

花崗岩の異方性を考慮した変形・破壊特性に関する研究

DEFORMATION AND FRACTURE PROCESS OF GRANITIC
ROCKS AS AN ANISOTROPIC BODY

佐野 修*・工藤洋三**・水田義明***・中川浩二***

By Osam SANO, Yozo KUDO, Yoshiaki MIZUTA and Koji NAKAGAWA

Granite specimens were cored at $\pi/12$ radian intervals within the grain plane, and then loaded at constant strain rates of 10^{-5} , 10^{-6} and 10^{-7} /s. The compressive strength varied about 10 % in the different directions and about 15 % under different strain rates. Young's modulus at low stress levels differed about 40 % in the different directions. The Young's modulus defined by the linear part of stress-strain curve hardly changed. When the loading axis inclined at small angle to the grain plane, the strike of the fault was parallel to the grain plane. Except in the above case, the strike was always parallel to the rift plane. A ratio of the dilatant strain to the number of acoustic emissions increased with decreasing strain rate. Four independent velocities showed that the crack closure continued to the last stage of the loading and also showed that the dilatancy anisotropy should be affected by the rock fabric.

Keywords : anisotropy, granite, dilatancy, AE, sound velocity

1. 諸 論

圧縮応力下の岩石が示す非弾性的挙動は、内部に存在する先在クラックの閉塞や開口^{1)~4)}、あるいは微小破壊による^{5)~7)}ことが示されてきた。これらの研究には理論的な取り扱いも含まれるが、ひずみゲージの採用、サーボ制御方式による試験機の高性能化、高周波のアコースティック・エミッション (AE) の検出あるいは弾性波速度測定など、試験技術の高度化による実験事実の解明が重要な役割を果たしている。その結果、含水状態や温度の変動に伴う力学的性質の変化など^{8),9)}、環境要因のわずかな変化がもたらす影響も論じられるようになった。

試験技術に払われてきた配慮と比較して、試験対象となる岩石のもつ性質に対する配慮は十分とはいいがたい。岩石は多かれ少なかれ異方性を有するが^{10),11)}、変成岩に関する研究¹²⁾を除けば、岩石の力学的異方性を考慮した研究^{13)~15)}は少ない。しかもこれらの研究で異方性が指摘された岩石でも、工学的には等方性とみなすこと

が普通である。中でも試験に用いることの多い花崗岩は、通常、等方性仮定がなされているにもかかわらず¹³⁾、その異方性はかなり大きく^{11),13)~16)}、一軸引張強度や破壊靱性値 K_{Ic} の異方性は 40~50 % 程度もある^{14),16),11)}。

地質学の分野では 1930 年代に花崗岩の圧縮強度の異方性が指摘された^{17),18)}。地震学や工学分野では 1970 年代に認められ、圧縮強度や引張強度^{13),14),16),19)}、弾性波速度^{15),16),20)}や変形・破壊挙動^{13),14)}の異方性が論じられた。また花崗岩の異方性が先在クラック分布に起因することを示す証拠が提出された。しかし異方性を考慮した研究でさえも、載荷軸が異方性軸と一致する場合のみが行われており、主軸と斜交する場合に関する系統的な研究^{13),14),16)}は少ない。さらに圧縮応力下に関するもの¹³⁾は非常に少ない。

比較的低温低圧の圧縮応力下の岩石の破壊は微小破壊の集積によるものであり、その影響は載荷方向のひずみよりもむしろ載荷方向に垂直なひずみや体積ひずみ、すなわちダイラタンシーとして顕著に現われる^{21),4),7)}。前述の論文¹³⁾は載荷軸が異方性軸と斜交する場合の変形挙動を議論しているが、ダイラタンシーが岩石破壊の重要な指標であるという認識がなされてなく、載荷軸方向の変形の異方性のみが論じられているので、破壊挙動に関する議論は不十分と思われる。一方 Hadley²²⁾により

* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部
(〒755 宇部市常盤台)

** 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助教授

*** 正会員 工博 山口大学教授 工学部

指摘されたダイラタンシー異方性や Sobolev²³⁾により指摘されたダイラタンシーの局在は、微小破壊が先在クラックの配向面と関連した方向に発達するためであると指摘されており^{24)–26)}、最終破断面が異方性軸により決定されることが示されている。このように岩石の異方性が破壊過程に重要な影響を及ぼすことが明らかとなってきたが、これらの研究の多くは載荷軸が異方性軸と一致する場合に限定されており、地殻や岩盤内構造物周辺の主応力方向が必ずしも岩石の異方性軸と一致するとは限らないので、異方性軸と主応力軸が斜交する場合についても検討する必要があると思われる。

本研究では、その強度が比較的高いこと、および比較的広範囲にわたって一様な特性が期待できること等から地下備蓄や廃棄物処理のための地下空洞建設の対象となることが多い花崗岩の圧縮応力下の変形・破壊挙動を明らかにするために、花崗岩が一般的に有する異方性の主軸に関して載荷方向を系統的に変化させた場合の変形・破壊挙動について検討する。また、載荷軸方向のひずみだけでなく、垂直な方向のひずみやダイラタンシー、さらに弾性波速度や AE による微小破壊のモニタリングを行い、異方性岩石の圧縮応力下の変形・破壊挙動および破壊機構に関する考察を行う。

2. 岩石供試体

用いた岩石は、徳山市黒髪島産の花崗岩で厳密には花崗閃緑岩である¹⁶⁾が、通称に従い黒髪島花崗岩とよぶ。島内には多数の採石場があり、採石場ごとに粒径などに違いがある。本研究で使用した岩石は島内で最大規模の採石場で入手した。主要な構成鉱物は石英、斜長石、カリ長石で、平均粒径は約 3 mm である。石英は隣接鉱物により造岩鉱物固有の結晶面の発達が阻害された他形でプール状集合体をつくる。斜長石は造岩鉱物固有の形が発達した自形ないし半自形で累帯構造を示す。カリ長石は他形で間隙を充填しており弱いパーサイトが認められ、時に 10 mm に達する大晶をなすことがある。

花崗岩採石場では採石の際に割れやすい面が利用されている²⁷⁾。この面はクラックの選択的な配向によって特徴づけられており、異方性をもたらす。呼称は採石場により異なることもあるが、ここでは Dale²⁸⁾に従い、最も割れやすい面を rift 面、ほぼ直交する二番目に割れやすい面を grain 面、これらに垂直な面を hardway 面とよび、各面の法線を R 軸、G 軸、H 軸とよぶ。

工藤ほか²⁹⁾によると、石英粒内には rift 面に平行なクラックが著しく、石英集合体内で連続しており、結晶粒界を端部とすることが多い。この種のクラックは長石粒内に延びることはほとんどないが、時には長石粒内にも平行なクラックが認められている。Grain 面には石英粒

内に healed crack (癒着したクラック) と開口クラックが存在するが、rift 面のクラックより少ない。hardway 面にも healed crack が石英粒内に認められるが、grain 面のクラックより少ない。

異方性面内を伝播する弾性波速度 (V_p) を Fig. 1 に示す。Grain 面内や hardway 面内の弾性波速度には大きな異方性が認められる。これは rift 面に平行なクラックによるものであり、grain 面や hardway 面のクラックが rift 面のものよりかなり少ないことを示している。また rift 面内の弾性波速度の異方性は小さいので、grain 面や hardway 面のクラック量に大きな差はない。すなわちこの岩石には rift 面に平行なクラックのみが著しく発達している。以上のことから rift 面のクラックが岩石供試体の変形・破壊挙動に及ぼす影響を検討することを目的とし、grain 面内において載荷軸と H 軸がなす角 θ をパラメーターとして一軸圧縮試験を行うことにした。まず Fig. 2 に示すように、両端面が grain 面と平行な直径約 50 cm の円盤を作製し、 $\pi/12$ ラジアン間隔に側面に垂直にコアを採取し、円柱形供試体を作製した。した

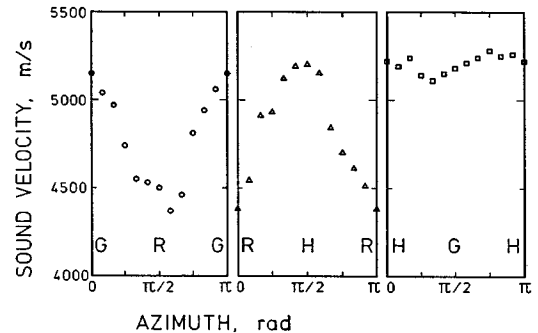


Fig. 1 Sound velocity propagating in the planes of anisotropy, the hardway, the grain and the rift planes. H, G and R are normal to these planes.

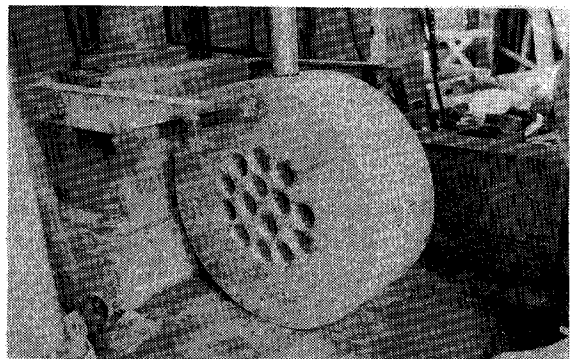


Fig. 2 A photograph showing the coring of the specimens in the various directions.

がって載荷軸は必ず G 軸に垂直である。

3. 実験方法

実験条件は既報²⁶⁾と同様であり、直径約 44.4 mm、長さ 115.00 mm の円柱形供試体を用いた。供試体の両端面の平行度は $\pm 1/100$ mm 以内である。端面効果を減じることを目的として直径 48 mm のエンドピースを介して載荷した。既報²⁶⁾でみられるように再現性は十分よいので、供試体数は各条件につき 1 個とした。定ひずみ速度で載荷したが、設定したひずみ速度は 10^{-5} 、 10^{-6} 、 $10^{-7}/s$ の 3 種類である。 $10^{-5}/s$ については $\theta=0$ (H 軸) から $\pi/2$ (R 軸) を通り $11\pi/12$ までを $\pi/12$ ラジアンの間隔で、他のひずみ速度については 0 から $\pi/2$ までを同じ間隔で採取した供試体により一軸圧縮試験を行った。それとは別にいくつかの供試体については、載荷途中(強度の約 80%)で除荷し、除荷時の弾性率を求めた。またひずみ速度が $10^{-7}/s$ の試験においては応力下の弾性波速度の変化を計測した。弾性波の進行方向は載荷軸に垂直な方向である。載荷軸が異方性軸と一致している場合に得られた結果^{24)~26)}から推測すると、斜交している場合にもダイラタンシー異方性軸や最終破断面 (fault, fracture plane) の走向は異方性軸により決定されると思われる。そこで Fig. 3 に示すように、最終破断面の走向に平行な縦波 (V_{yy}) とこれに垂直な縦波の速度 (V_{xx})、および最終破断面の走向方向に進行し、載荷軸方向に振動する横波 (V_{yz}) と、これに垂直に振動する横波の速度 (V_{zx}) を計測した。これはクラックを含む媒体内の弾性波速度に関する理論^{30)~32)}に基づいたもので、ダイラタンシー異方性の主軸に関するクラック密度を知ることができる。

用いたひずみゲージは長さ 20 mm のクロス型のもので、供試体のほぼ中央部、供試体側面と G 軸が交わる位置およびこれと $\pi/2$ を成す位置にシアノアクリレートにて接着した。弾性波速度および AE の測定には圧

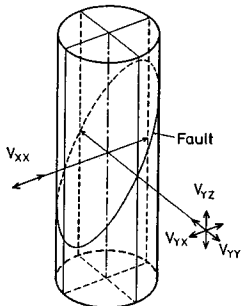


Fig. 3 Directions of propagation (first suffix) and polarization (second suffix) of the velocities measured under load. An expected fault whose strike is parallel to the Y-axis is also shown.

電振動子 (共振周波数 1 MHz) を用いた。速度の測定はパルス透過法で行ったが、発振パルスは約 1 MHz の矩形波である。

4. 実験結果

(1) 破壊状況

最終破断面の走向は載荷軸が H 軸と成す角 θ (Fig. 4) が $\pi/2 \pm \pi/12$ の範囲では grain 面内にあり、他の場合には rift 面内にあった。したがって載荷軸が異方性軸と斜交する場合にも最終破断面の走向は異方性軸により決定され、競合するクラック配向面と載荷軸の成す角の影響を受ける。クラック配向面の法線と載荷軸と成す角が約 $\pi/3$ 以下になると、クラック先端近傍の引張応力が低下するので³³⁾、このクラック集団の破壊挙動への寄与率は低下する。 θ が $\pi/3$ より小さいか $2\pi/3$ より大きい場合には dilatant crack (ダイラタンシーをもたらすクラック) は rift 面のものと grain 面のものが競合し、rift 面のクラックの影響が大きい。しかし θ が $\pi/2 \pm \pi/12$ の間では、rift 面のクラックは破壊に関与しなくなる。その結果 grain 面のクラックと hardway 面のクラックが競合するようになり、破壊面は grain 面のク

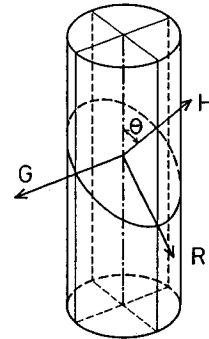


Fig. 4 A definition of the theta, the azimuth between the H-axis and the loading axis.

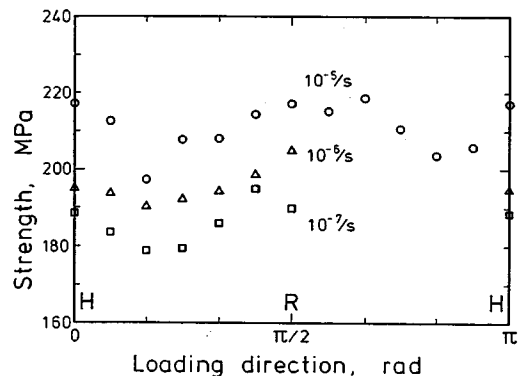


Fig. 5 Azimuthal variation of the uniaxial compressive strength. The effect of the strain rate is also shown.

ラックにより決定される。

(2) 強 度

一軸圧縮強度の方向依存性を Fig. 5 に示す。ひずみ速度が $10^{-5}/s$ の場合、载荷軸は grain 面内で一周しているが、 $\theta=0$ および $\pi/2$ に関してほぼ対称性が認められる。これは黒髪島花崗岩が直交異方性的性質を有することと矛盾しない。直交異方性的性質は薄片の観察および弾性波速度測定結果からも得られており、他の花崗岩でも同様の結果が得られている^{14),34)}。またいずれのひずみ速度においても、载荷軸と異方性軸が一致する場合に強度が極大値を示しており、 θ がほぼ $\pi/6$ で極小値を示す。この傾向は片理面の発達した岩石の強度特性^{12),35)}で認められた傾向と類似しており興味深い。同一ひずみ速度で試験した場合に得られた圧縮強度には最大値の 8~12% 程度の異方性があり、花崗岩で認められる引張強度の異方性^{14),16)}より小さい。このことは引張強度が材料の構造に敏感なのに対し、圧縮強度が比較的鈍感なためと考えられる。またひずみ速度が遅いほど強度は低下するが、载荷軸の傾きによる圧縮強度の変化状況はひずみ速度によらずほぼ一定である。応力腐食³⁶⁾によるクラックの伸長を考慮した理論⁹⁾によると、ひずみ速度以外の環境条件が一定の下で得られる圧縮強度 σ_{max} とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の間には、

$$\log(\sigma_{max}) \propto \log(\dot{\epsilon})/(n+1) \dots\dots\dots (1)$$

という関係が成立する。ただし n は応力腐食指数であり、応力腐食によるクラックの伸長速度と応力拡大係数の関係を決める物質定数である。Fig. 5 に示された結果は黒髪島花崗岩の n 値がほぼ 30 であること、および方向による差がほとんど認められないことを示している。これは従来の結果^{9),11)}と調和的である。

(3) ひずみおよび静的弾性率

試験時に得られた応力ひずみ曲線の例を Fig. 6 に示す。図は载荷軸が H 軸と一致する場合 ($\theta=0$) であり、応力~ひずみ曲線に及ぼすひずみ速度の影響が示されて

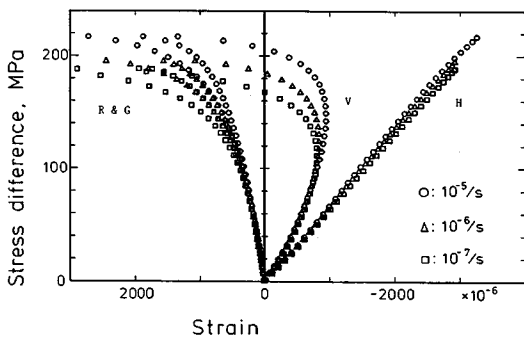


Fig. 6 The effect of the strain rate on the stress-strain relationship. The lower the strain rate, the larger the dilatancy at the same stress levels.

いる。縦ひずみは前述の方法で $\pi/2$ 間隔に貼られた 4 つのひずみゲージによる測定値の平均で、2 つの横ひずみはそれぞれ向かい合う 2 つのひずみゲージの平均値である。低応力域の応力ひずみ曲線はほぼ同一曲線上にあるが、荷重が高くなりダイラタンシーが認められるようになると、横ひずみは非線形となり、しかも 2 つの横ひずみに差が認められるようになる。また R 軸方向のひずみが G 軸方向より大きい。これはダイラタンシーに異方性があること、およびこの異方性がクラックなど岩石内部の微細構造に依存していることを示している。さらに既報⁹⁾で示されているように、ひずみ速度が遅くなるにつれて強度が減少するだけでなく、ダイラタンシー開始応力が減少し、同一応力レベルのダイラタンシー量が増加することがわかる。

ひずみ速度一定 ($10^{-5}/s$) で、载荷軸を G 軸の周りに回転させた場合の応力~ひずみ曲線を Fig. 7 に示す。応力ひずみ曲線は θ により顕著な異方性を示す。特に縦ひずみには大きな異方性が存在する。 $\theta=0$ (H 軸) の場合には载荷初期の非線形量が比較的小さく、 $\theta=\pi/2$ (R 軸) の場合には大きな非線形領域が生じる。载荷初期にはクラックの閉塞による非線形域が生じるが^{3),3),4)}、その程度は载荷軸がクラックの最も多い rift 面に垂直な場合に最も大きく、平行な場合に最小となる

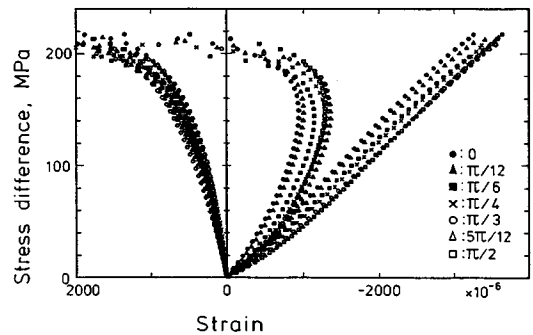


Fig. 7 Azimuthal variation of the stress-strain relationship with the change in the loading direction. The parameter theta defined in Fig. 4 is indicated.

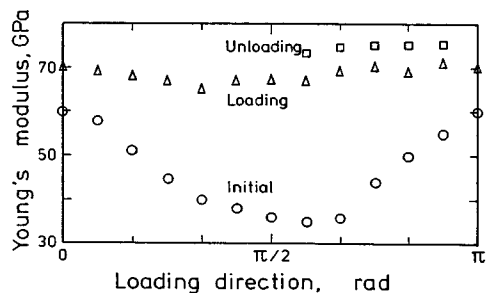


Fig. 8 Azimuthal variation of the Young's moduli defined by the initial, linear and unloading parts of the axial strain.

ためである。

荷重がさらに上昇すると縦ひずみには線形領域が認められたようになる。ここでは載荷初期に認められたような弾性率の著しい異方性は認められない。したがってクラックの閉塞により、岩石供試体の挙動がクラックを含まない本来の材料固有の値に近づくことがわかる。ここで載荷初期に定義される接線ヤング率、線形領域から求まる値、および除荷時に定義される値をそれぞれ Fig. 8 に示す。前述のように載荷初期のヤング率は小さく異方性が大きい。以下順に線形領域のヤング率、除荷時のヤング率となる。材料内にクラックが存在するとヤング率が低下し、開口型クラックは閉塞型クラックより大きな影響を及ぼす¹⁾。これは剛性率や体積弾性率も含めた弾性率について一般的に成り立つ。したがって多くのク

ラックが開口している載荷初期の弾性率が最も小さく、またその影響による異方性の程度も最も大きい。またこの弾性率の値は無載荷状態の弾性波速度から求めた弾性率³⁴⁾と調和的である。載荷に伴いクラック面に垂直な応力成分によりクラックは閉塞する。その結果、弾性率は増加し、異方性も小さくなる。したがって無載荷状態の弾性波速度から求めた動的弾性率が応力~ひずみ線図の直線部分から求めた静的弾性率より小さいことは十分あり得ることである。一方、線形領域でもクラック面でのすべり¹⁾や閉塞³⁷⁾は連続しているが、除荷時にはクラック面でのすべりが拘束されるため¹⁾、除荷時の弾性率が最も高く、構成鉱物から求まる弾性率に近い。

載荷軸を G 軸の周りに回転させた場合に得られた横ひずみ計測結果の 3 例を Fig. 9 に示す。θ=0 のときに

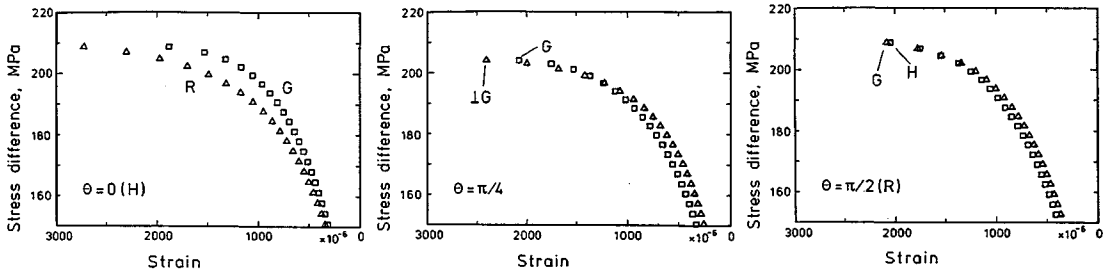


Fig. 9 Two linear strains normal to the loading axis are plotted against the stress difference. The dilatancy anisotropy associated with rock fabric can be seen.

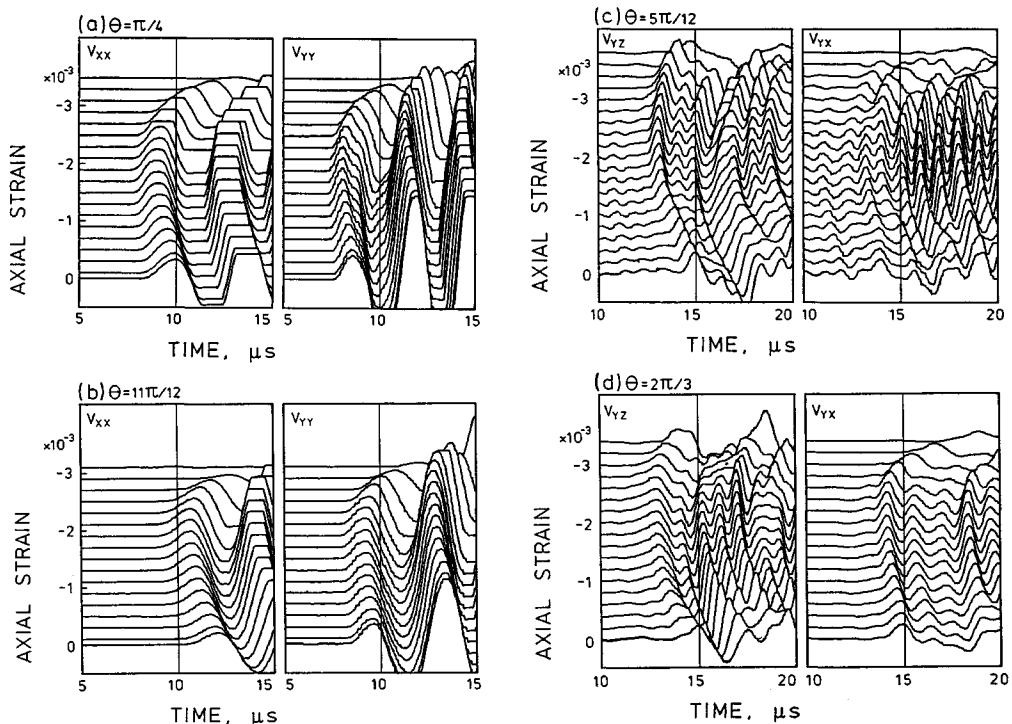


Fig. 10 Temporal change in the seismograms of various waves, V_{xx} , V_{yy} , V_{yz} and V_{yx} . Amplitude is in arbitrary unit.

は、十分高い応力状態の G 軸方向のひずみと R 軸方向のひずみの間に顕著な異方性が認められ、後者が大きい。すなわちダイラタンシーの異方性が認められる。θが増加するにつれて、G 軸方向のひずみとこれに垂直な横ひずみの差は減少し、θ=π/2 付近で大小関係は逆転する。したがって dilatant crack の生成方向は先在するクラックと関連した異方性があり、主破壊面の走向を決定する。

(4) 弾性波速度

平面配向するクラックを含む媒体内部を伝播する弾性波速度に関する理論によると^{30)~32), 38)}、クラックに垂直に進行する縦波の速度は大きな影響を受け、平行に進行する場合も少し影響される。横波は進行方向と振動方向が(異方性体ではほぼ)垂直なので、クラックに垂直に進行し平行に振動する場合、あるいは平行に進行し垂直に振動する場合に最も影響が大きく、その程度は等しい。平行に進行し平行に振動する場合はほとんど影響を受けない。

次に応力の増加に伴う弾性波受信波形の変化の 4 例を示す。θ=π/4 と 11π/12 で得られた V_p 計測結果、および θ=5π/12 と 2π/3 で得られた V_s 計測結果を示したものが Fig. 10 である (Fig. 3 参照)。先在クラックが閉塞すると弾性波の振幅や速度が増加するので、載荷初期の先在クラックの閉塞の程度と弾性波の進行方向や振動方向の関係によって受信波の振幅や速度の初期変化は大きく異なる。Fig. 10(a) および (b) の V_{xx} はそれぞれ rift 面に π/4 および 5π/12 傾斜しているが、V_{yy} は rift 面に平行である。したがって載荷初期の速度上昇は V_{xx} で大きく、V_{yy} はほとんど変化しない。V_s の進行方向は rift 面に平行である。振動方向は Fig. 10(c) および (d) の V_{yz} では rift 面とそれぞれ 5π/12 および π/3 をなしている。また V_{xx} の振動方向はそれぞれ rift 面と π/12 および π/6 をなしている。したがって Fig. 10(c), (d) の順に V_{yz} の速度上昇が大きく、V_p よりも激しい。一方 V_{xx} には初期変化がほとんど認められない。

荷重が増加しダイラタンシーが認められるようになると、すべての速度や振幅が減少する。V_{yy} と V_{xx} にもダイラタンシー異方性の効果が認められ、V_{xx} の速度低下は V_{yy} を上回る。しかし V_{xx} と V_{yz} にはいっそう顕著に異方性の効果が現われる。V_{xx} の低下は最終強度のほぼ 1/2 から開始し、破壊に向かって進行する。一方 V_{yz} の低下は最終破壊の直前に初めて生じる。これはダイラタンシー異方性が先在クラック面に支配されていることを示しており、主破壊面の観察や横ひずみから得られた結論を補強するものである。またダイラタンシー形成段階で生じるクラックの大部分が載荷軸にほぼ平行であることを示している。最終段階で V_{yz} も低下するが、こ

の段階に至って初めて載荷軸に斜交したクラックの生成が開始することを示しているものと考えられる。

5. 考 察

異方性岩石の強度は Griffith³³⁾型の理論により説明されることが多いようである³⁸⁾。開口クラックの場合 π/6 付近に強度の最小値があるなど、定性的には観測結果と一致している。しかし π/12 の強度と π/6 の強度は理論的に約 25% 異なるはずであるが、これは観測結果より大きい。この問題点はクラック分布が配向面に正確に一致せず、その前後にある程度ばらついていると仮定すれば回避できる。しかし Griffith 型の理論は基本的に最弱リンク説であり、単一のクラックが破壊を支配するという観点に立っている。一方圧縮応力下では破壊に先立ち多数の微小破壊が生じ、これらの集積によって最終破壊に至ることが明らかとなっているので、最弱リンク説から導かれる理論の適用には問題が残っている^{21), 4), 38)}。

Sano et al.⁹⁾は多数の微小破壊の発生により最終破壊に至る過程を考慮した岩石破壊のモデルを提案した。載荷軸とクラックの成す角によりクラック先端近傍の引張応力が異なることが強度に及ぼす効果はこの論文⁹⁾の式 (25), (26) 中の定数 A に含まれる。すなわち

$$\log(\sigma_{\max}) \propto -\log[f(\theta)]n/(n+1) \dots \dots \dots (2)$$

となる。ただし n は式 (1) と同様に応力腐食指数であり、一軸圧縮応力下での f(θ) は岩石内のクラックを貫通型楕円クラックとみなしたとき、開口型クラックでは

$$f(\theta) = \sin^2 \theta - \sin \theta$$

となり³³⁾、閉塞型クラックでは

$$f(\theta) = \sin \theta (\cos \theta - \mu \sin \theta)$$

となる³⁹⁾。ただし μ はクラック表面の摩擦係数である。Griffith 型の理論を適用したモデルでは強度は f(θ) に直接依存する。これと異なり式 (2) は多数の微小破壊が関与するため強度は f(θ) のべき乗に依存することが示されている。ただし n/(n+1) は 1 に近いので最弱リンク説による結果と大きな差はない。

異方性の主軸に斜交して強制的に振動させた場合には、横波は異方性の主軸方向に分極する^{40), 34)}。したがって先在クラック面と斜交した軸をもつ供試体で計測した横波 V_{xx} と V_{yz} は、軸に垂直にも平行にも一様に振動することはなく、異方性の主軸方向に分極し、さらにその結果生じた 2 つの波の速度が異なる。荷重の増加に伴い、無載荷状態の異方性をもたらしした先在クラックのうち載荷軸と大きく傾斜するクラックが閉塞し、前述のように載荷軸にほぼ平行な dilatant crack^{41), 21), 41)}が増加すると、新たにこのクラックによる異方性が生じる。その過程で異方性軸は回転し、1 つの異方性軸は載荷軸に平

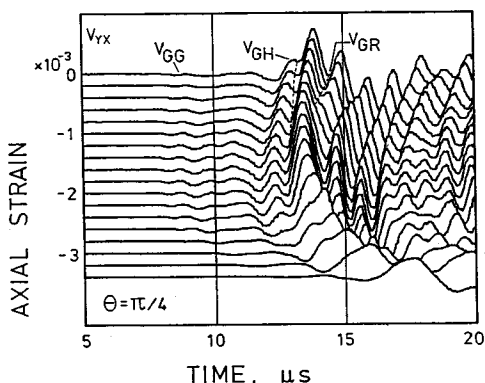


Fig. 11 An example of the splitting of the shear wave. Amplitude is in arbitrary unit.

行になるものと考えられる。これに伴い他の2つの主軸は載荷軸に垂直で、本来の異方性軸により決定されるダイラタンシー異方性の主軸^{(22), (24), (25)}と一致するように回転すると考えられる。Fig. 11に載荷軸と異方性軸が $\pi/4$ 斜交する場合に得られたSH波の波形を示す。振幅のきわめて小さいP波に続いてS波の到達を明瞭に認めることができるが、さらに注意深く観察するとこのS波に遅れて別のS波が到達していることがわかる。SV波およびSH波から得られた前者の速度はそれぞれ3176および3128 m/sであり、これは V_{GH} (G軸方向に進行し、H軸方向に振動するS波速度)と考えられる。また後者の速度は2858および2860 m/sであり、 V_{GR} (G軸方向に進行し、R軸方向に振動するS波速度)と考えられる。この2つのS波の到達点を包絡線で図中に示す。この現象は載荷軸と異方性軸が斜交する場合に入射した波動が異方性軸方向に分極することを示す証拠である。なおFig. 10(c)ではセンサーの分極方向と異方性軸がほぼ一致しているのでこのようなS波の分極は見出せないが、Fig. 10(d)にはわざわざみることができる。一般に V_s のこうした分極は載荷初期から中期にかけて顕著であるが、ダイラタンシーが顕著となるといずれか一方の V_s のみが卓越する傾向にある。このことは異方性の主軸が載荷軸方向に回転し、センサーの分極方向(載荷軸に平行および垂直)と岩石の異方性軸が一致するようになることを示している。

AEの発生はクラック閉塞領域を除いて新たなクラックの生成を意味しているが、ひずみ成分には弾性変形も含まれるので、測定量から dilatant crack に依存する成分を分離する必要がある。このためクラックの閉塞および弾性変形によるひずみ成分を計測された体積ひずみより差引き、新たに生成したクラックの寄与分と考えられるひずみを求めた。基本的には Brace ほかが行った方法^{(3), (4)}と同様であるが、具体的には Sano et al.^{(9), (42)}に

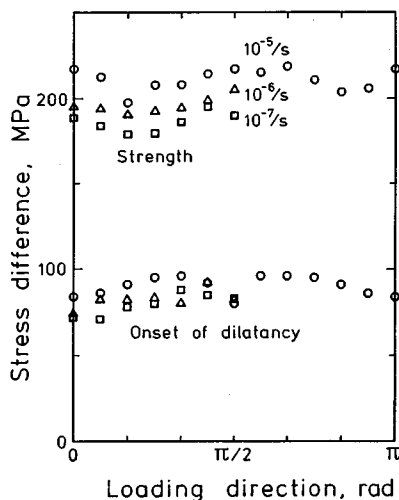


Fig. 12 Azimuthal variation of the stress of the onset of dilatancy.

従った。ダイラタンシー開始応力が載荷軸と異方性軸が成す角 θ により変化する様子を示すとFig. 12のとおりである。ダイラタンシー開始応力の変化は主軸に対してほぼ対称となっており、強度曲線とは若干異なった形状となっている。Griffith理論⁽³³⁾が最終強度ではなく、ダイラタンシー開始応力に適用されるべきであるとする説^{(3), (4)}に従えば、 $\pi/6$ 付近で最もダイラタンシー開始応力が低下するものと考えられるが、そのような傾向は認められていない。これは体積ひずみの線形部分が厳密に弾性的な挙動を示す領域ではなく、クラックの閉塞が連続しており⁽³⁷⁾、そのためダイラタンシー開始応力にある程度の誤差を生じさせるためと考える。

ダイラタンシーにより生じる体積ひずみの線形挙動からの逸脱の大きさを示す dilatant strain と AE との発生頻度の関係を示すとFig. 13のとおりである。これらにはほぼ線形関係が成立している。したがって微小破壊の発生と dilatant strain には直接的な関係が認められる。また dilatant strain に及ぼす微小破壊一個当たりの寄与

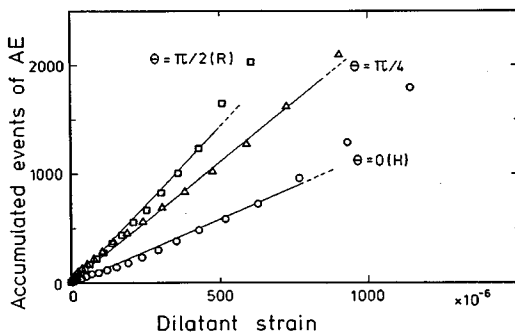


Fig. 13 Linear-relationship between dilatant strain and accumulated events of acoustic emissions is shown.

率 $\eta^{(6),9)}$ は Fig. 14 に示すように载荷軸の回転により系統的に変化しているが、これは先在クラックの配向面と载荷軸の成す角により dilatant crack の長さが変化するためと考えられる。さらにひずみ速度の低下に伴い η は増加する。これはひずみ速度の低下により微小破壊の大きさが拡大することを示しているが、あるいは AE を伴わない dilatant crack の拡大率が増加することを示しているとも考えられる。

Anderson et al.³⁰⁾ の解を用いて Soga et al.³¹⁾ は破壊の進行に伴い生じる dilatant crack による弾性波速度の変化を定量化した。その際、クラックの効果は弾性波速度測定方向に関してベクトル的に分解したクラック長さによるクラック密度を用いて示されている。本研究では弾性波速度がダイラタンシーの主軸方向に測定されているので dilatant crack によるクラック密度を直接求めることが可能である。また dilatant strain と比較することにより、クラックのアスペクト比 (クラックを楕円で近似したときの短径/長径) が決定される³¹⁾。4 つの独立な波の速度をもとに求めた各主軸方向のクラック密度 ϵ の計算結果の一例を Fig. 15 に示す。 ϵ_z の低下は载荷初期に著しく後期段階まで進行する。 x -軸はクラック配向面と斜交しているが、 y -軸はクラック配向面と平行である。したがって ϵ_x はクラックの閉塞により载荷初期に低下するが、ダイラタンシー開始以後の増加量は ϵ_y を上回っており、主破壊面の走向、横ひずみの異方性および弾性波速度の異方性からの結論と同様の異方性が認められる。すなわち x -軸に垂直な dilatant crack がより多く発生し、ダイラタンシー異方性をもたらす。

地殻内部では岩石に封圧成分が作用するので先在クラックの多くは閉塞する。そのため地下深部では異方性の程度が低下するものと考えられる。大島花崗岩の異方性軸方向のひずみの静水圧下の挙動を計測した例を Fig. 16 に示す。これは花崗岩の一般的な挙動であり³⁾、弾性波速度でも同様の結果が得られている²⁰⁾。この結果は被り圧が 100 MPa、深さが 4000 m 以上で多くの花崗岩が等方性的性質を示すようになることを示しており、逆に工学的に対象となる深さでは異方性が存在することを示している。ただしこのような深さに存在する岩石にもクラックが存在するか否かはクラックの成因ともかかわっており、現時点では不明である。

これまで示された結果は花崗岩質岩石で共通の現象と考えられるが、すべての岩石に共通のものとはいえない。大部分の岩石は厳密にみれば異方性を有するが、等方性仮定に基づく誤差がそれほど大きくない場合も多い。またここで議論された異方性の効果は異方性をもたらす構造すなわちクラックと比較して十分大きなものの変形・破壊機構であり、岩盤や地殻内のジョイントや断

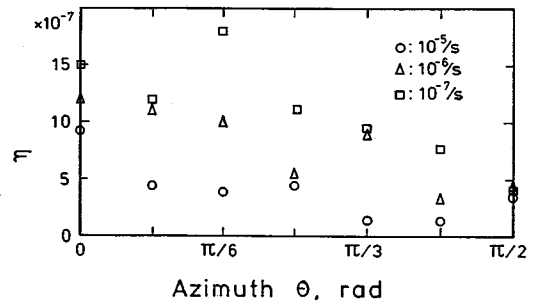


Fig. 14 Azimuthal variation of the eta, the ratio of the dilatant strain to the number of acoustic emissions. The eta increases with the decrease in the theta or the strain rate.

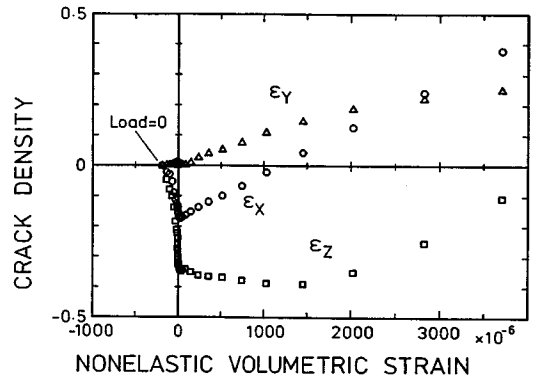


Fig. 15 Crack density parameters of three orthogonal directions were calculated with four independent velocities. Many cracks normal to the Z-axis closed during the early stage of the test, and continued to close until the final faulting was approached. The dilatant cracks normal to the X-axis are more than those normal to the Y-axis.

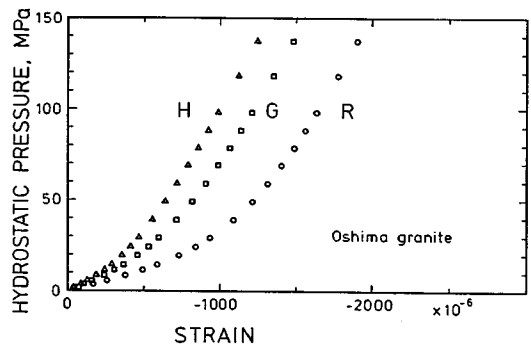


Fig. 16 Three linear strains under hydrostatic pressure for Oshima granite. A large anisotropy disappeared at relatively high pressure.

層構造が異方性をもつ場合にもその構造と比較して十分大きな領域を対象とする場合には類似性が考えられる。

6. 結 論

黒髪島花崗岩を用いて一軸圧縮応力下の花崗岩の変形、破壊挙動について検討を行った。使用した岩石のクラックの発達程度は日本の花崗岩の中で一般的なものであり、岩石の力学的性質が岩石中に選択的に配向して存在する偏平な先在クラックに支配されることを示している。すなわち強度、ひずみ、ヤング率あるいは弾性波速度など、岩石の変形・破壊挙動や弾性的性質は異方性の主軸と載荷軸あるいは測定軸のなす角度に大きく依存する。圧縮試験で定義される3種のヤング率のうち、載荷直後に定義されるヤング率は方向により大きく異なる。またこれは載荷軸と異方性の主軸が一致するときに極値となり、その値は無載荷状態の弾性波速度から求められるヤング率に近い。一方、除荷時に定義されるヤング率は方向にほぼ無関係であり、最も高い。応力-ひずみ線図の線形部分により定義されるヤング率は方向によりわずかに変化するだけで、その値は除荷時のヤング率よりわずかに低い。これらの違いは等方性岩石と同様にクラックの閉塞やすべりにより説明するべきである。弾性波速度は異方性軸方向に極値をもつ。ただし本研究では触れられていないが、これが最大値でも最小値でもない場合があり得る⁴³⁾ことに注意する必要がある。強度は異方性軸方向だけでなく、より多くの先在クラックが存在する面と載荷軸の成す角がほぼ $\pi/6$ の場合にも極値をもつ。ひずみの測定結果および異方性を配慮して設定された4種の波(2つの縦波および2つの横波)の速度の変化は、先在クラックの閉塞がかなり高い応力状態まで続くこと、ダイラタンシー領域で生じるクラックの密度に異方性があり、先在クラックの異方性により支配されていることを示している。また上記の4種の弾性波の受信波形の変化は異方性軸が主応力軸と斜交する場合に載荷の過程で異方性軸が回転することを示している。すなわち載荷初期の異方性は先在クラックにより支配されているが、載荷の過程で載荷軸と大きく斜交する偏平なクラックが閉塞し、さらにダイラタンシーが顕著になると、ダイラタンシーをもたらすクラックにより新たな異方性軸が決定される。したがってこの間に異方性軸の回転が生じ、1つの主軸が載荷軸と平行に、他の2つの主軸がダイラタンシー異方性の主軸となると考えられる。最終破断面の走向は異方性軸と載荷軸の角度 θ により決定されるが、この角度 θ がある範囲内では破壊面の走向は一定であり、この範囲を逸脱すると突然 $\pi/2$ 回転する。このように異方性岩石の変形・破壊挙動はきわめて複雑であるが、一方、先在クラックの閉塞に始まり、載荷に伴う微小クラックの安定成長、微小破壊の開始とその集積、およびダイラタンシーの局所化に伴う最終的

な破壊という過程には異方性による本質的な差はない。

謝 辞：黒髪石材株式会社には原石の採取や円盤への加工に際して多大なご援助を頂いた。また薄片の観察に際しては、広島大学名誉教授 小島丈児先生のご指導をお願いした。ここに記して謝辞としたい。

参 考 文 献

- 1) Walsh, J.B. : The effect of cracks on the uniaxial compression of rocks, *J. Geophys. Res.*, Vol.70, pp.399~411, 1965.
- 2) Walsh, J.B. : The effect of cracks in rocks on Poisson's ratio, *J. Geophys. Res.*, Vol.70, pp.5249~5257, 1965.
- 3) Brace, W.F. : Brittle fracture of rocks, In : W.R. Judd (ed.), *State of stress in the earth's crust*, Elsevier, pp.111~174, 1964.
- 4) Brace, W.F. ; Paulding, B.W., Jr. and Scholz, C.H. : Dilatancy in the fracture of crystalline rocks, *J. Geophys. Res.*, Vol.71, pp.3939~3953, 1966.
- 5) Mogi, K. : Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Tokyo Univ., Vol.40, pp.125~173, 1962.
- 6) Scholz, C.H. : Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression, *J. Geophys. Res.*, Vol.73, pp.1417~1432, 1968.
- 7) Scholz, C.H. : Mechanism of creep in brittle rock, *J. Geophys. Res.*, Vol.73, pp.3295~3302, 1968.
- 8) Nur, A. and Simmons, G. : The effect of saturation on velocity in low porosity rocks, *Earth Planetary Sci. Let.*, Vol.7, pp.183~193, 1969.
- 9) Sano, O., Ito, I. and Terada, M. : Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, *J. Geophys. Res.*, Vol.86, pp.9299~9311, 1981.
- 10) Lo, T.-W., Coyner, K.B. and Toksöz, M.N. : Experimental determination of elastic anisotropy of Berea sandstone, Chicopee shale, and Chelmsford granite, *Geophysics*, Vol.51, pp.164~171, 1986.
- 11) 佐野 修 : ダブルトーション法による岩石内のクラック進展現象の異方性に関する実験的研究, *材料*, Vol.37-413, pp.152~158, 1988.
- 12) Donath, F.A. : Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock, In : W.R. Judd (ed.) *State of stress in the earth's crust*, Elsevier, pp.281~297, 1964.
- 13) Douglass, P.M. and Voigt, B. : Anisotropy of granites, *Geotéchnique*, Vol.19, pp.376~398, 1969.
- 14) Peng, S.S. and Johnson, A.M. : Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.9, pp.37~86, 1972.
- 15) Simmons, G., Todd, T. and Baldrige, W.S. : Toward a quantitative relationship between elastic prop-

- erties and cracks in low porosity rocks, *Amer. J. Sci.*, Vol. 275, pp. 318~345, 1975.
- 16) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二：花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布, *土木学会論文集*, Vol. 370/Ⅲ-5, pp. 189~198, 1986.
 - 17) Osborne, F. : Rift, grain, and hardway in some Pre-Cambrian granites, Quebec, *Econ. Geol.*, Vol. 30, pp. 540~551, 1935.
 - 18) Bell, J. F. : The investigation of the cleavage of granites, *Econ. Geol.*, Vol. 31, pp. 272~277, 1936.
 - 19) McWilliams, J. R. : The role of microstructure in the physical properties of rock, In : *Testing techniques for rock mechanics*, ASTM., STP 402, pp. 175~189, 1966.
 - 20) Todd, T., Richter, D. A. and Simmons, G. : Unique characterization of lunar samples by physical properties, *Proc. 4th Lunar Sci. Conf.*, Vol. 3, pp. 2639~2662, 1973.
 - 21) Matsushima, S. : On the flow and fracture of igneous rocks and on the deformation and fracture of granite under high confining pressure, *Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Bull.*, 20 pp., 1960.
 - 22) Hadley, K. : Azimuthal variation of dilatancy, *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, pp. 4845~4850, 1975.
 - 23) Sobolev, G., Spetzler, H. and Salov, B. : Precursors to failure in rocks while undergoing anelastic deformations, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, pp. 1775~1784, 1978.
 - 24) Scholz, C. H. and Koczyński, T. : Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, pp. 5525~5534, 1979.
 - 25) 柳谷 俊・西山 哲・寺田 孚：花崗岩のダイレイタンスー異方性について, *土木学会論文集*, Vol. 382/Ⅲ-7, pp. 63~72, 1987.
 - 26) 佐野 修・工藤洋三・古川浩平・中川浩二：岩石の一軸圧縮強度実験結果のばらつきに関する研究, *土木学会論文集*, Vol. 388/Ⅲ-8, pp. 141~150, 1987.
 - 27) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二：石工の経験則と花崗岩の力学的性質, *土と基礎*, Vol. 34, pp. 47~51, 1986.
 - 28) Dale, T. N. : The commercial granites of New England, *Bull. U.S. Geol. Surv.*, Vol. 738, 438 pp., 1923.
 - 29) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二：瀬戸内花崗岩の採石場における花崗岩質岩石の異方性, *土木学会論文集*, Vol. 382/Ⅲ-7, pp. 45~53, 1987.
 - 30) Anderson, D. L., Minster, B. and Cole, D. : The effect of oriented cracks on seismic velocities, *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, pp. 4011~4015, 1974.
 - 31) Soga, N., Mizutani, H., Spetzler, H. and Martin, R. J., III : The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, pp. 4451~4458, 1978.
 - 32) Nishizawa, O. : Seismic velocity anisotropy in a medium containing oriented cracks, *J. Phys. Earth*, Vol. 30, pp. 331~347, 1982.
 - 33) Griffith, A. A. : The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. R. Soc.*, A 221, pp. 163~198, 1920.
 - 34) 佐野 修：応力腐食による岩石内のクラック伸長現象の異方性に関する理論的考察, *材料*, Vol. 37-413, pp. 159~165, 1988.
 - 35) McLamore, R. and Grey, K. E. : The mechanical behaviour of anisotropic sedimentary rocks, *J. Eng. Ind.*, Vol. 89, pp. 62~73, 1967.
 - 36) Anderson, O. L. and Grew, P. C. : Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 15, pp. 77~104, 1979.
 - 37) Lockner, D. A., Walsh, J. B. and Byerlee, J. D. : Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, pp. 5374~5378, 1977.
 - 38) Paterson, M. S. (荻野正二ほか訳)：実験岩石力学, 古今書院, 242 pp., 1986.
 - 39) McLintock, F. A. and Walsh, J. B. : Friction on Griffith cracks in rocks under pressure, In : *Proc. 4th U.S. Nat. Congr. Appl. Mech.*, Vol. 2, pp. 1015~1021, 1962.
 - 40) Musgrave, M. J. P. : *Crystal Acoustics*, Holden-Day, 288 pp., 1970.
 - 41) Kranz, R. L. : Microcracks : A review, *Tectonophysics*, Vol. 100, pp. 449~480, 1983.
 - 42) Sano, O., Ehara, S. and Terada, M. : A study on the time-dependent microfracturing and strength of Oshima granite, *Tectonophysics*, Vol. 84, pp. 343~362, 1982.
 - 43) 佐野 修・工藤洋三・河嶋 智・水田義明：異方性体としての花崗岩の弾性率に関する実験的研究, *材料*, Vol. 37-418, pp. 818~824, 1988.

(1988. 3. 10・受付)