

花崗岩の粒径が水圧破碎の破壊機構に及ぼす影響について

陳 渠¹・石田毅²・佐々木俊二³・松永烈⁴・水田義明⁵

¹正会員 工博 山口大学大学院工学研究科博士後期課程システム工学専攻

(現 応用地質 (株) oyo コアラボ) (〒330 大宮市宮原町 1-66-2)

²正会員 工博 山口大学助教授 地域共同研究開発センター

(兼 大学院工学研究科社会建設工学専攻) (〒755 宇部市常盤台 2557)

³理博 (財) 電力中央研究所我孫子研究所耐震部研究主幹 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

⁴工修 資源環境技術総合研究所地殻工学部地殻エネルギー研究室長 (〒305 つくば市小野川 16-3)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

粒子の大きさが異なる 4 種類の花崗岩を用いて、花崗岩の岩目に直交する方向に水圧破碎孔を削孔し、水圧破碎実験を行った。供試体は一辺 20cm の立方体とし、水平 2 方向にそれぞれ 12MPa, 6MPa の拘束圧を作用させた。鉱物粒子が大きな花崗岩では、岩目と平行な水平面に沿って亀裂が発生したのに対し、鉱物粒子が小さい花崗岩では、最大拘束圧方向の鉛直面に沿って亀裂が発生した。さらに、Acoustic Emission のメカニズム解は、鉱物粒子の大きな花崗岩では、亀裂がせん断破壊により生じたことを示すのに対し、鉱物粒子の小さな花崗岩では引張破壊が発生したことを示した。このことから、花崗岩の鉱物粒径が水圧破碎の破壊機構に大きな影響を及ぼすことがわかった。

Key Words: hydraulic fracturing, acoustic emission(AE), granite, grain size, rift plane, rock mechanics

1. はじめに

世界でも有数の火山国である日本にとって、乾燥した高温の岩体から地熱の抽出を行う高温岩体発電の実用化は、貴重な国産エネルギーの利用法として重要である。高温岩体発電においては、地下の高温の岩盤に向けて坑井を掘削し、この坑井に地表から高压の水を圧入し、岩盤内に熱交換を行うための亀裂を人工的に造成する。そして、この亀裂を貫くように別の坑井(生産井)を掘削し、地表から注入井を通して岩盤内に水を圧入することにより、生産井から熱水と蒸気を回収する。したがって、高温岩体発電システムの合理的な設計のためには、水圧によって発生させる人工亀裂の生成メカニズムの把握が重要である。また、土木、鉱山、地球物理、石油などの分野でさかんに利用されている水圧破碎による地圧測定法においても、その信頼性向上のためには水圧破碎の破壊メカニズムの把握が重要である。

水圧破碎による岩盤の破壊機構は、弾性論的には

引張破壊が予想される¹⁾にもかかわらず、現場実験などで観測される水圧破碎に伴う AE (Acoustic Emission) 弾性波動の解析結果からはせん断破壊が推定される²⁾⁻⁵⁾など、必ずしも十分な解明がなされているとはいえない。そこで、筆者らは、水圧破碎の破壊機構に影響を与える要因とその影響の程度を明らかにするため、まず破碎流体を用いずウレタン・スリーブで水圧破碎孔を内側から載荷して供試体を破碎し、これを通常の水圧破碎の実験結果と比較した⁶⁾。また、水に比べて大きな粘性を有する油を破碎流体に用いて水圧破碎実験を行い、これを通常の水を破碎流体に用いた水圧破碎の実験結果と比較して、水圧破碎における破碎流体の粘性の影響を検討した⁷⁾。

以上の筆者らの研究^{6),7)}は、同一の花崗岩を用いて水圧破碎の方法を変化させる実験であったが、逆に同一の破碎方法を用いて供試体の材質を変化させる実験は、一部では試みられているものの⁸⁾、十分には行われていない。そこで今回、粒子の大きさが

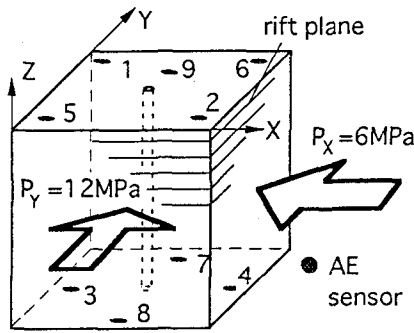


図-1 供試体の载荷状態及び供試体に設置したAEセンサーの位置(花崗岩のリフト・プレーンはXY平面に平行)

明らかに異なる4種類の花崗岩を入手して同じ方法で水圧破碎を行い、主にAEの測定により破碎機構の違いを検討した。その結果、興味ある知見が得られたので、以下に報告する。

2. 実験方法

(1) 岩石供試体

供試体に用いた岩石はいずれも花崗岩で、粒径の大きなものから順に、中国産桃色花崗岩、足尾沢入花崗岩、真壁小目花崗岩、中国産糠目花崗岩である。供試体の形状はいずれの花崗岩についても、図-1に示すように一辺20cmの立方体とした。花崗岩には一般に、最も割れやすい面(rift plane)、これに直交する2番目に割れやすい面(grain plane)、これら2面に直交する割れにくい面(hardway plane)の3つの石目がある。また、P波速度の測定を行うと、最も割れやすい面であるリフト・プレーン(rift plane)に直交する測線のP波速度が最小となることが知られている⁹⁾。そこで、P波速度の測定を行い、このP波速度が最小となる方向、すなわち、最も割れやすい面であるリフト・プレーンに直交する方向に直径1.0cmの水圧破碎孔を削孔した。供試体に対する座標軸を図-1に示すように定めた場合の、X,Y,Zの3方向のP波速度の測定結果を表-1に示す。

また実験終了後、実験に用いた供試体からX,Y,Zの3方向にコアを採取して直径3.0cm、長さ3.0cmの円柱形試料を作製し、X,Y,Zの3方向のコアに対し、それぞれにZ,X,Y方向に圧裂荷重を作用させY,Z,X方向の圧裂引張強度 T_y, T_z, T_x を求めた。その結果を表-2に示す。表中のひとつの強度を求めるのに3回の試験を行い、その平均値を示している。

()内の数値は標準偏差を示し、最小で0.15MPa、最大で2.74MPaであった。

表-1 実験に用いた花崗岩供試体のP波速度

供試体		P波速度 (km/s)		
岩石名	記号	V_x	V_y	V_z
中国産桃色	A	4.83	4.85	4.24
足尾沢入	B	4.48	4.37	3.59
真壁小目	C	5.18	5.01	4.94
中国産糠目	D	4.77	4.63	4.22

表-2 実験に用いた花崗岩供試体の圧裂引張強度

供試体		圧裂引張強度 (標準偏差) MPa		
岩石名	記号	T_x	T_y	T_z
中国産桃色	A	7.60 (0.15)	11.72 (2.74)	7.31 (0.44)
足尾沢入	B	8.22 (0.39)	10.38 (0.36)	5.82 (0.54)
真壁小目	C	11.04 (0.27)	9.52 (0.49)	9.11 (0.53)
中国産糠目	D	13.10 (0.41)	12.32 (0.79)	10.49 (0.65)

供試体に用いた4種類の花崗岩の偏光顕微鏡による観察結果を写真-1に示す。左は下方ポーラーのみ(Plane polarized light)を用いた場合を、右側は直交ポーラー(Crossed polarized light)を用いた場合の顕微鏡写真である。これらの写真より、4種類の花崗岩における粒径の違いは明らかである。それぞれの花崗岩の特徴は以下の通りである。

(A)中国産桃色花崗岩:粗粒で等粒状の黒雲母花崗岩で、構成鉱物は主に石英、カリ長石、斜長石および黒雲母より成る。カリ長石は1~4cmの粗粒を呈する。肉眼においてもカリ長石の配列に異性が認められ、この方向はP波速度から求められる花崗岩のリフト・プレーンの方向と一致する。

(B)足尾沢入花崗岩:等粒状組織の発達する黒雲母花崗岩で、構成鉱物はカリ長石、石英、斜長石より成り、苦鉄質鉱物として黒雲母を含有する。比較的連続性のよいクラックが発達する。また、次の真壁小目花崗岩に比べ、若干苦鉄質鉱物の含有量が多い。

(C)真壁小目花崗岩:細粒の等粒状組織を有する黒雲母花崗閃緑岩で、緑泥石化、炭酸塩鉱物化、絹雲母化および緑廉石化などの変質作用が多少認められる。構成鉱物は主に石英、斜長石より成り、カリ長石を伴う。苦鉄質鉱物としては、黒雲母の他に単斜輝石が含まれる。

(D)中国産糠目花崗岩:細粒の等粒状黒雲母花崗閃緑岩で、構成鉱物は、主に石英と斜長石より成り、カリ長石は比較的少ない。苦鉄質鉱物としては黒雲

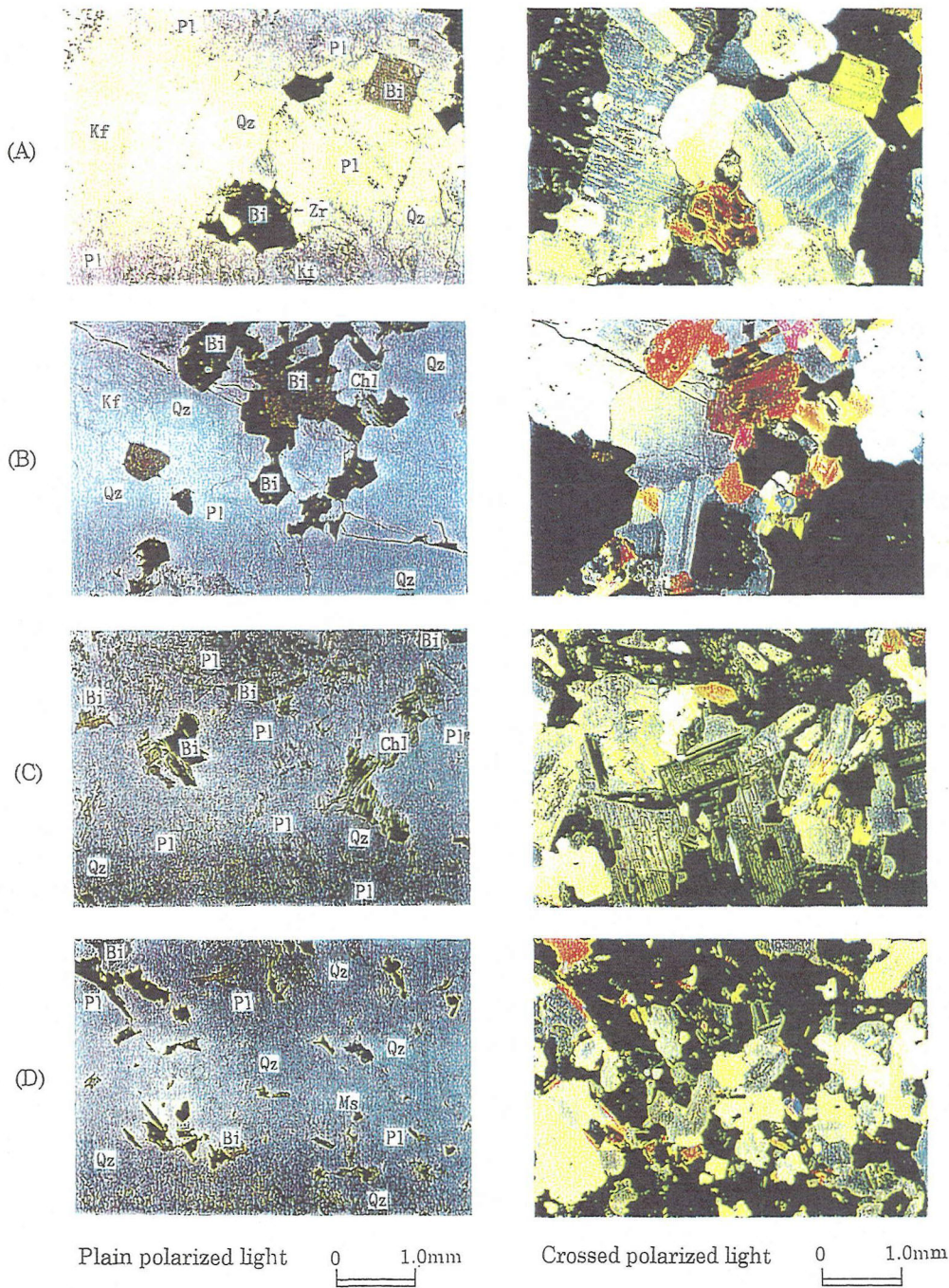


写真-1 透過光による供試体試料の顕微鏡写真。上から順に (A) 中国産桃色花崗岩, (B) 足尾沢入花崗岩, (C) 真壁小目花崗岩, (D) 中国産榎目花崗岩。左は下方ポラーのみ(Plane polarized light)を用いた場合, 右側は直交ポラー(Crossed polarized light)を用いた場合。写真中に示した記号は以下の通り。P1(Plagioclase:斜長石), Bi(Biotite:黒雲母), Qz(Quartz:石英), Kf(K Feldspar:カリ長石), Chl(Chlorite:緑泥石), Zr(Zircon:ジルコン), Ms(Muscovite:白雲母)。

母を含む。全般に変質は少なく新鮮である。

以下では簡単のため、粒径の大きなものから順に、A花崗岩、B花崗岩、C花崗岩、D花崗岩のように、適宜省略して呼ぶこととする。

(2) 実験装置

実験に用いた装置の模式図を図-2に示す。水圧破碎には図-3に示すような直径1.0cm、加圧区間の長さが5.0cmのメカニカル・タイプのダブル・パッカーを用いた。加圧区間への水の注入は、油圧ポンプからの油をブースター・ポンプにより水に変換し、送水流量が一定となるよう制御した。加圧時の送水流量は、タービン式微小流量計(感度1~40cm³/min;耐圧30MPa)から求め、圧力はパッカーへの加圧ラインの途中に設置した圧力変換器によって求めた。実験に用いた送水流量は、4.4~4.9cm³/minである。供試体への拘束圧は、厚さ0.6mmのステンレス鋼板を溶接して作製した厚さおよそ6mmのフラット・ジャッキを用い、水圧破碎孔をZ軸と平行としたとき、X、Y軸方向にそれぞれ6MPa、12MPaを載荷した(図-1参照)。これらの拘束圧の値は、圧力が5MPa以下ではフラット・ジャッキが十分ふくらまず供試体に均一に載荷できないこと、圧力が高くなると送水管やフラット・ジャッキ、パッカーが破損するなどの実験装置の制約により決定した。また、2方向の側圧を6MPa、12MPaと1:2としたのは、次の理由による。すなわち、弾性論に基づくKirschの解¹⁰⁾によれば、この載荷状態では、破碎孔の孔壁に作用する接線方向の直応力は、最小で6MPa(図-1の孔壁上のY座標最大及び最小の点)、最大で30MPa(孔壁上のX座標最大及び最小の点)の圧縮応力となる。したがって、孔壁上ではどの位置でも接線方向応力が圧縮応力状態にあり、かつY方向に亀裂が発生しやすい、安定した実験条件が得られると考えたからである。

(3) AEの測定方法

AEの測定は、AEの取りこぼしを防ぐため、A/D変換した波形データをただちにD/A変換して出力し、アナログ・データ・レコーダに収録する方法を採用した。このため、測定システムは図-4に示すように収録システムと再生用システムからなる。これは前報^{6),7)}と類似しているが、一部に前報とは異なる特性や仕様の機器を用いたので、前報の測定システムとの相違点に重点を置いて説明する。

収録用システムは図-4(a)に示すとおりで、AEセンサーには共振周波数500kHz、直径18mm、高さ18.5mmの円柱型センサー((株)エヌエフ回路設

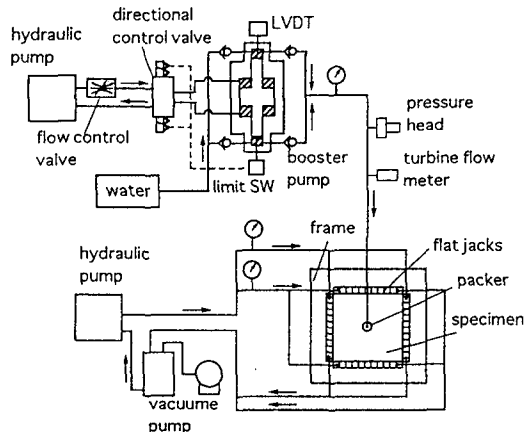


図-2 実験装置の模式図

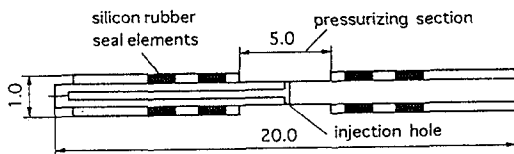


図-3. 実験に用いたダブル・パッカー(単位:cm)

計ブロック製、AE-904D型)を用いた。このセンサー合計9個を、加熱して溶融させたワックスを用いて、供試体の上下面に接着した(図-1参照)。センサーで受振したAE信号を合計80dB増幅し、これを波形記憶装置において、サンプリング・タイム0.2μsでA/D変換した後、ただちに5μsでD/A変換して出力し、アナログ・データ・レコーダ(ティアック(株)製、SR-51型)に記録した。この操作により、現象を5μs/0.2μs=25倍に引き伸ばしたことになる。アナログ・データ・レコーダはFM方式で、テープ速度は152.4cm/sとした。この速度での、データ・レコーダの測定帯域はDC~40kHzである。波形記憶装置へのトリガーには、3チャンネルOR論理のトリガー論理ボックスを用い、図-1の1,7,8のいずれか1つのセンサーからの信号が、80dB増幅後1.5V以上の振幅を有する場合に波形記憶装置にトリガーがかかるように設定した。

再生用システムは図-4(b)に示すように、データ・レコーダ、ADボードを内蔵したパーソナル・コンピュータ及び外付けのリムーバブル・ハード・ディスクからなる。実験終了後、この再生用システムを用い、収録時の1/128である1.19cm/sのテープ速度でAEデータを再生した。収録時に、A/D、D/A変換により25倍引き伸ばしているからトータルで

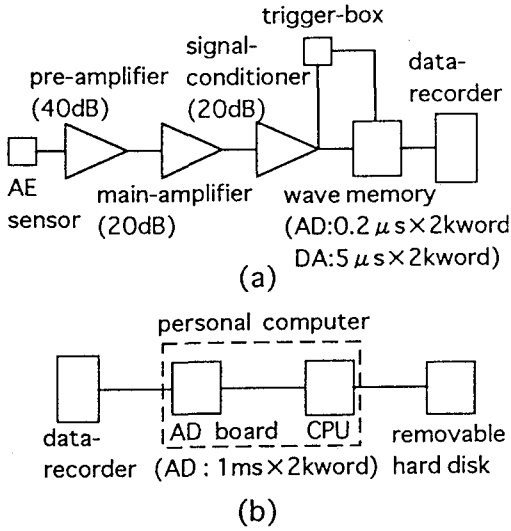


図-4 AE測定システム (a) 収録用システム
(b) 再生用システム

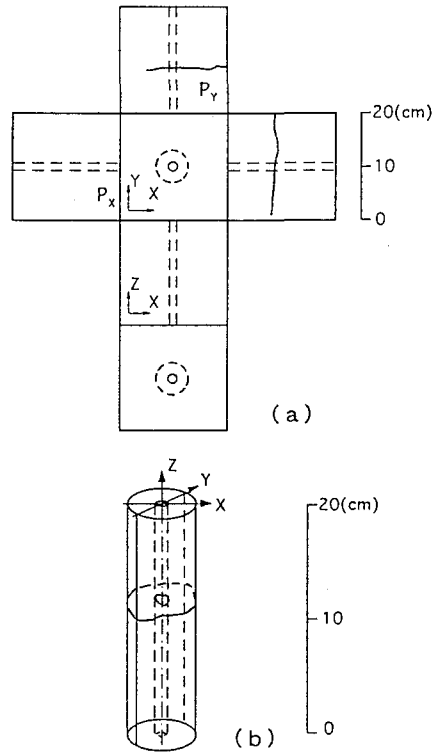


図-5 供試体の亀裂の観察記録の例 (A花崗岩の場合)
(a) 供試体表面での観察記録
(b) オーバー・コアリングしたコアの観察記録

実現象を $25 \times 128 = 3200$ 倍に引き伸ばしたことになる。この引き伸ばした再生信号をサンプリング・タイム 1ms, 分解能 12ビットでA/D変換し、パーソナル・コンピュータのCPUを介して容量47Mbyteのリムーバブル・ハード・ディスクに収録した。

3. 実験結果

(1) 亀裂の観察方法と観察結果

いずれの実験においても、供試体表面の亀裂を観察するため、実験終了後供試体を載荷枠から取出し、再度水圧破碎に用いたパッカーをセットして送水した。そして、供試体表面の亀裂から水がしみ出すのを確認して、鉛筆で亀裂位置に印をつけた。さらに、この鉛筆の印を目印に亀裂位置に赤のマジック・インキを塗り、シンナーで表面のマジック・インキを拭き取った。この作業により、亀裂だけに鮮明に赤い色素が残り、容易に亀裂の観察を行うことができた。また、供試体内部の特に水圧破碎孔周辺の亀裂の発生を観察するため、破碎孔を中心として直径6.0cmのオーバー・コアリングを行い、採取したコアの表面においても上述した手法により亀裂の観察を行った。これらの観察記録の例として、A花崗岩の場合を図-5(a)(b)に示す。亀裂の形状が複雑な一部のコアに関してはダイヤモンド・カッターによって供試体やコアをさらに任意の方向に切断し、破碎孔からの亀裂の発生状況を詳細に観察した。以上の亀裂の観察結果に基づいて推定した4つの供試体の亀裂の発生状況を図-6(a)~(d)に示す。なお、図中

の実線は供試体の表面で認められた亀裂、破線はコア表面やダイヤモンド・カッターによる切断で観察した亀裂に基づいて推定した供試体内部の亀裂であり、次に述べるAE震源の決定結果は利用していない。

この図より明らかなように、鉱物粒子の大きなA花崗岩とB花崗岩では、水圧破碎孔に垂直な水平面(XY面)に沿って亀裂が発生し、一方、鉱物粒子が最も小さいD花崗岩では水圧破碎孔と最大拘束圧方向に平行な鉛直面(YZ面)に沿って亀裂が発生していることがわかる。またC花崗岩では、亀裂の肉眼観察では図に示したようにD花崗岩と同じくYZ面に沿って発生し供試体表面まで進展した亀裂しか確認されなかったが、後で述べるAEの震源決定結果から破碎孔周辺ではA, B花崗岩と同じくXY面に平行な亀裂の発生が認められ、この点で、A, B花崗岩とD花崗岩の中間的な亀裂の発生となっている。すでに述べたように、供試体への拘束圧として、X方向に6MPa, Y方向に12MPaを載荷しており、この2軸載荷状態では、破碎孔の孔壁に作用する接線方向の直応力は、最小で6MPa(孔壁上のY座標最大及び最小の点)、最大で30MPa(孔壁上のX

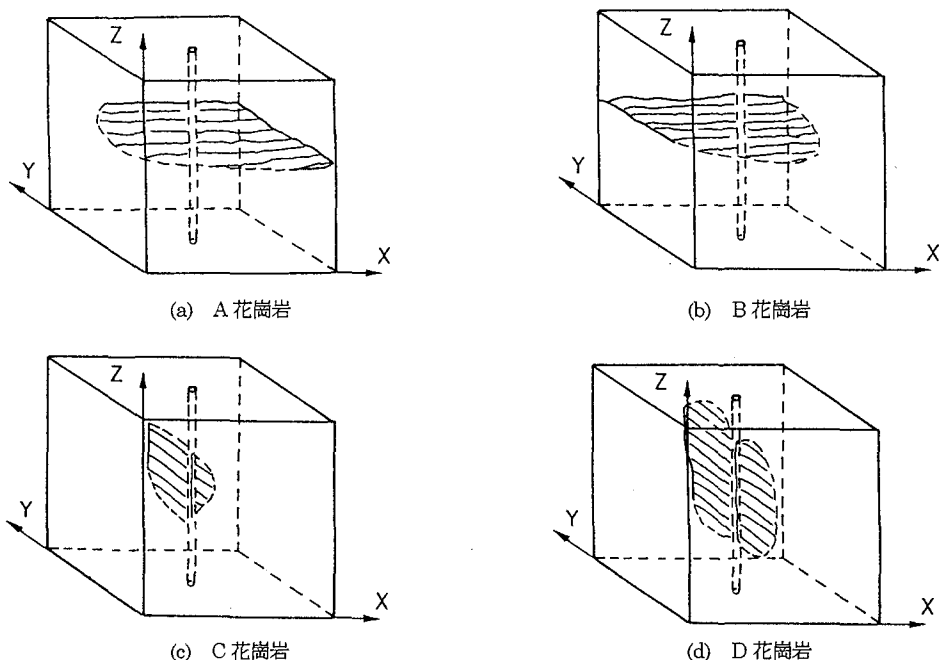


図-6 各供試体で発生した水圧破砕亀裂

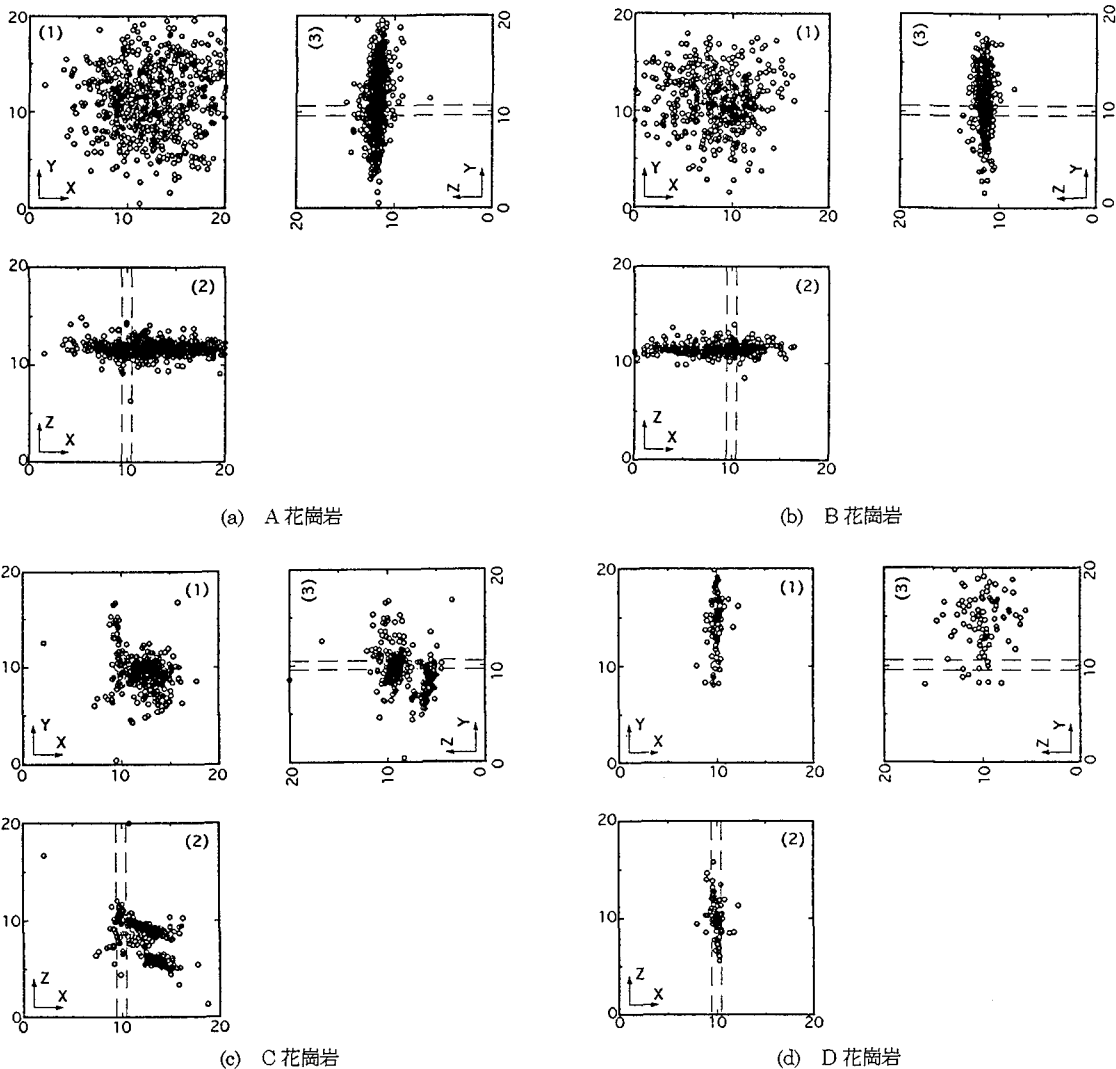
座標最大及び最小の点)の圧縮応力となる。したがって、孔壁上ではどの位置でも接線方向応力が6MPa~30MPaの安定した圧縮応力状態にあり、また応力状態からみれば孔壁上の圧縮応力が最小となるY方向に亀裂が発生しやすい条件となっている。しかし、拘束圧を載荷している水平2方向に比べて、水圧破砕孔の孔軸方向である鉛直方向(Z方向)は加圧区間両端のパッカーでZ方向の変位が拘束されているものの、供試体表面からの載荷はなされておらず、しかも水圧破砕孔は花崗岩の最も割れやすい面であるリフト・プレーンに垂直に削孔されている。したがって、この点では、水圧破砕孔に垂直な水平面(XY面)に沿って亀裂が発生しやすい条件にあるといえる。

(2) AE震源の時空間分布と圧力の経時変化

AEの震源は、供試体の異方性を考慮し、各センサーへのP波初動の到達時刻から求めた。考察の対象とした震源は、P波初動の到達時刻を読み取ったセンサー数(データ数)が6以上、震源決定結果の走時残差の標準偏差が $3\mu\text{s}$ 以下などの条件を満たした震源のみであり、震源決定誤差は数mm程度、最大でも20mm程度である。これらの震源決定法と震源決定に際しての諸条件は、すでに報告した実験⁶⁾と同じである。

さて、4種類の花崗岩A,B,C,Dを供試体に用いた実験で、震源決定されたAE数はそれぞれ725, 472, 392, 89個であった。これらの震源分布のXY, XZ, YZの平面への投影図を図-7に示す。これらの図を見ると、図-6に示した亀裂に対応する位置に、概ねAE震源が集中的に分布していることがわかる。

図-8に4種類の花崗岩供試体における破砕孔の水圧の経時変化とAE震源の時空間分布を示す。AE震源の時空間分布とは、横軸に時間をとり縦軸に震源のX,Y,Z座標をとってAE発生位置の経時変化を示したものである。水圧は、いずれの場合も急激な上昇開始から30秒程度で最高圧(破砕圧)に達した後、亀裂の発生にともなって急激な低下を示している。水圧が破砕圧に達して急激に低下し始めると、ただちに圧力回路を閉鎖して時間をおき、圧力の低下の様子を観察し、その後回路を開放して圧力を0に落とした。AEの発生は、いずれの場合も、亀裂の発生にともなう圧力低下時と圧力を0に落としたときに集中的に発生している。後者のAEは、亀裂の閉塞にともなうAEと思われる。A,BおよびD花崗岩では、AE発生位置の顕著な経時変化は認められない。しかしC花崗岩の場合は、横軸で90~100秒の間の破砕圧直後の圧力低下の際の震源のX座標は $X=10\text{cm}$ 付近にばば集中しているのに対し、Y座標とZ座標はそれぞれ5~15cm, 5~



図一七 各供試体で発生したAEの震源分布 (1) XY 平面図 (2) XZ 断面図 (3) YZ 断面図。破線は破砕孔を示す

12.5cm の広い範囲に分布する。これは Z 方向の加圧区間 7.5~12.5cm を中心に破砕孔から Y 方向に YZ 面 (鉛直面) に平行な亀裂が進展したことを意味している。この後、110~135 秒の間に圧力がゆるやかに上昇した後 135 秒から再び圧力がゆるやかに低下している。この圧力低下の前後の 120~140 秒の間の震源はそれまでと異なり、震源の Z 座標は Z=5~7cm の範囲にほぼ集中しているのに対し、X 座標と Y 座標はそれぞれ 11~15cm、4~11cm の広い範囲に分布する。これはこの時点で、すでに発生した YZ 面 (鉛直面) に平行な亀裂とは別に、リフト・プレインに沿った XY 面 (水平面) に平行な亀裂が新たに発生したことを示している。この 2 つの直交

する亀裂の発生は、図一七(c)に示した震源分布からも明らかである。このように、C 花崗岩では図一六に示した亀裂の肉眼観察からは明らかでなかったが、D 花崗岩でみられた YZ 面 (鉛直面) に平行な亀裂が発生したのち、A、B 花崗岩でみられたリフト・プレイン沿いの XY 面 (水平面) に平行な亀裂も発生しており、両者が併存する中間的な破壊形態を示したといえる。すでに述べたように、C 花崗岩の鉱物粒径は A、B 花崗岩より小さく、D 花崗岩より大きい。したがって、この中間的な破壊形態は鉱物粒径の変化にともなう破壊形態の変化を象徴的に表していると思われる。

図一八で 4 種類の花崗岩の破砕圧の大きさに注目

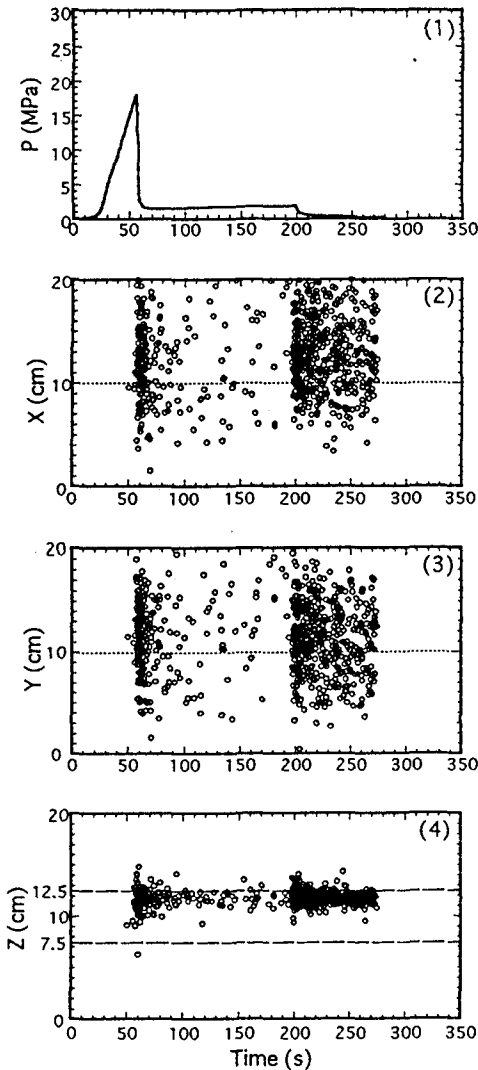


図-8(a) A花崗岩で発生したAE震源の時空間分布図
 (1)圧力-時間関係 (2)AE震源のX方向への移動 (3)Y方向への移動 (4)Z方向への移動

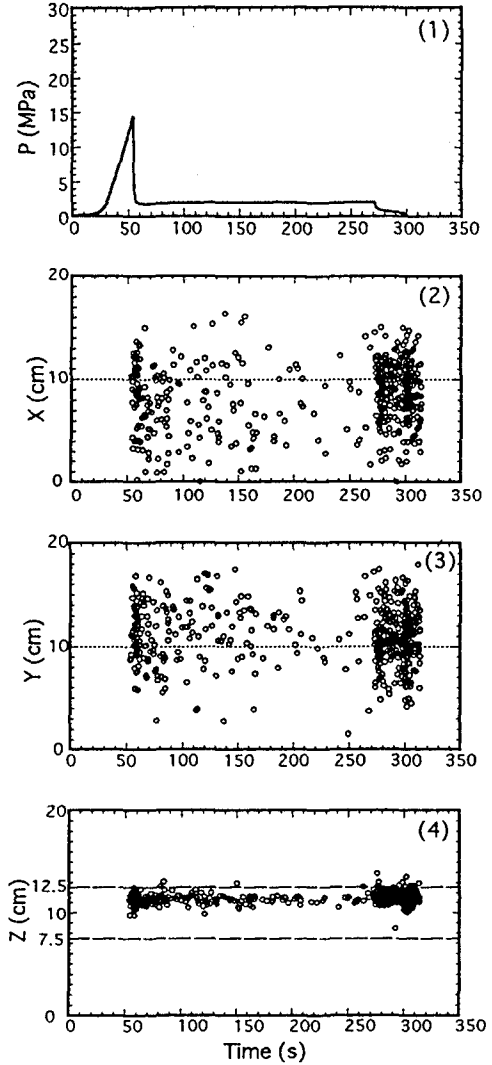


図-8(b) B花崗岩で発生したAE震源の時空間分布図
 (1)圧力-時間関係 (2)AE震源のX方向への移動 (3)Y方向への移動 (4)Z方向への移動

すると、A,B,C,及びD花崗岩の順に、それぞれ17.8, 14.3, 22.6, 26.3MPaである。なお、加圧時の送水量は4.4~4.9cm³/minである。

破砕圧の大きさの違いを比較するため、横軸に供試体の種類を鉱物粒子が大きいものから順にならべ、縦軸に実験で得られた破砕圧の大きさを示すと図-9のようになる。この図には、送水量はやや異なるが、破壊形態の再現性の確認のため、同じ条件で行った追加実験の結果も参考のため、黒丸印で示した。破砕圧の大きさは、小さい方から、B,A,C,Dの順となっており、AとBの順番が入り替っているが、概ね鉱物粒径の大きさの順といえる。鉱物粒径が大き

い場合、加圧区間に構造的な弱面が存在する可能性が高く、その弱面をきっかけに亀裂が発生しやすいと考え、この傾向は合理的である。

(3) AEのメカニズム解

AEの発生に伴って観測点(AEセンサー)に伝播してくるP波の極性は初動が震源に向うか、遠ざかるかによってそれぞれ引き波、押し波のいずれかの極性を有している。実際の破壊はせん断破壊と引張破壊の両者が混合したモードで生じている場合も多い¹¹⁾が、初動の押し引き分布は、せん断型の場合、押し引きが4象限型の分布を示すのに対し、引張型

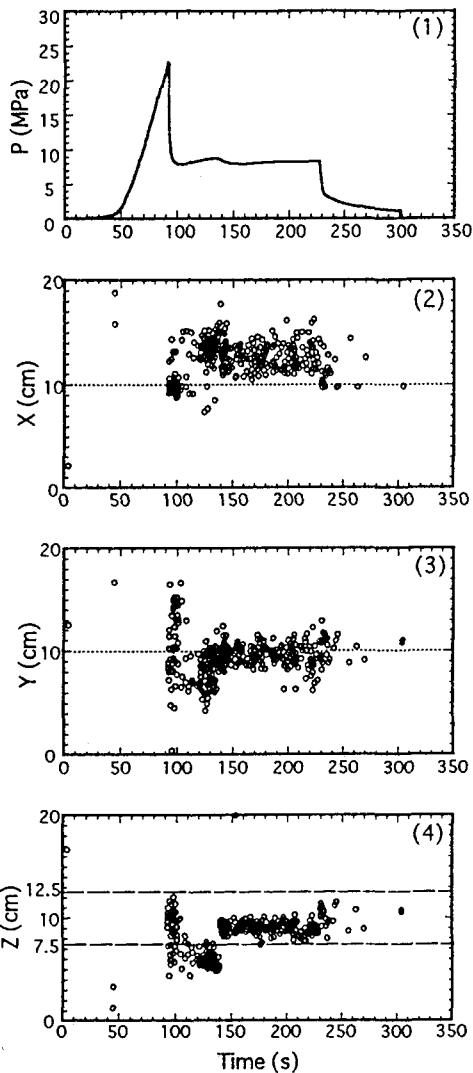


図-8(c) C花崗岩で発生したAE震源の時空間分布図
 (1)圧力-時間関係 (2)AE震源のX方向への移動 (3)Y方向への移動 (4)Z方向への移動

の破壊の場合、全センサーで押し波が観測される。したがって、震源を決定したAEイベントに対して、多数の観測点でP波の初動極性を調べることで、AEの発生メカニズムを推定することができる。メカニズム解を得るためには多数のセンサーで明瞭なP波初動の押し引きをとらえる必要がある^{6),12)}。今回の実験で6個以上のセンサーでP波初動の到達時間が読み取れ震源位置を決定できたAEイベントは、すでに述べたようにそれぞれ725,472,392,89個であったが、6個以上のセンサーでP波初動の押し引きが明瞭に読み取れるAEイベントは極端に少なく、震源位置を決定できたAEイベントの数パーセント

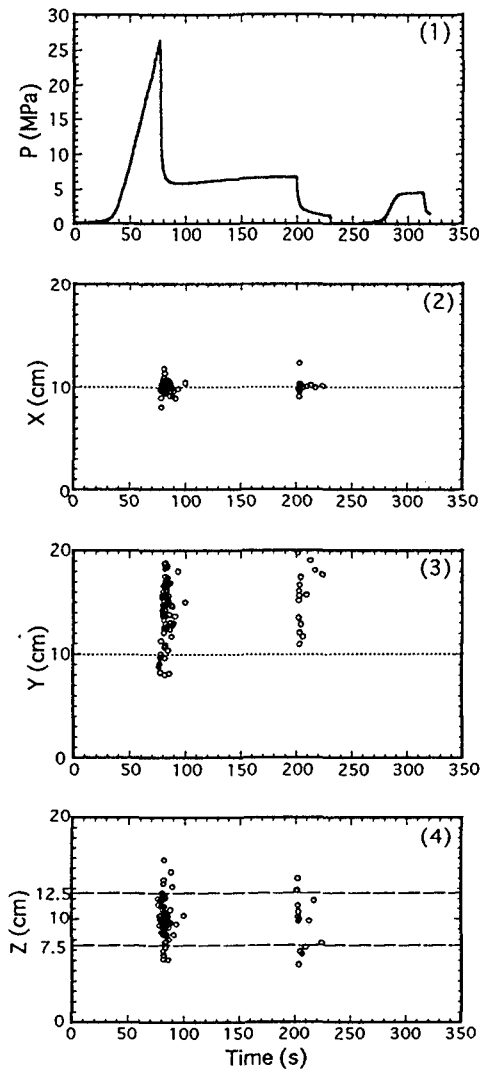


図-8(d) D花崗岩で発生したAE震源の時空間分布図
 (1)圧力-時間関係 (2)AE震源のX方向への移動 (3)Y方向への移動 (4)Z方向への移動

以下である。そこで、それぞれの花崗岩でもっとも多数のセンサーでP波初動の押し引きが明瞭に読み取れたAEイベント5個を選んで解析の対象とした。

図-10に花崗岩A, B, Dについてはそれぞれ代表的な1個の、花崗岩Cについては代表的な2個のAEイベントのメカニズム解を示す。なお、これらのAEイベントはいずれも破砕圧の前後で発生したものである。各図の●や○の印は、AEの震源を球の中心に置き、震源からみた各AEセンサーの方向をステレオ・ネットの下半球に投影して示したものである。●印はそのセンサーで測定されたP波初動が押し波の観測点、○印は引き波の観測点を示す。

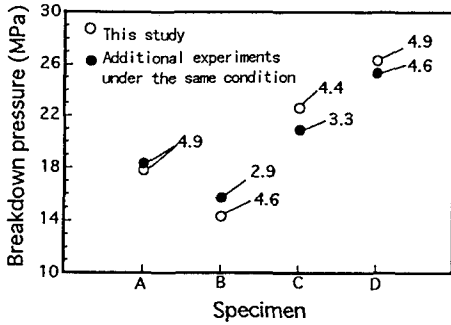


図-9 各供試体の破碎圧の比較 (数字は送水流量 (cm³/min) を示す)

各観測点毎にセンサー番号と観測された波形を示した。観測波形に示した▲印と▽印が初動の読み取り位置であり、▲印は初動が図上で上向き(押し波)、▽印は下向き(引き波)であることを示す。▲印や▽印の位置で初動を読みとって震源を求めると、走時残差が小さく十分な精度で震源が求まることを確認している。しかし、初動が上向きであるか下向きであるか必ずしも明瞭でないものも見受けられ、この点にデータの信頼性の限界がある。なお、初動が押し波であるか引き波であるかは、実験前に供試体の片面に全てのセンサーを貼り付け、もう一方の面に鋼球を打ち当てて波形を収録し、センサーの極性を確認した。この鋼球を当てた際に観測された初動のトレースがいずれも上向きであったため、上向きのトレースを押し波、下向きのトレースを引き波とした。

まず、例として、図-10(a)のA花崗岩のメカニズム解をみると、いずれの場合も各センサーのP波初動の方向は押し波と引き波が混在し、せん断破壊の場合に見られる4象限型の分布を示すことがわかる。●(押し波)と○(引き波)の分布を区切る図中の二本の曲線は空間的に直交する2つの平面に対応し、これを節面と呼ぶ。ここに示したような8点程度の測定データ数では、節面の選び方は必ずしも1通りに定まらないが、2つの節面は震源を中心とする球面上の大円であり、かつ互いに直交するという節面の条件を満たさなければならないため、選択の範囲は限定される。また選ばれた2つの節面のうち、そのいずれかひとつが、そのAEを発生させたせん断破壊の实在の破壊面に対応する¹²⁾。しかし、いずれが实在の破壊面かは、P波初動の押し引き分布からだけでは決定できない。一方、せん断破壊に際して作用した最大及び最小主応力の方向はそれぞれ節面で区切られた●印と○印の分布の中心に求まり、P軸及びT軸とよばれる。これらの方向を図中にP、Tの文字の位置で示した。

図-10(a)のメカニズム解の場合、Aで示した節面は水平面であるXY面に近い平面の走向・傾斜を表し、Bで示した節面は+Y方向から時計回りに-18°の走向を有する鉛直に近い平面を表す。水圧破碎でこの供試体に生じた巨視的な亀裂面は、XY面に平行な水平面であるから、メカニズム解の实在の破壊面は巨視的な亀裂面に近い節面Aに対応すると考えるのが妥当である。

図-10(b)は、B花崗岩の場合のメカニズム解である。この場合も各センサーのP波初動の方向は押し波と引き波が混在し、せん断破壊の4象限型の分布を示すことがわかる。B花崗岩の場合もA花崗岩の場合と同じく、巨視的な亀裂面はXY面に平行な水平面に沿って生じているから、メカニズム解の实在の破壊面は節面Aに対応すると考えられる。したがって、このAEもA花崗岩のAEと同じく、XY面に平行な水平面に沿った亀裂がせん断破壊により発生したと考えることができる。

図-10(c)より先に図-10(d)をみると、すべてが●印であり、全センサーでも押し波のP波初動が観測されていることがわかる。このようなP波初動の分布は引張破壊に対応して観測されることが知られている¹³⁾。AEセンサーは供試体の上下面に設置されており、どちらかといえば水平面(XY面)に平行な亀裂が引張破壊により発生した場合、全点で押し波の初動を検出しやすい配置となっている。しかし、A花崗岩とB花崗岩では水平面(XY面)に平行巨視的亀裂が生じているにもかかわらず、せん断型の押し引き分布を示し、逆にD花崗岩では鉛直面(YZ面)に平行に巨視的亀裂が生じているにもかかわらず、全点で押し波の初動を検出している。したがって鉱物粒子の小さなD花崗岩では、巨視的亀裂の方向が他と異なるばかりではなく、微小破壊のメカニズムも他と異なり引張成分の卓越した破壊により亀裂が発生したといえる。なお、このような初動の押し引き分布に対しては節面を得ることができないため、発生した微小亀裂の方向を議論することはできない¹²⁾。

図-10(c)にもどると、C花崗岩についてだけは2つのメカニズム解を示したが、いずれも、押し波と引き波の分布が混在し、せん断型の破壊を示すことがわかる。節面は上のメカニズム解の場合、水平面に近いA面と+Y方向から時計回りに+62°の走向を有する鉛直面に近いB面が、下のメカニズム解の場合、水平面に近いA面と+Y方向から+34°の走向を有する鉛直に近いB面が得られることがわかる。すでに述べたように、図-8(c)に示したAE震源の時空間分布より、90~100秒の間は破碎孔からY方

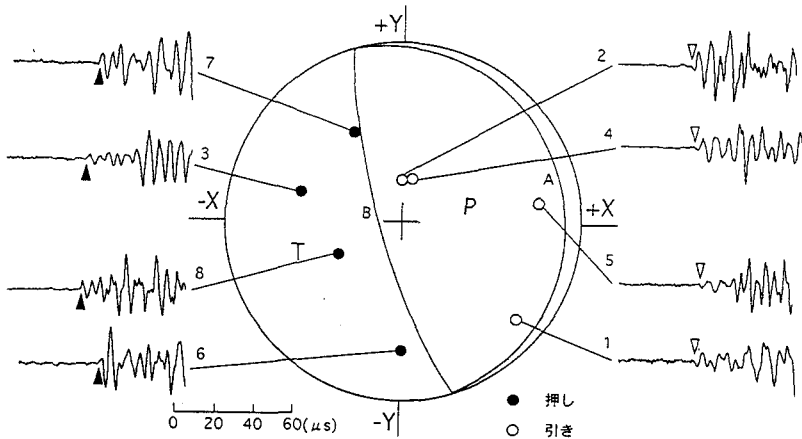


図-10(a) A花崗岩で発生したAEのメカニズム解(シュミットネット下半球投影)
(発生時間60.22s, 震源座標 X=17.85, Y=5.09, Z=12.14 cm)

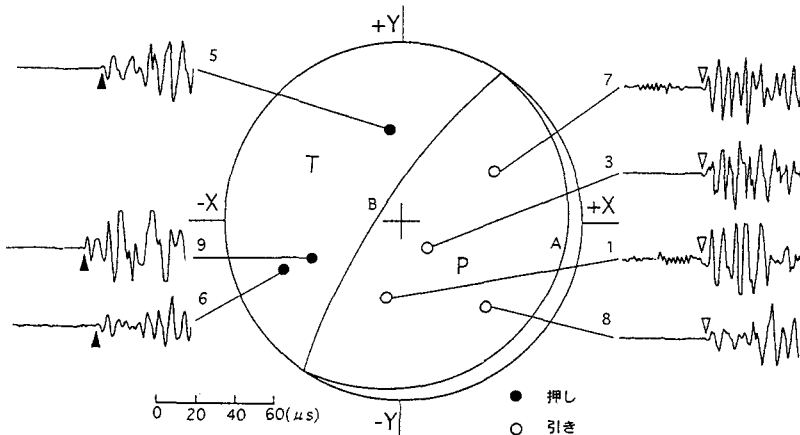


図-10(b) B花崗岩で発生したAEのメカニズム解(シュミットネット下半球投影)
(発生時間58.61s, 震源座標 X=0.28, Y=11.74, Z=10.40 cm)

向に鉛直面の亀裂が、110~135秒の間には水平面の亀裂が発生したと推測される。発生時刻96.25sの上のメカニズム解のAEは発生時刻からみるかぎり、Y方向の鉛直亀裂の発生に伴うAEと推測される。しかし、造成されたY方向の鉛直亀裂は概ねX=10cmの方程式で表わされる平面であり、震源のX座標13.11cmはこれより大きく、この亀裂面上にないことがわかる。また、このメカニズム解の節面BもY方向よりもむしろX方向に近い。したがって、このメカニズム解では節面Aが実際の破壊面であり、これはこの後110~135秒の間に顕著となる水平方向の亀裂面の造成に関連して発生した先駆的なAEイベントと考えるのが妥当ではないと思われる。一方、下のメカニズム解は、発生時刻、震源座標ともにこのAEがY方向の鉛直亀裂に伴って発生したことを示唆しており、節面Bを破壊面と考えれば、

この鉛直面に沿ったせん断破壊で矛盾なく説明できる。しかし、このメカニズム解では、押し波を観測したセンサーが5個あるのに対し、引き波を観測したセンサーは1個しかない。したがって、この破壊はせん断破壊と判断されたが、引張破壊成分を多く含んだ引張破壊とせん断破壊の複合破壊である可能性がある。

表-3は、メカニズム解を検討した各供試体5個ずつのAEイベントに対し、押しのP波初動を観測したセンサー数と引きのP波初動を観測したセンサー数の割合を整理したものである。また図-11は、表-3に示した押しのP波初動を観測したセンサー数の割合を縦軸にとり、横軸に供試体の種類を鉱物粒子が大きいものから順にならべてプロットしたものである。鉱物粒子が小さくなると押しのP波初動が観測されることが多くなる傾向が認められる。メ

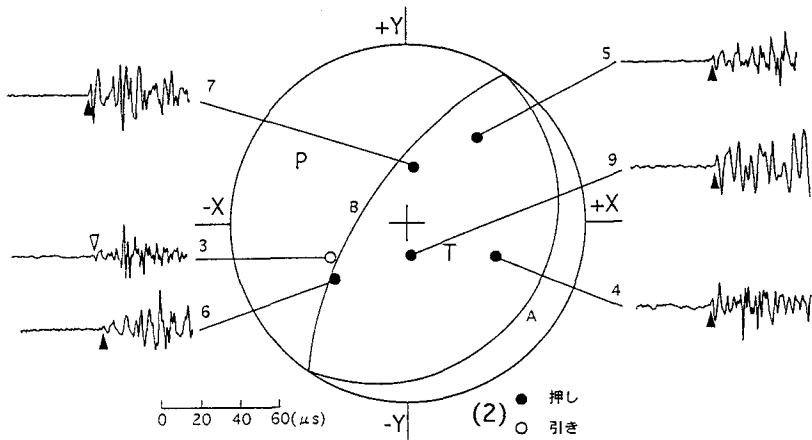
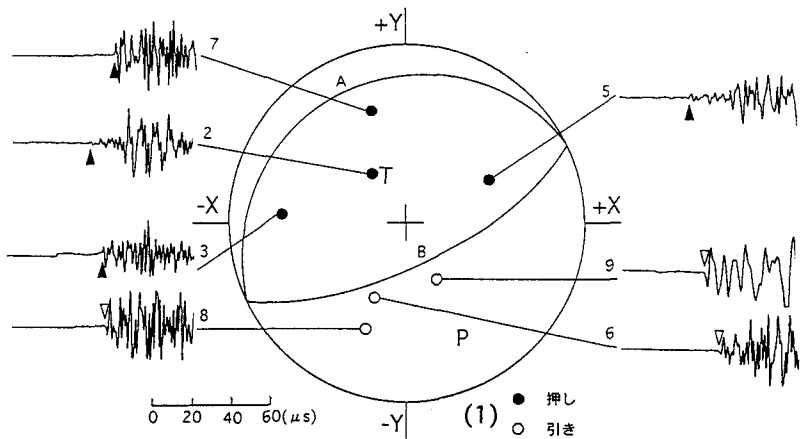


図-10(c) C花崗岩で発生したAEのメカニズム解(シュミットネット下半球投影)
 (1) No.1 震源(発生時間 96.25s, 震源座標 X=13.11, Y=8.82, Z=5.87cm)
 (2) No.2 震源(発生時間 100.75s, 震源座標 X=9.89, Y=12.77, Z=9.76cm)

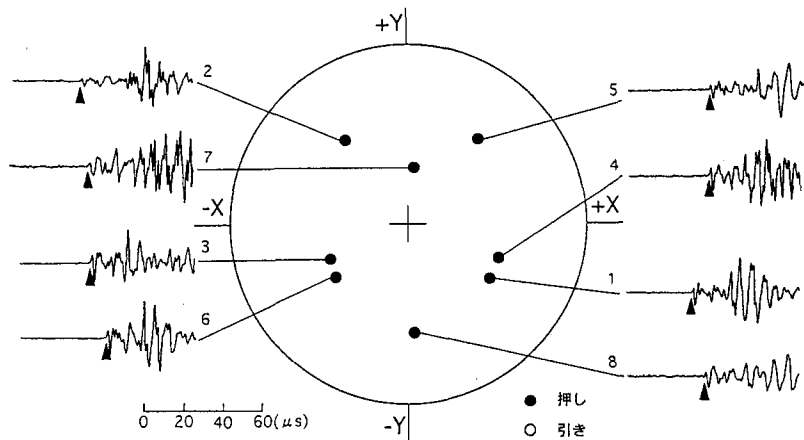
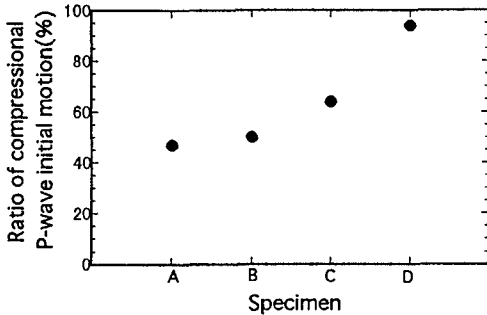


図-10(d) D花崗岩で発生したAEのメカニズム解(シュミットネット下半球投影)
 (発生時間 202.92s, 震源座標 X=9.57, Y=10.96, Z=9.78 cm)

表一 3 P 波初動が押し波の観測点と引き波の観測点の割合

供試体		割合 (センサー数)		AE イベント数 (センサー数)
岩石名	記号	押し波の観測点	引き波の観測点	
中国産桃色	A	47% (17)	53% (19)	5 (36)
足尾沢入	B	50% (16)	50% (16)	5 (32)
真壁小目	C	64% (21)	36% (12)	5 (33)
中国産糠目	D	94% (32)	6% (2)	5 (34)

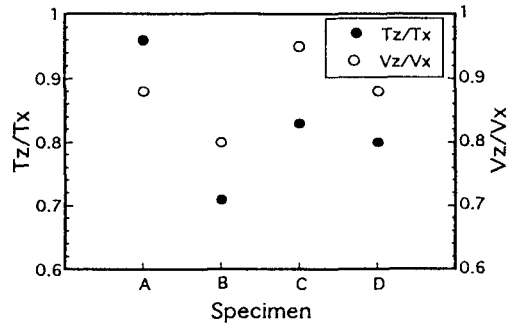


図一 11 P 波初動が押し波の観測点と引き波の観測点の割合

カニズム解の検討しては、震源とセンサーの相対的な位置関係や波形上の P 波初動の位置なども確認して押し引きの判定を行っている。表一 3 と図一 11 は各供試体 5 個ずつの AE イベントに対する限られたデータであるが、この意味でこれらは信頼性の高いデータであり、少なくともこの範囲では、鉱物粒子が小さくなると押しの P 波初動が観測されることが多くなる傾向が認められる。

また、図一 10 には測定波形を同じ時間スケールの横軸で示したが、A, B 花崗岩の AE に比べて、C, D 花崗岩の AE の周波数はかなり高い。P 波初動の周波数を調べてみると、A, B 花崗岩の場合 150kHz 程度であるのに対し、C, D 花崗岩の場合は 300kHz 程度の周波数が卓越していることがわかる。また、初動以降の周波数も、A, B 花崗岩の場合よりも C, D 花崗岩の方が高い。水圧破碎による亀裂が、造岩鉱物の粒界に沿って 1 粒子毎にステップ的に進展すると仮定すると、粒径が小さい花崗岩ほど 1 回の亀裂の進展長が小さいことになる。亀裂の進展長が小さいほど、それにとまって発生する AE の周波数は高くなるから、鉱物粒子が小さくなるほど測定波形の周波数が高くなる上述の観測結果は合理的と思われる。

以上述べたことをまとめると、AE のメカニズム解からみて、鉱物粒子の大きな A, B 花崗岩では巨視的



図一 12 引張強度と P 波速度の関係

亀裂面の方向である水平面(XY 面)に沿った亀裂がせん断破壊により生じたのに対し、鉱物粒子の小さな D 花崗岩では引張破壊の発生が卓越したといえる。また、押しと引きの P 波初動を観測したセンサー数を比較すると、限られたデータの範囲ではあるが、鉱物粒子が小さくなると押しの P 波初動が観測されることが多くなる傾向が認められる。さらに、鉱物粒子が小さくなるにつれて、測定される AE 波形の周波数も高くなる傾向がみられ、これは、水圧破碎による亀裂が、造岩鉱物の粒界に沿って 1 粒子毎にステップ的に進展すると仮定すると合理的に説明できることがわかった。

4. 考察

(1) 亀裂発生方向の変化について

すでに述べたように、鉱物粒子の大きな A 花崗岩と B 花崗岩では、リフト・プレインである水圧破碎孔に垂直な水平面(XY 面)に沿って亀裂が発生し、一方、鉱物粒子が最も小さい D 花崗岩では、最大拘束圧方向に平行な鉛直面(YZ 面)に沿って亀裂が発生した。また C 花崗岩では、D 花崗岩と同じく YZ 面(鉛直面)に平行な亀裂が発生したのち、A, B 花崗岩と同じリフト・プレイン沿いの XY 面(水平面)に平行な亀裂が発生し、A, B 花崗岩と D 花崗岩の中間的な破壊形態を示した。

このような亀裂発生方向の変化は、供試体の強度に異方性があり、X 方向に対する Z 方向の圧裂引張強度の比 T_z/T_x が、花崗岩 A, B, C, D の順に増大していれば、Z 方向に順に引張破壊が生じにくくなる傾向であるから、合理的に説明できると思われる。また、花崗岩の強度異方性はおもに微小亀裂の選択的な配向性によるものと考えられるから⁹⁾、X 方向に対する Z 方向の P 波速度の比 V_z/V_x も、圧裂引張強度の比と同様に花崗岩 A, B, C, D の順に増大していれば合理的である(図一 1 参照)。図一 12 は、表一

1, 表-2の数値からX方向に対するZ方向の圧裂引張強度の平均値の比 T_z/T_x とP波速度の比 V_z/V_x を計算し, 横軸に供試体の種類を鉱物粒子が大きいものから順にならべてそれぞれ●印と○印で示したものである. 図の縦軸は, 左側が T_z/T_x の比の値を, 右側が V_z/V_x の比の値を表している. この図をみると●印も○印も右上がりの傾向は認められず, 上述の圧裂引張強度やP波速度の異方性だけでは亀裂発生方向の変化を説明できないことがわかる. したがって, 亀裂発生方向の変化は圧裂引張強度やP波速度の異方性では表現されない鉱物粒子間の強度的欠陥の程度の違いに依存しているのではないかとと思われる. すなわち, 水圧破碎による亀裂は, 5.0cmの加圧区間内にある最も強度の小さい微小亀裂をきっかけとし, その位置から発生すると思われるが, 鉱物粒子が大きい花崗岩ではこの微小亀裂の強度の最小値が小さく, 水圧破碎により容易に亀裂が発生し微小亀裂の配向方向であるリフト・プレインに沿って亀裂が進展しやすいと思われる. これに対し, 鉱物粒子が小さい花崗岩ではこのような強度的欠陥の影響が小さく連続体として挙動し, 2次元弾性論で説明できる方向に破壊が生じたのではないかとと思われる. これは, 鉱物粒子が大きくなればなるほど含まれる微小亀裂のサイズが大きく, 強度的欠陥の程度も大きくなると考えれば, 理解しやすいと思われる. 先に図-9に示した各供試体の破壊圧を比較すると, A花崗岩とB花崗岩で順序が入れ替わっているものの, これを除けばほぼA,B,C,Dの順に大きくなっており, 鉱物粒子が大きいほど破壊圧が小さいことがわかる. これは上述の, 鉱物粒子が大きい花崗岩ほど微小亀裂の強度の最小値が小さく水圧破碎により容易に亀裂が発生するとの推論を支持しているように思われる.

(2) P波初動の押し引き分布の変化について

メカニズム解を検討したAEイベントに対し, 押しと引きのP波初動を観測したセンサー数を比較した結果を, すでに表-3と図-11に示した. これをみると, 鉱物粒子が大きいA,B花崗岩では押しと引きのP波初動が相半ばしたが, 鉱物粒子がやや小さいC花崗岩では押しが64%を占め, 鉱物粒子が最も小さいD花崗岩では押しが94%を占めた. このように, 限られたデータの範囲ではあるが, 鉱物粒子が小さくなるにつれて, 押しと引きのP波初動が多く観測される傾向が認められた. また, 測定波形の周波数をみると, A, B花崗岩の破壊に伴うAEの周波数に比べて, C, D花崗岩の周波数はかなり高い傾向がみられ, これは, 粒径が小さい花崗岩

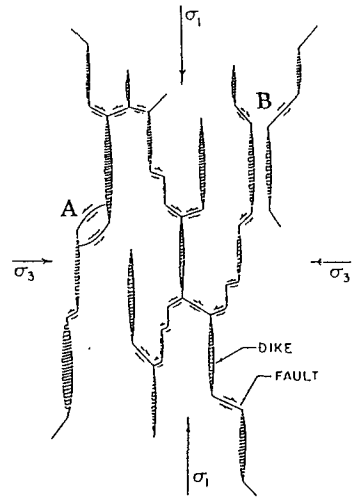


図-13 最大圧縮主応力 σ_1 と最小圧縮主応力 σ_3 の下にある岩脈と共役断層の模式図. Hill (1977)¹⁴⁾による

ほど1回の亀裂の進展長が小さいためと思われた.

一方, AEのメカニズム解は, 鉱物粒子の大きなA,B花崗岩ではリフト・プレインに沿った亀裂がせん断破壊により生じたことを示すのに対し, 鉱物粒子が最も小さなD花崗岩では引張破壊の発生を示した. 図-13は前報⁷⁾でも実験結果の考察に用いた, 火山近傍で発生する群発地震に対して提案されたHillのモデル¹⁴⁾である. 火山でのマグマの貫入は, マグマを破碎流体とした大規模な水圧破碎とみなすことができる¹⁵⁾. このようなマグマの貫入・噴出に伴う地震活動では, 引張破壊に起因すると思われる全観測点でP波初動が押し波を示す地震とともにせん断破壊で説明できる4象限型の押し引き分布を示す地震が多数観測されている^{14), 16)}. Hillは亀裂に富む岩盤にマグマが貫入すると, 最大圧縮主応力方向にマグマで満たされた多数の岩脈が形成され, 図-13にA,Bで示したように岩脈の端をつなぐ形で亀裂が生じ, その際せん断破壊による地震が発生すると考えた. 著者らの実験に用いた花崗岩供試体のリフト・プレインに沿って多数存在する微小亀裂をHillのモデルの弱面に対応させて考えれば, A花崗岩やB花崗岩で観測されたせん断型のAEは, リフト・プレインに沿った微小亀裂の端をつなぐ亀裂の発生に伴って生じたものと推測される. 一方, D花崗岩で観測された引張型のAEは, このモデルや既存の微小亀裂とは無関係に花崗岩の基質部に新たに亀裂が発生し, これに伴って生じたものではないかと思われる.

なお, せん断型のAEが, 図-13のモデルの図の通りに説明されるとすると, 破壊面は巨視的亀裂

の方向と $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ の角度で斜交するはずであり、図-10(a)、図-10(b)および図-10(c)の(1)のメカニズム解において実在の破壊面に対応するとした節面Aは、水平面に近すぎる。これについては、既存亀裂の端を結ぶ方向が巨視的亀裂面の方向である水平方向により近くなるように(例えば図-13よりも、 σ_1 方向に広い間隔で、 σ_3 方向に密な間隔で)亀裂が配列していた、あるいは既存亀裂に水圧が作用し、既存亀裂がそのままその方向に進展する傾向が若干あったなどの原因が推測される。

5. まとめ

岩盤の力学的性質の違いによる水圧破碎の破壊機構の変化を検討するため、明らかに粒子の大きさが異なる4種類の花崗岩を入手して、同じ方法で水圧破碎を行った。すなわち、一辺20cmの立方体供試体を作製し、花崗岩の最も割れやすい面であるリフト・プレイン(XY面)に直交する方向(X方向)に直径1.0cmの水圧破碎孔を削孔し、X方向に6MPa、Y方向に12MPaの拘束圧を作用させて水圧破碎を行い、主にAEの測定により破壊機構の違いを検討した(座標系については図-1参照)。その結果、次のことがわかった。

(1) 亀裂の観察結果とAEの震源分布から、鉱物粒子が最も大きなA花崗岩とその次に大きなB花崗岩では、花崗岩の最も割れやすい面であるリフト・プレインに沿って水平面(XY面)に平行に亀裂が発生した。一方、鉱物粒子が最も小さいD花崗岩では、弾性論に基づく水圧破碎孔の孔壁上の応力状態から最も亀裂が発生しやすいと予測される最大拘束圧方向の鉛直面(YZ面)に沿って亀裂が発生した。またC花崗岩では、D花崗岩と同じく鉛直面(YZ面)に平行な亀裂が発生したのち、A、B花崗岩と同じリフト・プレイン沿いの水平面(XY面)に平行な亀裂が発生し、A、B花崗岩とD花崗岩の中間的な亀裂の発生を示した。

(2) 亀裂発生時の圧力を比較すると、A花崗岩とB花崗岩で順序が入れ替わっているものの、これを除けば鉱物粒子が大きいほどこの圧力が小さいことがわかった。

(3) (1)に述べた亀裂発生方向の変化を、各供試体に対して行ったX,Y,Zの3方向の圧裂試験結果やP波速度測定結果と比較したが、これらの異方性では亀裂の発生方向の変化を説明できないことがわかった。このことから、鉱物粒子が大きい花崗岩では水圧破碎の加圧区間に含まれる微小亀裂の強度の最小値が小さく、水圧破碎により容易に亀裂が発生し微小亀

裂の配向方向であるリフト・プレインに沿って亀裂が進展しやすいのに対し、鉱物粒子が小さい花崗岩ではこの強度的欠陥の影響が小さく連続体として挙動し、2次元的な弾性論で説明できる方向に破壊が生じたのではないかと思われる。これは、鉱物粒子が大きくなればなるほど含まれる微小亀裂のサイズも大きくなると考えれば、理解しやすいように思われる。また(2)に述べた、鉱物粒子が大きいほど亀裂発生時の圧力が小さいことも、この推論を支持しているように思われる。

(4) AEのメカニズム解は、鉱物粒子の大きなA,B花崗岩ではリフト・プレインに沿った亀裂がせん断破壊により生じたことを示すのに対し、鉱物粒子の最も小さなD花崗岩では引張破壊の発生を示した。また、メカニズム解を検討したAEイベントに対し、押しのP波初動と引きのP波初動を観測したセンサー数を比較した結果、鉱物粒子が小さくなるにつれて、押しのP波初動が多く観測される傾向が明らかであった。

(5) (4)に述べたAEのメカニズム解の変化について、火山近傍で発生する群発地震に対して提案されたHillのモデルを用いて考察した。その結果、鉱物粒子の大きなA花崗岩やB花崗岩で観測されたせん断型のAEは、リフト・プレインに沿った微小亀裂の端をつなぐ亀裂の発生に伴って生じたものと推測された。一方、D花崗岩で観測された引張型のAEは、このモデルや既存の微小亀裂とは無関係に花崗岩の基質部に新たに亀裂が発生し、これに伴って生じたものではないかと思われた。

(6) 測定されたAE波形の周波数を比較すると、鉱物粒子が小さくなるにつれて、測定されるAE波の周波数が高くなる傾向がみられた。水圧破碎による亀裂が、造岩鉱物の粒界に沿って1粒子毎にステップ的に進展すると仮定すると、粒径が小さい花崗岩ほど1回の亀裂の進展長が小さいことになる。亀裂の進展長が小さいほど、それにとまって発生するAEの周波数は高くなるから、この観測結果は合理的と思われた。

(7) 以上のことから、少なくとも花崗岩の場合、造岩鉱物の粒子の大きさが異なると、同じ条件で水圧破碎を行っても、亀裂発生時の圧力の大きさが異なるばかりではなく、亀裂発生方向やさらには微小破壊のメカニズムも大きく異なることがわかった。このことは、高温岩体からの地熱抽出の際の水圧破碎亀裂の設計や、あるいは、水圧破碎による地圧測定における圧力値の評価などにも重要な示唆を与えると思われる、今後の研究の一助となるものと思われる。

謝辞：実験手法や実験装置の使用法については、資源環境技術総合研究所地殻工学部開発システム研究室長の小林秀男氏にご指導いただいた。また、実験の実施ならびに測定データの解析に際しては、吉沢技研計測(株)の佐藤節雄氏に多大なご尽力を賜った。ここに記して、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Hubbert, M. K. and Willis, D. G.: Mechanics of hydraulic fracturing, *Petroleum Transactions American Society of Mining Engineers*, vol.210, pp.153-168, 1957.
- 2) Baria, R. and Green, A.S.P.: Seismicity induced during a viscous stimulation at the Camborne school of mines hot dry rock geothermal energy project in Cornwall, England, *Progress in Acoustic Emission III*, The Japanese Society of NDI, pp.407-429, 1986.
- 3) 佐々木俊二, Fehler, M., House, L. and Keppler, H.: 高温岩体発電における人工貯留層の形状評価手法—その1 ロスアラモスの大規模水圧破砕実験に伴う微小地震の震源決定法, 電力中央研究所報告, 研究報告, No.385011, 1985.
- 4) 佐々木俊二, 石田毅, 金川忠: 高温岩体発電のための岩盤破砕評価技術の開発—水圧破砕で発生するAEの特性と破壊メカニズム—, 電力中央研究所報告・研究報告, No.U86032, 1987.
- 5) Talebi, S. and Cornet, F.H.: Analysis of the microseismicity induced by a fluid injection in a granitic rock mass, *Geophysical Research Letters*, 14, pp.227-230, 1987.
- 6) 陳渠, 石田毅, 水田義明: AEデータから推定される水圧破砕における水の破砕効果, 土木学会論文集, No.541/Ⅲ-35, pp.173-187, 1996.
- 7) 石田毅, 陳渠, 水田義明: AEデータから推定される水圧破砕における破砕流体の粘性の影響, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-37, pp.183-198, 1996.
- 8) Matsunaga, I., Kobayashi, H., Sasaki, S. and Ishida, T.: Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission monitoring, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.30, pp.909-912, December 1993.
- 9) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野修, 中川浩二: 石工の経験則と花崗岩の力学的性質, 土と基礎, 第34巻, 第343号, pp.47-51, 1986.
- 10) Kirsch, C.: Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol.42, pp.797-807, 1898.
- 11) Ohtsu, M.: Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: application to in situ hydrofracturing test, *Journal of Geophysical Research*, vol.96, No. B4, pp.6211-6221, 1991.
- 12) 笠原慶一: 地震の力学, pp.37-45, 鹿島出版会, 1983.
- 13) Walter, W.R. and Burne, J.M.: Spectra of seismic radiation from a tensile crack, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. B3, pp.4449-4459, 1993.
- 14) Hill, D.P.: A model for earthquake swarms, *Journal of Geophysical Research*, Vol.82, No.8, pp.1347-1352, 1977.
- 15) 中村一明: 地殻の力学的弱点としての火山—伊豆大島火山の例—, 火山, 第2集, 第33巻, 伊豆大島噴火特集号, pp.S1-S6, 1988.
- 16) 佐々木俊二: 水圧破砕に伴うアコースティック・エミッションの特性と発生メカニズムに関する研究, 東北大学理学部学位請求論文, pp.225-226, 1995.

(1997. 3. 25 受付)

INFLUENCE OF GRAIN SIZE OF GRANITE ON HYDRAULIC FRACTURING MECHANISM

Qu CHEN, Tsuyoshi ISHIDA, Shunji SASAKI,
Isao MATSUNAGA and Yoshiaki MIZUTA

By employing four 20cm-cubic granite specimens of different grain size, hydraulic fracturing test were conducted. Water was injected into a vertical hole bored normal to a rift plane of the specimen. In the two horizontal directions, 12MPa and 6 MPa confining pressure were applied to the specimen. Due to water injection, a horizontal crack along a rift plane was created in the specimens having larger grains, while a vertical crack along the direction of the maximum confining pressure was created in those having smaller grains. In addition, fault plane solutions of acoustic emission indicated that microcracks in the specimens of larger grains were of shear type while those of smaller grain were of tensile type. These results demonstrate that grain size considerably influences the orientation of crack extension and the mechanism of microcracking in hydraulic fracturing of granite.