

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17776

研究課題名(和文)自動分類型応力逆解析法の開発とプレート沈み込み帯の応力史解明

研究課題名(英文)Automatic detection of multiple solutions of stress tensor inversion from fault-slip data and stress states around subduction plate boundary

研究代表者

佐藤 活志 (Sato, Katsushi)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：70509942

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：多数の断層方位データから自動的に複数の古応力を検出するための自動分類型応力逆解析法を開発した。この手法は、偏差応力空間の混合確率分布モデルとベイズ情報量規準によって応力数を決定する。新手法を大分県別府湾周辺に分布する第四系を切る小断層群に適用し、約100万年前に引張方向が変化したことを示した。また、徳島県牟岐町に分布する四万十付加体牟岐メランジュを切る小断層群に同手法を適用し、プレート境界の直下における正断層型応力を検出した。引張方向は沈み込み方向と海溝軸に平行な方向の2種類が得られた。さらに、小断層群の摩擦係数を推定すると0.1～0.2という小さな値が得られた。

研究成果の概要(英文)：A new method of stress tensor inversion was developed to automatically detect multiple stress states from heterogeneous fault-slip data. The method determines the number of stresses by Bayesian information criterion with mixture probability distribution in the deviatoric stress space. Firstly, the method was applied to faults cutting Quaternary sediments around the Beppu bay area, SW Japan and successfully detected a change in the orientation of tensional stress axes around 1 Ma. Secondly, faults in a tectonic melange in the Cretaceous to Paleogene Shimanto Belt were analyzed. The detected stresses were interpreted as normal-faulting stress states just under the subduction plate boundary. Additionally, a computerized method to determine frictional coefficient from the orientation distribution of fault planes was developed. It was applied to the faults in the melange and extremely low friction coefficients (0.1-0.2) were obtained.

研究分野：構造地質学

キーワード：応力逆解析 小断層解析 混合確率分布 底付け付加体 構造的メランジュ

1. 研究開始当初の背景

地殻変動や地震を駆動する地殻内部応力を知るため、断層の方位から応力を推定する「応力逆解析法」が用いられる。日本列島周辺のようなプレート沈み込み帯では、応力の時空間変動が頻繁かつ顕著に起こると考えられる(例えば、Hasegawa et al., 2011)。陸上露頭で観察される地質時代の断層群には、複数の応力が記録されていると想定しなければならない。したがって、応力逆解析法には複数の応力を検出する性能が求められる。

これまでに、いくつかの手法が複数の応力を検出できるものとして提案されてきた。しかしながら、主観的な基準を排除して解を認定することには成功していない(佐藤ほか, 2017)。例えば、主応力軸の1つは鉛直に近いと想定し断層を先見的に分類する、応力の数を指定する、応力距離(応力同士の違いの尺度)の閾値を指定するなど、解析の前に仮定を設けたり何らかの値を設定しなければならない。

2. 研究の目的

本研究は以下の2点を目的とする。

- ・ 自動的に複数の応力を分離・検出する「自動分類型応力逆解析法」の開発
- ・ 付加体に発達した断層群の解析による、プレート沈み込み帯の応力の解明

3. 研究の方法

断層方位データに適合する応力の探索を、偏差応力空間(Sato and Yamaji, 2006)を用いて行う。この空間では5次元単位球面上の点が規格化された応力テンソルに1対1対応する。4条の断層に対して、1つの応力を決定できることを利用する高速多重逆解法(Sato, 2012)を用いれば、 $N$ 条の断層方位データから ${}_N C_4$ 個という膨大な数の応力が得られる。これらの応力に対応する偏差応力空間の点群のクラスターを認定し、その中心を最適応力とみなす。クラスターが複数あれば、複数の応力が認定される。

最適応力数(クラスター数)の決定のために、ベイズ情報量規準を用いる。ベイズ情報量規準は、対数尤度とペナルティ項の和で表される。対数尤度を評価するための確率分布モデルとして、Kent分布(Kent, 1982)を複数重ね合わせた混合Kent分布を採用する(図1)。Kent分布は、球面上に異方的な広がりを持つクラスターの分布を表現できる。またペナルティ項は、確率分布モデルの自由度と、高速多重逆解法によって得られた応力数から算出される。

4. 研究成果

(1) 新手法のテスト

開発した自動分類型応力逆解析法の性能を検証するため、模擬データの解析を行った。模擬データは2つの応力によって活動した

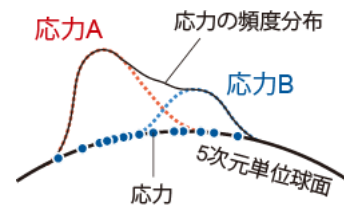


図1. 混合 Kent 分布による複数の応力の認定. 偏差応力空間(5次元単位球面)を表す概念図.

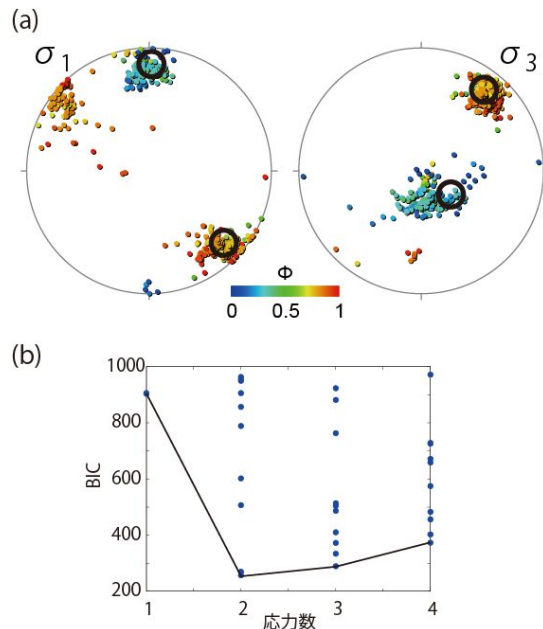


図2. 模擬断層データの解析結果。(a) 主応力軸の方位(下半球等積投影). 小さい点が高速多重逆解法による多数の応力, 黒丸が最適解(クラスター中心の応力)を示す。(b) ベイズ情報量規準(BIC). 応力数が2のときに最小(最適)となる。

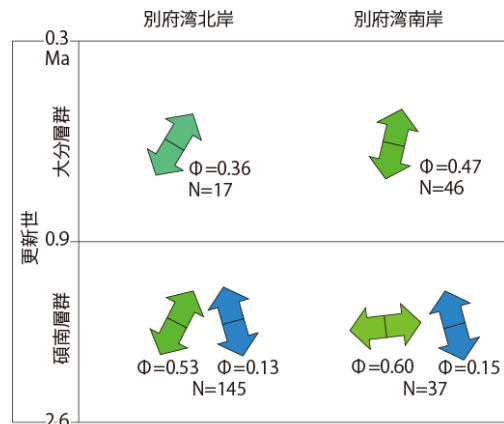


図3. 別府湾周辺地域の小断層から検出された正断層型応力の水平引張方向.

断層が 25 条ずつ混合された、合計 50 条の断層からなる。解析の結果、設定した応力が得られ、ベイズ情報量規準によって正しい応力数 2 が選択された (図 2)。

### (2) 第四紀の小断層群による応力解析

新手法を大分県別府湾周辺に分布する碩南層群 (2 Ma ~ 0.9 Ma に堆積) および大分層群 (0.9 ~ 0.3 Ma に堆積) を切る小断層群 (合計 245 条) に適用した。碩南層群からは北東引張と北西引張の 2 種類の正断層型応力が、大分層群からは北北東引張の正断層型応力が得られた (図 3)。このことは、約 0.9 Ma に応力状態が変化したことを示す。本地域は中央構造線断層帯の西端に位置しており、約 1 Ma 以降は中央構造線の右横ずれ運動が活発であったと考えられている。それ以前は、ユーラシアプレートに対するフィリピン海プレートの運動方向が現在よりも北よりであり、本地域にはたらく応力も現在とは異なっていたと考えられる。

### (3-1) 四万十付加体に記録された応力

徳島県牟岐町・美波町に分布する四万十帯牟岐メランジュは、白亜紀末～古第三紀の堆積岩・火成岩からなる底付け付加体である。劈開面が発達した頁岩を基質とし、砂岩や玄武岩をブロックとする block-in-matrix 構造を成す。海洋プレートの沈み込みに伴う変形によってメランジュ化したと考えられている。また、100 ~ 200 m の間隔で玄武岩が層状に分布しており、同じ層序 (ユニット) が繰り返し現れるので、5 ~ 6 つのユニットから成る duplex 構造を成すと考えられている。小断層データを duplex 構造のユニットごとに収集し自動分類型応力逆解析法で解析した (図 4, 5)。

各ユニットから、1 個 ~ 4 個の応力が検出された。最大圧縮主応力 ( $\sigma_1$ ) 軸は水平に近い。最小圧縮主応力 ( $\sigma_3$ ) 軸は、頁岩劈開面の走向方向か傾斜方向に近いものが多い。

### (3-2) 摩擦係数の推定

単一の応力によって活動した断層群について、その摩擦係数を推定する手法を開発した (Sato, 2016)。この手法は、断層面の方位頻度分布が摩擦係数に依存するというモデルに基づいている。この手法を前項 (3-1) の断層群に適用した結果、摩擦係数は 0.1 ~ 0.2 程度になった (図 6)。多くの岩石の摩擦係数は 0.6 ~ 0.85 であることが知られており、沈み込みプレート境界近傍の岩体が非常に小さい摩擦係数を持つことが本研究により示された。

### (3-3) プレート沈み込み境界の応力

(3-1) で検出された応力の最大圧縮主応力 ( $\sigma_1$ ) 軸は、各 duplex ユニットの頁岩劈開面の極の集中方向に一致していた (図 5)。劈開面の極の集中がユニットごとに異なる



図 4. 牟岐メランジュの黒色～赤色頁岩を切る小断層。

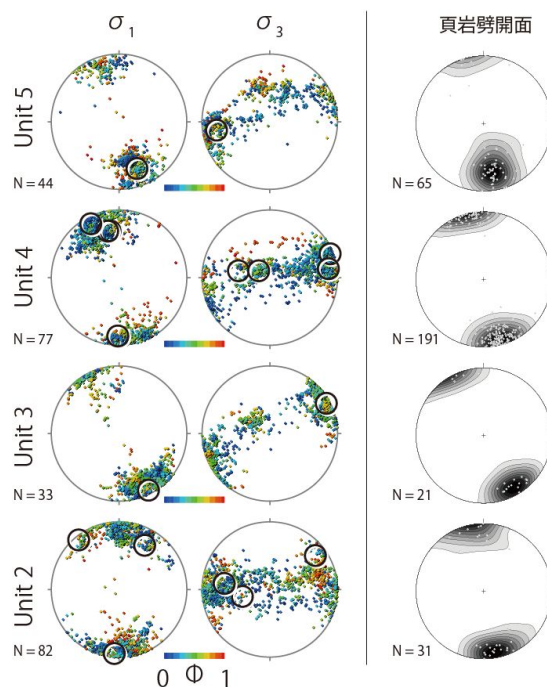


図 5. 牟岐メランジュの小断層群から検出された応力と頁岩劈開面の集中 (下半球等積投影)。黒丸が自動検出された主応力軸を示す。

こと、解析した断層はユニット境界断層に切られることから、検出された応力は duplex 構造の形成、すなわち底付け付加作用の前にはたらいたものと推定できる (図 7)。底付け付加の前は、頁岩劈開面は水平に近いプレート境界断層に平行であったと考えられるので、当時の正断層型応力を示しているといえる。(3-2) で示した通り、プレート境界の摩擦係数が小さければ、沈み込みプレート境界の下盤では荷重による正断層型応力がはたらくことになり、整合的である。

現在の劈開面の走向方向と傾斜方向に平行な最小圧縮主応力 ( $\sigma_3$ ) 軸は、海溝軸と沈み込み方向に平行であったと考えられる。変形の長軸 (伸びの方向) が  $\sigma_3$  軸一致するならば、沈み込みが卓越する時期と、斜め沈み込



みまたは横ずれ運動が卓越する時期があったとの解釈が可能である。

<引用文献>

Hasegawa, A., Yoshida, K. and Okada, T., 2011, Earth Planets and Space, 63, 703-707.  
 Kent, J., 1982, Journal of the Royal Statistical Society, 44, 71-81.  
 Sato, K., 2012, Computers & Geosciences, 40, 132-137.  
 Sato, K. and Yamaji, A., 2006, Journal of Structural Geology, 28, 957-971.

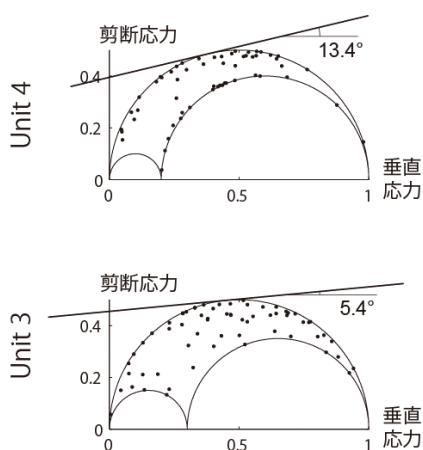


図6. 摩擦係数の推定. Mohr ダイアグラムにおいて, 断層に働く垂直応力と剪断応力を表す点群が集中する位置で Mohr 円に接する直線の傾きが摩擦係数を表す.

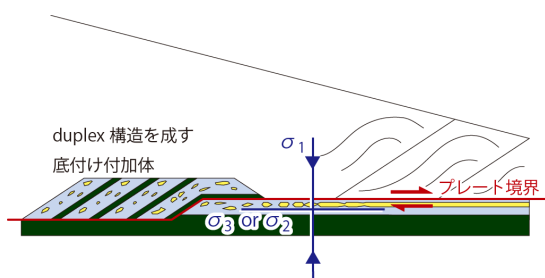


図7. 沈み込みプレート境界の模式断面図と検出された応力.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4件)

佐藤活志・大坪 誠・山路 敦, 応力逆解析手法の発展と応用, 地質学雑誌, 査読有, 2017, 123, 391-402, DOI: 10.5575/geosoc.2017.0028, <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/230936/1/geosoc.2017.0028.pdf>.

Sato, K., A computerized method to estimate friction coefficient from orientation distribution of meso-scale faults, Journal of Structural Geology, 査読有, 2016, 89, 44-53, DOI: 10.1016/j.jsg.2016.05.006.

[学会発表](計 26件)

佐藤活志・宮川歩夢, 地震の発震機構解による応力逆解析と摩擦係数決定および節面選択, 日本地質学会 124 年学術大会, 2017 年.  
 佐藤活志, 混合確率分布を用いた応力逆解析法: 別府湾周辺の第四紀小断層群への適用, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017 年.  
 Sato, K., Orientation distribution analysis of fault planes for constraining friction coefficient, European Geosciences Union General Assembly 2016, 2016 年.  
 Sato, K., A method to estimate friction coefficient from orientation distribution of meso-scale faults: application to faults in forearc sediment and underplated tectonic melange, American Geophysical Union Fall Meeting 2015, 2015 年.

[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
- (4) 研究協力者  
 なし