

(91) Westerly花崗岩内の微小欠陥と強度異方性

徳山高専 ○工藤洋三 徳山高専 山本秀喜
山口大学工学部 佐野 修 山口大学工学部 中川浩二

Relation between Fabric Anisotropy and Physical Anisotropy in Westerly Granite

Yozo KUDO, Tokuyama College of Technology
Hideki YAMAMOTO, Tokuyama College of Technology
Osam SANO, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

ABSTRACT

Sound velocity measurement, diametral compression test and thin section analysis were performed to check the relation between fabric anisotropy and physical anisotropy in Westerly granite. Pre-existing microfractures which characterize three quarry planes in Westerly granite were observed by optical microscope. Thin section analysis indicates that the rift plane, oriented horizontally, is the plane of parallel arrangement of mineral grains like plagioclase and biotite; that the grain plane, normal to the rift plane and therefore oriented vertically, is the plane of preferentially oriented cracks in quartz grains; and that the hardway plane is the plane normal to both the rift plane and the grain plane. Sound velocity propagating normal to the rift plane has the lowest value and the velocity normal to the hardway has the largest. The velocity normal to the grain has a velocity value close to that of the hardway. In contrast, tensile strength with respect to the grain plane has closer value to the strength of the rift rather than to that of the hardway. Qualitative differences between preferentially oriented microcracks in quartz and parallel arranged plagioclase grains explain this unexpected results in physical property.

1. はじめに 岩石物性を把握したり岩盤の力学的挙動を理解するために、Westerly花崗岩（アメリカ合衆国ロードアイランド州Westerly産）が室内実験用の供試体として使用される機会は特に多い。これはこの岩石が細粒であるため実験結果の再現性が優れていることや供給が安定していることによるものである。さらに同じ供試体を用いれば実験結果の直接比較が可能であるため日本においてもこの岩石を実験に使用する機会が増えている。このためWesterly花崗岩の組織・構造や基本的な力学的性質を把握しておくことが重要となっている。特に花崗岩には組織・構造を反映した力学的な異方性が存在することがすでに多くの研究により明らかになっているので、異方性という点に関してWesterly花崗岩の特性を把握しておくことも重要である。

本研究では、薄片観察によりWesterly花崗岩の組織・構造の特徴を明らかにするとともに、これらの微視的な特徴が弾性波速度や圧裂強度にどのように反映されるかについて検討する。

2. 試料 Scholz and Koczyński¹⁾によれば、Westerly花崗岩内の構造は直交異方性を有している。rift面は雲母の配向面でクラックが最も密度が高く、これに直交するgrain面は2番目にクラック密度の高い面として記載されている。Westerly花崗岩のダイラタンシー異方性に関する研究として、Hadley²⁾, Scholz and Koczyński¹⁾の研究がある。またBrace³⁾は、高い封圧下でも圧縮率に5%程度の異方性が認められることを明らかにしている。一方、Mogi⁴⁾が行ったWesterly花崗岩に関する圧縮強度試験では強度異方性は認められていない。

Westerly花崗岩と呼ばれている岩石は実際には3種類あるが、この内岩石試験によく用いられている岩石は"Westerly blue"と呼ばれている岩石であり、以下この岩石をWesterly花崗岩と呼ぶ。工藤の調査⁵⁾によれば、

採石場ではほぼ直交する2つの面が同じ"rift"という名称で呼ばれている。このうち一つは水平面であり、一方はほぼ鉛直面でほぼN35°Eの走行を有している。採石場での情報をもとに、薄片の面がそれぞれの"rift"に平行な薄片2枚と2つの"rift"に直交する面に平行な薄片1枚を、薄片の長軸または短軸も"rift"と一致するような3枚の薄片を製作した。

薄片の観察結果の代表的なものを写真-1および写真-2に示す。写真-1から明らかなように、Westerly花崗岩の石英粒内にはほぼ水平方向("rift"の方向)に開口したクラックが選択配向している。写真はそれぞれ別の薄片から得られたものであるが、いずれの薄片でもこうした選択配向が認められる。これは日本の多くの花崗岩の異方性を特徴づける構造と一致している。こうした石英粒内に選択配向するクラックの多くは開口しているが開口幅は極めて小さい。これらのクラックは石英粒内をほぼ横断しており、したがってその長さは石英の粒径とほぼ一致している。次に写真-2からも明らかなように、ほぼ鉛直面で、採石場で"rift"と呼ばれているもう一つの面には、黒雲母粒および斜長石粒の平行配列が認められる。すなわち黒雲母の(001)および斜長石の(010)のへき開や斜長石粒界に配向性が認められる。

こうした観察結果によれば、Scholt and Koczynski¹⁾がWesterly花崗岩でrift面と呼んでいるのは鉱物粒の平行配列で特徴づけられる鉛直面であり、grain面はほぼ水平面である。本研究でも配向面の呼称は以下この定義に従うことにする。実験に先だってgrain面内の弾性波速度の異方性を調べた。rift面に垂直に進行する弾性波の速度(4250m/s)とhardway面に垂直に進行する弾性波(4710m/s)の間には約10%の速度異方性が認められ、grain面に垂直に進行する波動はこの両者の間の値(4580m/s)となった。すなわち弾性波速度の測定結果からもrift面は鉱物粒の平行配列によって特徴づけられる面であり、grain面は石英粒内の選択配向によって特徴づけられる面となる。なお日本で入手できるWesterly花崗岩の中でも、弾性波速度の異方性などに若干のばらつきがある。おそらくは採石場所の違いによるものと考えられるが中には異方性が数%しかないものもある。このため本研究で扱っている試料は、Westerly花崗岩の中でも異方性の大きい岩石であると考えられる。

3. 実験方法 本研究で用いた圧裂強度試験装置はISRMの指針⁶⁾に準拠したものである。計測量として、荷重と内蔵変位計によって得られる軸方向変位の他に、供試体端面の圧裂予定面上にひずみゲージを配置した。供試体中央部に載荷軸に平行なひずみゲージを配し、載荷初期における偏心の有無と体積ひずみを計算した。以後載荷軸に平行な方向のひずみゲージによって得られるひずみを縦ひずみ、これと直交する方向のひずみを横ひずみと呼ぶことにする。圧裂強度の計測は、rift面、grain面、hardway面の各面についてのみ行った。供試体の直径は約42mmであり、供試体長は約21mmである。供試体の寸法上の精度について圧裂面内の直径のばらつきは同一供試体内で2/100 mm 以内であり、また端面の平面度のばらつきは5/100mm 以内としている。圧裂試験に先立ち圧裂面に垂直な方向の V_0 を計測した。

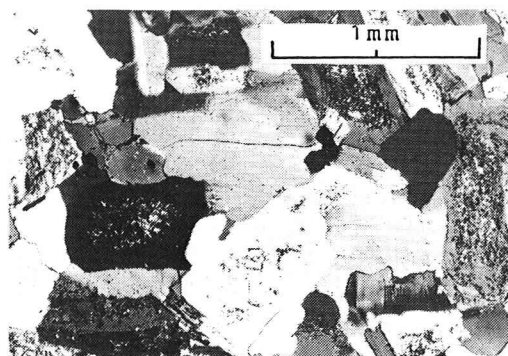


写真-1 grain面に平行な石英粒内のクラック

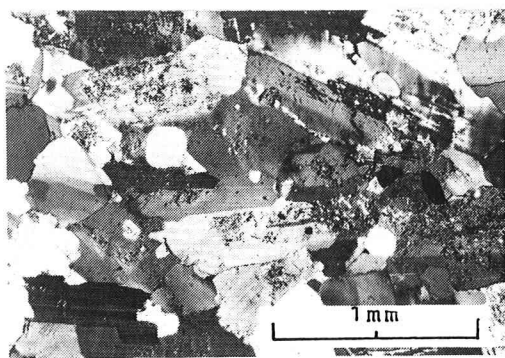


写真-2 rift面内に平行配列した斜長石と黒雲母

表-1 実験条件と実験結果

No	Case	Specimen Orientation	Diameter (mm)	Length (mm)	Sound Velocity (m/s)	Tensile Strength (MPa)
1	A	rift	42.80	21.20	4302	11.0
2			42.75	20.80	4233	11.0
3			42.75	20.70	4340	11.7
4	B	grain	42.70	20.05	4591	11.0
5			42.80	20.15	4578	11.4
6			42.75	21.15	4647	11.3
7	C	hardway	42.75	21.30	4572	12.9
8			42.70	20.65	4616	12.1
9			42.70	20.80	4692	12.5

4. 実験結果 実験結果を表-1に示す。圧裂面に垂直に進行する弾性波速度はそれぞれの面に関する限りばらつきも小さい。圧裂強度もそれぞれの面に関するものはよく一致している。Case A, Case B, Case Cの圧裂強度を比較すると、hardway面に関する圧裂強度が最も大きく、rift面とgrain面の圧裂強度はさほど異なっていない。このことはgrain面に垂直に進行する弾性波速度がむしろhardway面に垂直に進行する弾性波速度に近いことと対照的である。

図-1に横ひずみの測定結果を示す。これは横ひずみを、測定された断面の位置と各荷重段階に対応させて示したものである。応力 (σ_t) は圧裂試験の慣用式を用いて荷重から得られたもので、破断直前のひずみ分布を図示した後、応力増加が約1MPaになるように測定結果を整理したものである。圧裂試験では荷重方法が不安定であるため、荷重初期に慎重に荷重しても荷重の偏心はさけられない。図に示した結果の多くは、荷重の偏心によって一方の側のひずみが相対的に他の端面のものより大きいことを示している。さらに、圧裂面上のひずみ分布にも若干の変化があり、荷重初期の各測定点間のひずみの差は荷重にともなって拡大する傾向にある。もし材料が線形的な挙動を示すならばそれぞれの応力段階に対応した折れ線の間隔は等しいはずであるが、実際には荷重に伴って拡大される傾向にある。こうした横ひずみの非線形挙動は、荷重によってまず供試体端面近くの特定位に微小クラックが発生し、さらにこれが同じ端面の圧裂面に沿って伝播することを示唆していると考えられる⁷⁾。こうした傾向が両方の端面に対して認められるものもあるが、一方の端面のひずみが破断の直前まで微小クラックの発生と伝播に対応した兆候が認められないものもある。

5. 考察 図-1はたとえ微小クラックの発生が供試体端部であった場合でも、供試体中央部におけるひずみから供試体の変形挙動を推測することができることを示唆している。圧裂試験における変形・破壊挙動についてさらに詳しく検討するために、供試体中央部の荷重軸に平行に貼られたひずみゲージと引張ひず

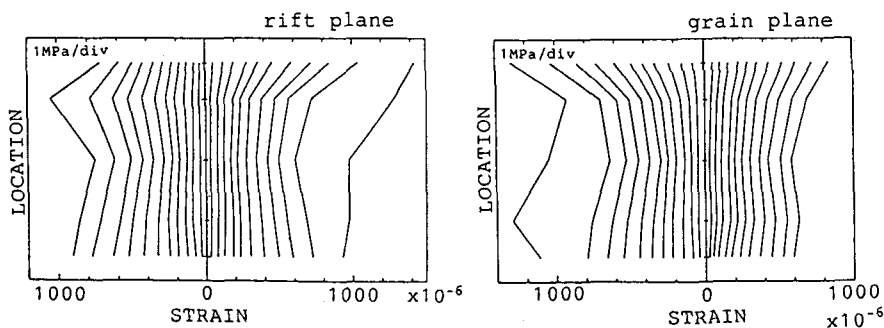


図-1 供試体端面の破断予定面上における横ひずみの分布

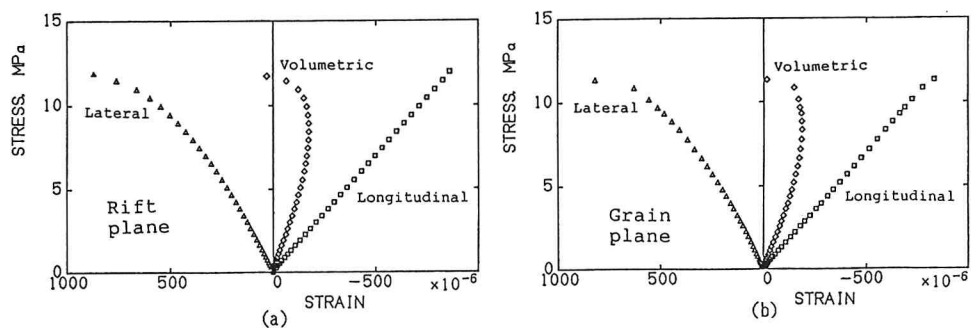


図-2 供試体端面中央部のひずみから計算された体積ひずみの挙動

み測定用のひずみゲージの出力を用いて体積ひずみ⁷⁾を定義して検討した。計算結果を図-2に示す、いずれの場合も体積ひずみは一軸圧縮試験の場合と似た挙動を示している。すなわち体積ひずみは最大荷重点に至る前に、弾性成分からの体積膨張側への逸脱と考えられる非線形挙動を示すようになる。圧縮強度実験の場合はこの逸脱成分が载荷に伴う微小クラックの生成と集積から説明されている。図は圧裂実験の場合もこれと同様な機構から説明されることを示唆している。またこの逸脱が主に横ひずみによってもたらされていることも、载荷軸方向の微小クラックの生成と集積に対応しているものと考えられる。すなわち圧裂による破壊が1個あるいは数個の欠陥によって決定されるのではなく、かなりの数の微小クラックの集積によってもたらされることを示しているものと考えられる。このことはAEの測定によっても裏付けられる⁷⁾。

図-2は圧裂試験における破壊もまた微小クラックの集積によってもたらされることを示唆したが、こうした微小クラックの発達段階と強度に異方性がもたらされる原因については岩石を構成している鉱物粒の種類とその組合せなどの関連で論じなければならない。Westerly花崗岩の主要な造岩鉱物は石英、長石(斜長石、カリ長石)、黒雲母であるのでそれぞれの鉱物粒と鉱物粒内の欠陥さらにはこれらの組合せの中で異方性を

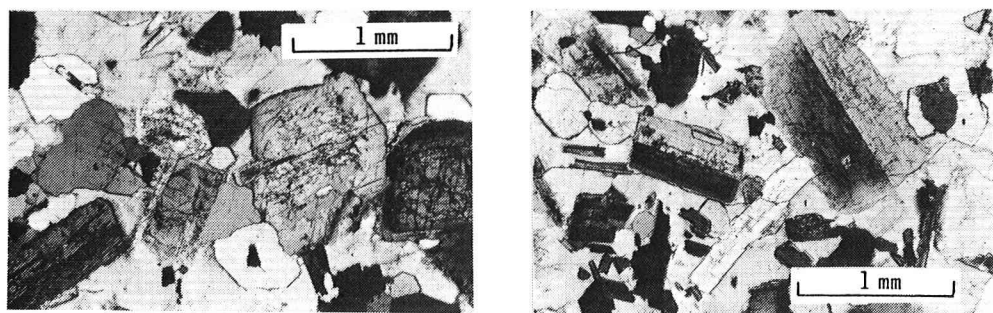


写真-3 長石粒内におけるクラックの伝播経路(ダブルトーション試験)

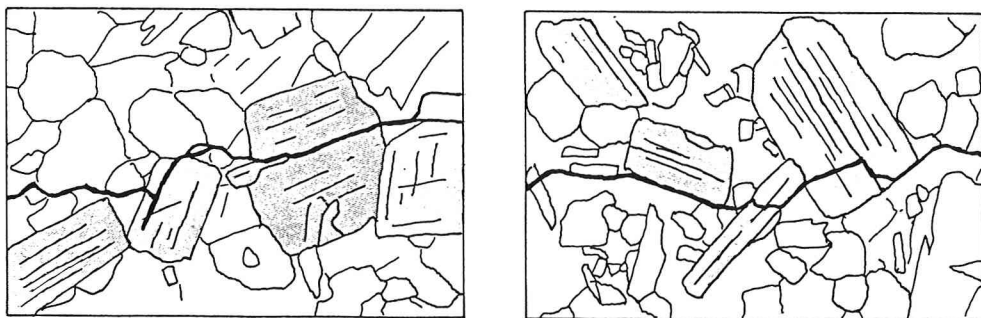


図-3 長石粒内におけるクラックの伝播経路(写真-3に対応)

有するものに関して議論すればよい。圧裂試験において圧裂面に沿う破断の直前に荷重を停止させることは可能でありまたひずみの集中域も予測可能なので、表-1 に示した供試体とは別にこうした供試体を準備し薄片観察を行ったが、载荷によって生じたクラックと先在クラックを区別することが困難であった。このためクラックの開始位置と伝播方向が明らかな実験、本研究では大島花崗岩を用いた3点曲げ試験（変位速度 5×10^{-7} m/s）と庵治花崗岩を用いたダブルトーション試験（クラック速度 1×10^{-7} m/s）に使用した試料から岩石薄片を製作して鉱物粒とクラックの伝播経路の関係について検討した。この内、石英粒については粒内に先在クラックが存在する場合は、その先在クラックが载荷にともなって発生するクラックの経路となり、先在クラックが存在しない場合は粒内を迂回して粒界を進行すること、また雲母の(001)のへき開もこうしたクラックの進行経路になる可能性が高いことについてはすでに述べた⁸⁾。ここではWesterly花崗岩のrift面を特徴づける構造の一つである斜長石粒の平行配列との関連で斜長石粒内あるいは粒界を進行するクラックについて検討する。



写真-4 斜長石粒内を伝播するクラック（3点曲げ試験）

写真-3は载荷にともなって生じる主要なクラックが斜長石粒内および粒界を進行する場合のクラックの進行経路に関するものであり、図-3はこれをスケッチしたものである。これらの写真および図よりも明らかなように、クラックの進行方向とほぼ平行な方向に(010)のへき開がある場合、クラックはこのへき開を選択するように進行する。また(001)のへき開についても同様なことがいえる。しかし(010)と(001)のへき開のほぼ垂直2等分線上をクラックが進行する場合には、(010)のへき開を選択的に通過する場合が多いことから、へき開面の強度は相対的に(010)の方が弱いものと考えられる。(010)および(001)のへき開はほぼ直交しており、一般に(010)に沿うへき開の長さが(001)に沿うへき開の長さより長い。さらにクラックの進行方向と斜長石粒の方向が斜交している場合には写真-4に典型的に示されているように(010)と(001)のへき開を交互に進行する例が多く認められる。このことは石英粒内のクラック進行方向に先在クラックがない場合には粒内を通らず、粒界がクラック進行経路になることと対照的である。

grain面に垂直に進行する弾性波速度が比較的大きいことは石英粒内のクラックの開口幅が比較的小さく、結果として弾性率の低下にさほど反映しないことより説明できる。これに対して圧裂強度の低下は、花崗岩を構成する鉱物の中で強度が相対的に高いと考えられる石英粒内に先在的にクラックが存在するため、载荷に伴うクラックが石英粒内を直線的に伝播することから説明できる。rift面を圧裂する場合、長石粒内や雲母粒内は直線的に伝播することができるが石英粒内には先在的な欠陥が少ないため、石英粒を回避するような伝播経路をとると考えられる。

6. おわりに 本研究ではWesterly花崗岩の組織・構造における異方性と微小欠陥の各配向面に平行な圧裂強度の異方性を明らかにし、圧裂強度の異方性とその程度を载荷に伴って生じる微小クラックの発達段階の問題から説明した。ここで扱った鉱物粒の種類とクラックの発達段階の問題は圧裂荷重下のみならず、圧縮荷重下におけるクラックの伝播の問題に対しても有益な情報を提供しているものと考えている。

【参考文献】 1) Scholz C. H. and T. A. Kocynski, J. Geophys. Res., 84, 5525-5534, 1979. 2) Hadley K., J. Geo-phys. Res., 80, 4845-4850, 1975. 3) Brace W. F., J. Geophys. Res., 70, 391-398, 1965. 4) Mogi K, Felsmechanik. Ingenieurgeol., 4, 41-55, 1966. 5) 工藤洋三, 土と基礎, No.1819, 39-44, 1988. 6) ISRM Commission on standarization of laboratory and field tests, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15, 99-103, 1978. 7) 工藤洋三, 佐野修, 古川浩平, 中川浩二, 土木学会論文集, No.400/Ⅲ-10, 233-241, 1988. 8) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野修, 中川浩二, 土木学会第43回年講(第Ⅲ部), 680-681, 1988.