



応力逆解析手法の発展と応用

Recent advancement and applications of stress tensor inversion techniques

Abstract

佐藤活志* 大坪 誠** 山路 敦*

Katsushi Sato, Makoto Otsubo** and
Atsushi Yamaji**

2017年5月1日受付.

2017年5月24日受理.

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
Division of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Science, Kyoto University,
Kyoto 605-8502, Japan

** 産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology, Tsukuba 305-8567, Japan

Corresponding author: K. Sato,
k_sato@kueps.kyoto-u.ac.jp

Stress tensor inversion techniques are widely used in various fields of solid Earth sciences to elucidate (paleo) stress states in the Earth's crust. In recent decades, these techniques have been developed and utilized for disaster prevention and assessment of nuclear power plant safety, as well as for scientific purposes. The data sources used in such studies include the orientations of mesoscale faults observed in outcrops, seismic focal mechanisms, dilatant fractures such as dykes and mineral veins, and mechanical twins in calcite grains. Inversion techniques for fault-slip data, including geological faults and seismic focal mechanisms, have been enhanced to detect multiple stress conditions from heterogeneous data and to examine spatiotemporal changes in stress. In addition, methods for analyzing dilatant fractures have been enhanced to determine stress regimes and stress ratios, with implications for fluid pressure levels. Recent refinements in calcite twinning analysis have aided estimates of differential stress magnitudes.

Keywords: stress tensor inversion, mesoscale fault, focal mechanism, dyke, mineral vein, calcite twin

はじめに

テクトニクスの機構や駆動力を理解するには、地殻応力場とその変遷史の解明を避けては通れない。そのために、構造地質学の分野では断層、岩脈、鉱物脈、方解石双晶など様々なスケールの地質構造を用いた応力逆解析(応力テンソルインバージョン)手法が開発されてきた。一方、地震学の分野では応力の推定に発震機構解が用いられてきた。それらが「逆」解析と呼ばれるのは、変形の結果として生じた地質構造から、変形の原因である応力を推定するからである(例えば、メンケ, 1997)。小論は、応力逆解析手法のここ四半世紀ほどの発展を概観し、応用例を紹介する。ここで扱う地質構造の多くは、脆性的な変形の結果生じたものである。したがって、知ろうとする対象は主に地殻浅部の応力状態である。以下の各節ではデータの種類ごとに、解析手法とその応用例を紹介する。

ここで応力について復習しておこう。連続体内部の1点における応力状態は、独立な6成分からなる応力テンソル $\sigma = \{\sigma_{ij}\}$ ($i, j = 1, 2, 3, \sigma_{ij} = \sigma_{ji}$)で記述される。6成分は、3本の主応力軸の方位と3つの主応力値($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, 圧縮を正とする)によっても表現できる。3つの主応力値のうちの2つを、差応力 $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ と応力比 $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ とに置き換えて表現することもできる($0 \leq \Phi \leq 1$)。軸性圧縮応力($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$)は $\Phi = 0$ に、軸性引張応力($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)は $\Phi = 1$ に対応する。小論が紹介する応力逆解

析手法は、地質構造の方位を観測データとする。方位は無次元量であるため、主応力や差応力の絶対値の決定は一般に難しい。後述する方解石双晶の応力解析は、例外的に差応力の絶対値を求められることが長所の一つである。

断層スリップデータ

小論では、変位量が1つの露頭で確認できる規模(数mm~数10m)の断層を小断層と呼ぶ。古応力状態を知るために大断層でなく小断層を用いる方がよいのは、活動履歴が単純であり(1条の断層が複数のテクトニックイベントを記録している可能性が低く)、ある一時期の応力を記録していると期待できるからである(山路, 2001)。1990年頃までの小断層による応力逆解析法はAngelier(1984, 1994)、2000年頃まではRamsay and Lisle(2000)、2010年頃まではCélérier et al.(2012)がよくまとめている。和文では、山路(2001)が詳しい。小論は2000年以降の進展を中心に述べる。

1. Wallace-Bott 仮説に基づく応力逆解析法

20世紀中盤までに普及した小断層解析法は、Anderson理論(Anderson, 1905, 1951)に基づく応力レジーム(3つの主応力軸のどれが鉛直に近い)の判定や、Mohr-Coulombの破壊基準(Fig. 1)に基づいて共役な2方向の断層面の2等分方向として主応力軸を得るものだった。しかし、斜めずれ断層の普遍性、鉛直でない主応力軸は地下数kmまでありうること(Lacombe, 2012)、露頭における共役断層セット

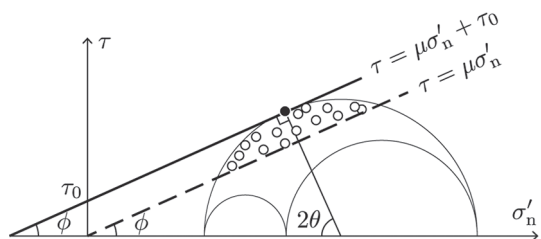


Fig. 1. Mohr diagram showing the conditions of faulting. The horizontal and vertical axes are effective normal stress σ'_n and shear stress τ , respectively. The Mohr-Coulomb failure criterion is drawn as the solid line $\tau = \mu\sigma'_n + \tau_0$. The black solid circle corresponds to the orientation of the fault to be newly formed under the criterion. The broken line $\tau = \mu\sigma'_n$ is the failure criterion, which neglects cohesion τ_0 for reactivated faults and faulting along preexisting weak planes. In this case, the faults indicated by open circles are to be activated.

断層の形成条件を示す Mohr ダイアグラム。横軸は有効垂直応力 σ'_n 、縦軸は剪断応力 τ を表す。実線 $\tau = \mu\sigma'_n + \tau_0$ は Mohr-Coulomb の破壊基準であり、黒丸が形成される断層の方位に対応する。破線 $\tau = \mu\sigma'_n$ は粘着力 τ_0 を無視した破壊基準であり、白丸の分布域に対応する方位の断層が活動する。

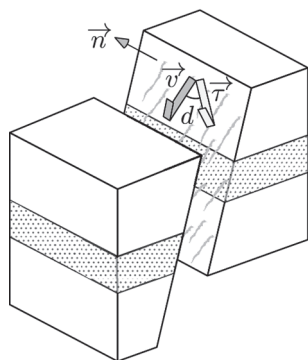


Fig. 2. Schematic figure showing the Wallace-Bott hypothesis (Wallace, 1951; Bott, 1959). A fault is assumed to slip in the direction of shear stress. The vectors $\vec{n}$ and $\vec{v}$ are the fault normal and slip directions, which can be measured in outcrop. Given a reduced stress tensor, we can calculate the direction of shear stress $\vec{\tau}$. The misfit angle d describes the difference between the observed slip direction and the calculated shear stress direction.

Wallace-Bott 仮説 (Wallace, 1951; Bott, 1959) は、断層の滑り方向が剪断応力に平行であると仮定する。断層面の法線 $\vec{n}$ と滑り方向 $\vec{v}$ を露頭で観測し、規格化応力テンソルを適当に与えれば、剪断応力の方向 $\vec{\tau}$ を算出できる。ミスフィット角 d は $\vec{v}$ と $\vec{\tau}$ のなす角であり、これを最小化する規格化応力テンソルが最適解と見なされる。

の発見がまれであること、既存断層の再活動や弱面(層理面など)を利用した断層の存在がこれらの手法の難点である。

Wallace (1951) や Bott (1959) は、断層の滑り方向は断層面上の剪断応力の方向に平行であるという仮説を提案した (Wallace-Bott 仮説, Fig. 2)。この仮説は、弱面を利用した断層や再活動した断層にも適用できるものとして受け入れられ、応力逆解析法の基本原理となっている。Wallace-Bott

仮説に基づく応力逆解析法は、断層スリップデータ(断層面の方位、条線の方位、剪断センス)を観測し、reduced stress tensor (Angelier, 1984; 小論では規格化応力テンソル)を決定する手法である。剪断センスは、断層面に画された一方の岩体が条線に沿ってどちらの向きに移動したかという区別であり、正断層、逆断層、右横ずれ断層、左横ずれ断層のいずれの成分を持つかで記述される。規格化応力テンソルは、3つの主応力軸方位と応力比のあわせて4つの未知量からなる。そこでは応力の絶対値の情報が捨象されている。

断層面の方位が単位法線ベクトル $\vec{n}$ で与えられたとき、規格化応力テンソル σ を適当に仮定すれば、剪断応力ベクトル $\vec{\tau}$ は次のように算出できる：

$$\vec{\tau} = \sigma \vec{n} - (\vec{n} \cdot \sigma \vec{n}) \vec{n}. \quad (1)$$

ベクトル $\vec{\tau}$ の方向と、断層面上の条線として観測された滑り方向との成す角をミスフィット角と呼ぶ。多数の断層スリップデータに対するミスフィット角の合計値を最小化する規格化応力テンソルが最適解と見なされる (Carey and Brunier, 1974; Angelier, 1979)。

実際にはミスフィット角そのものではなく、各断層について

$$f(d) = \begin{cases} 1 - d/d_0 & (0^\circ \leq d \leq d_0) \\ 0 & (d_0 < d \leq 180^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

というような関数が使われることが多い (例えば, Angelier, 1984)。ただし d はミスフィット角、 d_0 は閾値であり 30° 程度に設定される。 f は d の減少関数なので、全断層について f を合計したもの(それを目的関数と呼ぶ)を最大化する規格化応力テンソルが逆解析法の最良解である。

2. 複数の応力の検出

1990年代以降は、複数の応力を求める応力逆解析法が開発されてきた。1980年代までの手法は、小断層群が単一の応力によって活動したと考えるものであった (例えば, Angelier, 1979; Etchecopar et al., 1981; Michael, 1984)。しかし、解析対象が空間的に広い場合、地質学的に古い場合、複雑なテクトニクス史を持つと予測される場合は、複数の応力を記録した「不均一な断層スリップデータ」の解析手法が必要である。

Nemcok and Lisle (1995) は、観測された断層スリップデータ(方位)そのものの類似性を基準に断層群をグループ分けし、グループごとに応力を求める手法を提案した。しかし、Wallace-Bott 仮説によれば1つの応力のもとで様々な方位の断層が変位し得る。Wallace-Bott 仮説に基づいて複数の応力を検出するためには、様々な応力に対して目的関数(例えば式(2)の和)の値を算出し、その極大値を複数発見する必要がある。

多重逆解析法(山路, 1999; Yamaji, 2000b)は、断層スリップデータの部分集合の繰り返し抽出と解析により多数の解を得て、それらがつくる複数のクラスターをステレオ投影図上で視認するものである。規格化応力テンソルは4自由度を持つため、4次元パラメタ空間のクラスターを認定する必要

がある。シンボルや色に工夫が凝らされたが、グラフ上での4次元空間のクラスターの認定は困難を伴い、解析者の主観を排することが困難であった。

3. 解空間の設計

2000年以降に、応力逆解析を幾何の問題に帰着させられることが指摘され、複数の応力を検出するための方法論的飛躍があった。すなわち、Sato and Yamaji (2006a) は Fry (1999) の σ 空間を改良し、次のような偏差応力空間の利用を提案した。応力テンソルには6つの独立成分があるので、それらから定義される6次元直交デカルト座標 ($\sigma_{11}/\sqrt{2}$, $\sigma_{22}/\sqrt{2}$, $\sigma_{33}/\sqrt{2}$, σ_{23} , σ_{31} , σ_{12}) をもつ1点によって表現できる。ここで最初の3成分を $\sqrt{2}$ で割っているのは、座標不変性の原理 (the principle of coordinate invariance: 例えば, Ottosen and Ristimaa, 2005) を満たすようにして、どの方向に座標軸を選んででも解に影響しないようにするためである。第一不変量 ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) を0に、第二不変量 ($-\sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1$) を1に規格化した応力テンソルは、5次元空間の単位球面上の点に相当する。

5次元単位球面上の2点間のユークリッド距離は、対応する2つの規格化応力テンソルの stress difference $D = \sqrt{J_2(\sigma_A - \sigma_B)}$ (Orife and Lisle, 2003; Sato and Yamaji, 2006a) に等しい。Stress difference は2つの応力の差異を定量化する尺度であり、複数の応力を客観的に区別する基準となる。ここで $J_2(\sigma_A - \sigma_B)$ は、規格化応力テンソル σ_A と σ_B の差の第二不変量である。 D は0から2までの値をとり、値が大きいほど2つの応力の違いが大きい。 D を角距離で表現し直した応力角距離 $\Theta = 2 \sin^{-1}(D/2)$ は、2つの応力をあらゆる方位の断層面に作用させたとき、それぞれの応力で生じる剪断応力の2つの方向の角度差の平均値にほぼ等しいという性質を持つ (Yamaji and Sato, 2006)。したがって、応力角距離や stress difference は、Wallace-Bott 仮説に基づく応力逆解析法との親和性が高い。ただし、これらの尺度は剪断応力の大きさにも僅かながら影響されることに注意が必要である (Sato, 2012b)。

Otsubo et al. (2006) は stress difference を距離尺度とする K-means クラスタリング (例えば, 宮本, 1999) によって、多重逆解法の解の認定を自動化した。Yamaji et al. (2006) は、形状認識のための画像処理技術の一つである Hough 変換 (例えば, Leavers, 1992) を応用し、偏差応力空間の目的関数分布をそのままステレオ投影図に表現するシンプルな逆解析法 (以下, Hough 法と呼ぶ) を提案した。Hough 法は条線の方位や剪断センスの情報を欠く不完全な断層データにも適用できる (Sato, 2006)。さらに、探索グリッドやアルゴリズムの改良によって、計算の高速化や精度の均一化が達成された (Sato and Yamaji, 2006b; Sato, 2012a; Yamaji and Sato, 2012)。以上の手法を用いても、活動させた断層数の差が大きい場合、複数の応力の検出は困難である。多重逆解法の繰り返し抽出操作は適合する断層が多い応力を特に強調するので、適合する断層が相対的に少ない応力は検出されにくい。Hough 法はそのような強調効果を持たず、目的関数値は適合する断層数にほぼ比例するので、少数の断層を

活動させた応力の検出には有利である (佐藤, 2010)。

4. 天然の断層群への適用

三野・山路 (1999) は房総半島の前弧海盆堆積層を切る小断層群を解析し、ミスフィット角の頻度分布に基づいて複数の応力状態を認定した。このデータは後に Yamaji (2000a) によって多重逆解法を用いて再解析され、応力史が編まれた。多重逆解法や Hough 法は、国内外の様々な地質体に適用され成果を挙げている。例えば小林ほか (2005) は、能登半島の日本海拡大期の堆積層を切る小断層群を解析し、西南日本弧に斜交する引張応力を報告した。南澤ら (2006) は四万十付加体を切る小断層の解析によって、多様な圧縮方位を復元した。大坪ほか (2009) は掘削コアを切る断層を多重逆解法によって解析し、現地応力測定結果との比較に基づいて、南海トラフ前弧域の応力変遷を論じた。Hashimoto et al. (2015) は、台湾チェルンブ断層の掘削コアに含まれる滑り面の解析によって2種類の応力を検出し、地震サイクルにおける応力の変動を論じた。

小断層が形成された後に岩体が大きく傾動した場合について、Yamaji et al. (2005) は古地磁気学における褶曲テストの原理と多重逆解法を組み合わせ、褶曲成長のどの段階で応力が作用したかを検証した。Tonai et al. (2011) は天草地域の古第三系を切る小断層群に Hough 法を適用し、褶曲形成前と褶曲形成中の応力状態を明らかにした。

応力逆解析法は活断層にも応用されつつある。Tsutsumi et al. (2012) は Hough 法を近畿地方の活断層群に適用し、10万年スケールの応力の時空間的一様性を示した。2011年の東北地方太平洋沖地震をきっかけに原子力発電所敷地内の破碎帯の調査が行われ、それに関する有識者会合でも応力逆解析が活用された [URL1; URL2]。切断関係に基づいてグループ分けされた断層群に応力逆解析法を適用し、トレンチ調査による第四紀層との関係や、地震のデータから得られた応力との比較を踏まえて、後期更新世以降の活動の有無が判断された例がある [URL3]。

5. Slip tendency と摩擦係数

Wallace-Bott 仮説は断層面の方位が応力状態に依存しないと考えるので、間隙流体圧が高い場合や摩擦係数が小さい場合など、一見活動しにくい断層の滑りも説明できる利点がある。しかしながら、見方を変えれば、断層面の方位を測定しても何ら応力を制約できないという解析の都合上の大きな欠点がある。そのため近年は、Mohr-Coulomb の破壊基準にある程度回帰し、断層面の方位分布を利用する応力逆解析法も提案されている。

McFarland et al. (2012) は、観測された断層面の slip tendency (断層面上の垂直応力に対する剪断応力の比, Morris et al., 1996; Lisle and Srivastava, 2004) を最大化するように規格化応力テンソルを決定した。Slip tendency は断層の活動しやすさを表現する量として、地震学や防災の分野で注目されている (Miyakawa and Otsubo, 2015; Yukutake et al., 2015)。

剪断応力が大きく垂直応力が小さい断層ほど活動しやすいという力学的な仮定をおけば、小断層群の活動時の摩擦係数

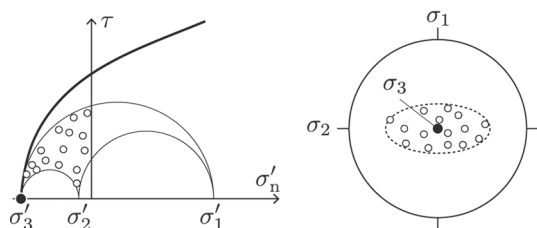


Fig. 3. Mohr diagram showing the condition of formation of dilatant fractures (left) and a corresponding stereogram (right). White circles show effective normal stress σ'_n and shear stress τ on each fracture (left) and poles to fractures (right). The bold curve is the rupture criterion. When the differential stress is small enough, a newly ruptured fracture is formed on the condition shown by the solid black circle. The fracture should be perpendicular to the σ_3 -axis. Re-opening of fractures and opening of preexisting weak planes such as joints occur when the effective normal stress is negative ($\sigma'_n < 0$); i.e., the fluid pressure exceeds the tectonic normal stress (open circles).

岩脈や鉱物脈などの引張割れ目の形成条件を示す Mohr ダイアグラム(左)および対応するステレオ投影図(右)。横軸は有効垂直応力 σ'_n 、縦軸は剪断応力 τ を表す。太線は破壊の包絡線。差応力(Mohr の応力円の直径)が小さければ、 σ_3 軸に直交する割れ目が新規が形成される(黒丸)。既存の割れ目や弱面が利用される場合は、有効垂直応力が負の領域(白丸の分布域)に対応する方位の割れ目が開口する。

を決定できる(Angelier, 1989; Sato, 2016; Fig. 1)。断層の方位から摩擦係数を推定する手法は、応力逆解析法の価値を高め今後の発展を促すものであろう。

岩脈・鉱物脈

岩脈や鉱物脈は、開口した引張割れ目をマグマや水などの流体が充填した痕跡である。引張割れ目による応力逆解析法については、山路(2012)が方法論の発達史をまとめている。

1. 岩脈法とその拡張

引張割れ目はおおむね平面的であり、 σ_3 軸に直交する方向に形成されると考えられる(Anderson, 1951; Fig. 3)。引張割れ目の形成条件は $p_f \geq \sigma_n + T_0$ と表される(Jaeger, 1956)。 p_f はクラックを開こうとする流体(マグマや水)の圧力、 σ_n はそれを抑えようとする岩石の垂直応力、 T_0 は岩石の引張強度である。平行岩脈群の極の平均方向を引張応力方向と見なす解析法は、日本国内では岩脈法(Nakamura, 1977)として普及した。この手法では、火山の中央付近では地下から上昇するマグマ圧が卓越して放射状岩脈群が形成されるが、火山から離れるとテクトニックな広域応力の σ_{Hmin} 軸に直交する走向の平行岩脈群が形成されると考えられた。

しかし、天然の引張割れ目群は完全に平行ではない。既存の弱面の開口を考慮して岩石の引張強度を無視すると、引張割れ目の形成条件は

$$p_f \geq \sigma_n \quad (3)$$

と表せる(Delaney et al., 1986)。Mohr ダイアグラムの横軸を有効垂直応力($\sigma'_n = \sigma_n - p_f$)で表現すれば、横軸の負の領域に対応する方向の割れ目が開口する(Fig. 3)。この条

件に合致する面の極の方位は、ステレオ投影図上で σ_3 軸の周りに広がりを持つ(Fig. 3)。この方位分布の形状は、 σ_3 軸だけでなく、 σ_1 軸と σ_2 軸、さらには応力比 Φ (すなわち規格化応力テンソル)にも依存する。

Jolly and Sanderson(1997)は、岩脈群や鉱物脈群の方位分布の形状から規格化応力テンソルを決定する手法を提案した。この手法は画期的だったが、分布の端ではデータ数が少ないため分布形状の正確な視認は困難であった。そこで Yamaji et al.(2010)は、確率分布のあてはめによって自動的に規格化応力テンソルを決定する応力逆解析法を提案した。流体圧 p_f の変動(テクトニックな応力状態に比べて変動しやすい)に応じて引張割れ目群が形成されたなら、その頻度は垂直応力に対して単調に減少すると考えられる。その減少の仕方が指数関数的であると仮定して、割れ目群の方位分布に Bingham 分布(例えば、Borradaile, 2003)をあてはめた。最適化された Bingham 分布のパラメタが規格化応力テンソルを与える。

2. 駆動流体圧比

Jolly and Sanderson(1997)の手法は、規格化応力テンソルだけでなく駆動流体圧比 $R = (p_f - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ も決定できる。 R は 0 から 1 までの値をとる。式(3)に従えば、観測された割れ目にはたらいた垂直応力のうち最大のものが p_f に等しく、その値に基づいて R を算出できる(Fig. 3)。ただし、すべての割れ目が観測されることは無いので、得られるのは R の最小見積りである。駆動流体圧比は流体圧比(上載圧に対する流体圧の比)の見積りにつながるパラメタである。Sato et al.(2013)は、駆動流体圧比の決定精度を高めるために凸な関数形の確率分布を用いる手法を提案し、Bingham 分布を用いた場合に比べて遜色ない結果を得た。

3. 複数の応力の検出

岩脈群や鉱物脈群も、小断層群と同様に、複数のテクトニックイベントを記録している可能性がある。そこで、それらの方位頻度分布に複数の Bingham 分布の混合分布を当てはめる手法が提案された(Yamaji and Sato, 2011)。このとき、いくつかのイベントが記録されているか判定するために、ベイズ情報量基準が導入された。この手法ののちに、遺伝的アルゴリズムを用いて改良され、ソフトウェアが公開されている(Yamaji, 2016a)。

4. 応用

Nakamura(1977)の岩脈法は、1970年代から1980年代にかけて日本各地の火成岩脈に適用されてきた(例えば、Tsunakawa, 1986; Hoshi and Takagawa, 2009)。山元(1991)は既存のデータセットをもとに、32 Ma 以降の日本列島の応力場変遷史を総括した。しかし、当然ながらこれらの研究は水平面内の引張および圧縮方向(σ_{Hmin} 軸および σ_{Hmax} 軸)の議論にとどまり、3つの主応力軸方位は同時代に動いたと思われる断層のセンスから推定された。

Jolly and Sanderson(1997)の手法は日本国内では普及しなかったが、Yamaji et al.(2010)以降の手法は近年利用され始めている。Yamaji and Sato(2011)は楠橋・山路(2001)の岩脈方位データを再解析し、広域応力と火山体の

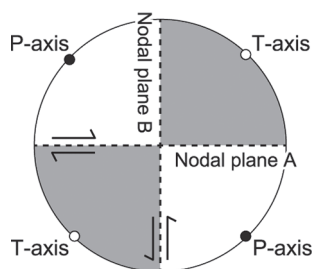


Fig. 4. Schematic figure showing an earthquake focal mechanism solution. Broken lines indicate nodal planes. White and gray regions, which are centered by P- and T-axes, show possible ranges of the σ_1 and σ_3 -axes, respectively.

地震の発震機構解を示す模式図。点線が二つの節面(Nodal plane)。二つの節面の一方が真の断層面である。白色と灰色の領域が σ_1 軸と σ_3 軸が存在する範囲であり、それぞれの中心がP軸とT軸。

局所応力とを分離して検出した。Sato et al. (2013)は敦賀地域の中新世の岩脈群を解析し、駆動流体圧比から日本海拡大期の高いマグマ圧を論じた。金井ほか(2014)および金井・高木(2017)は、傾家花崗岩中のヒールド・マイクロクラックを解析し、白亜紀末の広域応力の σ_3 軸と中央構造線の直交性を論じた。Otsubo et al. (2016)は、延岡衝上断層の周辺の鉱物脈群を解析し、地震サイクルに伴う駆動流体圧比の変動を検出した。

地震の発震機構解

地震データは現在の応力状態に関する直接的な情報を持っており、広域の観測網を通じて膨大なデータが取得できる利点がある。地震学分野での応力逆解析に関しては、和文では寺川・松浦(2009)が詳しい。小論は2000年以降の進展を中心に述べる。

1. Wallace-Bott 仮説に従った応力逆解析の発震機構解への適用

地震学の分野では、Wallace-Bott 仮説に基づく応力逆解析が普及するまでは、P波初動の極性データから各地震でのP軸およびT軸を求め、それらを重ね合わせることで対象地域の平均的な応力パターンを推定することが多かった(例えば、Isacks and Molnar, 1971; Zoback and Zoback, 1980; Sbar, 1982)。その後地質学の分野で発展してきた応力逆解析法が地震学分野に取り入れられた。Ellsworth and Zhonghuai(1980)は断層条線の代わりに地震の発震機構解(Focal mechanism, Fig. 4)を変換した断層面の姿勢とすべりの方向をデータとして応力逆解析をした。地震の断層すべりデータを用いた応力逆解析は、現在の応力状態を把握するための最も有効な手段として広く用いられるようになった(例えば、Gephart and Forsyth, 1984; Michael, 1984, 1987; Angelier, 2002)。それらの手法を用いて日本列島周辺でも多くの研究例がある(例えば、Townend and Zoback, 2006; Katsumata et al., 2010; Imanishi et al., 2011; Hasegawa et al., 2012; Yoshida et al., 2016)。また、応力状態だけで

なく間隙流体圧の推定も試みられている(Terakawa et al., 2010, 2012)。

以下、地震のデータに応力逆解析を適用するときの課題を挙げながら、その解決策として発展してきた手法を紹介する。

1つ目の課題は、地震の発震機構の2つの節面(Fig. 4)のどちらが断層面であるかが不明確であることで解の精度が低下する問題である(Micheal, 1987)。大規模地震であれば、地震発生後の余震分布のパターンの把握からこの問題は緩和されるが、小規模地震では難しい。Gephart and Forsyth (1984)やMichael(1984, 1987)の手法では、2つの節面の両方を断層面とみなし、ブートストラップのアプローチで誤差を評価する。Angelier(2002)は、ミスフィット角の代わりにslip shear stress component(SSSC)という基準を提案した。この値は、断層面に働く応力ベクトルと地震観測から得られた単位すべりベクトルのスカラー積であり、2つの節面では同じになる。そこで、SSSCの総和を最大にする応力を最適解として節面選択問題を回避している。ただしこの手法はP軸とT軸が主応力軸として選択されやすい。Arnold and Townend(2007)は、ベイズ統計を基礎に節面選択の曖昧さを含む発震機構解データの精度を応力逆解析に取り込み、最適解の不確かさを論じた。

2つ目の課題は、応力状態が時間的空間的に変化する場合に、複数の応力を分離検出するにはどうするかという問題である。Wallace-Bott 仮説に従った応力逆解析では、解析に使用するデータの少なくとも一部分は均一という仮定があるため、応力の時間変化を知るために地震の発生期間を分割して解析することが多い(例えば、Wu et al., 2010; Martínez-Garzón et al., 2013; Schoenball et al., 2014)。ただし、分割した期間があまりにも短いと、各期間内のデータ数が少なくなり安定な解が得られなくなる。これらに対して、データを分割せずに多重逆解析法(Yamaji, 2000b)を適用した例がある(例えば、Pasquale et al., 2008; Macchiavelli et al., 2012)。空間的な応力の不均一を解明する場合には、結果が解析領域の分割の仕方に依存してしまう。領域があまりにも細かいと、各領域内のデータ数が少なくなりやはり安定な解が得られなくなる。Hardebeck and Michel(2006)はミスフィット角の自乗和と隣接する領域間の応力場の差の自乗和を足したものを最小化するという基準により、領域分割のモデル依存性を解決しようと試みた。Otsubo et al. (2008)は、領域分割をせずに1つのデータセットとして応力逆解析を行うアプローチを提案した。これは多重逆解析法(Yamaji, 2000b)の発震機構解への応用である。Otsubo et al. (2008)は、北琉球弧の火山フロントを挟んだ領域内の発震機構解から、前弧と背弧で異なる応力を示した。

2. 地震波を1次データとする応力推定

地震学分野では別の応力逆解析法が独自の発展を遂げている。地震学分野での1次データは地震波であり、これは震源域での非弾性的なプロセスが周辺の弾性領域に引き起こした応力変化が擾乱として伝わる現象ととらえることができる(寺川・松浦, 2009)。そこで、1次データに立ち返り、

1990年代より Wallace-Bott 仮説の妥当性が議論されてきた(例えば, Michael, 1991; Pollard, 1993; Twiss and Unruh, 1998). Twiss and Unruh(1998)は地震発生域を等方線形弾性体と仮定することの再検討を提案している. また, ほぼそれと同時期に断層スリップデータの代わりに P 波初動の極性をデータとする逆解析手法が提案された(例えば, Rivera and Cisternas, 1990; Horiuchi et al., 1995; Abers and Gephart, 2001). これらの手法では, 各地震イベントの断層面(節面)の向きを変数として, 観測された P 波初動の極性を最も説明するように主応力軸の方位と応力比を決定し, その過程で各地震イベントの最適な断層面を求めることができる(寺川・松浦, 2009). Terakawa and Matsu'ura (2008)は, 上記で紹介した手法がもつ課題を解決する手法として, 地震の CMT(Centroid Moment Tensor)データから直接的に 3 次元応力を推定する逆解析法を提案した. CMT とは, 観測された地震波形を最もよく説明する地震の位置, 規模, および発震機構を同時に求める解析法である(例えば, Rice, 1980). Terakawa and Matsu'ura (2008)は日本列島域で CMT データを用いた応力逆解析により, 3 次元応力場のパターンを示した. こうした近年の地震学分野での手法を地質学分野にフィードバックすることも, 今後の課題である.

方解石双晶

方解石の顕微鏡スケールの双晶からは, その双晶ができたときの応力が推定できる(例えば, Lacombe, 2010). 応力へのこのアプローチは, 変形実験に立脚した Turner(1953)の研究に始まって, 70 年代以降に発展した. 本節ではまず, この双晶ラメラの結晶学的方向とその形成による剪断変形について述べたあと, 差応力計としての利用を紹介し, 双晶の方向データから偏差応力テンソルを推定する逆解析法を解説する. この逆解析法に関する研究は 1990 年頃からの停滞ののち最近再開された.

1. *e* 双晶

方解石の機械的双晶(*e* 双晶)は, $\{01\bar{1}2\}$ 面(*e* 面)にそって単純剪断が生ずることで形成される(Fig. 5). 形成される双晶ラメラの両側にあって, もとの結晶方位を保持する部分を, そのラメラのホストとよぶ. ラメラ(*e* 面)の極とホスト中の *c* 軸方向は, 光学顕微鏡のユニバーサルステージや, 走査型電子顕微鏡の EBSD(電子線後方散乱回折法)で測定できる. それらを単位ベクトル *e*, *c* で表す. ラメラの単純剪断の方向(単位ベクトル *g* で表す)は結晶学的に決まっており, *c* を *e* 面に正射影した方向として算出できる(Fig. 5). 結晶構造の制約から, 単純剪断の剪断角は約 19° と一定で, 1 枚のラメラ中に生ずる剪断歪みは $\tan 19^\circ$ である. ラメラがたくさんできるほど, それを包含する結晶粒子は大きな剪断変形をこうむる(Groshong, 1972). このことを利用した歪み解析は近年も行われているが(例えば, Hung and Kuo, 1999; Kang et al., 2005; Kim et al., 2008), 山路(2016a)が批判的にそれを検討している.

方解石 *e* 双晶の密度(1 mm あたりのラメラの枚数), ラメ

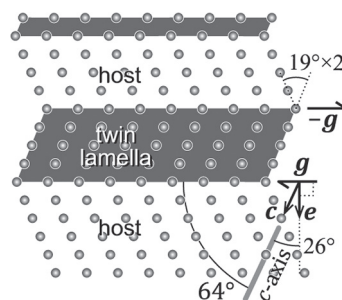


Fig. 5. Geometry of *e*-twinning in calcite. Gray balls represent calcite atoms. The twinning results in simple shear along the twin lamella. See text for the definitions of vectors.

方解石の *e* 双晶の模式的構造. 灰色の玉は Ca 原子. 双晶形成により双晶ラメラに沿った単純剪断が生ずる. 図中のベクトルの定義は本文参照.

ラの体積比率, 方解石の全粒子数に対する双晶を持つ粒子の割合が, 差応力 $\Delta\sigma$ の指標になり得る(Jamison and Spang, 1976; Laurent et al., 1990). これらは容易に測定できる量なのでしばしば利用され(例えば, 西川ほか, 2008), 差応力計としてのキャリブレーションが変形実験により行われている(Rowe and Rutter, 1990; Sakaguchi et al., 2011; Rybacki et al., 2013). しかし, *e* 双晶を実験で作るには, フィールドにおける適用温度領域である常温～百数十 $^\circ\text{C}$ より高温で変形させることが多く, また, 負荷したはずの応力と不適切な *g* ベクトルをもつラメラが無視されることなど(Nemcok et al. (1999)が提示する実験結果には, 鉛直圧縮したサンプル中になぜか逆断層タイプの動きをした双晶が多数含まれる), 実験による差応力計のキャリブレーションの問題点を, Rybacki et al. (2013)が指摘している. 彼らの実験によると, 密度と $\Delta\sigma$ のあいだに相関はあるが, $\Delta\sigma$ の見積もりは約 50% もの誤差を含むという(Rybacki et al., 2013). また彼らの $\Delta\sigma$ 見積もりは, Rowe and Rutter (1990)および Sakaguchi et al. (2011)より有意に小さい. 変形実験では歪み速度や温度が天然にくらべて過大なことが多いことを考えると, 天然データによるキャリブレーションも重要だろう.

2. 方向データの逆解析

双晶の *e* と *g* という方向データの逆解析で, 主応力軸の方向や応力比のみならず差応力も推定できる. その方法論的研究は, 断層の既存の逆解析法を参照しながら進められた.

(1) 小断層解析法の適用

この路線で先鞭をつけたのは Turner(1953)だった. 彼はいわば共役断層法を *e* 双晶に適用し, *e* と *g* を二等分する方向に P 軸と T 軸があると考え, さらに, 多結晶体のなかの各粒子から得られた両軸それぞれの平均方向を σ_1 軸と σ_3 軸とみなした. これはステレオネットだけでできる簡便な方法であり, 今でもよく使われている(例えば, Takeshita et al., 2014; Tripathy and Saha, 2015). しかし地震の発震機構解の場合と同様, それらの方向に必ずしも σ_1 軸と σ_3 軸が存在するわけではなく, より洗練された方法が求められた. 断

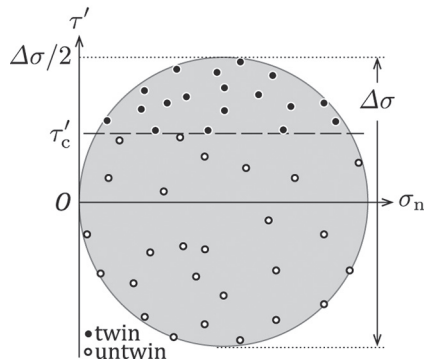


Fig. 6. Mohr diagram showing the normal and resolved shear stresses along the twinning directions of twinned and untwinned *e*-planes.

双晶ラメラを形成した *e* 面としなかった *e* 面に作用した、垂直応力と分解剪断応力(剪断応力の双晶形成方向成分)を示すモール・ダイアグラム。

層の解析法そのままを *e* 双晶に適用した例としては、right dihedral 法(Angelier and Mechler, 1977)による Pfiffner and Burkhard(1987)と Nemcok et al.(1999)、多重逆解析法による Jaya and Nishikawa(2013)、Hough 法(Yamaji et al., 2006)による Kanai and Takagi(2016)の研究がある。

断層の形成条件と双晶の形成条件とは異なるので、断層の解析法を双晶に適用することは適切でない場合がある。方解石双晶の形成条件は、*e* 面上の剪断応力の *g* 方向成分 τ' が臨界値 τ'_c を超えること、すなわち $\tau' \geq \tau'_c$ である(Turner et al., 1953; Lebensohn and Tomé, 1993)。変形実験によると τ'_c は 2~12 MPa であり、粒径や温度に依存するが(Rowe and Rutter, 1990; Rybacki et al., 2013)、10 MPa という値がしばしば使われる(Jamison and Spang, 1976; Lacombe, 2010)。さて、差応力 $\Delta\sigma$ で発生しうる最大剪断応力は $\Delta\sigma/2$ である(Fig. 6)。したがって $\Delta\sigma < 2\tau'_c$ なら *e* 双晶はできない。わずかに $\Delta\sigma$ が $2\tau'_c$ を上まわるときには共役断層に近い方向を持つ *e* 面でしか条件が満たされず、それを満たす面では Wallace-Bott 仮説が近似的に成り立つのである。 $\Delta\sigma$ が大きな時にできたラメラの剪断方向(*g* 方向)は、同仮説が指し示す方向から大きくずれるようになる。 $\Delta\sigma$ が τ'_c の 4~5 倍を超えない低差応力でできた *e* 双晶なら、断層解析手法を適用して主応力軸と応力比を大まかに求めることができる(Yamaji, 2015b)。しかし、断層解析手法では主応力軸の方向と応力比しか決まらない。

(2)20 世紀の逆解法

双晶の方位から、差応力の絶対値を含む偏差応力テンソルを求める逆解法が、70 年代以降に開発された(Jamison and Spang, 1976; Laurent et al., 1981; Etchecopar, 1984; Laurent et al., 1990)。なかでも Etchecopar(1984)の方法はフリーウェアも開発され[URL4]、30 年にわたって世界の様々な地域で使われている。そして、小断層解析などとクロスチェックしたり深度の推定が行われたりしたが(例えば、Lacombe, 2010)、逆解法そのものの方法論的研究は 1990

年前後以降、大きく進展しなかった。Etchecopar 法では τ'_c を定数とした上で、*e* 面のうち双晶ラメラを形成したものを twin 面、そうでないほうを untwin 面とよび、 $\tau' \geq \tau'_c$ が twin 面では満たされ、untwin 面では満たされなかったと考える。すると、偏差応力テンソルをうまく選べば、Fig. 6 のような Mohr ダイアグラムを描き、twin 面と untwin 面のデータ点を上下に分離する水平線(図中の破線)を引くことができる(応力の等方成分は τ' に効かないので、横軸上の Mohr 円の位置は任意)。この分離の良さが最大になる応力を最適応力とする逆解法が Etchecopar 法である。

Etchecopar 法には以下の 3 つの問題がある。第一に、untwin 面には誤判別の恐れがある。薄片と低角をなすラメラは観察されにくいというバイアスにより、twin 面の 25% 近くが untwin 面と誤判別され得る(Yamaji, 2015a)。第二に、 τ'_c を定数と仮定していることが問題である。上述のように双晶密度などが差応力と正の相関を持つことは、双晶形成による歪み硬化、すなわち τ'_c の増加を示している(Laurent et al., 2000)。また、 τ'_c は粒径や温度にも依存することが知られている(Rowe and Rutter, 1990)。第三に、不均一なデータから複数の応力を分離する問題である。一つの応力では説明できない双晶データがしばしば得られる(Groshong, 1972; Lacombe et al., 1990)。多結晶体であるために、一つのサンプルの中で応力が非一様になることもあるだろう。歪み硬化によって双晶ラメラの方向の許容範囲が縮小し、不均一なデータ(差応力値が変化したようにみえるもの)が得られる可能性もあるが、実験的に作られた双晶ラメラの方向解析の例は乏しい(Lacombe and Laurent, 1996; Nemcok et al., 1999; Laurent et al., 2000)。そもそも、Etchecopar 法が τ' という 1 変数で自由度が 5 の偏差応力テンソルを複数識別するのは困難である(Yamaji, 2015b)。

(3)21 世紀の逆解法

上述の問題を解決するため、Yamaji(2015a)は双晶形成条件 $\tau' \geq \tau'_c$ を偏差応力空間(Sato and Yamaji, 2006a)における幾何学的条件に書き換えた。すなわち、データに対応する点が 5 次元の単位球上でクラスターをなし、クラスターのサイズが $\Delta\sigma$ の関数であり、 $\Delta\sigma$ が τ'_c の数倍までであれば、 $\Delta\sigma$ を精度よく決定できることを見いだした。これらにもとづいて、一般化 Hough 変換(Ballard, 1981)により不均一な双晶データから複数の応力が分離でき、上記のバイアスや τ'_c 値にバリエーションがあってもロバストな解が得られることを Yamaji(2015b)が示した。しかし分解能には改善の余地があり、また、分離すべき 2 つの応力の $\Delta\sigma$ 値が同程度であれば十分異なる応力でも識別しにくかった。この問題は 5 次元の球面上のデータ点のファジー・クラスター解析で解決でき、検出すべき応力の数も情報量基準で推定できる(山路, 2015, 2016c; Yamaji, 2016c)。また、温度、深度、偏差応力テンソル、 τ'_c についての連立方程式を解くことで、それらが推定できる(Yamaji, 2016b; 山路, 2016b)。

機械的双晶の応力逆解析は、ドロマイトなど他の種類の鉱物にも適用可能である(Groshong, 1972; Passchier and Trouw, 2005)。しかし方解石以外は手つかずのようである。

方解石では τ_c が数 MPa~十 MPa なので、応力逆解析が差応力に感度を持つのは十 MPa~百 MPa、埋没深度にして数百 m~数 km、温度では約 200°C 以下の領域が研究対象である (Burkhard, 1993; González-Casado et al., 2006; Lacombe et al., 2009)。 τ_c 値の異なる鉱物が使えれば、異なる領域のテクトニクスを研究する手段になるだろう (Newman, 1994)。

今後の展望

小論は種々のデータを用いた応力逆解析法について、ここ四半世紀ほどの発展を概観した。応力逆解析法の方法論に残された課題は、以下の 3 点にまとめられるだろう。

第一に、応力の時空間変化の理解のため、不均一なデータセットに記録された複数の応力を分離して検出するという課題である。この課題は、岩脈・鉱物脈や方解石双晶の解析法では情報量基準を使って解決済みである (例えば, Yamaji and Sato, 2011; Yamaji, 2016a)。しかし、利用される機会が多い小断層や地震の発震機構解の解析法では成功していない。これは、1 条の断層データがパラメタ空間の 1 点ではなく半円弧に対応し、しかも有意な応力が半円弧の交点で表されるという複雑な問題構成 (Sato and Yamaji, 2006a) に起因する。この問題構成を単純化するパラメタ空間が発見されれば、クラスター解析でこの問題を解くことができるのだが、今後の課題である。

第二に、複数の応力が検出された場合にそれらの前後関係、さらには絶対年代を知るという課題である。これは地震の発生時刻が既知である発震機構解の解析では問題にならないが、地質時代に形成された構造の解析では重要な問題である。火成岩脈なら放射年代の測定が可能な場合がある。断層に関しては、近年発達してきた断層破碎帯物質の形成年代測定法 (例えば, Zwingmann et al., 2010) の利用 (例えば, Tonai et al., 2016) が有効だろう。

第三に、規格化応力テンソル (主応力軸方位と応力比) に含まれないパラメタを推定する問題である。特に、間隙流体圧比、摩擦係数、そして差応力や主応力の絶対値の決定が望まれる。小論で紹介した手法もその一部は達成しているが (例えば, Yamaji et al., 2010; Yamaji, 2015a; Sato, 2016)、特に絶対値の決定は地質構造の方位解析のみでは不可能であり、実験値などが不可欠である。鉱物脈の解析において流体包有物から間隙流体圧値を得る (例えば, Hashimoto and Eida, 2015)、何らかの地質温度・圧力計と組み合わせで深度を制約するなど、応力逆解析とは独立した解析との組み合わせが鍵となるだろう。

謝 辞

2 名の匿名査読者と、担当編集委員である大阪府立大学の石井和彦准教授のご指摘により、原稿が大きく改善された。本研究の一部に科学研究費補助金 (15H02141, 15K17776, 15H01139) を使用した。記して感謝の意を表します。

文 献

- Abers, G. A. and Gephart, J. W., 2001, Direct inversion of earthquake first motions for both the stress tensor and focal mechanisms and application to southern California. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 26523–26540.
- Anderson, E. M., 1905, The dynamics of faulting. *Trans. Edinburgh Geol. Soc.*, **8**, 387–402.
- Anderson, E. M., 1951, *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*, 2nd ed., Oliver and Boyd, London, 206p.
- Angelier, J., 1979, Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, **56**, T17–T26.
- Angelier, J., 1984, Tectonic analysis of fault slip data sets. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 5835–5848.
- Angelier, J., 1989, From orientation to magnitudes in paleo-stress determinations using fault slip data. *Jour. Strat. Geol.*, **11**, 37–50.
- Angelier, J., 1994, Fault slip analysis and palaeostress reconstruction. In Hancock, P. L. ed., *Continental Deformation*, Pergamon Press, Oxford, 53–100.
- Angelier, J., 2002, Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV—a new method free of choice among nodal planes. *Geophys. Jour. Int.*, **150**, 588–609.
- Angelier, J. and Mechler, P., 1977, Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **19**, 1309–1318.
- Arnold, R. and Townend, J., 2007, A Bayesian approach to estimating tectonic stress from seismological data. *Geophys. Jour. Int.*, **170**, 1336–1356.
- Ballard, D. H., 1981, Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognit.*, **13**, 111–122.
- Borradaile, G. J., 2003, *Statistics of Earth Science Data: Their Distribution in Time, Space and Orientation*. Springer, Berlin, 280p.
- Burkhard, M., 1993, Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. *Jour. Strat. Geol.*, **10**, 673–684.
- Bott, M. H. P., 1959, The mechanics of oblique slip faulting. *Geol. Mag.*, **96**, 109–117.
- Carey, M. E. and Brunier, M. B., 1974, Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *C. R. Acad. Sci.*, **279**, 891–894.
- Célérier, B., Etchecopar, A., Bergerat, F., Vergely, P., Arthaud, F. and Laurent, P., 2012, Inferring stress from faulting: From early concepts to inverse methods. *Tectonophysics*, **581**, 206–219.
- Delaney, P. T., Pollard, D. D., Ziony, J. I. and McKee, E. H., 1986, Field relations between dikes and joints: Emplacement processes and paleostress analysis. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 4920–4938.
- Etchecopar, A., 1984, *Etude des États de Contraintes en Tectonique Cassante et Simulation de Déformations Plastiques (Approche Mathématique)*. PhD Thesis, Univ. Montpellier, 270p.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daignières, M., 1981, An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Jour. Struct. Geol.*, **3**, 51–65.
- Ellsworth, W. L. and Zhonghuai, X., 1980, Determination of the stress tensor from focal mechanism data. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **61**, 1117.
- Fry, N., 1999, Striated faults: visual appreciation of their constraint on possible paleostress tensors. *Jour. Strat. Geol.*, **21**,

- 7–21.
- Gephart, J. W. and Forsyth, D. W., 1984, An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 9305–9320.
- González-Casado, J. M., Gumiel, P., Giner-Robles, J. L., Campos, R. and Moreno, A., 2006, Calcite e-twins as markers of recent tectonics: insights from Quaternary karstic deposit from SE Spain. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 1084–1092.
- Groshong, R. H., 1972, Strain calculated from twinning in calcite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **83**, 2025–2038.
- Hardebeck, J. L. and Michael, A. J., 2006, Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, B11310, doi: 10.1029/2005JB004144.
- Hasegawa, A., Yoshida, K., Asano, Y., Okada, T., Inuma, T. and Ito, Y., 2012, Change in stress field after the 2011 great Tohoku-oki earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **355–356**, 231–243.
- Hashimoto, Y. and Eida, M., 2015, Quantitative estimation of fluid pressure ratio of shear vein in an on-land accretionary complex, the Yokonami mélange, the Cretaceous Shimanto Belt, Kochi, southwest Japan. *Tectonophysics*, **665**, 17–22.
- Hashimoto, Y., Tobe, K., Yeh, E. C., Lin, W. and Song, S. R., 2015, Changes in paleostress and its magnitude related to seismic cycles in the Chelung-pu Fault, Taiwan. *Tectonics*, **34**, 2418–2428.
- Horiuchi, S., Rocco, G. and Hasegawa, A., 1995, Discrimination of fault planes from auxiliary planes based on simultaneous determination of stress tensor and a large number of fault plane solutions. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 8327–8338.
- Hoshi, H. and Takagawa, M., 2009, Early Miocene parallel dike swarms in the Tsuruga Bay area, back-arc side of central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 96–99.
- Hung J. H. and Kuo C. K., 1999, Calcite twins for determining paleostress and paleostress in the thrust front of the Taiwan collisional belt. *Jour. Geol. Soc. China*, **42**, 209–232.
- Imanishi, K., Kuwahara, Y., Takeda, T., Mizuno, T., Ito, H., Ito, K., Wada, H. and Haryu, Y., 2011, Depth-dependent stress field in and around the Atotsugawa fault, central Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms: Evidence for localized aseismic deformation in the downward extension of the fault. *Jour. Geophys. Res.*, **116**, B01305, doi: 10.1029/2010JB007900.
- Isacks, B. and Molnar, P., 1971, Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys.*, **9**, 103–174.
- Jaeger, J. C., 1956, *Elasticity, Fracture and Flow*, 2nd ed. Methuen, London, 212p.
- Jamison, R. W. and Spang, J., 1976, Use of calcite twin lamellae to infer differential stresses. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **87**, 868–887.
- Jaya, A. and Nishikawa, O., 2013, Paleostress reconstruction from calcite twin and fault-slip data using the multiple inverse method in the East Walanae fault zone: Implications for the Neogene contraction in South Sulawesi, Indonesia. *Jour. Struct. Geol.*, **55**, 34–49.
- Jolly, R. J. H. and Sanderson, D. J. A., 1997, Mohr circle construction for the opening of a pre-existing fracture. *Jour. Struct. Geol.*, **19**, 887–892.
- Kanai, T. and Takagi, H., 2016, Determination of the stress conditions of the ductile-to-brittle regime along the Asuke Shear Zone, SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **85**, 154–167.
- 金井拓人・高木秀雄(Kanai, T. and Takagi, H.), 2017, 中部地方白亜紀花崗岩類中に発達するヒールドマイクロクラックを用いた古応力解析：特に中央構造線と直交方向に沿った変化について (Paleostress directions estimated from healed microcracks in the Cretaceous granitoids: their variation along a transect normal to the Median Tectonic Line, central Japan). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **123**, 147–162.
- 金井拓人・山路 敦・高木秀雄(Kanai, T., Yamaji, A. and Takagi, H.), 2014, 混合ビンガム分布を適用したヒールドマイクロクラックによる古応力解析：中部地方の領家花崗岩類における例 (Paleostress analyses by means of mixed Bingham distributions of healed microcracks in the Ryoke granites, Central Japan). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **120**, 23–35.
- Kang, S. S., Kim, J. M. and Jang, B. A., 2005, Paleostress fields from calcite twins in Pyeongan Supergroup, South Korea. *Island Arc*, **14**, 137–149.
- Katsumata, K., Kosuga, M., Katao, H. and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2010, Focal mechanisms and stress field in the Atotsugawa fault area, central Honshu, Japan. *Earth Planets Space*, **62**, 367–380.
- Kim, J. M., Jang, B. A., Obara, Y. and Kang, S. S., 2008, Paleostress reconstructions based on calcite twins in the Joseon Supergroup, northeastern Ogcheon Belt (South Korea). *Island Arc*, **17**, 57–69.
- 小林博文・山路 敦・増田富士雄(Kobayashi, H., Yamaji, A. and Masuda, F.), 2005, 能登半島輪島地域の中新統の層序・堆積環境・テクトニクス (Miocene stratigraphy, sedimentary environments and tectonics in the Wajima area, Noto Peninsula, southern margin of the Japan Sea). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **111**, 286–299.
- 楠橋 直・山路 敦(Kusuhashi, N. and Yamaji A.), 2001, 愛媛県面河地域の久万層群が示す西南日本の中新世テクトニクス (Miocene tectonics of SW Japan as inferred from the Kuma Group, Shikoku). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **107**, 26–40.
- Lacombe, O., 2010, Calcite twins, a tool for tectonic studies in thrust belts and stable orogenic forelands. *Oil Gas Sci.*, **65**, 809–838.
- Lacombe, O., 2012, Do fault slip data inversions actually yield “paleostresses” that can be compared with contemporary stresses? A critical discussion. *C. R. Geosci.*, **344**, 159–173.
- Lacombe, O., Angelier, J., Laurent, Ph., Bergerat, F. and Tournet, Ch., 1990, Joint analyses of calcite twins and fault slips as a key for deciphering polyphase tectonics: Burgundy as a case study. *Tectonophysics*, **182**, 279–300.
- Lacombe, O. and Laurent, P., 1996, Determination of deviatoric stress tensors based on inversion of calcite twin data from experimentally deformed monophase samples: preliminary results. *Tectonophysics*, **255**, 189–202.
- Lacombe O., Malandain J., Vilasi N., Amrouch K. and Roure F., 2009, From paleostresses to paleoburial in fold-thrust belts: preliminary results from calcite twin analysis in the outer Albanides. *Tectonophysics*, **475**, 128–141.
- Laurent, P., Bernard, P., Vasseur, G. and Etchecopar, A., 1981, Stress tensor determination from the study of e twins in calcite: a linear programming method. *Tectonophysics*, **78**, 651–660.
- Laurent, P., Kern, H. and Lacombe, O., 2000, Determination of deviatoric stress tensors based on inversion of calcite twin data from experimentally deformed monophase samples. Part II. Axial and triaxial stress experiments. *Tectonophysics*, **327**, 131–148.
- Laurent, P., Tournet, C. and Laborde, O., 1990, Determining deviatoric stress tensors from calcite twins: applications to monophased synthetic and natural polycrystals. *Tectonics*, **9**, 379–389.
- Leavers, V. F., 1992, *Shape Detection in Computer Vision Using the Hough Transform*. Springer-Verlag, London, 201p.
- Lebensohn, R. A. and Tomé, C. N., 1993, A study of the stress state associated with twin nucleation and propagation in

- anisotropic materials. *Phil. Mag. A*, **67**, 187–206.
- Lisle, R. J. and Srivastava, D. C., 2004, Test of the frictional reactivation theory for faults and validity of fault-slip analysis. *Geology*, **32**, 569–572.
- Macchiavelli, C., Mazzoli, S., Megna, A., Saggese, F., Santini, S. and Vitale, S., 2012, Applying the Multiple Inverse Method to the analysis of earthquake focal mechanism data: New insights into the active stress field of Italy and surrounding regions. *Tectonophysics*, **580**, 124–149.
- Martínez-Garzón, P., Bohnhoff, M., Kwiatak, G., Dresen, G., 2013, Stress tensor changes related to fluid injection at The Geysers geothermal field, California. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2596–2601.
- McFarland, J. M., Morris, A. P. and Ferrill, D. A., 2012, Stress inversion using slip tendency. *Comp. Geosci.*, **41**, 40–46.
- メンケ, W., 柳谷 俊・塚田和彦訳 (Menke, W., translated by Yanagidani, T. and Tsukada, K.), 1997, 離散インバース理論: 逆問題とデータ解析 (*Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*). 古今書院 (Kokon Shoin), 東京, 294p.
- Michael, A. J., 1984, Determination of stress from slip data: Faults and folds. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 11517–11526.
- Michael, A. J., 1987, Use of focal mechanisms to determine stress: A control study. *Jour. Geophys. Res.*, **92**, 357–368.
- Michael, A. J., 1991, Spatial variation in stress within the 1987 Whittier Narrows California aftershock sequence: New techniques and results. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, 6303–6319.
- 南澤智美・桑野一彦・坂口有人・橋本善孝 (Minamizawa, S., Kuwano, K., Sakaguchi, A. and Hashimoto, Y.), 2006, 四国古第三系四十万帯室戸層の構造解析と古応力場解析 (Structural and paleo-stress analyses of Muroto formation, the Tertiary Shimanto Complex, Shikoku). 構造地質 (*Struct. Geol.*), **49**, 87–98.
- 三野浩一朗・山路 敦 (Mino K. and Yamaji A.), 1999, 複数の応力状態を経験した地域における小断層解析: 房総半島の更新統を例として (The separation of paleostresses from heterogeneous fault-slip data: the case of Boso area, Japan). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **105**, 574–584.
- Miyakawa, A. and Otsubo, M., 2015, Applicability of slip tendency for understanding long-term fault activity: A case study of active faults in northeastern Japan. *Jour. Japan Soc. Civil. Eng.*, **3**, 105–114.
- 宮本定明 (Miyamoto, S.), 1999, クラスタ分析入門: ファジィクラスタリングの理論と応用 (*Introduction to Cluster Analysis: Theory and Applications of Fuzzy Clustering*). 森北出版 (Morikita Publ.), 東京, 164p.
- Morris, A., Ferrill, D. A. and Henderson, D. B., 1996, Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, **24**, 275–278.
- Nakamura, K., 1977, Volcanos as possible indicators of tectonic stress orientation—principle and proposal. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **2**, 1–16.
- Nemcok, M., Kováč, D. and Lisle, R. J., 1999, A stress inversion procedure for polyphase calcite twin and fault/slip data sets. *Jour. Struct. Geol.*, **21**, 597–611.
- Nemcok, M. and Lisle, R. J., 1995, A stress inversion procedure for polyphase fault/slip data sets. *Jour. Struct. Geol.*, **17**, 1445–1453.
- Newman, J., 1994, The influence of grain size and grain size distribution on methods for estimating paleostresses from twinning in carbonates. *Jour. Struct. Geol.*, **16**, 1589–1601.
- 西川 治・奥平敬元・吉田昌幸・白石建雄 (Nishikawa, O., Okudaira, T., Yoshida, M. and Shiraishi, T.), 2008, 出羽丘陵新第三系に発達する変形構造 (Deformation structures developed in the Neogene strata in Dewa hilly land, Akita Prefecture). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **114**, S75–S85.
- Orife, T. and Lisle, R. J., 2003, Numerical processing of palaeo-stress results. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 949–957.
- Otsubo, M., Miyakawa, A., Kawasaki, R., Sato, K., Yamaguchi, A. and Kimura, G., 2016, Variations in stress and driving pore fluid pressure ratio using vein orientations along megasplay faults—example from the Nobeoka Thrust, southwest Japan. *Island Arc*, **25**, 421–432.
- Otsubo, M., Sato, K. and Yamaji, A., 2006, Computerized identification of stress tensors determined from heterogeneous fault-slip data by combining the multiple inverse method and k-means clustering. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 991–997.
- 大坪 誠・重松紀生・北川有一・小泉尚嗣 (Otsubo, M., Shigematsu, N., Kitagawa, Y. and Koizumi, N.), 2009, 南海トラフ沈み込み帯前弧陸域での応力場変遷: 熊野市井内浦および紀北町海山観測点コアをきる断層面を用いて (Stress history in the forearc region of the Nankai trough subduction zone: paleostress analysis based on faults in core samples from the Kumano Ichiura and Kihoku Miyama sites, Kii Peninsula, SW Japan). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **115**, 457–469.
- Otsubo, M., Yamaji, A. and Kubo, A., 2008, Determination of stresses from heterogeneous focal mechanism data: An adaptation of the multiple inverse method. *Tectonophysics*, **457**, 150–160.
- Ottosen, N. and Ristinmaa, M., 2005, *The Mechanics of Constitutive Modeling*. Elsevier, Amsterdam, 745p.
- Pasquale, G., Matteis, R., Romeo, A. and Maresca, R., 2008, Earthquake focal mechanisms and stress inversion in the Irpinia Region (southern Italy). *Jour. Seismol.*, **13**, 107–124.
- Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J., 2005, *Microtectonics*, 2nd ed. Springer, Berlin, 366p.
- Pfiffner, O. A. and Burkhard, M., 1987, Determination of paleo-stress axes orientations from fault, twin and earthquake data. *Ann. Tectonicae*, **1**, 48–57.
- Pollard, D. D., 1993, Stress inversion methods: are they based on faulty assumptions? *Jour. Struct. Geol.*, **15**, 1045–1054.
- Ramsay, J. G. and Lisle, R. J., 2000, *The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 3: Applications of Continuum Mechanics in Structural Geology*. Academic Press, London, 1061p.
- Rice, J. R., 1980, The mechanics of earthquake rupture. In Dziewonski, A. M. and Boschi, E. ed. *Physics of the Earth's Interior*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 555–649.
- Rivera, L. and Cisternas, A., 1990, Stress tensor and fault solutions for a population of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **80**, 600–614.
- Rowe, D. W. and Rutter, E., 1990, Palaeostress estimation using calcite twinning: experimental calibration and application to nature. *Jour. Struct. Geol.*, **12**, 1–17.
- Rybacki, E., Evans, B., Janssen, C., Wirth, W. and Dresen, G., 2013, Influence of stress, temperature, and strain on calcite twins constrained by deformation experiments. *Tectonophysics*, **601**, 20–36.
- Sakaguchi, A., Sakaguchi, H., Nishiura, D., Nakatani, M. and Yoshida, S., 2011, Elastic stress indication in elastically rebounded rock. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L09316, doi: 10.1029/2011GL047055.
- Sato, K., 2006, Incorporation of incomplete fault-slip data into stress tensor inversion. *Tectonophysics*, **421**, 319–330.
- 佐藤活志 (Sato, K.), 2010, 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 (A comparative study between multiple inverse method and Hough-transform-based inverse method for stress estimation). 日本地球惑星科学連合 2010 年大会予稿集 (*Japan Geosci. Union Meet. 2010, Abstract*), STT075-01.
- Sato, K., 2012a, Fast multiple inversion for stress analysis from fault-slip data. *Comp. Geosci.*, **40**, 132–137.
- Sato, K., 2012b, Physical meaning of stress difference for fault-slip analysis. *Math. Geosci.*, **44**, 635–644.
- Sato, K., 2016, A computerized method to estimate friction coefficient from orientation distribution of meso-scale faults. *Jour. Struct. Geol.*, **89**, 44–53.

- Sato, K. and Yamaji, A., 2006a, Embedding stress difference in parameter space for stress tensor inversion. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 957–971.
- Sato, K. and Yamaji, A., 2006b, Uniform distribution of points on a hypersphere for improving the resolution of stress tensor inversion. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 972–979.
- Sato, K., Yamaji, A. and Tonai, S., 2013, Parametric and non-parametric statistical approaches to the determination of paleostress from dilatant fractures: Application to an Early Miocene dike swarm in central Japan. *Tectonophysics*, **588**, 69–81.
- Sbar, M. L., 1982, Delineation and interpretation of seismotectonic domains in western North America. *Jour. Geophys. Res.*, **87**, 3919–3928.
- Schoenball, M., Dorbath, L., Gaucher, E., Wellmann, J. F. and Kohl, T., 2014, Change of stress regime during geothermal reservoir stimulation. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 1163–1170.
- Takeshita, T., Yamaguchi, A. and Shigematsu, N., 2014, Stress reversal recorded in calcite vein cuttings from the Nankai accretionary prism, southwest Japan. *Earth Planets Space*, **66**, 144, doi: 10.1186/s40623-014-0144-4.
- Terakawa, T. Matsu'ura, M., 2008, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields. *Geophys. Jour. Int.*, **172**, 674–684.
- 寺川寿子・松浦充宏(Terakawa, T. Matsu'ura, M.), 2009, 地震学における応力インバージョンの新展開: CMT データインバージョン法による応力場の推定(A Methodological breakthrough in stress inversion: Estimation of 3-D tectonic stress patterns from CMT data inversion). 地震第2輯(*Jour. Seismol. Soc. Japan. 2nd Ser.*), **61**, 339–346.
- Terakawa, T., Miller, S. A. and Deichmann, N., 2012, High fluid pressure and triggered earthquakes in the enhanced geothermal system in Basel, Switzerland. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, B07305, doi: 10.1029/2011JB008980.
- Terakawa, T., Zaporowski, A., Galvan, B. and Miller, S. A., 2010, High-pressure fluid at hypocentral depths in the L'Aquila region inferred from earthquake focal mechanisms. *Geology*, **38**, 995–998.
- Tonai, S., Ito, S., Hashimoto, Y., Tamura, H. and Tomioka, N., 2016, Complete ^{40}Ar resetting in an ultracataclastite by reactivation of a fossil seismogenic fault along the subducting plate interface in the Mugli Mélange of the Shimanto accretionary complex, southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **89**, 19–29.
- Tonai, S., Sato, K. and Ashi, J., 2011, Incremental fold test for paleostress analysis using the Hough transform inverse method. *Jour. Struct. Geol.*, **33**, 1158–1168.
- Townend, J., Zoback, M. D., 2006, Stress, strain, and mountain building in central Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, B03411, doi: 10.1029/2005JB003759.
- Tripathy, V. and Saha, D., 2015, Inversion of calcite twin data, paleostress reconstruction and multiphase weak deformation in cratonic interior: Evidence from the Proterozoic Cuddapah basin, India. *Jour. Struct. Geol.*, **77**, 62–81.
- Tsunakawa, H., 1986, Neocene stress field of the Japanese arcs and its relation to igneous activity. *Tectonophysics*, **124**, 1–22.
- Tsutsumi, H., Sato, K., and Yamaji, A. 2012, Stability of the regional stress field in central Japan during the late Quaternary inferred from the stress inversion of the active fault data. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L23303, doi: 10.1029/2012GL054094.
- Turner, F. J., 1953, Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. *Amer. Jour. Sci.*, **251**, 276–298.
- Twiss, R. J., Unruh, J. R., 1998, Analysis of fault slip inversions: Do they constrain stress or strain rate? *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 12205–12222.
- Wallace, R. E., 1951, Geometry of shearing stress and relation to faulting. *Jour. Geol.*, **59**, 118–130.
- Wu, Y. M., Hsu, Y. J., Chang, C. H., Teng, L. S., Nakamura, M., 2010, Temporal and spatial variation of stress field in Taiwan from 1991 to 2007: Insights from comprehensive first motion focal mechanism catalog. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **298**, 306–316.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 1999, 多重逆解析: 複数の応力を検出する小断層解析の新技术(Multiple inverse method: a numerical technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data). 構造地質(*Struct. Geol.*), **43**, 79–88.
- Yamaji, A., 2000a, The multiple inverse method applied to meso-scale faults in mid-Quaternary fore-arc sediments near the triple trench junction off central Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **22**, 429–440.
- Yamaji, A., 2000b, The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, **22**, 441–452.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 2001, 新しい小断層解析(Review on fault striation analysis). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **107**, 461–479.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 2012, 岩脈法発達史(A historical review of the methods for inferring paleostresses from dike orientations). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 335–350.
- Yamaji, A., 2015a, How tightly does calcite e-twin constrain stress? *Jour. Struct. Geol.*, **72**, 83–95.
- Yamaji, A., 2015b, Generalized Hough transform for the stress inversion of calcite twin data. *Jour. Struct. Geol.*, **80**, 2–15.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 2015, 方解石双晶の方向データから複数の偏差応力テンソルを検出する新技术(A method for determining deviatoric stress tensors from heterogeneous calcite twin data). 日本地質学会第122年学術大会講演要旨(122nd Ann. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), R4-O-15.
- Yamaji, A., 2016a, Genetic algorithm for fitting a mixed Bingham distribution to 3D orientations: a tool for the statistical and paleostress analyses of fracture orientations. *Island Arc*, **25**, 72–83.
- Yamaji, A., 2016b, Solving the simultaneous equations of stress, temperature, depth, and critical resolved shear stress using calcite e-twin data. *Geophys. Res. Abstr.* EGU2016-11966.
- Yamaji, A., 2016c, Separation of deviatoric stress tensors from heterogeneous calcite twin data using a statistical mixture model. *Geophys. Res. Abstr.*, EGU2016-11369.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 2016a, 歪み解析と変形解析の数理: 2. 微小変形とその地質学的計測(Lecture note on the theories of strain and deformation analyses: 2. Infinitesimal deformation and their geological measurements). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **122**, 551–562.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 2016b, 方解石双晶の方位解析による古地温・古深度・古応力の推定(Paleo temperatures, depths and stresses evaluated using calcite twinning paleopiezometry). 日本地球惑星科学連合2016年大会予稿集(*Japan Geosci. Union Meet. 2016, Abstr.*), SCG63-17.
- 山路 敦(Yamaji, A.), 2016c, 複数の偏差応力テンソルを方解石双晶の方向データから検出する統計的混合分布モデル(Statistical mixture model for separating deviatoric stress tensors from heterogeneous calcite twin data). 日本地球惑星科学連合2016年大会予稿集(*Japan Geosci. Union Meet. 2016, Abstr.*), SCG63-P25.
- Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, Paleostress analysis using the Hough transform for separating stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 980–990.
- Yamaji, A. and Sato, K., 2006, Distances for the solutions of stress tensor inversion in relation to misfit angles that accompany the solutions. *Geophys. Jour. Int.*, **167**, 933–942.
- Yamaji, A., Sato, K. and Tonai, S., 2010, Stochastic modeling for the stress inversion of vein orientations: Paleostress

- analysis of Pliocene epithermal veins in southwestern Kyushu, Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **32**, 1137–1146.
- Yamaji, A. and Sato, K., 2011, Clustering of fracture orientations using a mixed Bingham distribution and its application to paleostress analysis from dike or vein orientations. *Jour. Struct. Geol.*, **33**, 1148–1157.
- Yamaji, A. and Sato, K., 2012, A spherical code and stress tensor inversion. *Comp. Geosci.*, **38**, 164–167.
- Yamaji, A., Tomita, S. and Otsubo, M., 2005, Bedding tilt test for paleostress analysis. *Jour. Struct. Geol.*, **27**, 161–170.
- 山元孝広 (Yamamoto, T.), 1991, 日本列島の後期新生代岩脈群と造構応力場 (Late Cenozoic dike swarms and tectonic stress field in Japan), 地調月報 (*Bull. Geol. Surv. Japan*), **42**, 131–148.
- Yoshida, K., Hasegawa, A., Saito, T., Asano, Y., Tanaka, S., Sawazaki, K., Urata, Y., Fukuyama, E., 2016, Stress rotations due to the M6.5 foreshock and M7.3 main shock in the 2016 Kumamoto, SW Japan, earthquake sequence. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 10097–10104.
- Yukutake, Y., Takeda, T. and Yoshida, A., 2015, The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **411**, 188–198.
- Zoback, M. L., Zoback, M. D., 1980, State of stress in the conterminous United States. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 6113–6156.
- Zwingmann, H., Yamada, K. and Tagami, T., 2010, Timing of brittle deformation within the Nojima fault zone, Japan. *Chem. Geol.*, **275**, 176–185.
- [URL1] 原子力規制委員会 (Nuclear Regulation Authority), 原子力発電所敷地内破砕帯の調査に関する有識者会合 (Expert meeting on the investigation of fracture zones in the nuclear power plants)*. <http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yyushikisya/hasaitai.html>
- [URL2] 原子力規制委員会 (Nuclear Regulation Authority), 原子力発電所敷地内破砕帯の評価に関する有識者会合について (Basic policy of the expert meetings on the investigations of fracture zones in the nuclear power station sites)*. <http://www.nsr.go.jp/data/000047086.pdf>
- [URL3] 原子力規制委員会 (Nuclear Regulation Authority), 関西電力株式会社大飯発電所の敷地内破砕帯の評価について (Report on investigation of fracture zones at the Ohi Power Station, Kansai Electric Power Co., Inc.)*. <http://www.nsr.go.jp/data/000047800.pdf>
- [URL4] Célérrier, B., Software available on this site. <http://www.bcelerier.univ-montp2.fr/software/bc.software.e.html>

* English translation from the original written in Japanese.

(要 旨)

佐藤活志・大坪 誠・山路 敦, 2017, 応力逆解析手法の発展と応用. 地質雑, **123**, 391–402. (Sato, K., Otsubo, M. and Yamaji, A., 2017, Recent advancement and applications of stress tensor inversion techniques. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **123**, 391–402.)

応力逆解析法は、現在または地質学的過去の、テクトニクスを原動力を解明する方法である。この方法は理学的研究だけでなく、防災や原発の安全評価にも使われるようになった。データは、小断層、地震の発震機構解、岩脈や鉱物脈などの引張割れ目、方解石双晶から得られる。応力の時空間変化の把握には、異なる応力に由来するデータが混在していても、応力を分離検出する必要がある。ここ四半世紀で、まず小断層解析でそれが可能となり、地震の発震機構解の解析にも応用されるようになった。次いで岩脈や鉱物脈で可能になり、さらに3本の主応力軸方位・応力比のみならず流体圧も制約できるようになった。方解石双晶でも分離検出が最近可能になり、主応力軸方位と応力比に加え、差応力の推定も可能になりつつある。

(著者プロフィール)



佐藤活志 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻。研究内容：構造地質学、テクトニクス。小論では全体の総括および断層スリップデータの節の主部と岩脈の節を執筆。



大坪 誠 産業技術総合研究所地質調査総合センター主任研究員。研究内容：構造地質学、テクトニクス。小論では地震の発震機構解の節と断層スリップデータの節の原発審査への応用に関する部分を執筆。



山路 敦 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻教授。研究内容：構造地質学、テクトニクス。小論では方解石双晶の節を執筆。