式について考察を進め、Yamaji and Sato (2006) の意味づけが厳密には正しくないことを発見した。2種類の応力をランダムな方位の断層面に作用させるとき、stress difference は、2つの剪断応力方向のなす角の期待値ではなく、2つの剪断応力ベクトルの差ベクトルの長さの期待値に比例する。この比例関係は解析的に成り立つ。つまり、stress difference の値には、剪断応力の方向だけでなく大きさも関連しているのである。この発見は、応力逆解析法にとっては不都合である。Wallace-Bott 仮説は応力の大きさに言及しないが、断層の変位に必要な剪断応力の大きさを議論に加えるならば、摩擦係数や破壊強度などの物性を知らなければならない。通常の応力逆解析では主応力値は規格化されているが、断層面にはたらく応力の大きさは方位によって異なる。幸運なことに、stress difference を計算する際の規格化方法は、剪断応力の大きさの違いが大きいものではない。しかし、規格化の方法という意図しない効果が、stress difference の値に影響していることには注意が必要だろう。

引用文献

Orife, T. and Lisle, R.J., 2003. Jour. Struct. Geol. 25, 949-957.

Yamaji, A. and Sato, K., 2006. Geophys. Jour. Int. 167, 933-942.

キーワード: 応力逆解析, 応力距離, 応力角距離, 断層スリップデータ, 偏差応力空間

Keywords: stress tensor inversion, stress difference, angular stress distance, fault-slip data, deviatoric stress space

SCG061-P04

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 14:00-16:30

異なる深度から得られる断層スリップデータから応力状態の不均一性を明らかにする手法と意義について

Method and significance to determine stresses from heterogeneous fault-slip data obtained in different depths

大坪 誠^{1*}

Makoto Otsubo^{1*}

¹産総研・地質情報

¹AIST/IGG

断層群から得られる断層スリップデータ(走行傾斜, すべり方向, 運動センス)において, 単一の応力のもとで動いていない断層群から得られる断層スリップデータを不均一 (heterogeneous) なデータとよぶ. 対象とする地域において, 応力場は, 空間的にも時間的にも変化する可能性があるだろう. 不均一なデータは, 応力状態の不均一性を理解する手がかりになり, 応力状態が時間的・空間的に連続的に変化しているという描像を明らかにすることに繋がる.

深度方向の応力場の空間的な変化に注目すると, 異なる深度において断層スリップデータを得ることができる手段としては, 地表露頭, ボーリングコア, 地震の発震機構 (focal mechanism) があげられる. 不均一なデータから, 断層を動かした複数の応力を検出する手法の一つとして, 多重逆解法 (Yamaji, 2000; Otsubo and Yamaji, 2006) があり, それらの不均一なデータから深度方向の応力状態の不均一性を明らかにすることが可能となってきた.

本発表では, ある対象地域において, それぞれ深度が異なる地点から得られる断層スリップデータから詳細な応力場を明らかにする意義を, 多重逆解法を適用した結果を例に示す.

引用文献:

Otsubo, M. and Yamaji, A. (2006) Improved resolution of the multiple inverse method by eliminating erroneous solutions. *Computers & Geosciences*, 32, 1221-1227.

Yamaji, A. (2000) The multiple inverse method: A new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 22, 441-452.

キーワード: 応力, 断層スリップデータ, 多重逆解法, テクトニクス, 地殻, 地震

Keywords: Stress, Fault-slip data, Multiple inverse method, Tectonics, Crust, Earthquake

SCG061-P05

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 14:00-16:30

断層スリップデータの適合度にもとづいた応力逆解析の段階褶曲テスト Incremental fold test for stress tensor inversion based on fitness evaluation to fault-slip data

藤内 智士^{1*}, 佐藤 活志², 芦 寿一郎³
Satoshi Tonai^{1*}, Katsushi Sato², Juichiro Ashi³

¹ 産総研, ² 京都大学, ³ 東京大学大気海洋研究所

¹ AIST, ² Kyoto University, ³ AORI, the University of Tokyo

We present a method of incremental fold test for the paleostress inversion of fault-slip data obtained from folded sedimentary rock, which provides not only the orientations of the three principal stress axes and the stress ratio, but also the relative timing of folding and faulting. The method is based on the stepwise backtilting of strata that was tilted before, during, or after fault activity. At each step, the rotated fault-slip data are analyzed by a stress inversion technique, based on the Hough transform. The inversion technique calculates the degree of fitness of all possible stresses to the fault data and detects the optimal fitness. The peak values of fitness are compared among the various backtilting steps to find the maximum value. The stress and the backtilting step that yield the maximum fitness are selected as the optimal solution. To assess the validity of the method, we applied it to artificial fault-slip datasets generated with hypothetical histories of folding and faulting and with known paleostresses. The proposed method succeeded in determining the supposed stresses and the relative ages of folding and faulting.

キーワード: 小断層, 応力逆解析, 褶曲テスト

Keywords: minor fault, stress inversion, fold test

SCG061-P06

会場:コンベンションホール

時間:5月25日 14:00-16:30

エシェロン構造の形成と応力場の関係の研究 - MPS 法による数値シミュレーション -

Relation between formation of echelon faults and stress fields in rock mass-Simulation using MPS method-

今井 優希^{1*}, 三ヶ田 均¹, 後藤 忠徳¹, 武川 順一¹

Yuki Imai^{1*}, Hitoshi Mikada¹, Tada-nori Goto¹, Junichi Takekawa¹

¹ 京大院工

¹ Kyoto Univ.

地震や地殻変動などによって形成される断層面周辺には、主せん断面といくらかの角度をなす方向に複数の破砕面が現れることがある。このき裂群をエシェロンと呼び、日本では伊豆半島沖合に典型的なエシェロン構造が確認できる。その発生メカニズムや発生形態、応力場との関連性については力学的に明確な解答が得られておらず、これを明らかにすることが重要な課題として残されている。

本研究では、岩体にエシェロン構造が発生するのに必要な条件を調べるため、MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法 (Koshizuka and Oka, 1996) を用いて数値シミュレーションを行った。MPS 法は非圧縮性流れの数値計算手法として開発された粒子法の一つであり、連続体を有限個の粒子によって表現し、勾配や発散などの偏微分演算子に対する粒子間相互作用モデルを用いて、連続体の運動を離散粒子群の運動によって近似する。このため、従来固体の変形に関する計算法として用いられてきた差分法や有限要素法のように格子やメッシュを必要とせず、形状に合わせて計算点となる粒子を配置するだけでよい。そのため、差分法や有限要素法では解析が困難であった大変形や破壊現象も比較的容易に扱うことができる。

計算モデルとして、2次元長方形弾性体を考え、一軸圧縮、三軸圧縮状態それぞれについてエシェロン構造が発生するかを調べた。また、三軸圧縮状態において、岩体の破壊包絡線を定義する粘着力や側面に掛かる拘束圧を変化させることで、これらが共役なき裂の発達にどのような影響を与えるかを考察した。

数値計算の結果、粘着力や拘束圧が高いほど共役なき裂が密に発達し、拘束圧がき裂の傾きに影響を与えることが確認された。このことから、エシェロン構造の発達した岩体において、その分布や方向から、現在加えられている応力や過去に加えられた応力の方向、大きさを推定できる可能性が示された。

キーワード: エシェロン, 粒子法, MPS 法, 圧縮試験

Keywords: echelon, particle method, MPS method, compression test