

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03780

研究課題名（和文）断層方位解析による応力テンソル・摩擦係数の同時決定手法の開発

研究課題名（英文）Inversion method of fault-slip analysis to determine stress tensor and friction coefficient

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：断層方位データから、それらを活動させた地殻応力状態と、断層の摩擦係数を同時に推定する解析手法を開発した。断層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目的関数を考案し、逆解析に用いた。

新手法の性能を確認する数値実験を行うと、複数の応力状態の検出能が従来の解析法に比べて高まったことが確認された。新手法を第四系碩南層群（大分市）を切る断層群に適用したところ、約100万年前に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

応力逆解析は構造地質学だけでなく地震学の分野で広く用いられている。本研究により岩石の力学的挙動を決定付けるパラメタである摩擦係数を推定できるようになり、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。例えば地質時代の複雑な応力変遷史の解明や、地震発生条件の非一様性の理解に寄与できるだろう。また、活断層の摩擦係数評価等を行えば、地盤安定性の評価の高精度化にも繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：Stress tensor inversion method was improved to determine both stress condition and friction coefficient 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.

The new method was tested by some numerical analyses using artificial fault-slip data. As the result, an improvement of detectability of stress conditions from polyphase fault-slip data was confirmed. The method was applied to outcrop-scale faults cutting Quaternary Sekinan Group in Oita Prefecture. Two normal faulting stresses with N-S tension and ENE-WSW tension axes were obtained (friction coefficient: 0.93 and 0.49, respectively).

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

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)や地震波観測(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(例えば,[1]). この手法は、剪断応力の方向に断層が滑るという仮説(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ー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、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のもと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.

Wallace-Bott 仮説の仮定の緩さは、手法の汎用性という利点を生じる反面、断層データから応力を強く制約できないという欠点も生んでいる. 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. そのような変動を検出するため、複数の応力状態を分離して検出することが必要である. ところが、多数の断層データから複数の応力を検出するための分解能が不足し、天然の断層データから応力を特定しきれない例が見られる(図1).

応力の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[2]を用いた逆解析法を構成できる. また、滑り傾向係数[3]が高い断層が多いと仮定することもできる. 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、一般に0.6~0.85程度であることが知られている(Byerleeの摩擦則)が、粘土鉱物はより低摩擦であることが知られているし、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、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Sato[4]は、断層面の方位分布から摩擦係数を推定する手法を開発した. 天然の断層の方位は多様である(図1a). 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越えたときに断層が活動すると考えれば、図2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、差応力や間隙流体圧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. しかしながら、この手法を用いて応力状態(主応力軸方位と応力比)が既知である必要があった. Wallace-Bott 仮説に基づく応力逆解析法で最適応力を決定することはできるが、摩擦係数の算出においては、最適応力の誤差は考慮されない.

2. 研究の目的

そこで本研究は、断層方位解析によって応力と摩擦係数を同時に求める手法を開発する. そのために、断層の滑り方向だけ(Wallace-Bott 仮説)に基づく応力解析と、断層面の方位分布だけに基づく摩擦係数解析を組み合わせる.

これにより、従来の解析では用いられなかった情報を加味できるようになり、応力と摩擦係数の検出能が向上すると期待される. また、応力と摩擦係数のいずれも実験的に既知とせず推定できる.

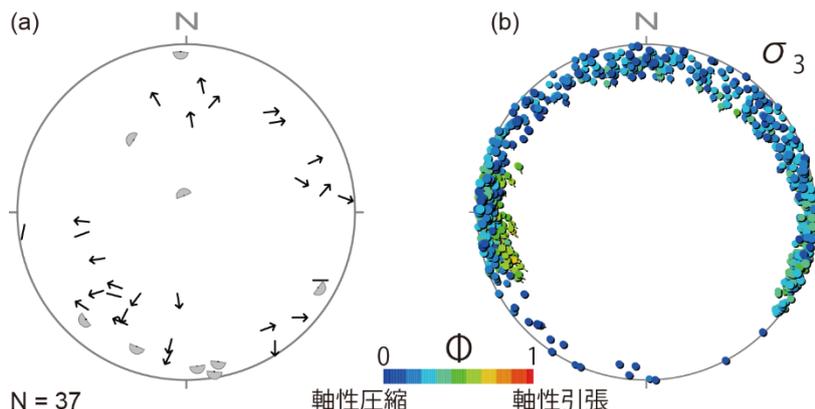


図1 大分市周辺の碩南層群を切る断層群の応力解析. 下半球等積投影. (a) 断層方位データ. (b) 応力解析の結果(引張主軸と応力比 $\Phi$ ).

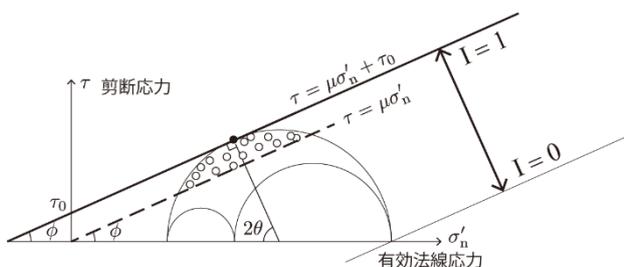


図2 摩擦係数( $\mu$ ), 内部摩擦角( $\phi$ ), fault instability (I) の関係を示す Mohr ダイアグラム.

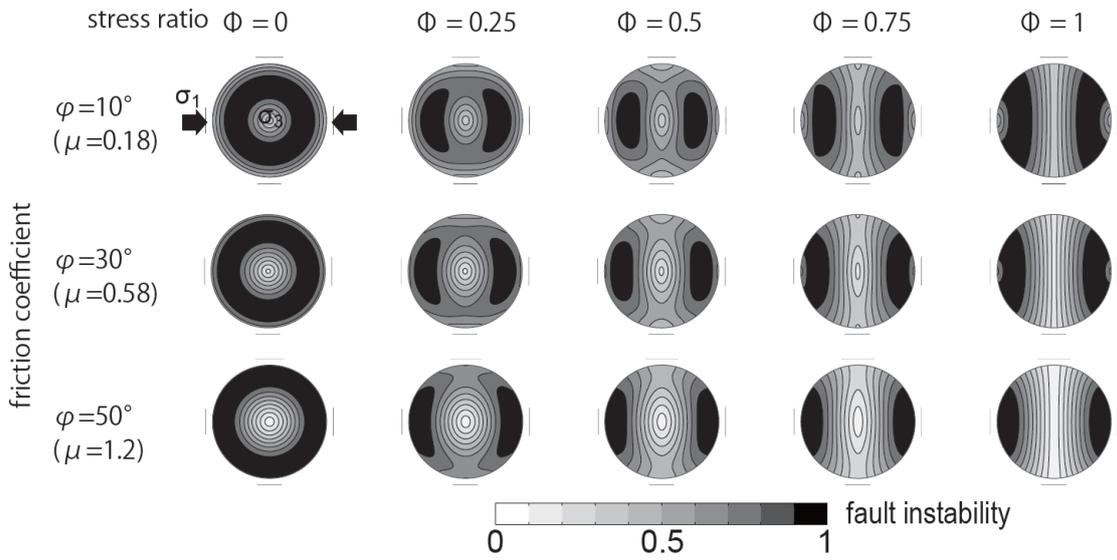


図3 Fault instability の方位分布. 下半球等積投影. 内部摩擦角  $\phi$  および応力比  $\Phi$  に対する依存性も示す.

### 3. 研究の方法

- (1) 断層の滑りやすさの指標である fault instability (断層不安定度, [5], 以下 FI) の性質を調べ, 逆解析の目的関数に組み込む. FI は摩擦係数に依存するので, 様々な摩擦係数を変化させて断層が最も滑りやすい摩擦係数値を探索できる. また, 目的関数は Wallace-Bott 仮説も満たすように設計する. これらを達成する応力・摩擦係数解析のソフトウェアを開発する.
- (2) 模擬 (人工) 断層データを用いて新手法の性能を検証する数値実験を行う. 特に, 複数の応力の検出能の向上を確認する.
- (3) 天然の断層データ到新手法を適用し, 応力と摩擦係数の解明を試みる.

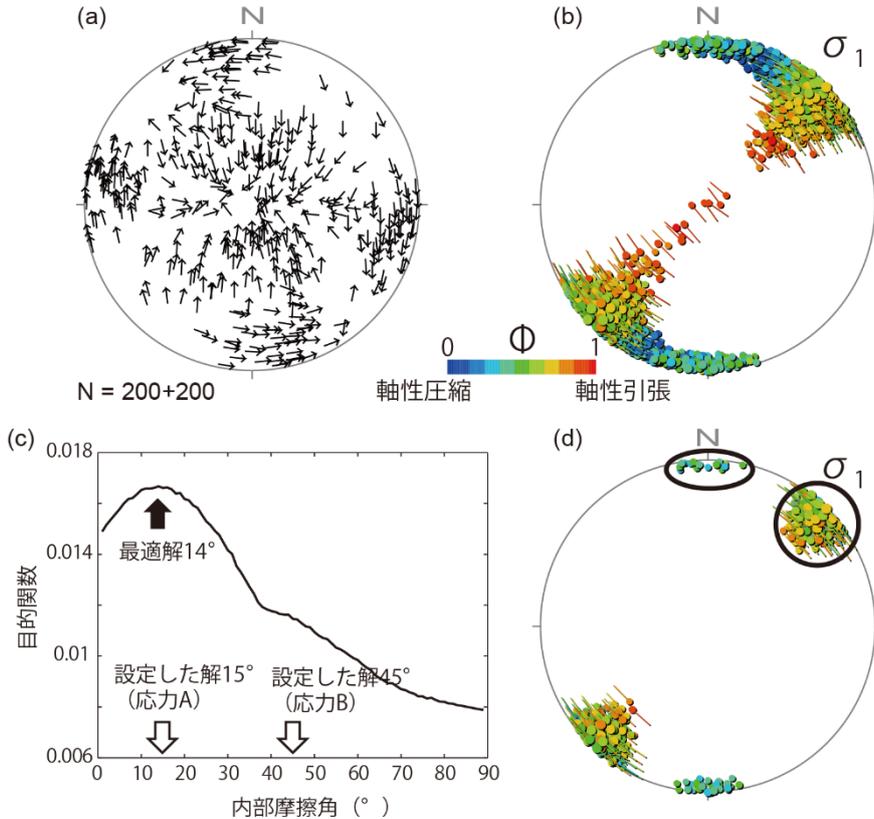


図4 模擬データ解析結果. (a) 南北圧縮による断層 200 条 (主に逆断層) と北東圧縮による断層 200 条 (主に横ずれ断層) を混合した断層方位. (b) 従来の応力解析結果 (圧縮主軸と応力比  $\Phi$ ). (c) 新手法により内部摩擦角を求めた結果. (d) 新手法による解析結果 (圧縮主軸と応力比  $\Phi$ ).

#### 4. 研究成果

(1) 様々な摩擦係数・応力・断層方位に対し、FI を算出したところ、応力比（応力のタイプ：軸性応力か三軸応力かを示す指標）への依存性が確認された（図3）。軸性応力に近いほど FI が大きい方位の範囲が広い。そこで 10,000 条の断層方位を球面上の一樣乱数で生成し、FI の頻度分布を算出した。これをもとに、ある FI 値が与えられたとき、その値以下の FI を持つ確率を評価値として用いる方法を考案した。この評価値と、Wallace-Bott 仮説に基づく評価値（観測された断層滑り方向と剪断応力方向との一致度）とを掛け合わせて、新手法の目的関数とした。

(2) 新手法の性能を確認するため、模擬データを解析する数値実験を行った。その結果、断層面の方位分布が応力に適合していない場合（滑りにくい方位の断層群）や、ランダムに誤差を与えたデータでも正しい解（応力と摩擦係数）が得られた。また、複数の応力に起因する断層群の場合、応力の検出能が向上した（図4）。ただし、複数の摩擦係数の決定は困難だった。

(3) 新手法を天然の断層データに適用した。大分市周辺に分布する碩南層群（約 200 万年前～約 100 万年前に堆積）を切る断層群の方位データ（図1a）を解析したところ、南北引張と東北東-西南西引張の2つの正断層型応力が得られた（図5）。これは従来の手法では検出が困難だったものである（図1b）。応力比はそれぞれ 0.2 および 0.6 程度、摩擦係数はそれぞれ 0.93（内部摩擦角  $43^\circ$ ）および 0.49（内部摩擦角  $26^\circ$ ）程度であった。上位の大分層群を切る断層群の解析では南北引張応力しか得られなかったことを考慮すると、約 100 万年前に応力転換（東北東-西南西引張から南北引張へ）および摩擦係数の変化が起こったと推測される。

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の応力だけでなく摩擦係数を求めることが可能になり、応力の検出能が高まった。今後は天然データへの適用研究とともに、複数の応力や摩擦係数を検出するための手法の改良が望まれる。

#### <引用文献>

- [1] 佐藤活志・大坪誠・山路敦, 地質学雑誌, 2017, 123, 391-402.
- [2] Angelier, J., 2002, Geophysical Journal International, 150, 588-609.
- [3] Morris, A.P., Ferrill D.A. and Henderson, D.B., 1996, Geology, 24, 275-278.
- [4] Sato, K., Journal of Structural Geology, 2016, 89, 44-53.
- [5] Vavryčuk, V., 2014, Geophysical Journal International, 199, 69-77.

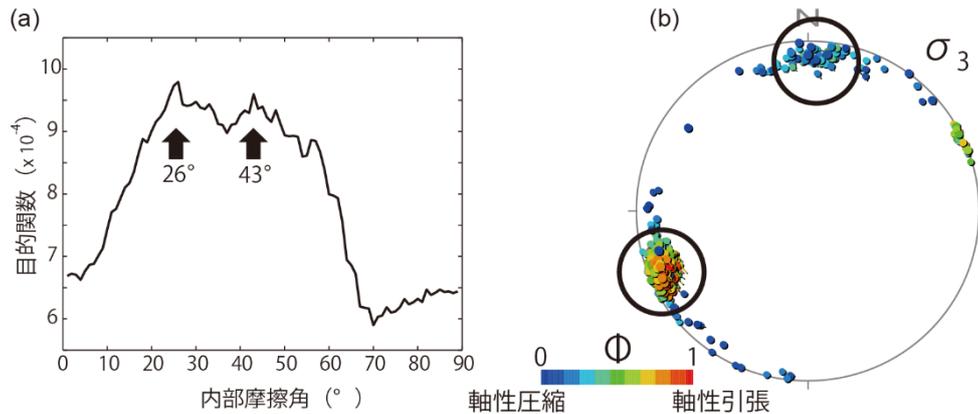


図5 図1のデータを新手法で再解析した結果。(a) 2つの内部摩擦角を読み取る。(b) 応力解析の結果（引張主軸と応力比 $\Phi$ ）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 大橋聖和, 大坪誠, 松本聡, 小林健太, 佐藤活志, 西村卓也	4. 巻 129
2. 論文標題 九州中部の第四紀テクトニクスと2016年熊本地震	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 565-589
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.129.565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3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 断層の滑りやすさの評価による応力逆解析の分解能向上
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤活志, 宮川歩夢
2. 発表標題 地震の発震機構解による応力・摩擦係数推定と断層不安定度に基づく節面選択
3. 学会等名 日本地質学会126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤活志
2. 発表標題 断層の滑りやすさを考慮した応力逆解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018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
---------	---------