

(2) 岩石内の微小欠陥と力学的挙動の異方性

山口大工学部 正会員 ○佐野 修 徳山工専 正会員 工藤 洋三
徳山工専 正会員 橋本 堅一 山口大工学部 正会員 中川 浩二

1. 緒論

岩石には異方性が認められる。造岩鉱物の多くは異方性なのでその集積構成物もまた異方性を示すのは当然であるが、一般には造岩鉱物のランゲム分布を仮定し、造岩鉱物より十分大きなスケールで見た岩石は等方性体として取り扱われることが多い。しかしこの仮定は厳密には成立たず、変成岩はもちろん、堆積岩は堆積面に関し、火成岩は流理構造に関して粒子の配向性が認められるので、重力下で生成する岩石の大部分は異方性である。さらにクラックなどの空孔が配向性を持っている場合にもやはり全体として異方性を呈するものと考えられる。特に岩盤ではジョイントの構造が重要であろう。

岩盤内構造物の設計にあたり岩石や岩盤の異方性を考慮することは解析的には少し複雑になるが困難ではない。しかし物性値を求めることはかなり複雑である。等方弾性体の場合にはヤング率とポアソン比を求めればすべての弾性率が求まるが、異方性体の場合には最大21個の独立な弾性率の値と主軸の方向を求める試験が必要である。実際には、力学的性質の異方性の程度およびその影響の大きさは構成要素の異方性の程度と解析対象によりさまざまである。したがってすべての場合に異方性を考慮することは現実的ではない。そこで岩種により岩石あるいは岩盤の異方性に一定の傾向があるか？さらに一定の傾向を示す領域の大きさ、あるいは重力下で生成した岩石の異方性の主軸の方向の一つは鉛直であると期待できるなどその主軸方向に一般性あるいは地域性があるか？さらには解析対象によりその影響の大きさがどの程度となるか？などの疑問に答える必要があるだろう。地域性あるいは領域の問題については工藤他[1987]が議論している。ここでは岩石の力学的性質に見られる異方性の程度と、異方性をもたらす原因、および異方性が岩石の変形—破壊挙動にもたらす影響を議論する。

2. 弾性波速度に見られる異方性と主破壊面 (fault) の関連性について

岩石に異方性がある場合には、特定の割れ易い面が存在することが普通である。そのため通常の発破により砕石を行っている砕石場でさえも小割りの過程で比較的直方体に近いブロックを入手することが可能なことが多い。そこで岩石力学の分野で用いられることの多い岩石を選び、その岩石の直方体に近いブロックを入手し、その各面に垂直に伝播する弾性波の速度の最大値と最小値を示すと Table 1のとおりである。花崗岩に見られる大きな異方性は古くから知られており、古代エジプトで花崗岩の砕石に異方性面を利用していたとの記述も見られる(Dale, 1923)。異方性面はほぼ直交しており、英語では砕石場の用語で割りやすい順に rift, grain, hardway planeと呼ばれている。フランス語、ドイツ語、ロシア語にもそれぞれの名称がある(Balk, 1937, Isnard et Leymarie, 1964)。日本では目、二の目、しわと呼ばれている(工藤他, 1986)。凝灰岩の異方性は空孔の形状と相関が認められる。すなわち空孔の長軸方向は弾性波速度の最も遅い方向に垂直である。内部に認められるバッチもまた空孔の長軸方向に細長い。これらの構造は堆積面に沿って偏平になったことにより形成されたものと思われる。玄武岩内部の針状の斜長石には配向性が認められるが弾性波速度の異方性は小さい。

rift plane に平行な大島花崗岩の一軸圧縮試験で認められた主破壊面の走向を rift plane を基準に計測した結果を示すと Fig.1のとおりである。主破壊面の走向と rift plane が一致していることが認められる。弾性波速度の異方性が大きな荻野凝灰岩でも同様な結果が得られる。北九州市門司区にほぼ10kmにわたって点在する

Table 1. The maximum and the minimum velocities and velocity anisotropy, $(V_{\max} - V_{\min})/V_{\max}$ for various rocks

Rock type	$V_{\max}$, m/s	$V_{\min}$, m/s	Anisotropy, %
Oshima granite	4650	3650	21.5
Ogino tuff	2900	2513	13.3
Izumi sandstone	4560	4460	2.2
Murata basalt	5610	5510	1.8
Akiyoshi marble	5020	4870	3.3

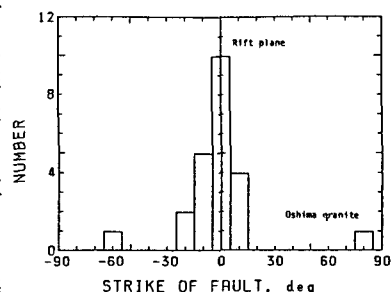


Fig. 1. A histogram of the strike of the fault. Almost all strikes are parallel to the rift plane.

碎石場で採取したほぼ直方体に近い岩石(主として砂岩)ブロックの広い面に垂直と平行な二方向に抜かれた供試体を用い、一軸圧縮試験を行った結果認められた主破壊面の走向を、供試体軸に垂直な平面内で弾性波速度が極大となる方向を基準に計測した結果を示すと Fig. 2 のとおりである。弾性波速度の異方性は前述の花崗岩や凝灰岩ほど大きくはなく6%以下であるが、主破壊面の走向がほぼ0°あるいは90°となっていることが認められる。したがって弾性波速度の異方性が比較的小さな岩石でも破壊する面は異方性軸と関係するものと考えられる。

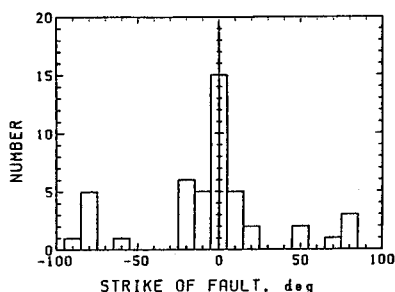


Fig. 2. A histogram of the strike of the fault. Azimuth was measured from the direction of the maximum sound velocity within the plane normal to the specimen's axis. Rock types are slate, shale, sandstone and andesite.

3. 異方性をもたらす内部構造とその性質について

針状の斜長石の結晶が配向している村田玄武岩は造岩鉱物の配向性による異方性を示すがその量は僅かである。しかしクラックなどの空隙が岩石の力学的性質に及ぼす影響の重要さを考慮すると(例えば Paterson, 1986), クラックなどの配向性をもっと重要であることが理解できる。内部に存在する偏平なクラックは十分な静水圧下で閉塞するため見掛けの弾性率が変化する。静水圧試験を行うことによりクラックの配向性による異方性の程度を知ることが可能である。静水圧を受ける岩石の挙動の例として大島花崗岩と荻野凝灰岩の静水圧下の主ひずみの大きさを圧力の関数として示すと Fig. 3 のとおりである。内部に多くの偏平なクラックを含む花崗岩の場合には圧力-ひずみ

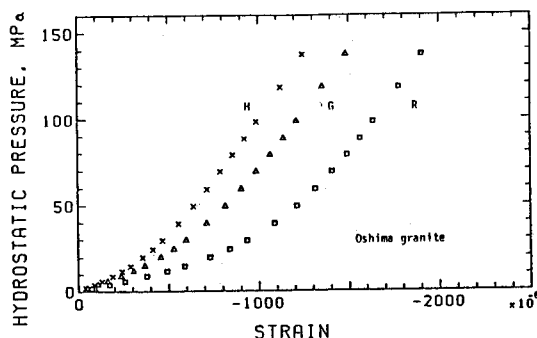


Fig. 3-a. Three linear strains of Oshima granite under hydrostatic pressure. R, G and H are normal to the rift plane, the grain plane and hardway plane, respectively.

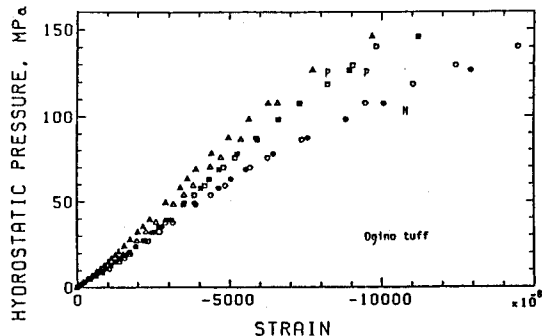


Fig. 3-b. Three linear strains of Ogino tuff under hydrostatic pressure. N and P indicate the direction normal to the bedding plane and parallel to that, respectively.

曲線は下に凸となる。また見掛けの弾性率は比較的低圧下で大きな異方性を示すが、十分高い圧力の下では3主ひずみともほぼ平行になるのでクラックの影響を除くとほぼ等方性体であること、逆に、岩盤内で深さが4000m(かぶり圧がほぼ100MPa)となるまでクラックが存在するならば異方性が残ることが分る。花崗岩と異なり、荻野凝灰岩は比較的低圧で線形を示し、3主ひずみの傾きは異なる。見掛けの弾性率は堆積面と思われる方向で最も小さい。さらに圧力が高くなると非線形となり、圧力-ひずみ曲線は上に凸となる。高封圧下の非線形性は内部の pore 周辺部の圧縮応力集中部での圧壊によるものと考えられ、この現象はこの岩石が今までこれほど高い圧力を受けたことがないことを示すものと考えられる。

4. 変形-破壊挙動に及ぼす異方性の影響

異方性の一主軸を共有する供試体を用いて圧裂試験を行い求めた引張強度の異方性の例を示すと Fig. 4 のとおりである。花崗岩の引張強度の異方性が大きいことは Peng [1972] も述べている。また異方性の

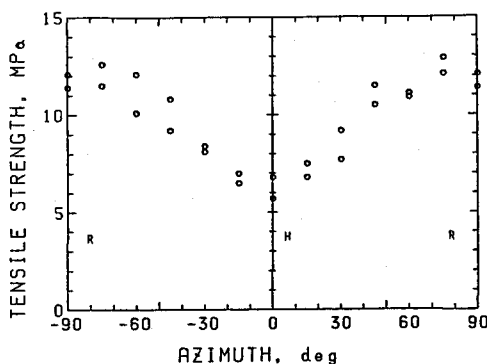


Fig. 4. Tensile strength by the Brazilian test, as a function of the loading direction. R and H indicate that the load was applied normal to the rift plane and the hardway plane, respectively.

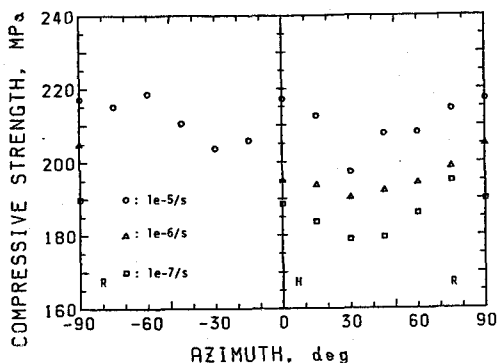


Fig. 5. Compressive strength of Kurokamijima granite as a function of the loading direction, under 3 different strain rates. R and H indicate the loading direction normal to the rift plane and hardway plane.

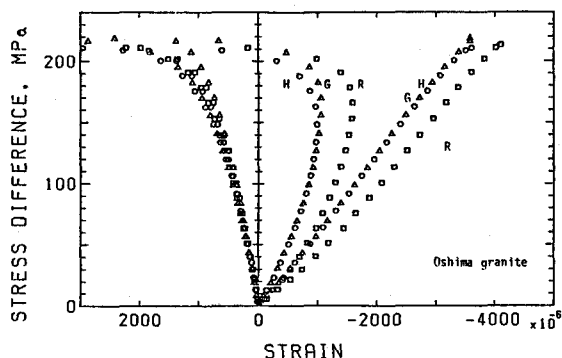


Fig. 6. Three linear strains and volumetric strain under uniaxial compression for three granite specimens cored normal to the rift plane, grain plane and hardway planes.

一主軸に垂直な黒髪島花崗岩の供試体の一軸圧縮試験で得られた圧縮強度の異方性の例を Fig. 5 に示す。一軸圧縮応力下の弾性体内部に存在する精円孔壁面に生じる引張応力の大きさがほぼ最大となる30°の方向で強度が最小となることなど、花崗岩の異方性が内部に存在するクラックによるとする見解と調和的である。また異方性の3つの主軸方向に載荷された大島花崗岩で得られた応力-ひずみ線図を示すと Fig. 6 のとおりである。ダイラタンシーに伴い生じる横ひずみの非線形部分には異方性が認められ、それぞれの主軸の方向によりほぼ数倍の差が生じていることが分る。線形破壊力学的試験の一つであり、stress corrosion による subcritical なクラック伸長現象を調査する目的で行われるダブルトーション試験により求められた、クラック伸長速度とクラック先端部の応力拡大係数の関係を示すと Fig. 7 のとおりである。き裂の進展速度には大きな異方性が認められ、最大で約 10^6 倍もの差が認められる。この差がクラッキングの選択的な発達をもたらし、ダイラタンシー異方性を生じさせ、主破壊面を決定するものと考えられる。

5. 異方性岩石の独立な弾性率の決定

任意の方向の弾性率は座標変換により求まるが、異方性を考慮する場合まず独立な弾性率を知る必要がある。異方性媒体内の弾性波速度は次の方程式の解で与えられる(例えば、Schreiber et al., 1973)。

$$\begin{aligned} (\Gamma_{11} - \rho v^2)U_1 + \Gamma_{12}U_2 + \Gamma_{13}U_3 &= 0 \\ \Gamma_{21}U_1 + (\Gamma_{22} - \rho v^2)U_2 + \Gamma_{23}U_3 &= 0 \\ \Gamma_{31}U_1 + \Gamma_{32}U_2 + (\Gamma_{33} - \rho v^2)U_3 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 Γ は Christoffel stiffness, ρ は密度, v は弾性波速度であり, U は振幅を表す成分である。また $\Gamma_{ik} = \Gamma_{ki}$ であり, かつ $\Gamma_{ik} = a_j a_l C_{ijkl}$ である。ただし, a は波面の法線の主軸に関する方向余弦であり, C は stiffness tensor である。主軸の方向および弾性率が未知の場合, 原理的には9次の連立方程式となる。主軸の方向が既知の場合にはより簡単になるが, 方向の測定には 1° 以内の精度が必要である (McSkimin, 1965)。主軸方向の弾性波速度を含む項は因数分解可能で, 一つの弾性率と一つの弾性波速度のみを含む3つの方程式が得られるので, この方向の弾性率の計算誤差は速度の測定精度により直接決定される。すなわち誤差の伝播は他の方向より小さい。また主軸方向の速度は必ず極値となるので, 方向の測定誤差が速度の測定に大きく影響することはない。したがって弾性率の対角要素は主軸方向に伝播かつ振動する縦波(P-波)と横波(S-波)の速度を求めることにより容易に知ることができる。非対角要素ははるか

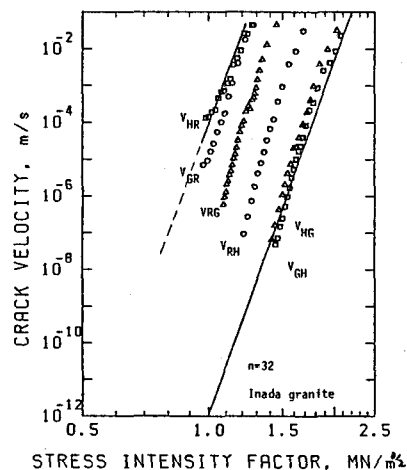


Fig. 7. Subcritical crack growth rate in Inada granite for various directions. V_{ik} indicates the velocity of i -direction and the opening direction of k . R, G and H indicate the axis normal to the rift plane, the grain plane and the hardway plane. The theoretical curve, $V = AK_I^n$ is indicated where $n=32$.

に困難である。

orthorhombic (orthotropic) や hexagonal (transversely isotropic) が仮定できる場合は未知数が減少するので比較的容易である。荻野凝灰岩の場合には、堆積面内に等方性を仮定し、大島花崗岩の場合には直交異方性を仮定する。この場合、各主軸に垂直に伝播する弾性波と関係する非対角要素は最大で1個となる。ここで各主軸に垂直に伝播かつ振動するS-波を調べると、ほぼ45°の方向に極値を持つ。上述の対角要素と同様の理由でこの波の速度をもとに非対角要素を決定することにする。大島花崗岩で測定された各波の速度と決定された独立な弾性率を matrix notation で示すとTables 2-3のとおりである。測定結果はほぼ $V_{ik}=V_{ki}$ であり直交異方性仮定との矛盾は小さい。

同じ測定結果をもとに、等方性仮定で弾性率を求めるとTable 4 が得られる。等方性仮定ではボアソン比がマイナスになりうる事が理解できる。したがって弾性波速度から弾性率を求める場合には異方性を考慮しなければならない。なお Birch[1966] には、弾性波速度をもとに花崗岩の弾性率を求めた例が多数掲載されているが、なかにはボアソン比がマイナスのものも見られる。原位置試験でさまざまな方向の弾性波速度を求めることによる手法を用いるのは困難とも思えるが、ジョイント構造から理論的に推定することは可能であろう。

6. 結言

等方性と考えられている岩石でもその多くは異方性である。構成する鉱物粒子の配向性による異方性もあるが、クラックの配向性はより大きな力学的性質の異方性をもたらす。その結果弾性波速度や弾性率が方向に依存するだけでなく、異方性の主軸と関連するクラッキングの異方性が生じ、結果としてダイラタンシー異方性が生じる。またその結果、主破壊面の走向は異方性の主軸と関連することが多い。多くの花崗岩の無載荷時のヤング率および引張強度には比較的大きな異方性が見られ、方向により最大で2倍程度の差異が存在する。stress corrosionにより進展するき裂の速度は方向により10⁶程度も異なるので、クリープ速度や、クラッキングに異方性が生じるものと考えられる。異方性体の独立な弾性率は弾性波の速度から求めることができるが、等方性仮定は深刻なエラーをもたらす。

参考文献

Balk, R., 1937, Structural behavior of igneous rocks, Geol. Soc. Amer., Mem. 5
Birch, F., 1966, Handbook of physical constants, ed. S.P. Clark, Geol. Soc. Amer.
Dale, T.N., 1923, The commercial granites of New England, Bull. Geol. Surv., Amer., 738
Isnard, P., et P. Leymarie, 1964, Sci. Terre, vol. 9-4
工藤, Y., 他, 1986, 土と基礎, vol. 34-8
工藤, Y., 他, 1987, this issue
McSkimin, 1965, Physical Acoustics, vol. 1, Acad. Press, NYC
Paterson, M.S., 荻野, S., 他訳, 1986, 実験 岩石力学, 古今書院, Tokyo
Peng, S.S., and A.M. Johnson, 1972, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 9
Schreiber, E, et al., 1973, Elastic constants and their measurement, McGraw-Hill, NYC

Table 2. Elastic wave velocities for various paths and polarizations. The first subscript and the second one denote the direction of propagation and polarization, respectively

Vp, m/s	Vs, m/s	
V _{RR} =3750	V _{RG} =2749	V _{R45G-nH} =2598
	V _{GR} =2670	
V _{GG} =4568	V _{GH} =3008	V _{G45H-nR} =2956
	V _{HG} =2977	
V _{HH} =4833	V _{HR} =2742	V _{H45R-ng} =2556
	V _{RH} =2779	

Table 3. Stiffness matrix, C_{ij}, and all technical constants of Oshima granite

C _{ij}					
37.4e9	93.6e8	12.6e9	0.00	0.00	0.00
93.6e8	56.3e9	12.5e9	0.00	0.00	0.00
12.6e9	12.5e9	62.1e9	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	23.4e9	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	19.8e9	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.16e9

Technical constants					
33.9e9	12.7e-2	17.8e-2	0.00	0.00	0.00
19.6e-2	52.5e9	16.2e-2	0.00	0.00	0.00
29.4e-2	17.4e-2	56.2e9	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	23.4e9	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	19.8e9	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.2e9

Table 4. Velocities for various paths and propagations, and Poisson's ratio from the theory of isotropic elasticity

Vp	Vs	Poisson's ratio	
		V _{RG} =2749	-0.08
V _{RR} =3750	V _{RH} =2779		-0.11
	V _{GH} =3008		0.12
V _{GG} =4568	V _{GR} =2670		0.24
	V _{HR} =2742		0.26
V _{HH} =4833	V _{HG} =2977		0.19

(2) Anisotropy in physical properties and micro defects in rocks

Osam Sano*
Yozo Kudo**
Ken'ichi Hashimoto**
Koji Nakagawa*

ABSTRACT

Due to physical anisotropy, an assumption of isotropy sometimes brings about serious errors in the behavior of stressed rocks which have been usually treated as an isotropic body in engineering practice. The isotropic elasticity, for example, often showed negative Poisson's ratio of granites, when sound velocities, V_p and V_s , were used. The anisotropic nonlinearity in the linear strains under hydrostatic pressure showed that micro defects such as cracks play the most important role in the anisotropic nature of granites, and pores do the similar role for tuff. Apparent Young's modulus under relatively low stresses and tensile strength varied as the direction by a factor of two, while the compressive strength varied by 10%. A subcritical crack growth due to stress corrosion was also investigated by double torsion technique. The crack velocity differed by the order of six or seven from the direction of crack propagation. The strike of the fault at the final fracture closely coincided with one of the anisotropic axes due to presumably the anisotropy in cracking under stress. Because elastic moduli are needed for the stress-strain analysis in engineering practice, all independent elastic moduli of Oshima granite, for example, were determined under the assumption of rhombic syngony (orthotropic) by using a theory of anisotropic body and the sound velocities of different paths and polarizations.

* Yamaguchi University, Ube

**Tokuyama Technical College, Tokuyama