

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740364

研究課題名（和文） 応力逆解析法の基本原理の検証

研究課題名（英文） Examination of the basic assumption of stress tensor inversion methods

研究代表者

佐藤 活志 (SATO KATSUSHI)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：70509942

研究成果の概要（和文）：

応力逆解析法は断層の方位から地殻応力を推定する手法である。この手法は、広域的な応力状態から予測される方向に断層が滑るという仮説に基づいている。本研究は数値シミュレーションによってこの仮説を検証した。その結果、従来想定されていたよりも断層の滑り方向がばらつくことを発見した。天然の断層群の方位を測定し比較すると、同様のばらつきが見られた。今後は、断層滑り方向のばらつきを十分に考慮した応力逆解析法の開発が必要である。

研究成果の概要（英文）：

Stress tensor inversion methods are widely used to estimate the earth's crustal stress state from fault-slip orientations. The methods are based on an assumption that the slip directions of faults are consistent with the regional stress state. This study examined the assumption through numerical experiments. As a result, a significant dispersion of slip directions was found, which is also supported by natural fault-slip data. The inversion methods should be designed so as to take the dispersion into account.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：構造地質学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：応力・断層・逆解析・個別要素法

## 1. 研究開始当初の背景

地球の岩石圏の変動を動力的に理解するためには、プレートテクトニクスによって記述される「運動」だけでなく、「応力」の情報を得る必要がある。応力逆解析法は、多数の断層の方位を元に地殻応力を推定する手法であり、特に構造地質学と地震学の分野で広く用いられてきた。構造地質学において

は、地層を切る断層群から地質時代の応力場変遷史が推定される。地震学においては、地震波の観測で得られる発震機構解が解析され、現在の地球表層の応力場の変動が推定される。

断層の方位（観測量）から応力（未知量）を推定するためにはフォワードモデル（仮説）が必要である。応力逆解析法の基本原理

である Wallace-Bott 仮説は、断層面にはたらく剪断応力と断層変位方向とが平行であると仮定する。これは、地殻が等方線形な構成方程式に従うという仮定である。しかしながら、地殻の巨視的な構成方程式は不明であり、仮定の妥当性を検証する必要がある。

これまでも Wallace-Bott 仮説の妥当性に関する議論はあり、例えば1条の断層面上の変位方向のばらつきを調べる数値実験が行われてきた。しかし、広域的な応力と多数の局所的な断層変位との対応関係に関する知見は得られていない。

## 2. 研究の目的

多数の小断層や微小地震の発震機構から広域テクトニクスを理解するために、Wallace-Bott 仮説に立脚した応力逆解析法が利用されている。本研究は、数値シミュレーションと天然の断層系の観察を通じて、巨視的な応力と微視的な小断層について Wallace-Bott 仮説が成立するか確かめることを目的とする。

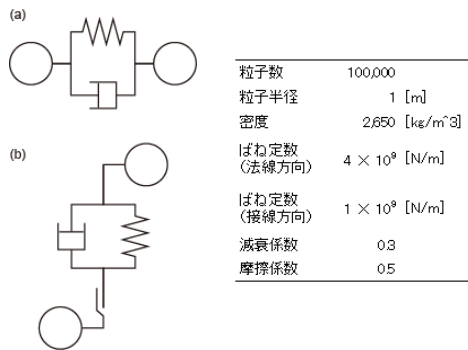


図1. 粒子間相互作用のモデル. 表に物性定数を示す。(a) 法線方向の力は、弾性力(ばね)と粘性力(ダッシュポッド)を並列した Voigt 体で表す。(b) 接線方向は、Voigt 体に摩擦を表すスライダを加えた。

## 3. 研究の方法

### (1) 個別要素法

本研究では、断層運動を再現し、その変位方向を観察するために数値シミュレーションを行った。地質構造を再現する目的で、砂箱によるアナログ実験も広く行われている。数値シミュレーションの利点は、アナログ実験では困難な、変形進行中の地質体内部の観察や、応力や歪などの力学的情報の取得が容易なことである。また、条件の変更と繰り返し試験も行い易い。

個別要素法は、地質体を微小粒子の集合体(粒状体)で表現し、粒子同士の力の及ぼし合いを評価して運動方程式を解くことで、変形を再現する手法である。本研究では、図1

に示す球形粒子を用いた。粒子同士の力学的相互作用を、Voigt 体(弾性ばねと粘性を表すダッシュポッドを並列したモデル)で表し、接線方向には摩擦を表すスライダを導入した。本研究は、特定の地質構造を再現することを目的とせず、応力と断層の関係のみに着目するため、重力を含む体積力は作用させずに粒子間の面積力のみを評価した。

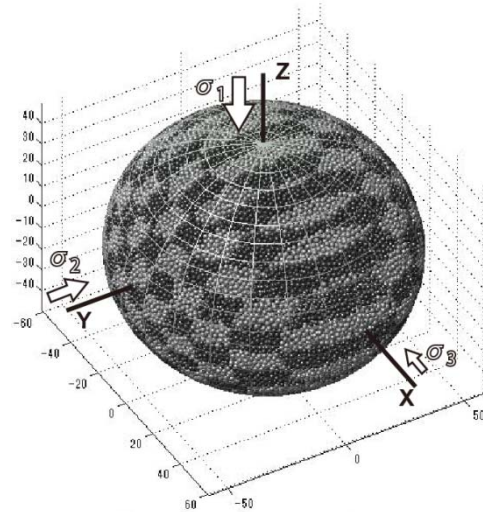


図2. 変形中の粒子配置. 変形を可視化するために粒子の色を変えてあるが、物性の違いはない。X, Y, Z は主歪軸。σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>, σ<sub>3</sub> は、主応力軸。

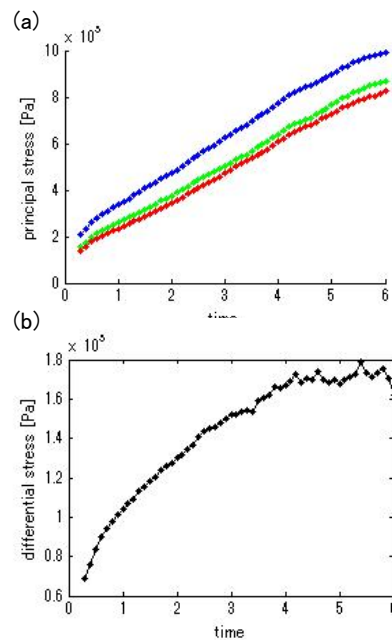


図3. (a) 変形実験中の主応力(σ<sub>1</sub>:青, σ<sub>2</sub>:緑, σ<sub>3</sub>:赤). (b) 差応力.

### (2) 初期配置の生成

数値実験の準備段階として、変形前の粒子の初期配置を次のように生成した。まず、10万個の半径 1m の球形粒子を、半径 75m の球

体内部にランダムに、かつ重なりがないように配置する。次に境界である球体の半径を、約 10MPa (地下 400m 程度に相当する) の封圧が達成されるまで徐々に小さくした。このとき、粒子間には弾性力と粘性力が働き、運動方程式に従って速度と回転の角速度が生じることで再配置が行われる。また、境界面に接した粒子は、境界の外側に置いた同じ物性の粒子から力を受けるものとした。

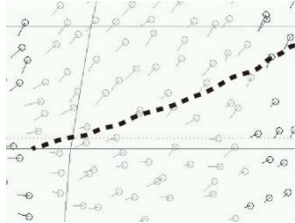


図4. 計算領域の内部に生じた断層の例。丸が粒子の位置、線が速度を示す。相対速度の大きい面(点線)を断層とみなす。

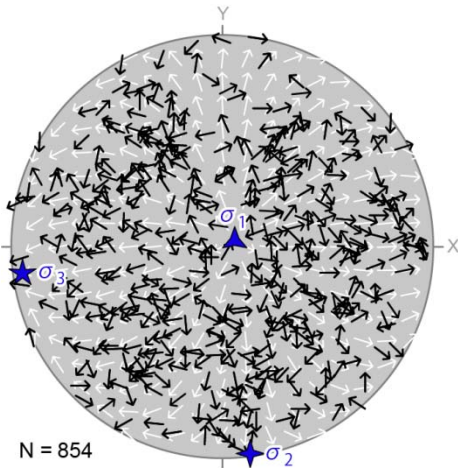


図5. 数値シミュレーションで形成された小断層群の方位の例。N は断層数。黒い矢印の位置が断層面の法線方向、矢印の向きが下盤の運動方向を示す。青い星印は広域応力の主軸、白い矢印は広域応力が各方向の断層面に及ぼす剪断応力方向を示す。X, Y は主歪軸。下半球等積投影。

### (3) 変形の再現

断層は異方的応力状態の元で生じる。すなわち、互いに直交する方向の主応力(最大圧縮： $\sigma_1$ 、最大圧縮： $\sigma_2$ 、最大圧縮： $\sigma_3$ )の値が異なることが断層形成に必要である。本研究では、計算領域の形状を球から楕円体へと変形させ、そのときに生じる応力状態と断層の方向を観測した。変形中の粒子配置の例を図2に示す。変形する境界の歪速度は一定とした。計算領域全体で平均した応力状態を広域応力とみなす。図3は、実験中の広域応力の主応力と差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )の例である。

この例では、巨視的な変形が弾性変形から塑性変形に移行する様子を捉えている。

局所的に生じた小断層の例を図4に示す。隣り合う粒子の速度差が大きい部分が面的に連続したものを小断層とみなし、その面(断層面)と相対速度(断層変位)の方向を取得した。

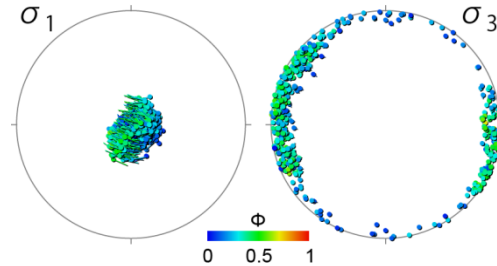


図6. 数値シミュレーションで形成された小断層を解析した結果。左が最大圧縮、右が最小圧縮方向、色が応力比を示す。下半球等積投影。

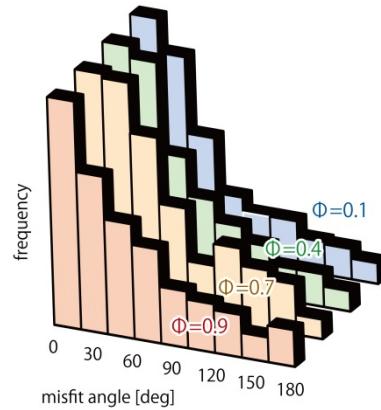


図7. 数値シミュレーションで得られたミスフィット角のヒストグラム。Phiは応力比。

## 4. 研究成果

### (1) 数値シミュレーションの結果

シミュレーションの結果、ほぼ一定の応力下でも様々な方向の小断層が生じた(図5)。また、これらの小断層に応力逆解析法を適用すると、観測された広域応力とほぼ一致する最適応力解が得られた(図6)。

Wallace-Bott 仮説成立の指標として、広域応力から計算される剪断応力と実際の断層変位方向とのなす角(ミスフィット角)を用いる。Wallace-Bott 仮説に完全に合致するならばミスフィット角は  $0^\circ$  であるが、シミュレーションの結果は大きな外れを示した(図7)。ミスフィット角が  $0^\circ$  に近いものが多く、平均的には Wallace-Bott 仮説が成り立つと言える。しかし、ミスフィット角が非常に大きい断層も相当数含まれており、裾の長い頻度分布となった。その半値幅は約  $40^\circ$  である。



図7は、境界条件の変更により応力比 ( $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ : 3つの主応力の比) を変化させた結果を示すが、ミスフィット角のばらつきは応力比によらず大きかった。

## (2) 天然の断層との比較

天然の断層群が、数値シミュレーションと同様に Wallace-Bott 仮説から外れるか検証した。千葉県房総半島に分布する鮮新統～更新統の上総層群を切る小断層 (図8) の方位を図9に示す。断層面のばらつきは、シミュレーション結果よりも小さく、NNE-SSW 走向の高角正断層が多いが、横ずれ、斜めずれ断層も含まれる。応力逆解析を行った結果、WNW-ESE 方向の水平引張応力 (正断層型応力) が得られた (図10)。この広域応力から計算される剪断応力を基準に、Wallace-Bott 仮説の成立を検証した (図11)。ミスフィット角が小さい断層が多いが、大きいミスフィット角の断層もあり、頻度分布の裾は長い。その半値幅は  $30^\circ$  程度であり、概して数値シミュレーションの結果と一致した。



図8. 上総層群の小断層の例。右側の岩体がずり落ちる正断層。

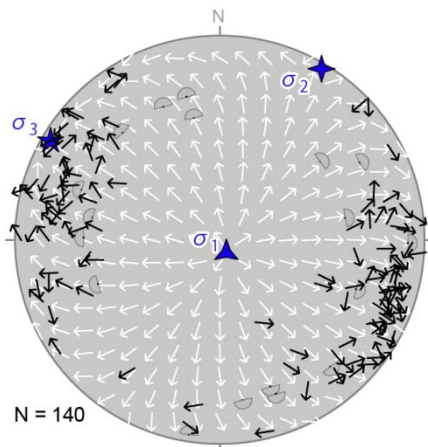


図9. 上総層群の小断層の方位。シンボルの意味は図5と同様。扇形は矢印の向き得る範囲を示す。主応力軸は応力逆解析により得られたもの (図10)。

## (3) 本研究の意義

一定の広域応力のもとで Wallace-Bott 仮説は平均的には成立するものの、従来想定されていたより断層変位方向は大きくばらつくことが示された。応力逆解析法を用いる研究では、慣習的にミスフィット角は  $30^\circ$  以下であると推論されることが多く、 $30^\circ$  よりも大きいならば、別の応力に起因する断層と解釈されてきた。応力逆解析法の計算過程においても、 $30^\circ$  程度の閾値が用いられている場合が多い。本研究の結果は、そのような断層の解釈や、解析手法自体に見直しを迫る。前述の上総層群の小断層群は、変位方向にばらつきがあるものの、一定の応力のもとで形成されたと解釈できる。変位方向の大きなばらつきを考慮した解析手法の開発が求められる。

本研究のシミュレーションで設定した実験条件は限られており、どのような条件ならば Wallace-Bott 仮説が成立するのか、より網羅的に検討しなければならない。歪速度、封圧、要素の摩擦特性や強度など、巨視的・微視的な条件を変更しながら、応力逆解析法の適用条件を解明することが必要である。

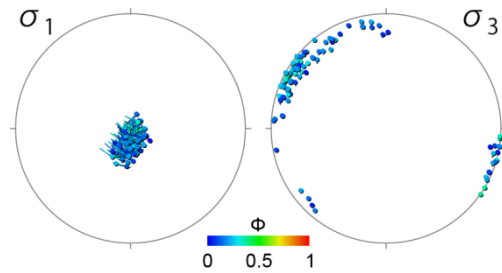


図10. 上総層群の小断層に応力逆解析法を適用して得られた応力状態。シンボルの意味は図6と同様。

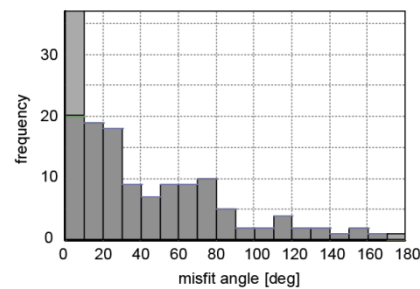


図11. 上総層群の小断層のミスフィット角のヒストグラム。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

① Sato, K., Physical Meaning of Stress

Difference for Fault-Slip Analysis, Mathematical Geosciences, 査読有, 2012, 印刷中.

DOI:10.1007/s11004-012-9395-4

- ② Sato, K., Fast multiple inversion for stress analysis from fault-slip data, Computers & Geosciences, 査読有, 40, 2012, 132-137.

DOI:10.1016/j.cageo.2011.08.003

- ③ Tonai, S., Sato, K. and Ashi, J., Incremental fold test for paleostress analysis using the Hough transform inverse method, Journal of Structural Geology, 査読有, 33, 2011, 1158-1168. DOI: 10.1016/j.jsg.2011.05.005

[学会発表] (計7件)

- ① 佐藤活志, 応力解析のための高速多重逆解法とノイズ低減, 日本地質学会 118 年 学術大会, 2011 年 9 月 10 日, 茨城大学.
- ② Sato, K., A wide-use method of fault-slip analysis: its principle and applications, Stress controls on faulting, fracturing and igneous intrusion in the Earth's crust: A meeting to commemorate the work of Ernest Masson Anderson, 2010 年 9 月 5 日, グラスゴー大学 (英国).
- ③ 佐藤活志, 応力逆解析手法の比較研究: 多重逆解法と Hough 変換による逆解法, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会, 2010 年 5 月 25 日, 幕張 (千葉県).

[その他]

ホームページ等

[http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/k\\_sato/](http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/k_sato/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 活志 (SATO KATSUSHI)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 70509942

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし