

## 変形鉱物脈群を用いた岩石の延性変形の定量解析法 —変形脈群法の概要と解析プログラム—

副島祥吾

深田地質研究所

A quantitative analysis method for ductile deformation of rocks  
using deformed mineral vein sets  
- Overview of the deformed vein sets method and its analysis program -

SOEJIMA Shogo

Fukada Geological Institute

要旨：構造地質学において、岩石の変形は基本的な情報源である。しかし、従来の変形解析手法の多くは、伸長比（歪み楕円の軸比）は分かるものの、絶対的な長さ変化は推定できず、一般的に体積変化を無視することで解釈が進められる。本稿では、変形した鉱物脈群の形状と方位のデータを用いて、2次元的な変形の3要素（歪み・回転・面積変化）を同時かつ定量的に決定する手法である「変形脈群法」について解説する。本手法は、物質線の伸長・短縮履歴を反映する鉱物脈の形状タイプの分布が、岩石が経験した変形パラメータに依存することを利用する。2次元の変形勾配テンソルを幾何学的に表現するモール円と統計的手法の組み合わせにより、野外データから不確実性を考慮した上で変形パラメータを抽出できる。本稿では、手法の理論的背景と、野外での測定からpythonを用いたデータ解析までの具体的な手順を解説する。また、米国フランシスカン帯の変成堆積岩に本手法を適用した事例を紹介し、本手法の特徴と利点を示す。

キーワード：変形鉱物脈, 有限変形解析, モール円, 体積変化, フランシスカン帯

Abstract: In structural geology, rock deformation serves as a fundamental source of information. However, many conventional deformation analysis methods can determine the stretch ratio (aspect ratio of the strain ellipse) but cannot estimate absolute length changes, and interpretations generally proceed by ignoring volume changes. This paper explains the “Deformed Vein Sets method,” a technique that simultaneously and quantitatively determines the three elements of two-dimensional deformation (strain, rotation, and area change) using data on the shape and orientation of deformed mineral veins. This method exploits the fact that the distribution of mineral vein shape types, reflecting the elongation/shortening history of material lines, depends on the deformation parameters experienced by the rock. By combining the “Mohr circle,” a geometric representation of the two-dimensional deformation gradient tensor, with statistical methods, deformation parameters can be extracted from field data while accounting for uncertainty. This paper explains the theoretical background of the method and the specific procedure from field measurements to data analysis using Python. It also presents a case study applying this method to metamorphic sedimentary rocks in the Franciscan belt of the United States, demonstrating its characteristics and advantages.

Keywords: Deformed mineral vein, Finite deformation analysis, Mohr circle, Volume change, Franciscan belt

## 1. はじめに

構造地質学において、岩石の延性変形の解析は、地質構造の復元やテクトニクスの議論における最も基本的な情報源の一つである。有限変形は、1) 歪み (shape change), 2) 回転 (rotation), 3) 体積変化 (volume change) の3つの要素から構成される。このうち、岩石中の変形したマーカー (礫や化石など) の形状や方位を利用して歪み量を推定する手法 ( $R_f/\phi$  法など, Ramsay, 1967) は古くから確立され、広く用いられてきた。また、回転成分 (より正確には変形の非共軸度) を定量化する手法も 1990 年代までには開発され、多くの地質体の構造発達過程の理解に貢献してきた (e.g., Xypolias, 2010)。

しかし、3つ目の要素である体積変化の定量化は、容易ではない。それは、多くの変形解析で用いられる歪みマーカーから、伸長比 (歪み楕円体の軸比) は推定できる一方、絶対的な長さ変化の情報は得られないためである。そこで、多くの変形解析では、「変形中は体積が一定である」という仮定を置くことで、伸長比から絶対的な伸縮を推定している。しかし、初期空隙率の大きな岩石の変形や流体移動による物質輸送が無視できない環境での変形において、等体積の仮定は成り立たない可能性がある (e.g., Wood, 1974; Wright & Platt, 1982; Bray & Karig, 1985)。例えば、圧力溶解クリープが卓越するような場では、鉱物の溶解や再沈殿 (solution mass transfer) によって岩石の体積は大きく変化することが報告されている (e.g., Breeding & Ague, 2002; Kawabata et al., 2007; Soejima & Wallis, 2022)。このような溶解物質移動は、地質体の構造発達過程を理解するうえで無視できないだけでなく、沈み込み帯におけるスロー地震の発生メカニズムとも関連して近年

注目されており (Audet & Burgmann, 2014)、その規模を定量化することは地球科学的に重要である。

この既存の変形解析における課題に対し、岩石中の多様な方位を持つ鉱物脈群の変形様式に着目した解析法である「変形脈群法」が提案されている (Talbot, 1970; Passchier, 1990; Wallis, 1992)。この手法では、野外で観察される変形した鉱物脈や岩脈の形状のタイプ分けとその角度分布に基づき、2次元断面における変形の3要素 (歪み, 回転, 面積変化) のすべてを同時に決定可能である。Soejima & Wallis (2022) は、この手法に統計的なアプローチを導入し、野外データの不確実性を考慮した上で、より客観的に変形パラメータを推定する手法を開発した。

本稿の目的は、この変形鉱物脈群を用いた解析法を実際に利用できるよう、その理論的背景から具体的な解析手順、そして Soejima & Wallis (2022) が開発した Python プログラムの利用法までを、平易に解説することである。

本手法を実行するための Python コードは以下からアクセス可能である。shogoesojima. (2025). shogoesojima/2D-Deformed-Vein-Sets-method: 2D Deformed Vein Sets method (2D\_DVS\_2025\_v1.0.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17491199>

## 2. 変形鉱物脈の形状タイプ

野外の露頭では、同じ岩体中にある鉱物脈が、一方は褶曲し (短縮: S)、もう一方はブーディンやネッキングとなり (伸長: E)、また別の脈は褶曲した後に引きちぎられている (短縮後に伸長: S+E)、といった多様な変形様式を示すことがある (図 1)。これは、岩石が延性的に変形する際の流

動場の中で、もともと異なる方位を持っていた物質線（鉱物脈）が、それぞれ異なる伸長・短縮の履歴を経験するためである。

岩石の2次元的な流動変形では、ある瞬間において物質線が伸長する方向である「瞬間伸長領域」と短縮する方向である「瞬間短縮領域」が存在する（図2a）。これらの領域の境界は、瞬間的な伸縮の無い線と定義でき、定常流（steady flow）

の場合、流れの特性によって特定の方向を持つ（Passchier, 1988a, b）。

岩石の変形が進むと、内部の物質線（鉱物脈）は一般的に回転を伴って伸縮する。このとき、

1. 最初から最後まで伸長領域にあり、一貫して引き伸ばされる脈（Eタイプ）。
2. 最初から最後まで短縮領域にあり、一貫して短縮される脈（Sタイプ）。

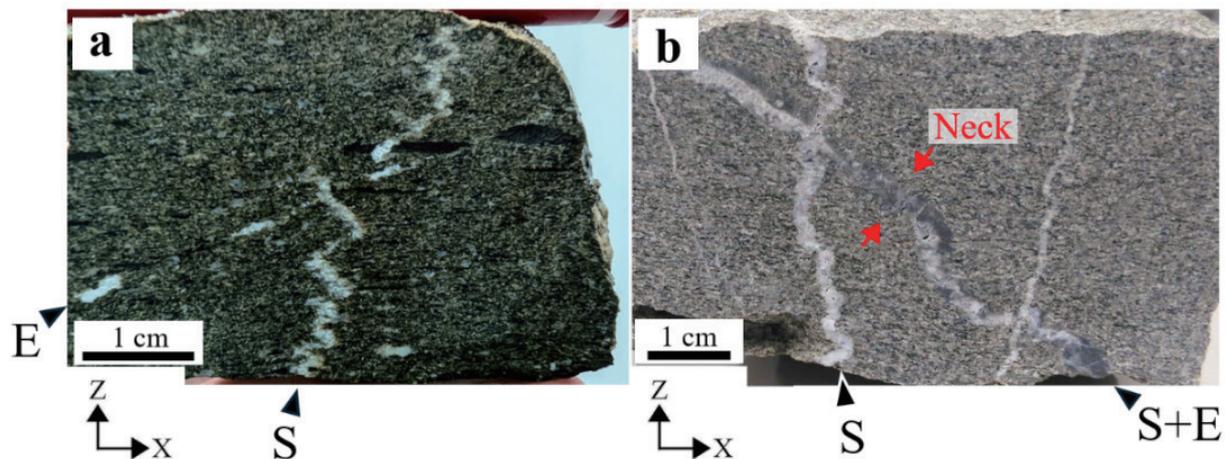


図1 単相変形で同時に形成された異なる形状タイプの変形脈のセットの例。(a) 褶曲脈(S)とブーディング脈(E)のセット。(b) 褶曲脈とネッキングした褶曲脈(S+E)のセット。岩石はいずれもカリフォルニア州デルプエルト峡谷のフランシスカン帯変成グレーワック。どちらの断面も最大伸長方向(x)と最小伸長方向(z)に平行な面(xz面)である

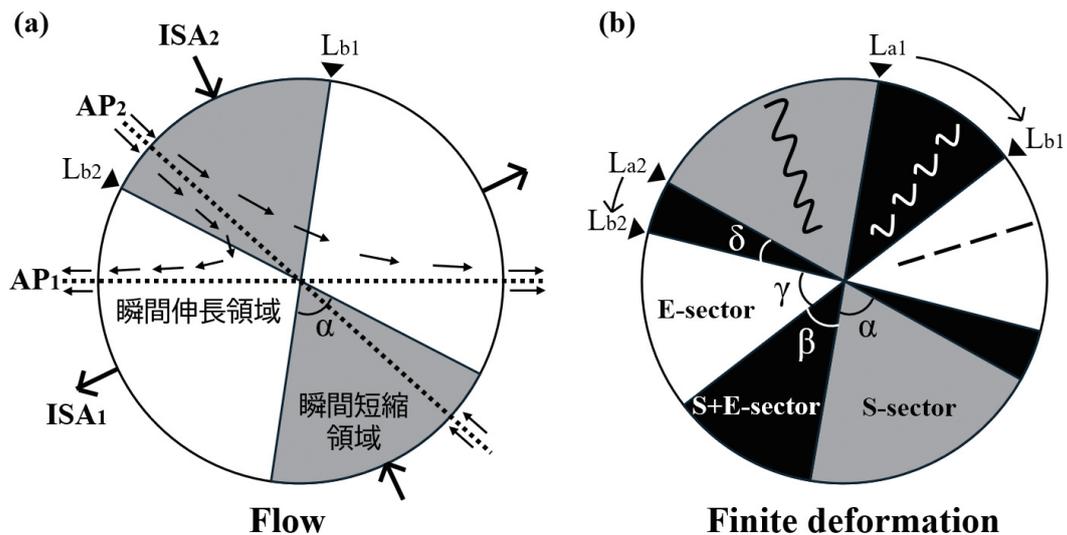


図2 (a) 2次元的な流れの場と伸長・短縮領域。ISA<sub>i</sub> : 瞬間伸長軸, AP<sub>i</sub> : Flow apophyses. Lb<sub>i</sub> : 変形開始時に瞬間的な伸縮の無い向きにある物質線。連続する矢印は流れのパターンの一部を示す。(b) 変形後の岩石における各変形履歴を持つ脈の分布セクター。La<sub>i</sub> : 変形終了時に瞬間的な伸縮の無い向きにある物質線。

3. 最初は短縮領域にあったが、変形の進行に伴い回転して伸長領域に入り、短縮された後に伸長する脈 (S+E タイプ).

4. 最初は伸長領域にあったが、変形の進行に伴い回転して短縮領域に入り、伸長した後に短縮される脈 (E+S タイプ).

という4つの異なる変形履歴を持つ脈が生じうる (Passchier, 1990; Wallis, 1992) (図 2b).

S タイプ脈の分布範囲 ( $\alpha$ ) は、瞬間短縮領域に一致する (図 2b).  $\alpha$  は体積変化と密接に関係しており、 $\alpha < 90^\circ$  なら体積減少、 $\alpha > 90^\circ$  なら体積増加、 $\alpha = 90^\circ$  なら体積一定である (Passchier, 1990; Wallis, 1992). S+E タイプ脈の分布 ( $\beta$ ,  $\delta$ ) は、歪み量と変形の非共軸性と関連し、歪み量が大きいほど  $\beta$  と  $\delta$  は大きくなる傾向にあり、非共軸度が増すほど  $\beta$  と  $\delta$  は非対称的になる. 特に純粋剪断の場合、 $\beta = \delta$  で、単純剪断の場合、 $\beta = 0$  または  $\delta = 0$  となる. E+S タイプ脈は、純粋剪断から単純剪断の間の一般剪断の条件においては非定常流の場合にのみ生じる (Passchier, 1990; Wallis, 1992; Soejima & Wallis, 2022).

したがって、ある変形場において、変形後にどの方向にどのタイプの脈が分布するかは、その岩石が経験した歪み量、運動学的特徴 (純粋剪断か単純剪断か、あるいはその中間か) および体積変化に依存して決まる. 逆に、野外で各タイプの脈が分布する方位を測定することで、その岩石が経験した有限変形の3要素を定量的に復元できる.

### 3 解析の理論と手順

#### 3.1 有限変形のモール円

有限変形は、変形前の座標を  $x$ 、変形後の座標を  $x'$  とすると、 $x' = Fx$  という線形変換で記述できる. この変換行列  $F$  は変形勾配テンソルと呼ばれ

る.

応力テンソルの視覚化ツールとして有名なモール円は、この変形勾配テンソルにも応用でき、「有限変形のモール円 (Mohr circle for finite deformation)」として変形解析の強力なツールとなる (Means, 1982; Passchier, 1988b) (図 3). モール円は、変形勾配テンソルの成分で定義される座標 [ $F_{22}$ ,  $F_{12}$ ] および [ $F_{11}$ ,  $-F_{21}$ ] を直径にもつ円として作図され、円周上の角度関係は実空間の2倍の角度をもつ (Means, 1982; De Paor & Means, 1984). したがって、実空間で直交する2本の線はモール円上では対極にプロットされる.

この有限変形のモール円の最大の利点は、円周上の点の極座標 (原点からの距離と角度) が、対応する方位の物質線が経験した伸縮 (stretch) と回転角 (rotation) を直接示すことにある (Means, 1982). それによって、円の幾何学的なパラメータ ( $R$ ,  $Q$ ,  $T$ ; 図 3) は、以下のように伸長比 ( $R_s$ ), 平均渦度数 ( $W_m$ ) および面積変化 ( $1 + \Delta A$ ) といった変形パラメータと直接対応する (Passchier, 1988b).

$$R_s = (T+R)/(T-R) \quad (1)$$

$$W_m = Q/R \quad (2)$$

$$1 + \Delta A = T^2 - R^2 \quad (3)$$

平均渦度数  $W_m$  は変形の非共軸性 (回転成分の寄与) を示す指標で、 $W_m = 0$  は純粋剪断 (pure shear),  $W_m = 1$  は単純剪断 (simple shear) に対応する (Passchier, 1988a, b).

また、座標系の横軸と円の交点  $A_i$  は、定常流動場における回転の生じない物質線の方向 (flow apophyses) を示している (Ghosh & Ramberg, 1976; Passchier, 1988b).

#### 3.2 野外データからの有限変形モール円の構築

野外で測定した変形脈のデータから、有限変

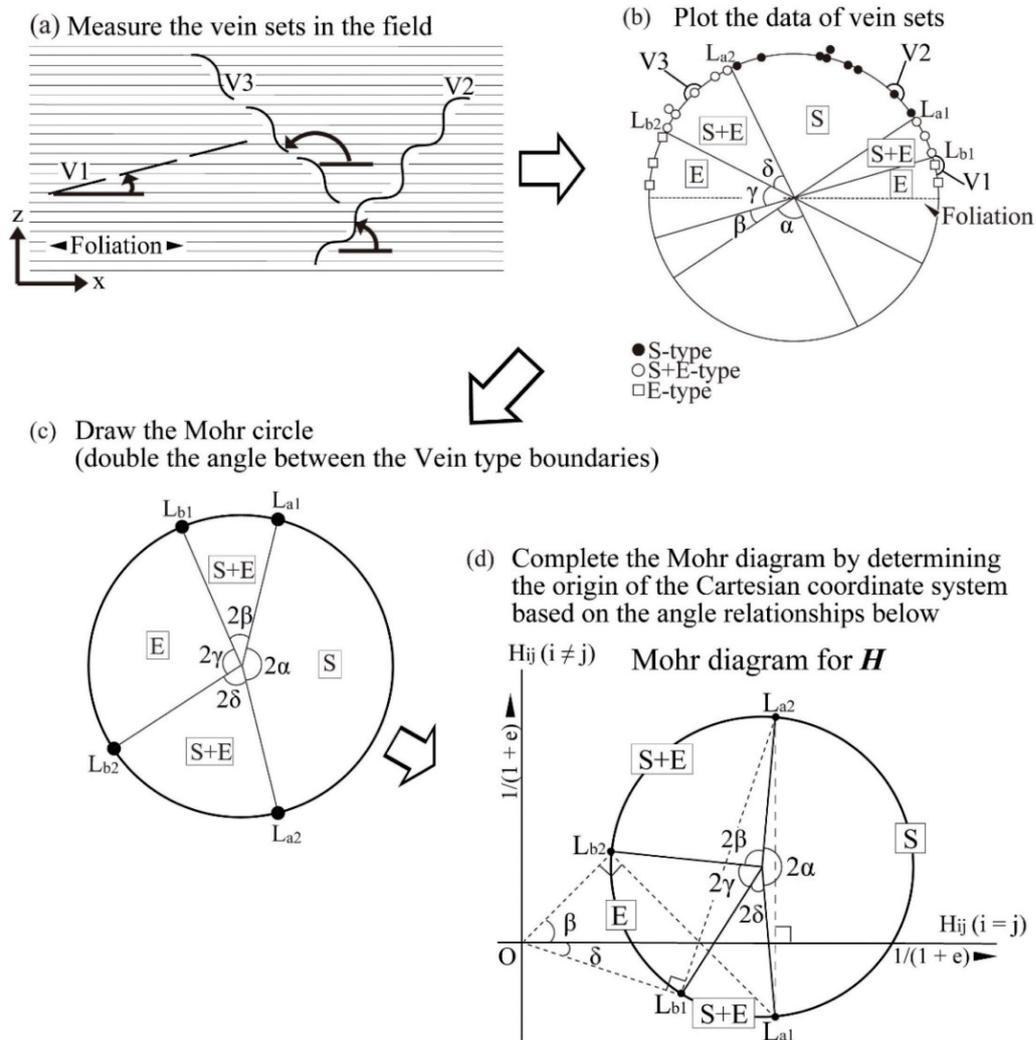


図4 変形脈の形状タイプの角度分布を用いた有限変形 Mohr 図の作成手順 (Soejima & Wallis, 2022 より一部改変)

形モル円を構築する手順の概要は以下の通りである (図4)。

変形後の岩石で観察される S, E, S+E タイプの脈の分布セクターの境界線 (図2bの  $L_{a1}$ ,  $L_{a2}$ ,  $L_{b1}$ ,  $L_{b2}$ ) の方位を  $xz$  面における面構造の向きなどを基準として測定する (図4a, b)。

測定したセクターの内角 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) を2倍してモル円を描き (モル円上での角度関係は実空間の2倍),  $L_{a1}$  と  $L_{a2}$  がモル円空間上で鉛直に並ぶように配置する (図4c)。

これらの境界線のうち,  $L_a$  (Sタイプと S+E

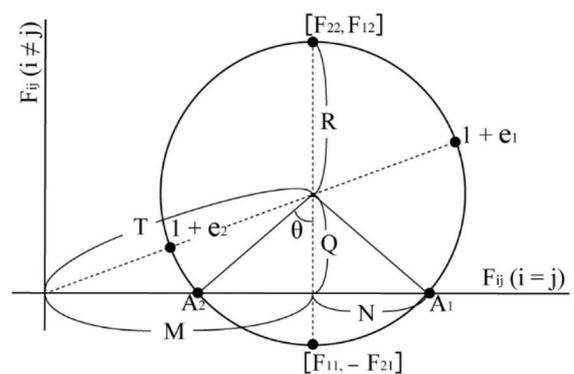


図3 有限変形勾配テンソル  $F$  のモル円. 円の位置と大きさは変形パラメータを規定する. 円周上の任意の点の, 原点 (0) からの距離が伸長率  $(1+e)$ , 横軸からの角度が回転角を表す.

タイプの境界) は, 変形の最終段階における瞬時的な伸縮の無い線の方に対応する. 一方,  $L_b$  (S+EタイプとEタイプの境界) は, 変形の初期段階における瞬時的な伸縮のない線が, 変形の進行に伴って回転した後の方向に対応する (図 2b).

すなわち,  $L_a$  と  $L_b$  の成す角は,  $L_b$  自身が経験した回転角に等しい. この幾何学的な制約を利用することで, モール空間上でのモール円と原点の相対的な位置関係が決定される (図 4d; Passchier, 1990: Appendix 2 参照).

有限変形のモール円の絶対的なスケールは, 定常流動のパラメータとモール円上のパラメータの対応付けにより決定される. ここで, 流動のパラメータである運動学的ダイラタンシー数  $D$  を導入する (Passchier, 1990).  $D$  は流動場における面積変化速度に関連する指標であり,  $D > 0$  ならその瞬間における面積拡大,  $D < 0$  なら面積縮小を意味する. これは, 瞬時的な短縮領域の広さと密接に関係しており, 以下の式で表される.

$$D = \cos \alpha \quad (4)$$

また, モール円のパラメータ (図 3) を用いて, 以下のようにも表せる (Passchier, 1990; Soejima & Wallis, 2022).

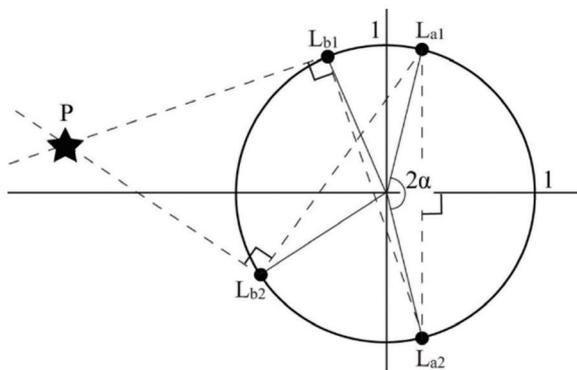


図 5 Variable-origin Mohr diagram の概念図. (Soejima & Wallis, 2022) 半径 1 の円は固定され, 原点  $P$  の位置が変形パラメータ ( $R_s$ ,  $W_m$ ) を表す.

$\beta$  か  $\delta$  が 0 のとき,

$$D = \frac{M \ln(M)}{R} \quad (5a)$$

$\beta$  と  $\delta$  が 0 でないとき,

$$D = \frac{N\{\ln(M+N) + \ln(M-N)\}}{R\{\ln(M+N) - \ln(M-N)\}} \quad (5b)$$

$R$ ,  $M$ ,  $N$  の相対的な関係はこれまでのステップで明らかになっているため, さらに式 (4) と式 (5a) あるいは式 (5b) を用いることで,  $R$  の絶対的な大きさ, すなわち有限変形の Mohr 円のスケールを決定することができる (Passchier, 1990; Soejima & Wallis, 2022).

一度モール円が構築できれば, 前述の式 (1) ~ (3) を用いて歪み, 回転, 面積変化といった変形パラメータをすべて求めることができる.

#### 4. 解析プログラムの利用法

Soejima & Wallis (2022) は, 上記の解析法をより客観的かつ定量的に行うための Python プログラムを開発した. このプログラムは, 野外データの不確実性を考慮するために, 可変原点モール図 (Variable-origin Mohr diagram) という描画法とモンテカルロ法を組み合わせている.

##### 4.1 可変原点モール図

通常 of モール円では, 原点が固定され, 円の位置と大きさが変化することで変形パラメータを表現する. これに対し, 可変原点モール図 (Variable-origin Mohr diagram) では, 半径 1 の円を座標中心に固定し, 原点の位置  $P$  が動くことで変形パラメータを表現する (図 5). この図において, 歪み ( $R_s$ ) と回転 ( $W_m$ ) は原点  $P$  の座標で表現され, 面積変化 ( $\Delta A$ ) は  $L_{a1}$  と  $L_{a2}$  のなす角  $\alpha$  を用いて計算される (Soejima & Walli, 2022).

この表現により、異なる角度分布から導かれる異なる変形パラメータを、シンプルな一つの図にまとめて表すことができる。また、これによって後述するモンテカルロ法との組合せも容易かつ効果的に行える。

#### 4.2 モンテカルロ法による不確実性の評価

定量的解析において、解析結果の不確実性の評価は不可欠である。本手法では、乱数を用いたシミュレーションを多数回繰り返すことで、確率的な事象の近似解を求める統計的手法であるモンテカルロ法によって、不確実性を評価する。

3.2節で述べたように、野外の露頭から変形脈のセクター境界角 ( $L_{ai}$  と  $L_{bi}$ ) を読み取るが、その際、必ずしも単一の角度を決定できるとは限らず、通常は角度範囲 (とりうる最小値と最大値) として定義される。本解析におけるモンテカルロ法は、この入力値の不確実性 (角度範囲) が、最終的に算出される変形パラメータ ( $R_s$ ,  $W_m$ ,  $\Delta A$ ) の不確実性にどのように伝播するかを評価するために用いられる。

具体的な処理は以下の通りである。まず、プログラムの User-defined parameters で設定された各セクター境界の角度範囲 (例:  $La1\_min$  から  $La1\_max$  まで) 内から、ランダムに角度を一つサンプリングする。これを全ての境界角 ( $L_{a1}$ ,  $L_{a2}$ ,  $L_{b1}$ ,  $L_{b2}$ ) に対して同時に実行する。こうして得られたランダムな角度の1セットを用い、3.2節のプロセスに基づいて、変形パラメータの解を1回分計算する。

この試行を、設定された回数 (デフォルトでは  $N = 100000$  回) 繰り返す。これにより、入力された角度範囲の不確実性を反映した、膨大な数 (10万個) のパラメータの解の集団が得られる。この解の集団は、求めたい変形パラメータの確率

分布を近似したものと見なすことができる。

プログラムは、この解の集団全体を可変原点モール図にプロットし、カーネル密度推定によって変形パラメータの確率密度を可視化する (図6)。この確率密度図において、密度が高い領域 (例えば95%信頼区間) が、統計的に確からしい解の範囲となる。本稿で示す解析結果の平均値や範囲は、この確率分布に基づいて算出されたものである。

このように、モンテカルロ法を用いて不確実性を定量的に評価することにより、野外データの不完全性を適切に反映した、客観的で頑健な変形パラメータの推定が可能となる。

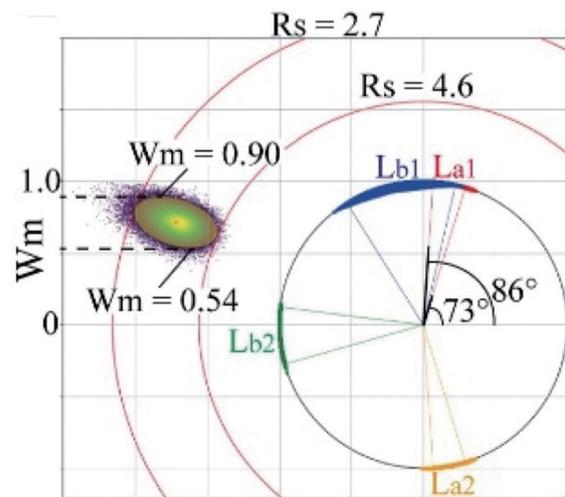


図6 解析プログラムの出力例。(Soejima & Wallis, 2022より改変) モンテカルロシミュレーションの結果 (P点) の確率密度分布が示される。黄色の楕円部分が推定結果の95%信頼範囲を表す。

#### 4.3 解析の手順

プログラムを用いた解析は、以下の手順で進める。

##### Step 1: 野外データの測定と整理

露頭で、鉱物脈をS, E, S+Eの3タイプに分類し、それぞれの方位角 (azimuth) とプランジ (plunge) を測定する。測定面を露頭の観察面 (通

常, 最大伸長軸と最小伸長軸を含む面, xz 面) に投影し, 最大伸長方向 (岩石の伸長線構造などから決定) を基準とした角度 ( $0^\circ - 180^\circ$ ) としてデータを整理する.

#### Step 2: セクター境界の角度範囲の決定

整理したデータをプロットし, 各タイプの脈が分布するセクターの境界 ( $L_{a1}, L_{a2}, L_{b1}, L_{b2}$ ) が, それぞれどの角度範囲に存在するかを決定し, それぞれがとりうる角度の最大値と最小値を指定する.

#### Step 3: プログラムの実行

Python コード (2D Deformed Vein Sets method (2D\_DVS\_2025\_v1.0.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17491199>) の冒頭にあるパラメータ設定部分に, Step 2 で決定した角度範囲を入力する. また, 他の手法で求めた歪み楕円の軸比  $R_s$  の範囲を入力することで, 変形脈群法の結果とモール図上で比較することもできる. 以下は入力例である.

```
# =====
# User-defined parameters
# =====
# Angle ranges for La1, La2, Lb1, and Lb2 (in
degrees)
La1_min = 29
La1_max = 33
La2_min = 132
La2_max = 141
Lb1_min = 0
Lb1_max = 0
Lb2_min = 142
Lb2_max = 142

# Range of finite strain (minimum and maximum
```

Rf values)

Rf\_min = 2.1

Rf\_max = 2.5

# Number of trials

N = 100000

プログラムを実行すると, モンテカルロ法により指定された回数 (N 回) のシミュレーションが行われる. 各試行では, 指定された角度範囲内でランダムに  $L_a, L_b$  の値が選ばれ, 一つの変形パラメータセット (図 5 における P 点) が計算される.

#### Step 4: 結果の解釈

計算が終了すると, Variable-origin Mohr diagram 上に N 個の P 点がプロットされた図が出力される (図 6). 点の密度分布から, 最も確からしい変形パラメータの値と, その不確かさ (95% 信頼区間の楕円など) を読み取ることができる. 同時に, 面積変化 ( $\Delta A$ ) を含む各種変形パラメータの具体的な値もテキストとして出力される.

## 5. 米国フランスカン帯変成堆積岩の解析例

Soejima & Wallis (2022) は, 本手法を米国カリフォルニア州に分布する白亜紀の沈み込み型高圧変成岩であるフランスカン帯の変成グレーワッケに適用した. この地域の岩石は, 圧力溶解クリープによって延性変形しており, 流体を介した物質輸送が岩石の体積変化を引き起こした可能性が指摘されていた (Ring, 2008).

Ring (2008) は, 同地域の碎屑性石英粒子とプレッシャーシャドーの形状解析 (Ring &

Brandon, 1999) から、変形中に大規模なシリカの溶脱によって約 30% の体積減少が生じたと結論付けている。

これに対して、Soejima & Wallis (2022) は変形脈群を用いた解析により、歪み  $R_s = 2.7\text{--}4.6$ 、平均渦度数  $W_m = 0.54\text{--}0.90$  (上盤西ずれの非共軸変形) という値とともに、7–21 vol.% の体積増加という、先行研究とは全く逆の結果を示した。

この違いの主な原因は、先行研究で用いられた手法が、粒子スケールの変形機構である「粒界すべり (grain boundary sliding)」の影響を考慮していなかったことにあると考えられる。粒界すべりの影響を補正すると、先行研究のデータからも体積増加が示唆され、両者の結果は調和的になる (Soejima & Wallis, 2022)。

この解析事例は、本手法が従来の粒子スケールの解析では見過ごされがちだった、より大きなスケールでの岩石全体の変形 (体積変化を含む) を捉える上で有効であることを示している。フランシスカン帯で見積もられた 7–21% の体積増加は、深部から上昇してきたシリカに富む流体がこの場で石英を沈殿させたことを意味し、沈み込み帯における大規模な流体移動と物質輸送の地質学的証拠となる (Soejima & Wallis, 2022)。

## 6. 本手法の意義と今後の展望

### 6.1 本手法の意義と今後の展望

本稿で紹介した変形脈群を用いた解析法は、従来の多くの手法と比較して、以下のようなメリットを持つ。

1. 3要素の同時決定: 歪み, 回転, 面積 (体

積) 変化を、一つのデータセットから同時に、かつ互いに矛盾なく決定できる。

2. 絶対的な伸縮の決定: 伸長比だけでなく、各方向の絶対的な伸縮率を推定できるため、延性変形と地質体の構造発達過程に関するより厳密な議論が可能になる。

3. 仮定の少なさ: 「体積一定」や変形前のマーカーの形状に関する仮定を必要としない。

4. 不確実性の評価: モンテカルロ法を導入することで、野外データのばらつきを反映した、推定結果の信頼区間等の評価が可能である。

### 6.2 今後の展望

本手法は 2 次元解析を基本としているが、Soejima & Wallis (in prep.) は、これを 3 次元に拡張した 3 次元変形脈群法を構築している。この手法では、露頭で測定できる脈の形状タイプと 3 次元的な方位データ (plunge と azimuth) から、平面歪みを仮定することなく、真の 3 次元有限変形 (歪み楕円体の形状と大きさ, 回転, 体積変化) を完全に記述することが可能になる (副島, 2025)。この 3 次元解析法によって、斜め沈み込み場など、平面歪みからの逸脱が予想される変形場の定量的な解析への道が開かれることが期待される。

## 7 まとめ

本稿では、変形した鉱物脈群の形状と方位を用いて、岩石の 2 次元的な延性変形を定量的に解析する手法について解説した。本手法は、有限変形のモール円の理論に基づき、歪み, 回転, 面積変化という変形の 3 要素を同時に決定できる強力なツールである。特に、Soejima & Wallis (2022) によって開発された Python プログラムを用いる

ことで、野外データの不確実性を考慮した客観的な解析が可能となった。

フランススカン帯の事例が示すように、本手法は圧力溶解など流体の関与が重要な場での体積変化を定量化し、従来の解析法では見過ごされてきた地質現象を捉える上で有効である。今後、本手法が3次元へと拡張されることで、より多様で複雑な造構場への定量的解析への貢献が期待される。

また、本稿で紹介した変形脈群法の理論的背景やフランススカン帯での適用事例に関する詳細な内容については Soejima & Wallis (2022) を参照されたい。

## 謝辞

本稿で紹介した変形脈群法の開発は、東京大学大学院のウォリスサイモン教授との共同研究で行われたものである。手法開発にあたっては東京大学の岩石テクニクスセミナーのメンバーのみなさまより有益なご意見をいただいた。また、本手法の python プログラムの実装にあたっては株式会社野村総合研究所の鳴海祐太氏より多くのご助言をいただいた。ここに記して、心より感謝の意を表する。

## 文献

- Audet, P. & Burgmann, R., 2014. Possible control of subduction zone slow-earthquake periodicity by silica enrichment. *Nature*, **510**, 389–392.
- Bray, C.J. & Karig, D.E., 1985. Porosity of sediments in accretionary prisms and some implications for dewatering processes. *Journal of Geophysical Research*, **90** (NB1), 768–778.
- Breeding, C. M. & Ague, J. J., 2002. Slab-derived fluids and quartz-vein formation in an accretionary prism, Otago Schist, New Zealand. *Geology*, **30**, 499–502.
- de Paor, D. G., & Means, W. D., 1984. Mohr circles of the First and Second Kind and their use to represent tensor operations. *Journal of Structural Geology*, **6**(6), 693–701.
- Ghosh, S.K. & Ramberg, H., 1976. Reorientation of inclusions by combination of pure shear and simple shear. *Tectonophysics*, **34**, 1–70.
- Kawabata, K., Tanaka, H. & Kimura, G., 2007. Mass transfer and pressure solution in deformed shale of accretionary complex: Examples from the Shimanto Belt, southwestern Japan. *Journal of Structural Geology*, **29**, 697–711
- Means, W. D., 1982. An unfamiliar Mohr circle construction for finite strain. *Tectonophysics*, **89**, T1–T6.
- Passchier, C. W., 1988a. Analysis of deformation paths in shear zones. *Geologische Rundschau*, **77**(1), 309–318.
- Passchier, C. W., 1988b. The use of Mohr circles to describe noncoaxial progressive deformation. *Tectonophysics*, **149**, 323–338.
- Passchier, C. W., 1990. Reconstruction of deformation and flow parameters from deformed vein sets. *Tectonophysics*, **180**, 185–199.
- Ramsay J. G., 1967. Folding and Fracturing of Rocks. *McGraw-Hill, New York*, 568.
- Ring, U., 2008. Deformation and Exhumation at Convergent Margins: The Franciscan Subduction Complex. *The Geological Society of America, Special paper*, 445

- Ring, U. & Brandon, M.T., 1999. Ductile Deformation and Mass Loss in the Franciscan Subduction Complex: Implications for Exhumation Processes in Accretionary Wedge. Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow and Erosion. *Geological Society, London, Special Publications*, **154** (1), 55–86.
- Soejima, S., & Wallis, S. R., 2022. Deformed Vein Sets as a Record of Synmetamorphic Volume Change: Quantifying Solution Mass Transfer in Subduction - Type Metasediments of the Del Puerto Canyon Region, Franciscan Belt, USA. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**(6), e2022JB024197.
- 副島祥吾, 2025. 有限変形の Mohr-cyclide の構築—実用的な 3 次元有限変形解析に向けて—. 日本地質学会第 132 年学術大会予稿集, T1-P-20.
- Talbot, C. J. 1970. The minimum strain ellipsoid using deformed quartz veins. *Tectonophysics*, **9**, 46–76.
- Wallis S. R., 1992. Vorticity analysis in a metachert from the Sanbagawa belt SW Japan. *Journal of Structural Geology*, **14**, 271–80.
- Wood, D.S., 1974. Current views on the development of slaty cleavage. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **2**, 122–135.
- Wright, T. O. & Platt, L. B., 1982. Pressure dissolution and cleavage in the Martinsburg Shale. *American Journal of Science*, **282**, 122–135.
- Xypolias, P., 2010. Vorticity analysis in shear zones: a review of methods and applications. *Journal of structural Geology*, **32**(12), 2072-2092.