

岩脈群や鉱物脈群による応力推定法に用いる確率分布型の検討 Parametric and non-parametric methods of determining paleostress from dykes or veins

佐藤 活志^{1*}, 山路 敦¹, 藤内 智士²SATO, Katsushi^{1*}, YAMAJI, Atsushi¹, TONAI, Satoshi²¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 産業技術総合研究所¹Div. Earth Planet. Sci., Kyoto Univ., ²AIST

岩脈群や鉱物脈群の方位は、過去のテクトニック応力の指標となる。無傷の岩体中に新規に形成される開口割れ目は、最小圧縮主応力 (σ_3) 軸に直交すると考えられる。一方、実際の岩体には既存の弱面があることを考慮し、Jolly and Sanderson (1997) は流体圧に応じて一定の範囲の方位を持つ割れ目群ができるというモデルを提示した。このモデルは、実際の岩脈群や鉱物脈群の方位がばらつくことをよく説明し、3つの主応力軸方位と応力比 $\sigma_2/\sigma_3 = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ を決定する逆解析法の発明をもたらした (例えば、Andre et al., 2001)。ただし従来の手法では、割れ目群の方位分布範囲の境界を認定する必要があるが、実際には分布範囲の周縁に向かって割れ目の頻度は漸減することが多く、認定は困難であった。この問題を解決するために、境界の認定をせず、最尤法によって確率分布モデルを割れ目群の方位分布に当てはめることで応力を推定する手法が提案された (Yamaji et al., 2010)。この手法の基本的な仮定は、面にはたらく法線応力が大きい方位ほど割れる確率が低いという、法線応力に対する割れ目頻度の単調減少性である。

Yamaji et al. (2010) は Bingham 分布 (球面上の指数型分布) を割れ目群の方位頻度分布に当てはめた (以下、Bingham 法と呼ぶ) が、別の関数形が適する可能性もある。そこで本研究は、2つの新しい手法を提案する。1つは自由度の高い冪乗型の確率分布モデルを用いる方法 (冪乗法と呼ぶ)、もう1つは確率分布自体を用いないノンパラメトリック手法 (ノンパラメトリック法と呼ぶ) である。冪乗法の利点は、様々な形の単調減少関数を表現できる柔軟性にある。また、流体圧 P_f の相対値 $\sigma_2/\sigma_3 = (P_f - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ をパラメタに持つので、逆解析によってこの値を客観的に決定することも利点である。一方、ノンパラメトリック法では単調減少性の指標として法線応力と割れ目頻度の順位相関係数を用い、これを最小化 (負の相関を最大化) した。この方法ならば、あらゆる形の単調減少関数を同等に評価できる。また、確率分布型を仮定せずに解析を行えることも利点である。

模擬データの解析により、新手法の性能を調べた。まず、Bingham 型の確率分布に従う割れ目群の模擬データを解析したところ、Bingham 法、冪乗法、ノンパラメトリック法のいずれでも誤差の範囲内で正解の応力が検出された。ただし、精度と確度においては Bingham 法と冪乗法が同等であり、ノンパラメトリック法はそれらに劣った。次に、ステップ関数型の模擬データを解析した。3つの手法のすべてで正解の応力が得られたが、冪乗法の精度と確度が高く、Bingham 法とノンパラメトリック法は特に応力比の確度が低かった。この模擬データでは、割れ目の頻度が急減する法線応力が流体圧に対応する。冪乗法によって、流体圧の相対値が精度よく決定された。以上の検証により、Bingham 法に比べて冪乗法は汎用性が高く、流体圧の推定においても有利であることが分かった。また、ノンパラメトリック法も実用に耐える精度と確度を持つ。方位頻度分布に関する根拠に乏しい仮定を排除できるという点で、ノンパラメトリック法も実用に値すると言える。

天然のデータへの適用例として、約 19Ma (Hoshi and Takagawa, 2009) に美濃-丹波帯に貫入した安山岩質岩脈群 (福井県敦賀市周辺) の解析結果を紹介する。測定した約 100 枚の岩脈面方位データに前述の3つの手法を適用したところ、共通して NW-SE 方向の σ_3 軸をもつ正断層型の古応力状態が得られた。Bingham 法とノンパラメトリック法の精度は同等で、冪乗法の精度が最も高かった。冪指数は 1 に近い直線型の頻度分布であり、応力比 $\sigma_2/\sigma_3 = 0.66 \pm 0.19 / -0.22$ 、流体圧の相対値 $\sigma_2/\sigma_3 = 0.76 \pm 0.06 / -0.16$ が得られた。日本海拡大時期のテクトニック応力が正断層型であったこと、応力比が中程度 (三軸応力) であったことが新知見である。

References

- Andre, A.S., Sausse, J. and Lespinasse, M., 2001, *Tectonophysics*, 336, 215-231.
 Hoshi, H. and Takagawa, M., 2009, *Jour. Geol. Soc. Japan*, 115, 96-99.
 Jolly, R.J.H. and Sanderson, D.J., 1997, *Jour. Struct. Geol.*, 19, 887-892.
 Yamaji, A., Sato, K. and Tonai, S., 2010, *Jour. Struct. Geol.*, 32, 1137-1146.

キーワード: 応力逆解析, 岩脈, 鉱物脈, 流体圧, ノンパラメトリック手法

Keywords: stress tensor inversion, dyke, vein, fluid pressure, non-parametric statistics