

火成岩の破断パターンにみられる揺らぎの普遍性 Universal geometric fluctuation in fracture patterns of igneous rocks

秋葉 祐里 (山梨大院・工) 高島 愛果 (山梨大院・生命環境) 島 弘幸 (山梨大院・総合)

Yuri AKIBA, University of Yamanashi
Aika TAKASHIMA, University of Yamanashi
Hiroyuki SHIMA, University of Yamanashi
FAX: 055-220-8834, E-mail: hshima@yamanashi.ac.jp

Columnar joint is a regular pattern of cracking in igneous rock that forms an array of slender columns with polygonal cross section. In this study, we considered the geometry and topology of the polygonal crack tessellation observed at the outcrop surface of columnar joints. Aerial photo shooting of the columnar joint was conducted at four different sites in Japan to obtain a sufficient amount of image data for numerical replication of the polygonal crack patterns. Using the primary data, we examined the similarity and difference in the statistical properties of the polygon geometry between the four sites. The results imply a universal fluctuation in the skewness of polygons, which quantifies the geometric discrepancy in the polygon shape from the regular counterpart. It was also discovered that the geometric fluctuation is characterized by Gumbel distribution, irrespective to lithographic and geographic conditions under which the columnar joint formed.

1. はじめに

自然が創り出す形の中には、規則的なパターンを示すものがある。例えば、キリンのまだら模様やハチの巣のハニカム構造、干上がった田んぼ表面に現れるひび割れ模様、マスクメロンの網目などが挙げられる。これらは全て、材料の表面全体が網目状の多角形パターンで覆われている^{1,2)}。そうした多角形パターンの中でも、ひときわ荘厳なのは火成岩によってできた角柱構造の集合体「柱状節理」である(Fig.1)。火山の噴火によって溶岩が流出すると、冷やされた溶岩は次第に体積収縮し、固化する際に亀裂が発生する。そして、この亀裂が岩体の内部へと進行することで、最終的に角柱状の柱構造が形成される。柱状節理は、その構造の美しさから古くより注目されており、世界的には Giant's Causeway (北アイルランド) や Devils Tower (アメリカ) が有名である。また、火山大国である日本にも数多く存在し、玄武洞 (兵庫県) をはじめとして 60 ヶ所以上ある。

あらゆる柱状節理の露頭断面では、規則的な柱断面の多角形パターンが観察できる。つまり、このことは岩石の化学組成や柱サイズが異なるなどのような柱状節理においても、同様のパターンが現れることを示している。これまでの研究では、こうした多角形パターンを特徴づける幾何学量(柱のサイズ・多角形の頂点数 (Fig. 1)) の統計的性質が調べられてきた³⁾。さらに発展した研究では、柱断面の直径は溶岩の冷却速度に依存することを示唆している⁴⁾。しかし、あらゆる柱状節理が類似した多角形パターンを示すことに関して、その普遍的な幾何学的性質の解釈を試みた研究例は極めて少ない。

そこで本研究では、普遍的性質の解釈を行うことを目的として、フィールド調査と統計処理・多角形の歪度を評価する新たな指標の導入・分布に対する非線形 fitting を行った。以下、それぞれの詳細について説明する。

2. ドローンを用いたフィールド調査

柱状節理の幾何データを取得するため、フィールド調査を行った。まず調査地へドローンを持参し、上空から岩場全景を空撮する。その後、地理情報システムを用いて多角形状断面の面積と頂点数を割り出した⁵⁾。調査地は、以下に示す 4 ヶ所で行った：(1) 沖縄県久米島町の「畳石」(O-spot)、(2) 山口県萩市の「畳ヶ淵」(Y-spot)、(3) 静岡県下

田市の「俵磯」(Sz-spot)、(4) 島根県出雲市日御碕(Sm-spot)。これら 4 つの地点で見られる柱状節理は、いずれも露頭表面がほぼ平らである。よって、ドローンを用いて露頭全体を撮影した際に、得られる画像の歪みが抑えられるため、多角形パターンの解析に適した調査地と考えた。

またこれら 4 つの調査地点は、岩石の組成が地点ごとに異なる — 畳石・俵磯は安山岩質、畳ヶ淵は玄武岩質安山岩、日御碕は流紋岩質の柱状節理であることが知られている。すなわち、岩石中に含まれる二酸化ケイ素の含有率が異なるため、固化する前の段階におけるマグマの粘性が、地点ごとに異なると推察される。

さらに、柱のサイズについても、最も大規模な畳石の柱直径は約 1.6 m であるのに対して、最も小さい日御碕の柱直径は約 0.05 m であり、オーダーにして二桁の差がある。こうした岩石組成や柱直径の相違が、網目パターンの統計的性質に与える影響の有無に注目して、画像解析と統計処理を行い、一次データを得た。

解析の結果、頂点数については、どの調査地においても五角形・六角形が頻出することが判明した。さらに、調査地によって大きく異なる柱の断面積については、確率密度分布を作成することで、そのばらつき度合いを定量的に示すことができた。

3. 多角形の歪度評価

次に、亀裂を発生させる力学的エネルギーの観点から、多角形パターンについて考察する。L.I. Hewes⁶⁾ が提案した理論によると、多角形状の亀裂パターンが母材の歪みエネルギーを最も多く解放できるのは、次の 2 つの条件を満たすときである。

- 1) 多角形が円に内接する。
- 2) 多角形の面積が最大となる。

簡単な思考実験を行うと、上記 2 つの条件を満たすのは正 n 角形のときだとわかる。以上のことを踏まえて本研究では、実際の柱状節理が、理想的な状態 (全て正多角形) と比べて、どのくらい異なるのかを検証した。検証に用いた方法の概略を次節で述べる。

4. 外心比較による方法

実際の柱状節理に対して、条件 1「多角形が円に内接する」からのずれを評価した。まず、 n 角形を $n-2$ 個の三角

形で分割し、三角形それぞれに対して外心を算出する。その後、 $n-2$ 個の外心がどの程度ばらついているのかを算出した。もし、全ての外心が一致するならば、その多角形は円に内接していると言える。

外心は、分割した三角形の2辺に対して垂直二等分線を引き、二等分線同士の交点を求めることで算出した。三角形を構成する3点を $\vec{a}_{n-1}, \vec{a}_n, \vec{a}_{n+1}$ で表し、垂直二等分線の交点(外心)を \vec{p}_n とおくと

$$(\vec{a}_n - \vec{a}_{n-1}) \cdot \left(\vec{p}_n - \frac{\vec{a}_n + \vec{a}_{n-1}}{2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{a}_n - \vec{a}_{n+1}) \cdot \left(\vec{p}_n - \frac{\vec{a}_n + \vec{a}_{n+1}}{2} \right) = 0 \quad (2)$$

が成り立つ。ここで $\vec{p}_n = c_m \vec{a}_{n-1} + c_p \vec{a}_{n+1}$ とおき、式(1)(2)を満たす c_m と c_p を求めると三角形の外心を見積もることができる。

5. 分布に対する非線形フィッティング

最後に、外心比較によって求めたばらつき確率密度分布に対して、非線形曲線によるフィッティングを行った。その結果、Gumbel 分布の確率密度関数が、いずれの調査地においても、 $R^2=0.9$ 以上となり、非常に良くフィットすることを発見した。Fig. 2 は各調査地ごとの外心比較とフィッティングの結果を示している。変動係数は、外心位置のばらつき大きさ σ を調査地ごとに柱断面の平均値 \bar{x} で割り、正規化した値である。どの分布も最頻値が変動係数 1.1 の近傍であり、裾を引く形状である。この結果は、柱状節理で観測される多角形パターンの揺らぎが、化学組成や長さスケールに依らず、同一の法則に従うことを示唆している。

6. まとめ

今回、自然が創り出した数ある多角形パターンの中でも柱状節理に着目し、幾何形状についての普遍的性質を探った。その結果、実際の柱状節理はどの調査地においても、理想的な多角形パターンからの逸脱度合いが同様の確率密度関数で表現できることが判明した。このことは、柱状節理における普遍則の存在を示唆している。さらに、柱状節理以外の材料についても同様の解析・評価を行うことで、多角形パターン全体を跨ぐ共通性についての、新たな知見が期待できる。

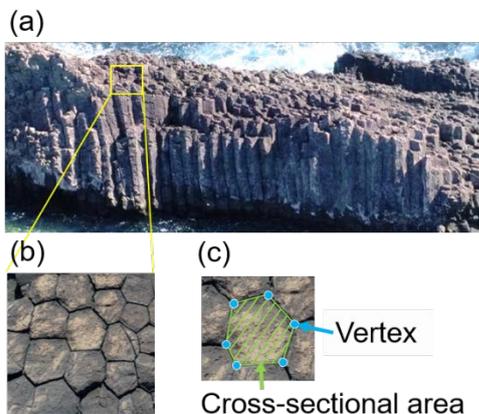


Fig. 1 (a) Overall view of columnar joint in Shizuoka, Japan. (b) Polygonal cracking pattern. (c) Geometric quantities characterizing a polygon: the cross-sectional area and the number of vertices.

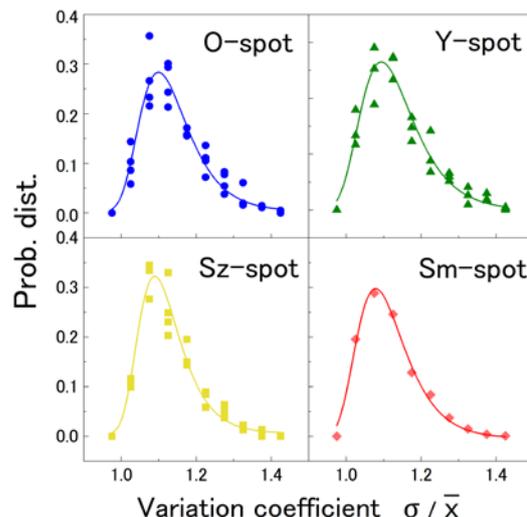


Fig. 2 Probability distribution of the coefficient of variation regarding the circumcenter positions of triangles obtained by triangulation of constituent polygons at each investigation spot. The curve shows Gumbel distribution curve that fits the data points.

謝辞

本研究は、日本科学協会の笹川科学研究助成、および科研費 19H05359, 19K03766 の支援を受けています。

参考文献

- 1) Y. Akiba, J. Magome, H. Kobayashi, and H. Shima: Morphometric analysis of polygonal cracking patterns in desiccated starch slurries, *Phys. Rev. E*, 96, 023003, 2017.
 - 2) Y. Akiba and H. Shima: Flow-Velocity-Dependent Transition of Anisotropic Crack Patterns in CaCO₃ Paste, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 88, 024001, 2019.
 - 3) P. Budkewitsch and P.-Y. Robin: Modelling the evolution of columnar joints, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 59, pp.219-239, 1994.
 - 4) L. Goehring, L. Mahadevan, and S. W. Morris: Nonequilibrium scale selection mechanism for columnar jointing, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 106, no. 2, pp.387-392, 2009.
 - 5) L. I. Hewes: A theory of surface cracks in mud and lava and resulting geometrical relations, *Am. J. Sci.*, 246, 138-149, 1948.
- A) Y. Akiba, Aika Takashima, Akio Inoue, Hiroshi Ishidaira, and H. Shima: Geometric Attributes of Polygonal Crack Patterns in Columnar Joint, *submitted*.