

画像解析による砂岩中石英粒内亀裂の自動検出手法の開発

中川 愛珠*・上原真一*

Development of an automated method for detecting intragranular cracks in quartz grains in sandstone using image analysis

Ayumi NAKAGAWA* and Shin-ichi UEHARA*

*東邦大学大学院理学研究科 Graduate School of Science, Toho University, 2-2-1 Miyama, Funabashi, Chiba 274-8510, Japan. E-mail: 6624010n@st.toho-u.ac.jp

キーワード：画像解析, 粒内亀裂, 機械学習, 石英

Key words: Image analysis, Intragranular cracks, Machine learning, Quartz

1. はじめに

岩石中の亀裂密度は、断層活動や変形履歴の指標として用いられており、特に劈開が少ない石英は、自然な破壊を偏りなく保持できること観察対象として適している (e.g., Mizoguchi & Ueta 2013). しかし、従来の微小亀裂密度の測定は、薄片画像上での手作業による観察に依存しているため、解析に時間を要するうえ、観察者の主観的判断の影響を排除することが難しい。近年、岩石表面やコンクリート構造物の亀裂検出においては画像処理や機械学習を用いた手法が報告されている (Arena *et al.* 2014; 山根・全邦釘 2019) が、鉱物粒内の微小亀裂を対象とする方法は未だ確立されていない。

本研究では、砂岩の薄片画像を対象に石英の粒内亀裂を自動検出する手法を構築することを目的とする。

2. 解析対象と画像の前処理

解析対象は 650°C で加熱後急冷処理を施し、亀裂を生じさせたインド産砂岩である。粒径は 0.02~0.1 mm、鉱物組成は石英約 68 %、カリ長石約 18 %、斜長石約 10 %、不透明鉱物等約 4 %、間隙率は 13.2 % である。解析には SEM 反射電子像、偏光顕微鏡直交ニコル像、および SEM 二次電子像の 3 種類の画像を用い、SEM 反射電子像を基準に他像をアフィン変換で位置合わせをした。位置合わせおよび Trainable Weka Segmentation による石英領域検出は中川・上原 (2025) で報告されている。本研究ではそれらを前提とした前処理済み画像を使用した。

3. 解析手法

以下の一連処理は最終的に 3 種類の情報を統合して石英粒内の亀裂を検出するプロセスの一部である。検出の流れを第 1 図に示す。

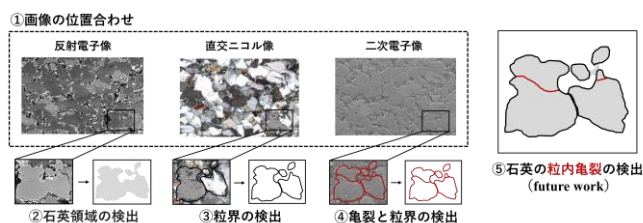
直交ニコル像で粒界、二次電子像で亀裂と粒界をエッジ検出した後、モルフォロジー演算により境界線を補完した。この際、Canny 法 (標準設定)、LoG 法 ($\sigma=2.0$)、Prewitt 法 (閾値 0.2)、Gabor フィルタ (波長 4 ピクセル、方位 90°) の 4 手法を偏光像および二次電子像のそれぞれに適用して境界情報を取得した。

次に、得られた複数のエッジ候補のうち視覚的に最も精度が高いと判断した Canny 法を選択し、その出力画像にモルフォロジー演算のクロージングを適用した。クロージングには diamond, disk, octagon, line, square の 5 種類の構造要素を用い、境界線の連続性を保ちつつノイズを抑制できるか比較検討した。評価では、ひび割れや粒界が細線状構造として途切れずに補完されているか、粒界とひび割れが近接する部分で誤結合が生じていないか、SEM 像特有の凹凸やノイズによって輪郭が断続的になる領域がどれだけ改善されているか、を中心に視覚的に検証した。

4. 結果

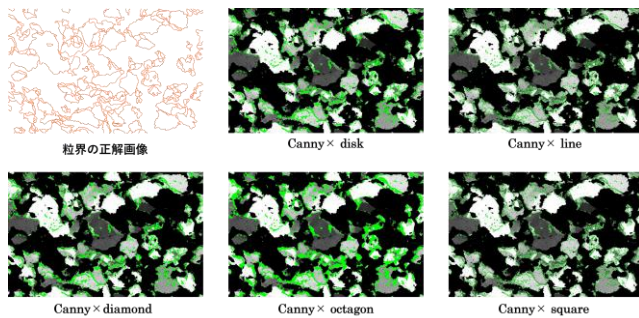
得られた輪郭候補を視覚的に比較した結果、Canny 法が最も安定して細線状構造を連続的に検出できた。二次電子像中央部にある長い亀裂では、Canny 法適用後の輪郭が途切れず、主要な亀裂パターンがほぼ忠実に再現されていると判断した。ただし、直交ニコル像から検出された粒界では微細凹凸ノイズやわずかなコントラスト変動により輪郭が途切れ、亀裂と粒界の区別が困難となる場合があった。LoG 法は滑らかな輪郭を得られるものの細い分岐で途切れやすく、太めの線がノイズと重なることで誤検出が生じた。Prewitt 法は斜め輪郭の感度不足により鋭角分岐が欠落し、Gabor フィルタは方向変化部で輪郭が途切れ、ノイズが多く残存することが確認された。

これらを踏まえ、Canny 法で得た亀裂と粒界にモルフォロジー演算 (クロージング) を適用し、構造要素として diamond, disk, octagon, line, square を比較した (第 2 図, 第 3 図)。disk および octagon は閉じた形状ゆえに輪郭

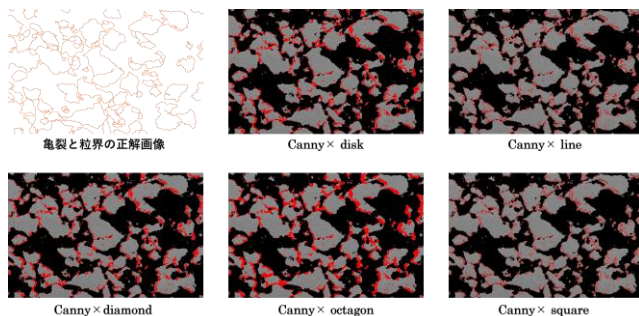


第 1 図 石英粒内亀裂検出の流れ

が過度に膨張し、粒界や隣接亀裂と一体化しやすかった。line は境界線で連続性を確保するものの、分岐部や粒界近傍で誤結合が生じた。diamond はあらゆる方向で膨張できるものの、先端部や曲がり角で実線とずれるため形状再現性に課題があった。直交ニコル像にある粒界では亀裂と粒界が一体化するケースが残った（第2図）。最も安定して実用性が高いと判断されたのは square であり、二次電子像にある長い亀裂中心線を途切れず補完しつつ、線幅を比較的均一に維持できた（第3図）。これらの結果から、視覚的検証に基づいて Canny 法+square を組み合わせる手法が最も有効とされたが、粒界と亀裂が誤って結合される点や分岐部の検出漏れ、SEM 像ノイズに起因する偽線検出などの問題が依然として解決されていないことが示された。



第2図 ③粒界の検出：直交ニコル像を用いたモルフォロジー演算（クロージング）の構造要素別結果（緑）



第3図 ④亀裂と粒界の検出：二次電子像を用いたモルフォロジー演算（クロージング）の構造要素別結果（赤）

5. 考察

粒界と亀裂が近接する領域では、わずかな輪郭ずれが Canny 法単体の出力に現れ、ひび割れの一部が途切れたり、粒界に沿った線形構造と誤結合したりするケースが散見された。

これに対して、モルフォロジー演算によるクロージングを組み合わせることで、連続性を改善できるが、構造要素の形状や方向性が適用結果に大きな影響を与えることが明らかとなった。disk や octagon では、輪郭を太く膨張させる特性により、実際の線形から大きく外れた領域が加わりやすかった。とくに粒界やノイズ領域では、隣接する線形がまとめられ、一つの太い構造として観察されるため、真の亀裂中心線を捉えているとは言いがたい。また、line は、まっすぐな亀裂を補完する点で有利であるものの、亀裂の方向が変化する分岐部では線が分断され、しかも粒界接近部では構造要素の向きと亀裂方向が一致せず誤結合が生じる。一方、diamond ではあらゆる方向に対応するが、角張った膨張形状が実線とずれを生じさせるため、細かな形状再現には不向きであった。これに対し、square は上下左右に均等に膨張すると同時に線幅をほどよく維持できるため、長い亀裂

中心線の連続性を確保できた。しかし、粒界近傍では square 形状がひび割れと粒界をまとめてしまい、結果として実線とは異なる一本化された線状構造が観察された。

以上より、視覚的検証を通じてどの手法・構造要素が実際の亀裂形状を再現しうるかを判断することが、本研究の本質的な評価基準であると認識した。

混同行列による定量評価では、Canny 法+square 構造要素の組み合わせにおいて正解率 87.07%、適合率 33%、再現率 16.4%、F1 値 0.2191 を得た。しかし、これらの数値は SEM 像特有のノイズや線幅の変化、粒界誤結合の影響でピクセル単位の一致率が低く算出される傾向がある。たとえば正解画像における亀裂や粒界はあくまでも1ピクセル幅の線状であるのに対し、エッジ検出後やクロージング適用後の検出結果は領域（太さを持つ線）として出力されるため、その厚み分のズレを考慮しなければ、適合率や再現率が著しく下がるのは当然である。したがって、混同行列のみで亀裂中心線をどの程度正確に再現しているかを評価するのは不十分であり、視覚的評価によってどの領域が本当に正しく検出されているかを確認するほうが実用上有益であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、砂岩薄片中の石英粒内における亀裂および粒界を自動検出する手法として、偏光顕微鏡直交ニコル像および SEM（二次電子像・反射電子像）を対象に、Canny 法、LoG 法、Prewitt 法、Gabor フィルタの4手法でエッジを候補取得し、得られた複数のエッジ画像の中から視覚的に最も優れている Canny 法を選択してモルフォロジー演算によるクロージングを適用した。クロージングに用いた diamond, disk, octagon, line, square の五種の構造要素を比較した結果、視覚的には Canny 法+square 構造要素の組み合わせが亀裂および粒界を最も忠実に再現し、線幅もほどよく維持されていると判断された。しかし、同組み合わせでも粒界と亀裂が近接する部分では構造要素形状の影響で誤結合が生じるほか、ノイズ由来の偽線が残存する問題があった。したがって、亀裂および粒界を区別し検出するうえで、視覚的に検出結果を評価し、どの領域が正しく検出できているかどの領域で誤検出や欠落が生じているかを具体的に示すことが不可欠である。

今後は、視覚的評価を補完するために亀裂中心線間の距離誤差や分岐点再現性を評価する指標を導入し、より石英粒内亀裂の検出性能向上を検討する予定である。

文 献

- Arena, A., Delle Piane, C., and Sarout, J. (2014) A new computational approach to cracks quantification from 2D image analysis: Application to micro-cracks description in rocks. *Computers & Geosciences*, Vol.66, pp.106–120.
- Mizoguchi, K. and Ueta, K. (2013) Microfractures within the fault damage zone record the history of fault activity. *Geophysical Research Letters*, Vol.40, pp.2023–2027.
- 中川愛珠, 上原真一 (2025) 機械学習による粒内亀裂の自動検出方法の開発. 日本地球惑星科学連合 2025 年大会発表要旨.
- 山根達郎, 全邦釘 (2019) Deep learning による Semantic Segmentation を用いたコンクリート表面ひび割れの検出. 構造工学論文集, Vol.65A, pp.130-134.