

## 花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布

## RELATION BETWEEN PHYSICAL ANISOTROPY AND MICROSTRUCTURE OF GRANITE

工藤洋三\*・橋本堅一\*\*・佐野 修\*\*\*・中川浩二\*\*\*\*

By Yozo KUDO, Ken-ichi HASHIMOTO, Osam SANO and Koji NAKAGAWA

Granite contains many small defects which are preferentially oriented along three mutually perpendicular planes. These defects affect the physical properties, of the granite, e.g. P wave velocity, compressive strength, tensile strength.

In this study, we are reporting the relation between the physical anisotropy and the microstructure of granite. Oshima granite was chosen for this test. P wave velocity was measured in diametric directions at 15° intervals. The diametric compression test was performed under the same condition. Three thin sections were cut (one parallel to the rift plane, one parallel to the grain plane and one other parallel to the hardway plane) to check the preferred orientation of small defects.

There was a strong correlation between the strength anisotropy, the preferred orientations of open microcracks in quartz and P wave anisotropy and there was also a correlation between the tensile strength anisotropy and the healed microcracks in feldspar.

## 1. 緒 言

わが国においては花崗岩は広く分布しており、堅硬かつ安定な岩盤として知られている。そのため、たとえば原油やLPGの地下備蓄のための候補地として挙げられているものには、岩盤区分が花崗岩類となっているものが圧倒的に多く、また種々の岩盤構造物が花崗岩中に建設されることは、むしろ好ましいこととされている。このような事情により、花崗岩が土木工学的な立場から岩盤、岩石試験の対象とされる機会は特に多い。その場合一般に、堅硬な花崗岩は岩盤分類上硬岩として扱われ、岩石試験においては等方性材料として処理される。しかしながら、花崗岩の力学的な試験を行う場合、たとえ新鮮な岩石を用いても、一般に、強度、ひずみ、AE特性、弾性係数などの物理量のほとんどに異方性が認められる。

たとえば、Birch<sup>1),2)</sup>は静水圧試験時における圧力の増加に伴う弾性波伝播速度や、圧縮率の異方性の減少などから、花崗岩内に微小クラックが存在し、そのクラック

が選択的な配向性を有することを述べている。また強度の面から花崗岩の異方性を取り扱ったものとして、古くはOsborne<sup>3)</sup>の研究があり、圧縮強度の異方性が先在するクラックの選択的配向性から説明されている。さらに、McWilliams<sup>4)</sup>は、さまざまな方向の弾性波伝播速度試験と圧裂試験とを行っており、縦波伝播速度と圧裂強度の間に正の相関が存在すること、それらの値が極値をとる面に、point load testによる選択的な破壊面が形成されることを述べている。さらにDouglass<sup>5)</sup>らやPeng<sup>6)</sup>らは、クラックが卓越して配向する面を考慮して花崗岩の圧縮荷重下の変形挙動を追跡しており、その際認められた花崗岩の変形、破壊挙動に非線形性や異方性をもたらす原因を、クラックの選択的配向性に求めている。一方Pengらは、同様な考え方に基づいた圧裂試験により花崗岩の引張強度の方向依存性を、比較的密な間隔で測定した結果を報告している。また、一方向に配向したクラックを有する供試体内の弾性波伝播速度の異方性に関する理論的な研究も数多くみられる<sup>7),8)</sup>。

このように、花崗岩の異方性とその原因としてのクラックの選択的な配向性については広く認められている。しかしながらこれら花崗岩の力学的性質の中でも特に引張強度（圧裂強度試験結果）については理論的解釈を行うほどのものが得られていない。たとえばPengら

\* 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助教授  
(〒745 徳山市久米高城 3538)

\*\* 正会員 徳山工業高等専門学校助手(同上)

\*\*\* 工博 山口大学工学部助手

\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学工学部教授

の圧裂強度試験結果については、データの変動が大きくかつ測定範囲が限定されている。そのため、圧裂強度の異方性の現われ方に対する解釈などが推測の域を大きく出ていないように思われる。

今後岩盤構造物がより一般化し、巨大化していくことを考えるとき、設計などの基礎的資料として対象岩盤についてより正確な情報が必要となる。また最近、岩盤、岩石内の欠陥とこれらの巨視的な挙動を関連づけるための研究が、クラックテンソルの概念<sup>9)</sup>や damage mechanics の概念<sup>10)</sup>を導入することにより幅広く行われている。このことと関連して、実在の代表的な岩石の一種である花崗岩が実際どのような内部欠陥を有し、どのような力学的特性を有するかをより詳しく検討することは、これらの研究の今後の発展とも関連して大いに有意義なことと思われる。

本研究において著者らは、大島花崗岩を例にとり、圧裂強度と縦波伝播速度とを実験的に精度よく求めることにより、圧裂強度と縦波伝播速度の三次元的な異方性を検討した。そして花崗岩内の微小な欠陥の観察結果の助けを借りつつ、両者の異方性の関連についてより詳しい検討を行いその結果を報告した。

## 2. 石目と試料

花崗岩採石場では、採石の際に一般に石目とよばれる割れやすい面が利用される。この場合、「割れやすい」ということばの中には、より小さな外力で破断させることができるということ、破断面の形状に平面性が高いという意味が併せてこめられている。わが国の採石場では、一般に、加工の際に最も割れやすい面を「目」、これとほぼ直交する二番目に割れやすい面を「二番の目」、両者に直交する割れにくい面を「シワ」などと称している。海外にも同様の呼称があり、英語では、一般に割れやすい順に、rift plane, grain plane, hardway plane とよばれている。以下の議論においては、この分類に従うこととする。

本研究で用いた岩石は、愛媛県伊予大島産の比較的細粒（平均結晶粒径 2 mm 程度）の花崗岩である。この岩

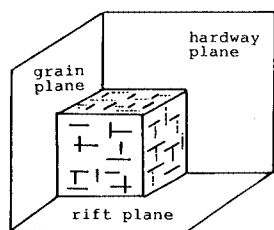


Fig. 1 Diagram of the orthogonal rift, grain, and hardway planes.

石は領家花崗岩類に属し、岩石学上の分類からすれば角閃石黒雲母花崗閃緑岩の範ちゅうに属するが、一般に大島花崗岩と称されているので、本研究ではこの呼称に従う。この花崗岩の採取地においては、rift plane は  $N 65^{\circ}E 14^{\circ}N$  でほぼ水平に近く、grain plane は  $EW 85^{\circ}S$  でほぼ鉛直面、hardway plane はこれら 2 つの面に直交するほぼ鉛直面である。以下の議論における方位角の原点は、すべてこれら採石場における経験則によるものである。試料採取用のブロックは、この石目に従って忠実に切り出したものを用いておりほぼ正確な矩形形状をしている。今この石目の状況を図示したものが Fig. 1 である。以下 rift plane, grain plane, hardway plane をそれぞれ、R, G, H 面、それに垂直な軸を R, G, H 軸とよぶことにする。

## 3. 大島花崗岩の力学的異方性の計測

### (1) 縦波伝播速度： $V_p$

岩石内を伝播する弾性波速度は、非破壊的に、しかも比較的容易に測定できる。そのため、この弾性波伝播速度は岩石の力学的性質や内部構造などを推定する場合にしばしば利用されている。本研究では、まず縦波伝播速度（以下  $V_p$  と略）をパルス透過法により測定し、花崗岩の内部構造に関する情報を得ることとする。

$V_p$  を測定するためまず発信器より継続時間  $1 \mu s$  の矩形パルスを発信用の圧電振動子に送る。発信されたパルスは供試体を透過した後、受信用振動子で受信され、プリアンプにより増幅された後、トランジェントレコーダーに記録され、透過に要する時間から速度が求められる。振動子の共振周波数は約 1 MHz で、プリアンプは DC ~ 2 MHz を  $\pm 1$  dB で 60 dB 増幅可能である。トランジェントレコーダーのサンプリング間隔は 50 ns を採用している。供試体は円柱状でありその直径は約 48 mm である。測定はすべて気乾状態でやっている。

Fig. 2 に、発振矩形波形とそれぞれの石目である R, G,

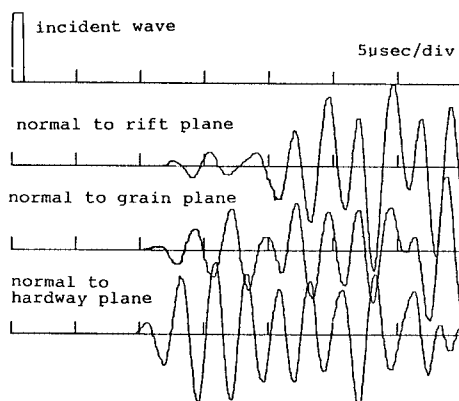


Fig. 2 P wave variations propagating in Oshima granite.

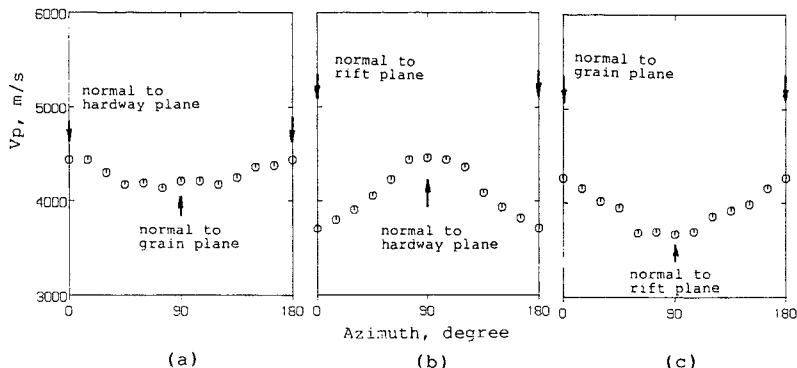


Fig. 3 P wave velocity for Oshima granite obtained from three mutually perpendicular cores.

H 面に対して垂直（それぞれ R, G, H 軸方向）に進行するパルスの受信波形を示す。発振振動子に加えられる電気パルスは単一の矩形パルスであるが振動子の自由振動などにより伝達、受信される波形は図にみられるようなものになっている。これによると、R 軸方向に進行したパルスの受信波形は比較的振幅も小さく、また波動の到達時間も他と比較して遅くなっている。これに対して H 軸方向に進行するパルスの受信波形は一般に振幅も大きく、波動の到達時間も他のものと比較すると早い。このことから、無載荷状態において、岩石内部にすでにクラックが存在し、しかもそのクラックが石目の方向に選択的な配向性を有することが考えられる。ここで、 $V_p$  の特性について詳しく検討するために、R, G, H それぞれの軸を供試体軸とする供試体を、軸回りに  $15^\circ$  の間隔ごとに回転させながら R 面、G 面、H 面内で測定した  $V_p$  を示したものが Fig. 3 である。ここで、それぞれの測定の基準となる  $0^\circ$  の方向は R 面、G 面、H 面のそれぞれの測定において、H 軸、R 軸、G 軸の方向をそれぞれとっている (Fig. 4 参照)。測定結果によると、R 面内および G 面内において H 軸方向に進行するパルスの  $V_p$  は、Fig. 3 (a) の  $0^\circ$  および Fig. 4 (b) の  $90^\circ$  で与えられ、いずれも約  $4400 \text{ m/s}$  でありほぼ同じ値となっている。また R 面内および H 面内における G 軸方向の  $V_p$  は、それぞれの図で  $90^\circ$  と  $0^\circ$  で与えられ、さら

に G 面内および H 面内における R 軸方向の  $V_p$  は、それぞれの図で  $0^\circ$  および  $90^\circ$  で与えられている。いまこれを三次元的に図示したものが Fig. 4 である。図は  $V_p$  が  $3000 \text{ m/s}$  の場合を原点としてこれと測定された  $V_p$  との差を放射方向に展開したものである。Fig. 3 および Fig. 4 より、大島花崗岩内を伝播する縦波伝播速度はほぼ直交異方性状であることが推察される。

(2) 圧裂引張強度:  $\sigma_t$

岩石やコンクリートなどの引張強度を求める方法として、供試体作成の容易さや試験方法の簡便さから圧裂試験法が多用される。異方性岩石を用いて圧裂試験を行う場合、実験結果の解釈に等方弾性解を用いることには問題がある。しかし一般に弾性定数が極端な値をとらないかぎりその差は小さいことが知られている<sup>11), 12)</sup>。そこで本研究では、通常の圧裂試験法と慣用式によりその引張強度を考えるものとする。先の  $V_p$  の計測に対応して圧裂強度 (以下  $\sigma_t$ ) の異方性を実験的に求めた。供試体の直径は約  $42 \text{ mm}$  であり、供試体長は約  $21 \text{ mm}$  である。本実験では、特に精度のよい圧裂試験を行うことを考慮しており、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  $2/100 \text{ mm}$  以内であり、また端面の平面度のばらつきは  $5/100 \text{ mm}$  以内としている。圧裂試験装置の概略を Fig. 5 に示す。これは、偏心荷重による曲げ応力の発生を防止し、かつ荷重の作用方向が圧裂予定面内にあるように工夫したものである。用いた圧縮試験機は、東京試験機製  $50 \text{ t}$  万能試験機であ

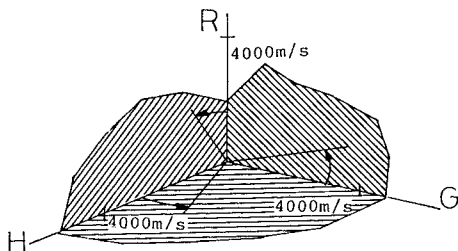


Fig. 4 Three-dimensional  $V_p$  variation of Oshima granite. Center of the diagram indicates  $3000 \text{ m/s}$ .

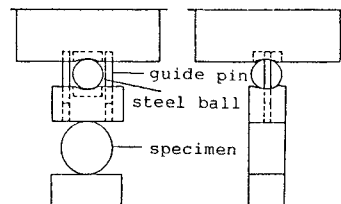


Fig. 5 Schematic diagram of diametric compression test.

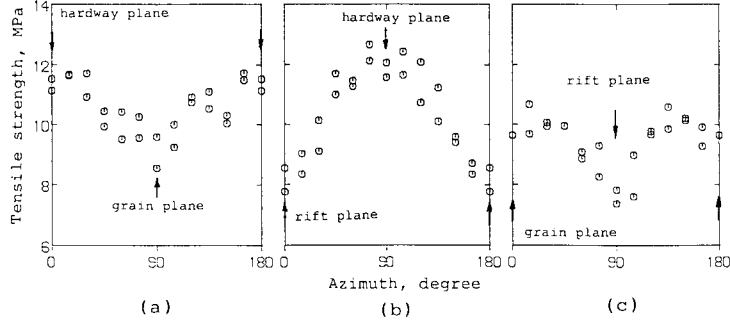


Fig. 6  $\sigma_t$  anisotropy of Oshima granite. (a) Disks with flat surface parallel to rift plane. (b) Disks with surface parallel to grain plane. (c) Disks with surface parallel to hardway plane.

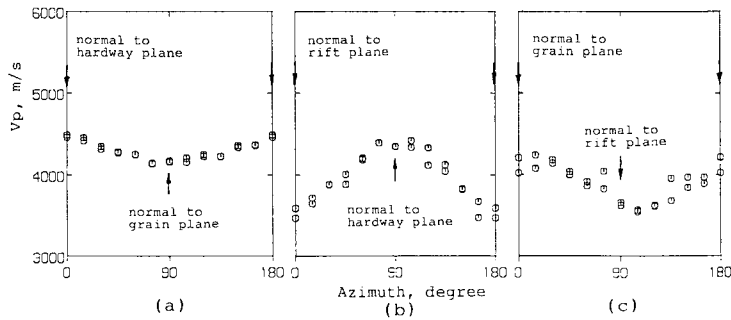


Fig. 7  $V_p$  anisotropy of Oshima granite obtained from the cores of diametric compression test. (a) Disks with flat surface parallel to rift plane. (b) Disks with surface parallel to grain plane. (c) Disks with surface parallel to hardway plane.

り、載荷速度は約 50 kPa/s である。供試体軸が G 軸と一致する供試体 10 個について圧裂面を H 面と一致させて行った予備実験結果によると、得られた圧裂強度の変動係数は 3.0% であった。花崗岩の圧裂試験結果のばらつきについては、材料固有のばらつきによるものと実験技術上のばらつきによるものが考えられ、その区別は必ずしも容易ではない。しかし本予備実験の精度はこれまでに報告されている多くの実験精度を上回るものであり<sup>13)</sup>、実験結果は十分に信頼し得るものと考えられる。このことより本実験において供試体数は各試験条件についてそれぞれ 2 個とした。

圧裂強度の計測は、R、G および H 軸を軸とする供試体について供試体軸を含む 15° 間隔の面内で行っている。したがって供試体数は R、G および H 軸を供試体軸とするものをそれぞれ 24 個作製している。圧裂面の決定は、先の  $V_p$  の測定の場合に従っている。すなわち、たとえば R 軸を軸とする供試体については、H 面での圧裂試験を 0° とし、15° 間隔に圧裂面を設定した (G 面が 90° となる)。圧裂試験に先立ち圧裂面に垂直な方向 (H 面の圧裂試験に対しては H 軸方向) の  $V_p$  を先と同じ方法で計測している。これは供試体ごとの  $V_p$  のばら

つきについての検討を行うためである。

実験によって得られた各軸を含む供試体の 15° 間隔での圧裂試験結果とそれに対する圧裂面に垂直な方向の  $V_p$  を Fig. 6, Fig. 7 に示す。ここで Fig. 3 の値が各図でそれぞれ同一の供試体の各方向の  $V_p$  を計測したものであるのに対して、Fig. 6 は、すべて異なる供試体に対する計測値によるものである。これらの図により一致がみられることは、ここで用いた供試体材料が少なくとも  $V_p$  からみるかぎりよい再現性を有することを意味するといえよう。Fig. 7 によると、R 面の圧裂強度は G 軸を軸とする供試体を圧裂する場合に 8.1 MPa、H 軸を軸とする供試体を圧裂する場合が 7.6 MPa とかなり近い値を示している。同様に、G 面を圧裂するものは 9.2 MPa と 9.6 MPa、H 面では 11.4 MPa と 11.8 MPa と供試体軸が異なってもいずれも近い値となっている。

石目に対応する面内での圧裂に関するかぎり、R 面を圧裂する場合が最も小さな値となり、次に G 面、そして最大が H 面の順となっている。R 面の圧裂強度は測定されたすべての面内で最小値を示しているが、H 面の圧裂強度は最大とならず、最大圧裂強度は H 面からわずかに離れた面に生じている。

これらを先の Fig. 4 と同様に三次元的に示したものが Fig. 8 である。ここでは、原点の圧裂強度を 4 MPa として異方性を強調して示している。σ<sub>t</sub> についてもその状況は直交異方性状であり、石目に垂直な方向を軸とする回転楕円体を変形させたものとして予想される。

4. V<sub>p</sub> と σ<sub>t</sub> の比較と検討

縦波伝播速度 V<sub>p</sub> および圧裂強度 σ<sub>t</sub> の異方性に関する比較検討を Fig. 3 (あるいは Fig. 7) と Fig. 6 ならびに Fig. 4 と Fig. 8 について行う。Fig. 3 と Fig. 6 とを比較するとそれぞれの軸をもつ供試体の V<sub>p</sub> と σ<sub>t</sub> とは、おおまかにみて周期 180° の調和振動をしているかのようであり、両者には、かなりのよい相関がみられる。ここで Fig. 7 の V<sub>p</sub> に比べて Fig. 6 の σ<sub>t</sub> のばらつきがいくらか大きくなっているが、本来 V<sub>p</sub> が材料内の欠陥に関して構造鈍感な量であるのに比べて σ<sub>t</sub> が構造敏感な量であることからこの差は説明されよう。Fig. 4 と Fig. 8 とを比較すると、それぞれの異方性の状況は、ともに石目に垂直な方向を軸とする直交異方性状であり、回転楕円体を若干変形したもので表わされるようである。

計測結果を詳しく調べると、G 面内で計測された V<sub>p</sub> は H 軸方向 (90°) で最大とはならず、わずかに隣接部と比べて低くなっており、H 面内での G 軸方向 (0° あるいは 180°) でも同様の傾向がみられる。さらに σ<sub>t</sub> は、それぞれの軸を有する供試体において、R、G および H のそれぞれの面の圧裂強度が隣接部と比べて明確に低くなるのが認められる。これは、それぞれの面内にクラックなどの欠陥が選択的に配向していることを意味していると考えられる。

ここで、V<sub>p</sub> と σ<sub>t</sub> の異方性の程度を表わす量としてそれぞれ、異方性率 (V<sub>pmax</sub> - V<sub>pmin</sub>) / V<sub>pmax</sub> = R<sub>vp</sub> および (σ<sub>tmax</sub> - σ<sub>tmin</sub>) / σ<sub>tmax</sub> = R<sub>st</sub> を定義して、R、G、および H 軸を軸とする供試体を異なった方向に測定した場合の V<sub>p</sub> と σ<sub>t</sub> の最大値、最小値、平均値、および異方性率を Table 1 に示す。σ<sub>t</sub> の異方性率は G 軸を軸とする供試体内で最も大きく、R 軸を軸とする供試体内で最小となる。さらに各軸を含む供試体での σ<sub>t</sub> の平均値は、それ

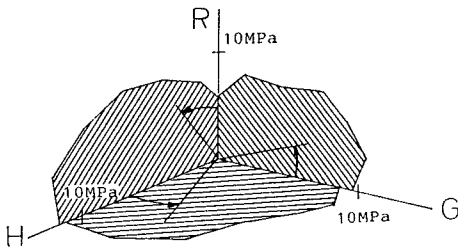


Fig. 8 Three dimensional σ<sub>t</sub> variation of Oshima granite. Center of the diagram indicates 4 MPa.

Table 1 V<sub>p</sub> and σ<sub>t</sub> anisotropy of Oshima granite.

	V <sub>pmax</sub> (m/s)	V <sub>pmin</sub> (m/s)	R <sub>vp</sub> (%)	V <sub>pave</sub> (m/s)	σ <sub>tmax</sub> (MPa)	σ <sub>tmin</sub> (MPa)	R <sub>st</sub> (%)	σ <sub>tave</sub> (MPa)
Rift	4470	4140	7.4	4290	11.7	9.1	22.2	10.5
Grain	4370	3530	19.2	4010	12.4	8.1	34.7	10.5
Hardway	4160	3560	14.4	3900	10.2	7.6	25.5	9.4

ぞれの面の σ<sub>t</sub> とは逆に R 軸、G 軸、H 軸を軸とするものの順に大きい。すなわち、R 軸を軸とする供試体の場合は、石目として G 面と H 面のみが圧裂面に存在するためにクラックの影響が比較的小さい。これに比べて、H 軸を軸とする供試体の場合は石目として R 面と G 面が圧裂面に存在するために相対的な平均強度低下がみられるものと考えられる。Table 1 より計測されたすべての面内での σ<sub>t</sub> の異方性率を求めてみると約 39 % となる。このことは、同じ岩石ブロックの任意の方向からサンプリングされた供試体について実験を行った場合、最大 40 % 近い圧裂強度の変動が生じ得ることを意味する。

5. 岩石組織の欠陥からみた異方性の検討

(1) 岩石組織の欠陥の観察

これまで、大島花崗岩の V<sub>p</sub> および σ<sub>t</sub> の三次元的な変化を測定しその異方性を検討してきた。ここでこれらの異方性についてより合理的な解釈を加えるため、花崗岩の岩石組織の欠陥について検討する。内部構造を知るといふ目的からすれば、薄片によって岩石組織を観察するという方法は有効である。そこで、それぞれの石目の方向に沿って薄片を作成し、偏光下での岩石組織の欠陥の観察を行った。観察は主として、クラックの分布と液粒面(後述)の分布に関して行った。これらを示したものが、Fig. 9 (R 面)、Fig. 10 (G 面)、Fig. 11 (H 面) である。

a) クラックの分布

G 面および H 面の写真である Fig. 10 および Fig. 11 の観察から、大島花崗岩では、R 面とほぼ平行な方向の開口したクラックが石英粒内に卓越して配向していることが認められる。これらのクラックは、単一の石英粒内に存在することもあり、石英集合体内を貫いて存在することもある。またこれらのクラックが、長石内まで延長して存在することもあるが、長石を貫いて存在することはまれである。すなわち、石英粒内の大部分のクラックは、石英粒内か粒界で停止する。クラック長は一般に 1~2 mm であり、時として 5 mm 程度連続するものも認められる。カリ長石や斜長石内にもまれに R 面にほぼ平行なクラックが認められるが、これらのクラックは石英粒内のクラックに比べて数も少ない。

R 面および H 面の写真である Fig. 9 および Fig. 10 によると、G 面にはほぼ平行なクラックが石英粒内に選択的に配向しているのがみられる。しかしながら、先の

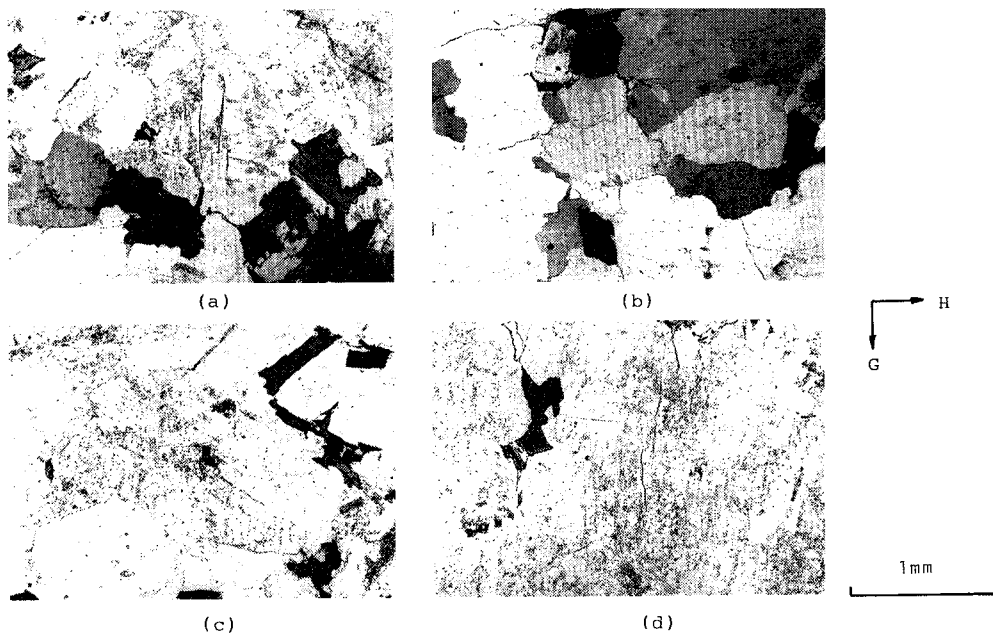


Fig. 9 Photomicrographs showing typical cracks found in a thin section of Oshima granite (parallel to rift plane). (a) and (b) were taken under crossed polarized light and others under plane-polarized light. G and H axis represent the orientation parallel to grain plane and hardway plane, respectively.

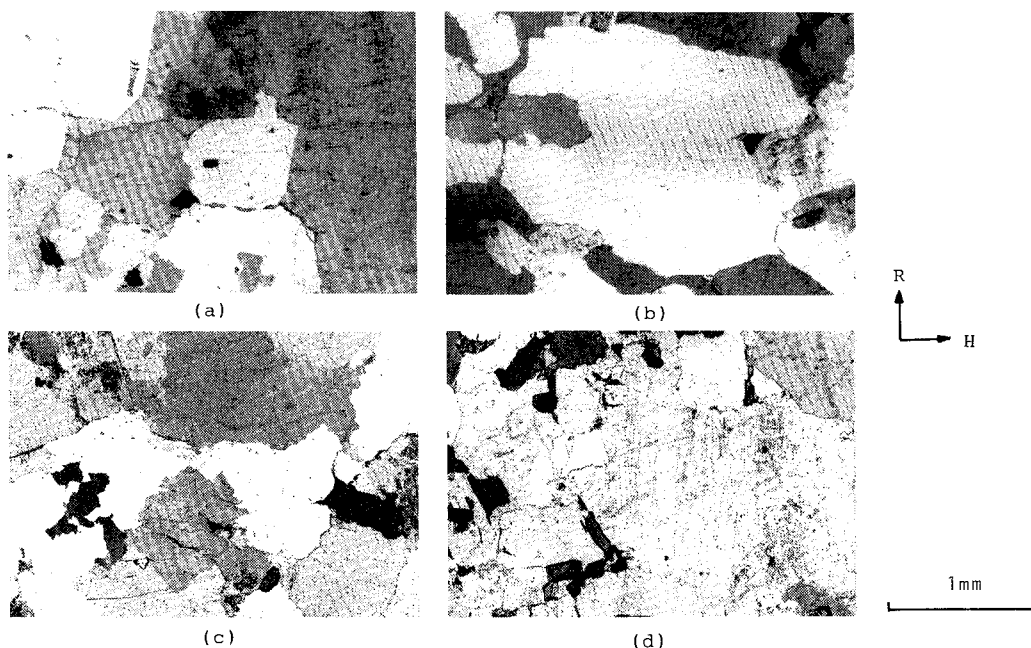


Fig. 10 Photomicrographs showing typical cracks found in a thin section of Oshima granite (parallel to grain plane). All are taken under plane-polarized light. R and H axis represent the orientation parallel to rift plane and hardway plane, respectively.

R面に平行なクラックが時として5 mm程度まで連続しているのに対して、G面に平行なものは、最大のものでも1 mm程度で、クラック密度も相対的に低い。

さらにR面およびG面の写真からは、H面に平行には、石英粒内およびカリ長石、斜長石内に微小なクラックがいくらかみられるのみで開口したクラックはほとん

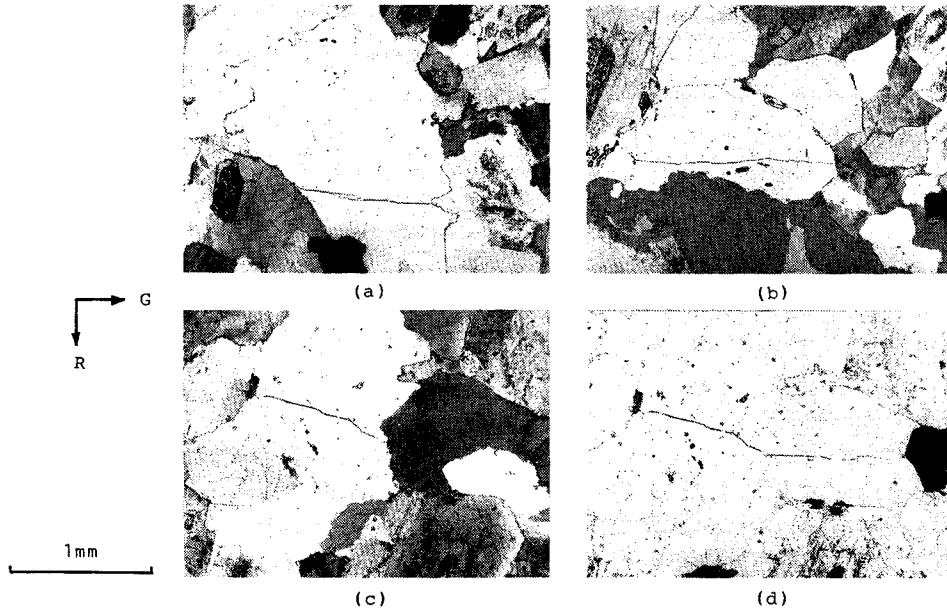


Fig. 11 Photomicrographs showing typical cracks found in a thin section of Oshima granite (parallel to hardway plane). (d) shows an area taken under plane-polarized light and (c) shows the same area under crossed polarized light. R and G axis mean the orientation parallel to rift plane and grain plane, respectively.

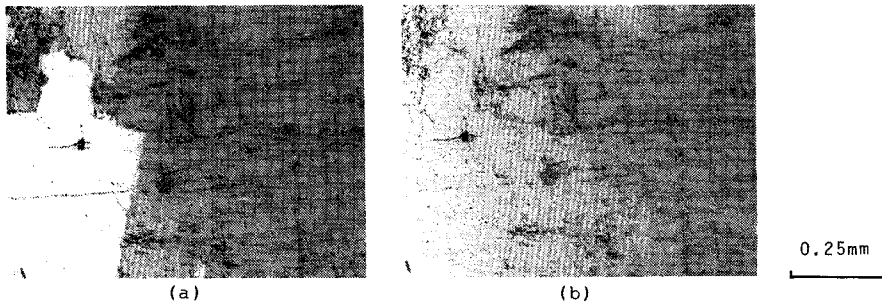


Fig. 12 Traces of liquid inclusion planes parallel to hardway plane. Thin section was cut parallel to grain plane. Surrounding material is potash feldspar.

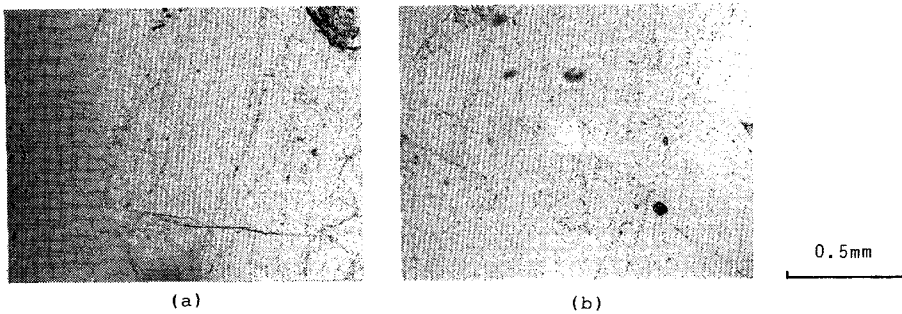


Fig. 13 Traces of liquid inclusion planes parallel to hardway plane. Thin section was cut parallel to hardway plane. Surrounding material is quartz.

Table 2 Classification of defects observable from each thin section.

Thin section	typical features	
	Open crack	Healed crack
Rift plane	Preferentially oriented transgranular cracks, within quartz, parallel to grain plane and secondary preferred orientation of cracks within feldspars. Cracks within quartzs often extend into feldspar grains.	Preferentially oriented healed cracks, within feldspar and hornblende, parallel to hardway plane. These cracks never extend into neighboring quartz grains.
Grain plane	Preferentially oriented transgranular cracks, within quartz, parallel to rift plane and secondary preferred orientation of cracks within feldspar. Cracks within quartzs often extend into feldspar grains.	same as above
Hardway plane	Strong preferred orientation of open cracks, within quartz, parallel to rift plane and weak preferred orientation of open cracks parallel to grain plane.	Mutually perpendicular healed cracks, within quartz, inclined about 20°-40° to rift plane and grain plane.

This table contains no information about grain-boundary cracks.

ど認められない。

またこれら三方向に選択的に配向して存在するクラックのほか、結晶粒界のクラックや結晶粒内に任意方向に発達した微小クラックがかなりみられるが、特定の方向にまとまって発達したクラックは認められないようである。

#### b) 液粒面の分布

前述のようなクラックのほか、大島花崗岩内には、選択的な配向性を有する微小欠陥として、液粒面 (liquid inclusion plane) が存在する。液粒面の詳細については他に譲るが、これはほぼ球状の微細な液体包有物が結晶粒内に面状をなして存在するものである。Fig. 12 (Fig. 10 の部分写真, G 面) に石英粒内のクラックと併せて、長石内に密に配向した液粒面とその拡大写真を示す。これらから、H 面にはほぼ平行な方向に、カリ長石内および斜長石内に選択的に配向した液粒面の存在が認められる。液粒面は、カリ長石と斜長石が隣接して存在する場合は両者を貫く形で存在するが石英内に連続して伸張することはない。これらの液粒面は長石内にはほぼ例外なく存在する。したがって、花崗岩内の長石類の占める割合を考えた場合、かなりの比率でこの液粒面が存在していることになる。さらに角閃石内にも H 面にはほぼ平行な液粒面が存在する。

これに対して、H 面に直交する R 面あるいは G 面に平行な方向には、液粒面の存在はほとんど明らかでない。さらに H 面の観察によると、H 面にはほぼ垂直で、R 面および G 面に斜交する液粒面の存在がみられる。Fig. 13 は、これらの液粒面を示すもので、石英粒内に存在し、H 面にはほぼ垂直で R 面および G 面と約 30° 程度斜交する互いにはほぼ直交する液粒面である。これらの液粒面は長石内に存在する液粒面と比較すると、密度がかなり低い。

これらの結果をまとめて示したものが Table 2 である。

#### (2) 岩石組織の欠陥分布からみた $V_p$ および $\sigma_t$ の異方性の検討

岩石供試体の内部構造の観察によりそれぞれ互いに直交する R, G, H 面には程度の差はあるが、クラックが存在することが認められた。先に示した  $V_p$  および  $\sigma_t$  の異方性はこれらのクラックの発達程度とよく対応している。また液粒面を構成する個々の包有物は、前述のようにほぼ球状で、力学的には等方性を有していると考えられるが、それらの集合体は選択的な方向性を有し面状をなしている。これらの液粒面は、連結性には欠けるものの引張破壊のための弱面を形成するものと考えられる。一方、この面は開口したクラックほどの不連結性はなく、弾性率の低減も小さいと考えられ、その構造特性上  $V_p$  を低下させる大きな原因とはならない。このことから、H 面における液粒面の存在は、H 面にはほとんどクラックがみられず H 軸方向の  $V_p$  には周囲と比べて特に目立った低下がみられないにもかかわらず H 面で  $\sigma_t$  が明らかに低下することと関連しているようである。さらに H 面は、前述のように「シワ」などと称されて R 面、G 面と直交する割れにくい面とされているが、検討の結果、R 面、G 面と比べれば割れにくい、両者にほぼ直交する面としては内部欠陥がかなり選択的に配向しており、ある程度割れやすい面になっていると解釈される。これに対して、H 軸を軸とする供試体の圧裂試験の結果で、H 面に垂直で R 面に斜交する液粒面の存在による圧裂強度の低下の程度がさほど顕著でないのは (Fig. 6 (c) の 60° および 150°)、石英粒内の液粒面の密度が比較的疎であるという理由によるものであろう。さらに、R 軸を軸とする供試体の圧裂強度曲線 (Fig. 6 (a)) において、H 面から 150° 傾いた面に若干の強度低下が認められるが、この面に対応した岩石組織には、クラックや液粒面の選択的な配向性が認められず、この原因については明らかでない。

このように、 $V_p$  および  $\sigma_t$  の三次元的な分布形に対し



て Fig. 6, Fig. 7 や Fig. 4, Fig. 8 に現われる明確な特徴は、多くの部分がクラックおよび液粒面の存在からほぼ説明することができる。ただこれらのクラックや液粒面が定量的にどの程度  $V_p$ ,  $\sigma_c$  の異方性に寄与しているかは、クラック、液粒面の定量化を必要とし今後の課題であると考えられる。

## 6. 結 言

本研究では、定性的には知られているが、その関連が必ずしも明快とはいえなかった花崗岩内欠陥と縦波伝播速度  $V_p$  および圧裂強度  $\sigma_c$  との関連を大島花崗岩を用いて精度よい実験を行うことにより明らかにしたものである。大島花崗岩は R 面のみが著しく発達しており、G 面、H 面の発達は特に著しくない。またそれ以外の方向に発達したクラックはほとんどみられない。大島花崗岩は細粒花崗岩であり、用いた供試体寸法に対して内部欠陥が統計量として取り扱える程度に分布していると考えられる。そのため縦波伝播速度試験結果の再現性はよく、圧裂試験結果も本実験の予備実験の範囲では 3% 程度の変動係数であった。このことは花崗岩内のクラックの発達と  $V_p$ - $\sigma_c$  を関連づけて解釈する場合に著しく好都合である。すなわち本実験においては、既往のいくつかの研究結果ではあいまいにしか説明できなかったこれらの関係が大島花崗岩を用いて精度よい実験をすることによって特に明快にされたといえることができる。得られた結果を列挙すれば以下のとおりである。

(1) それぞれの石目である面内での縦波伝播速度の測定結果は  $180^\circ$  を周期とする調和振動状になるのが認められた。これより三次元的な縦波伝播速度は石目に垂直な方向を主軸とする直交異方性状であることが推定された。

(2) 石目に垂直な軸を含む面での圧裂試験結果は縦波伝播速度と同じく、大まかにみて  $180^\circ$  を周期とするほぼ調和振動状になることが認められた。花崗岩の三次元的な圧裂強度はそれぞれの軸を主軸とする直交異方性状であることが推察された。

(3) それぞれの石目の面の岩石組織の欠陥の観察により、程度の異なるそれぞれの石目に平行なクラックの発達が認められた。このクラックの発達程度は前記の力学的異方性の程度とよく一致し、クラックの発達程度から花崗岩の大まかな異方性が説明されることが確認された。

(4) hardway plane は「シワ」などと称されて rift plane, grain plane に直交する割れにくい面とされているが液粒面の選択的な配向性がみられ、その面の近傍の面と比べて比較的割れやすい面であることが認められた。したがって圧裂強度を示す曲面のこの方向に対応す

る頂点が凹型となるのが認められた。

(5) 方位角に対する圧裂強度変化を示した図において、石目の方向以外のいくつかの方向でも圧裂強度が周囲と比べてやや低下する部分がみられた。これらの方向のあるものに対しては対応する液粒面の存在が認められた。しかし観察された範囲では対応するクラック、液粒面の存在しない方向もあり、これらに関しては今後検討が必要である。

本研究で得られたこれらの結果はすべての花崗岩にそのまま適用可能であるとはいえないが、一般に等方性材料として扱われている花崗岩のみならず、多くの花崗岩質岩石の力学的性質を明らかにするうえでの貴重な資料を提供していると考えられる。

本研究を進めるにあたり、大島石協同組合の小田順重氏および小田哲郎氏には原石採取に際して多大なご援助をいただいた。また、薄片の観察に関する部分の記述については、広島大学名誉教授 小島丈児先生の指導に負うところが大きい。さらに、徳山高専技官 山本秀喜氏および宇多村智則(日本ビジネスコンサルタント)、大久保博明(日電ソフトウェア)の両君には実験および実験データの整理で多大な協力をいただいた。記して謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) Birch, F. : The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 1. J. Geophys. Res., Vol. 65, pp. 1083~1102, 1960.
- 2) Birch, F. : The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2. J. Geophys. Res., Vol. 66, pp. 2199~2224, 1961.
- 3) Osborne, F.F. : Rift, grain, and hardway in some Pre-Cambrian granites, Quebec, Econ. Geol., 30, pp. 540~551, 1935.
- 4) McWilliams, J.R. : The role of microstructure in the physical properties of rock. In : Testing techniques for rock mechanics, Am. Soc. Test Mat., STP 402, pp. 175~189, 1966.
- 5) Douglass, P.M. and Voigt, B. : Anisotropy of granites : A reflection of microscopic fabric, Geotechnique, 19, pp. 376~398, 1969.
- 6) Peng, S.S. and Johnson, A.M. : Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 9, pp. 37~86, 1972.
- 7) Anderson, D.L., Minster, B. and Cole, D. : The effect of oriented cracks on seismic velocities, J. Geophys. Res., 79, pp. 4011~4015, 1974.
- 8) Soga, N., Mizutani, H., Spetzler, H., Martin, R.J. III : The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westerly granite, J. Geophys. Res., 83, pp. 4451~4458, 1978.

- 9) Oda, M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 4, pp. 96~108, 1982.
  - 10) 京谷孝史・市川康明・川本眺万：岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について，土木学会論文報告集，第358号／Ⅲ-3，pp. 27~35，1985.
  - 11) Amadei, B., Rogers, J.D. and Goodman, R.E. : Elastic constants and tensile strength of anisotropic rocks, *International conference of ISRM*, pp. 189~196, 1983.
  - 12) 金子勝比古：personal communication.
  - 13) たとえば Mellor, M. and Hawks, I. : Measurement of tensile strength by diametral compression of disks and annuli, *Eng. Geol.*, 5, pp. 173~225, 1971.  
(1985. 10. 23・受付)
-