

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03720

研究課題名(和文) 小断層群から複数の摩擦係数を分離検出する応力逆解析法の開発

研究課題名(英文) Inversion method to detect multiple stress tensors and friction coefficients from fault-slip data

研究代表者

佐藤 活志 (Sato, Katsushi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70509942

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：断層方位データから、複数の地殻応力と摩擦係数を推定する手法を開発した。断層の滑り方向は剪断応力に平行であると期待される。断層面の方位は断層不安定度が高い方向に集中すると期待される。これらの2つの条件を組み込んだ評価関数を用いた。

まず、評価関数値が大きい解を図示し、複数の解を視認する手法を開発した。次に、最適解に対する残差の頻度分布に確率分布モデルを当てはめる手法により、情報量規準を利用して複数の解を自動認定する手法を開発した。新手法を第四系礫南層群(大分県別府湾周辺)を切る断層群に適用したところ、引張応力の方向と摩擦係数が変化したことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地質時代の応力や摩擦係数の時空間変化を検出することは一般に難しい。地殻の強度を決定付ける摩擦係数は、標準的な値を想定して様々な議論が進められるが、岩相や断層帯の成熟度によって変化するので、実際の値を推定することが重要である。本研究により応力と摩擦係数の変動史を解明することが可能になり、プレート運動などの外力に対する地殻の応答を理解する研究が進むと期待される。本研究で開発した手法は、断層面の方位を特定できるならば地震のデータにも適用できる。地震や活断層のデータへの適用により、防災や地盤安定性の評価にも寄与できると期待される。

研究成果の概要(英文)： Stress tensor inversion method was improved to determine multiple stress conditions and friction coefficients of faults. Stress condition controls shear stress directions on fault planes, which are expected to be parallel with observed slip directions (Wallace-Bott hypothesis). Observed fault planes are expected to have large fault instability values, which are calculated from both stress condition and friction coefficient. This study combined the above-mentioned two criteria to compose a new objective function of inversion analysis.

Firstly, a graphical method to visualize the feasible solutions was developed. Secondly, detection of multiple solutions was automated by fitting stochastic model to frequency distribution of residuals. The new method was applied to natural faults cutting the Quaternary Sekinan Group around Beppu Bay. Two tensional stresses were detected: N-S tension with moderate friction coefficient and E-W tension with low friction coefficient.

研究分野：構造地質学

キーワード：応力逆解析 小断層解析 摩擦係数 断層不安定度 情報量規準

1. 研究開始当初の背景

応力逆解析法は、地質調査（構造地質学）や地震観測（地震学）によって得られる断層の方位データをもとに、地殻応力状態を推定する手法である。応力逆解析法は、剪断応力の方向に断層が滑るという単純な仮定「Wallace-Bott 仮説」に基づいている。断層の運動には、摩擦係数、間隙流体圧、差応力などの未知パラメタが影響を与えると考えられるが、Wallace-Bott 仮説はそれらに依存しないという利点がある。すなわち、仮定が緩く、未知パラメタに関する事前情報を必要としないのである。例えば、断層破碎帯物質が泥質な場合や、間隙流体圧が高い場合には、非常に小さな剪断応力でも断層が滑り得る。そのような場合にも適用できるのが、Wallace-Bott 仮説に基づく応力逆解析法の利点である。

しかしながら、Wallace-Bott 仮説の仮定の緩さは、断層データから応力を強く制約できないために応力逆解析における検出能が低いという欠点も生んでいる ([1])。検出能を上げるためには、仮定を強くすればよい。例えば、一定の摩擦係数を好むような目的関数を用いたり、滑り傾向係数 ([2]) が大きい断層を高く評価することができる。しかしこれらの方法を用いるためには、摩擦係数が既知である必要がある。無傷（既存の断層などの弱面が存在しない）の岩石の摩擦係数は、0.6~0.85 程度であることが知られている（Byerlee の摩擦則）が、日本列島のように地殻変動が活発な地域で岩石が無傷であると想定することは適切でない。天然の断層破碎帯物質を採取し、岩石力学実験によって摩擦係数を決定することはできる。しかしながら、地下の断層のサンプルを得ることは困難であるし、地表に露出した地質時代の断層については、過去の物性を復元することが難しい。

そこで、断層面の方位分布から摩擦係数を決定する手法 ([3]) が開発され、これを応力逆解析法に組み合わせることで検出能の向上を達成してきた。天然の断層の方位は多様である。その多様性は、変形する岩体の既存の弱面（古い断層、節理や地層面など）の再活動によって説明できる。剪断応力と有効法線応力との比が一定の摩擦係数を超えたときに断層が活動すると考えれば、図1の白丸の分布域に相当する断層群が活動する。このモデルの優れた点は、間隙流体圧や差応力の変動を考慮している点である。すなわち、それらの変動によって断層活動が繰り返された場合に生じる断層面方位分布を想定し、観測された方位分布をよく説明する摩擦係数を算出する。この手法は画期的なものとして今後の応用研究が期待され、地質時代の断層だけでなく、地震の発震機構解データへの適用も始まっている。

検出能の向上には成功する一方で、これまでに開発できた手法は多数の断層に対して単一の解（応力と摩擦係数の組）を与えるだけのものであった。すなわち、解析する断層群が複数の応力状態で形成されたものの混合である場合に、それらを分離することができない手法であった。

地殻応力は時空間変化する。例えば、プレートの運動方向が変化すれば、地殻にはたらく応力が変化する。地質時代の古応力を記録した断層群はそのような変動を反映し、多様な方位分布を示す。解析対象の時空間範囲が広い場合には、複数の応力および摩擦係数を分離して検出できる手法が必要である。

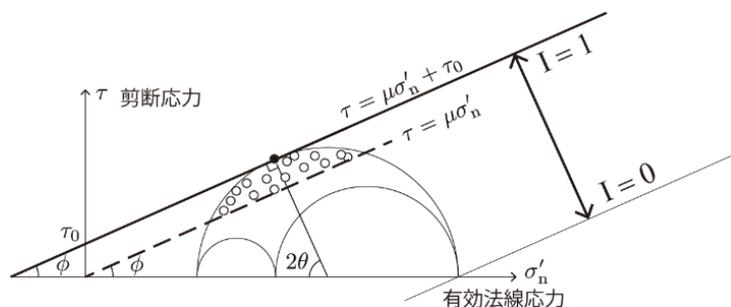


図1 摩擦係数 (μ)、内部摩擦角 (ϕ)、fault instability (I) の関係を示す Mohr ダイアグラム。

2. 研究の目的

本研究は、断層群の方位解析によって複数の摩擦係数と応力を分離検出する応力逆解析法を開発した。この手法の応用により、多様な物性を持つ断層群の解析が可能になり、地殻の応力状態と力学特性の時空間変化を解明することが可能になると期待される。

3. 研究の方法

以下のステップで研究を進めた。

- (1) 断層データに対する解（応力と摩擦係数）の適合度を可視化し、複数の解を視認する手法を開発する。
- (2) 確率分布のあてはめにより複数の解を自動認定する手法を開発する。解の数は情報量規準に基づいて最適化する。

各ステップにおいて、模擬データの解析による性能検証を行った後、天然の断層データを収集し適用した。

4. 研究成果

(1) 複数の解を図から視認する手法

解（応力と摩擦係数）の適合度を、Wallace-Boot 仮説に基づく滑り方向の適合度と、fault instability の積によって評価する手法を開発した。適合度の高い解をステレオ投影図に図示することで、図から複数の解を視認できる。図2に天然の断層データ（大分県別府湾南岸の第四系礫南層群を切る断層群）の解析例を示す。引張方向の異なる2つの正断層型応力が検出された。南北引張応力は応力比が小さく、高い摩擦係数（内部摩擦角=約 45° ）を持つ。東北東-西南西引張応力は応力比が大きく、中程度の摩擦係数（内部摩擦角=約 30° ）を持つ。この手法は、不完全な断層データ（断層条線や剪断センスが露頭で判別できないもの）にも適用できる利点がある。しかし、解の視認において解析者の主観を排除することが難しい。

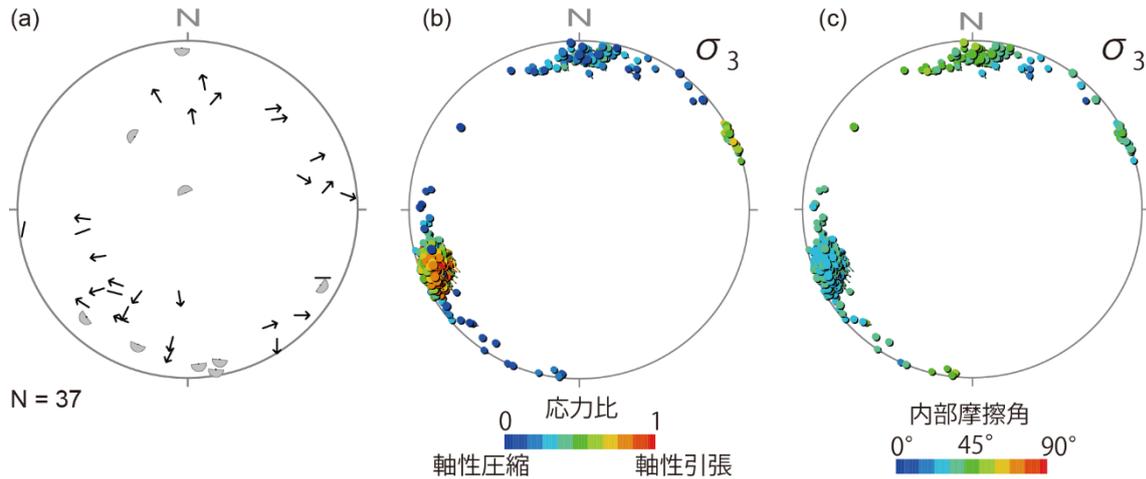


図2 (a)断層スリップデータ. (b),(c)適合度の高い応力の引張応力軸. (b)の色は応力比, (c)の色は内部摩擦角を示す. いずれも下半球等積投影.

(2) 複数の解を自動認定する手法

岩脈の応力解析においては、データの方位分布に確率分布モデルを当てはめることで複数の解を自動認定できる ([4]). このとき、岩脈のデータ数を用いて情報量規準を算出することで、応力数を最適化できる. 一方、断層の応力解析では、断層の方位分布をモデル化するのではなく、断層に適合する応力の適合度を計算する. 解空間（偏差応力空間）に適合度分布を描くことはできるが、解空間に分布する「データ」の数は人為的な計算グリッド数に依存するため、情報量規準に基づいた応力数の最適化ができない.

そこで本研究は、解（応力と摩擦係数）に対して計算できる各断層データの残差の頻度分布に確率分布モデルを当てはめた. 残差のデータ数は断層データ数であるので、情報量規準を用いることができる. 図3の解析結果では、77 条の断層データ（大分県別府湾周辺の第四系礫南層群を切る断層群）から2つの応力と摩擦係数の組を検出した. 2つの水平引張応力が得られ、南北引張応力は中程度の摩擦係数（内部摩擦角= 24° ）、東西引張応力は低摩擦係数（内部摩擦角=

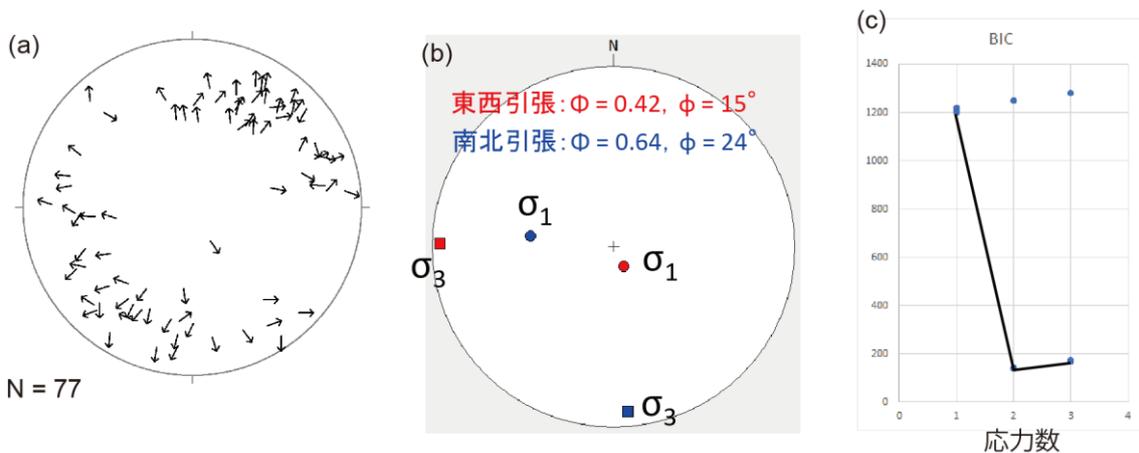


図3 (a)断層スリップデータ. 下半球等積投影. (b)検出された2つの応力(赤, 青)の主応力軸. Φ は応力比. ϕ は内部摩擦角. 下半球等積投影. (c)ベイズ情報量規準. 応力数2が最適.

15°) であった。この手法は、解析者の主観を排除して複数の解を決定できるのが利点である。ただし、不完全な断層データと完全な断層データを混合して解析できないという欠点がある。

本研究が開発した手法により、断層方位データ解析によって地質時代に起こった応力と摩擦係数の時空間変化を捉えられるようになった。今後は天然データへの適用研究とともに、不完全な断層データに応用しやすい手法の開発が望まれる。

<引用文献>

- [1] 佐藤ほか (2017) 地質学雑誌, 123, 391-402.
- [2] Morris et al. (1996) *Geology*, 24, 275-278.
- [3] Sato (2016) *Journal of Structural Geology*, 89, 44-53.
- [4] Yamaji and Sato (2011) *Journal of Structural Geology*, 33, 1148-1157.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤活志
2. 発表標題 断層方位解析による複数の応力と摩擦係数の同時逆解析法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤活志
2. 発表標題 小断層方位から複数の応力と摩擦係数を自動検出する逆解析法
3. 学会等名 日本地質学会第129年学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤活志
2. 発表標題 断層方位解析による応力と摩擦係数の同時推定法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安邊啓明, 佐藤活志
2. 発表標題 応力角距離に基づく規格化応力テンソルの階層的クラスタリング
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤活志
2. 発表標題 不均一な断層方位データに適合する応力数の自動決定法
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤活志
2. 発表標題 応力逆解析における小断層解析法と岩脈法のフォワードモデルの方法論的比較
3. 学会等名 日本地質学会130年学術大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関