土木学会論文集 No. 547／Ⅲ-36, 183-198, 1996. 9

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

石田　毅[1]・陳　渠[2]・水田義明[3]

[1]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）
[2]正会員　工修　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（同上）
[3]正会員　工博　山口大学教授　工学部社会建設工学科（同上）

1 辺 19cm の花崗岩の立方体に直径 2cm の破砕孔を穿ち，粘度 1cP の水と粘度 80cP の油を用いて水圧破砕試験を行い，AE や圧力，ひずみなどを測定した．水圧破砕によって生じた亀裂の幅や亀裂の進展挙動，AE のメカニズム解などを比較した結果，次のことがわかった．すなわち，粘性が小さく浸透しやすい水を用いた場合には，亀裂幅の小さな微細な割れ目が網の目状に造成される傾向があるのに対し，粘性が大きく浸透しにくい油の場合には，亀裂幅の大きい分岐のすくない板状亀裂が造成される傾向があることがわかった．このことは，粘性の異なる破砕流体を用いることにより，水圧破砕で生じる亀裂の性状をある程度制御できる可能性を示しており，現実の高温岩体発電の貯留層造成にも有用と思われる．

Key Words : *hydraulic fracturing, acoustic emission(AE), fracturing fluid, viscous stimulation, rock mechanics*

1．はじめに

乾燥した高温の岩体に人工的な地熱貯留層を造成して地熱の抽出を行う高温岩体発電は，天然の地下水の存在を必要としないため，開発可能な地熱エネルギーが飛躍的に拡大する．そこでこの方法は地熱開発の有力な手法として注目され，この概念を提唱した米国をはじめ，イギリス，フランス，西ドイツ，スウェーデンなどで大規模な研究プロジェクトが進められてきた．また，日本でも NEDO や，(財)電力中央研究所，東北大学などがそれぞれ原位置実験場を設けて鋭意研究を行ってきている[1]．これらの研究におけるひとつの課題は，熱抽出のために高圧の水を圧入して地中に造成する人工亀裂面の評価とその生成メカニズムの解明，さらにはこれらの成果に基づく亀裂生成の制御法の開発である．

水圧破砕による亀裂生成メカニズムの解明には，岩盤の破砕に伴って発生する Acoustic Emission（岩盤の微小な破壊に伴って発生する弾性波動放射のことをいう．以下では AE とよぶ．）を多数のセンサーを用いて観測し，AE 震源に対するセンサー位置と観測された P 波初動の押し引きの関係から破壊のメカニズムを検討するのがひとつの有効な手法と思われる．このような測定は，現場での実際の水圧破砕においても，測定周波数は異なるが，同じ AE 測定という名称で，あるいは，微小地震観測という名称で行われ，亀裂面の評価や生成メカニズムの検討に用いられている[2)-5)]．すでに佐々木・石田ら[6)]は，実験室においてアクリル樹脂と花崗岩の水圧破砕実験を行い，測定した AE の P 波初動のメカニズム解から，アクリル樹脂の場合には引張破壊が生じるのに対し，花崗岩の場合にはせん断破壊が生じることを明らかにしている．また彼ら[7)]は，破砕流体に油を用いて，大理石や安山岩の供試体を破砕し，岩石の粒径と破砕流体の粘性が破壊に及ぼす影響を検討している．筆者ら[8)]はこれらの研究を踏まえ，水圧破砕における水の破砕結果を検討するため，破砕流体を用いずウレタンを介して破砕孔の孔壁に圧力を作用させて供試体を破砕する実験を行い，これを通常の水圧破砕の実験結果と比較した．この結果，水圧破砕の場合には，発生した亀裂の先端に破砕流体が浸入して亀裂をさらに押し広げるため，亀裂が短時間に進展する傾向が顕著なことが明らかとなった．

今回筆者らは，粘性の異なる２種類の破砕流体，すなわち水と油を用いて花崗岩供試体の破砕実験を行い，AE や圧力，ひずみなどを計測して，亀裂の性状と亀裂の生成メカニズムを比較検討した．その結果，破砕流体の粘性を変化させることにより，破砕のメカニズムが変化し，生じる亀裂の性状も変化することが明らかとなった．このことは，粘性の異なる破砕流体を用いることにより，水圧破砕で生じる亀裂の性状をある程度制御できる可能性を示していると思われる．すでに，イギリスの Camborne School of Mines の高温岩体プロジェクトでは，2300m の深度で粘性流体を用いて破砕実験を行っている [2),9)]．したがって，粘性の異なる破砕流体を用いて岩盤を破砕することは，現実の高温岩体の地熱貯留層の造成においても可能であり，今回の実験結果は実用的にも有用と思われるので以下に報告する．

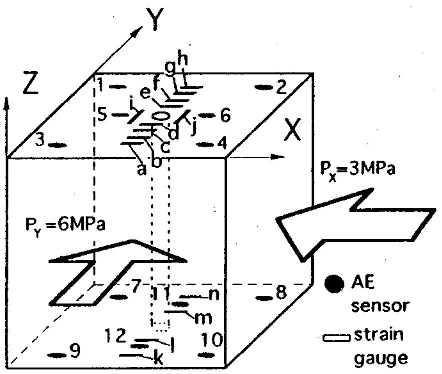
２．実験方法

(1) 供試体と供試体の破砕方法

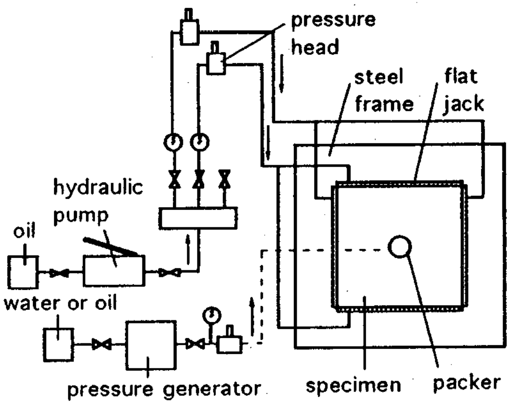
実験には，粘度 1cP の水と粘度 80cP の油を用いた(cP（センチホアズ）は粘度の実用単位であり，$1cP=1\times10^{-2}dyn\cdot s/cm^2=1\times10^{-3}Pa\cdot s$ である）．供試体は一辺 19cm の黒髪島花崗岩の立方体である．**図－1** に示すように座標系を定めた場合，水を破砕流体とする実験に用いた供試体の P 波速度は，X，Y，Z の３方向がそれぞれ 4.93，5.14，5.20km/s であった．また，油を破砕流体とする実験に用いた供試体の P 波速度は，X，Y，Z の３方向がそれぞれ 4.93，5.21，5.28km/s であった．直径 2cm の水圧破砕孔を，供試体の中心に，P 波速度が最大の Z 方向に削孔した．

供試体への拘束圧の載荷は**図－2** に示すように，岩石供試体を反力枠の中に入れ，供試体と反力枠の間にフラット･ジャッキを挿入することにより行った．X 方向に 3MPa，Y 方向に 6MPa の拘束圧を加え，実験はこの２軸応力状態の下で実施した．破砕孔の内圧の加圧には，水と油のいずれの場合にも，**図－3** に示すダブル･パッカーを用い，プレッシャー･ジェネレイターで，１分間当り約 $10cm^3$ の流量で加圧した．プレッシャー･ジェネレイターは，流量は小さいが圧力の脈動が小さく，安定した加圧ができる点に特徴がある．

いずれの実験においても，破砕実験終了後，供試体表面の亀裂を観察するとともに，破砕孔を中心として，直径 7cm のオーバー･コアリングを行い，破砕孔周辺の亀裂の発生を観察した．



図－1 供試体の載荷状態及び供試体に設置したAEセンサーとひずみゲージの位置

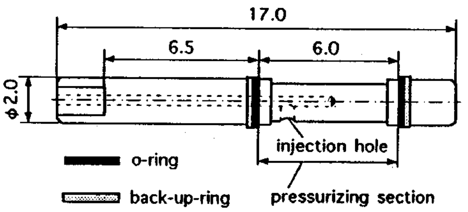


図－2 実験装置の模式図

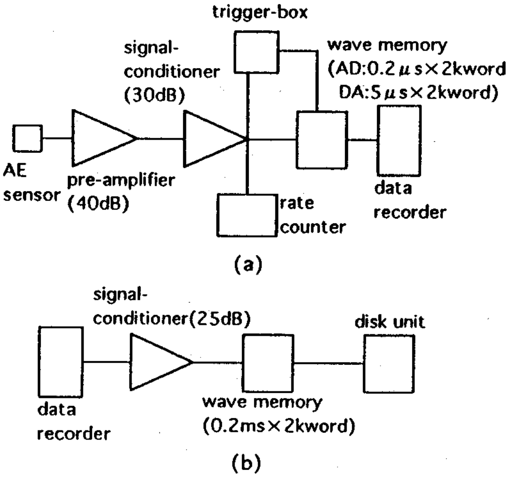
(2) 圧力及びひずみの測定方法

破砕孔の内圧の加圧は圧力計を目視で確認しながら，プレッシャー･ジェネレイターで行った．圧力値はプレッシャー･ジェネレイターとパッカーの間に設置した圧力変換器で検出し，それを自動デジタルひずみ測定器で４秒おきに A/D 変換し，コンピューターに収録した．また，ハンド･ポンプで加圧後，管路を閉じて一定圧に保った X，Y2 方向のフラット･ジャッキの圧力の変動も，同様の方法で測定した．

供試体の亀裂の発生を，供試体表面のひずみ変化から検出するため，供試体の上下面にひずみゲージを貼付した．**図－1** に示したように，供試体の上面には，亀裂に発生が予想される最大拘束圧方向の Y 方向に破砕孔の中心から両側へ 1.5cm 間隔で４枚ずつ，これに直交する最小拘束圧方向の X 方向に破砕孔の中心から 1.5cm の位置に１枚ずつ合計 10 枚を貼付した．供試体の下面には，Y 方向に破砕孔の中心から両側へ 3.0cm 間隔で２枚ずつ，合計４枚を貼



図－3 実験に用いたダブル・パッカー (単位：cm)



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

付した．ひずみゲージはゲージ長 10mm の単軸ゲージ（東京測器研究所，TYPE FLA－10－11）であり，測定成分はいずれも破砕孔の円周方向である．また，水圧破砕の際に亀裂面からしみでる水または油によって，ひずみゲージが浸水し測定値が不安定になることを防ぐため，コーティング剤を使用してひずみゲージを防水，防油した．ひずみの測定値は，自動デジタルひずみ測定器（東京測器研究所製，TDS－301，ASW－30A）で 4 秒おきに A/D 変換して，コンピューターに収録した．

(3) ＡＥの測定方法

水圧破砕では，主要な亀裂が数秒で進展し，この間に数百個の AE が発生して供試体の破断に至る．そこで，AE データの収録は 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・レコーダーに収録する方法をとることにした．このためデータ解析に際しては，データ・レコーダーから波形を再生する必要があり，図－4 に示すよう収録用システムと別に再生用システムが必要となった．

収録用システムは図－4(a)に示すようであり，供試体の上下面に設置した 12 個の AE センサー（図－1 参照）で受振した信号をプリアンプで 40dB，シグナル・コンディショナーで 30dB，合計 70dB 増幅した．これを波形記憶装置で 0.2 μs のサンプリング・タイムで A/D 変換した後，ただちに 5 μs のサンプリング・タイムで D/A 変換して，FM 方式のアナログ・データ・レコーダーに記録した．この操作により，現象を 5 μs/0.2 μs＝25 倍に引き伸ばしたことになる．用いた AE センサーの共振周波数は 150kHz であり，たとえばこの共振点でとらえられた 150kHz の波動は，この操作で 6kHz の波動となる．なお,データ・レコーダーの測定帯域は収録に使用したテープ速度 76cm/s で DC～20kHz である．

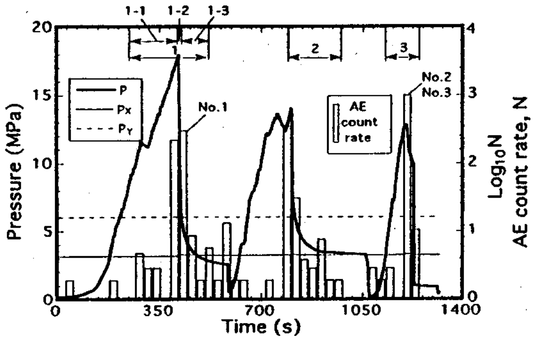
A/D 変換と D/A 変換を行った波形記憶装置は 12 チャンネルで，各チャンネル毎に分解能 8 ビット，記録長 2048word の性能を有する．プレトリガーはできるだけ多くのチャンネルで初動が読み取るよう記録長の 1/2 に設定して使用した．波形記憶装置へのトリガーには，3 チャンネル OR 論理のトリガー論理ボックスを用い，図－1 の 1,6,10 いずれか 1 つのセンサーで一定レベル以上の振幅を感知すると波形記憶装置にトリガーがかかるように設定した．なお，同時にレート・カウンタを用いて，AE の発生数を記録した．

再生用システムを図－4(b)に示す．実験終了後，テープ速度 76cm/s で収録したデータをテープ速度を 1/64 に低下させ 1.2cm/s で再生した．収録時に，A/D, D/A 変換により 25 倍に引き伸ばしているからトータルで実現象を 25×64＝1600 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 0.2ms で A/D 変換し，フロッピー・ディスクに収録した．再生用システムに用いたシグナル・コンディショナーと波形記憶装置は，収録用システムに用いたそれらと異なる低周波数用仕様のものである．なお，ここで，述べた AE の測定方法は，すでに報告した実験[8]と同じである．

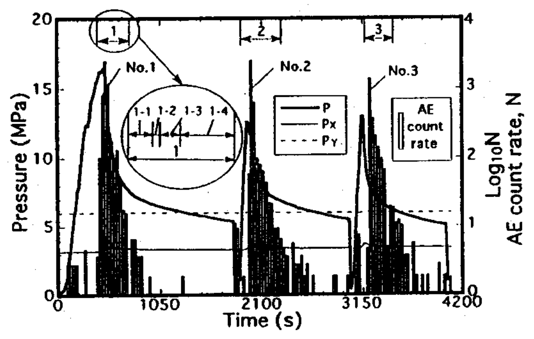
3．実験結果

(1) 圧力とＡＥ発生頻度の経時変化

圧力と AE 発生頻度の経時変化を図－5 に示す．図－5(a)は破砕流体が水の場合，図－5(b)は破砕流体が油の場合である．これらの図で縦軸は圧力と AE の発生頻度，横軸は経過時間を示す．図中，太い実線は破砕孔に作用する流体圧 P を，細い実線 P_X と細い破線 P_Y は，供試体の X 方向と Y 方向にそれぞれフラット・ジャッキで作用させた拘束圧を示す．棒グラフは 30 秒毎の AE 発生頻度である．図－5(b)の



(a) 破砕流体が水の場合



(b) 破砕流体が油の場合

図－5 圧力及び AE 発生頻度の経時変化(No.1, No.2, No.3 は図－15, 16 に示したメカニズム解を求めた AE イベントの発生時刻を示す)

横軸は図－5(a)の横軸の 3 倍のスケールとなっている．これは，後に述べるように，油の場合，水の場合に比べて破砕圧発生後の圧力の低下が極めて遅く，試験に長い時間を要したためである．

図－5(a)(b)の両図とも，破砕孔に作用する流体圧の増大中にしばしば一時的な圧力の低下がみられる．これは，加圧に用いたプレッシャー・ジェネレイターの容量が小さく，一定量の送水の後に破砕流体（水または油）の補充が必要になること，また，AE をデータ・レコーダーに収録しているため，5 分 30 秒毎にテープの交換が必要になり，これらのためしばしば加圧を中断したためである．また，流体圧の加圧曲線がかならずしも滑らかでないのは，圧力計を目視しながら，手動でプレッシャー・ジェネレイターを操作して加圧したためである．いずれの実験の場合も，破壊が発生して圧力が低下し始めると，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た．圧力の低下の収束を確認した後，圧力回路を開いて再度加圧し，これを繰り返し，図に示したように 3 回目の圧力低下が収束したところで実験を打切った．以下では，加圧開始から圧力低下を経て次の加圧開始の直前までを 1 回の加圧サイクルと考え，1 回目の加圧，2 回目の加圧，3 回目の加圧などとよぶ．また，1 回目の加圧時の最高圧を 1 次破砕圧 (Breakdown Pressure)，2 回目，3 回目の加圧時の最高圧を 2 次破砕圧 (Secondary Breakdown Pressure)とよび，両者を特に区別しない場合は単に破砕圧とよぶことにする．

図－5(a)の水の場合をみると，1 回目の加圧においては 17.9MPa の 1 次破砕圧を示した後，内圧が急激に低下した．後で示すように，亀裂は破砕孔から Y 方向に進展している．したがって，圧力系が完全に閉回路で亀裂の進展が供試体内部で止まっておりかつ供試体内への流体の浸透がなければ，低下した圧力は X 方向の拘束圧 Px に漸近するはずである．しかし，圧力は拘束圧 Px を下回っていることがわかる．この実験のために何度か予備実験を行ったが，その際，水を破砕流体に用いた実験では亀裂が O－リング部分を越えて生じることがあり，破砕に伴って水がパッカーから漏れ出すのがしばしば観察された．圧力が Px を下回ったのは，このパッカーからの漏水か，亀裂が供試体表面まで進展したため，あるいは供試体内部への水の浸透のためではないかと思われる．2 回目の加圧では 14.0MPa の破砕圧を，3 回目の加圧では 12.8MPa の破砕圧を示している．1 回目と 2 回目の最大圧の差 3.9MPa は，供試体岩石の引張強度に対応し，3 回目の破砕圧が 2 回目の破砕圧より小さいのは，2 回目の破砕で水の流路となる亀裂が増大したためではないかと思われる．棒グラフは，12 個の AE センサーのうち，図－1 の 1,6,10 番のいずれかひとつのセンサーで検知された AE をカウントしたものであり，30 秒ごとの頻度を対数で示している．なおこのカウントは，合計で 70dB 増幅した AE 信号に対しディスクリ・レベル 1.2V を設定し，イベント計数法で計数した．AE は，3 回の加圧のいずれの場合でも，破砕圧付近で集中的に発生しており，この時期は他の時期の 100 倍程度の頻度になっていることがわかる．

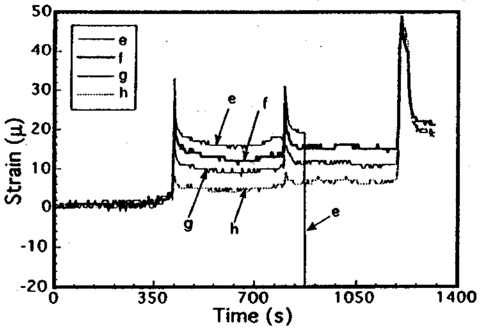
図－5(b)で，油を破砕流体とした場合の結果を見ると，1 回目の加圧においては，16.5MPa の 1 次破砕圧を，2 回目と 3 回目の加圧においては，それぞれ 12.4，12.9MPa の 2 次破砕圧を示した．これらの 1 次破砕圧，2 次破砕圧は水の場合の 1 次破砕圧 17.9MPa，2 次破砕圧 14.0MPa，12.8MPa と大きく違わない．Schmitt and Zoback [10]は，ガラスと花崗岩に対する実験結果から，従来の水圧破砕の破砕条件式を検討し，浸透性の低い岩盤の場合には間隙圧が小さくなるため，破砕圧が大きくなると報告している．今回の実験の場合供試体は同じ花崗岩であ

るが，粘性が大きい油では浸透性が低いため，水に比べて破砕圧が大きくなるのではないかと予測された．しかし，上述のように破砕圧の大きさには顕著な違いは認められなかった．また，これらの破砕圧の発生に伴って AE が集中的に発生している点も水の場合と同じである．一方，水の場合に比べて，大きな違いは内圧が一定値に低下するのに長時間を要している点である．図－5(b)は図－5(a)に比べて，横軸を 3 倍して示している点に注意されたい．水の場合には，数秒で Y 方向の拘束圧 P_Y を下回り，50～100s 程度で X 方向の拘束圧 P_X に漸近した．これに対し，油の場合には P_Y を下回るのにさえ 400～800s 程度がかかり，P_X に近づくにはさらに長時間を要する傾向が明らかである．いずれの実験においても，破砕圧の発生が認められるとただちに圧力回路を閉鎖しており，破砕圧が発生した後の圧力回路の閉鎖方法に相違はない．また，亀裂の発生方向も水の場合と同じである．したがって，この圧力低下の傾向の違いは，水と油の粘性の違いによるものと思われる．すなわち，粘性の大きい油の場合，水に比べて浸透性が低く流動速度も小さいため，発生した亀裂内へ浸入しにくいと思われる．なお，水の場合には破砕時に破砕流体が破砕孔から漏れだす現象が頻繁に見られたが，油の場合にはこのような現象が見られることが少なかった．これは，破砕流体の粘性が大きい場合には，O リングによる密閉効果が有効に表れるためと思われた．このことからも，発生した亀裂内へ流体の浸入挙動が，流体の粘性の違いにより異なることが推測された．

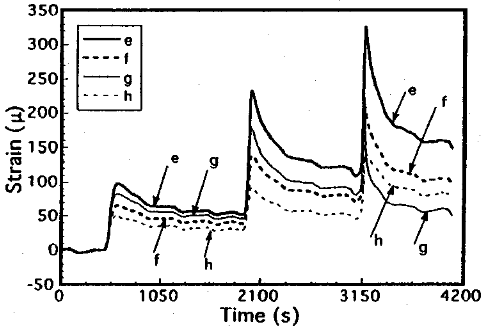
再び図－5 で，破砕圧の発生に伴う X 方向の拘束圧 P_X の変化を見ると，水の場合にはほとんど変化がないのに対し，油の場合には 0.3～0.5MPa の増大がみられる．これは，粘性の高い油が Y 方向に生じた亀裂内に侵入する場合には，亀裂が大きく開口し，供試体が X 方向に膨張してフラット･ジャッキを押し戻しフラット･ジャッキの圧力が増大するためと思われる．このことは水の場合に発生する亀裂よりも，油の場合に発生する亀裂のほうが亀裂幅が大きいことを示唆している．

(2) 供試体表面のひずみの経時変化

今回の実験では，供試体の上下面にひずみゲージを貼付し，ひずみの変化を計測した．後に述べるように，水を用いた破砕においても油を用いた破砕においても，亀裂は破砕孔から最大拘束圧方向である Y 方向に進展した．そこで，ここでは破砕孔から Y 軸の＋方向に亀裂をまたぐように供試体の上面に貼付した 4 枚のひずみゲージ e,f,g,h（図－1 参照）の測定結果を，水と油の場合で比較する．



(a) 破砕流体が水の場合



(b) 破砕流体が油の場合

図－6 供試体表面一部ひずみの経時変化

図－6(a)は，水を用いた破砕におけるこれらのひずみの測定結果である．ひずみの測定結果の 3 回のピークは，3 回の破砕圧の発生，より厳密にいえば 3 回の圧力の急激な低下に伴う亀裂の発生あるいは拡大に対応している．測定値はいずれも引張ひずみを示し，その大きさは，e,f,g,h の順である．これは破砕孔に近い順であり，発生した亀裂の幅が破砕孔に近いほど大きかったと考えれば合理的である．e ゲージは 2 回目のピークを示した後，圧縮側に振り切れている．これは亀裂の発生によりゲージ位置まで水が浸透し，ゲージの抵抗値が低下したためではないかと思われる．

図－6(b)は，油を用いた場合の測定結果である．この図は水を用いた場合の図－6(a)と比較して，横軸は 3 倍，縦軸は 7 倍のスケールで示している．測定値はいずれも引張ひずみを示し，その大きさは 1 回目の破砕圧発生後 3 回目の破砕圧の発生前までは e,g,f,h の順，3 回目の破砕圧発生後は e,f,h,g の順である．破砕孔に近い順に e,f,g,h の順であるから，前半では,f と g，後半では h と g の順序が入れ替わっているが，概ね破砕孔に近い順である．ひずみの測定結果の 3 回のピーク値は，1 回目より 2 回目，2

回目よりは3回目と，徐々に大きくなっている．これは，3回の破砕で亀裂の幅が徐々に大きくなっていったことを示していると思われる．

2つの実験で測定された引張ひずみの大きさを3回のピーク値で比較すると，油の場合の方が水の場合に比べて3～7倍の大きな値を示している．例えば，1回目のピークでいずれの場合においても最大値を示しているeゲージの測定結果を比較すると，水の場合には33 μ程度の値を示しているのに対して，油の場合には，約100 μと水の場合の3倍の値を示している．3回目のピークで比較すると，水の場合には，f,g,hの3つのゲージが45～50 μ程度の値を示しているのに対し，油の場合は，最大のeゲージで約330 μ，最小のhゲージで約140 μと3倍から7倍の値を示している．このことは，油を用いて破砕した場合に生じた亀裂は水を用いた場合に生じた亀裂よりも，亀裂幅が大きかったことを示していると思われる．

なお，ここに示したe,f,g,hゲージと破砕孔に関して180° 対称の位置に貼付したa,b,c,dゲージの測定結果は，必ずしも上述のような傾向を示していない．これは，油の場合には，亀裂がこれらのゲージを貼付した側に進展しなかったためと思われるが，水の場合にはこれらのゲージの側にも亀裂が進展しており，その原因はよくわからない．

(3) ＡＥ震源の空間分布

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，センサー数（データ数）6以上，走時残差の標準偏差が3 μs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[8]と同じである．

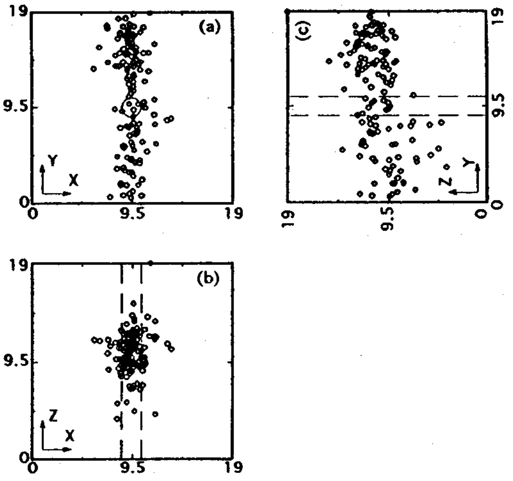
水を破砕流体に用いた実験で，震源決定されたAE数は139個であった．これらの震源のX―Y，X―Z，Y―Zの平面への投影図を図―7に示す．左上のX―Y平面図を見ると，AE震源は破砕孔からY方向に供試体の両端まで直線的に分布していることがわかる．また，X―Z平面図とY―Z平面図より，AE震源のZ座標は4.0cm～14.0cmの間に分布しており，これはZ座標で6.5cm～12.5cmに位置するダブル・パッカーの加圧区間にほぼ対応する．したがって，AE震源の空間分布より，この水圧破砕で造成された亀裂は，破砕孔の加圧区間から最大拘束圧の方向に平面的に成長したといえる．このことは，従来の水圧破砕理論から考えられる亀裂発生の方向と一致している．実験後に観察した供試体表面の亀裂，および破砕孔を中心にオーバー・コアリングして取り出したコアの表面で観察した亀裂のスケッチを**図―8**に示す．この結果を**図―7**のAE震源の空間分布と比較すると両者はよい一致を示していることがわかる．

油を破砕流体に用いた実験で，震源決定された218個のAEの震源の投影図を**図―9**に示す．左上のX―Y平面図を見ると，AE震源は水の場合と同様に最大拘束圧方向に分布していることが分かる．X―ZとY―Z平面図より，AE震源は破砕孔を中心に供試体の上下の端面の近くまで，Z軸方向にやや広く分布していることがわかる．**図―10**にこの実験の亀裂の観察結果を示す．**図―10**を**図―8**と比較すると，水の場合には亀裂が上端面にのみ達しているのに対し，油の場合には上下端面の両方に達しているのがわかる．油の場合，水の場合に比べてAE震源がZ軸方向にやや広く分布する傾向があるのはこのためと思われる．いずれにしろ，油の場合にも，水の場合と同様，従来の水圧破砕理論と矛盾することなく，亀裂は破砕孔から最大拘束圧方向に平面的に成長したことがわかる．なお，これらの亀裂の肉眼観察で，油の場合の亀裂は幅が大きく明瞭であったのに対し，水の場合の亀裂は細く不明瞭であり，注意してみないと識別が困難であった．

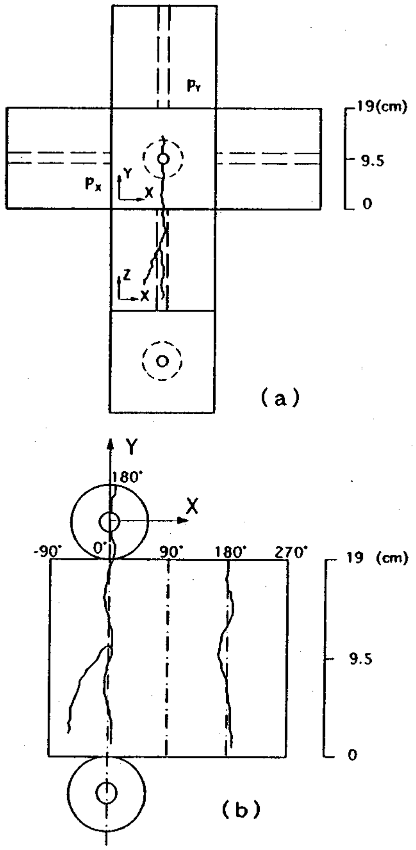
(4) ＡＥ震源分布の経時変化

次に，水の場合の3回の加圧に伴う亀裂の進展状況を検討するため，各加圧サイクルにおけるAE震源のX―Y平面への投影図を**図―11**に示す．なお，3回の加圧に伴うAE震源数はそれぞれ41個，26個，72個であり各図に示したAEの発生時期を**図―5**に矢印と数字で示した．**図―11**より，1回目と2回目の加圧ではAEは破砕孔からみてY軸のマイナス方向で発生し，亀裂がこの方向に進展したことがわかる．しかし，3回目の加圧では，AEはY軸のプラス方向で発生し，亀裂は1回目，2回目とは逆方向に進展したことがわかる．

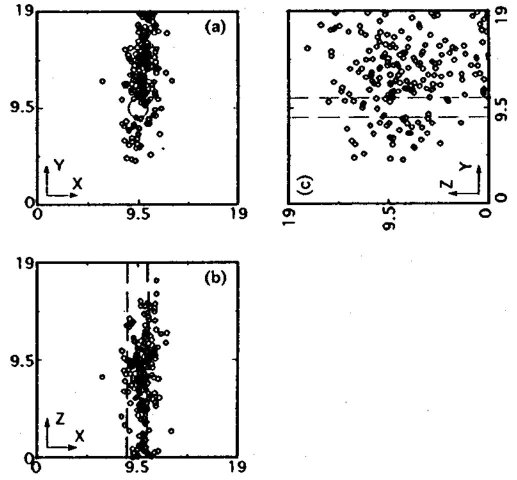
さらに，この1回目の加圧に伴って発生したAEの震源41個を震源数が13または14個ずつになるように，発生時間順に3つにわけて図を**図―12(a)**，(b)，(c)に示す．この1回目の加圧を細分化した3つの段階をそれぞれ1―1，1―2，1―3段階と呼ぶことにする．これらの時間区分と圧力―間曲線との関係も，**図―5**に示している．1回目の加圧でAEの震源は全体としてはY軸のマイナス方向に分布したわけであるが，さらにこれを詳細にみると，震源は1―1段階では，Y軸のプラス方向に分布し，1―2，1



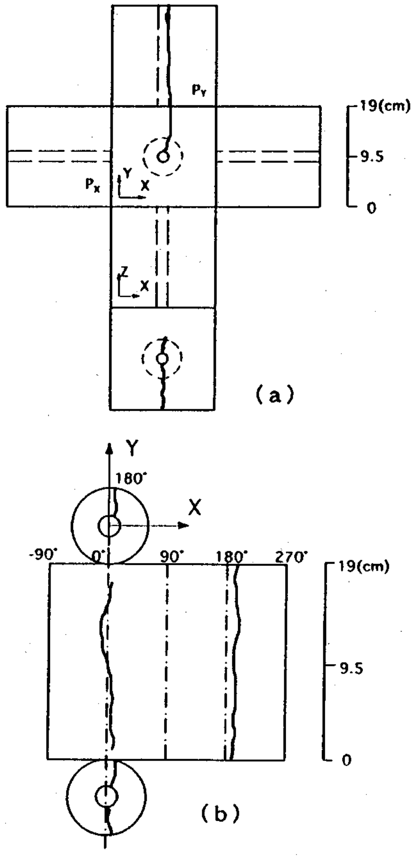
図—7 水を破砕流体に用いた実験で発生した AE 震源の空間分布 (a) XY 平面図 (b) XZ 断面図 (c) YZ 断面図．破線は破砕孔を示す



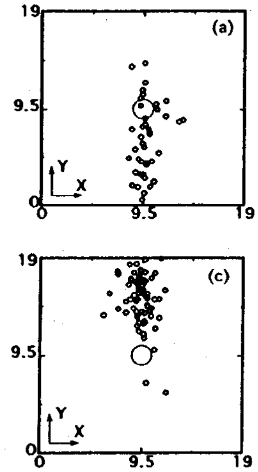
図—8 水を破砕流体に用いた実験で発生した可視亀裂のスケッチ (展開図) (a) 供試体表面での観察結果 (破線の円はオーバー・コアリングの位置を示す) (b) オーバー・コアリングしたコアの表面での観察結果



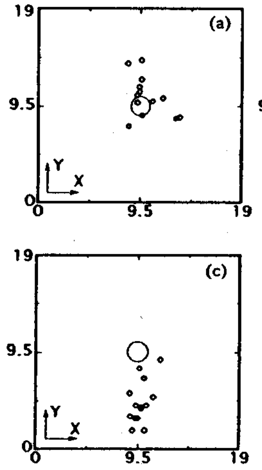
図—9 油を破砕流体に用いた実験で発生した AE 震源の空間分布 (a) XY 平面図 (b) XZ 断面図 (c) YZ 断面図．破線は破砕孔を示す



図—10 油を破砕流体に用いた実験で発生した可視亀裂のスケッチ (展開図) (a) 供試体表面での観察結果 (破線の円はオーバー・コアリングの位置を示す) (b) オーバー・コアリングしたコアの表面での観察結果



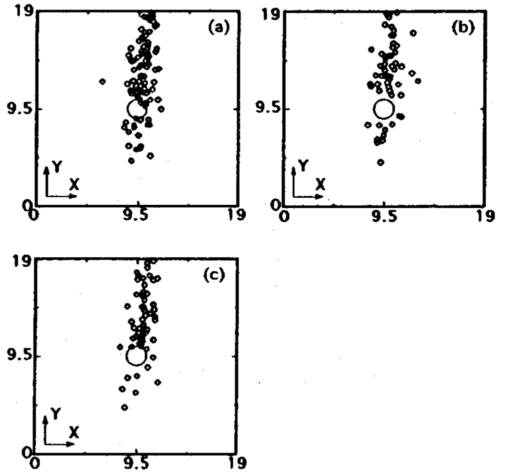
図－11 水を破砕流体に用いた実験で発生したAE震源の各加圧サイクル毎の平面分布（XY 平面図）(a) 1回目加圧（発生時間254～512 s） (b) 2回目加圧（発生時間801～938 s） (c) 3回目加圧（発生時間1122～1234 s）



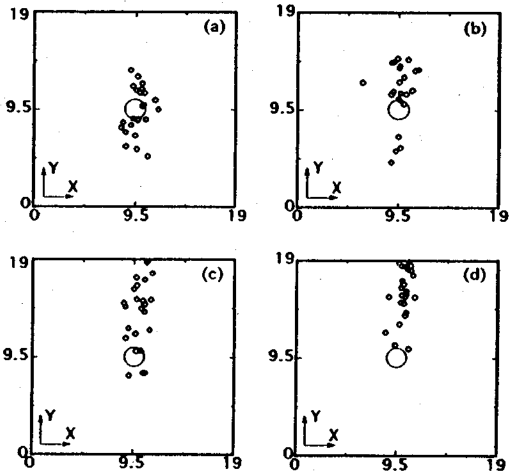
図－12 図－11の(a) 図（1回目の加圧）のAE震源を発生時間に従ってさらに3分割して示した XY 平面図 (a) 1－1段階（発生時間254～416 s）(b) 1－2段階（発生時間417～423 s） (c) 1－3段階（発生時間424～512 s）

－3段階では逆にY軸のマイナス方向へ分布することが分る．同様の傾向は，2回目の加圧においてもみられたが，3回目の加圧ではみられなかった．

一方，油の場合の3回加圧に伴うAE震源のX－Y平面への投影図を図－13に示す．各加圧時の震源数はそれぞれ98個，60個，60個である．この図より，3回の加圧に伴う震源はいずれも概ね破砕孔の



図－13 油を破砕流体に用いた実験で発生したAE震源の各加圧サイクル毎の平面分布（XY 平面図）(a) 1回目加圧（発生時間416～708 s） (b) 2回目加圧（発生時間1962～2278 s） (c) 3回目加圧（発生時間3224～3442 s）



図－14 図－13の (a) 図 (1回目の加圧) のAE震源を発生時間に従ってさらに4分割して示したXY平面図 (a) 1－1段階 (発生時間416～471 s) (b) 1－2段階 (発生時間472～482 s) (c) 1－3段階 (発生時間483～528 s) (d) 1－4段階 (発生時間529～708 s)

周辺からY軸のプラス方向へ分布することが分る．すなわち，水の場合には，3回の加圧サイクル毎に亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向がみられたのに対し，油の場合は最初の加圧の際に発生したのと同じ方向に2回目，3回目の加圧時にも亀裂が発生したといえる．

さらに，1回目の加圧に伴って発生した98個の

AE 震源を，水の場合と同様に発生時間順に震源数が 24 または 25 個ずつになるように，1—1，1—2，1—3，1—4 の 4 段階に分け，**図—14(a)**，(b)，(c)，(d)に示す．震源は 1—1 段階では，破砕孔の周辺に分布し，1—2 段階では破砕孔から Y 軸のプラス方向に分布し始め，1—3 段階では破砕孔から供試体の Y のプラス側の端部まで広く広がり，1—4 段階では破砕孔側よりむしろ供試体の Y のプラス側の端部に震源が集中している．この震源分布は，加圧初期に破砕孔周辺の Y 方向のプラス側，マイナス側の両側に亀裂が進展しかけた後，1—2 段階に入って亀裂の進展が Y 方向のプラス側に偏り，時間とともに 1—3，1—4 段階と亀裂が逐次的に供試体の端部まで進展していったとみることができる．このように亀裂が一方向に進展する傾向は，2 回目，3 回目の加圧においても同じようにみられた．

以上のことから，3 回の加圧サイクル毎にみても，それぞれの 1 回の加圧サイクルを経時的に細分化してみても，水の場合には亀裂の進展方向が逆転する傾向がみられたのに対し，粘性の高い油の場合には一定方向に亀裂が進展していく傾向がみられたといえる．

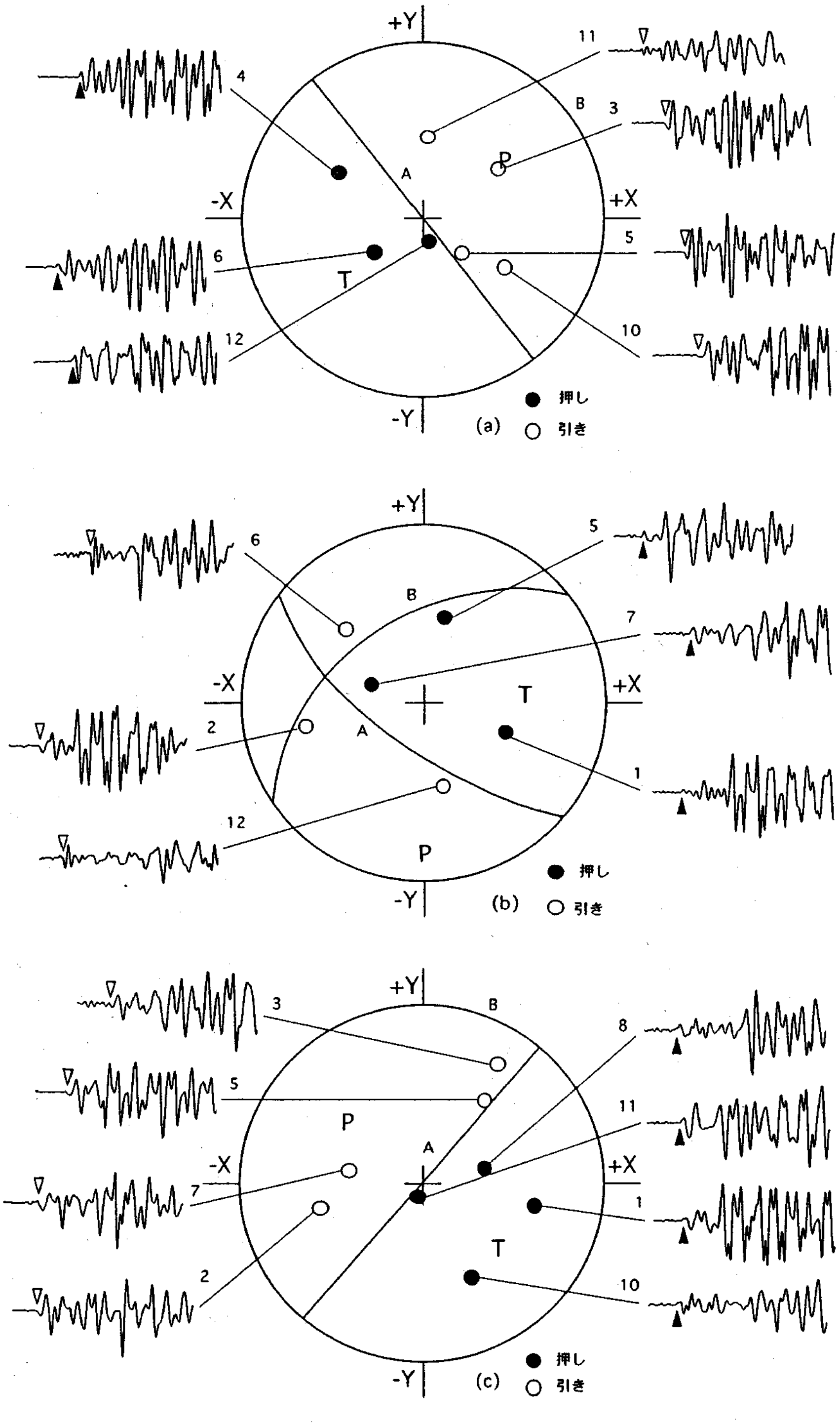
(5) ＡＥのメカニズム解

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，せん断型の破壊の場合，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により水圧破砕による AE の発生メカニズムを推定することができる[12]．そこで，このメカニズム解を求めて，破砕流体が水と油で AE の発生メカニズムが異なるかどうかの検討を試みることにした．なお，今回の実験では初動の押し引きの極性を明瞭に読み取れる AE データは少なく，6 チャンネル以上で，初動極性が読み取れる AE イベントはそれぞれの実験で各 10 個程度であった．

図—15 に破砕流体に水を用いた場合のメカニズム解の例を示す．これらは，図—5(a)の棒グラフに番号を付して示したように，1 回目と 3 回目の加圧に伴い発生した AE イベントである．**図—15** の●印は P 波初動が押し波の観測点，○印は引き波の観測点を示す．各観測点毎にセンサー番号と観測波形を示した．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．初動が押し波であるか引き波であるかは，実験前に縦 30cm × 横 20cm，厚さ 2cm の板状花崗岩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は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．●（押し波）と○（引き波）の分布を区切る図上の二本の曲線（**図—15**(a)及び(c)の場合は，円と円の中心を通る直線）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．**図—15** の各図に示した 6〜7 点の測定データでは，節面の選び方は必ずしも 1 通りに定まらず，いくつかの可能性があるが，ここでは，それぞれの図に示した節面を選んだ．それぞれの AE イベント毎に 2 つの節面が選ばれており，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実在の破壊面に対応する[12]．しかし，いずれが実在の破壊面かは，P 波初動の押し引き分布からだけでは決定できない．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—15 に示したメカニズム解のうち(a)(b)の 2 つについては，すでに文献 8)の**図—12** に示し，詳細な検討を行っている．また，本論文で新たに示した**図—15**(c)のメカニズム解は，P 軸，T 軸の方向が Y 軸に関して対称の位置にあるだけで基本的に**図—15**(a)のメカニズム解と同じである．これらのいずれの例においても，震源を取り囲む球面上で，押し波と引き波を受感したセンサーの位置が 4 象限型の分布を示していること，すなわち，いずれのメカニズム解もせん断型の破壊を示していることがわかる．巨視的な亀裂面は破砕孔から Y 軸の負の方向に進展した YZ 面に平行な平面であるが，AE の発生を伴う個々の微細な破壊面は，必ずしもこの巨視的な破壊面と一致せず，多少の角度を有するのが普通である．このことは，巨視的な岩石の破壊面が，滑らかな平面ではなく角度の異なる微細ないくつもの平面で構成されたぎざぎざした面であることからもわかる．このことを考慮すれば，**図—15** に示した 3 つのメカニズム解の節面や P 軸，T 軸の方向は，巨視的な破壊面の方向や供試体の載荷方向と若干ずれているものの，概ね合理的と思われる．

図—16 は，破砕流体に油を用いた場合の P 波初動

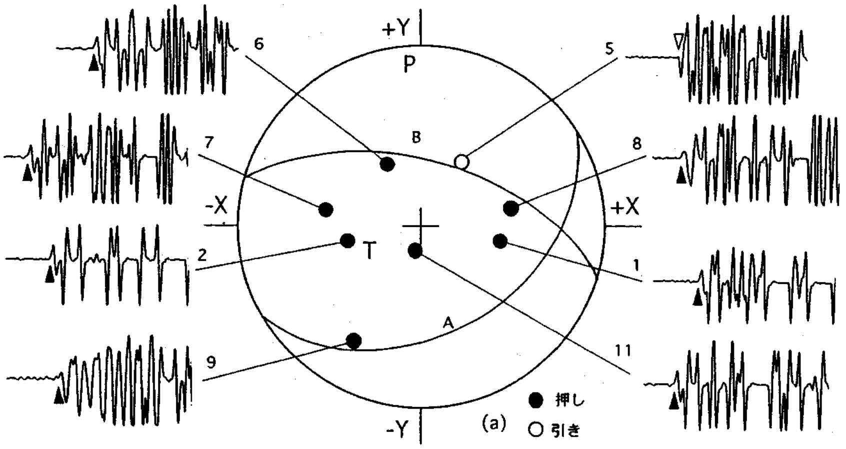


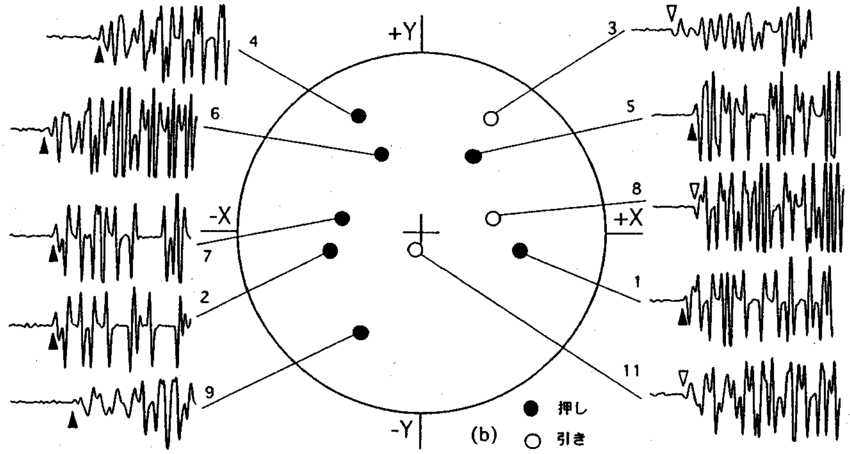
図－15 水を破砕流体に用いた実験で発生したAEのメカニズム解（シュミットネット下半球投影）

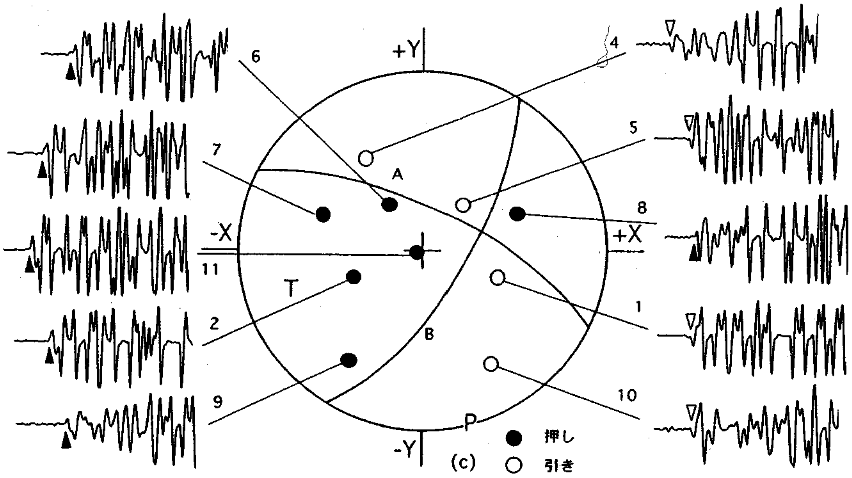
(a) No.1 震源（発生時間 424.92 s，震源座標 X=10.33, Y=4.27, Z=10.99 cm）

(b) No.2 震源（発生時間 1207.92 s，震源座標 X=9.16, Y=15.58, Z=11.44 cm）

(c) No.3 震源（発生時間 1209.04 s，震源座標 X=10.00, Y=15.46, Z=12.43 cm）







図−16 油を破砕流体に用いた実験で発生したAEのP波初動の極性分布（シュミットネット下半球投影）

(a) No.1 震源（発生時間 474.68 s，震源座標 X=11.43, Y=13.39, Z=7.64 cm）

(b) No.2 震源（発生時間 1992.37 s，震源座標 X=10.16, Y=16.64, Z=11.70 cm）

(c) No.3 震源（発生時間 3230.37 s，震源座標 X=10.31, Y=13.87, Z=6.54 cm）

の極性分布の例である．これらのAEイベントは図−5(b)の棒グラフに番号を付して示したように，いずれも3回の加圧サイクルの破砕圧の発生直後に発生したものである．図から明らかなように，P波初動の極性は押し波と引き波が混在するが，水と場合と比べると，いずれのイベントにおいても押し波の観測点が多い．

まず，**図−16**の(a)に示したNo.1イベントの場合，観測波形の初動はいずれもその極性が比較的明瞭であり，引き波を示す下向きのトレースはセンサーNo.5だけであることがわかる．このP波初動の押し引き分布に対してメカニズム解を求めると，図に示した解を得ることができる．供試体の載荷状態は，X方向3MPa，Y方向6MPaで，紙面に垂直なZ方向は無載荷であるから，P軸は最大拘束圧のY方向，T軸は無載荷のZ方向（図の円の中心に対応する）と予測される．**図−16**(a)のP軸とT軸の方向は，概ねこれらの方向に一致しており，この点については概ね妥当と思われる．しかし，2つの節面の走向はいずれもX方向に近く，実際の巨視的な亀裂が破砕孔からY軸の正の方向に進展したYZ面に平行な平面であることと矛盾している．したがって，初動の極性分布が4象限型の分布を示す，すなわち，このAEイベントが，このメカニズム解で示されたせん断型の破壊に伴って発生したと考えることは無理があるように思われる．

図−16(b)では，センサーNo.6と9で観測波形の初動の極性がやや不明瞭であるが，センサーNo.3，No.8および11の3個のセンサーでは引き波が，他の4個のセンサーでは押し波が観測された．この初動の押し引き分布に対して，4象限型の分布を前提とした通常のメカニズム解を求めることは困難である．したがって，このAEイベントは通常のせん断型の破壊では説明できない．

図−16(c)では，観測波形の初動極性が比較的明瞭であり，押し波が6個のセンサーで観測されているのに対し，引き波も4個のセンサーで観測されていることがわかる．この極性分布に対して求めたメカニズム解のP軸の方向は供試体に6MPaの最大拘束圧を載荷したY方向，T軸の方向は3MPaの拘束圧を載荷したX方向に近い．油による破砕孔への加圧はZ軸方向に長い円筒面になされ，巨視的な亀裂はY方向の鉛直面に沿って進展しているから，T軸がZ方向ではなくX方向にあることは必ずしも不合理ではない．また，Bで示した節面の走向・傾斜は実際に巨視的な亀裂が生じたY方向の鉛直面に近いから，2つの節面のうちこれを実際の破砕面と考えればこの点でも合理的である．したがってこのAEイベントは，他の2つのイベントと異なり，水を破砕流体として用いた場合と同じく通常のせん断型の破壊に伴って発生したと考えることができる．

以上のことから，水より粘性の高い油を破砕流体として用いた場合，水の場合と同じせん断型の破壊も生じるが，押し波のP波初動が多くのセンサーで観測されるせん断型で説明できない破壊が生じることも多いといえる．引張破壊の場合には，全センサーで押し波のP波初動が観測される[13]ため，粘性の高い油の場合，マグマの貫入による火山性地震[14),15)]の場合と同様引張破壊の成分が多く含まれた破壊が多いのではないかと思われる．

4．考察

(1) 造成された亀裂の幅の比較

破砕流体に水を用いた場合と油を用いた場合を比較すると，油の場合の方が造成された亀裂の幅が大きい．実験後，供試体の表面及び破砕孔を中心にオーバー・コアリングして取り出したコアの表面で亀裂を観察したが，水の場合の亀裂は細く不明瞭であり，注意してみないと識別が困難であるのに対し，油の場合の亀裂は幅が大きく明瞭であった．

また，破砕圧の発生に伴うX方向の拘束圧Pxの変化を見ると，水の場合にはほとんどど変化がないのに対し，油の場合には0.3〜0.5MPa増大がみられた．これは，Y方向に生じた亀裂内に粘性の高い油が侵入する場合には，亀裂が大きく開口し，供試体がX方向に膨張してフラット・ジャッキを押し戻し，フラット・ジャッキの圧力が増大するためと思われた．

また，供試体の上面に亀裂をまたぐように貼付した4枚のひずみゲージの測定結果を比較すると，測定値はいずれの実験でも引張ひずみを示し，その大きさは破砕孔に近いほど大きく，測定されたひずみの大きさをピーク値で比較すると，油の場合の方が水の場合のに比べて3〜7倍の大きな値を示した．

このように，亀裂の肉眼観察の結果，破砕圧の発生に伴うX方向の拘束圧の変化，供試体の上面に亀裂をまたぐように貼付したひずみゲージの測定結果のいずれもが，破砕流体に油を用いた場合に生じた亀裂の方が，水を用いた場合に生じた亀裂よりも，亀裂幅が大きかったことを示した．

(2) 亀裂の進展挙動の比較

AE震源の空間分布を見ると，水の場合，1回目と2回目の加圧では，破砕孔からみてY軸のマイナス方向でAEが発生し，3回目の加圧では逆にY軸のプラス方向で発生した．つぎに1回目の加圧サイク

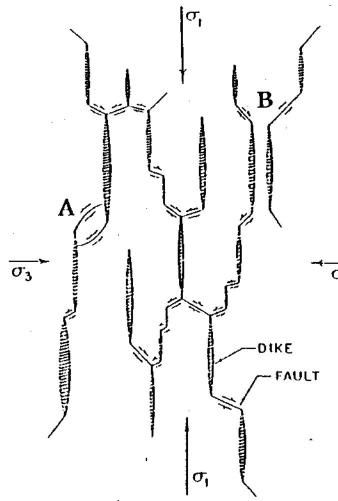
ルのAE震源分布だけを取り出し,これを時間的に3段階に区分してみると,最初はY軸のプラス方向に震源が分布し,その後の2つの段階では発生方向が反転しY軸のマイナス方向に分布した.同様の傾向は,2回目の加圧においてもみられたが,3回目の加圧ではみられなかった.このように,水の場合には亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向がみられたのに対し,油の場合には3回の加圧サイクル毎にみても,それぞれの加圧サイクルを経時的に細分化してみても,一方向に安定的に亀裂が進展する傾向がみられた.

今回の実験では,水の場合も油の場合も,予備実験は数回ずつ行ったが,AEデータの詳細な解析を行ったのは本論文に示したそれぞれ1例だけである.したがって,同一条件の実験を繰り返し行った場合,常に同じ結果が生じるとは断言できず,供試体によって結果がばらつく可能性がある.しかし,3回の加圧サイクルの比較だけではなく,それぞれの加圧サイクルを経時的に細分化してみても共通した傾向がみられたことから,破砕流体が水の場合には油の場合に比べて,亀裂の進展方向が組織に敏感に変化する不安定な傾向が強いことは確かだと思われる.

このような違いが生じる原因として,次のことが推測される.すなわち,供試体に用いた花崗岩は,長石,石英,雲母などの造岩鉱物からなり,これらの造岩鉱物の粒子間にはもちろん,粒子内にも多数の微細な割れ目が存在する.一方前節で述べたように,亀裂の肉眼観察や拘束圧の変化,ひずみゲージの測定結果は,いずれも,破砕流体に油を用いた場合の亀裂の方が水を用いた場合の亀裂より,亀裂幅が大きいことを示した.これらのことから,粘性が小さく,浸透しやすい水で亀裂を造成する場合,亀裂の進展の過程において供試体中の微細な割れ目でその進展方向が変化しやすいのに対し,粘性が大きく浸透しにくい油の場合,開口幅の大きな亀裂が造成されるだけでなく,亀裂進展の過程においても微細な割れ目の影響が少なく亀裂が安定的に進展するのではないかと思われた.

(3) ＡＥのメカニズム解の比較

P波初動の押し引き分布に基づくAEのメカニズム解を求めたところ,破砕流体に水を用いた場合には,せん断破壊で説明できる4象限型のメカニズム解がほとんどであった.これに対し,破砕流体に油を用いた場合には,4象限型のメカニズム解とともに,大半のセンサーで押し波が観測されるせん断破壊で説明できない押し引き分布も頻繁に観測された.引張破壊の場合には全センサーで押し波が観測されるため,粘性の大きな油の場合,引張破壊の成分が多く含まれた破壊が多いのではないかと思われた.



図－17 最大圧縮主応力σ_1と最小圧縮主応力 σ_3の下にあると共役断層の模式図. Hill (1977) [19]による

ところで,火山でのマグマの貫入は,マグマを破砕流体とした大規模な水圧破砕とみなすことができる[16].粘性係数の小さな玄武岩質のマグマでも水に比べて5桁程度も大きい粘性を有する[17].このようなマグマの貫入・噴出に伴う地震活動では,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とともに,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が多数観測されている[18].そこで今回の実験に伴う亀裂の進展を,佐々木・石田ら[6]にならって,マグマの貫入に伴う亀裂の進展モデルを用いて考察を試みる.

図－17は火山近傍で発生する群発地震に対して提案されたHill[19]のモデルである.このモデルによれば,火山地域で多数存在する弱面のうち,最大圧縮(σ_1)方向に配列する弱面に沿ってマグマが貫入し,引張破壊により岩脈を形成する.また,**図－17**のA,Bに示すこれらの岩脈の端部周辺で岩脈の端をつなぐ形で共役のせん断破壊が生じ,その際に地震が発生する.

マグマの貫入や現場の水圧破砕では,地殻応力の最大圧縮方向に亀裂が進展する傾向が明らかである[16].この亀裂の進展方向は,外圧の作用する2次元弾性体中の円孔の内壁に静水圧が作用したモデルで,円孔内壁から引張亀裂が生じると考えると合理的に説明できる(Kirschの解[20]または文献21)参照).そして,この引張破壊の発生に基づいて,水圧破砕による亀裂発生時の内圧と亀裂の方向から地殻応力あるいは岩盤内の応力を求める方法が開発され,

さかんに利用されている[21),22)]. しかし,いままで野外での水圧破砕実験で観測されたAEのほとんどは4象限型の押し引き分布を示し,破壊がせん断で生じていることを示している[2)-5)]. この水圧破砕の破壊メカニズムの矛盾は, 上述のHillのモデルで合理的に説明できるように思われる. 今回の水を用いた破砕実験でもこの破壊メカニズムの矛盾は同じであるが, 供試体に用いた花崗岩に含まれる微細な既存亀裂や鉱物粒子の境界面などをHillのモデルの弱面に対応させれば, この矛盾も全く同様に説明できる.

さて, 引張破壊に伴うAEが, 粘性の低い水の場合には観測されず, 粘性の高い油の場合にだけ観測されるのは, なぜであろうか. 粘性の低い水の場合にも, 雁行状の亀裂の開口や引張破壊が生じているはずである. しかしこの場合は, 亀裂の開口や引張破壊に伴う体積変化が小さく, 弾性論的にみれば引張モードに起因して放出される波動エネルギーが小さいのではないだろうか. これに対し, 粘性の高い油が岩盤中の弱面に浸入した場合, 今回の実験における亀裂の幅の比較からも明らかなように, 水の場合よりも大きな体積変化を伴う亀裂の開口もしくは引張破壊が生じるのではないかと思われる. 弾性体中で大きな体積変化が生じれば, それによって放出される波動エネルギーも大きくなるため, 油の場合には引張型のAEが観測されたのではないかと思われる.

なお, すでに報告した破砕流体を用いないウレタン・スリーブによる破砕では, 水を破砕流体に用いた場合と同様引張型のAEは観測されず, 4象限型の押し引き分布を示すせん断型のAEが観測された[8)]. しかしこれはマグマの貫入を考えた上述のHillのモデルではなく, 火山活動とは無関係な通常の地震がほとんどすべてdouble couple型の震源モデル, すなわち, せん断破壊で説明可能なことに対応すると思われる. 要約して述べれば, 破砕流体を用いない力学的な破砕では通常の地震と同様せん断型のAEが卓越し, 粘性の低い水を用いた破砕では, 火山性地震に対するHillのモデルにおいて岩脈の端をつなぐ形の破壊で説明されるせん断型のAEが卓越し, 粘性の高い油を用いた破砕では, Hillのモデルにおける岩脈に大きな体積変化を伴う亀裂の開口もしくは引張破壊を生じるため, 引張型のAEが観測されると思われる.

(4) 破砕流体の粘性変化による水圧破砕亀裂制御の可能性について

上に述べた考察(3)の結果をまとめると, 1cP程度の粘性の通常の水を破砕流体に用いた場合, 破砕流体は岩石内部の微細な既存の弱面に浸入し, 最大圧縮方向にほぼ平行な方向に配列する弱面を選択的に開口させながら, これらの既存亀裂をつなぐ形でせん断破壊を生じさせるといえる. これに対し, 80cPの大きな粘性を有する油を破砕流体に用いた場合, 破砕流体は岩石内部の比較的開口幅の大きな既存の弱面に侵入し, これを引張破壊させながら最大圧縮方向に進展させると思われる. また考察(1)および(2)で述べたように, 破砕流体に水を用いた場合, 亀裂の進展方向はしばしば変化する傾向があり造成される亀裂の幅が小さいのに対し, 油の場合には亀裂の進展方向は一定し亀裂の幅が大きいことが, 実験の結果からわかったといえる.

これらの実験結果および考察結果から, 現実の高温岩体の地熱貯留層の造成への応用を考えると, 次のようなことがいえる. すなわち, 高温の岩盤内に亀裂幅の小さな微細な割れ目を網の目状に多数造成して熱交換面積を拡大したい場合には, 粘性の小さな水を用いて破砕を行う. 一方注水井と生産井の通水性の増大など, 亀裂幅が大きく平面的な亀裂を造成したい場合には粘性の大きな流体を用いて破砕を行うのが望ましい. このように考えると, 一定の地熱抽出の後, 流量は変化しないが回収熱水の温度が低下してきた場合には粘性の低い流体を用いて亀裂の追加造成を行い貯留層を刺激する. 一方回収熱水の温度はあまり低下していないが流量が低下してきた場合には, 粘性の大きな流体を用いて破砕を行い, 通水性改善するなどの方法が考えられよう.

すでに, イギリスのCamborne School of Minesの高温岩体プロジェクトでは, 通水性を改善するため, 2300m深度で50cPの粘性流体を用いて亀裂の造成を行っている[2),9)]. したがって, 破砕流体の粘性を変化させて岩盤を破砕することは, 現実の高温岩体においても可能と思われ, このような方法で, 地熱貯留層に造成する亀裂を制御することは実用的にも有用ではないかと思われる. しかし実用化のためには, 環境に悪影響を及ぼさずかつ操作が容易な粘性流体の開発や, それを注入するのための特別なポンプの設計など, 実務的な面からの研究開発も必要と思われる. また, 岩盤内の亀裂の寸法と破砕流体の粘性の大きさの関係やボアホール径の影響, あるいは高温下や地圧の作用下での破砕流体の粘性の変化や岩盤の破壊挙動の変化なども明らかにする必要があると思われ, これは今後の課題である.

5. まとめ

高温岩体発電では, 熱抽出のために高圧の水を圧

入して地下の岩盤内に人工亀裂を造成する．この人工亀裂の合理的な造成のためには，人工亀裂面の評価とその生成メカニズムの解明，さらには亀裂の生成の制御法の開発が重要である．そこで，粘度 1cP の水と粘度 80cP の油を破砕流体に用いて，花崗岩供試体の破砕実験を行い，AE や圧力，ひずみなどを測定して，亀裂の性状と亀裂の生成メカニズムを比較検討した．その結果，以下のことがわかった．

(1)　亀裂の肉眼観察の結果，亀裂の発生に伴う拘束圧の変化，供試体の表面に亀裂をまたぐように貼付したひずみゲージの測定結果のいずれもが，破砕流体に油を用いた場合に生じた亀裂の方が，水を用いた場合に生じた亀裂よりも，亀裂の幅が大きいことを示した．

(2)　3回の加圧サイクル毎の震源分布および1回の加圧サイクルを経時的に細分化した震源分布を詳細に検討したところ，水の場合には亀裂の進展方向が不安定に変化する傾向があるのに対し，油の場合には一定方向に安定的に亀裂が進展していく傾向があることがわかった．粘性が小さく浸透しやすい水で亀裂を造成する場合，亀裂の進展の過程において供試体中の既存の微細な割れ目でその進展方向が変化しやすいのに対し，粘性が大きく浸透しにくい油の場合，微細な割れ目の影響が少なく亀裂が安定的に進展するのではないかと思われた．

(3)　P 波初動の押し引き分布に基づく AE のメカニズム解を求めたところ，水の場合にはせん断破壊で説明できる4象限型のメカニズム解がほとんどであったのに対し，油の場合には，4象限型のメカニズム解とともに，大半のセンサーで押し波が観測されるせん断破壊で説明できない押し引き分布も頻繁に観測された．引張破壊の場合には，全センサーで押し波が観測されるため，粘性の大きな油の場合，マグマの貫入による火山性地震の場合と同様，引張破壊の成分が多く含まれた破壊が多いのではないかと思われた．

(4)　以上の現象を火山性の群発地震に対して提案された Hill のモデルを用いて考察すれば，1cP 程度の粘性の通常の水を破砕流体に用いた場合，破砕流体は岩石内部の微細な既存の弱面に侵入し，最大圧縮方向にほぼ平行な方向に配列する弱面を選択的に開口させながら，これらの既存亀裂をつなぐ形でせん断破壊を生じさせると思われる．これに対し，80cP の大きな粘性を有する油を破砕流体に用いた場合，破砕流体は岩石内部の比較的開口幅の大きな既存の弱面に侵入し，これを引張破壊させながら最大圧縮方向に進展させると思われる．

(5)　造成された亀裂の幅，亀裂の進展挙動，測定された AE のメカニズム解の比較などから，現実の高温岩体の地熱貯留層の造成への応用を考えると，次のことがいえる．すなわち，回収熱水の温度が低下してきた場合には，粘性の低い流体を用いて亀裂幅の小さな微細な割れ目を網の目状に多数造成して，熱交換面積を拡大する．一方，注入水量に対して生産井からの回収水量が少ない場合には，粘性の大きな流体で破砕を行い，注入井と生産井を直結する厚さの大きい単一の板状亀裂を造成すればよいと思われる．

(6)　実用化のためには，環境に悪影響を及ぼさずかつ操作が容易な粘性流体の開発や，それを注入するのための特別なポンプの設計など，実務的な面からの研究開発も必要と思われる．また，岩盤内の亀裂の寸法と破砕流体の粘性の大きさの関係やボアホール径の影響，あるいは高温下や地圧の作用下での破砕流体の粘性の変化や岩盤の破壊挙動の変化なども明らかにする必要があると思われ，これは今後の課題である．

謝辞：（財）電力中央研究所の佐々木俊二氏と通産省工業技術院資源環境技術総合研究所の松永烈氏には，本研究の実施にあたり始終激励と貴重なご助言を賜った．山口大学工学部の佐野修，大西康智の両氏にもさまざまな有益なご助言を賜った．また，実験に際しては，当時山口大学工学部4年生の石井建城君（現在，（株）エイトコンサルタント）と佐藤正憲君（現在，大林道路（株））の協力を得た．ここに記して，深く感謝の意を表する．

参考文献

1)　厨川道雄：高温岩体開発の現状，サンシャインジャーナル 1989, Vol.10, No.1, pp.7-17, 1989.

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, 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*, Vol.14, No.3, pp.227-230, 1987.

6) 佐々木俊二，松永烈，小林秀男，石田毅：高温岩体発電のための岩盤破砕評価技術の開発－－AEから推定される水圧破砕の破壊メカニズム－－，電力中央研究所報告・研究報告，No.U88034, 1988.

7) 佐々木俊二，松永烈，小林秀男，石田毅：高温岩体発電のための岩盤破砕評価技術の開発－－水圧破砕に伴うAEと破壊メカニズムに及ぼす岩石の粒径と破砕流体の粘性効果－－，電力中央研究所報告・研究報告，No.U91008，1991.

8) 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.

9) Baria, R., Green, A.S.P. and Jones, R.H.: Anomalous seismic events observed at the CSM HDR project, U.K., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.26, No.3/4, pp.257-269, 1989.

10) Schmitt.,D.R. and Zoback.M.D.: Infiltration effects in the tensile rupture of thin walled cylinders of glass and granite: Implications for the hydraulic fracturing breakdown equation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.30, No.3, pp.289-303, 1993.

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，鹿島出版社，1983.

13) Walter, W.R. and Brune, J.M.: Spectra of seismic radiation from a tensile crack, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, No.B3, pp.4449-4459, 1993.

14) Julian, B.R.:Evidence for dyke intrusion earthquake mechanisms near Long Valley caldera, California, *Nature*, Vol.303, pp.323-325, 1983.

15) Aki, K. and Fehler, M. and Das, S.: Source mechanism of volcanic tremor: Fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol.2, pp.259-287, 1977.

16) 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.

17) 国立天文台編：理科年表(1995年度版)，p.764，丸善，pp.1046，1994.

18) 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.

19) Hill, D.P.: A model for earthquake swarms, *Journal of Geophysical Research*, Vol.82, No.8, pp.1347-1352, 1977.

20) Timoshenko, S.,P. and Goodier, J.,N.: Theory of Elasticity (Third Edition), pp.90-93, McGraw-Hill Kogakusha, pp.567, 1970.

21) Haimson, B.C.: The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, No.4, pp.167-178, 1978.

22) Mizuta, Y., Sano, O., Ogino, S. and Katoh, H.: Three dimensional stress determination by hydraulic fracturing for underground excavation design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.24, No.1, pp.15-29, 1987.

(1995. 11. 27 受付)

EFFECTS OF FLUID VISCOSITY IN HYDRAULIC FRACTURING DEDUCED FROM ACOUSTIC EMISSION MONITORING

Tsuyoshi ISHIDA, Qu CHEN and Yoshiaki MIZUTA

By employing a 19 cm cubic granite specimen with a 2 cm diameter hole, hydraulic fracturing experiments are conducted to clarify the viscous effect of fracturing fluid. The viscosity is varied by 1 cP water and 80 cP oil. The fractures are measured by acoustic emission, pressure and strain. It is elucidated that viscous oil tends to create thick and plane cracks with few branches, while water tends to generate thin and wavelike cracks with many branches of a network. This suggests a possibility to control the fracture patterns by changing viscosity of fracturing fluid in the hydraulic fracturing.