

掘削コア試料 X 線 CT 画像中の脈状鉱物の自動検出に基づく 海洋地殻の浸透率構造の推定

赤松祐哉*・片山郁夫**・岡崎啓史**・道林克禎***

Paleo-permeability structure of oceanic crust based on automated detection of veins in X-ray CT core images

Yuya Akamatsu*, Ikuo Katayama**, Keishi Okazaki**, and Katsuyoshi Michibayashi***

* 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 Research Institute for Marine Geodynamics, JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, Kanazawa-ku, Yokosuka, 237-0061, Japan. E-mail: akamatsuy@jamstec.go.jp

** 広島大学 先進理工系科学研究科 Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, 1-3-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan.

*** 名古屋大学 環境学研究科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601, Japan.

キーワード：浸透率，脈状鉱物，科学掘削，X線 CT，画像処理

Key words: Permeability; Vein mineral; Scientific drilling; X-ray CT; Image processing

1. はじめに

浸透率は地下の流体移動の時空間的変化を理解するために重要なパラメータであり、岩石内部に存在する亀裂に強く影響を受ける。流体の流路として機能した亀裂は岩石中に脈状鉱物として保存されるため、脈状鉱物の分布や形状を流体の浸透モデルに適用することで、岩石の過去の浸透率 (paleo-permeability) を推定することができる。本研究は、海洋地殻の流体循環に対する亀裂の影響を評価するために、ICDP Oman Drilling Project によって採取されたコア試料の X 線 CT 画像を用いて、コアに含まれる脈状鉱物とその特徴を自動的に検出する手法を開発し、コア試料の浸透率構造の推定を行った (Akamatsu et al., 2023)。

2. 手法

2.1 前処理・エッジ検出

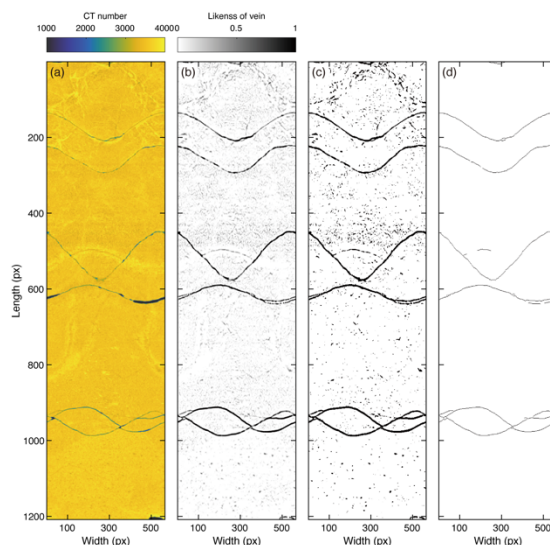
円柱状のコア試料に含まれる平板状の脈状鉱物は、コア側面の展開図において正弦波として現れるため、その正弦波を表すパラメータを求めることで、コアに含まれる脈状鉱物を検出することができる。まず、コアの3次元 CT 画像の中心から 100 ピクセル (35.2 mm) の半径を持つ円柱状の領域を抽出し、その展開図を作成する (第 1 図 a)。次に、multiscale Hessian filter (Jerman et al., 2015) を用いて CT 値の勾配から線状の構造を検出し (第 1 図 b)、P タイル法を用いて画像を二値化する (第 1 図 c)。得られた二値画像にいくつかのフィルターを適用しノイズを除去することで、脈状鉱物のエッジを検出する (第 1 図 d)。

2.2 ハフ変換

得られた二値画像に含まれる正弦波状のオブジェクトを、パターン認識手法の一種であるハフ変換を用いて検出する。画像中に現れる正弦波は以下の式で表現できる。

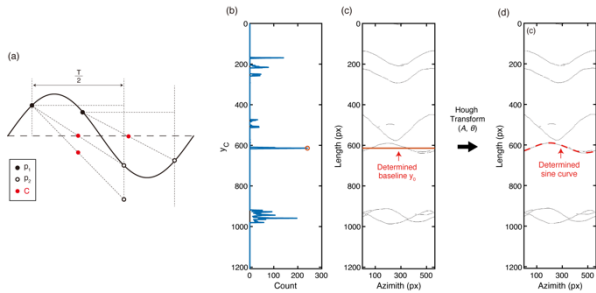
$$y = A \sin(\omega x + \theta) + y_0$$

ここで、 A, θ, y_0 はそれぞれ正弦波の振幅、位相、深さであり、



第 1 図. コア CT 画像の展開図におけるエッジ検出の例。

$\omega = 2\pi/T$, T は画像の幅である。したがって、画像空間中の点 (x, y) を (A, θ, y_0) 空間に投影する 3 次元のハフ変換を行うことで、画像中の正弦波を検出できる。本研究では計算効率を高めるために、2 段階に分けてこれらのパラメータを決定する two-step ハフ変換 (Changchun and Ge, 2002) を反復的に行なった。この手法では、まず正弦波の対称性を利用して y_0 の探索を行い、正弦波が存在する可能性の高い位置 y_c を検出する (第 2 図 a-c)。得られた y_c を用いて、点 (x, y) を (A, θ) 空間に投影する 2 次元のハフ変換を行う (第 2 図 d)。決定された正弦波の周囲のピクセルから脈状鉱物の平均開口幅と平均 CT 値を決定し、それらの点を二値画像から取り除く。この操作を画像中のエッジ数がしきい値以下になるまで繰り返すことで、画像中の正弦波状のオブジェ



第2図. Two-step ハフ変換の例.

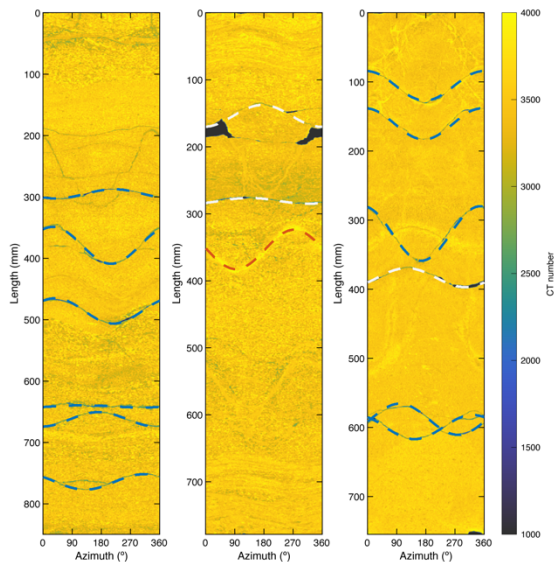
クトを偽陽性オブジェクトの検出を避けながら効率的に検出することができる。

この操作を、オマーンオフィオライトにおいて海洋地殻のシート状岩脈—はんれい岩層遷移帯に相当する ICDP Oman Drilling Project Hole GT3A で掘削・回収されたコア試料 400 m の X 線 CT 画像に適用し、コアに含まれる脈状鉱物の検出、それらの形状パラメーターの決定、および流体移動モデルに基づく浸透率構造の推定を行なった。

3. 結果・考察

3.1 脈状鉱物の検出

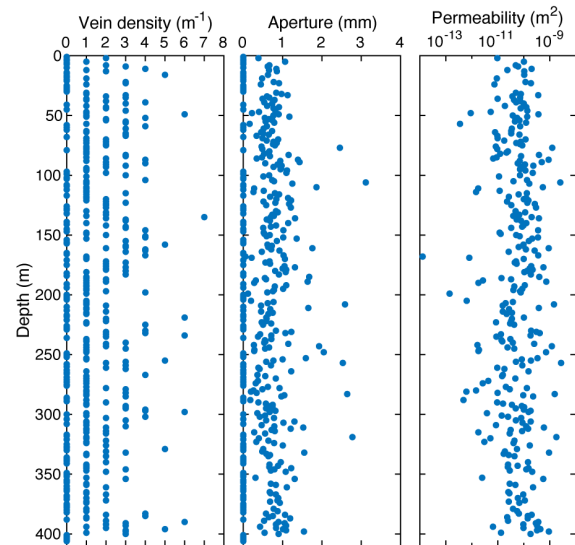
全長約 400 m のコア試料から、母岩の平均 CT 値よりも高い脈状鉱物 (High-CT vein) と低い脈状鉱物 (Low-CT vein) がそれぞれ 45 本、571 本検出された。展開図上で明瞭な正弦波状になるものや、CT 値が周囲と明確に異なるものは正確に検出された (第3図)。一方で、断続的なものや形状が不明瞭なもの、CT 値が周囲と同じくらいのもは検出されなかった。



第3図. 脈状鉱物の検出結果の例. 青色, 赤色, 白色の破線はそれぞれ Low-CT vein, High-CT vein, Fracture を表す.

3.2 浸透率構造の推定

第4図は、1 m ごとに算出された Low-CT vein の出現頻度 (ベイン密度) と開口幅の深さ変化を示す。掘削孔全体の平均ベイン密度は 1.43 本/m で、平均開口幅は 0.71 mm であった。等価流路モデル (Walsh and Brace, 1984) に基づくと、1 m あたり n 本、平均開口幅 w の平板状の亀裂を含む岩石のバルク浸透率 k は、以下の式で与えられる。



第4図. Hole GT3A で検出された Low-CT vein の 1 m ごとの平均ベイン密度, 開口幅, 浸透率の深さ変化.

$$k = \frac{nw^3}{12}$$

Hole GT3A で決定された脈状鉱物のパラメーターを用いると、計算されるバルク浸透率は 10^{-9} m^2 から 10^{-12} m^2 の値を示した。この値は、室内実験で求められる値よりも数桁高く、実際の海洋底の掘削孔で観測される値と整合的である。これは、開口幅が数ミリメートルのメソスケールの亀裂が、海洋地殻内部の流体移動を支配している可能性を示唆する。

4. 結言

本研究は、掘削コア試料の X 線 CT 画像を用いて、脈状鉱物を自動的に検出する手法を開発した。提案手法を Oman Drilling Project で採取されたコア試料データに適用した結果、開口幅が数ミリメートルスケールの脈状鉱物が多数検出された。亀裂の流体移動モデルに基づくと、検出された脈状鉱物はかつて極めて高い浸透率を持っていた可能性があり、海洋地殻の流体循環に大きく寄与していたことが示唆された。

文 献

- Akamatsu, Y., Katayama, I., Okazaki, K., and Michibayashi, K. (2023) Paleo-permeability structure of the crustal section of the Samail ophiolite based on automated detection of veins in X-ray CT core images from the Oman Drilling Project. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*.
- Jerman, T., Pernuš, F., Likar, B., & Špiclin, Ž. (2015). Beyond frangi: An improved multiscale vesselness filter. In *Medical imaging 2015: Image processing* (Vol. 9413, p. 94132A). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2081147>
- Changchun, Z., & Ge, S. (2002). A hough transform-based method for fast detection of fixed period sinusoidal curves in images. In *6th international conference on signal processing, 2002*. (Vol. 1, pp. 909–912 vol.1). [ieeexplore.ieee.org. https://doi.org/10.1109/ICOSP.2002.1181204](https://doi.org/10.1109/ICOSP.2002.1181204)