



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	花崗岩の縦波の減衰に及ぼすクラック及び水の効果
Author(s)	兼間, 強; KANEMA, Tsuyoshi
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 36, 69-82
Issue Date	1977-03-29
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.36.69">https://doi.org/10.14943/gbhu.36.69</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14068">https://hdl.handle.net/2115/14068</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	36_p69-82.pdf



## 花崗岩の縦波の減衰に及ぼすクラック及び水の効果

兼 間 強

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和51年12月20日受理)

### The Effect of Cracks and Water Saturation on Attenuation of Longitudinal Waves in Granite

By Tsuyoshi KANEMA

Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received December 20, 1976)

Internal friction( $Q^{-1}$ -value) and bar velocity( $V_L$ ) were measured by the longitudinal resonance method. The compressional velocity( $V_p$ ) was measured by the pulse transmission method(1 MHz).

The crack density of specimen was controlled by the thermal stress. As a specimen has been heated, the thermal stress, caused by the anisotropy of thermal expansion coefficient of the crystal axis of composite minerals and the difference of thermal expansion coefficient of different minerals, brought about micro fractures. Acoustic emissions caused by micro fractures were observed and counted. Four specimens were heated up to the various temperatures. Each specimen gets different crack density after heating. These specimens were used to investigate the  $Q^{-1}$ -value dependence on the crack density and water saturation.

The average shape of cracks in the specimens was estimated by comparison of the results of  $V_p$  and porosity measurements with ESHELBY-WALSH theory. The average shape of cracks is represented the oblate ellipsoidal crack that the aspect ratio is about  $10^{-3}$  and the length of the long axis is a few millimeters. The wavelength of high-frequency waves used in this experiment is larger than the crack dimensions.

The  $Q$ -value,  $V_L$  and  $V_p$  decrease with increase of crack density. The  $Q$ -value and  $V_L$  of dry specimens are 390-420 and 4.0-4.2 km/s, respectively. Those values of the most cracked specimens are 190-200 and 2.1-2.3 km/s, respectively. The mechanism of attenuation of dry specimen is attributed to intergranular friction. The  $Q$  value is sensitive to the interstitial moisture in the specimens. The mechanism of attenuation of water saturated specimens is attributed to viscosity of the interstitial moisture.

#### I. ま え が き

岩石の破壊に先行して岩石中の微小クラックの数の増加に伴う体積膨張 (dilatancy) が実験的

に認められている。(例えば BRACE et al.(1966), SCHOLZ(1968)). 一方岩石の破壊に水, 特に間隙水圧が重要な働きをしている事が BYERLEE(1970), BRACE and MARTIN(1968) によって明らかにされている. すなわち間隙水圧の増加は有効応力を下げることによって, 岩石の破壊強度を下げる働きをする. このことはデンバーにおける地下への注水に伴う地震の誘発現象をうまく説明する. 岩石中の水は, 種々の物理量(地震波速度, 電気抵抗等)に大きな効果を及ぼす事が知られている(例えば, NUR and SIMMON(1969), BRACE and ORANGE(1968)). 以上のような事実を総合して, NUR(1972), SCHOLZ et al.(1973)は体積膨張に伴うクラックの増加と, それに続く空隙中への水の浸透によって地殻の強度が下り地震が発生するという, dilatancy fluid diffusion model を提唱し, 地震の先行現象として種々の物理量の変化を予想した. この場合, 地震の先行現象としての物理量の変化の原因として, クラックの増加に基づくものと岩石の含水率に基づくものとの2つが考えられる.

地震の前兆現象の1つとして地震波速度に及ぼすクラックの存在と, 水の効果は注目される所である. 地震の先行現象としての地震波速度の変化に関する研究は野外においても実験室内においても数多くなされている. 一方先行現象として地震波の振巾に関しても変化が認められると予想されるが, これに関する野外の研究は少ない. 振巾には地震波の通過した領域の非弾性的性質を示す情報が含まれており, その程度はQ値で表わされる. 岩石のQ値に関する実験的な研究は様々な立場からなされており, 一般に常温, 常圧のもとにおいては岩石中のクラックの効果が大きいと考えられているが, その定量的な実験はない. 本論文における, 実験の目的は, 岩石内部のクラックの数の増加に伴う,  $Q^{-1}$ 値,  $V_p$ (縦波の速度),  $V_L$ (細長い棒の巾を伝わる縦波の速度)の変化, ならびに含水率の変化に伴う,  $Q^{-1}$ 値,  $V_p$ ,  $V_L$ を測定し, その効果を調べることに及び, その結果から dilatancy fluid diffusion model に基づき地震波の縦波のQ値がどのように変化するかを推測することである.

## II. 実験方法

### II-1. 測定方法

測定に用いた試料は, 密度 2.60 g/cc, 空隙率 0.5~0.6%, 平均粒径 2~3 mm の茨城県稲田産の花崗岩である.

Q値の測定法はいくつかあるが, トランスデューサーと試料が非接触という利点をもつ縦振動共振法を利用して測定を行なった. 測定に用いた試料は  $1 \times 1 \times 20 \text{ cm}^3$  の直方体の試料である. 測定法を Fig. 1 に示す. 励起コイルにより試料を振動させ, もう一端の受信コイルで振動を検出する. V.C.F. を利用して発振周波数を変化させ, こ

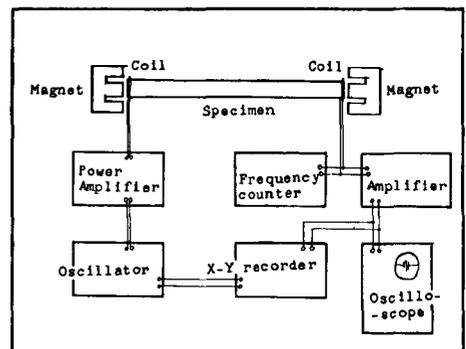


Fig. 1. Block diagram of the longitudinal resonance method.

の時の制御電圧をX-Yレコーダーの横軸に入れる。一方受信コイルで検出した電圧を整流してX-Yレコーダーの縦軸に入れることによって共鳴曲線を描かせる。この共鳴曲線の半巾値から

$$Q^{-1} \text{ 値が次式より得られる: } Q^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta f}{f}$$

( $\Delta f$ : 共鳴曲線の振巾が $\frac{1}{2}$ になる周波数,  $f$ : 共振周波数, )

測定は基本共振モードを利用して行なった。試料の共振周波数は2~8 KHzの範囲にあった。測定はすべてQ値が歪振巾に依存しない、微小歪の範囲でなされた。この時、棒状の試料を伝わる縦波の速度 $V_L$ は $V_L = 2 \cdot f \cdot l$  ( $l$ : 棒の長さ) で与えられる。一方 $V_p$ は1MHzのパルスを使って測定した。 $V_p$ と $V_L$ の間には次の関係がある。(  $\nu$ : ポアソン比)

$$V_p = V_L \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

## II-2 クラックの数を考える方法

岩石中のクラックの数の制御は花崗岩が熱に弱い性質を利用して、熱応力によって行なった。実験方法をFig. 2に示す。試料を電気炉の中で溶融石英の棒で支え、それを通して熱応力によって生ずる破壊音をチタン酸バリウムで検出する。オシロスコープを内部同期の状態にし、あるレベル以上の振巾をもつ音波信号に対しては掃引を開始するようにしておく。同期レベルを変えることによって、異なる振巾の音波を検出することが可能である。掃引信号を gate out から取り出し、ペンレコーダーに記録させる。検出した音波に対して、1コのパルスが記録紙上に記録される。この実験では、掃引時間は1msとしたため、1ms以内の間隔で生じた2コ以上の音波は1コに数えられることになる。しかし、オシロスコープ上で観察した限り、実験温度範囲では、1ms以内の間隔で生じた音波は少なく、全体の数の見積りに対して大きな誤差を与えない。加熱速度は10°C/分で行なった。数本の試料について各々の加熱の最高温度を変えれば各々のクラック密度が異なる試料が得られる。

## II-3 測定順序

クラック密度の増加による $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$ の変化は次のような測定順序で行なった。

①試料を整形の後、110°Cで24時間乾燥し、デシケーター内で室温まで冷却した後に、 $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$ を測定する。②4本の試料を最高温度を変えて加熱し、前述の方法によって試料中に新たに生じたクラックを数える。③試料を真空中で排気した後に水を浸透させ;加熱の際に蒸発した水をもとにもどす。④再び試料を110°C, 24時間乾燥し、デシケーター内で室温まで冷却した後に $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$ を測定する。乾燥状態でのクラック密度の増加による $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$ の変化は①と④の値を比

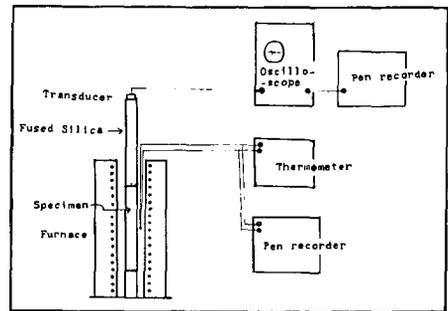


Fig. 2. Block diagram of the equipment for observing acoustic emission caused by thermal cracks.

較することにより得られる。

次に数本の試料について水の飽和度に対する  $Q$ ,  $V_L$  の変化を調べた。水の飽和度は試料の重量変化から求めた。試料を真空排気の後、水を浸透させ飽和した後、室内に放置すると自然乾燥によって重量は減小する。一方、 $110^{\circ}\text{C}$ 、24 時間乾燥した試料をデシケーター内で室温まで冷却した後室内に放置すると、試料は空気中の水蒸気を吸収して重量が増加する。これらの重量変化から試料の水による飽和度の変化を求め、それに対して  $Q$  値の変化を調べた。ここで飽和度は次式から計算した。

$$\text{飽和度} = \frac{W - W_d}{W_w - W_d}$$

( $W$  : 試料の重さ,  $W_d$  :  $110^{\circ}\text{C}$ 、24 時間乾燥しデシケーター内で室温まで冷却した時の重さ,  $W_w$  : 水で飽和した時の試料の重さ)。

### III. 実 験 結 果

#### III-1. 熱応力によって生じたクラックの数、及びその形状。

測定は 4 本の試料についてなされた。Fig. 3 は加熱実験の結果である。横軸に時間をとり、縦軸は温度と 1 分間当りに生じた音波の数をとってある。実線が観測した音波の数、1 点鎖線が温度を示す。 $200^{\circ}\text{C}$  付近から音波は観測され始め、温度の上昇につれて増大する。ある温度で加熱を止め、音波が観測されなくなる温度まで冷却し試料を取り出す。Table 1 に示されるように、各試料の加熱の最高温度と観測した音波の数は、No.1 :  $330^{\circ}\text{C}$ , 160, No.2 :  $390^{\circ}\text{C}$ , 500, No.6 :  $470^{\circ}\text{C}$ , 1980, No.5 :  $520^{\circ}\text{C}$ , 3900 であった。しかし、この数が加熱によって生じたすべてのクラックの数に等しい訳ではない。S/N 比の関係から音波として数えられる振巾には限りがあり、今回の実験では絶対振巾  $1.2\text{ mV}$  以上の振巾をもつ音波を観測の対称とした。従って、実際に岩石中に生じたクラックの数は観測した音波の数よりも多いと考えられる。しかし、今回の実験においては各試

Table 1

Specimen	Porosity (%)	$V_{p(d)}$ (km/s)	$V_{p(w)}$ (km/s)	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	$N_k$
No. 3 } No. 4 }	0.4 - 0.5	$5.4 \pm 0.1$	$4.2 \pm 0.1$		
No. 1	0.8	$5.1 \pm 0.1$	$3.6 \pm 0.1$	330	160
No. 2	1.0	$5.1 \pm 0.1$	$3.0 \pm 0.1$	390	500
No. 5	1.55	$4.8 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.1$	520	3,900
No. 6	1.25	$5.0 \pm 0.1$	$2.8 \pm 0.1$	470	1,980

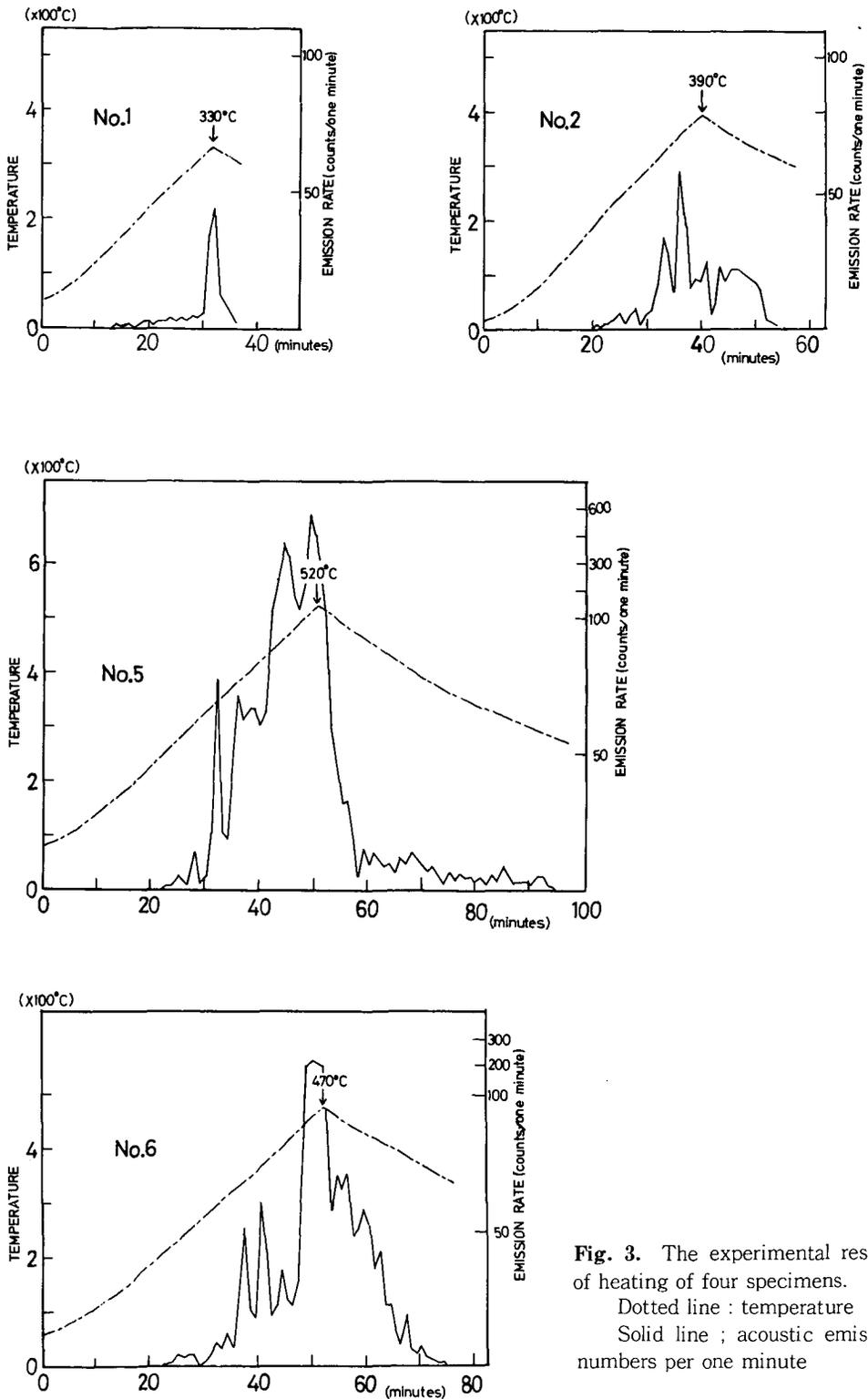
Table 1. Result of porosity and compressional velocity measurement.

Tem. : Maximam temperature of heating treatment before measurement.

$N_k$  : Acoustic emission number counted during heating.

$V_{p(d)}$  : Compressional velocity of dry specimen.

$V_{p(w)}$  : Compressional velocity of water saturated specimen



**Fig. 3.** The experimental results of heating of four specimens.  
 Dotted line : temperature  
 Solid line ; acoustic emission numbers per one minute

料に新たに生じたクラックの数を観測した音波の数を基準として考えてゆく。

試料中に、熱応力によって生じたクラックの形状を推測する。熱応力によってクラックが生ずる機構としていくつか考えられる。同じ試料について、前田・兼間(準備中)により熱応力による破壊の機構の実験・考察が行なわれている。それによると、今回の実験の加熱温度は520°C以下であり、この温度範囲で、生ずるクラックは主として構成鉱物の熱膨張率の相違や、鉱物の結晶軸方向の熱膨張率の異方性に起因する熱応力による結晶境界の剝離によるものと考えられる。従って生じたクラックは結晶粒程度の薄いクラックであろう。クラックを包含物とする媒質の弾性定数の理論をWALSH(1969)が提案している。ここではP波速度の測定結果を利用し、WALSHの理論と比較することによってクラックの形状を推測した。

加熱によって新たにクラックが生じた試料では空隙率が増加する。Table 1に示すように生じたクラックの数が多きほど空隙率の増加は大きい。各試料についてP波速度を、乾燥した状態( $V_{p(d)}$ )と水で飽和した状態( $V_{p(w)}$ )について測定するとTable 1に示すようになる。No. 3とNo. 4は加熱の過程をへない元の試料についての結果である。Walshの理論は、Fig. 4中に示されるようなペニー型の回転楕円体を包含物とする媒質の弾性定数を計算する理論である。Fig. 4には、 $\alpha$ (回転楕円体の縦軸と横軸の比)をパラメーターとして計算した理論曲線と実測値(黒丸印)を示す。横軸は空隙率、縦軸に $V_p$ を示す。点線が水で飽和した時、実線は乾燥状態(空気で飽和)の曲線である。計算はmatrixの弾性定数として、体積弾性率 $=5.70 \times 10^{11}$ c.g.s, 剛性率 $=3.40 \times 10^{11}$ c.g.s, ポアソン比 $=0.25$ として計算した。Fig. 4には $\alpha=10^{-2}$ ,  $\alpha=10^{-3}$ についての場合が計算されている。実測値と最もよく合うものは $\alpha=10^{-3}$ の理論曲線である。従って熱応力によって生じたクラックは $\alpha=10^{-3}$ の扁平な回転楕円体で近似し得る。さらに試料中に新たに生じたクラックの数を音波として観測した数( $N_k$ )とした時、増加した空隙率( $\Delta\phi$ )との間には次の関係が成り立つ( $\pi \cdot d^2 \cdot C/6 = \Delta\phi \cdot V$  ( $\pi d^2 C/6$ は長軸 $d$ , 短軸 $c$ の回転楕円体の体積,  $V$ は試料の体積),  $\Delta\phi$ ,  $V$ ,  $N_k$ は既知の量であるから,  $\alpha=10^{-3}$ とすると $d$ が計算できる。各試料について計算す

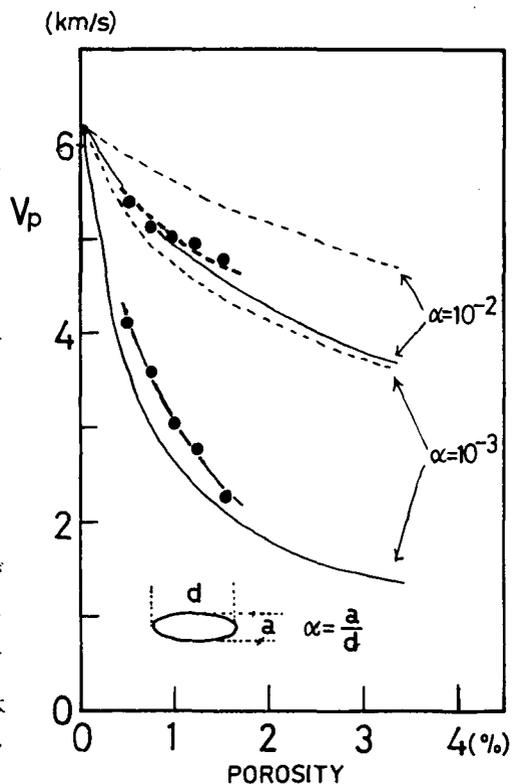


Fig. 4.  $V_p(d)$  and  $V_p(w)$  as a function of porosity for granite matrix containing oblate ellipsoidal cracks with aspect ratio  $10^{-2} - 10^{-3}$ . The solid circles represent observational data. Solid line : water saturated Dotted line : air saturated(dry)

**Table 2.** Result of  $Q$ ,  $V_p$  and  $V_L$  measurement of original specimen and thermally cracked specimen.

Temp.: Maximum temperature of heating treatment before measurement.

 $Q$  : Internal friction $V_L$  : Bar velocity $V_p$  : Compressional velocity

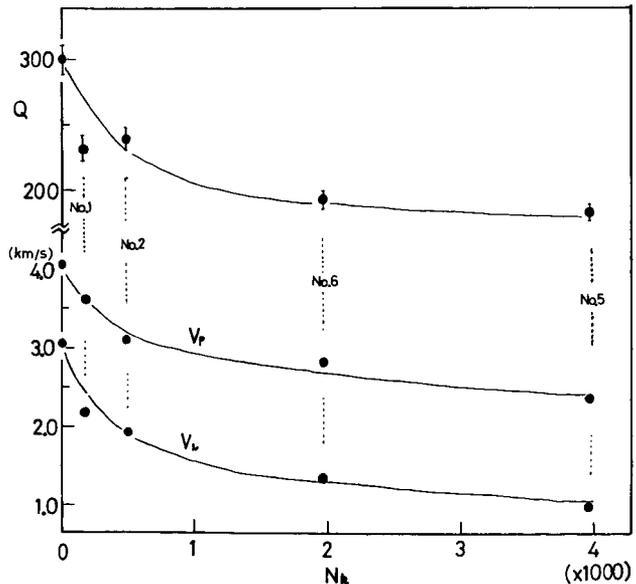
Table. 2 Specimen	Original specimen			Temp. (°C)	$N_k$	Thermally cracked spec.		
	$Q$	$V_L$ (km/s)	$V_p$ (km/s)			$Q$	$V_L$ (km/s)	$V_p$ (km/s)
No. 1	290 ± 10	3.05	4.1	330	160	230 ± 10	2.15	3.6
No. 2	290 ± 10	3.15	4.2	390	500	235 ± 10	1.98	3.0
No. 5	310 ± 10	3.05	4.1	520	3,900	180 ± 10	0.96	2.2
No. 6	300 ± 10	3.05	4.1	470	1,980	190 ± 10	1.35	2.8

ると  $d$  は数 mm のオーダーになる。実際に生じたクラックの数は観測した音波の数より多いと考えられるから、これはクラックの長軸の上限を示すものである。以上のような推測は、今回の実験の温度範囲で熱応力によって生じたクラックは粒子境界の剥離に対応する結晶粒程度の薄いクラックであろうとする推測と矛盾しない。

この実験においては、 $V_p$  の波長は 6 ~ 3 mm 程度となり、共振法の場合はこれよりさらに長い。従って、この実験における結果は波長よりも短い、 $\alpha$  が  $10^{-3}$  に近い薄いクラックに対する応答によるものであり、減衰の機構に関して、波の散乱の効果を考慮に入れる必要はないと考えられる。

### III-2 クラックの増加に伴う、 $Q$ , $V_L$ , $V_p$ の変化

Table 2 に元の試料と熱応力によってクラックが増加した試料についての  $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$  の測定結果を示す。測定は飽和度 = 0 の場合の結果である。Fig. 5 は音波の数 ( $N_k$ ) と  $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$  の関係を示す。 $N_k = 0$  の値は 4 本の元の試料の値の平均である。元の試料の  $Q$ ,  $V_L$ ,  $V_p$  は各々 280 ~ 310, 3.05 ~ 3.15 km/s, 4.1 ~ 4.2 km/s の範囲にある。これらの値は、すべてクラックの増加に伴って減少し、その減少の程度は直線的でなく、クラックの数が多くなるに従って減

**Fig. 5.**  $Q$ ,  $V_L$  and  $V_p$  versus  $N_k$  under dry state after heating. $V_L$ : bar velocity $V_p$ : compressional velocity $N_k$ : acoustic emission number

小の程度が鈍くなっている。VpはVLよりも約1 km/s速くなっているが、その変化は同様の傾向を示している。Fig. 6はVLとQ、VpとQの関係を示したものである。●、■の印で示されるものが元の試料の値である。クラック数の増加に伴い各試料のQ、VL、Vpは減少し、この範囲では直線で近似し得る、各々について次のような実験式が得られる。

$$Q = 60 V_L + 110 \quad (1)$$

$$Q = 50 V_p + 90 \quad (2)$$

これらは、乾燥した試料中に $\alpha$ が $10^{-3}$

程度の薄い、波長よりも短いクラックが増加してゆく時の縦波の速度と減衰の変化を表わしていると考えられる。

### III-3 減衰に及ぼす水の効果

減衰に及ぼす水の効果の実験結果を Fig. 7 に示す。横軸は飽和度である。No. 3は加熱の過程を経ない試料についてのもの、No. 2、No. 5は各々前述の試料である。飽和度0%とは110°Cで24時間乾燥しデシケーター内で室温まで冷却した状態、飽和度100%とは、真空中で排気した後水を浸透させ2~3日放置した状態を指す。前述のように室内に放置しておくことによる空気の水蒸気の授受を利用して飽和度を変化させている。Q値の測定は $Q < 50$ 以下ではSN比が悪くなって精度よく測定できなくなる。Q値に及ぼす岩石中の水の効果は非常に顕著であり、岩石中の水はQ値を著しく減少させる。Q < 50以下では減衰が大きくて、正確な測定はできなかったが、Fig. 7の結果を外挿すると0%と100%ではQ値は $\frac{1}{6}$ 以下に減少するものと推測される。

減衰に及ぼす水の効果についてはBORN (1941), GORDON and DAVIS (1968) らによっても同様な結果が報

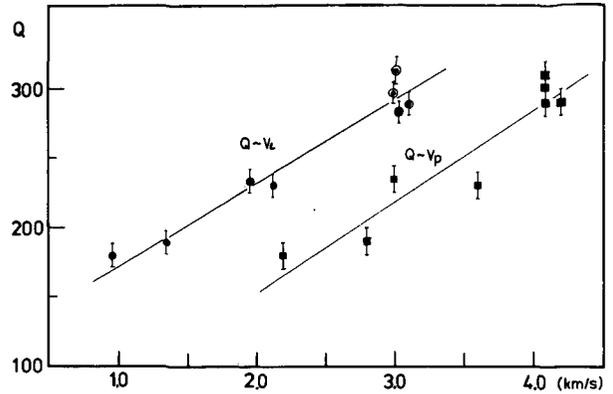


Fig. 6. Q versus  $V_L$  and  $V_p$  under dry state.

●■ : values of the original specimen

●■ : values of the thermally cracked specimen

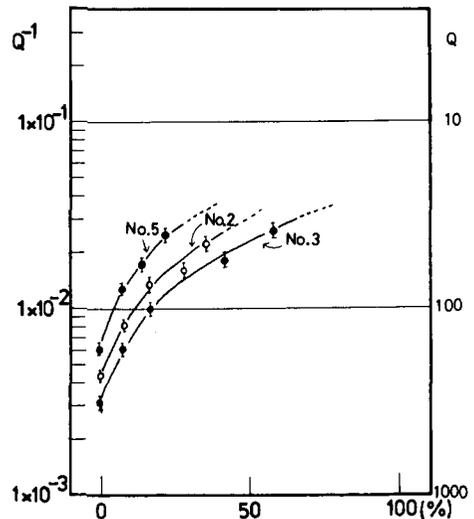


Fig. 7. Q versus the degree of water saturation.

告されている。BORN (1941) によれば岩石に水が含まれるとQ値の周波数依存性が顕著になる。従って今の実験の周波数  $f = 2 \sim 8$  KHz での結果が、地震波のような低周波に適應できるか否かは検討を要する。

## IV. 考 察

### IV-1 乾燥した試料の減衰の機構

乾燥した試料ではクラックの増加に伴ってQ値が減少する。常温、常圧のもとでは振動の減衰の原因を岩石内部のクラック面が相互にすべる際の摩擦によるとする説は有力である(例えば JACKSON and ANDERSON(1970), GORDON and DAVIS(1968))。ここではこの立場から結果を考察する。WALSH(1966)は岩石中に存在するクラック面の摩擦による減衰の理論を提案している。先に熱応力によって生じたクラックは縦軸と横軸の比が  $10^{-3}$  に近い扁平な回転楕円体で近似できるとした。これは長軸を1mmとすると短軸は1ミクロンとなる。生じたクラック面の凸凹のために面は点接触の状態にあると考えてみる。これをFig. 8中に示されるような一辺2cのクラックでモデル化しこのクラックが相互にすべることによって振動エネルギーが失なわれるものとする。クラックはランダムに配置しているものとする。この時、WALSHによれば棒の縦振動については、 $Q^{-1}$  値は次のように表わされる。

$$Q^{-1} = \frac{1}{15} \cdot \frac{E_0}{E} \cdot \left[ 2\mu - \mu^2 \frac{3+2\mu^2}{(1+\mu^2)^{3/2}} \right] \cdot \frac{Nc^3}{V} \quad (3)$$

ここで、 $E_0$  : 媒質のヤング率、 $E$  : intrinsic なヤング率、 $\mu$  : クラック面の摩擦係数、 $N$  : クラックの数、 $V$  : 体積である。ここで $Q$ 、 $E_0$ は実験から得られる。(1)式を次のように変形すると

$$(QE_0) = \left[ \frac{15 \cdot E}{(2\mu - \mu^2(3+2\mu^2)/(1+\mu^2)^{3/2})V} \right] \cdot \frac{1}{Nc^3} \quad (4)$$

(2)式において右辺の [ ] の中は、夫知の定数であるが、クラックの増加によるQ値への効果を考える時には不変の量である。 $N = N_0 + N_k$  ( $N_k$  : 熱応力によって新たに生じたクラックの数、 $N_0$  : 元の試料中のクラックの数) なる量で規格化すると、

$$\frac{(Q \cdot E_0)_k}{(Q \cdot E_0)_0} = \left( \frac{1+N_k/N_0}{1+N_k/N_0} \right)^{3/2} \cdot \left( \frac{1}{1+N_k/N_0} \right) \left( \frac{c}{C} \right) \quad (5)$$

となる。 $(Q \cdot E_0)_0$  は元の試料についての値、 $(Q \cdot E_0)_k$  はクラックが  $N_k$  だけ増加した時の値である。 $C$  は熱応力によって生じたクラックの平均のサイズ、 $c$  は元の試料中のクラックの平均のサイズ、である。Fig. 8は  $(QE_0)_k/(QE_0)_0$  と  $N_k$  の関係を示す。ここでは、観測した音波の数を  $N_k$  とし、 $C=c$  の場合につき  $N_0$  をパラメーターとした曲線である。実測値(黒丸印)とよく合

うのは  $N_0=200$  の場合である。パラメーター  $C$ ,  $c$ ,  $N_0$  の値の妥当性を他の手段で検討することはできないが、実測値の変化の傾向は近似できる。飽和度が0のときのクラックの増加に伴う  $Q$  値の変化は、その原因をクラックの摩擦によるものとして説明できる。この機構によれば  $Q$  値は周波数には依存しない。従って、Fig. 6 に示された関係は、乾いた岩石中にクラックが生じた時の速度と  $Q$  値の変化として、地震波のような低周波の場合にも適応できるものと考えられる。

#### IV-2 水で飽和された試料の減衰の機構

実験結果によれば、試料中の水の減衰に及ぼす効果は著しく、飽和度が0%から100%に変化すると  $Q$  値はほぼ一桁変化する。一般に減衰の原因はいくつかの機構が重畳したものと考えられる。先に飽和度0%の時の減衰の原因はクラック面の摩擦によるものが主たる原因であろうとした。飽和度の小さい時の減衰の原因は、クラック面の摩擦によると推測される。しかし試料が水で飽和されると  $Q$  値が約1桁減少することは、クラック面の摩擦による効果だけでは説明がつかない。例えば、(3)式において試料が水で飽和されることによって変化する定数は  $\mu$  (クラック面の摩擦係数) である。JAEGER and COOK (1969) によれば、鉱物の摩擦係数は水によって増加し、石英では0.11~0.19から0.42~0.65に増加する。これによって(1)式に従えば  $Q$  値は  $\frac{1}{4}$  程度に減少することになるが、一桁の減少は説明できない。従って、主たる原因を、他の機構に求めねばならない。ここでは WALSH (1969) に従って  $Q$  値の変化を考える。 $Q$  値の測定は棒の縦振動についてなされ、棒を伝わる速度は  $V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  で表わされる。従って測定される  $Q$  値は、複素弾性定数を使って  $Q^{-1} = 2V_L^*/V_L = E^*/E$  ( $E^*$ : 複素弾性定数の虚数成分) と表わせる。WALSHは、ペニー型のクラックを含む媒質の複素体積弾性定数  $K$ ,  $K^*$  と複素剛性率  $\mu$ ,  $\mu^*$  を導いている。今等方性媒質の弾性定数間の関係が複素弾性定数間にも成り立つとすると、

$$Q_E^{-1} = \frac{E^*}{E} = \left\{ \frac{3\mu^*(K^2 + K^{*2}) + K^*(\mu^2 + \mu^{*2})}{3\mu(K^2 + K^{*2}) + K(\mu^2 + \mu^{*2})} \right\} \quad (6)$$

と表わされる。 $K$ ,  $K^*$ ,  $\mu$ ,  $\mu^*$  を WALSH (1969) に従って計算した。matrixの弾性定数は速度を計算した時のものと同じである。包含物質が空気の場合  $(Q_E^{-1})_{dry}$  と水の場合  $(Q_E^{-1})_{wet}$  について計算し、 $(Q_E^{-1})_{dry}$  と  $(Q_E^{-1})_{wet}$  との比を、空隙率をパラメーターとして示したものが Fig. 9 a である。横軸は  $\alpha$  (クラックの縦軸と横軸の比) である。包含物が空気の場合は飽和度0%の結果に対応する。先に推測した  $\alpha = 10^{-3}$ , 空隙率0.5%~1.5%では、 $Q_E$  は空隙が水で飽和されると約1/20に減少することを示している。この変化は実験による  $Q$  値の一桁程度の減少と

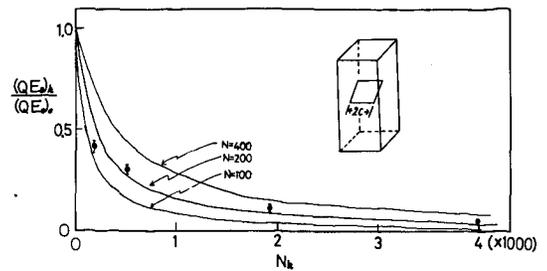
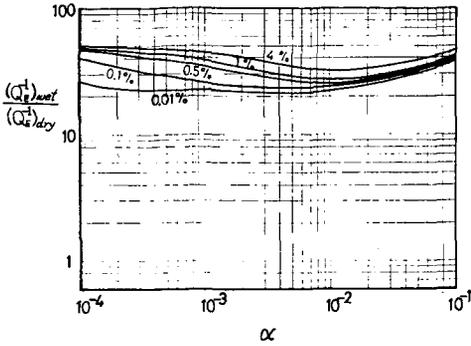
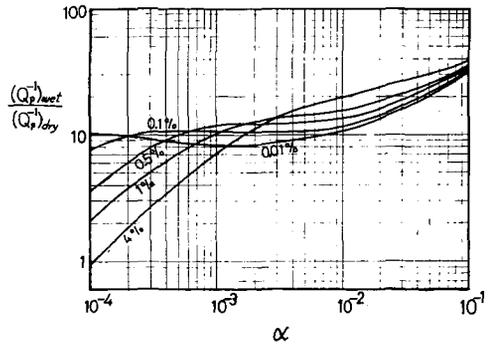


Fig. 8.  $(QE_o)_k$  versus the acoustic emission counts.  $(QE_o)_k$  is normalized with reference to the value of the original specimen. The curves are calculated by WALSH (1966). The insert figure represents the crack model.



**Fig. 9a.** Ratio  $(Q_E^{-1})_{wet}$  to  $(Q_E^{-1})_{dry}$  versus aspect ratio with parameter of porosity.  $Q_E^{-1}$  is internal friction for bar velocity.  $(Q_E^{-1})_{wet}$  is the value of air saturated specimen and  $(Q_E^{-1})_{dry}$  is the value of water saturated one.



**Fig. 9b.** Ratio  $(Q_p^{-1})_{wet}$  to  $(Q_p^{-1})_{dry}$  versus aspect ratio with parameter of porosity.  $Q_p^{-1}$  is internal friction for the compressional velocity.  $(Q_p^{-1})_{wet}$  is the value of the water saturated specimen and  $(Q_p^{-1})_{dry}$  is the value of the air saturated one. The calculation is based on WALSH's theory(1969).

よく一致する。

同様に、

$Q_p^{-1} = (K^* + 4/3\mu^*) / (K + 4/3\mu)$  を計算したものが Fig.9b である。  $Q_p$  も空隙が水で飽和されると  $\alpha > 10^{-3}$  では  $Q_p$  が約 1/10 に減少することを示している。

WALSH の理論は 2 成分系の媒質の弾性定数を表わす式の包含物の剛性率を  $i\omega\eta$  ( $i$ : 虚数単位,  $\omega$ : 周波数,  $\eta$ : 粘性係数) で置き換えて複素弾性定数を得るものであり、減衰は流体の粘性によるものである。 Fig.9.a.b. の結果は  $\omega = 10\text{KHz}$  とした結果である。  $Q^{-1}$  値の変化の傾向は低周波の場合にも保存される。しかし、含水岩石の減衰を、WALSH(1969) によって説明できるか否かを定めるためには、今後さらに広い周波数範囲にわたる実験が必要である。

#### IV-3 $V_L$ と $Q$ の関係

以上の実験結果をまとめたのが Fig.10 である。縦軸には  $Q^{-1}$  値、横軸には  $V_L$  をとってある。実線は飽和度 0% でクラック密度が増加する時の変化を点線はクラック密度が一定で飽和度が変化した時の結果を示す。括弧内の値は飽和度を示している。飽和度が増加しても  $V_L$  はほとんど変化していないが、Table 2 に示されるように  $V_p$  は顕著な増加を示す。これは、 $V_L$ ,  $V_p$  は各々

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad , \quad V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (7)$$

と表わされ、含水によって試料の  $E$  (ヤング率) はほとんど変化せず、 $\nu$  (ポアソン比) が増加するためである。飽和度が 0% でクラック密度が増加する時の  $V_L$  の変化は、 $V_p$  の変化と同様で

ある。以上の結果は地殻を構成する代表的な岩石である花崗岩についての結果である。

これらのことから縦波の減衰に及ぼす効果は次のように予想される。体積膨張に伴って乾いた岩石中のクラックが増加すると速度とQ値は共に減少する。その減少の程度は、(3)式で代表される。さらに体積膨張によって生じた空隙が水で満たされると、速度は増加するが、それに対応する $Q^{-1}$ 値の変化は、今の実験結果だけでは予想できない。

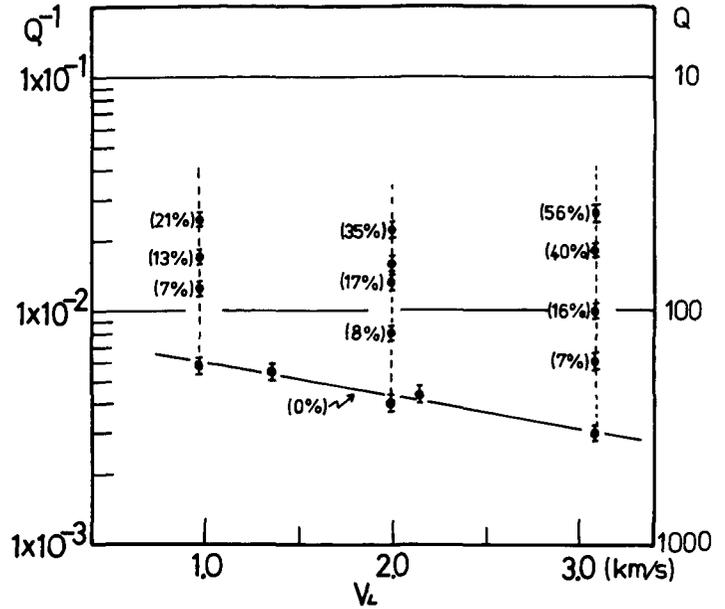


Fig. 10. Relation between  $Q^{-1}$  and  $V_L$ . The values in parentheses represent the degree of saturation in percentage.

地震の前兆現象としてのP波速度の変化に関する研究は多くなされているが地震に先行するP波速度の減少は高々10~20%程度である(例えば WHITCOMB, et al.(1973)).この変化をクラックの増加によるものとすれば、この変化に伴うQ値の変化を、実験式(3)から評価すると10~20%程度の減少になる。この程度のQ値の変化を地震学的に検出することは現在では困難であろう。

OKADA, et al.(1970)は松代群発地震の後に松地域域における人工地震探査の結果から、群発地震の顕著であった領域は周囲の地殻に較べてP波速度が約6%低いと報告している。さらにSUZUKI (1971)はこれらの領域のQ値が周囲の地殻よりも1/20低いとしている。これらの変化を群発地震活動に起因するものとする、その変化の原因の1つとして、群発地震活動の顕著な領域が高度に破碎されていることが考えられる。しかし今の実験結果から考えると、この原因だけからは、速度が6%減少したのに伴ってQ値が1/20に減少することは考えにくい。その2つの量の変化を统一的に説明するためにはさらに他の原因を考えなければならない、その1つの可能性として含水量の変化が挙げられよう。岩石中の水は今の実験結果では顕著にQ値を減少させるが、これは今後、広い周波数範囲について調べる必要がある。

### V ま と め

縦波の減衰に及ぼすクラックと水の効果を花崗岩を使って実験的に調べた。花崗岩のクラック密度の変化は熱応力によって微小クラックを発生させることによった。試料が少ないこと、限ら

れた周波数での実験であること、等からみて実験は充分とは言えないが、結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 熱応力によって生じたクラックの平均的な型状は、縦軸と横軸の比が  $10^{-3}$  に近い偏平な回転楕円体で近似できる。その長軸は、実験に使用した波長に較べて短いと推測される。従ってこの実験では減衰に関して散乱の効果はないものと考えられる。
- (2) 試料の飽和度が 0% のときには、クラックの増加に伴って速度、Q 値共に減少する。その実験式として、

$$Q = 60V_L + 110$$

$$Q = 50V_p + 90$$

を得た。これは、試料中に  $\alpha = 10^{-3}$  程度の波長よりも短いクラックが増加してゆく時の、速度と Q 値の減少の程度を示すものである。この乾いた試料の内部摩擦の主たる原因は、試料中のクラック面における相互のすべりによる摩擦によると考えられる。

- (3) 試料中の水は Q 値を著しく減少させる。飽和度が 0% から 100% まで変化すると、Q 値は 1/10 程度に減少する。これは空隙中の流体の粘性によるものと考えられる。しかしこの結果は周波数 3 ~ 7 KHz における結果であり、低周波における Q 値の変化を推測するには、さらに広い範囲の実験が今後望まれる。

以上の実験結果から地震の先行現象としての P 波の速度変化に対応する Q 値の変化は次のように予想される。地殻の体積膨張によってクラックが増加することによって P 波速度が 10~20% 程度減少すれば、それに伴って Q 値も 10~20% 程度減少する。さらに生じた空隙中に水が流入すれば P 波速度は増加する。それに伴う Q 値の変化は、今回の実験から予想することは少し無理があるが、さらに減少する可能性が示唆される。

## 文 献

- BORN, W. T., 1941. The attenuation constant of earth material. *Geophys.*, **6**, 132-148.
- BRACE, W. F. and R. J. MARTIN, 1968. A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity. *Int. J. Rock Mech Min. Sci.*, **5**, 415-426.
- BRACE, W. F., P. W. PAULDING and C. H. SHOLZ, 1966. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.*, **71**, 3939-3953.
- BRACE, W. F. and A. S. ORANGE, 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1433-1445.
- BYERLEE, J. D., 1970. The mechanics of stick-slip. *Tectonophys.*, **9**, 475-486.
- GORDON, R. B. and L. A. DAVIS, 1968. Velocity and attenuation of seismic waves in imperfectly elastic rock. *J. Geophys. Res.*, **73**, 3917-3935.
- JACKSON, D. D., and D. L. ANDERSON, 1970. Physical mechanism of Seismic-wave attenuation. *Rev. Geophys.*, **8**, 1-63.
- JAEGGER, J. C. and N. G. W. COOK, 1969. Fundamental of rock mechanics. *Methuen, London*, 55pp.
- NUR, A. and G. SIMMONS, 1969. The effect of saturation on velocity in low porosity rocks. *Earth and Planetary Science Letter*, **7**, 189-193.
- NUR, A., 1972. Dilatancy, ore pressure and premonitory variation of travel times. *B. S. S. A.*, **62**, 1217-1222.
- OKADA, H., S. SUZUKI and S. ASANO, 1970. Anomalous underground structure in the Matushiro earthquake

- swarm are as driven from fan shooting technique. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **45**, 417-471.
- SHOLZ, C. H., 1968. Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1417-1431.
- SCHOLZ, G.H., L.R.SYKES and Y.P.AGGARWAL, 1973. The physical basis of earthquake prediction. *Science*, **181**, 803-810.
- SUZUKI, S., 1971. Anomalous attenuation of p waves in the Matsushiro earthquake swarm area. *J. Phys. Earth*, **20**, 1-21.
- WALSH, J. B., 1966. Seismic wave attenuation in rock due to friction. *J. Geophys. Res.*, **71**, 2591-2599.
- WALSH, J. B., 1969. New analysis of attenuation in partially melted rock. *J. Geophys. Res.*, **74**, 4333-4337.
- WHITCOMB, J. H., J. D. GARMANY and D. L. ANDERSON, 1973. Earthquake prediction : variation of seismic velocities before the San Francisco earthquake. *Science*, **180**, 632-635.