

(75) 花崗岩内に生じるクラックの進行経路と鉱物粒の関係

徳山高専 正会員 ○工藤洋三
徳山高専 正会員 橋本堅一
山口大学工学部 正会員 佐野 修

Relation between Stress-induced Crack Path and Mineral Grains in Granitic Rocks

Yozo KUDO, Tokuyama College of Technology
Ken-ichi HASHIMOTO, Tokuyama College of Technology
Osam SANO, Yamaguchi University

Abstract

Stress-induced crack paths in rocks depend not only on the stress conditions but on the texture and the fabric of the rock. Direct observation of the crack path is important to understand its role in the mechanism of brittle fracture. The double-torsion test was chosen for making stress-induced cracks, because the crack starting point, crack initiation place, and crack propagating direction are known. Crack velocities were properly controlled, that is, 10^{-7} m/s, 10^{-4} m/s and 10^{-1} m/s. Thin section analysis using an optical microscope was conducted to detect the crack path. In spite of the extensive range of crack velocities, the ratios between the intragranular and intergranular crack length did not change. But the fractal dimensions of crack paths calculated from power spectrum shows a definite trend according to the crack velocities. The crack paths, which are dependent on the mineral grains, are discussed in detail.

1. はじめに

載荷に伴って岩石内に生じるクラックがどのように進行していくかという問題は、破壊力学の岩石への適用などとの関連で重要な問題である。また岩盤工学や地震学では、多くの場合岩石破壊と岩盤破壊の間に相似性を仮定するので、岩石破壊の岩盤への適用可能性を考える上で、岩石破壊実験の限界を知っておくことは有意義なことである。

応力下で岩石内に生じるクラックの進行経路は、応力状態のみならず岩石を構成する鉱物粒の種類や組合せに依存する。クラックの進行状況を観察するためにはクラックの開始位置、進行方向、クラック速度などが明らかであることが望ましい。圧縮荷重下において発生するクラックの経路を観察しようという試みは光学顕微鏡や電子顕微鏡を用いて盛んに行われており、多くの知見が得られている。しかし圧縮荷重下では先在クラックと新たに生じたクラックの区別が困難で、統計的な処理に頼らざるを得ない側面がある。さらに圧縮荷重下では、載荷にともなうダイラタンシーが局所化することが知られており、クラックの観察のためにはその位置を正確に知る必要がある。

本研究ではこうした困難を避けるため、まずクラックの開始位置と伝播方向が明らかな実験により得られる試料を用いることとした。そのような試験法としてダブルトーション法を選び、この試験によって得られた試料の薄片観察によって花崗岩内のクラックの進行経路と鉱物粒の関係について検討する。その際、鉱物粒内のクラックのみならず鉱物粒の組合せと関連する粒界クラックとの関連についても検討する。さらにクラック速度の変化に伴うクラック経路の変化を検討するためにフラクタル次元を計算して検討した。

2. 試料および実験方法

実験に用いた岩石は庵治花崗岩（香川県）である。石英の量比は比較的一定しているが、カリ長石は間隙を充填する形で大晶が散在しており平均的な構成鉱物の量比を求めるためにはかなり広い範囲の解析が必要である。表-1に示したのはgrain面の観察による構成鉱物の量比である。

表-1 構成鉱物の量比 (%)

石 英	3 0
斜長石	3 7
カリ長石	2 4
黒雲母	8
その他	1

実験は佐野の方法¹⁾に準じており、クラック開口方向はrift面に垂直である。石英内のクラック密度はrift面内が最大であるため、これはクラック長に占める粒内クラックの割合の最も高い経路である。所定のクラック速度 (10^{-7} m/s, 10^{-4} m/s, 10^{-1} m/s) が得られるように载荷した後除荷した。薄片の作製過程での新たなクラックの生成を避けるために薄片を作製する前に真空状態にして、着色したシアノアクリレート系の接着剤に浸潤させた後わずかに圧力をかけた。またクラックが最初に進行する面が観察できるように引張側から薄片を製作した。偏光顕微鏡に附属の撮影装置によりクラック周辺を写真撮影し、この写真を慎重に合成しクラックの総経路を得た。

3. 実験結果および考察

薄片観察によって得られたクラックの進行経路の一例を図-1に示す。クラックの進行状況は単純ではなくいたる所で屈曲しており時にはクラックが連続していない部分も認められる。このことはクラックが単純なモードⅠクラックではないことを意味している。クラックは大別すると鉱物粒内に存在する粒内クラックと2つの鉱物粒の間に存在する粒界クラックに大別される。粒内クラックについては、花崗岩の代表的な構成鉱物である石英 (Q), 斜長石 (P), カリ長石 (K), 黒雲母 (B) の各粒内に分類し、粒界クラックについてはこれらの鉱物のすべての組合せについて検討した。これらの関係について整理したものが表-2である。なお粒径が小さいためにクラックの種類が判別しにくいものについては除外した。

表よりまず明らかなことは、100万倍というクラック速度の違いにも関わらず、粒界クラック (T) と粒内クラック (I) の比率 T/I が0.85~0.92でほぼ等しいということである。これに対して、Swanson²⁾がWesterly花崗岩のダブルトーション試験片を用いて行ったクラックの解析によれば、クラック速度が 10^{-7} m/s程度では T/I の比率は0.6程度でクラック速度が破壊靱性値に近づくような領域 ($v > 10^{-1}$ m/sと記されている) ではこの比率は1.2程度になるという結果が得られている。すなわち、クラック速度の増加に伴ってクラックの進行経路は粒内を貫くクラックの経路が飛躍的に増えることが示されている。この違いが、試料の違いに基づくものか、観察方法の違いに基づくものかは現在のところ明らかでない。

粒内クラックのみに注目すれば、斜長石粒内のクラックが粒内クラックの約39%を占め構成鉱物の量比にほぼ等しいのに対して石英は約23%と対応する量比に比べて少ない。これに対してカリ長石は34%を占めており高い割合を占めている。これらの観察結果は各鉱物の単結晶としての強度と先在クラックやへき開などの微

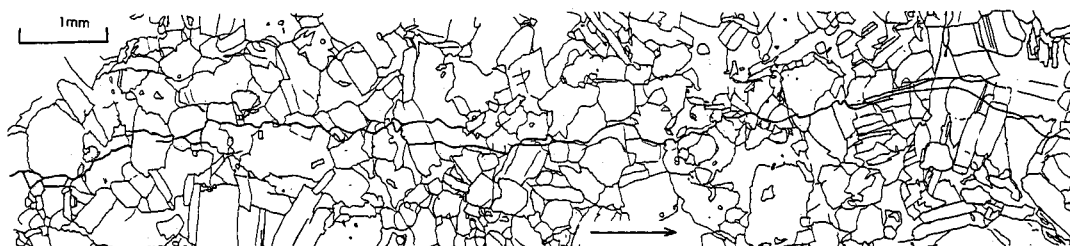


図-1 実験によって得られたクラック経路の一例 ($V=10^{-4}$ m/s)

表-2 クラック経路と鉱物粒の関係(%)

クラック速度		10 ⁻⁷ m/s	10 ⁻⁴ m/s	10 ⁻¹ m/s
クラック全長		32mm	32mm	17mm
粒内	石英	16	12	13
	斜長石	27	21	18
	カリ長石	10	18	16
	黒雲母	1	2	5
小計		54	53	52
粒界	Q - Q	8	9	10
	Q - P	9	5	4
	Q - K	11	10	11
	Q - B	3	3	3
	P - P	8	8	11
	P - K	2	9	3
	K - B	1	2	2
	P - B	3	0	1
	B - B	1	0	3
小計		46	47	48

小欠陥の割合から説明される。粒内クラックの比率は、斜長石が一番多く、石英とカリ長石の比率はほぼ同程度となっている。また粒界クラックでは、石英とカリ長石(Q-K)、石英と石英(Q-Q)、斜長石と斜長石(P-P)、石英と斜長石(Q-P)の組合せによる粒界クラックが比較的大きな比率を占めている。これを石英と関連した粒界クラックと斜長石と関連した粒界クラックに分類して考えると、石英に関するものが約0.3、斜長石に関するものが約0.2という比率になり、石英の粒界が比較的分離しやすいことがわかる。

次に、各鉱物粒ごとにクラックの進行経路との関連を示す。

1) 石英 石英は粒内クラックの方向に異方性が存在するので、クラックの解析についてはどの方向にクラックが進むかによって粒内を通る比率が変化することが予想される。図-2に石英粒とクラックの関係を示す典型的な事例を示した。まず図-2(a)は石英粒内にクラックが存在しない場合のクラック経路である。カリ長石が空隙を充填する形で石英粒をとりまいており、クラックはカリ長石粒内を通過した後石英との粒界に達し、ここからは石英とカリ長石の粒界が進行経路になっている。図-2(b)は石英と斜長石、および黒雲母の粒界をクラックが進行する場合であり、この場合も石英との粒界が進行経路となっている。すなわち石英の強度は他

の構成鉱物に対して大きいので、石英粒に達したクラックは粒内に入るためのエネルギーの障壁が大きく粒界に沿って進むものと考えられる。また石英は他の構成鉱物と比較して熱的な性質が著しく異なるため粒界のクラック密度が高いといわれており³⁾、こうした粒界の先在クラックがクラック経路として積極的に利用されているものと考えられる。

一方図-2(c)に認められるような粒内を通るクラックも認められた。クラックの進行方向が先在クラックの

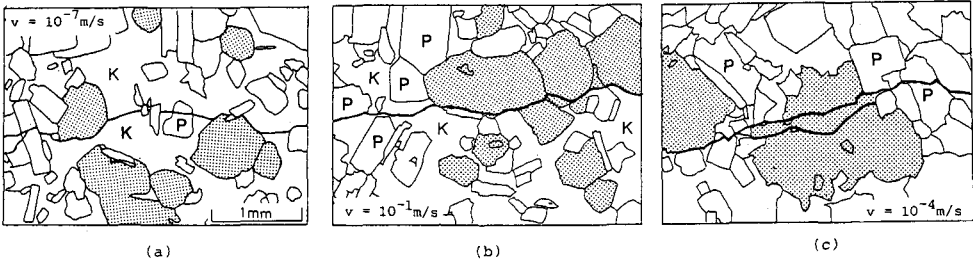


図-2 石英粒とクラック進行経路の関係

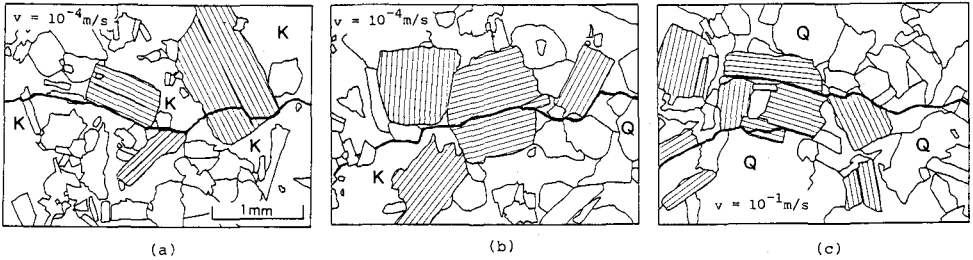


図-3 斜長石粒とクラック進行経路の関係

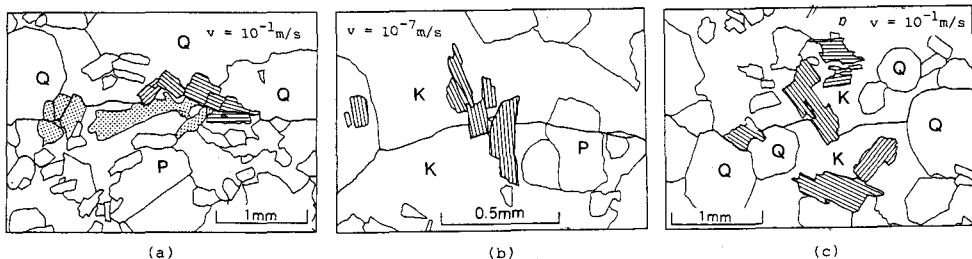


図-4 黒雲母粒とクラックの進行経路の関係

方向と同じであるため、先在クラックがクラックの経路となった可能性があるが、実際にこれが先在クラックに起因するものかそうでないかという判定は現時点では困難である。

2) 斜長石 図-3に斜長石粒とクラックの進行経路の関係を示す。斜長石内には $\{010\}$ と $\{001\}$ の2つのへき開面が存在する。図-3(a)および図-3(b)に示すように、斜長石粒内を通るクラックの大半はこのへき開面に沿うものである。

また図-3(b)および図-3(c)に示されているようにクラックが石英やカリ長石との粒界を通る場合も数多く存在する。用いた花崗岩の斜長石の形状は自形から半自形であるため粒界を通るクラックは比較的直線性が高い。

3) カリ長石 表-1および表-2から明らかなように、一般にカリ長石粒内を通るクラックの割合は、その量比に対してかなり高い。このことはカリ長石の強度が他の構成鉱物と比較して相対的に小さいことに起因するものと考えられる。また石英粒内や斜長石粒内のクラックと異なり先在クラックやへき開面と関連した明瞭な方向性を持っていないのもカリ長石粒内のクラックの特徴である。

4) 黒雲母 表-1からも明らかなように、黒雲母は試料中に含まれる量比も小さく力学的な性質に与える影響なども他の鉱物に比較すれば小さいと考えられる。しかし応力によって発生するクラックとの関連ではかなりはっきりとした傾向が認められる。図-4に黒雲母とクラックの関係を示した。図-4(a)と図-4(c)のように、黒雲母の $\{001\}$ のへき開にほぼ平行に進行してきたクラックはほとんどの場合このへき開に沿って進行する。このことは黒雲母のへき開がほとんど抵抗力を有しないことを意味している。これに対して図-4(b)のように黒雲母の $\{001\}$ のへき開に垂直に進行してきたクラックは黒雲母の粒界で停止してそのトレースが消え、もう一方の側のカリ長石と接する位置に再び現れる。

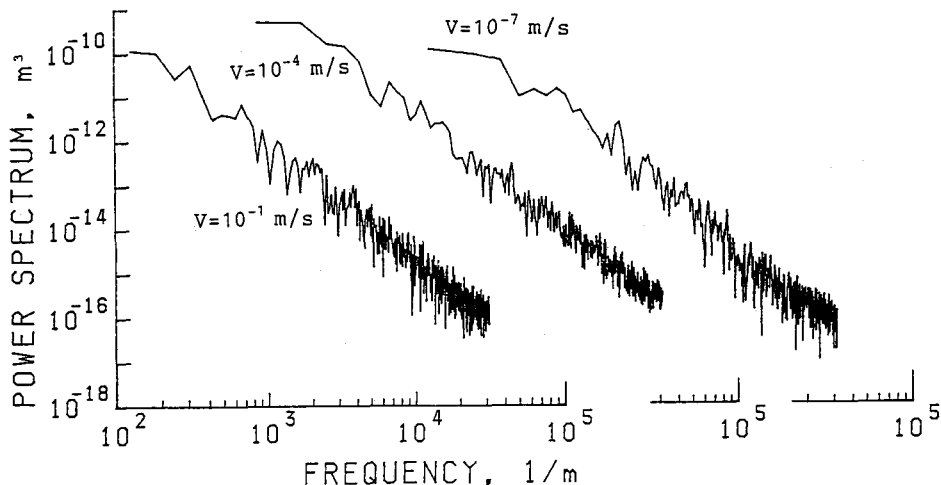


図-5 クラック経路のパワースペクトル

4. クラック経路のフラクタル次元

以上述べてきたように、クラック先端の鉱物粒の組合せが決まればクラックの進行経路はある程度決定される。しかしながら鉱物粒の複雑な組合せからなるクラック進展の全経路を予測することは不可能である。そこでクラック先端において、鉱物粒とその組合せによって決定されるこうしたクラック経路が、どのような特性を検討するためにフラクタル次元を求めてクラック経路の定量化を試みた。クラック経路をデジタル量に変換した後パワースペクトル密度を求め、スペクトルの傾

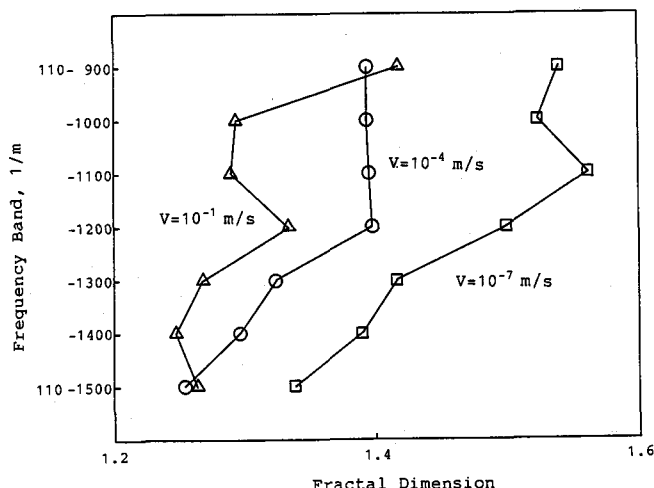


図-6 クラック速度の変化にともなうフラクタル次元の変化

きからフラクタル次元を計算した。各クラック速度別に計算されたパワースペクトル密度を図-5に示す。これより各周波数帯ごとにフラクタル次元を計算しまとめたものが図-6である。Brown and Scholz⁴⁾が明らかにしたように、鉱物粒の平均粒径に対応する周波数領域（約 1200m^{-1} ）においてはフラクタル次元はほぼ一定している。このことはこの領域におけるクラック経路がフラクタルであることを示唆している。パワースペクトルの傾きから計算されたフラクタル次元は、そのばらつきの範囲をこえてクラック速度の変化に伴う明瞭な傾向が認められ、クラック速度の増加に伴ってフラクタル次元は減少する傾向にある。このことはクラック速度の増加にともなって、クラック経路がより直線（フラクタル次元1）に近づくことを意味している。粒内クラックと粒界クラックの単純な比率では認められなかったクラック速度による変化がフラクタル次元において認められるが、フラクタル次元に変化をもたらす岩石内部の機構については現在のところ不明である。

5. おわりに

本研究では庵治産の花崗閃緑岩を用いたダブルトーション試験より得られる試験片より岩石薄片を作製し、その薄片を観察することによって花崗岩質岩石が本来有する組織や構造と応力によって生じるクラックの経路との関連を検討した。鉱物粒内あるいは粒界を進行するクラックには鉱物粒の方向や組合せによる規則性があり、岩石内の弱面がクラックの選択的な経路になることが明らかになった。またこうして形成されるクラックの全経路はフラクタル的な性質を持つことが示唆された。粒内クラックと粒界クラックの比率には影響を及ぼさなかったクラック速度の変化も、フラクタル次元には反映された。

参考文献

- 1) Sano, O., A revision of the double-torsion technique for brittle materials, J. Mat. Sci., 23, 2505-2511, 1988.
- 2) Swanson, P. L., Subcritical fracture propagation in rocks: An Examination using the methods of fracture mechanics and non-destructive testing, p, PHD thesis, University of Colorado, 1985.
- 3) Nur, A. and Simmons, G., The origin of small cracks in igneous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 18, 53-59, 1970.
- 4) Brown S. R. and C.H. Scholz, Broad Bandwidth study of the topography of Natural rock surfaces, J. Geophy. Res., Vol. 90, NO. B14, 12575-12582, 1985.