

岩石の異方性と低速亀裂進展挙動との関係

Relation between Anisotropy of Rocks and Subcritical Crack Growth

奈良禎太*・金子勝比古

Yoshitaka NARA, Katsuhiko KANEKO

It is very important to consider the anisotropic property of the materials when the deformation and fracture of rocks are discussed. However, the materials have been assumed to be isotropic in many studies, and it has been rare to consider the anisotropy of materials. Generally, the orthorhombic material such as granite has nine independent elastic constants. In the case of granite, however, it can be considered that there are some conditions to determine the elastic constants, because the anisotropy of granite is caused by the preferred orientation of pre-existing cracks. In this study, the method to determine the effective elastic constants of granite was presented, and the subcritical crack growth behavior in granite was investigated using estimated elastic constants. It was made clear that the elastic constants of granite were determined by estimating the intrinsic elastic moduli of the material and the values of crack density in three orthogonal directions. The stress level causing subcritical crack growth depended on the crack density.

Key Words: anisotropy, subcritical crack growth, Double-Torsion test, granite

1. はじめに

岩石材料には、先在クラックや層理面などの、多くの不連続面が含まれており、異方性を呈する場合が多い。花崗岩では、先在クラックの選択的配向性より、直交異方性が見られる¹⁾。一般に、直交異方性材料では、異方弾性定数の独立成分は9つである。これらの定数を求めるためには、様々な方向へ伝播するP波速度やS波速度を計測する必要があり、異方弾性定数を容易に求めることは困難である。そのため、岩石の異方性を考慮して、変形および破壊挙動が議論された例は少ない。しかしながら、花崗岩の異方性は、先在クラックの配向性に起因することから、異方性の制約条件が、一般の直交異方性材料とは異なる可能性がある。

本研究では、花崗岩の異方弾性定数の評価法について延べ、花崗岩の異方性の制約条件について考察する。さらに、計算された異方弾性定数を用いて、花崗岩において低速亀裂進展 (Subcritical Crack Growth)²⁾ が起こるときの応力レベルを評価し、材料の異方性との関連性について詳細に調べる。

2. 異方弾性定数の評価

花崗岩のような、マイクロクラックの方位分布から直交異方性がもたらされる材料をモデル化するために、本研究では、直交する二つの方向に円板状のマイクロクラックが卓越し、その他の方向ではランダムに分布しているようなモデルを仮定した。具体的には、Fig.1(a)のように、弾性体中にマイクロクラックをランダムに分布させ、さらに、Fig.1(b)と(c)にあるような、方向性を持ったマイクロクラック群を、直交する二つの方向に分布させるという手順で、直交異方性材料をモデル化した。

異方弾性定数の評価法として、Yamamoto³⁾ によって提案されている New Self Consistent Scheme (NSCS) を採用した。解析方法の詳細については、奈良・金子⁴⁾ を参照されたい。この場合、岩石実質部のヤング率 E^m およびポアソン比 ν^m を設定し、ランダムに分布しているクラック密度 Φ_0 、直交する2方向へのクラック密度の増加分 $\Delta\Phi_2$ および $\Delta\Phi_3$ を定める必要がある。

Birch⁵⁾ や Simmons⁶⁾ による静水圧下での弾性波速度の測定結果より、花崗岩は、100MPa 以上の封圧下では、先在クラックの閉塞により、等方的となることが知られている。本研究では、 $E^m=75[\text{GPa}]$ 、 $\nu^m=0.25$ と設定した。

クラック密度 Φ_0 、 $\Delta\Phi_2$ 、 $\Delta\Phi_3$ は、異方弾性定数から求められるP波速度の理論値と、花崗岩供試体から測定されるP波速度の実測値との誤差が最小になるように定めた。P波速度の理論値と実測値との誤差 e_p は、次の式で評価した。

$$e_p = \frac{1}{3} \times \left(\sum_{i=1}^3 \left| \frac{V_{II}^{th} - V_{II}^{ob}}{V_{II}^{th}} \right| \right) \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

ここで、 V_{II}^{th} および V_{II}^{ob} はそれぞれ、I方向に伝播・振動するP波速度の理論値および実測値である。

Table 1に、本研究で得られた大島花崗岩および稲田花崗岩における、I方向に伝播し、J方向に振動する弾性波速度 V_{IJ} の測定結果を示す。この表では、参考データとして、佐野⁷⁾ による大島花崗岩での測定結果も示されている。また、Table 2に、佐野が大島花崗岩を用いて求めたスティフネス定数の値を、Table 3に、 e_p が最小となるとき有効弾性スティフネスと弾性波速度の理論値を示す。

* 北海道大学大学院工学研究科

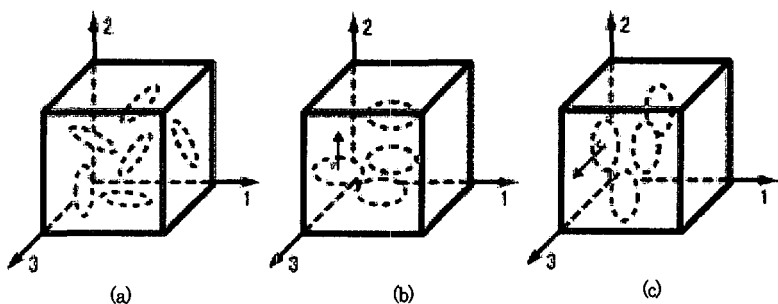


Fig.1 Three types of the crack distribution models

(a) : Microcracks are distributed randomly.

(b) : Microcracks are distributed parallel to each other. The crack plane is normal to 2-axis.

(c) : Microcracks are distributed parallel to each other. The crack plane is normal to 3-axis.

Table 1 Elastic wave velocity for granite

Rocks	V_{ij}^{ob} [km/s]								
	V_{HH}	V_{GG}	V_{RR}	V_{GH}	V_{HG}	V_{HR}	V_{RH}	V_{GR}	V_{RR}
Oshima granite(Sano ⁷⁾)	4.83	4.57	3.75	3.01	2.98	2.74	2.78	2.67	2.75
Oshima granite	4.91	4.61	4.51	2.91	2.97	2.82	2.81	2.81	2.82
Inada granite	4.33	4.69	4.06	2.75	2.78	2.54	2.51	2.61	2.59

Table 2 Effective stiffness from Sano⁷⁾

Effective stiffness [GPa]					
62.2	12.2	12.8	0	0	0
12.2	55.6	9.17	0	0	0
12.8	9.17	37.5	0	0	0
0	0	0	19.6	0	0
0	0	0	0	20.3	0
0	0	0	0	0	23.9

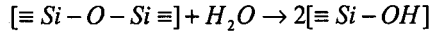
Table 3 Effective stiffness and theoretical wave velocity

Rocks	e_p [%]	Effective stiffness [GPa]						V_{ij}^{th} [km/s]
Oshima granite(Sano ⁷⁾)	0.3	62.0	12.4	8.94	0	0	0	$V_{HH}=4.79$
		12.4	56.2	8.25	0	0	0	$V_{GG}=4.57$
		8.94	8.25	38.0	0	0	0	$V_{RR}=3.75$
		0	0	0	17.8	0	0	$V_{GH}=V_{HG}=2.91$
		0	0	0	0	18.6	0	$V_{HR}=V_{RH}=2.65$
		0	0	0	0	0	22.3	$V_{GR}=V_{RG}=2.59$
Oshima granite	0.1	64.9	13.8	13.3	0	0	0	$V_{HH}=4.90$
		13.8	57.4	12.0	0	0	0	$V_{GG}=4.61$
		13.3	12.0	54.9	0	0	0	$V_{RR}=4.51$
		0	0	0	21.0	0	0	$V_{GH}=V_{HG}=2.93$
		0	0	0	0	22.2	0	$V_{HR}=V_{RH}=2.90$
		0	0	0	0	0	22.7	$V_{GR}=V_{RG}=2.82$
Inada granite	0.1	59.3	11.0	9.80	0	0	0	$V_{HH}=4.33$
		11.0	50.7	8.61	0	0	0	$V_{GG}=4.70$
		9.80	8.61	44.4	0	0	0	$V_{RR}=4.06$
		0	0	0	18.2	0	0	$V_{GH}=V_{HG}=2.82$
		0	0	0	0	19.6	0	$V_{HR}=V_{RH}=2.63$
		0	0	0	0	0	20.9	$V_{GR}=V_{RG}=2.73$

様々な方向の弾性波速度が精度良く測定され、かつ、直交異方弾性定数が評価されているデータとして、佐野⁷⁾の大島花崗岩での測定結果を基にして、本研究で用いた理論の正当性を検討した。Table 3 に示されているスティフネス定数の値は、Table 2 に示される佐野が弾性波速度より求めたものとよく一致している。さらに、 e_p を最小とするように弾性定数を求めても、主軸に沿って伝播・振動するS波速度を小さな誤差で再現できていることがわかる。ゆえに、クラックを含まない、 $E^m=75[\text{GPa}]$ 、 $\nu^m=0.25$ の等方弾性体に、主軸3方向のP波速度の理論値と実測値との誤差が最小となるようにクラック密度 $\Phi_0, \Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2$ を与えて、NSCSに基づいて計算すれば、花崗岩における直交異方弾性定数を算定することが可能であると考えられる。

3. 低速亀裂進展挙動の異方性

亀裂先端の応力レベルが臨界値（破壊靱性）に達していないときに起こる低速亀裂進展現象は、岩石においては、応力腐食に起因すると考えられている。珪酸塩材料における応力腐食は、材料内の亀裂先端付近のシロキサン結合に引張応力が作用し、そこに水が反応することによって起こる、原子間結合の切断現象と考えられている。この反応は、次のように表される。



このとき、応力拡大係数 K_I と亀裂進展速度 da/dt は、次のように関係付けられる⁸⁾。

$$\frac{da}{dt} = v_0 \exp\left(\frac{-E^* + bK_I}{RT}\right) \quad (2)$$

ここで、 E^* は活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は絶対温度、 v_0 および b は定数である。ガラスにおいては、定数 v_0 は反応物質（水）の活量に比例する⁹⁾。

岩石における低速亀裂進展現象について実験的に調べるために、定変位による Double-Torsion（以下DT）試験法¹⁰⁾を用いた。供試岩石は、大島花崗岩および稲田花崗岩である。供試体は、弾性波速度測定用の供試体と同じブロックから用意した。Fig. 2 に、DT 供試体の概要図を示す。ただし、 P は荷重であり、供試体の長さ $L=110\sim150[\text{mm}]$ 、幅 $B=45[\text{mm}]$ 、厚さ $d=3[\text{mm}]$ 、ガイド溝を彫った部分の厚さ $d_0=2[\text{mm}]$ 、モーメントアーム $w_0=18[\text{mm}]$ である。本研究では、RIFT 面、GRAIN 面、HARDWAY 面に垂直な軸をそれぞれ、 R 軸、 G 軸、 H 軸と定義し、亀裂の進行方向および開口方向を考慮して、岩石ごとに6種の供試体を用意した（Fig. 3 参照）。例えば、HR 供試体とは、亀裂の進行方向が H 軸方向で、開口方向が R 軸方向となるような供試体である。

試験は、大気環境下で、水蒸気分圧をそろえて行った。本論文では、水蒸気分圧が $530 \pm 90 \text{ Pa}$ （気温 11°C 、湿度 $40 \pm 7\%$ ）の条件下で得られた結果を示す。

本研究では、材料の等方性を仮定した式¹⁰⁾ および、材料の直交異方性を考慮した式⁷⁾ を用いてデータを解析した。異方性を考慮する場合、直交異方弾性定数が必要となるため、Table 3 に与えられている有効スティフネスの値を用いて、データの解析を行った。

Fig. 4 および Fig. 5 に大島花崗岩で得られた結果を、Fig. 6 および Fig. 7 に稲田花崗岩で得られた結果を示す。これらの結果より、いずれの花崗岩においても、低速亀裂進展挙動の異方性が顕著であることがわかる。また、異方性を考慮してデータを解析した場合、異方性の傾向がさらに明確になることがわかる。先在クラックが最も密に分布している RIFT 面に沿って亀裂が進展する場合に、低い応力レベルで亀裂が進展し、先在クラックの密度が低い面（大島花崗岩では HARDWAY 面、稲田花崗岩では GRAIN 面）に沿って亀裂が進む場合に、高い応力レベルで亀裂が進展することが示されている。

Table 4 および Table 5 にそれぞれ、大島花崗岩および稲田花崗岩における、直交異方性を考慮した式を用いたときの、 $da/dt=10^{-6}[\text{m/s}]$ のときの応力拡大係数の平均値および標準偏差を示す。異方性を考慮してデータを解析した場合、亀裂の開口方向が等しいとき、亀裂進展を起こす応力レベルが一致することが示された。ゆえに、花崗岩における低速亀裂進展挙動は、

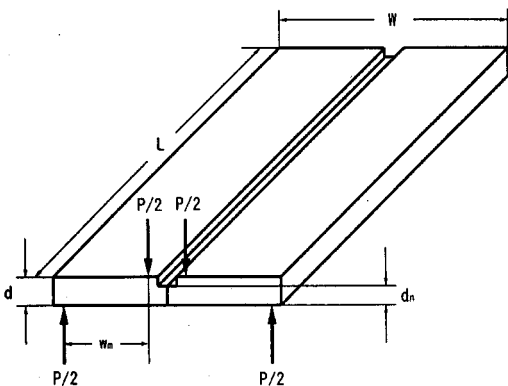


Fig.2 Illustration of DT specimen

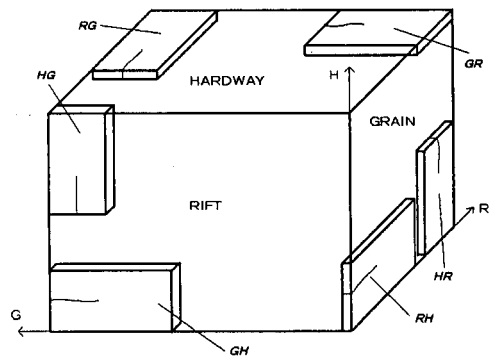


Fig.3 Sample block

先んずククラックの配向性に大きく影響され、開口する面に沿った方向の先んずククラックの密度によって応力レベルが定められると考へられる。
 以上の結果より、異方性材料における変形・破壊挙動を詳細に調べる場合、材料の異方性を考慮してデータを解析することが、大変重要であることが示される。

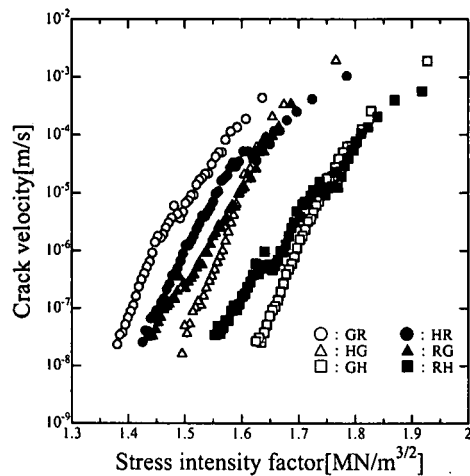


Fig.4 Relation between K_I and da/dt for Oshima granite by isotropic analysis

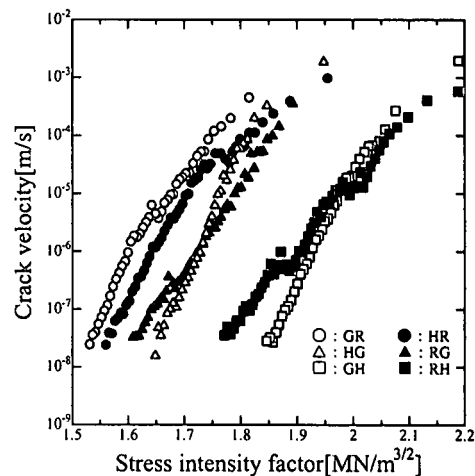


Fig.5 Relation between K_I and da/dt for Oshima granite by anisotropic analysis

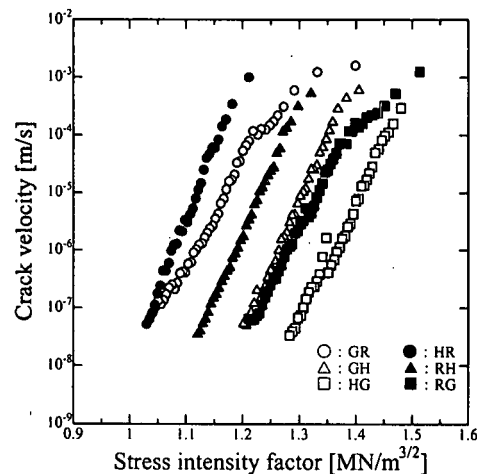


Fig.6 Relation between K_I and da/dt for Inada granite by isotropic analysis

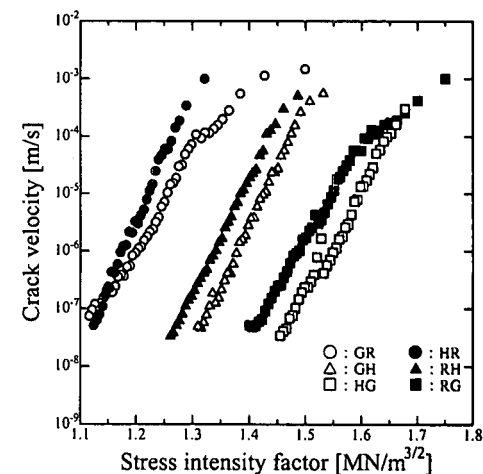


Fig.7 Relation between K_I and da/dt for Inada granite by anisotropic analysis

Table 4 Results of anisotropic analysis for Oshima granite

Crack Opening Direction	Specimen	K_I [MN/m ^{3/2}] ($da/dt=10^{-3}$ [m/s])
R-direction	GR	1.72 ± 0.08
	HR	1.76 ± 0.03
G-direction	HG	1.83 ± 0.08
	RG	1.83 ± 0.04
H-direction	GH	2.01 ± 0.13
	RH	1.99 ± 0.07

Table 5 Results of anisotropic analysis for Inada granite

Crack Opening Direction	Specimen	K_I [MN/m ^{3/2}] ($da/dt=10^{-3}$ [m/s])
R-direction	GR	1.23 ± 0.08
	HR	1.17 ± 0.14
G-direction	HG	1.59 ± 0.10
	RG	1.54 ± 0.08
H-direction	GH	1.40 ± 0.07
	RH	1.36 ± 0.11

4. 考察

花崗岩には、互いに直交する割れやすい面が存在することが経験的に知られており、これらは先在クラックの配向性に起因することが、薄片観察より明らかになっている。花崗岩における先在クラック分布の異方性より、力学的性質の異方性がもたらされることがよく知られている。ゆえに、異方弾性定数を評価した上で変形・破壊挙動を議論することが望ましい。2章における結果より、花崗岩における直交異方弾性定数の評価には、S波速度の測定が不必要であることが示された。これは、岩石におけるS波速度測定の高難しさを考慮すると、歓迎すべき結果と言える。

3章より、大島花崗岩および稲田花崗岩における緩やかな亀裂進展速度には、顕著な方向依存性があることが示された。この異方性は、材料を等方性と仮定して解析した場合でも見られるが、材料の異方性を考慮して解析した場合、異方性の程度が大きくなる。大島花崗岩において、最も割れやすい RIFT 面に沿って亀裂が進展する場合と、最も割れにくい HARDWAY 面に沿って亀裂が進展する場合とを比較すると、同一の応力レベルでは、亀裂進展速度には、等方性解析では約 4 オーダー、異方性解析では約 5 オーダーの差が見られる。一方、稲田花崗岩において、RIFT 面に沿って亀裂進展が起こる場合と、最も割れにくい GRAIN 面に沿って亀裂進展が起こる場合とを比較すると、同一の応力レベルでは、等方性解析では約 6 オーダー、異方性解析では約 7 オーダーの亀裂進展速度の差が見られる。異方性解析を行うことにより、亀裂進展異方性の程度が拡大するという傾向は、佐野⁷⁾による報告と一致する。

また、大島花崗岩と稲田花崗岩における亀裂進展特性を比較した場合、稲田花崗岩の方が、低速亀裂進展挙動の異方性の程度が大きいことがわかる。同一の亀裂進展速度での応力拡大係数を比較した場合でも同様に、稲田花崗岩の方が、大島花崗岩よりも、低速亀裂進展を起こす応力レベルの異方性の程度が大きい。これは、P波速度の異方性の程度と調和的である。P波速度の最大値と最小値との比は、大島花崗岩では $V_{HH}/V_{RR}=1.09$ であり、一方、稲田花崗岩では $V_{GG}/V_{RR}=1.16$ となる。花崗岩におけるP波速度の異方性は、先在クラックの配向性によりもたらされるものであり、本研究で示される破壊挙動の異方性も、先在クラックの配向性と大きく関連すると考えられる。

Fig.8 および Fig.9 にそれぞれ、大島花崗岩および稲田花崗岩における、亀裂の開口方向に伝播するP波速度と、 $da/dt=10^{-3}$ [m/s] のときの応力拡大係数との関係を示す。これらの図より、低速亀裂進展を起こす応力レベルとP波速度との間に、正の相関が見られる。これは、工藤ら¹¹⁾による、大島花崗岩における圧裂引張強度の異方性とP波速度の異方性との相関性とも調和的である。

RIFT 面に沿って亀裂進展が起こる場合に、応力レベルが小さくなることから、亀裂の進展は、先在マイクロクラックとの連結を伴いながら起こっていることが示唆される。このことを詳細に調べるためには、破壊力学試験に用いる前の岩石供試体中におけるマイクロクラックの分布状態と、試験後の亀裂進展経路との比較が必要になると思われる。これについては、今後の課題として、現在調査中である。

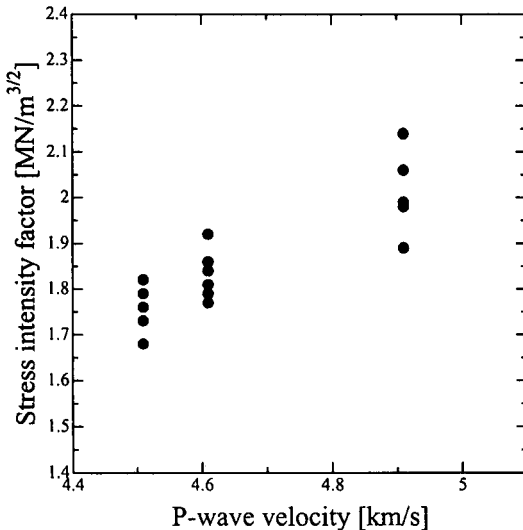


Fig.8 Relation between P-wave velocity and K_I for Oshima granite

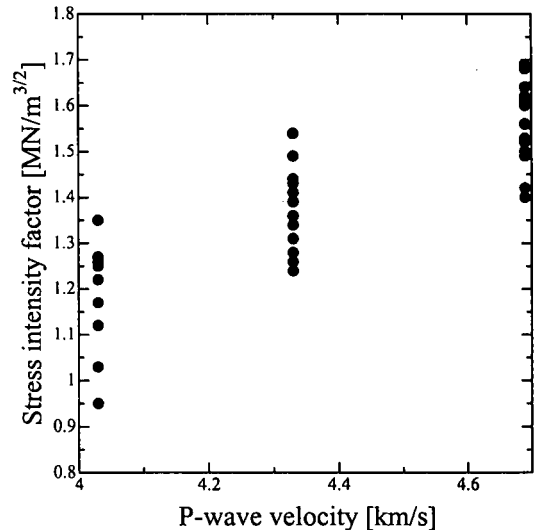


Fig.9 Relation between P-wave velocity and K_I for Inada granite

5. まとめ

花崗岩は、常温常圧下では、先在クラックの選択的配向性より直交異方性を示し、一方、100MPa 以上の高い封圧下では、先在クラックの閉塞により等方性を示す。ゆえに、岩石実質部の弾性定数（例えばヤング率とポアソン比）および、直交する3方向のクラック密度を与えれば、花崗岩における直交異方弾性定数を評価することが可能である。さらに、算出された有効弾性定数から求められるP波速度の理論値と、岩石供試体を用いて測定されたP波速度の実測値との誤差が最小になるようにクラック密度を与えれば、S波速度も小さな誤差で再現することができる。ゆえに、花崗岩の直交異方弾性定数の評価には、S波速度の測定は必要ではないことが示された。

また、DT 試験法を用いて、花崗岩における低速亀裂進展挙動について実験的に調べた。その結果、亀裂進展速度や緩やかな亀裂進展を起こす応力レベルに、顕著な異方性が見られた。直交異方性を考慮してデータ解析を行った場合、亀裂進展挙動の異方性の程度は拡大し、亀裂進展を起こす応力レベルは、亀裂の開口方向が同一であるとき、ほぼ一致するという結果が得られた。亀裂進展を起こす応力レベルは、亀裂の開口方向に伝播するP波速度と正の相関を示した。これらの結果より、低速亀裂進展挙動は、先在クラックの密度によって決定されると考えられる。

参考文献

- 1) 工藤洋三・佐野修(1993)：石目と花崗岩の力学的性質，地質ニュース，No.470, p.36-45
- 2) Atkinson, B. K.(1984)：Subcritical Crack Growth in Geological Materials, J. Geophys. Res., Vol.89, No. B6, p.4077-4114
- 3) Yamamoto, K.(1981)：Theoretical Determination of Effective Constants of Composite and Its Application to Seismology, Ph.D. thesis, Tohoku Univ.
- 4) 奈良禎太・金子勝比古(2002)：花崗岩の異方弾性定数の評価法に関する研究，資源と素材（投稿中）
- 5) Birch, F.(1960)：The Velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 Kilobars, J. Geophys. Res., Vol.65, No.4, p.1083-1102
- 6) Simmons, G.(1964)：Velocity of Shear Waves in Rocks to 10 Kilobars, J. Geophys. Res., Vol.69, No.6, p.1123-1130
- 7) 佐野修(1988)：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, No.413, p.159-165
- 8) Wiederhorn, S. M. and Bolz, L. H.(1970)：Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass, J. Am. Ceram. Soc., Vol.53, No.10, p.543-548
- 9) Freiman, S. W.(1974)：Effect of Alcohols on Crack Propagation in Glass, J. Am. Ceram. Soc., Vol.57, No.8, p.350-353
- 10) Williams, D. P. and Evans, A. G.(1973)：A Simple Method for Studying Slow Crack Growth, J. Test. Eval., Vol.1, No.4, p.264-270
- 11) 工藤洋三・橋本堅一・佐野修・中川浩二(1986)：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, p.189-197