

定応力下にある花崗岩の変形・弾性波速度変化・ 微小破壊活動について

増田幸治*

Koji MASUDA (1998) Strains, elastic-wave velocities, and acoustic emissions during the creep of granitic rocks. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 49, (4), p. 147-155, 9 figs., 1 table.

Abstract: A series of creep experiments of granitic rocks were carried out under the confining pressure of 50 MPa. Time to failure depends logarithmically on the stress level applied. Creep curves show three stages of typical creep deformation; the primary creep, the secondary creep and the tertiary creep. Time to onset of the tertiary creep normalized to the failure time has no relationship with the stress level. Elastic-wave velocities decrease after the onset of tertiary creep. Based on the calculation using the data of elastic-wave velocities and dilatant strains, aspect ratios of cracks increase during the creep. Activities of acoustic emission (AE) increase prior to the failure. Time to onset of increase of AE activity normalized to the failure time is longer as the stress level decreases.

要 旨

封圧50MPa下にある花崗岩に差応力を加えクリープ破壊実験を行った。クリープ破壊までの時間の対数はクリープ設定応力に比例する。変形曲線は1次クリープ, 2次クリープ, 3次クリープの3段階の変形様式を示す。体積歪曲線から読み取ったクリープ破壊までの経過時間に対する3次クリープ開始時期は, クリープ設定応力とは関係なくほぼ同じである。試料中を伝播する弾性波速度は破壊直前で減少するが, この時期は変形から推定された3次クリープ開始より遅い。クリープの進行とともにクラックのアスペクト比が大きくなっていくことが, 弾性波速度変化と非弾性体積歪のデータより分かった。微小破壊(AE)は破壊直前にその発生率が増加する。AEが増加し始める時期は, クリープ設定応力が小さいほど破壊時に近づく。

1. はじめに

岩石は差応力を一定に保持した応力状態下に置くと, ゆっくりとした変形が進行し, ある時間経過したのち突然破壊に至る。この現象をクリープ破壊, 遅れ破壊, または静疲労という。このような非常にゆっくりとした変形速度での岩石の変形や破壊を調べることにより, 自然界での定応力状態または非常にゆっくりとした変形による破壊について考察する手掛かりを得ることができる。本報告では, 花崗岩のクリープ実験を破壊に至るまでの時間が約 10^2 - 10^5 秒の範囲で行った結果を述べ, このよう

な変形速度が遅い場合の岩石の変形・破壊過程には, 応力腐食反応によって代表される水が関係した化学反応が重要な役割を果たしていることを示す。

2. 実験方法

試料にはインド産花崗岩を用いた。試料を直径25mm長さ62.5mmの円柱形に整形した。すべての実験は50MPaの封圧下で行った。封圧を加えた後, クリープ設定応力値まで加圧速度1.7MPa/sで試料に差応力を加え, その後クリープ破壊を起こすまで差応力を一定に保った。封圧50MPaにおける, この加圧速度での試料の破壊強度は776MPaである(Masuda *et al.*, 1987)。第1表にクリープ設定応力と破壊までの時間のまとめを示す。

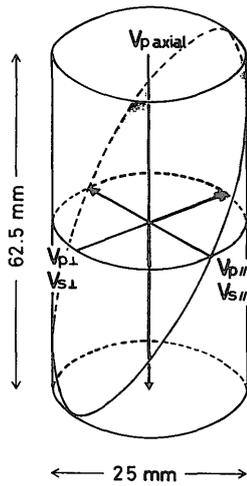
実験中, 試料の圧縮軸方向と周方向の歪, 弾性波速度変化, 微小破壊(アコースティック・エミッション, AE)の発生数を測定した。第1図は試料の形と最終破壊面の位置を示す図である。実験に用いた試料はすべて同じ岩石ブロックから同じ方向にコアリングして作成した。これら試料は圧縮実験を行った場合同じ方向に破壊面を形成して破壊に至ることが以前の実験で分かっているのので, あらかじめ最終破壊面の位置を予測することができる(Masuda *et al.*, 1987, 1988)。クリープ実験中, 軸応力に垂直な面内で最終破壊面に沿う方向に伝播するP波速度($V_{p||}$), S波速度($V_{s||}$), 同じ面内で最終破壊面に直行する方向に伝播するP波速度($V_{p\perp}$), S波速度($V_{s\perp}$), 軸応力方向に伝播するP波速度($V_{p\text{ axial}}$)をそれぞれ測定した。S波の振動方向は水平面内である。P波速度の測定

*地震地質部 (Earthquake Research Department, GSJ)

Keywords: rock fracture, creep, acoustic emission, stress corrosion

第1表 クリープ設定応力(σ)とクリープ破壊までの時間(t_f)
 Table 1 The differential stress(σ) at which the test was conducted and the time to failure(t_f).

No.	σ (MPa)	t_f (s)
1	716.9	1.13×10^2
2	694.6	6.00×10^3
3	705.3	6.80×10^3
4	686.8	4.48×10^4
5	671.1	9.36×10^4
6	674.6	1.12×10^5
7	657.8	1.70×10^5
8	652.3	3.10×10^5
9	679.2	$> 4.00 \times 10^6$



第1図 最終破壊面と測定した弾性波速度の伝播経路。
 試料は直径25mm,長さ62.5mmの円柱形。影を付けた面で試料が破壊した。
 Fig. 1 Location of fractured surface and paths of elastic waves measured during the experiments. Sample shape is circular cylinder with 25mm diameter and 62.5mm length. Shaded plane indicates the location of fractured surface.

時の波形記録がすべて得られた実験についてはP波の減衰も調べた。

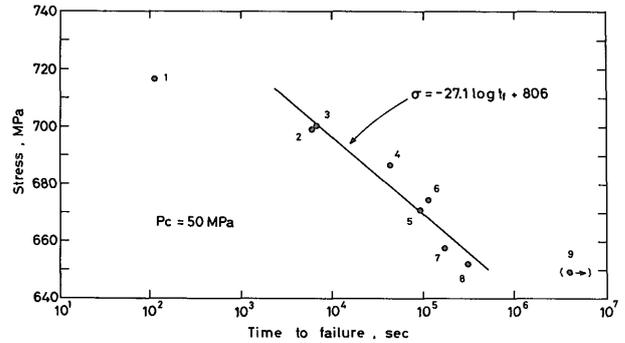
3. 実験結果

3.1 クリープ破壊までの時間

クリープ設定差応力と破壊までの時間との関係を第2図に示す。 σ はクリープ実験での設定差応力, t_f は差応力設定後試料が破壊するまでの時間である。第2図のデータポイントの番号は第1表の実験番号(No.)に対応する。破壊までの時間 t_f と差応力 σ の間には

$$t_f \propto \exp(-C\sigma) \quad (1)$$

という関係がある(例えば, Scholz, 1968; Kranz and Scholz, 1977; Kranz, 1980; Kurita *et al.*, 1983)。ここ



第2図 クリープ設定応力と破壊までの時間。直線は第1表の実験No. 2-8のデータに最小自乗法で計算した。
 Fig. 2 Differential stresses vs. time to failure. Straight line is calculated with the least squares method to fit to the data No. 2-8 listed in Table 1.

でCは定数である。破壊までの時間が特に短いNo. 1の結果と破壊に至る前に実験を中止したNo. 9の結果を除くNo. 2-8のデータは(1)式の関係とよく一致する。そこでNo. 2-8の実験データに対して

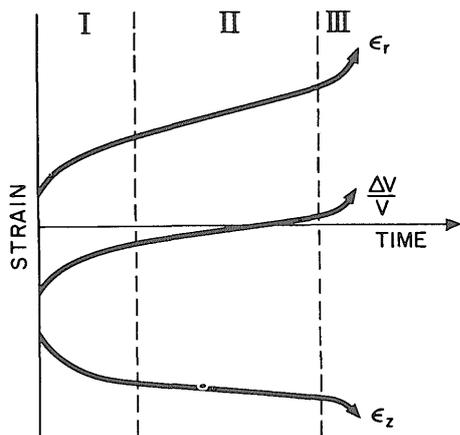
$$\sigma = -C \log t_f + D \quad (2)$$

という関係式を適用して最小二乗法で係数を計算した直線を第2図に示した。係数の値は, $C=27.1$, $D=806$ である。

(1)式あるいは(2)式はScholz (1968)の理論や本報告で示す腐食環境下でクラックが準静的に進行するというモデルで説明される。しかし, 高応力下(No. 1)や低応力下(No. 9)ではそれらの理論を適用できない。このことは定性的には次のように説明される。高応力下(No. 1)ではクリープ設定応力が破壊強度に近くなるので, クラックの静準的成長よりクラックの合体など, クラック間相互作用による破壊メカニズムが一定応力を加えた直後から優勢になり, 応力腐食理論で予想される時間より短い時間で破壊が起こる。低応力下(No. 9)ではマイクロクラック先端付近の応力集中部における応力値が小さくなり応力腐食によるクラック成長を妨げることになる(Scholz, 1968b)。本報告では, 応力腐食のメカニズムが変形や微小破壊の進行を支配していると思われる応力領域での実験(No. 2-8)について議論する。

3.2 歪の変化

試料の中央部の3箇所では圧縮軸方向の歪と周方向の歪をそれぞれ測定した。Yanagidani *et al.* (1985)はクリープ時に発生するAEの震源分布と18枚の歪ゲージを用いた表面歪のマッピングを行い, 微小破壊や変形の空間分布の時間変化を示した。Kurita *et al.* (1983)はホログラフィーを使ってクリープに伴う岩石表面の歪分布の変化の様子を調べている。Lockner and Byerlee (1980)もAE震源分布の時間変化から岩石内の微小破壊の分布を調べている。本報告では3箇所では測定した歪の値を平

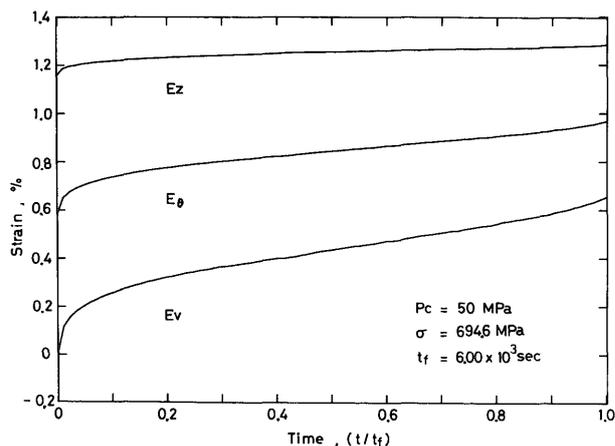


第3図 クリープ実験時の試料の歪変化の模式図。1次クリープ、2次クリープ、3次クリープの3段階に分けられる。
Fig. 3 Schematic drawing showing a typical creep curve. Three stages of creep, primary (I), secondary (II) and tertiary (III), are shown.

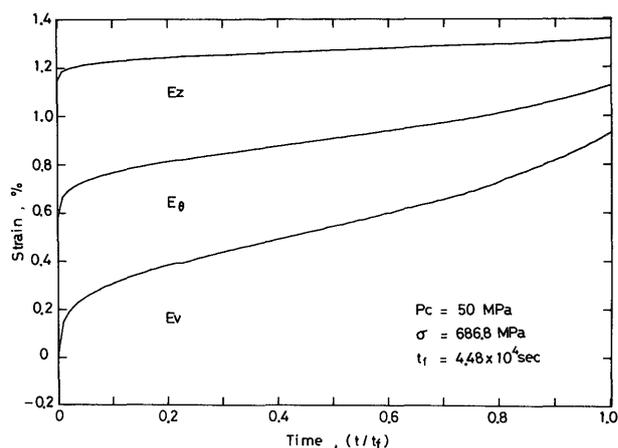
均して試料の変形とした。1点のみの歪測定データのだけでは試料全体を表しているとは言えないからである。

今回の実験のような常温下での岩石の変形は、局所脆性破壊による微小非弾性変形の積分効果として説明される。このようなクリープを特に脆性クリープ (brittle creep) という。定応力のクリープは、歪変化の様子から一般的には第3図に模式的に示すような3つの段階に分けられる。(1)クリープ開始直後、歪の変化速度が時間とともに減少する段階 (1次クリープ, primary or transient creep), (2)歪変化の割合が一定になる段階 (2次クリープ, secondary or steady state creep), (3)歪の変化速度が時間とともに加速する段階 (3次クリープ, tertiary creep), である。Kranz and Scholz (1977) は大気圧下でのクリープ実験の結果から、クリープ破壊に直接前駆する3次クリープの開始条件を見いだした。彼らによると、3次クリープの開始はクラックによる体積膨張がある一定の値に達したときであり、さらにこの値は応力レベルに無関係な岩石固有の値となる。

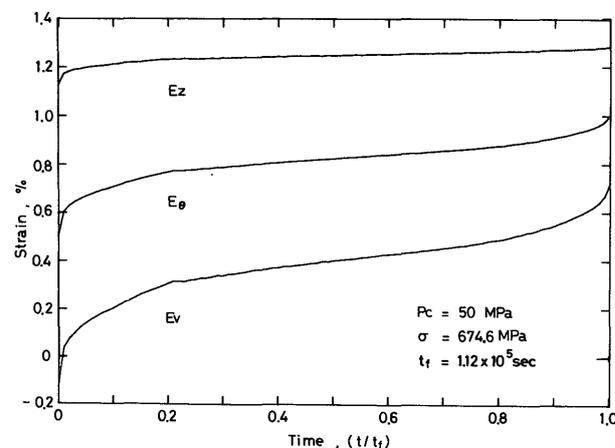
第4図に第1表で示した実験No. 2, 4, 6について、試料の歪変化 (クリープ曲線, 変形曲線) を示す。 E_z は圧縮軸方向の歪, E_θ は周方向の歪, E_v はそれらから計算した体積歪である ($E_v = E_z + 2E_\theta$)。横軸はクリープ応力設定時から破壊までの時間 (t_f) で規格化した経過時間 (t) である。第4図のクリープ曲線では、歪の各成分とも3段階の変化に対応した変化を示している。圧縮軸方向の歪 (E_z) は周方向の歪 (E_θ) に比べて変化の割合が小さく、特に3次クリープについてはその開始時間や変化があまり明瞭でない。周方向の歪 (E_θ) については1次クリープ, 2次クリープ, 3次クリープがすべての実験ではっきり観測された。これは、クリープが進行するにつれて圧縮軸に平行なクラック面を持つクラックが卓越す



(a)



(b)



(c)

第4図 試料の歪変化(a)実験No. 2, (b)No. 4, (c)No. 6。横軸の時間は破壊までの時間に対するクリープ経過時間の割合。
Fig. 4 Strains vs. elapsed time normalized by time to failure; (a) run No. 2, (b) No. 4, and (c) No. 6,

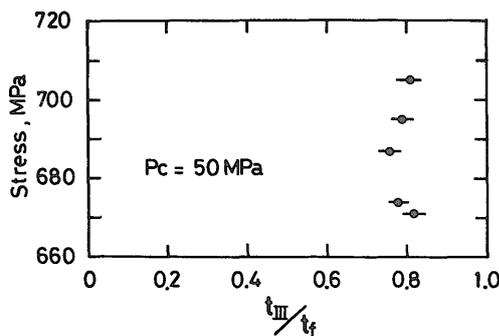
ることによる。これについては、Kranz(1979a)がSEM(走査型電子顕微鏡, Scanning Electron Microscope)で直接クラックを観察した研究で示している。体積歪 E_v を表すクリープ曲線では、よりはっきりとクリープの3つの段階が観測される。クラックの成長、試料の非弾性的体積歪は3次元的な量として観測されるので、 E_v の変化が最もよくその特徴を表していると考えられる。

体積歪のクリープ曲線から3次クリープの開始時間を読み取った。3次クリープが始まる時間を t_{III} としてクリープ破壊までの時間 t_f との比、 t_{III}/t_f とクリープ設定応力 σ との関係を図5に示す。No. 7, 8の2つの実験については実験中に3対の歪ゲージのうち1対が断線し、試料3箇所の変位測定が不完全なためこの考察からは除いた。これらは変形の異方性のため他のクリープ曲線とは異なった変化を示した。第5図からは3次クリープ開始時期 t_{III}/t_f の応力(クリープ破壊時間)依存性は見られなかった。周方向歪 E_θ のクリープ曲線からも3次クリープ開始時間が読み取れるが体積歪 E_v のクリープ曲線から読み取ったデータとほぼ同じ結果が得られた。Kranz and Scholz(1977)は大気圧下でのクリープ実験で t_{III}/t_f は応力に依存しないという結果を得ている。彼らによると、3次クリープ開始時期は Barre Granite で破壊までの時間のほぼ半分、Cheshire quartzite で約90%と岩石によって異なる。この t_{III}/t_f は封圧によっても変わるかもしれないが、これは今後の課題の一つである。

第6図に実験 No.2の歪データから非弾性体積歪をプロットした図を示す。非弾性体積歪は体積歪のうち、非弾性的な増加部分で、岩石試料内部に発生した微小クラックによる体積増加に相当する。第6図では縦軸、横軸とも対数である。非弾性体積歪も破壊が近づくに従って加速的に増加する。破壊時間の60%くらいまでは、非弾性体積歪 (E^{Dv}) とクリープ経過時間 (t) の間には

$$\log E^{Dv} \propto \log t \quad (3)$$

という関係がある。他の実験でも破壊時間の50%くらいまでは(3)式の関係が成り立っている。



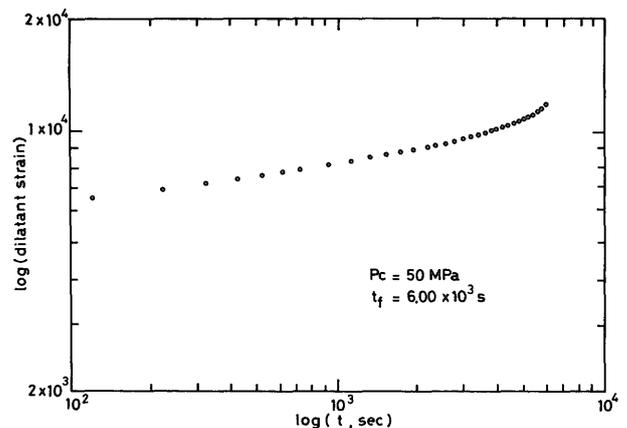
第5図 3次クリープが始まる時間(t_{III})のクリープ破壊時間(t_f)に対する割合(t_{III}/t_f)とクリープ設定応力の関係。
Fig. 5 Time to start tertiary creep (t_{III}) normalized by time to failure (t_f) vs. creep stress.

3.3 弾性波速度の変化

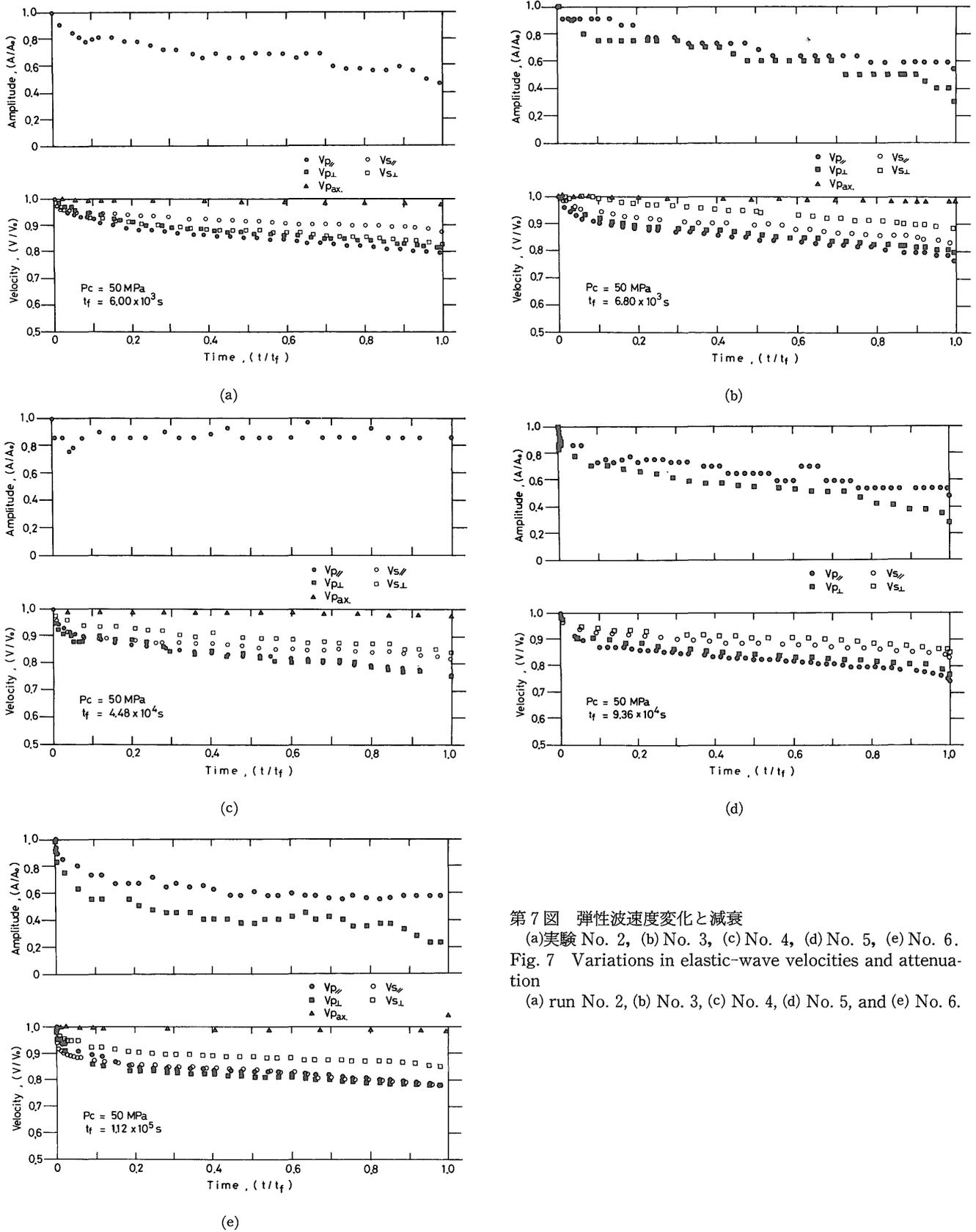
第7図に弾性波速度と減衰変化の様子を示す。圧縮軸に直角な方向に伝播するP波、S波ともに同じような変化を示す。クリープ開始直後は弾性波速度は急に減少するが、変化の割合は時間の経過とともに小さくなる。この時期はクリープ曲線に見られる1次クリープの時期と対応する。次に一定の割合で弾性波速度が減少する。この時期は2次クリープに対応する。クリープ曲線に見られたような3次クリープに対応する弾性波速度の急激な変化は破壊直前の t/t_f が95%くらいの時期から見られた。クリープ曲線では3次クリープが t/t_f が80%あたりから見られ、3次クリープの始まりに関しては弾性波速度の変化と歪の変化とは対応していない。弾性波速度の変化 V/V_0 については、P波の方がS波より小さくなる。破壊直前の弾性波速度についてもP波はクリープ開始時の速度 V_0 のほぼ80%近い値になるのに対して、S波の速度は85%前後である。

圧縮軸方向に伝播するP波速度については、破壊までほとんど変化が見られなかった。これは圧縮軸方向と平行な面をもつクラックが発生・成長するため、圧縮軸方向に伝播するP波の速度はあまり影響を受けないことによる。

弾性波の振幅の絶対値は、センサーと試料のカップリングをはじめとして各実験で全く同じ状態を再現することが困難なため測定が難しい。そこで振幅の相対変化を測って減衰とした。P波の波形データの最初の振幅を測って A とし、クリープ開始時の A を A_0 としてその比 A/A_0 で表した。 A/A_0 のデータは弾性波速度のデータに比べてばらつきが大きい。弾性波速度と同様な変化を示している。クリープ開始直後は A/A_0 が急に小さくなり、以後変化の割合が小さくなる。 A/A_0 が長期的に一定の割合で減少する時期が続く。破壊直前には振幅は急に小さくなる



第6図 体積膨張歪と経過時間(実験 No. 2).
Fig. 6 Dilatant strain vs. elapsed time (run No. 2).



第7図 弾性波速度変化と減衰

(a)実験 No. 2, (b) No. 3, (c) No. 4, (d) No. 5, (e) No. 6.
 Fig. 7 Variations in elastic-wave velocities and attenuation

(a) run No. 2, (b) No. 3, (c) No. 4, (d) No. 5, and (e) No. 6.

る。破壊直前の変化の割合は弾性波速度変化よりも大きく、破壊の先行現象としては弾性波速度の変化よりも減衰の変化の方が顕著である。

伝播方向による弾性波速度変化と最終破断面の方向との関係については、Soga *et al.* (1978), Granryd *et al.* (1983), Kurita (1986) らは封圧下の1軸圧縮実験で、最終破断面に直交する方向でP波速度が最も大きく減少することを報告している。今回の実験ではP波速度の変化に伝播方向による有意な差は見られなかった。非弾性体積歪の異方性についても最終破断面の方向と有意な関係が見られなかった。これは、今回の実験で使用した岩石では破壊直前まで圧縮軸に平行なクラックの面が圧縮軸のまわりにランダムに配列していることを示す。S波については、最終破断面の方向とS波の伝播・振動方向との有意な関係は得られなかった。

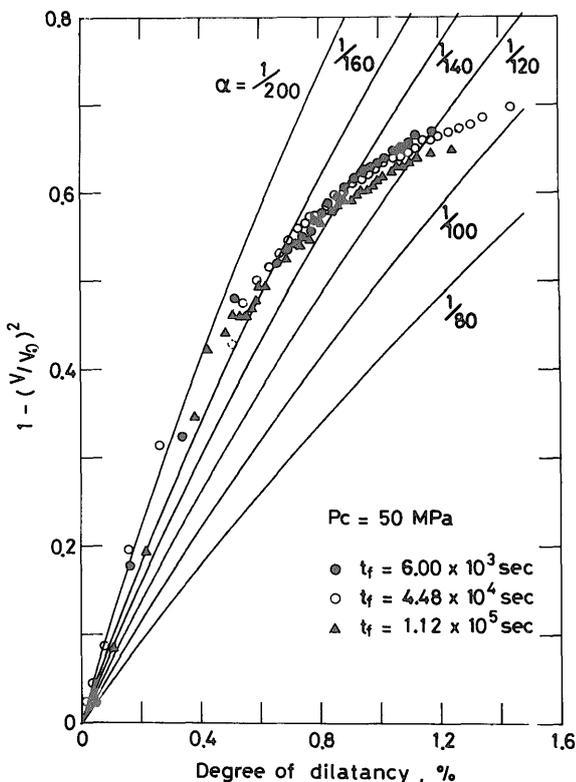
弾性波速度変化と非弾性的体積歪から、クラックのアスペクト比とその時間変化を推定した。第8図の曲線は、O'Connell and Budiansky (1974), Soga *et al.* (1978), Masuda *et al.* (1987, 1988) らの方法で計算したアスペクト比一定の場合の $1 - (V/V_0)^2$ で示した弾性波速度変化と非弾性体積歪との関係である(ただし乾燥状態、飽

和度 $\xi = 0$: Dry)。岩石内のクラックの形状や量を調べるのに、岩石内のクラックをSEM等を用いて観察することが行われている(例えば、Brace *et al.*, 1972; Sprunt and Brace, 1974; Olsson and Peng, 1976; Tapponnier and Brace, 1976; Kranz, 1979a, 1979b)。しかしそれらは実験終了後あるいは実験を途中で中止して試料を取り出し、stress freeの状態でも岩石内部を観察するもので、開いていたクラックが閉じるため(Kranz, 1979a) 差応力下でのクラックのアスペクト比を推定することはできない。今回用いたアスペクト比推定の方法は、弾性波速度変化と非弾性的体積歪という間接的な情報を使うものであるが、差応力下でのアスペクト比の推定には適している。第8図横軸の非弾性的体積歪は時間とともに増加するので、横軸はクリープの経過時間を表していると考えてもよい。クリープの進行とともにクラックのアスペクト比が大きくなっていくのが分かる。また、変形の後半部分では、破壊時間 t_f が長い実験ほど(クリープ設定応力が小さい実験ほど)クラックのアスペクト比が大きくなる傾向にある。

3.4 微小破壊 (アコースティック・エミッション, AE)

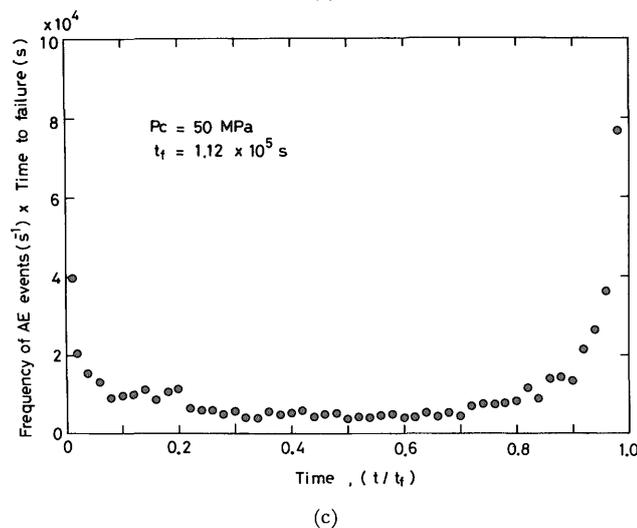
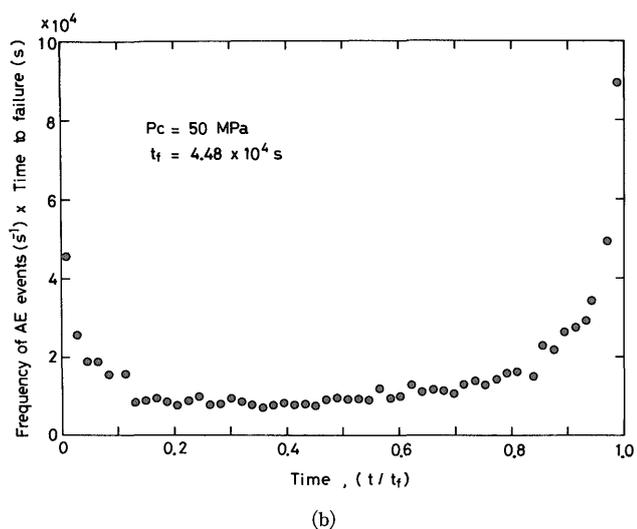
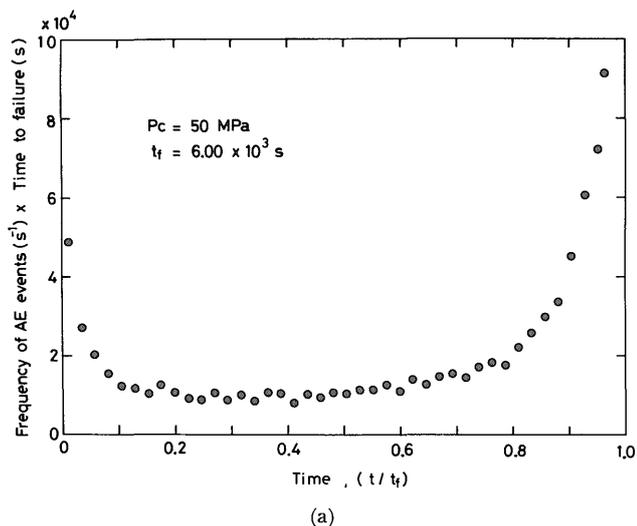
第9図にAE発生率と、クリープ経過時間(t)のクリープ破壊までの時間(t_f)に対する比(t/t_f)の関係を示す。縦軸はAE発生率(1秒あたりのAEカウント数)に破壊までの時間(t_f)をかけた量をプロットした。クリープ時に観測されるAEについてはOhnaka (1983) や Nishizawa *et al.* (1985) などの研究がある。本報告ではAE発生率の変化から見た破壊前兆現象(AE発生率の破壊前の増加)についてクリープ応力(クリープ破壊までの時間 t_f) との関係を考察した。

第9図に示したようなAE発生率の変化は、すべての実験で同様な傾向を示し、次の3段階に分けられる。(1)クリープ開始直後のAE発生数が減少する段階。(2)AE発生率がほぼ一定の段階。(3)AE発生率が増加して試料の破壊に至る段階である。(3)の時期の始まり(t/t_f)は、 t_f が長い実験ほど遅くなる。クリープ曲線(変形曲線)では3次クリープ開始時期にクリープ設定応力依存性(t_f 依存性)が見られないことから、このAE発生率の急増は主に体積変化を伴わない微小破壊によるものである(Tapponnier and Brace, 1976; Kranz, 1979a, 1979b; Ohnaka, 1983)。クリープ破壊直前は既存のクラックの合体成長が加速度的に起こっていると思われる。クリープ設定応力が小さいほど(t_f が長いほど)岩石内部の応力集中部での応力値が小さく、クラック成長速度が遅くなると考えられるので、相対的に遅れてクラックの不安定成長・合体が始まると考えられる。



第8図 弾性波速度変化、 $1 - (V/V_0)^2$ と非弾性体積歪の関係。実験No. 2, 4, 6のデータをプロットした。曲線はアスペクト比一定の理論曲線

Fig. 8 Relationship between the variations in elastic-wave velocities ($1 - (V/V_0)^2$) and dilatant volumetric strains. Data from run No. 2, 4 and 6 are plotted. Theoretical curves showing the constant aspect ratio are also shown.



第9図 AE発生率の時間変化(a)実験 No. 2, (b) No. 4, (c) No. 6, 縦軸はAE発生率にクリーブ破壊までの時間を掛けた量。
Fig. 9 Frequency of AE event vs. elapsed time normalized by time to failure. (a) run No. 2, (b) No. 4, and (c) No. 6. Frequency of AE event is multiplied by time to failure.

4. 考 察

強度や変形などの岩石の破壊に関する諸過程が歪速度、水の存在、破壊までの時間によって大きく変わるといふ、破壊の環境依存性や時間依存性は応力腐食 (Anderson and Grew, 1977; Atkinson, 1982, 1984など) によるクラック成長に基づく理論的考察から説明されている (Masuda *et al.* 1987, 1988; 増田ほか, 1997)。岩石の変形過程では圧縮軸に平行なクラックが卓越して成長することが知られている。クラック先端の応力集中部では物質と腐食因子の間で化学反応が起こり、強度のより低い物質を生じ、その結果クラック先端部では局所的な破壊が進行してクラックが成長する。水が存在する場合、クラック先端部での Si-O 結合が水 (H₂O) と反応して結合力の弱い水素結合に置換される (例えば, Michalske and Freiman, 1982; Freiman, 1984)。したがって化学反応のための十分な時間があればクラックは低い応力レベルでゆっくり成長する。応力腐食による低速度のクラック成長の結果、クラックの長さがある臨界値に達した時、隣り合うクラック同士が次々につながってマクロな破壊面を形成する。このような力学的不安定によって岩石の破壊が引き起こされるという概念に基づいて、岩石の時間や水の存在に依存する力学的振る舞い(破壊強度、歪み、弾性波速度変化など)を定量的に説明するモデルが提案されている (Mizutani *et al.*, 1977, 1982; Sano *et al.*, 1981など)。

クリーブ破壊強度と破壊時間の関係について応力腐食によるクラック成長モデルでの説明を試みる。クラックの成長率 v は、H₂O の水蒸気圧が P_{H_2O} 、絶対温度 T の時、試料全体に外部から加えた応力を σ とすると、

$$v = A P_{H_2O} \exp \{-(U-fV^* \sigma)/(RT)\} \quad (4)$$

で表される (Wiederhorn, 1974)。ここで A と n は定数。 R はガス定数、 U は応力腐食過程の活性化エネルギー、 V^* は活性化体積、そして f はクラック先端部での応力値と試料全体に加えられた応力値の比で応力拡大率と呼ばれている。(4)式によると、クリーブ実験のように外力を一定に保持した場合、クラックは一定速度で成長する。クラックの平均的な長さ、 $\langle a \rangle$ 、がある値に達したとき(時間 t_f)に隣り合うクラック同士が次々につながって試料全体の破壊が起こるとすると、破壊が起こるときの時間 t_f でのクラックの平均的な長さ $\langle a \rangle$ は、時間 0 の時のクラックの平均的な長さを $\langle a_0 \rangle$ とすると、(4)式を積分して

$$\begin{aligned} \langle a \rangle &= \langle a_0 \rangle + vt_f \\ &= \langle a_0 \rangle + A P_{H_2O} \exp \{-(U-fV^* \sigma)/(RT)\} t_f \end{aligned} \quad (5)$$

となる。したがって(5)式より、

$$\log t_f = (-fV^*/2.30 RT) \sigma + B \quad (6)$$

を得る。ここで B は応力値 σ に無関係な定数である。

実験結果によるとクリーブ破壊までの時間の対数 $\log t_f$

はクリープ設定応力 σ に比例し(第2図), (2)式の関係がある。これは応力腐食モデルから導かれた(6)式と同じ形である。このことは応力腐食による低速度のクラック成長モデルで岩石のクリープ破壊強度と破壊時間の関係が説明できることを示している。

5. 結 論

封圧50MPa 下で花崗岩のクリープ破壊実験を行い、クリープ設定応力と破壊までの時間、試料の変形、弾性波速度変化、AE発生率のデータを得た。クリープ破壊強度については、応力腐食モデルによる解釈を行った。

謝辞 本報告の実験部分は名古屋大学理学部において行った。実験を進めるに当たって、実験実行当時のスタッフ・学生である、水谷 仁、山田功夫、出原 理の各氏の協力を得た。査読者の地殻物理部西澤 修氏からは原稿に対する有益なコメントをいただいた。

文 献

- Anderson, O. L. and Grew, P. C. (1977) Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **15**, 77-104.
- Atkinson, B. K. (1982) Subcritical crack propagation in rocks: theory, experimental results and applications. *J. Struct. Geol.*, **4**, 41-56.
- Atkinson, B. K. (1984) Subcritical crack growth on geological materials. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4077-4114.
- Brace, E. F., Silver, E., Hadley, K. and Goetze, C. (1972) Cracks and pore: A close look. *Science*, **178**, 162-164.
- Freiman, S. W. (1984) Effect of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4072-4076.
- Granryd, L., Getting, I. C. and Spetzler, H. (1983) Path dependence of acoustic velocity and attenuation in experimentally deformed Westerly granite. *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 71-74.
- Kranz, R. L. (1979a) Crack growth and development during creep of Barre granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**, 23-35.
- Kranz, R. L. (1979b) Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**, 37-47.
- Kranz, R. L. (1980) The effects of confining pressure and stress difference on static fatigue of granite. *J. Geophys. Res.*, **85**, 1854-1866.
- Kranz, R. L. and Scholz, C. H. (1977) Critical dilatant volume of rock at the onset of tertiary creep. *J. Geophys. Res.*, **82**, 4893-4898.
- Kurita, K. (1986) How can we identify location of a fracture plane? -Anisotropy of electrical conductivity and seismic velocity in dilatancy. *Earthquake Prediction Research*, **4**, 39-45.
- Kurita, K., Swanson, P. L., Getting, I. C. and Spetzler, H. (1983) Surface deformation of Westerly granite during creep. *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 75-78.
- Lockner, D. and Byerlee, J. (1980) Development of fracture plane during creep in granite. In Hardy, H. R. and Leighton, F. W., eds., *Proc. Second Conf. On Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*. Trans. Tech. Pub., 11-25.
- Masuda, K., Mizutani, H. and Yamada, I. (1987) Experimental study of strain-rate dependence and pressure dependence of failure properties of granite. *J. Phys. Earth*, **35**, 37-66.
- Masuda, K., Mizutani, H., Yamada, I. and Imanishi, Y. (1988) Effects of water on time-dependent behavior of granite. *J. Phys. Earth*, **36**, 291-313.
- 増田幸治・佐藤隆司・西澤 修 (1997) 岩石の変形・破壊過程における水の役割—実験的研究—。地調月報, **48**, 475-485.
- Michalske, T. A. and Freiman, S. W. (1982) A molecular interpretation of stress corrosion in silica. *Nature*, **295**, 511-512.
- Mizutani, H., Spetzler, H., Getting, I., Martin, R. J. III, and Soga, N. (1977) The effect of outgassing upon the closure of cracks and the strength of lunar analogues. *Proc. Lunar Sci. Conf. 8th*, 1235-1248.
- Mizutani, H., Spetzler, H. and Murakami, H. (1982) Brittle behavior of rocks at high pressure. In Akimoto, S. and Manghnani, M. H. eds., *High-Pressure Research in Geophysics, Adv. In Earth and Planetary Sciences 12*. Center for Academic Publications, Japan, Tokyo, 207-215.
- Nishizawa, O., Onai, K. and Kusunose, K. (1985) Hypocenter distribution and focal mechanism of AE events during two stage creep in

- Yugawara andesite. *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 36-52.
- O'Connell, R. J. and Boudianky, B. (1974) Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. *J. Geophys. Res.*, **79**, 5412-5426.
- Ohnaka, M. (1983) Acoustic emission during creep of brittle rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **20**, 121-134.
- Olson, W. A. and Peng, S. S. (1976) Microcrack nucleation in marble. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **13**, 53-59.
- Sano, O., Ito, I., and Terada, M. (1981) Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression. *J. Geophys. Res.*, **86**, 9299-9311.
- Scholz, C. H. (1968) Mechanism of creep in brittle rock. *J. Geophys. Res.*, **73**, 3295-3302.
- Soga, N., Mizutani, H., Spetzler, H. and Martin R. J. III (1978) The effect of dilatancy on velocity anisotropy in Westery granite. *J. Geophys. Res.*, **83**, 4451-4458.
- Sprunt, E. S. and Brace, W. F. (1974) Direct observation of microcavities in crystalline rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **11**, 139-150.
- Tapponnier, P. and Brae, W. F. (1976) Development of stress-induced microcracks in Westery granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **13**, 103-112.
- Wiederhorn, S. M. (1974) Subcritical crack growth in ceramics. In Bradt, R. C., Hasselman, D. P. H., and Lange F. F., eds., *Fracture Mechanics of Ceramics, Vol.2, Microstructure, Materials, and Applications*, Plenum Press, New York, 613-646.
- Yanagidani, T., Ehara, S., Nishizawa, O., Kusunose, K. and Terada, M. (1985) Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress. *J. Geophys. Res.*, **90**, 6840-6858.

(受付：1997年12月1日；受理：1998年1月14日)